



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
INSTITUTO DE ENERGÍAS RENOVABLES  
CAMPO DE CONOCIMIENTO: ENERGÍA –  
CAMPO DISCIPLINARIO: SISTEMAS ENERGÉTICOS

ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE JATROPHA CURCAS COMO BIOCOMBUSTIBLE: CASO  
DE ESTUDIO MORELOS

**TESIS**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:  
ING. OSCAR SÁNCHEZ SANTILLÁN

TUTOR PRINCIPAL:  
DR. MANUEL MARTÍNEZ FERNÁNDEZ  
INSTITUTO DE ENERGÍAS RENOVABLES

TEMIXCO, MORELOS. FEBRERO 2017



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: DR. PATHIYAMATTOM JOSEPH SEBASTIAN

Secretario: DR. EDUARDO BÁRZANA GARCÍA

Vocal: DR. MANUEL MARTÍNEZ FERNÁNDEZ

1<sup>er.</sup> Suplente: DRA. CLAUDIA TOMASINI MONTENEGRO

2<sup>do.</sup> Suplente: DR. CARLOS A. GARCÍA BUSTAMANTE

INSTITUTO DE ENERGÍAS RENOVABLES - UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE  
MÉXICO. TEMIXCO, MORELOS, MÉXICO.

**TUTOR DE TESIS: DR. MANUEL MARTÍNEZ FERNÁNDEZ**

NOMBRE

-----

**FIRMA**

**A todas las personas que buscan cada día  
hacer del mundo un lugar mejor.**

**No importan los sentimientos, pensamientos  
o creencias: lo que importa son las acciones  
realizadas a partir de estos.**

## Agradecimientos

Especialmente a mi madre. Todas las cosas buenas que he hecho durante mi vida, y las que haga a partir de ahora, han sido y serán en gran medida gracias a ella.

A Carlos mi hermano, por su constante apoyo incondicional y por compartir conmigo su pasión por la ciencia. A mi abuelo Varo por transmitir a todas y todos, incluyéndome, su excepcional alegría de vivir. A mi tía Pina por su cariño y sus atenciones. A César por su compañerismo, afecto y lealtad. A Mónica por todo lo que hemos compartido.

A mis tías y tíos Mago, Tito, Ana, Memo, Elisa, Rosa, Armando, Norma, Gina, Fili y Gabi por siempre estar ahí. A mis primas y primos Emili, Memo, Fabián, Jorge, Fernando, Alejandra, Alejandro, Luis Carlos, Beto, Ruy, Daniela, Gina y David por ser mis mejores amigos.

A mi asesor, el doctor Manuel Martínez por todo el apoyo que me brindó a lo largo de este proceso, y por preocuparse siempre por mi crecimiento académico, profesional y personal. A la doctora Claudia Tomasini por cruzar la línea e interesarse más de lo debido en mi trabajo. A todos los profesores del IER por lo aprendido dentro y fuera de las aulas.

A mis amigos y compañeros por todas las pláticas que enriquecieron el trabajo.

Al Instituto de Energías Renovables y a la Universidad Nacional Autónoma de México por propiciar la generación y divulgación de ciencia, cultura y civilidad.

Finalmente, al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por otorgarme la beca mediante la cual pude concluir este proyecto de investigación.

## Contenido

Agradecimientos.....	ii
Contenido .....	iii
1 Introducción.....	1
1.1 Visión energética de México y el mundo .....	1
1.2 Biocombustibles .....	4
1.2.1 Biomasa .....	4
1.2.2 Biocombustibles .....	5
1.2.3 Biodiesel .....	6
1.2.3.1 Extracción de aceite .....	7
• Extracción mecánica.....	7
• Extracción química.....	7
1.2.3.2 Transesterificación .....	8
• Temperatura del aceite.....	8
• Temperatura de la reacción.....	8
• Relación de alcohol y aceite .....	9
• Tipo y concentración de catalizador.....	9
• Intensidad del mezclado .....	9
• Pureza del aceite vegetal.....	9
2 Producción y políticas públicas sobre biocombustibles por país .....	11
2.1 Producción de biocombustibles por país .....	11
2.2 Políticas de uso de biocombustibles por país .....	12
2.2.1 Unión Europea (UE).....	12
2.2.2 Continente Americano.....	14
2.2.2.1 Estados Unidos.....	15
2.2.2.2 Canadá.....	16
2.2.2.3 Brasil .....	17
2.2.2.4 Argentina.....	18
2.2.2.5 México.....	19
2.3 Jatropha.....	24

3	Formulación del problema.....	26
3.1	Transporte y biocombustibles.....	26
3.2	Situación a resolver .....	26
3.3	Objetivos.....	32
4	Análisis de ciclo de vida.....	34
4.1	Descripción general .....	34
4.1.1	Meta y alcance del estudio.....	34
4.1.2	Análisis de inventario .....	35
4.1.3	Evaluación de impacto.....	35
4.1.4	Interpretación.....	35
4.2	Análisis de ciclo de Vida en México .....	36
4.3	Software.....	37
4.3.1	Recursos .....	39
4.3.2	Tecnología .....	39
4.3.3	Proceso .....	40
4.3.4	Rutas .....	42
5	Metodología.....	44
5.1	Meta y alcance .....	44
5.1.1	Descripción y función del sistema referencia.....	46
5.1.2	Límites del sistema .....	46
5.1.3	Unidad funcional .....	47
5.1.4	Categorías de impacto y metodología de evaluación .....	47
5.1.5	Consideraciones.....	48
5.1.5.1	Instalaciones de producción .....	49
5.1.5.2	Fertilización de jatropha.....	49
5.1.5.3	Plantación de jatropha .....	50
5.1.5.4	Extracción de aceite .....	51
5.1.5.5	Producción del biodiesel .....	51
5.1.5.6	Pesticidas e insecticidas .....	51
5.1.5.7	Transporte.....	52
5.1.5.8	Electricidad.....	52

5.1.5.9	Pasta de semillas.....	52
5.1.5.10	Glicerina.....	53
5.1.6	Limitaciones .....	53
5.1.7	Audiencia a la que está dirigido el estudio .....	53
5.2	Análisis de inventario .....	54
5.2.1	Fuentes de información del sistema primario y secundario .....	54
5.2.2	Plantación de jatropha .....	55
5.2.3	Extracción de aceite.....	56
5.2.4	Producción del biodiesel.....	57
6	Resultados.....	59
6.1	Consumo de energía .....	60
6.2	Emisiones de GEI.....	63
6.3	Validación de resultados.....	65
6.3.1	Sistemas de producción .....	65
6.3.1.1	Prueksakorn & Gheewala (2006).....	65
6.3.1.2	Ndong et al. (2009).....	66
6.3.1.3	Achten et al. (2010).....	66
6.3.1.4	Kumar et al. (2012).....	67
6.3.1.5	Portugal-Pereira et al. (2016).....	68
6.3.2	Análisis de los resultados obtenidos de la revisión literaria.....	69
6.4	Análisis de sensibilidad .....	73
6.4.1	Fertilización mineral.....	74
6.4.2	Transesterificación eficiente.....	78
6.4.3	Recuperación de productos.....	80
7	Mitigación en las emisiones de GEI por políticas de uso obligatorio de biodiesel.....	84
7.1	Consumo de diesel y plantación de jatropha .....	85
7.2	Emisiones de GEI en combustibles .....	85
7.3	Descripción de escenarios .....	87
7.3.1	Escenario de referencia.....	88
7.3.2	Escenario CB-B2 .....	88
7.3.3	Escenario RP-B2 .....	88



7.3.4	Escenario TE-B2.....	89
7.3.5	Escenario FM-B2.....	89
7.3.6	Escenario FM-B5.....	89
7.4	Resultados.....	89
8	Conclusiones.....	92
8.1	Conclusiones globales .....	92
8.2	Conclusiones específicas .....	93
9	Referencias .....	97

# 1 Introducción

## 1.1 Visión energética de México y el mundo

En 2014 el suministro total de energía primaria en el mundo fue de aproximadamente 574 EJ, de los cuales alrededor del 81.1% provenían de recursos no renovables (petróleo, carbón y gas natural) y sólo el 14.1% provenían de recursos renovables (figura 1.1) (IEA 2016). Para el mismo año, el consumo final de energía en el planeta alcanzó los 395 EJ, de los cuales alrededor del 39.7% fueron aportados por productos de petróleo (IEA 2016). Los sectores industrial y transporte fueron responsables de 29.2% y 27.9% en el consumo final de energía respectivamente (figura 1.2) (IEA 2016). En México, la producción de energía primaria generó un total de 8,261 PJ en el año 2015, 6.7% menor con respecto a la producción del año anterior. El país utiliza como principal materia prima los hidrocarburos: el petróleo, los condensados, y el gas natural constituyen 61.3%, 1.2% y 24.7% respectivamente de la estructura porcentual en la matriz energética nacional. Mientras, el carbón aporta el 3.5% y las renovables, incluyendo las grandes hidroeléctricas contribuyen con el 7.9%. La industria nucleoelectrica representa el 1.5% (tabla 1.1 y figura 1.3) (SENER 2016). Si bien México se encuentra dentro de los primeros once países productores de petróleo, y está situado en el lugar 16 de reservas probadas (OPEP 2016), la producción petrolera de 2015 disminuyó 9.5% respecto al valor de 2014, fundamentalmente por la menor producción en el activo Cantarell, que actualmente se encuentra en declinación, y aunque existen otros activos que incrementaron su producción, el decaimiento del mayor activo petrolero no fue compensado. Por otro lado, la nucleoenergía incrementó su producción 19.7%, mientras el carbón y las renovables disminuyeron 5.3% y 2.7% respectivamente para el mismo periodo (SENER 2016).

El consumo final de energía en el sector transporte ha aumentado 2% en promedio desde 2000 y actualmente representa cerca del 28% del consumo energético total (REN21 2016). De los 110 EJ de energía consumidos a nivel mundial por el sector en 2014, 102 EJ fueron generados en base a productos de petróleo (IEA 2016) Debido a esto, el sector transporte fue uno de los sectores que más emisiones de CO<sub>2</sub> generó en el mismo año, aportando el 23% de las emisiones globales del principal Gas de Efecto Invernadero (GEI) (IEA 2016a) (figura 1.4). El sector carretero contribuyó con casi tres cuartas partes de las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas por el transporte, siendo el causante principal de que las emisiones por el sector transporte hayan aumentado 71% desde 1990 (IEA 2016a). A pesar de los esfuerzos para limitar las emisiones internacionales, el transporte aéreo y marítimo, 95% y 69% mayores en 2014 que en 1990 respectivamente, crecieron incluso más rápido que las emisiones generadas por el transporte carretero (IEA 2016a).

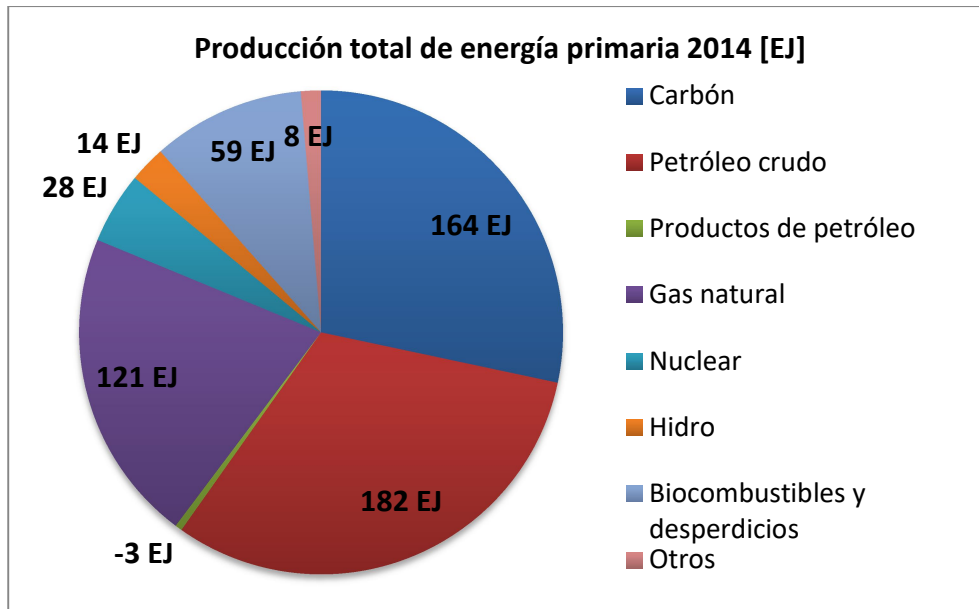


Figura 1.1 Suministro total de energía primaria mundial por energético para el año 2014 [EJ]. Otros incluye: energía geotérmica, solar, eólica; calor; y comercio de electricidad. Fuente IEA 2016.

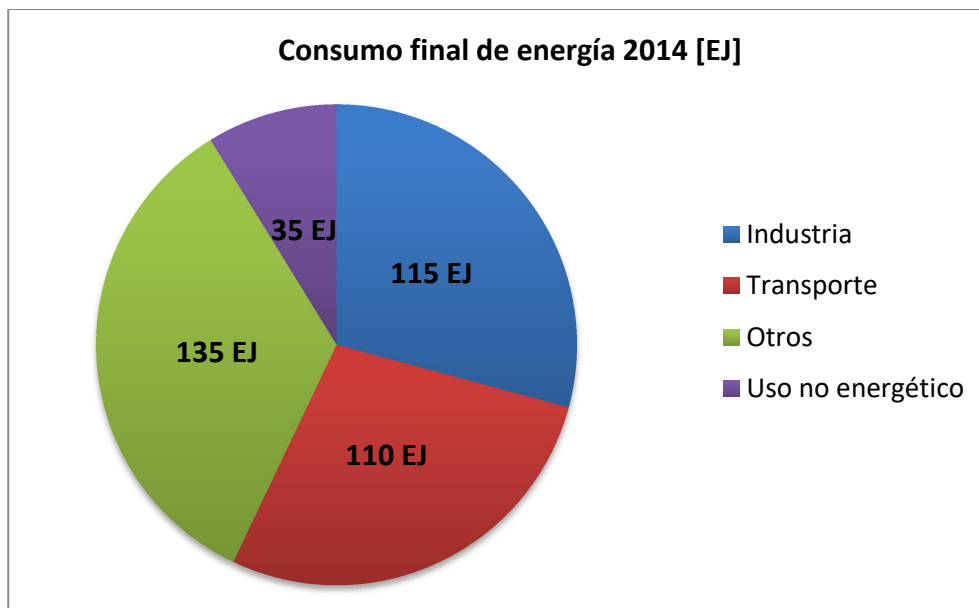


Figura 1.2 Consumo final de energía mundial por sector para el año 2014 [EJ]. Fuente IEA 2016.

Tabla 1.1 Producción de energía primaria mexicana por energético para los años 2014 y 2015. Renovables incluye a las grandes hidroeléctricas. Fuente SENER 2016.

Producción de energía primaria mexicana				
Energético	2014 [PJ]	2015 [PJ]	Variación porcentual 2015/2014 [%]	Estructura porcentual 2015 [%]
Carbón	303.73	287.69	-5.28	3.48
Hidrocarburos	7,782.96	7,203.85	-7.44	87.20
Petróleo crudo	5,597.20	5,067.69	-9.46	61.34
Condensados	106.31	98.83	-7.03	1.20
Gas natural	2,079.45	2,037.33	-2.03	24.66
Nucleoenergía	100.60	120.41	19.69	1.46
Renovables	666.97	649.09	-2.68	7.86
Hidroenergía	140.01	111.21	-20.57	1.35
Geoenergía	129.88	134.53	3.58	1.63
Solar	8.74	10.15	16.23	0.12
Energía eólica	23.13	31.48	36.09	0.38
Biogás	1.93	1.87	-3.01	0.02
Biomasa	363.28	359.84	-0.95	4.36
Bagazo de caña	109.16	107.00	-1.98	1.30
Leña	254.12	252.84	-0.50	3.06
<b>Total</b>	<b>8,854.25</b>	<b>8,261.03</b>	<b>-6.70</b>	<b>100.00</b>

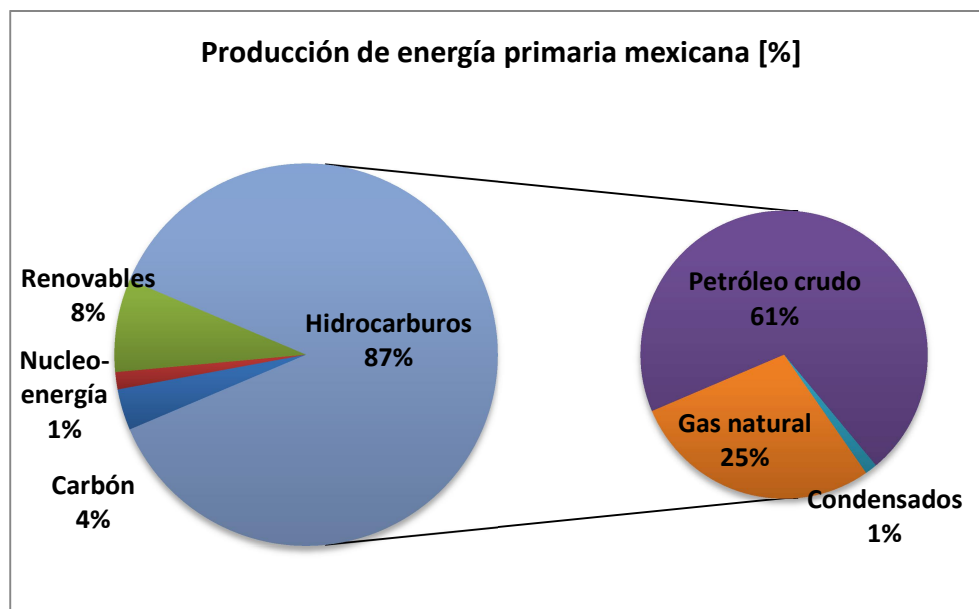


Figura 1.3 Porcentaje de la producción de energía primaria mexicana por fuente para 2015. Fuente SENER 2016.

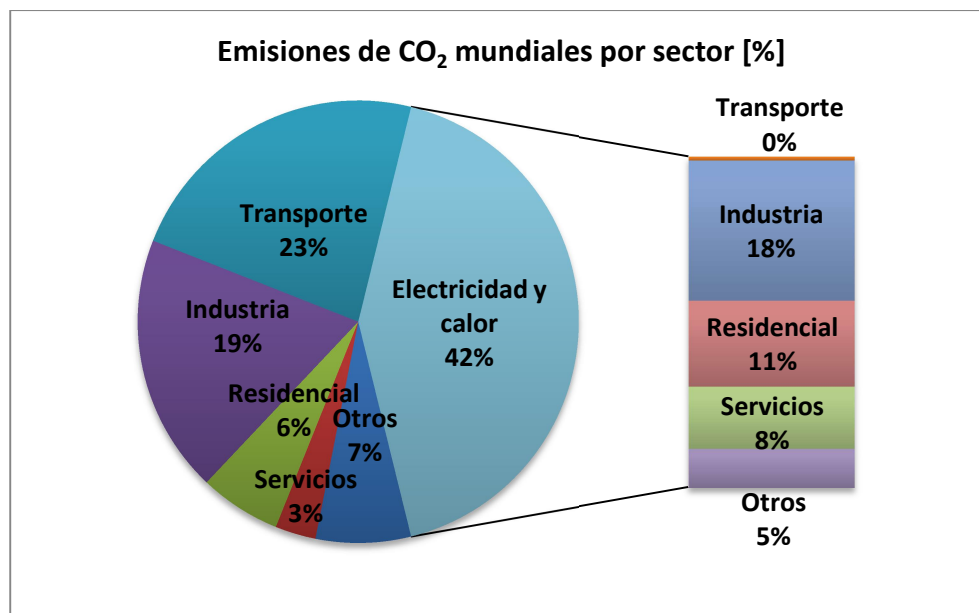


Figura 1.4 Emisiones de CO<sub>2</sub> mundiales por sector para 2014. Otros incluyen agricultura, silvicultura, pesca, energía de las industrias diferentes de electricidad y calor y otras emisiones no especificadas. Fuente IEA 2016a.

El consumo de energía en el sector transporte mexicano en 2015 fue de 2.4 EJ, el cual ha estado aumentando desde 1990, aunque de 2008 a 2015 permaneció más o menos constante (SENER 2016). Las emisiones de GEI (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O, caracterizadas en kg de CO<sub>2</sub>e) generadas debido al transporte contribuyeron con 26.2% de las emisiones de GEI totales por sector del país en el año 2013, de los cuales los vehículos carreteros a gasolina y diesel aportaron el 23.0%. El resto de las emisiones de GEI ocasionadas por el sector fueron a causa de la maquinaria de construcción (0.1%), la maquinaria agrícola (1.4%), el transporte marítimo (0.3%), la aviación (1.1%) y el transporte ferroviario (0.4%) (INECC 2015). En 2014 el sector transporte emitió alrededor de 162 MtCO<sub>2</sub>e, 0.3 MtCO<sub>2</sub>e y 1.9 MtCO<sub>2</sub>e de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O respectivamente. El 89% de las emisiones de CO<sub>2</sub> del transporte se generaron por la utilización de vehículos carreteros a gasolina y diesel, de la misma forma que el 89% y el 53% de las emisiones de CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O respectivamente (INECC 2016).

## 1.2 Biocombustibles

### 1.2.1 Biomasa

La biomasa es toda la materia orgánica renovable de origen vegetal o animal incluyendo los residuos y desechos orgánicos, susceptible de ser aprovechada energéticamente. La energía que se obtiene de la biomasa se denomina bioenergía. Existen tres formas principales mediante las cuáles se puede obtener biomasa: 1) natural, es decir a partir de leña o carbón

vegetal para quemarse directamente o gasificarse para producir electricidad y calor; 2) a partir de cultivos energéticos, como las plantas oleaginosas que tienen la capacidad de generar biodiesel y la caña de azúcar y algunos cereales mediante los cuales puede obtenerse bioetanol; y 3) a partir de estiércol y residuos municipales, agrícolas y forestales con la finalidad de generar combustibles gaseosos como el biogás (Masera et al. 2006).

El utilizar la biomasa de forma sustentable para obtener bioenergía puede ser de gran ayuda para realizar la transición energética de nuestro actual sistema basado en los combustibles fósiles a un sistema integral que contemple varias fuentes de energía, en su mayoría renovables, considerando los impactos ambientales que se generen en el planeta, así como la equidad dentro de la sociedad, pues debido al suministro descentralizado de los combustibles biomásicos, el uso de la bioenergía puede contribuir al desarrollo sustentable creando empleos en el medio rural, y proporcionando nuevas alternativas para la generación de electricidad y calefacción en zonas que no están conectadas a la red del sistema eléctrico nacional (Masera et al. 2006). La bioenergía puede utilizarse en varios sectores: en el sector residencial, sobre todo en medios rurales, para calefacción y preparación de alimentos; en el sector industrial generando calor y energía eléctrica para incluirla en los procesos de producción de bienes y servicios; y en el sector transporte sustituyendo total o parcialmente los combustibles fósiles que se utilizan regularmente en los vehículos con biocombustibles como bioetanol o biodiesel (Masera et al. 2006).

### 1.2.2 Biocombustibles

Un biocombustible es cualquier combustible cuya energía es obtenida a través de fijación de carbono biológica (*Biofuels* 2015). La fijación de carbono es un proceso que toma carbono inorgánico (generalmente en forma de  $\text{CO}_2$ ) para convertirlo en compuestos orgánicos, es decir, un proceso que transforma el dióxido de carbono en moléculas típicamente encontradas en organismos vivos. Cuando la fijación ocurre en un organismo vivo se denomina fijación de carbono biológica (*Biofuels* 2015). En las plantas, la fijación de carbono ocurre durante la fotosíntesis. Un biocombustible es un hidrocarburo generado por o mediante materia orgánica. Esto es, que los biocombustibles pueden producirse por organismos vivos o en laboratorios o instalaciones industriales mediante reacciones químicas utilizando biomasa como materia prima (*Biofuels* 2015). La principal diferencia entre los combustibles fósiles y los biocombustibles es que los segundos se generan en cortos periodos de tiempo (días, semanas, meses o algunos años) mientras los combustibles fósiles necesitan millones de años para formarse.

Los biocombustibles se clasifican en generaciones, determinadas en base a la materia prima mediante la cual el combustible se obtiene. Los biocombustibles de primera generación son los que se producen directamente de cultivos comestibles como maíz, soya, remolacha, caña de azúcar, trigo, y cebada, entre otros. Mientras que los biocombustibles generados a partir de biomasa lignocelulósica agrícola (residuos no comestibles de cultivos

alimenticios) o de la materia orgánica principal de los cultivos no comestibles como jatropha o pastos, son los biocombustibles de segunda generación (Masera et al. 2006). Recientemente, debido a los altos rendimientos que las algas pueden alcanzar con la utilización de menos recursos, algunos autores sugieren que las algas deben clasificarse como la tercera generación de biocombustibles, sin embargo no en toda la literatura se maneja así (*Biofuels* 2015; Masera et al. 2006).

En el sector transporte los biocombustibles que más se utilizan globalmente son biodiesel y bioetanol (REN21 2016). El bioetanol puede producirse a partir de varios cultivos, entre los que se encuentran la caña de azúcar, el maíz, el trigo, la remolacha dulce, y nuevas investigaciones apuntan a producirlo utilizando el desperdicio de la industria tequilera como materia prima (CONACyT 2016). El biodiesel puede generarse a partir de aceites vegetales vírgenes (comestibles y no comestibles), residuos de aceites vegetales reciclados, grasas animales y a partir de fuentes biotecnológicas como lo son las levaduras y las microalgas (Masera et al. 2006).

### 1.2.3 Biodiesel

El biodiesel es un éster metílico producido a partir de aceites vegetales usados o vírgenes (los cuales pueden ser comestibles o no comestibles) y grasas animales (Indian Planning Commission 2003). El biodiesel no contiene petróleo, sin embargo puede ser mezclado a cualquier nivel con diesel de petróleo para crear una mezcla o ser usado puro de la misma forma en que el diesel convencional se utiliza. Debido a que las propiedades físicas y químicas del biodiesel son bastante similares a las del diesel de petróleo, éste puede operar en motores de compresión por ignición con ligeras o ninguna modificación en las máquinas (IPCC 2006; Indian Planning Commission 2003). El biodiesel puede ser contenido de igual manera que el diesel convencional, por lo que no necesita nueva infraestructura para almacenarse (Indian Planning Commission 2003). Utilizar biodiesel en motores de diesel fósil puede reducir considerablemente los hidrocarburos sin quemar, el monóxido de carbono y el material particulado. El biodiesel contiene cerca de 10% de oxígeno integrado lo que le permite quemarse completamente, mientras su contenido de azufre y compuestos aromáticos es prácticamente nulo. Su alto número de cetano mejora la calidad de la ignición incluso cuando se mezcla con diesel de petróleo (Indian Planning Commission 2003).

Como se mencionó en la sección 1.2.2, el biodiesel se obtiene a partir de aceites vegetales o grasas animales. Una de las maneras para producir la materia prima necesaria en la generación de biodiesel es mediante cultivos energéticos. Luego de que se tiene la materia prima, debe extraerse aceite de las frutas o las plantas cultivadas para transformarlo posteriormente en biodiesel. Los procesos de extracción y transesterificación para convertir semillas oleaginosas en biodiesel se describen a continuación.

### 1.2.3.1 Extracción de aceite

Existen dos maneras principales de obtener aceite de semillas oleaginosas: extracción mecánica y extracción química. Las semillas deben secarse antes de extraerles el aceite, ya sea exponiéndolas directamente a la radiación solar o dentro de un horno. Las prensas o extractores mecánicos pueden obtener aceite utilizando la semilla, el grano o una mezcla de ambos, aunque generalmente se utiliza la semilla completa como entrada. Los extractores químicos utilizan solamente los granos. La cascarilla (la cáscara que envuelve al grano) puede utilizarse directamente como combustible o como materia prima para gasificación (Achten et al. 2008).

En lo que se refiere específicamente a *Jatropha*, su tamaño, peso y contenido de aceite dependen de factores genéticos y ambientales. La calidad del aceite que se obtiene se ve influenciado mayormente por condiciones ambientales que por condiciones genéticas. El estado de madurez en el que se encuentran las frutas al ser recolectadas también tiene influencia en la composición del aceite (Achten et al. 2008).

- Extracción mecánica

La extracción de aceite de las semillas por medios mecánicos puede llevarse a cabo mediante un ariete o prensa manual, o a través de un tornillo que preme impulsado por un motor eléctrico. La extracción utilizando dispositivos manuales resulta en extracciones que varían entre 60% y 65 %, mientras que los extractores eléctricos alcanzan eficiencias entre 75% y 80%. Usualmente se realizan tres fases de extracción. La eficiencia en la extracción de aceite, utilizando un dispositivo eléctrico, puede aumentar hasta 89% y 91% con una y dos pasadas respectivamente, si la semilla recibe un tratamiento previo. Cocinar la semilla es una práctica de pre tratamiento común (Achten et al. 2008).

- Extracción química

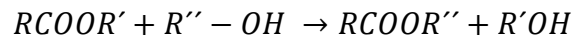
Existen varios métodos de extracción química. El método n-hexano es el que presenta mayor rendimiento y el que se utiliza más frecuentemente, aunque también es el que mayor tiempo necesita (entre 24 y 48 horas) (Achten et al. 2008). Adriaans (Adriaans 2006) recomienda económicamente viable la extracción química sólo cuando ésta se realiza a escala industrial, a más de 50 toneladas de biodiesel por día. Además, considera que la extracción química convencional utilizando n-hexano repercute fuertemente en el ambiente al generar agua contaminada, mayor utilización de energía y emisiones de compuestos orgánicos volátiles mayores.



### 1.2.3.2 Transesterificación

La alcoholólisis o transesterificación es la sustitución de un alcohol contenido en un éster por otro alcohol en un proceso similar a la hidrólisis. Generalmente ésta se lleva a cabo con la finalidad de reducir la viscosidad de los triglicéridos (Indian Planning Commission 2003). La transesterificación se representa en la siguiente ecuación:

Ecuación 1.1



donde  $RCOOR$  representa un éster (triglicéridos en el lado izquierdo de la ecuación, y éster metílico de ácidos grasos en el lado derecho),  $R$  representa una cadena con carbono (metanol en este caso), y  $ROH$  representa un alcohol (glicerol en este caso). Los ácidos grasos son transesterificados rápidamente por medio de un catalizador alcalino a temperaturas de entre 60 y 70 °C y presión atmosférica, con exceso de metanol. Al final de la reacción la mezcla debe reposar. En el fondo, se forma una capa de glicerol la cual es retirada mientras la capa superior de éster metílico se lava. El exceso de metanol es recuperado por destilación (Indian Planning Commission 2003).

Aunque es un proceso sencillo y directo, el rendimiento durante la transesterificación puede presentar variaciones considerables debido a las características genéticas y ambientales en el aceite que se utilice. Por esto, para alcanzar los resultados óptimos en la producción de biodiesel deben tomarse en cuenta la cantidad de alcohol y catalizador a utilizar así como la temperatura y tiempo de reacción. Los requerimientos óptimos para la producción de biodiesel de *jatropha* son 20% y 1% en masa de metanol e hidróxido de sodio respectivamente. El máximo rendimiento de ésteres ocurre después de 90 minutos de reacción a 60 °C (Achten et al. 2008). Las características más importantes en la transesterificación son las siguientes:

- **Temperatura del aceite**

La temperatura a la que se encuentra el aceite de *jatropha* antes de la transesterificación tiene efectos sobre la reacción: está probado que si se aumenta la temperatura el rendimiento en la producción de biodiesel es mayor, aunque temperaturas de más de 60 °C pueden ocasionar pérdidas de metanol durante el proceso (Indian Planning Commission 2003).

- **Temperatura de la reacción**

El rendimiento en la producción de biodiesel también está influenciado por la temperatura a la que la transesterificación ocurre: generalmente la reacción se lleva a cabo a una temperatura cercana al punto de ebullición del metanol (entre 60 y 70 °C) y a presión

atmosférica. Estudios sugieren que la transesterificación puede completarse de forma adecuada a temperatura ambiente en presencia de un catalizador alcalino si se le da el tiempo necesario (Indian Planning Commission 2003).

- **Relación de alcohol y aceite**

Otro factor que influye en el rendimiento de la reacción es la relación molar de alcohol a aceite vegetal. 6:1 es una relación que se utiliza comúnmente en procesos industriales, la cual otorga rendimientos de hasta 98% en masa de aceite vegetal a biodiesel. De acuerdo a Acthen y sus colegas (Acthen et al. 2008) la relación molar óptima es metanol:aceite  $\approx$  5.5:1. Relaciones molares menores requieren más tiempo para completar la reacción mientras que relaciones molares mayores disminuyen la tasa de recuperación debido a la pobre separación del glicerol (Indian Planning Commission 2003).

- **Tipo y concentración de catalizador**

Los catalizadores alcalinos son generalmente más efectivos en la transesterificación que los catalizadores ácidos. Los alcóxidos de sodio presentan buenos resultados en la transesterificación, aunque utilizando hidróxidos de sodio y potasio se obtienen resultados favorables también. El tiempo de reacción se reduce significativamente al utilizar catalizadores alcalinos en vez de catalizadores ácidos. La concentración de catalizadores alcalinos más adecuada va de 0.5% a 1% en masa obteniendo resultados de entre 94% y 99% en masa en la transformación de aceite vegetal a biodiesel. Incrementar la concentración de catalizador no necesariamente aumenta el rendimiento y presenta dificultades al tener que retirarlo antes de que la reacción termine (Indian Planning Commission 2003).

- **Intensidad del mezclado**

La intensidad a la hora de mezclar afecta el rendimiento en la transesterificación únicamente en la primera etapa de la reacción, es decir entre 5 y 10 minutos después de agregar metanol y el catalizador. Después de esto, el agitado tiene efectos despreciables en la reacción (Indian Planning Commission 2003).

- **Pureza del aceite vegetal**

Los ácidos grasos libres en el aceite vegetal pueden interferir con el catalizador. Bajo las mismas condiciones, rendimientos de entre 94% y 97% pueden disminuir hasta rendimientos de entre 67% y 84% si se utilizan aceites vegetales sin refinar o sin filtrar correctamente. Sin embargo, este problema suele no presentarse cuando la reacción ocurre a temperaturas y presiones elevadas (Indian Planning Commission 2003).

Una alternativa recientemente desarrollada para el proceso de transesterificación con el propósito de obtener biodiesel es el hidrotratamiento de los triglicéridos contenidos en los aceites vegetales utilizados como materia prima. El resultado del proceso es un producto desoxigenado y estable, con bajo contenido de azufre que es completamente compatible con el diesel fósil. La conversión por medio de hidrotratamiento proporciona tasas de rendimiento mayores, incrementando la calidad del diesel. Después de presentarse como una tecnología en desarrollo, se muestra ahora como una alternativa prometedora y avanzada en la producción de combustibles renovables (Portugal-Pereira et al. 2016).

## 2 Producción y políticas públicas sobre biocombustibles por país

### 2.1 Producción de biocombustibles por país

Hasta hace pocos años, la sustentabilidad de los biocombustibles no había sido debidamente estudiada. Incluso ahora, existen preocupaciones sobre el desarrollo y uso de biocombustibles que generan incertidumbre respecto a su implementación: uso de la tierra y su impacto en el ciclo del carbono y la biodiversidad; desarrollo económico y social; antagonismo con la producción de alimentos; y su rendimiento como elementos de mitigación en las emisiones de GEI son las principales. Sin embargo, a pesar de las contemplaciones ambientales, económicas y sociales, la producción de biocombustibles ha aumentado significativamente en los últimos años. En 2015 la energía renovable aportó alrededor del 4% de la demanda global de energía para transporte carretero, de la que los biocombustibles líquidos continúan representando la mayor parte. La producción global de biocombustibles alcanzó 133,000 millones de litros en 2015, presentando un incremento de 3% respecto a 2014. La producción de etanol y biodiesel correspondió (en términos energéticos) al 67% y 33% respectivamente del total fabricado, además de una pequeña pero en aumento cantidad de Aceite Vegetal Hidrogenado (AVH) (REN21 2016). Los cinco países que mayor aporte tuvieron a la producción global de biocombustibles en términos energéticos fueron Estados Unidos, Brasil (produciendo entre los dos el 72% de los biocombustibles), Alemania, Argentina e Indonesia (REN21 2016).

Estados Unidos y Brasil generaron el 86% de la producción mundial de etanol en 2015, China, Canadá y Tailandia le siguieron contribuyendo con el 2.8%, 1.7%, y 1.2%, respectivamente. En Estados Unidos, cerca de 100 estaciones de combustible en dieciséis estados venden la mezcla E15 (15% etanol y 85% gasolina) mientras los fabricantes de vehículos están trabajando para que sus motores sean compatibles con porcentajes superiores de etanol en la mezcla (REN21 2016). Concerniente al biodiesel, la producción global para 2015 fue de 30,100 millones de litros. Los principales actores fueron Estados Unidos (16%), Brasil (13%), Alemania (9%), Francia (8%) y Argentina (7%). En Europa ocurrió la fabricación del 38% (11500 millones de litros) de la producción global de biodiesel para 2015. En América Latina, la producción Brasileña aumentó 15% respecto a 2014 respondiendo a incentivos nacionales y al relativamente gran porcentaje de biodiesel en la mezcla obligatoria de 7%. En contraste la producción de biodiesel en Argentina disminuyó 3% debido a la reducción en el mercado de exportación resultado del aumento en el impuesto en las importaciones de biodiesel desde Argentina en la Unión Europea (UE). En la tabla 2.1 se muestran los 16 países que presentaron la mayor producción de biocombustibles para el año 2015 (REN21 2016).

Tabla 2.1 Los 16 países que mayor contribución tuvieron a la producción mundial de biocombustibles en 2015. La suma de los totales puede no coincidir debido a redondeos.

Fuente REN21 2016.

País	Etanol	Biodiesel	AVH	Total	Contribución a la producción global [%]
	Miles de millones de litros				
Estados Unidos	56.1	4.8	1.2	62.1	47
Brasil	30	3.9		32.3	24
Alemania	0.9	2.8		3.8	3
Holanda	0.4	1.5	1.7	3.5	3
Francia	0.9	2.4	0.1	3.4	3
China	2.8	0.4		3.1	2
Argentina	0.8	2.1		2.9	2
Tailandia	1.2	1.2		2.4	2
Singapur	~0	1	1.2	2.2	2
Canadá	1.7	0.3		2.0	2
Indonesia	0.1	1.7		1.8	1
España	0.5	0.6	0.2	1.3	1
Colombia	0.5	0.6	0.1	1.0	1
Bélgica	0.6	0.4		1.0	1
India	0.7	0.1		0.8	1
Malasia	~0	0.7		0.7	1
<b>Mundo</b>	<b>98.3</b>	<b>30.1</b>	<b>4.9</b>	<b>133.3</b>	<b>100</b>

## 2.2 Políticas de uso de biocombustibles por país

### 2.2.1 Unión Europea (UE)

El porcentaje de la aportación de las energías renovables al consumo energético neto en la Unión Europea en 1997 fue 6%. En este año, con la publicación de *the White Paper for a Community Strategy and Action Plan Energy for the future: Renewable sources of energy* (Scarlat et al. 2015; EC, Energy for the future 1997), se sentaron las bases para la política en favor de las energías renovables que la UE ha seguido desde entonces. En el documento se proponía doblar la contribución de las energías renovables para alcanzar 12% del consumo energético neto en 2010. La Directiva de Biocombustibles estableció en 2003 el objetivo de reemplazar con biocombustibles u otros combustibles renovables el 5.75% de toda la gasolina y diesel utilizados para transporte para 2010. A pesar de que no se alcanzó el objetivo, el consumo de biocombustibles en el transporte se incrementó de 125 PJ (1.0% del total de combustibles) en 2005 a 556 PJ (4.4% del total de combustibles) en 2010, en sustitución de gasolina y diesel fósil (EurObserv'ER 2011).

En 2009 la Directiva de Energía Renovable (DER) obligó a los miembros de estado a incrementar a 20% en el consumo energético final neto, y a 10% en el consumo energético en transporte la participación de las energías renovables para 2020 (European Council

2014), acoplando esta política con el objetivo estratégico de reducir las emisiones de GEI 20% respecto a los niveles de 1990. En el mismo año, la Directiva de Calidad de Combustible (DCC), estableció el objetivo de reducir en 6% las emisiones de GEI para los combustibles utilizados en transporte para el año 2020 (EC, Directive 2009). Tanto la Directiva de Energía Renovable, como la Directiva de Calidad de Combustible implementaron criterios de sustentabilidad para los biocombustibles y procedimientos para la verificación del cumplimiento de estos criterios (Scarlat et al. 2015). La DER prohibió la utilización de varias categorías de tierra para utilizarse en la producción de biocombustibles, entre las que se encuentran tierras con alto valor de biodiversidad (bosques primarios, zonas naturales protegidas, pastizales con alto nivel de biodiversidad); tierras con alto contenido de carbono (humedales, zonas boscosas); y turberas. Existe también una legislación de cumplimiento transversal que se refiere a la preservación de la calidad de suelo y agua, a la preservación de la diversidad biológica, al uso diligente de fertilizantes y pesticidas y a poner especial atención en la contaminación del aire (Scarlat et al. 2015).

El esquema de sustentabilidad de la UE obliga a los miembros de estado a reportar el impacto de biocombustibles y biolíquidos en la biodiversidad, agua, suelo, reducción en las emisiones de GEI, cambios en los precios de las materias primas y cambio de uso de tierra asociada con la producción de biomasa. También, los surtidores de combustible deben reportar el cumplimiento de los criterios de sustentabilidad así como las medidas tomadas para la protección de la tierra y el aire, la restauración de las tierras degradadas y el evitar utilizar agua en zonas donde esta sea escasa. Por otro lado, no existe criterio para medir la sustentabilidad social, sin embargo, la Comisión Europea debe reportar el impacto social que el uso de los biocombustibles genere, así como la variación en la disponibilidad de alimentos a causa de estos (Scarlat et al. 2015).

El uso de biocombustibles y biolíquidos en la UE debe reducir las emisiones de GEI por lo menos 35% en comparación con sus equivalentes fósiles. Este porcentaje de reducción aumentará a 50% en 2017 para los biocombustibles y biolíquidos que se generen en plantas ya existentes, y a 60% en 2018 para la producción en nuevas instalaciones. Otro aspecto de importancia es que los biocombustibles avanzados de segunda generación producidos de residuos, material celulósico no comestible, y material lignocelulósico contarán al doble para el cumplimiento del objetivo de 10% de combustibles renovables para 2020 (EC, Directive 2009a). Las emisiones de GEI deben incluir las emisiones asociadas a los biocombustibles y biolíquidos desde el cultivo de la materia prima, la transformación, el transporte y la distribución así como las emisiones generadas por el cambio de contenido de carbono asociado al cambio de uso de la tierra calculado en un periodo de 20 años. Respecto a las emisiones de los co-productos, estas deberán ser calculadas de acuerdo a su contenido energético. La Comisión Europea publicó también, guías para el cálculo del contenido de carbono en la tierra, las cuales incluyen al carbón orgánico del suelo y el

contenido de carbón en las capas superior e inferior de vegetación del suelo, ambas para el uso de tierra actual y el de referencia, así como valores para diferentes categorías de uso de tierra y tipos de suelo.

La Comisión Europea lanzó una propuesta en 2012 con la que trataba de unificar a la DER y la DCC en los criterios para tomar en cuenta el uso indirecto de la tierra en los cálculos de emisiones de GEI y otros efectos generados por la utilización de biocombustibles, además, buscaba estimular el desarrollo de biocombustibles avanzados provenientes de materias primas no comestibles. La propuesta limitaba el uso de biocombustibles obtenidos a partir de cultivos comestibles a 5% (del consumo energético en transporte) o a la cantidad de biocombustibles y biolíquidos consumidos en 2011, mientras consideraba que la contribución de los biocombustibles provenientes de cultivos como alga, desechos municipales, industriales, de agricultura y silvicultura debería ser cuatro veces su contenido energético; la contribución de biocombustibles obtenidos a partir de aceite de cocina usado, grasas animales, material celulósico no comestible y material lignocelulósico debería ser dos veces su contenido energético; y que los biocombustibles no provenientes de cultivos de cereales, almidones, azúcares y aceites, y los cultivos cuya producción ocasionara cambios directos en el uso de la tierra deberían tener emisiones asociadas al cambio indirecto de uso de la tierra de cero. En 2014 el Consejo Energético de la UE acordó incluir los aspectos relacionados con el cambio indirecto de uso de la tierra en la producción de biocombustibles, e incrementó el límite inicial de 5% a 7% en el uso de biocombustibles de primera generación (EC, Proposal for a Directive amending 2012; Council of the European Union 2014).

### 2.2.2 Continente Americano

El crecimiento en el mercado de los biocombustibles y su estado actual en América obedecen principalmente a la necesidad de sustituir o complementar a los combustibles fósiles para los vehículos de combustión interna y a la urgente obligación de reducir las emisiones de GEI. También ha contribuido el éxito pasado que tuvieron las industrias de biocombustibles bien establecidas en Brasil y Estados Unidos (Solomon et al. 2015). En varios países, la implementación de políticas públicas ha sido la principal herramienta para impulsar el mercado de los biocombustibles, especialmente las de exención de impuestos, subsidios y la mezcla obligatoria de combustibles fósiles con biocombustibles (Solomon et al. 2015).

Estados Unidos es ahora el mayor productor de etanol en el mundo (REN21 2016). En el periodo 2011-2012 el 39% (134.5 millones de toneladas) de la producción de maíz del país fue utilizado para producir etanol (EIA 2012). Estados Unidos, Argentina y Brasil son los principales exportadores de maíz de América, con México y Colombia como principales importadores (FAOSTAT 2013). Argentina y Brasil se encuentran experimentando la soya como materia prima para producir biodiesel mediante la expansión de tierra cultivada,

intensificación de la producción de soya, generando instalaciones para producir biodiesel e implementando políticas públicas como instrumentos para lograrlo. Para fabricar biodiesel, Argentina utilizó el 26% del total de la producción de soya en 2011, siendo para entonces el mayor exportador a nivel mundial. Sin embargo, restricciones de la UE en 2013 han perjudicado la industria de biodiesel de soya en Argentina. Brasil es el segundo exportador de etanol en el mundo. La producción se reparte entre la generación de comida y biocombustible, y su industria tiene la capacidad de cambiar rápidamente de producir etanol a la elaboración de productos alimenticios, así, cuando la demanda de azúcar crece, se disminuye la producción de etanol, como sucedió en 2011. Canadá aportó el 2% del total de producción de etanol en el mundo (el quinto mayor productor a nivel mundial después de E.U.A., Brasil, UE y China) pero menos del 1% de la producción total de biodiesel en el mundo (REN21 2016; Solomon et al. 2015).

Otros países de América Latina presentan un gran potencial para la producción de biocombustibles, aunque hasta recientemente comenzaron a explorar esta posibilidad. Colombia, Guatemala, Honduras, Paraguay y Uruguay han tomado medidas para promover la industria de biodiesel utilizando como materia prima aceite de palma y soya, mientras que Colombia, Guatemala, Paraguay y Perú también producen etanol utilizando principalmente caña de azúcar, maíz y sorgo. Colombia es el mayor productor de biodiesel de palma de aceite y el tercer mayor productor de etanol (en su mayoría de azúcar de caña) en América Latina (REN21 2016; Solomon et al. 2015). A continuación se mencionan las políticas públicas relacionadas con biocombustibles de los países que cuentan con una industria bioenergética estable en el continente Americano.

### 2.2.2.1 Estados Unidos

La política más importante y la primera en ser aplicada en Estados Unidos fue la exención parcial del impuesto federal a los combustibles de motores para el gasohol (mezcla de gasolina y etanol) dirigido a los productores de combustibles. Esta exención fue aprobada en el Acta de Impuestos Energéticos (*Energy Tax Act*) de 1978. En el Acta de Impuestos Energéticos de 1980, se agregó un crédito para el impuesto sobre las ganancias para los mezcladores de combustible y un crédito para la utilización de alcohol como único combustible. Hasta 2004 estas medidas fueron renovadas periódicamente (Solomon et al. 2015). Otro apoyo federal surgió en 1990 con el crédito a los impuestos para los pequeños productores de etanol (*Small Ethanol Producer Tax Credit*) que otorgaba USD \$0.10 por galón adicional de crédito a las ganancias para las plantas de etanol que fabricaran volúmenes de hasta 15 millones de galones (Yacobucci et al. 2012). El Acta de Política Energética (*Energy Policy Act*) de 2005 redefinió como pequeño productor a las plantas que fabrican volúmenes hasta 60 millones de galones por año (Solomon et al. 2015). Los mecanismos para otorgar el subsidio al etanol cambiaron en 2004 por medio de la introducción del crédito al impuesto sobre la venta volumétrica de etanol (*Volumetric Ethanol Excise Tax Credit*, VEETC). EL VEETC simplificó el sistema de subsidios al



hacerlo en base a volumen sin limitarlo a mezclas específicas. Hasta 2010 el subsidio permaneció en USD \$0.51 por galón de etanol. Después de criticar este subsidio por muchos años el congreso lo eliminó a finales de 2011 (Solomon et al. 2015).

El gobierno introdujo el estándar de combustibles renovables (*Renewable Fuel Standard*, RFS) en el acta de política energética de 2005 que obligaba mezclar biocombustibles en los combustibles para transporte. El acta de independencia y seguridad energética (*Energy Independence and Security Act*) de 2007 modificó e incrementó el RFS y propuso un aumento paso a paso en la mezcla obligatoria de biocombustible anual hasta 36 millones de galones para 2022. Una versión revisada del RFS, conocida como RFS2 se publicó en 2010, estableciendo el uso de biocombustibles de segunda generación y materia prima avanzada como materiales celulósicos o residuos para la producción de biocombustible a la par de limitar la producción de etanol derivado de maíz (*Energy Independence and Security Act 2007*).

La política de Estados Unidos no consideró la sustentabilidad respecto a los biocombustibles en los primeros 25 años, como muestra es que la sostenibilidad económica de programas tan subsidiados siempre fue incierta. La sustentabilidad se incorporó a las políticas públicas desde 2007. Los aspectos más importantes fue el mandato de cambio hacia materias primas no comestibles y la reducción forzosa en las emisiones de GEI. La industria de biodiesel en Estados Unidos es más pequeña que la de etanol, con muy poca producción hasta 2005. La principal materia prima es el aceite de soya. Un crédito al impuesto en las ganancias para productores y mezcladores de USD \$1.00 por galón se estableció por el acta americana de creación de empleos (*American Jobs Creation Act*) en 2004. En 2005 se creó el crédito a los impuestos para pequeños productores de agrobiodiesel (*Small Agri-Biodiesel Producer Tax Credit*) de USD \$0.10 por galón para volúmenes de hasta 15 millones de galones por año. La industria de biodiesel en Estados Unidos ha sido sumamente volátil en comparación con la de etanol (Solomon et al. 2015).

#### 2.2.2.2 Canadá

Canadá es uno de los principales productores de petróleo en el mundo, por lo que su interés en los biocombustibles es esencialmente por la preocupación que existe por las emisiones de GEI y el cambio climático, y para desarrollar zonas rurales mediante un sistema bioenergético robusto (Ackom 2010). En 2010, el gobierno federal y las provincias establecieron una mezcla de 5% de etanol con gasolina obligatoria para ser alcanzada para 2015 (Hanney et al. 2013). En 2011, el gobierno estableció también la mezcla de 2% de biodiesel y diesel (*Renewable Fuels Regulations 2011*). La mayoría de las provincias en Canadá han promovido el desarrollo de los biocombustibles: mientras Ontario, Alberta y Columbia Británica fijaron mezcla obligatoria de 5% de etanol entre 2007 y 2010, las provincias de Saskatchewan y Manitoba establecieron requerimientos de 7.5% y 8.5% respectivamente (Ontario Ministry of Environment 2007). El gobierno federal y las

provincias mencionadas, además de Quebec también exentaron al etanol del pago de impuestos especiales desde 1990 (Solomon et al. 2015). Los departamentos de agricultura y agro-alimentos (*Agriculture and Agri-Food Canada*, AAFC) y recursos naturales (*Natural Resources Canada*, NR Can) implementaron el programa de expansión de etanol (*Ethanol Expansion Program*, EEP) de 2003 a 2007, el cual apoyó la construcción de varias pequeñas plantas para producir etanol a través de otorgar préstamos libres de intereses (Laan et al. 2011). En 2010 Canadá publicó una guía con los principios de sustentabilidad para la producción de biocombustibles (Hanney et al. 2013). Al mismo tiempo, el departamento de finanzas (*Department of Finance*) implementó programas para proporcionar exención de impuestos especiales cada cierta fecha para incrementar la producción y uso de combustibles renovables (Solomon et al. 2015).

El programa de subsidios para biocombustibles de mayor alcance, ecoENERGY, se implementó en 2008. Todas las alternativas existentes o propuestas para sustituir gasolina o diesel pueden aplicar por el subsidio (C\$0.07 por litro) que expira en 2017, aunque nuevo financiamiento terminó en 2010 (Laan et al. 2011). A pesar de los subsidios, Canadá es un gran importador de etanol desde Estados Unidos (Thrän et. Al. 2014).

### 2.2.2.3 Brasil

El Decreto 19.717 de 1931 fue la primera política que introdujo los biocombustibles en Brasil (Hira & de Oliveria 2009). Estableció una mezcla voluntaria de 5% de etanol anhidrico con gasolina que ascendió brevemente hasta 54% durante la segunda guerra mundial. El instituto de azúcar y alcohol (*Instituto do Açúcar e do Alcool*, IAA) se encargó de establecer precios, fijar cuotas para las plantas y de crear las mezclas después de este periodo. El decreto presidencial 9.827 de 1946 comenzó la expansión de las cuotas de producción de etanol para todo el país con la finalidad de que todas las regiones pudieran participar. El decreto 25.174 de 1948 promovió la industria de etanol, aunque después de este año la industria brasileña de caña de azúcar cambió nuevamente a la fabricación de azúcar (Solomon et al. 2015).

En 1975, el gobierno federal lanzó un programa para fomentar la producción de etanol bajo el decreto 75.593 con la meta de reducir la dependencia de petróleo extranjero (Coelho & Guardabassi 2014). El mandato de porcentaje de etanol en la mezcla de combustible ha variado desde que se instauró entre 10% y 25%, dependiendo de la cosecha de caña de azúcar (Goldemberg et al. 2004). Las destilerías productoras de etanol están atadas a las fábricas de azúcar para que ambos productos puedan ser producidos, así cuando los precios internacionales de azúcar caen haciendo la producción menos rentable, la caña de azúcar puede utilizarse para producir etanol, y cuando los precios internacionales de azúcar suben, la producción de etanol se reduce.

En la primera fase del programa pro-alcohol de 1975 a 1979, los esfuerzos se concentraron en apoyar la investigación, desarrollo y producción de alcohol anhidro para mezclarse con gasolina. El gobierno ofreció préstamos de bajo interés para la construcción de destilerías y subsidios para la producción de etanol. El gobierno invirtió también en las universidades públicas para fomentar la investigación en el desarrollo de automóviles que utilicen etanol como combustible (Coelho & Guardabassi 2014). Durante la segunda fase de pro-alcohol, de 1980 a 1985, el esfuerzo principal cambió hacia el desarrollo de instalaciones para producción de etanol hídrico para vehículos motores y la reducción de impuestos para los consumidores que compraran carros de etanol (Goldemberg et al. 2004). El apoyo del gobierno en este periodo contribuyó al desarrollo de una industria de etanol a gran escala que más adelante redujo costos de producción e hizo al etanol competitivo con la gasolina.

Sin embargo, las fluctuaciones en los precios del azúcar, el descubrimiento de nuevas reservas de petróleo fuera de la costa, y los precios internacionales de petróleo estables frenaron el entusiasmo de la industria de biocombustibles en el país en la década de 1990. Aunque comenzando en 1997, los límites de precio desaparecieron y actualmente el etanol compete con la gasolina sin subsidios (Coelho & Guardabassi 2014).

Brasil también ha desarrollado el mercado de biodiesel. La ley federal de 2003 conocida como Programa Nacional para la Producción y Uso de Biodiesel (PNPB), autorizó el uso de 2% de biodiesel hasta 2008, cuando este porcentaje se volvió obligatorio. Después el porcentaje aumento a 5% en 2010 (Solomon et al. 2015) y a 10% en 2015 (REN21 2016). En 2004 el programa sello social (*Selo Social*) fue creado con la finalidad de identificar familias campesinas que podían participar en la bioeconomía y así incrementar las oportunidades de empleo (Bailis 2014). El gobierno del país otorgó distintas exenciones de impuestos para biodiesel dependiendo de la materia prima utilizada, la región de producción, y el tamaño de las granjas donde se cultiva la materia prima (Solomon et al. 2015).

En los últimos 15 años, en Brasil se han realizado avances considerables para incorporar la sustentabilidad en los programas de biocombustibles (Smeets et al. 2008) en el que las principales preocupaciones son creación de zonas agro-ecológicas para proteger los bosques y el uso tradicional de la tierra, la gradual eliminación de la quema de caña de azúcar para reducir los problemas de salud y mejorar las condiciones de trabajo, reducción en la emisión de GEI, prohibición de trabajo esclavista y promover a los pequeños propietarios y la creación de cooperativas rurales para la producción de materias primas (Coelho & Guardabassi 2014).

#### 2.2.2.4 Argentina

Las políticas públicas en favor de los biocombustibles en Argentina comenzaron en 2001, cuando se definió al biodiesel. En 2006, el congreso aprobó la ley 26.093 que obligaba a

utilizar 5% de etanol en la gasolina y 5% de biodiesel en el diesel para el mercado doméstico. En 2007 se publicaron las regulaciones para la implementación de ésta ley y se crearon incentivos para la producción y uso de biocombustibles en el interior del país para un periodo de 15 años empezando en 2010. En 2008, mediante la aprobación de la ley 26.334, se brindó apoyo para la producción mínima de etanol de caña de azúcar. La ley permitió a las fábricas de azúcar poder acceder a los beneficios inherentes a la producción de biocombustibles, manteniendo las regulaciones y normas básicas de la ley 26.093 (Solomon et al. 2015).

La política de Argentina para el desarrollo de los biocombustibles fue bastante activa en 2010. La Secretaría de Energía publicó varios acuerdos en el Diario Oficial durante ese año. Se especificaron los objetivos respecto a las características de calidad que el biodiesel debía alcanzar y posteriormente fueron modificados, en los acuerdos 6 y 828 respectivamente. El acuerdo 7, ratificó el Acuerdo de Suministro de Biodiesel y estableció una fórmula polinomial para calcular el precio del biodiesel. La Secretaría de Energía por medio del acuerdo 554 incrementó el porcentaje obligatorio de la mezcla de 5% a 7% en 2010, y luego se incrementó a 8% en 2013. A finales de ese año se estableció la meta de aumentarlo a 10% para 2014 (Joseph 2014). El aceite de soya, fue cerca del 100% de la materia prima para la producción de biodiesel. La normativa principal sobre las características de calidad del etanol se estableció en el acuerdo 1295.

La UE ha sido el mayor importador de biodiesel de soya de Argentina desde 2009. En noviembre de 2012, la Comisión Europea comenzó una investigación sobre el mercado argentino alegando que las importaciones desde éste (así como desde el de Indonesia) estaban siendo subsidiadas, perjudicando materialmente a la industria de la UE (JWK Law Office 2012). Puesto que no se ha otorgado ninguna contribución no recuperable para subsidiar los biocombustibles, además de que la obligación nacional de mezcla de 10% desvía parte de la materia prima y de la producción doméstica de biodiesel lejos de un mercado potencialmente más rentable en la UE (Timilsina et al. 2013), Argentina apeló la acción ante la Organización Mundial de Comercio (Miles 2013).

#### 2.2.2.5 México

La infraestructura legal e institucional mexicana respecto a los biocombustibles es sumamente pobre, y fue hasta 2008 cuando se publicó la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos (LPDB) (Romero Hernández et al. 2011; LPDB 2008). En el marco de esta ley, el gobierno busca estimular el desarrollo de una industria nacional de bioenergía que pueda contribuir a la seguridad energética, a impulsar el desarrollo socioeconómico rural y a reducir la emisión de GEI generados por la industria eléctrica y por el sector transporte en las mayores zonas urbanas del país. La aplicación de la LPDB corresponde al ejecutivo federal mediante las Secretarías de Energía (SENER), de Agricultura, Ganadería,

Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA) y de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT).

SAGARPA es la encargada de la producción y comercialización de insumos, la SENER otorga y revoca permisos para la producción, almacenamiento, transporte y distribución por ductos, y para comercializar los bioenergéticos; y la SEMARNAT cuenta con facultades para evaluar y autorizar en materia de impacto ambiental, las instalaciones para la producción, almacenamiento, transporte, distribución y comercialización de los bioenergéticos (Prospectiva de Energías Renovables 2012-2026 2012). La de México es la única gran economía en la Región Panamericana que no posee un mercado comercial de biocombustibles bien establecido.

Hasta octubre de 2015 la SENER había entregado 48 permisos para la producción, almacenamiento, transporte, distribución y comercialización de bioenergéticos: 21 para biodiesel, 24 para etanol anhidro y 3 para ambos biocombustibles. Además se otorgaron 22 avisos de producción menor a 100 litros por día, de los cuales 21 son para biodiesel y únicamente 1 para etanol (Prospectiva de Energías Renovables 2015-2029 2015). Se pusieron en marcha los programas Programa de Producción Sustentable de Insumos para Bioenergéticos y de Desarrollo Científico y Tecnológico 2009-2012, y Programas en Materia de Bioenergéticos, a cargo de SAGARPA y SENER respectivamente. El primero tiene el objetivo de fomentar la producción sustentable de materias primas para la generación y comercialización de los bioenergéticos mediante el desarrollo el campo mexicano. Este programa, contempla los cultivos de remolacha, sorgo, caña de azúcar, jatropha, higuera y palma de aceite como posibles insumos para la producción de biocombustibles (Prospectiva de Energías Renovables 2012-2026 2012).

El principal problema que enfrentan los biocombustibles para su desarrollo en México, es que deben competir con el precio de la gasolina que el gobierno federal subsidia a través de Petróleos Mexicanos (PEMEX), mientras que no existe una cadena de materia prima abundante y barata para su producción (SEMARNAT-INE; CIEco 2008). Sin embargo, el 22% del total de gasolina utilizada en el país en 2011, pudo ser reemplazado por biocombustibles líquidos, principalmente etanol, al transformarse la industria nacional de caña de azúcar. Sin considerar aspectos económicos y de logística, México tiene el potencial para satisfacer el 40% de su energía primaria utilizando recursos bioenergéticos con las tecnologías existentes, aun sin tomar en cuenta el maíz, que no puede ser considerado como materia prima según la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos por el posible aumento en los precios de alimentos y la escasez eventual de comida (SEMARNAT-INE; CIEco 2008). Además, para el año 2035 las opciones bioenergéticas del país podrían reemplazar el 16% del consumo final de energía y mitigar 17% las emisiones de GEI comparadas con la línea base. De estas opciones, el biodiesel de jatropha podría sustituir 1,614 PJ de energía en el sector transporte y evitar la generación de 35 MtCO<sub>2e</sub> (García et al. 2015).

Otro asunto importante, es que existe en México una carencia de datos técnicos, sobre todo en lo referente al rendimiento de cultivos energéticos (caña de azúcar, remolacha dulce y sorgo para etanol, y aceites de jatropha, castor y de palma para biodiesel), y aunque el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) ha otorgado recursos para la investigación científica, la legislación generalmente no presta verdadera atención a los resultados científicos (Solomon et al. 2015).

El marco legal en México, a diferencia de otros países como Brasil y Estados Unidos, no incluye un porcentaje obligatorio de etanol y biodiesel mezclado con gasolina y diesel respectivamente, por lo que la demanda es casi nula. Alternativamente, la Secretaría de Energía fijó las Metas para la Introducción de los Biocombustibles para el periodo 2001-2012, en donde se estableció mezclar 2% de etanol con gasolina en Guadalajara, Monterrey y la Ciudad de México. Sin embargo, como no existe mandato legal para adquirir biocombustibles, PEMEX tiene la facultad de rechazar los precios o características de calidad que no encuentre aceptables de los productores potenciales de biocombustibles. De acuerdo a los productores, sin alguna clase de subsidio no hay forma que los biocombustibles que se fabrican puedan competir económicamente con los combustibles fósiles (Solomon et al. 2015).

En algunos estados como Michoacán, Chiapas y Yucatán se otorgaron subsidios estatales y federales, además de apoyo de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) para establecer plantaciones de jatropha, dirigidos a compañías y campesinos luego del entusiasmo internacional que se generó por la producción de biodiesel utilizando esta planta como materia prima alrededor del año 2007 (Prospectiva de Energías Renovables 2012-2026 2012). Los rendimientos obtenidos en las plantaciones fueron mucho más bajos de los esperados tras plantar miles de hectáreas, lo que llevó a que varios proyectos fueran cancelados y a la desaparición o cambio de producto en las plantaciones de las compañías que se dedicaban al cultivo de jatropha (Eastmond et al. 2014). La tabla 2.2 muestra las hectáreas de jatropha sembradas entre 2007 y 2011.

Tabla 2.2 Hectáreas de jatropha sembradas por estado en México entre 2008 y 2011. Fuente CONAFOR.

Estado	Superficie cultivada [ha]				Total
	2008	2009	2010	2011	
Chiapas	272	811	2022	1097	4202
Guerrero	-	18	98	-	116
Michoacán	10	77	136	493	716
Morelos	-	-	6	-	6
Oaxaca	-	67	8	47	122
Yucatán	-	23	1530	1398	2951
<b>Total</b>	<b>282</b>	<b>996</b>	<b>3800</b>	<b>3035</b>	<b>8113</b>

En la continua discusión que existe sobre la producción de biocombustibles en nuestro país, hay un aparente acuerdo en que los criterios de sustentabilidad deben seguir lo estándares internacionales, además de que bajo ningunas circunstancias, los biocombustibles deben perjudicar o competir con la producción de alimentos. Un ejemplo de esto es la exclusión del maíz como materia prima para generar biocombustibles (Prospectiva de Energías Renovables 2012-2026 2012). En un principio, se debe poner especial atención en la implementación de programas relacionados con biocombustibles, y luego deben ser monitorizados y evaluados constantemente para asegurar que se apliquen de forma sustentable y evitar que rompan la ley (haciendo un uso inadecuado de la tierra por ejemplo) durante su vigencia, como el caso que ocurrió en Yucatán donde se deforestó zona boscosa con el fin de sembrar jatropha y se utilizaron pesticidas tóxicos desde el aire causando la muerte de la mitad de la población de abejas en la comunidad, y obteniendo de cualquier forma un certificado de sustentabilidad (Selfa et al. 2014). Se han encontrado otros casos de corrupción relacionados con biocombustibles, como en Chiapas, lo que pone en evidencia la falta de capacidad y la corrupción que existen en algunos sectores del gobierno mexicano al poner en marcha programas de producción de biocombustibles sustentables, y plantea severas dudas sobre la veracidad de estos (Solomon et al. 2015). Ésta situación debe mejorar. La investigación científica puede y debe ser de utilidad en la implementación de programas sustentables de producción y uso de biocombustibles.

Existen varios países que tienen en marcha políticas públicas de mezclas obligatorias de etanol mezclado con gasolina y biodiesel mezclado con diesel para emplearse en el sector transporte. La tabla 2.3 muestra la mezcla obligatoria implementada por país, donde las letras E y B representan etanol y biodiesel respectivamente, y el número que tienen en seguida indica el porcentaje de biocombustible en la mezcla. Hay países que tienen mezclas sugeridas pero que no se consideran obligatorias: Chile (E5 y B5), República Dominicana (B2 y E15), Fiji (B5 y E10) y Nigeria (E10) son algunos ejemplos. En México, en la ciudad de Guadalajara se quiere proponer un mandato piloto E2 (REN21 2016).

Tabla 2.3 Políticas de mezclas obligatorias de biocombustibles por país a finales de 2015. Fuente REN21 2016.

País	Mezcla obligatoria
Angola	E10
Argentina	E10 y B10
Australia	Estados: E6 y B2 en New South Wales; E5 en Queensland
Bélgica	E4 y B4
Brasil	E27.5 y B10
Canadá	Nacional: E5 y B2; mezclas superiores en algunas provincias
China	E10 en nueve provincias
Colombia	E8 y B10
Corea del sur	B2.5; B3 a partir de 2018
Costa Rica	E7 y B20
Ecuador	E5 y B5; E5 en 2016
Estados Unidos	Nacional: 64,090 millones de litros
Etiopía	E10
Filipinas	E10 y B2; B5 en 2015
Guatemala	E5
India	E10
Indonesia	E3 y B5
Italia	0.6% mezcla de biocombustibles avanzados para 2018; 1% para 2022
Jamaica	E10
Malasia	E10 y B10
Malauí	E10
Mozambique	E10 en 2012-2015; E15 en 2016-2020; E20 a partir de 2021
Noruega	B3.5
Panamá	E7; E10 a partir de abril 2016
Paraguay	E25 y B1
Perú	E7.8 y B2
Sudáfrica	E2; E5 a partir de octubre 2015
Sudán	E5
Tailandia	E5 y B7
Turquía	E2
Ucrania	E5; E7 a partir de 2017
Uruguay	E5 y B5
Vietnam	E5
Zimbabue	E5, que se propone aumentar a E10 y E15 sin fecha definida



## 2.3 *Jatropha*

La *Jatropha* es una planta oleaginosa que da frutos. Es originaria de América Central y México y se encuentra distribuida en América Latina, África, India y el sudeste asiático (Adil et al. 2015). La *Jatropha* es un arbusto mediano que mide entre 5 y 7 metros de altura, de una madera suave cuya esperanza de vida es de 50 años. La planta desarrolla una raíz primaria que es capaz de estabilizar el suelo contra desprendimiento de tierras mientras que las raíces superficiales pueden ayudar a prevenir y controlar la erosión del suelo causado por viento y agua (Achten et al. 2008).

Las semillas de la mayoría de las especies de *Jatropha* contienen toxinas (ésteres de forbol, curcina, inhibidores de tripsina, lectinas y fitatos) a niveles tales que las semillas, aceite y pasta de semillas no son comestibles sin desintoxicación (Achten et al. 2008). Sin embargo, algunas comunidades mexicanas consumen semillas de *Jatropha platyphylla* después de sólo tostarla, ya que esta especie contiene alrededor de 60% de aceite y está libre de ésteres de forbol (Makkar et al. 2011), mientras la *Jatropha* que se utiliza como materia prima en la fábrica de biodiesel ubicada en el estado de Morelos, puede ser utilizada también como alimento forrajero. La planta es capaz de crecer en distintos tipos de tierra incluyendo marginadas, degradadas y tierras contaminadas, también, está bien adaptada a condiciones climáticas áridas y semiáridas. El aceite de este cultivo puede ser transformado en un biocombustible líquido fácilmente y de forma complementaria, la pasta de semillas puede ser utilizado como fertilizante y se puede producir biogás (CH<sub>4</sub>) con los residuos orgánicos que genera (Adil et al. 2015).

La popularización global de la *Jatropha* se debe principalmente a tres factores: adquirir seguridad energética; restablecer tierras marginadas y degradadas; y contribuir al desarrollo rural mediante la descentralización de la producción energética y la creación de empleos en este medio (Adil et al. 2015). De manera más específica, la adopción del cultivo de *Jatropha* a gran escala en países en desarrollo se debe a varios atributos, entre los que destacan: el potencial de uso como materia prima para la producción de biodiesel; la arquitectura y tamaño óptimos para la cosecha de sus frutos; mayor contenido de aceite (entre 40 y 60%) que otros cultivos energéticos; su capacidad de crecer en condiciones de poca irrigación y utilización de insumos agrícolas; rápido crecimiento y fácil propagación; resistencia a plagas y tolerancia a sequías; y sus pequeños periodos de gestación. Esto ha llevado al establecimiento de más de 1,000,000 de hectáreas de plantaciones de *Jatropha* alrededor del mundo: 85% de las plantaciones están ubicadas en países asiáticos, 12% en África, y 2% en América Latina, en Brasil y México principalmente. India es el país que mayor cantidad de plantaciones de *Jatropha* tiene con 300,000 ha de área cultivada (Adil et al. 2015).

Sin embargo, los valores esperados del rendimiento de semillas y el porcentaje de aceite generalmente no se alcanzan por una diferencia significativa debido fundamentalmente al

desempeño de la *jatropha* en condiciones de campo y a errores en los cálculos por unidad de área (Adil et al. 2015). También, la cantidad y la calidad del contenido de aceite en las semillas de *jatropha* dependen de la especie y sobre todo de las condiciones edáficas y de clima. Respecto a la resistencia a plagas, estudios de campo revelan que la *jatropha* es propensa a enfermedades virales y ataques de insectos (Adil et al. 2015). La creencia de que la *jatropha* puede crecer sin la utilización de insumos agrícolas en tierras degradadas y marginadas es también un factor por el cual los resultados esperados no se consiguen, pues aunque puede crecer en estas condiciones su rendimiento es considerablemente más bajo que cuando la tierra y la planta son tratadas con más consideraciones. Sumado a esto, la gente que cultiva *jatropha*, se encuentra con el problema de no conocer verdaderamente las características biológicas, ecológicas y fisiológicas de la planta, pues es un género exótico. Adicionalmente, debe estudiarse el impacto de las plantaciones de *jatropha* en otras tierras, así como el impacto que tienen en la biodiversidad local, incluyendo la biodiversidad microbiana (Adil et al. 2015).

Para que la *jatropha* pueda utilizarse como cultivo energético los estudios científicos respecto a ella deben aumentar. Establecer mediante investigación de calidad las mejores prácticas agrícolas para las condiciones edáficas y climáticas en las que la planta va a cultivarse así como los rendimientos reales que pueden obtenerse son factores claves para la adecuada utilización de la *jatropha* con fines energéticos. Las hectáreas sembradas con *jatropha* deben monitorizarse y retroalimentarse para la constante mejora en las prácticas agrícolas. En México desde 2015 se evalúa el rendimiento de algunas especies de *jatropha* por medio del Colegio de Veracruz en conjunto con el Centro de Investigaciones Tropicales de la Universidad Veracruzana, con la finalidad de conocer el potencial que tiene en la producción de biodiesel y cultivos de baja toxicidad como opción alimenticia (CONACyT 2016a).

La generación de biodiesel de forma sustentable debe realizarse mediante un programa en el que la producción continua y estable del biocombustible esté asegurado, poniendo especial atención al impacto ecológico que conlleva, a la contribución que tiene al crecimiento económico y la descentralización, y al desarrollo de la sociedad mediante la reclamación de tierras marginadas, manejando la biodiversidad local, creando empleos principalmente en el medio rural y presentando oportunidades empresariales, como la producción de alimento forrajero. Para que esto ocurra se deben crear las políticas públicas adecuadas, basadas en información generada científicamente.

## 3 Formulación del problema

### 3.1 Transporte y biocombustibles

A nivel mundial, el sector transporte utiliza en su mayoría combustibles de origen fósil: de los 110 EJ consumidos globalmente por el sector en 2014, 106 EJ (96% del total) se generaron con base a combustibles fósiles, y 102 EJ (92% del total) fueron generados con base a productos de petróleo (IEA 2016). La volatilidad de los precios y la escasez de petróleo económico, que aunque es debatible cuáles son las reservas actuales, éstas invariablemente disminuirán, aunado con la enorme contaminación que se genera debido a su utilización, hacen que buscar alternativas sea una necesidad urgente. Como posible respuesta a esta problemática surgen los biocombustibles. Biocombustibles y sustentabilidad son frecuentemente relacionados debido a que pueden ser carbono neutros durante su ciclo de vida, es decir que el CO<sub>2</sub> que se genera cuando son quemados se absorbe mientras la biomasa está creciendo. Además el hecho de que en la mayoría de los casos no se generan residuos peligrosos durante su producción, y que su producción y uso pueden realizarse de una manera descentralizada y distribuida, conducen a disminuir los recorridos largos de transporte y propician el desarrollo económico en zonas rurales. Sin embargo, esto no siempre es cierto, y la evaluación de sustentabilidad en los biocombustibles debe practicarse, monitorizarse y retroalimentarse para poder tomar decisiones acertadas para la investigación, desarrollo e implementación de estos energéticos.

### 3.2 Situación a resolver

La matriz energética en México está basada principalmente en combustibles fósiles, los cuales aportaron 91% del total de la energía primaria en 2014. La generación de electricidad se da principalmente en plantas de ciclo combinado en base a gas natural, combustible mediante el que se genera cerca del 51% de la electricidad dentro del territorio nacional (SENER 2014; SENER 2016). En 2000, la producción de petróleo alcanzó los 3.01 millones de barriles por día (Mbpd) mientras que en 2015 fue de 2.27 Mbpd. Esta disminución en la producción petrolera mexicana tiene como un factor determinante el agotamiento del activo de Cantarell que pasó de producir 1.47 Mbpd a 273,000 barriles diarios para el mismo periodo. Por otro lado, las importaciones de gas natural aumentaron 476% de 2000 a 2015, generando un gasto en el último año de 1,674 millones de dólares (MMUS\$). Respecto al carbón, en 2015 el 43% de la oferta total se basó en importaciones (SENER 2016). Existen reservas de petróleo que aún no son explotadas, sin embargo no se tiene la certeza que los esfuerzos de exploración actuales lleven al descubrimiento de reservas probadas y a la alta producción de petróleo que ocurrió en décadas pasadas: entre 2003 y 2012, aún con las mayores inversiones en el sector petrolero en la historia, las

reservas probadas disminuyeron en 31.2% (SENER 2016; Estrategia Nacional de Energía 2013-2017 2013). Un caso similar ocurre para el gas natural, pues aunque México es uno de los países con mayor potencial de reservas de gas de lutitas (shale gas), existe la incertidumbre del tamaño real de las reservas, así como de los impactos ambientales generados por su extracción y de la viabilidad económica de su explotación. Varias de las plantas de generación de energía eléctrica en el país ya rebasaron su tiempo de vida útil, y algunas otras están cerca de alcanzarlo, mientras, el consumo energético ha crecido más que el Producto Interno Bruto (PIB) en la última década, lo cual quiere decir que se necesita cada vez más energía para conseguir desarrollo económico. México es un importador neto de gasolina, diesel, turbosina, gas natural, gas licuado de petróleo y petroquímicos (SENER 2016; Estrategia Nacional de Energía 2013-2017 2013).

El índice de independencia energética es una forma de medir a grandes rasgos la capacidad que tiene un país para cubrir su consumo de energía por medio de su producción. Este índice se utiliza internacionalmente y es el cociente entre la producción y el consumo nacional de energía. En México, el índice de independencia energética fue por primera vez equivalente a 1.0 en 2013, y se puso por debajo de 1 en 2015 alcanzando un valor de 0.97, lo cual quiere decir que la producción nacional de energía no pudo satisfacer la demanda, esto debido al efecto combinado de la disminución promedio anual de 0.8% en la producción desde 2000 y el incremento de 3.6% en el consumo para el mismo periodo. En el año 2000, el índice de independencia energética fue mayor a 1.4 (SENER 2016).

Es claro que la independencia y la seguridad energética del país se encuentran en riesgo, y de continuar con estas tendencias, para el 2020 México se convertiría en un país con déficit energético (SENER 2016; Estrategia Nacional de Energía 2013-2017 2013). En respuesta a esta situación el gobierno mexicano se ha enfocado más en la perspectiva de extracción de gas y petróleo, y en los últimos años se han realizado grandes inversiones en exploración, configuración a refinerías y en la expansión del sistema de transporte de gas natural. Aunque existe el mandato legal de generar el 35% de la energía a partir de fuentes de energía limpias para 2024 y la necesidad de diversificar y optimizar el parque de generación energético, se ha prestado mucho menos atención a las energías renovables (Prospectiva de Energías Renovables 2015-2029 2015), a las cuales es necesario apoyar para conocer y desarrollar la capacidad que tienen para brindar seguridad energética y mitigar las emisiones de GEI.

Como se mencionó en la sección 1.1, el sector transporte generó en 2014 cerca del 23% de las emisiones de CO<sub>2</sub> totales a nivel mundial (IEA 2016), y de acuerdo al reporte anual del 2016 emitido por la Red de Políticas en Energías Renovables (REN por sus siglas en inglés) el gasto de energía en el sector transporte ha aumentado 2% en promedio desde 2000 y actualmente representa cerca del 28% del consumo energético total (REN21 2016). Tanto la reducción de las emisiones de GEI, principalmente CO<sub>2</sub>, como del consumo de energía en el transporte representan grandes retos que deben afrontarse durante la

evaluación de la sustentabilidad ambiental del sector. En este sentido, Fulton et al. (Fulton et al. 2015) identifican cuatro factores que contribuyen con la disminución de CO<sub>2</sub> derivado de las actividades de transporte. Estos factores incluyen la contribución combinada de vehículos de hidrógeno y electricidad mediante una rápida y profunda introducción de estas tecnologías en el mercado; mejora en la eficiencia de combustibles; cambios hacia modos masivos de transporte; y reducciones agresivas en el crecimiento del transporte. Sin embargo, al analizar las proyecciones de estas acciones para 2050 y 2075, Fulton y sus colegas concluyen que persiste la necesidad de “descabornizar” el 80% y el 50% respectivamente de la energía utilizada por el sector transporte, planteando la posibilidad de una mayor inclusión de los biocombustibles para lograrlo. Esta conclusión es consistente con la medida señalada por la Agencia Internacional de Energía (IEA por sus siglas en inglés) de duplicar la producción de biocombustibles generada en 2011 para el año 2020 como instrumento necesario para poder alcanzar el escenario en el que el cambio climático en la temperatura media de la tierra no excede los 2 °C (IEA 2012).

El desarrollo y uso de los biocombustibles líquidos en el sector transporte ha sido objeto de estudio como una solución potencial en la reducción de las emisiones de GEI globales del sector (Rocha et al. 2014; Gheewala 2011; Garcez & Vianna 2009). En 2015, la energía renovable aportó cerca del 4% del combustible mundial para transporte carretero, constituido en su mayoría por la aportación de biocombustibles líquidos (REN21 2016). La producción anual global de etanol aumentó de 94.5 billones en 2014 a 98,3 billones en 2015, mientras la producción anual global de biodiesel sufrió una ligera disminución, pasando de 30.4 a 30.1 billones para los mismos años, debido principalmente a la producción restringida en Argentina e Indonesia (REN21 2016). Existen varios factores involucrados en el potencial incremento de la utilización de biocombustibles para transporte entre los que destacan la capacidad que poseen (la cual debe ser probada) para mitigar las emisiones de GEI y sustituir o complementar a los combustibles fósiles (Silva et al. 2011; LPDB 2008); la oportunidad de desarrollo económico, sobre todo en medios rurales (Silva et al. 2011; LPDB 2008); su posible utilidad en la descentralización e independencia energética (LPDB 2008); la experiencia de las industrias de biocombustibles bien establecidas en Brasil, EUA y la Unión Europea (Scarlat et al. 2015; Solomon et al. 2015); y la implementación de políticas públicas de uso obligatorio de biocombustibles (Solomon et al. 2015).

Es necesario contar con información para poder tomar decisiones apropiadas en la evaluación ambiental del uso de biocombustibles como elemento de mitigación en las emisiones de GEI. Uno de los actores que mayor información requiere es el legislativo, específicamente en cuanto al desarrollo de políticas públicas. Éstas aparecen como la principal herramienta del incremento potencial en el uso de biocombustibles, ya que promover una industria bioenergética sin que se establezcan políticas públicas que favorezcan esta transición es sumamente complicado. Por esta razón, se ha incrementado el

desarrollo de estos instrumentos legislativos enfocados en general al uso de energías renovables y particularmente al uso de biocombustibles. De ahí que los cinco países líderes en la producción de biocombustibles en el mundo (Estados Unidos, Brasil, Alemania, Argentina y Francia para biodiesel y Estados Unidos, Brasil, China, Canadá y Tailandia para etanol (REN21 2016a)) tienen todas políticas de uso obligatorio de biocombustibles, resaltando así la importancia de su implementación.

A finales de 2015, 66 países en el mundo contaban con políticas públicas de uso obligatorio de energía renovable en el sector transporte activas entre 2010 y 2015 (REN21 2016). Dos de los órganos legislativos más importantes sobre biocombustibles se encuentran en la Unión Europea y Estados Unidos (EUA). La Dirección de Energía Renovable (RED por sus siglas en inglés) establece una política general sobre energía renovable en la UE. Actualmente requiere que se complete por lo menos el 20% de las necesidades energéticas mediante fuentes de energía renovables para el año 2020, y pide a todos los miembros asegurar que por lo menos el 10% de los combustibles para transporte provengan de fuentes renovables para el mismo año (Comisión Europea 2016). El Estándar de Combustible Renovable (RFS por sus siglas en inglés) es un programa de política nacional en EUA que requiere que cierto volumen de combustibles renovables sustituya o reduzca la cantidad de combustibles de petróleo para transporte, calefacción o aviación. El RFS busca alcanzar 36 mil millones de galones de combustibles renovables para 2022 (EPA 2016). En América Latina, Brasil (27.5% para etanol y 10% para biodiesel) y Argentina (5% para etanol y 10% para biodiesel) son los países que tienen el mayor porcentaje en la mezcla de uso obligatorio de biocombustibles (REN21 2016), mientras Colombia, Costa Rica, Ecuador, Guatemala, Jamaica, Panamá, Paraguay, Perú y Uruguay cuentan también con obligaciones de biocombustibles en la región (REN21 2016). En cuanto al caso de México, de acuerdo con el reporte Prospectiva de Energías Renovables 2015-2019 (Prospectiva de Energías Renovables 2015-2029 2015), no existen políticas de uso obligatorio de biocombustibles. Sin embargo, como se menciona en la sección 2.2.2, este tipo de instrumentos legislativos es determinante para promover de forma regulada el incremento del uso de biocombustibles en el territorio nacional.

Fulton y sus compañeros (Fulton et al. 2015) destacan que la elaboración de políticas públicas sobre biocombustibles debe tomar en cuenta la evaluación de los impactos ambientales y sociales durante su producción a gran escala como fuente de suministro de energía para el sector transporte, y que es necesario poner especial atención en tres elementos: 1) uso de la tierra que incluya aspectos ambientales y sociales, 2) uso de metodologías globalmente aceptadas para la cuantificación de las emisiones de GEI bajo un enfoque de ciclo de vida y 3) el desarrollo de tecnologías de bajo costo para la producción de biocombustibles. El presente estudio se enfoca en el segundo factor, al contribuir con el análisis de las emisiones de GEI y el consumo de energía para un sistema de producción de biodiesel de jatropha en México, empleando un enfoque de ciclo de vida. Este trabajo

contribuye a generar información que puede servir como herramienta de consulta y ser empleada por los diferentes actores involucrados con la promoción, producción e implementación de políticas públicas de biocombustibles en México. También, el estudio puede ser utilizado como punto de partida para futuras investigaciones relacionadas con biocombustibles, específicamente con biodiesel de *jatropha*.

El uso de los biocombustibles para transporte en el país es prácticamente nulo, por lo que la contribución que estos representan no aparece en el Balance Nacional de Energía 2014 (SENER 2014) ni en el Sistema de Información Energética (SENER 2016). Existen programas de investigación y desarrollo de biocombustibles en el país conducidos por entidades académicas y gubernamentales (Prospectiva de Energías Renovables 2015-2029 2015), sin embargo la carencia de políticas de uso obligatorio de biocombustibles retrasan considerablemente su implementación (Solomon et al. 2015). A pesar de esto, en México se está tratando de impulsar el aprovechamiento de los biocombustibles en el sector transporte. Hasta octubre de 2015 se habían otorgado 48 permisos para producción, comercialización y transporte de biocombustibles: 21 referentes a biodiesel, 24 a etanol anhidro y 3 para ambos combustibles. La producción de biodiesel en México se lleva a cabo mediante pequeños productores con lotes menores a los 500 litros por día. Los principales insumos para su fabricación son aceites vegetales provenientes de semillas de *jatropha*, higuera y aceite de palma; aceites vegetales usados (domésticos o industriales); y grasas animales (Prospectiva de Energías Renovables 2015-2029 2015).

De los insumos mencionados anteriormente, el estudio de la *jatropha* ha cobrado interés tanto en el país como en el mundo, debido a que la *jatropha* es una planta con la capacidad de desarrollarse en distintos tipos de tierra incluyendo degradadas, marginadas y tierras contaminadas. También, su contenido de aceite (entre 40% y 60%) es superior al de otros cultivos energéticos y presenta una buena tolerancia a sequías (Adil et al. 2015). La *jatropha* tiene el potencial para ser de utilidad al adquirir seguridad energética y restablecer tierras marginadas y degradadas; y puede contribuir al desarrollo rural mediante la descentralización de la producción energética y la creación de empleos en este medio (Adil et al. 2015). En México la plantación de *jatropha* con fines energéticos comenzó a considerarse desde 2007, y entre 2008 y 2011 se sembraron más de 8000 ha de *jatropha* en varios estados (Prospectiva de Energías Renovables 2012-2026 2012). Aunque debido a que los rendimientos fueron mucho más bajo de lo esperado muchos de los proyectos fueron cancelados (Eastmond et al. 2014). De acuerdo con García et al. podrían cultivarse en el país 3.2 Mha de *jatropha* siguiendo estrictos criterios de sustentabilidad (sembrándose en áreas donde los rendimientos sean altos y no se requiera irrigación, evitando áreas naturales protegidas y estableciendo nuevos cultivos energéticos sólo en tierras con bajo contenido de carbono como pastizales y tierras de pastoreo) para 2035, con la finalidad de suministrar materia prima a 29 plantas productoras de biodiesel y sustituir el 2.2% del

consumo de diesel fósil proyectado para ese año, completándose así una mitigación acumulada de 35 Mt de CO<sub>2</sub> equivalente. (García et al. 2015).

Existe también un gran potencial para que los países en desarrollo, que en su mayoría cuentan con condiciones naturales favorables para el cultivo de la materia prima necesaria en la producción de biocombustibles, así como con disponibilidad de tierra y agua, puedan incursionar en nuevos mercados y brinden oportunidades de desarrollo económico en el sector rural ofreciendo empleos con salarios justos y condiciones de trabajo adecuadas, y generando así un impulso en la economía nacional al reducirse el consumo de combustibles fósiles y con la posibilidad de exportar los biocombustibles que se generen (Silva et al. 2011).

Sin embargo los biocombustibles pueden generar impactos ambientales, económicos y sociales negativos. Monocultivo, extinción de la biodiversidad, degradación del suelo, agotamiento de agua, precios mayores para los usuarios respecto al de los combustibles fósiles, trabajo infantil, salarios bajos, relegación de las mujeres y condiciones de trabajo inadecuadas son algunos ejemplos de esto (Silva et al. 2011). Además de los criterios establecidos por García et al., la generación potencial de biodiesel de jatropha en México de forma ambientalmente sustentable requiere información respecto a los impactos ambientales ocasionados por las actividades de producción y uso a lo largo de su ciclo de vida. Ésta información será especialmente útil al comparar la posible participación del biodiesel de jatropha con su equivalente fósil o con biodiesel obtenido de materias primas diferentes (como aceite de palma, higuera y soja), diseñada para la reducción en las emisiones de GEI en la transición hacia una matriz energética independiente, diversificada y sustentable. Como se mencionó antes, el presente trabajo parte de un enfoque de ciclo de vida en el análisis de los impactos ambientales de la producción de biodiesel de jatropha, buscando así tomar en cuenta las actividades de todo el proceso, desde la obtención de la materia prima hasta que el biodiesel es utilizado, evitando la práctica común de no considerar las actividades previas a la adquisición de un producto ni lo que ocurre con él después de que es desechado. Por esta razón, la evaluación de los impactos ambientales de la producción de jatropha en México se completó empleando el análisis de ciclo de vida como herramienta de evaluación ambiental.

De las distintas herramientas que existen para la cuantificación de los impactos ambientales (Análisis de Impacto Ambiental, EIA por sus siglas en inglés (Židonienė & Kruopienė 2015; Cornejo Rojas et al. 2005), Modelo de Evaluación Ambiental Integrada (IEAM por sus siglas en inglés (Silva et al. 2011)) se seleccionó el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) como herramienta de evaluación ambiental para la producción de biodiesel de jatropha. La selección del ACV se realizó en base a los siguientes criterios: 1) el ACV aborda y evalúa los aspectos ambientales concretos y potenciales a lo largo del ciclo de vida de un producto o proceso tomando en cuenta la extracción u obtención de la materia prima, la producción, el uso, el reciclado y la disposición final que éstos tienen, 2) la Organización Internacional



de Estandarización (ISO por sus siglas en inglés) generalizó esta herramienta y definió sus líneas guía, 3) además de conducir las evaluaciones ambientales de forma cualitativa, el ACV permite realizar también evaluaciones cuantitativas, 4) dependiendo de la calidad y la cantidad de información con la que se cuente, el ACV puede adaptarse en gran medida a las condiciones locales donde se completa el estudio, y 5) ésta herramienta permite identificar áreas de mejora en cuanto a materiales y procesos en la generación de productos y servicios.

Existen varios estudios en la literatura que mediante el ACV han conducido evaluaciones ambientales para la producción de biodiesel proveniente de otras materias primas (Escobar et al. 2014; Souza & Seabra 2014; Nanaki & Koroneos 2012; Silva et al. 2011; Filson & Prasad 2006). La información de los impactos ambientales relacionados específicamente con el biodiesel de *jatropha* es más escasa. En la revisión se encontró con 5 estudios importantes de la producción de biodiesel de *jatropha* (Portugal-Pereira et al. 2016; Kumar et al. 2012; Achten et al. 2010; Ndong et al. 2009; Prueksakorn & Gheewala 2006). En México sólo existe un estudio que evalúa las emisiones de GEI de biocombustibles líquidos utilizando el ACV, el cual analiza las emisiones de GEI y el balance de energía del ciclo de vida de la producción de etanol a partir de caña de azúcar (García et al. 2011).

El presente estudio utiliza datos reales para el sistema principal obtenidos directamente de la empresa productora de biodiesel GAFISA establecida en Morelos, México, apoyo que se agradece significativamente, y sin el cual no se habría podido completar la investigación. Los resultados pretenden contribuir a la escasa información referente a la evaluación ambiental de la producción de biodiesel a partir de *jatropha* en México.

### 3.3 Objetivos

El objetivo principal de este estudio es cuantificar las emisiones de GEI y el consumo de energía ocasionados por la producción de biodiesel obtenido a partir de *jatropha* utilizando el ACV como herramienta. El análisis se lleva a cabo para las condiciones específicas de México, evaluando la producción de biodiesel en una fábrica en el estado de Morelos. Las categorías de impacto en las que se enfoca el estudio son emisiones de GEI y consumo de energía ocasionados por su producción debido a que son dos de los impactos que dependen en mayor medida del uso de combustible dentro de los impactos ambientales totales del sector transporte (Hawkins et al. 2012). Posteriormente, se analizan escenarios en los que se sustituye cierta cantidad de diesel fósil por biodiesel de *jatropha* para ser utilizado en el sector transporte mexicano, variando el porcentaje de contribución de biocombustible en la mezcla para identificar la posible mitigación de las emisiones de GEI. Los resultados relacionados con las emisiones de GEI serán empleados para analizar el potencial de mitigación generado por el uso de biodiesel en el sector transporte, considerando diferentes escenarios derivados de la implementación de políticas públicas que promuevan el uso de biodiesel en dicho sector, mientras los del consumo energético van a ser utilizados para

estimar la eficiencia del sistema de producción del biocombustible. Los resultados se dirigen a los actores vinculados con la planeación, la producción y el uso de este combustible, entre los que destacan legisladores, comunidad académica, productores y distribuidores de biodiesel y la comunidad en general.

## 4 Análisis de ciclo de vida

### 4.1 Descripción general

El Análisis de Ciclo de Vida (ACV) aborda y evalúa los aspectos ambientales, concretos y potenciales, a lo largo de todo el ciclo de vida de un producto o servicio; es decir, profundiza en las actividades de extracción y adquisición de materia prima, producción, utilización, reciclado y disposición final. El ACV es la recopilación y evaluación de las entradas, las salidas y los impactos ambientales de un sistema a través de su ciclo de vida. Esta herramienta fue generalizada por la Organización Internacional de Estandarización (ISO, por sus siglas en inglés), la que definió sus líneas guía (ISO 14040 2006). Actualmente esta herramienta, no sólo realiza las evaluaciones de forma cualitativa, sino que también analiza de forma cuantitativa los impactos ambientales de las cadenas productivas de los productos o servicios que se revisan. El proceso completo del ACV incluye cuatro etapas: definición de meta y alcance; análisis de inventario; evaluación de impacto; e interpretación. El proceso es iterativo y depende en gran medida de la calidad y de la exhaustividad de la información que se utiliza, y su plausibilidad es constantemente probada (ISO 14040 2006).

#### 4.1.1 Meta y alcance del estudio

La meta del estudio debe contener de forma clara y sin ambigüedades la aplicación perseguida por el análisis, las razones por las cuales el estudio se realiza, la audiencia a la que va dirigido y si se busca que los resultados sean utilizados en aseveraciones comparativas para ser presentadas públicamente (ISO 14040 2006). El alcance debe ser definido de forma adecuada con la finalidad de asegurar que la amplitud, la profundidad y el detalle del estudio sean compatibles y suficientes para abordar la meta establecida (ISO 14040 2006). El alcance debe tomar en cuenta los siguientes puntos:

- El sistema del producto o servicio a estudiar.
- Las funciones del sistema (o sistemas en el caso de estudios comparativos) del producto o servicio.
- La unidad funcional.
- Los límites del sistema
- Los procedimientos de asignación de productos.
- Las categorías de impacto seleccionadas y la metodología de evaluación de impacto que va a seguirse, así como la posterior interpretación que va a llevarse a cabo.
- Los requerimientos de datos.
- Consideraciones.
- Limitaciones.

- Los requerimientos de calidad para los datos iniciales.
- Si existe, tipo de revisión crítica.
- Tipo y formato del reporte requerido para el estudio.

#### 4.1.2 Análisis de inventario

El Inventario de Ciclo de Vida (ICV), es la etapa de recolección de datos dentro del ACV. El ICV es el recuento directo para todo lo involucrado en el sistema de interés. Consiste en el rastreo detallado de todos los flujos de entrada y de salida del sistema del producto o servicio, incluyendo materias primas o materiales, distintos tipos energía y agua, así como emisiones al aire, tierra y agua de sustancias específicas. Este análisis involucra abundantes unidades de procesos individuales en una cadena de suministros y requiere el rastreo de varias sustancias. El proceso para completar el análisis de inventario es iterativo. Por esta razón, mientras se recolectan los datos y se aprende más sobre el sistema, nueva información va a ser requerida y algunas limitaciones pueden ser identificadas. El cumplimiento de la meta del estudio va a depender en gran medida de la calidad y la cantidad de los datos con los que se cuente (ISO 14040 2006).

#### 4.1.3 Evaluación de impacto

El Análisis de Impacto del Ciclo de Vida (AICV) es la etapa del ACV que busca evaluar los impactos ambientales potenciales utilizando los resultados del ICV. Esta etapa asocia los datos del inventario con categorías de impactos ambientales específicas e indicadores con el objetivo de entender esos impactos. Sus principales elementos son: definición de categorías, clasificación, caracterización y valoración o importancia. El AICV incluye también tres elementos opcionales: normalización, agrupación y ponderación. Las categorías de impacto se seleccionan con el fin de describir los impactos causados por los productos o por los sistemas del producto (ISO 14040 2006). Existen varios métodos para catalogar y caracterizar el impacto del ciclo de vida de los flujos desde y hacia el entorno, lo que en ocasiones complica las comparaciones de distintos estudios de ACV. Otras variaciones en el AICV se dan por las diferentes elecciones de los límites del sistema, la unidad funcional, y el método específico del AICV. El AICV genera información que posteriormente es utilizada en la interpretación del ACV (ISO 14040 2006).

#### 4.1.4 Interpretación

La interpretación es la fase en la que los resultados del ICV y la evaluación de impacto son analizados en conjunto. Esta fase entrega resultados consistentes con la meta y el alcance definidos previamente y conduce a alcanzar conclusiones, explicar limitaciones y presentar recomendaciones. En la interpretación se observa que los resultados obtenidos durante el AICV están basados en un enfoque relativo y que indican los efectos ambientales potenciales, lo cual quiere decir que el ACV no predice los impactos reales en las

categorías de punto final ni la expansión de los límites y los márgenes de seguridad o riesgos (ISO 14040 2006). La interpretación permite elaborar un reporte comprensible, completo y consistente con los resultados del ACV, el cual puede servir como instrumento de consulta para los tomadores de decisiones (ISO 14040 2006).

Como se mencionó antes, los resultados de los ACV dependen en gran medida de la información que se utiliza respecto a la geografía y a los inventarios usados, así como de los límites del sistema analizado. Esto genera diferentes resultados del ACV para el mismo producto, lo que no siempre permite la comparación directa de las alternativas estudiadas desembocando en diversidad de interpretaciones, señalando así las debilidades de la herramienta. Sin embargo, la metodología del ACV puede resultar un instrumento sumamente útil en la evaluación de los impactos ambientales potenciales al utilizarse de forma correcta. Respecto a los biocombustibles, el ACV se utiliza para estimar los impactos positivos o negativos en todas las etapas durante su ciclo de vida, mide los posibles beneficios que estos tienen y justifica la selección de la alternativa más conveniente desde diferentes puntos de vista.

## 4.2 Análisis de ciclo de Vida en México

Existen en México bastantes esfuerzos para utilizar al ACV como herramienta en la evaluación de la sostenibilidad ambiental, sin embargo la mayoría se realizan como iniciativas individuales y aisladas, sin mucha comunicación y cooperación de quienes la utilizan. Hasta 2010, los estudios de ACV realizados por Academia y Unidades de Investigación se centraban en temas relacionados con el manejo de residuos. Después de ese año, comenzó a utilizarse en el estudio de sistemas energéticos, huellas de carbón e hídrica y sobre todo en el ámbito de construcción (Güereca et al. 2015).

El gobierno utilizó por primera vez el ACV en México en la parte final de la década de 1990 y a principios de la de 2000. Mediante el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), antes Instituto Nacional de Ecología, llevó a cabo investigaciones sobre manejo de residuos y empaquetamiento. Sin embargo las comunidades académicas y de investigación fueron las que comenzaron a utilizar el ACV más intensamente, realizando diversos estudios a partir del año 2000 de temas entre los que se encuentran plantas de tratamiento de aguas, (Güereca et al. 2015; Romero-Hernández 2004), celdas de combustible de hidrógeno (Dante et al. 2002), residuos biológicos (Güereca et al. 2015; Güereca et al. 2007; Güereca et al. 2006), manejo de residuos (Juárez-López 2008), opciones para la disposición final de teléfonos celulares (Padilla-Rivera 2010), residuos de construcción (Domínguez & Martínez 2007), alternativas para los residuos del barril de crudo (Pulido & Fernández 2007) y sistemas de empaquetamiento (Romero-Hernández et al. 2009). Santoyo Castelazo et al. (Santoyo-Castelazo et al. 2014) realizaron estudios del actual sistema energético en México mientras que García, Hernández-Gálvez, Güereca, y Juárez-López, y Vargas evaluaron alternativas energéticas tomando en cuenta a las

renovables (García et al. 2011; Hernández-Gálvez et al. 2012; Güereca & Juárez-López 2014; Vargas et al. 2014).

PEMEX y CONACYT apoyaron la creación en 2004 del Centro Mario Molina (CMM), una organización sin fines de lucro cuyo objetivo principal es vincular el conocimiento científico con la elaboración de políticas ambientales y energéticas, dentro de las cuales incluyen el pensamiento de ciclo de vida (Güereca et al. 2015). En 2008, el Instituto Mexicano de Normalización y Certificación (IMNC) publicó las normas NMX-SAA-14040-IMNC-2008 y NMX-SAA-14044-IMNC-2008, que son las versiones mexicanas de las normas ISO 14040 y 14044 respectivamente. También se publicó un libro enfocado al ACV para la construcción en México en 2012 (Suppen 2013). En el mismo año, la Comisión Nacional de Vivienda (CONAVI) y el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) ofrecieron una conferencia para presentar resultados de la investigación realizada sobre construcción sustentable, donde se mostraron varios estudios de ACV. En el sector industrial, las empresas que utilizan el ACV en mayor medida son CEMEX, CFE y PEMEX, mientras que algunas industrias mineras han invertido en metodologías para el Inventario de Ciclo de Vida y analizado varios procesos metalúrgicos. La asociación de calzado contrató al Centro de Análisis de Ciclo de Vida y Diseño Sustentable (CADIS) para capacitar y realizar estudios preliminares sobre ACV (Güereca et al. 2015).

Si bien ya existen antecedentes del uso del ACV como herramienta para evaluar la sostenibilidad ambiental en México, es necesario el desarrollo de inventarios de datos que representen materiales y procesos locales. Además, deben fortalecerse las redes de cooperación entre practicantes. Para que esto ocurra deben aumentar (en calidad y cantidad) los estudios científicos en los que se utiliza el ACV como herramienta, mientras la difusión de los trabajos se vuelve más intensa. La formación de recursos humanos y la enseñanza de la metodología son factores claves para que el pensamiento de ciclo de vida y el uso de la herramienta sean de utilidad en la toma de decisiones nacionales.

### 4.3 Software

Utilizar un software especializado simplifica considerablemente la realización de los ACV. Los programas contienen bases de datos de los ciclos de vida de varios productos y servicios, evitando así determinar los flujos de materiales y energía y las emisiones de cada insumo dentro del sistema analizado. Además posibilitan que las modificaciones (que ocurren frecuentemente debido al proceso iterativo que se conduce) se realicen de manera más sencilla. Los softwares también propician una comparación más uniforme de los resultados obtenidos y permiten que los analistas puedan validar de mejor manera las diferentes etapas del ACV. Para este estudio, el software elegido como herramienta de análisis es GREET (Gases de efecto invernadero, Emisiones Reguladas, y uso de Energía en el Transporte, por sus siglas en inglés), debido a que fue desarrollado específicamente para el sector transporte, a que cuenta con una amplia trayectoria de ACV alrededor del

mundo y a que posee una gran cantidad de información referente a biocombustibles dentro de su base de datos. Adicionalmente, GREET es un software cuya descarga y licencia son gratuitas y las personas responsables del programa se muestran bastante accesibles en cuanto a la solución de problemas y dudas.

GREET es un modelo ciclo de vida desarrollado para el transporte por el laboratorio Argonne, del Departamento de Energía de EUA. La primera versión se desarrolló como un modelo de hoja de cálculo multidimensional de Microsoft Excel en 1996. Desde entonces, el laboratorio ha actualizado y expandido el modelo (GREET 2014). GREET calcula las emisiones de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O, además de otros contaminantes críticos relacionados con transporte, mientras contabiliza los requerimientos de energía necesarios para completar los procesos. En el modelo se hace uso de los conceptos recursos, tecnologías, procesos, rutas y combinaciones de rutas para la producción de productos y servicios del sector transporte. En la figura 4.1 se presenta la pirámide de los conceptos utilizados dentro de GREET.



Figura 4.1 Representación esquemática de los conceptos que GREET utiliza. Fuente GREET 2014.

El modelo de cálculo de GREET es un modelo de entradas y salidas dentro de un conjunto ordenado de procesos llamado ruta. Las entradas pueden venir de distintas fuentes como son recurso primario, combinación de rutas, salida de un proceso previo y ruta sencilla. El tipo de fuente de donde se obtiene la entrada específica cómo van a calcularse las emisiones y los requerimientos de energía asociados a ella. Cuando una entrada se define como recurso primario, no se considera uso de energía ni emisiones previas. La energía asociada con la producción de una entrada se calcula de acuerdo a la Ecuación 4.1, en donde  $a(f)$  indica la cantidad de un recurso y  $E_{pr}$  se refiere a la energía previa necesaria para producir el recurso  $f$ .

#### Ecuación 4.1

$$E(f) = a(f)E_{pr}(f)$$

Las emisiones asociadas a la producción de entradas se calculan con la Ecuación 4.2, donde  $Em_{pr}$  son las emisiones previas generadas por la producción del recurso  $f$ ,  $s(f,t)$  indica la contribución a las emisiones del recurso de entrada en el proceso y la tecnología mediante la que se aprovecha,  $T$  se refiere a la lista de total de tecnologías para utilizar el recurso,  $Em_f(f,t)$  es el factor de emisión asociado al recurso  $f$  aprovechado por la tecnología  $t$ , y  $Em_{ad}$  indica las emisiones vinculadas a factores adicionales como fugas y gasificación de los recursos.

#### Ecuación 4.2

$$Em(f) = a(f)Em_{pr}(f) + a(f) \sum_{t \in T} s(f,t)Em_f(f,t) + Em_{ad}$$

### 4.3.1 Recursos

Los recursos son entradas y salidas de los procesos que se organizan en grupos, entre los que se encuentran combustibles de petróleo, gas natural, carbón y fósiles, recursos renovables, biomasa, nuclear, combustibles no fósiles, fertilizantes, pesticidas y gas natural renovable. Cada recurso puede pertenecer a uno o más grupos. Existen siete propiedades físicas que deben estar establecidas en los recursos dentro del modelo, éstas son: proporción de carbón, proporción de azufre, densidad, poder calorífico superior, poder calorífico inferior, estado de materia y valor en el mercado. Las proporciones de carbón y azufre se utilizan para calcular el balance de esos elementos, es decir, para calcular las emisiones de  $CO_2$  y  $SO_x$  como resultado de la combustión. Las proporciones de carbón y azufre deben estar especificadas para los combustibles. La densidad y los poderes caloríficos se utilizan para convertir entre masa, energía y volumen así como para la asignación de productos derivados. Los recursos pueden establecerse como primarios, lo cual quiere decir que no se contemplan emisiones y requerimientos de energía previos a su uso (GREET 2014).

### 4.3.2 Tecnología

El concepto tecnología se utiliza para evaluar las emisiones generadas por combustión o reacciones químicas dentro de cada proceso, y está definido por factores de emisión para los contaminantes críticos. Los contaminante críticos son: VOC, CO,  $NO_x$ ,  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $SO_x$ ,  $CH_4$ ,  $CO_2$ , y  $N_2O$  (GREET 2014). Cuando el factor de emisión  $SO_x$  no se encuentra definido de manera específica para una tecnología se calcula de acuerdo a las ecuaciones siguientes: Ecuación 4.3 para combustibles líquidos o gaseosos y Ecuación 4.4 para combustibles sólidos.



Ecuación 4.3

$$ef(f, SO_x) = \frac{\rho(f)}{hv(f)} \frac{sr(f)}{sr(SO_2)} \left[ \frac{kg}{J} \right]$$

Ecuación 4.4

$$ef(f, SO_x) = \frac{1}{hv(f)} \frac{sr(f)}{sr(SO_2)} \left[ \frac{kg}{J} \right]$$

Donde  $f$  indica el recurso para el cual se está calculando el factor de emisión;  $\rho$  es la densidad;  $hv$  es el poder calorífico;  $sr(f)$  es la proporción de azufre para el combustible del proceso y  $sr(SO_2)$  es la proporción de azufre del  $SO_2$ . La unidad usada en las proporciones de azufre es partes por millón (ppm).

Las ecuaciones 4.5 y 4.6 se utilizan para calcular los factores de emisión del  $CO_2$  para combustibles líquidos o gaseosos y para combustibles sólidos respectivamente.

Ecuación 4.5

$$ef(f, CO_2) = \frac{1}{cr(CO_2)} \left[ \frac{\rho(f)cr(f)}{hv(f)} - (ef(VOC)cr(VOC) + ef(CO)cr(CO) + ef(CH_4)cr(CH_4)) \right]$$

Ecuación 4.6

$$ef(f, CO_2) = \frac{1}{cr(CO_2)} \left[ \frac{cr(f)}{hv(f)} - (ef(VOC)cr(VOC) + ef(CO)cr(CO) + ef(CH_4)cr(CH_4)) \right]$$

Donde  $cr(f)$  es la proporción de carbón para el combustible que se está calculando y  $cr(VOC)$ ,  $cr(CO)$  y  $cr(CH_4)$  es el contenido de carbono en los contaminantes correspondientes. Se considera que el 100% del contenido de carbón y azufre en el combustible se emite a la atmósfera en forma de  $CO_2$  y  $SO_x$  al quemarse dentro del motor. Lo mismo aplica para todas las tecnologías relacionadas con el combustible específico.

### 4.3.3 Proceso

Los procesos son bloques construidos dentro del modelo donde ocurren casi todos los cálculos. Dentro, se pueden definir cuatro componentes para los cálculos de emisiones y requerimientos de energía asociadas al proceso: entradas, salidas, productos derivados y

emisiones adicionales, aunque únicamente las dos primeras son necesarias para realizar el cómputo. Existen dos clases principales de procesos en GREET, estacionarios y de transporte (GREET 2014). Los procesos estacionarios son los que transforman los materiales de entrada mediante el uso de energía y la generación de emisiones en productos finales o en otros productos que pueden ser empleados como entrada en los procesos siguientes. Los procesos de transporte trasladan materiales y productos entre procesos y generalmente indican que el proceso siguiente se lleva a cabo en otro tipo de instalaciones (GREET 2014). La figura 4.2 muestra el esquema de un proceso en GREET.

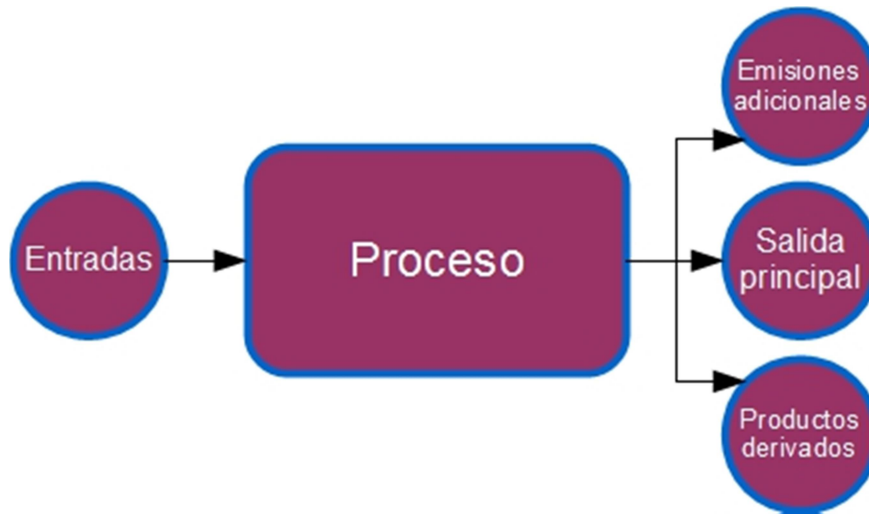


Figura 4.2 Esquema de los componentes que participan en los cálculos de emisiones y consumo de energía en los procesos del modelo.

La Ecuación 4.7 muestra la fórmula para calcular el balance de energía por unidad de salida asociada a un proceso.  $E(P)$  es la energía asociada a los productos derivados,  $E(f)$  se define en la Ecuación 4.1,  $l_r$  es la tasa de pérdidas definida para la salida principal,  $(f_0)$  es la salida del proceso, e  $I$  representa la lista del total de entradas en el proceso.

Ecuación 4.7

$$E_b = \frac{E(I) - E(P)}{a(f_0)(1 - l_r(f_0))}$$

en la cual

Ecuación 4.8

$$E(I) = \sum_{f \in I} E(f)$$

de igual manera, para calcular las emisiones en cada proceso:

Ecuación 4.9

$$Em_b = \frac{Em(I) - Em(P) + Em_{ad}}{\alpha(f_o)(1 - l_r(f_o))}$$

donde  $Em_{ad}$  son las emisiones adicionales anotadas por el usuario, generalmente asociadas con pérdidas, mientras  $Em(P)$  son las emisiones atribuidas a los productos derivados.

#### 4.3.4 Rutas

Las rutas son conjuntos de procesos representados dentro del modelo como diagramas que siguen una secuencia previamente establecida para la producción de un producto o servicio. Los procesos en las rutas son ordenados y se enlazan entre sí mediante conectores que indican la dirección del flujo de materiales. Para realizar los cálculos de requerimientos de energía y emisiones, la salida de cada proceso se transforma a una unidad equivalente denominada unidad funcional para que los cálculos se efectúen respecto a ella, los resultados homogéneos de todos los procesos se suman para tener el resultado total de la ruta (GREET 2014). La figura 4.3 muestra el esquema de una ruta.

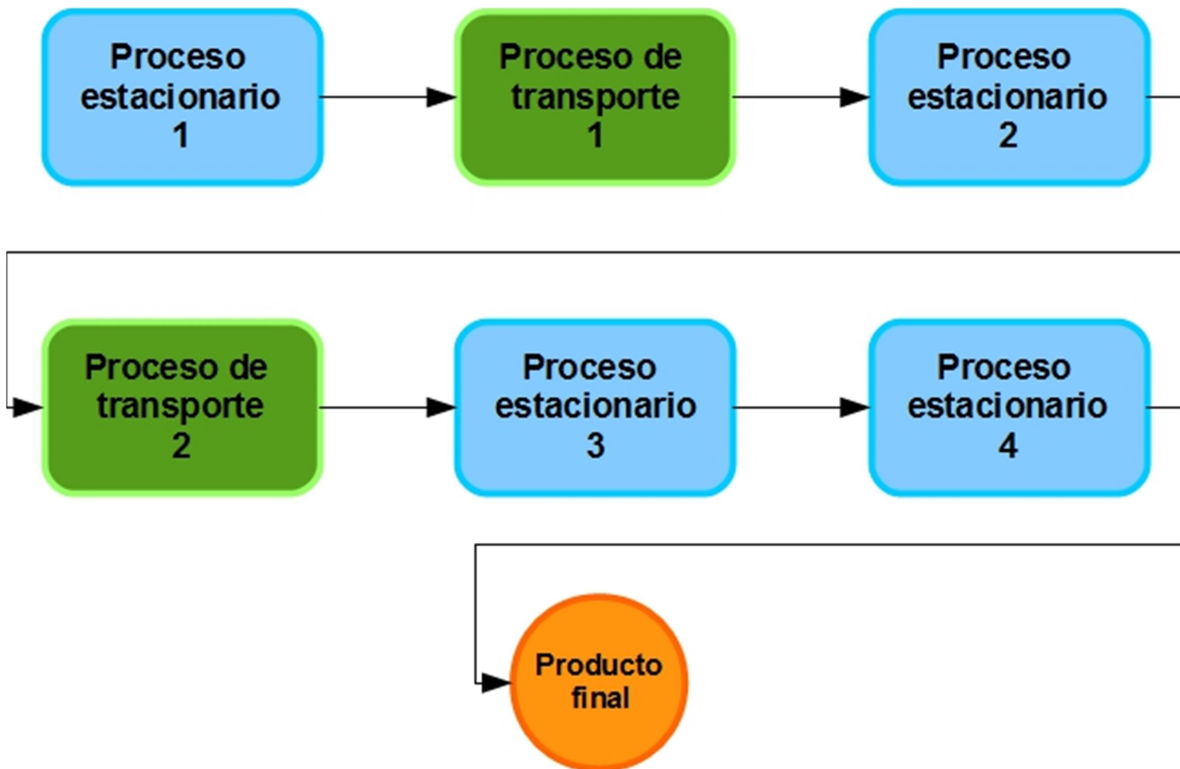


Figura 4.3 Esquema de ruta dentro del modelo.

Existen en GREET dos clases de combustibles básicos para vehículos con motores de combustión interna: gasolina (vehículos de ignición por chispa) y diesel (vehículos de ignición por compresión). Para ambos tipos de combustibles, existen un factor denominado economía del combustible ( $ec$ ) y un factor de emisiones como entradas del modelo. Cuando se utiliza un combustible no básico, el factor  $ec$  y el factor de emisiones se calcula con un factor de escala con base al tipo de combustible (gasolina o diesel) correspondiente, de acuerdo al tipo de ignición del combustible utilizado (GREET 2014). La fórmula para calcular la energía de operación del vehículo por unidad de distancia viajada es:

Ecuación 4.10

$$e_{op} = \frac{\sum_{f \in F} s(f) hv(f)}{ec} \left[ \frac{J}{km} \right]$$

donde  $F$  son todos los combustibles en la mezcla,  $s(f)$  es la aportación volumétrica de cada combustible, y  $hv$  es el poder calorífico del combustible.

## 5 Metodología

Como se mencionó en el capítulo 4, el ACV es la recopilación y evaluación de las entradas, las salidas y los impactos ambientales potenciales del sistema de un producto o servicio a través de su ciclo de vida (ISO 14040 2006). Se utiliza para identificar oportunidades de mejora en el desempeño ambiental de productos o servicios; brindar información a tomadores de decisiones; seleccionar indicadores ambientales relevantes; y puede ser usado con fines publicitarios. En el presente estudio se seleccionó esta herramienta para llevar a cabo la evaluación de los impactos ambientales potenciales de la producción de biodiesel utilizando *jatropha* como materia prima. La selección se debe a las ventajas que ofrece el enfoque de ciclo de vida en el que se basa el ACV, entre las que se encuentra una evaluación ambiental desde una perspectiva global que incluye todas las etapas de la cadena de suministro de un producto durante su ciclo de vida, desde la extracción de la materia prima hasta la disposición final del mismo. A través de este análisis es posible identificar áreas de mejora en cuanto a materiales y procesos en la generación de productos y servicios, lo que puede conducir a modificar el sistema productivo con la finalidad de examinar opciones que permitan reducir o controlar los impactos ambientales y el consumo de energía.

El presente estudio se completó siguiendo los lineamientos establecidos por la Organización Internacional de Estandarización (ISO por sus siglas en inglés) en las normas ISO 14040/14044, donde se define las cuatro fases que incluye el ACV: 1) definición de meta y alcance del estudio, 2) análisis de inventario, 3) evaluación de impacto, e 4) interpretación. El capítulo presente está dedicado a la descripción de las características del ACV que se condujo en este estudio. A continuación, se presenta información de cada una de las etapas observadas durante el ACV y las consideraciones tomadas.

### 5.1 Meta y alcance

El objetivo del ACV es cuantificar las emisiones de GEI y el consumo de energía asociados a la producción de biodiesel obtenido a partir de *jatropha*, utilizando el análisis de ciclo de vida como herramienta de evaluación. Las emisiones de GEI son caracterizadas en kg de CO<sub>2</sub> equivalente, en tanto que el consumo energético que incluye los insumos y la energía necesarios para completar el proceso es cuantificado en MJ, ambos calculados por unidad funcional, la cual ha sido definida como una tonelada de biodiesel. Los resultados relacionados con las emisiones de GEI serán empleados para analizar el potencial de mitigación generado por el uso de biodiesel en el sector transporte, considerando diferentes escenarios derivados de la implementación de políticas públicas que promuevan el uso de biodiesel en dicho sector. Los resultados del consumo energético van a ser utilizados para

estimar la eficiencia del sistema de producción del biocombustible. Tanto la cuantificación de las emisiones de GEI como el consumo de energía serán evaluados utilizando el caso de estudio de México, específicamente en el estado de Morelos en donde se ubica una planta productora de biodiesel que utiliza *jatropha* como materia prima.

Con base en los resultados arrojados de la revisión literaria, es posible concluir que la información de los estudios de ACV de la producción de biodiesel es escasa. La mayor parte de la información incluye estudios de materias primas diferentes a la *jatropha* (Escobar et al. 2014; Souza & Seabra 2014; Nanaki & Koroneos 2012; Silva et al. 2011; Filson & Prasad 2006), y los estudios de evaluaciones de ACV de biodiesel obtenido a partir de *jatropha* son menos frecuentes. En la revisión se encontró con 5 estudios importantes de la producción de biodiesel de *jatropha* (Portugal-Pereira et al. 2016; Kumar et al. 2012; Achten et al. 2010; Ndong et al. 2009; Prueksakorn & Gheewala 2006). De la información disponible se identificó que en México existe únicamente un estudio que evalúa las emisiones de GEI de biocombustibles líquidos utilizando el ACV como herramienta, el cual evalúa las emisiones de GEI y el balance de energía del ciclo de vida de la producción de etanol a partir de caña de azúcar (García et al. 2011). Sin embargo, como se explica en la sección 2.2.2, de acuerdo a la LPDB (LPDB 2008) éste tipo de información es necesaria. Específicamente, en cuanto a la reducción de emisiones de GEI la ley establece en su artículo 1 fracción IV que el uso de biocombustibles procurará su reducción de acuerdo a los instrumentos internacionales de los tratados de los cuales México forma parte. La ley establece también, la necesidad de implementar instrumentos y acciones que puedan impulsar el desarrollo sustentable a lo largo de la cadena de suministro de la producción de biodiesel en los artículos 15 y 17; los requerimientos que deben tener las herramientas utilizadas en la evaluación de proyectos en equilibrio con el medio ambiente en el artículo 19 fracciones IV y V; y la necesidad de coordinar investigación que permita establecer los lineamientos para la integración del Programa Nacional para la Investigación Científica y Tecnológica en Materia de Insumos para Bioenergéticos con la finalidad de establecer criterios que favorezcan la administración de los recursos naturales relacionados con la producción de biodiesel, plasmada en el artículo 21.

De acuerdo al contexto legislativo mencionado, los resultados del presente estudio van a contribuir a la generación e integración de información que será de utilidad para analizar tanto la producción de biodiesel, como el potencial efecto de mitigación en las emisiones de GEI derivados de su uso en el sector transporte mexicano, utilizando el ACV como herramienta de evaluación, la cual es reconocida internacionalmente como instrumento integrado en la legislación de la Unión Europea (Sustainability criteria 2016) y de Estados Unidos (EPA 2016).

La etapa de evaluación de impacto se llevó a cabo empleando el software GREET (Gases de efecto invernadero, Emisiones Reguladas, y uso de Energía en el Transporte, por sus siglas en in inglés) en la versión GREET.net 2015 (Argonne 2015). Este software se

seleccionó debido a que fue desarrollado específicamente para el sector transporte, considerando diferentes opciones de combustibles incluyendo la producción de biodiesel a partir de jatropha. Como se explica en la sección 5.2.1, la información disponible en la base de datos de GREET se adaptó para el caso de México.

### **5.1.1 Descripción y función del sistema referencia**

El ACV del presente estudio, evalúa un sistema que incluye la producción de biodiesel de jatropha en el Estado de Morelos, México.

### **5.1.2 Límites del sistema**

Los límites del sistema definen los procesos unitarios que están incluidos en el sistema producto (ISO 14040 2006). El sistema analizado incluye cuatro etapas cuyas consideraciones se describen en la sección 5.1.5. Como se muestra en la figura 5.1, el proceso de producción de biodiesel se completa mediante las etapas de cultivo de jatropha, extracción de aceite, transesterificación y el transporte intermedio entre las etapas que lo requieren. Las flechas de color verde en la figura señalan productos que podrían ser recuperados en distintas etapas del sistema pero que no son contempladas en el escenario base. La plantación de jatropha obedece a un sistema de producción de baja intensidad, mientras que la generación de biocombustible se realiza mediante un proceso tradicional descrito ampliamente en la literatura (Kumar et al. 2012; Achten et al. 2008), el cual ha sido adaptado para las condiciones de México, con base a la información obtenida de la empresa productora de biodiesel en Morelos.

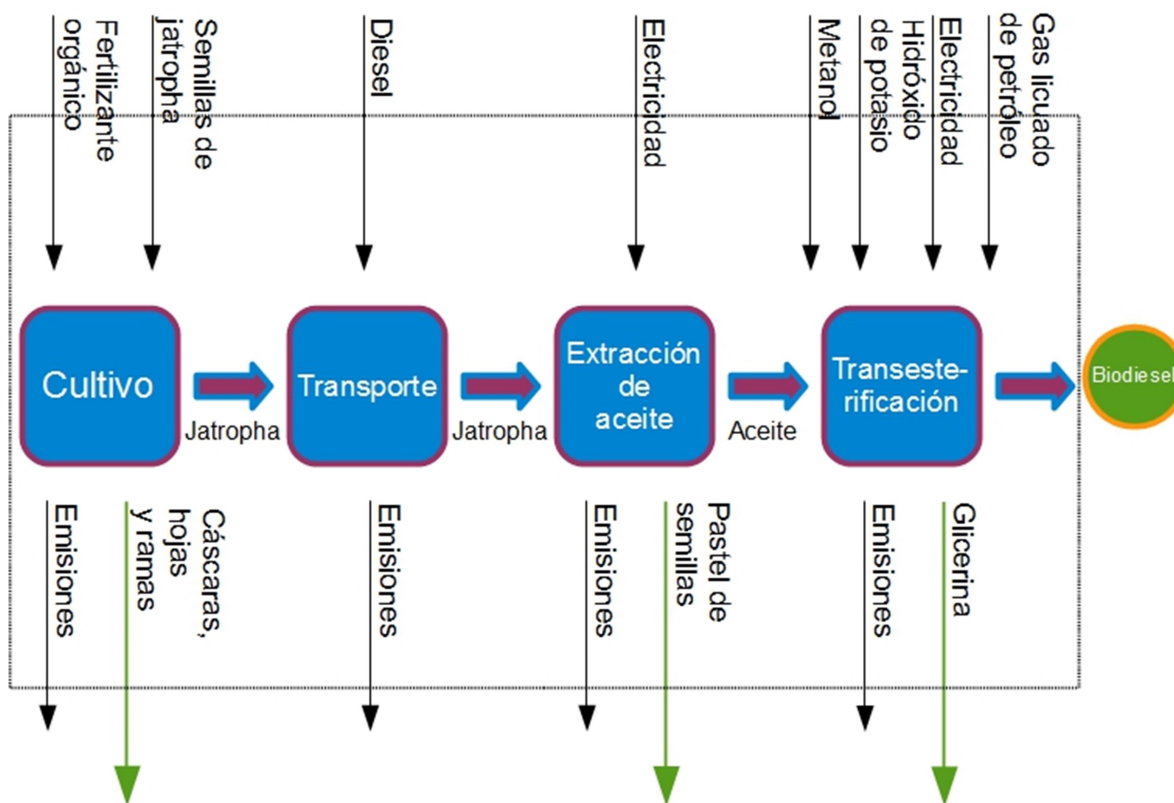


Figura 5.1 Límites del sistema.

### 5.1.3 Unidad funcional

La unidad funcional, es de acuerdo a la norma ISO 14040 (2006) una medida de la función desempeñada por el sistema producto. La función principal considerada en este estudio es la producción de biodiesel utilizando semillas de jatropha como materia prima. Justificado por esta función, la unidad funcional se estableció como 1 tonelada de biodiesel producido, la cual ha sido previamente utilizada por otros autores (Portugal-Pereira et al. 2016; Kumar et al. 2012), y su uso en el presente estudio va a permitir la comparación de los resultados con la información disponible en la literatura.

### 5.1.4 Categorías de impacto y metodología de evaluación

Los dos indicadores empleados en este estudio son el potencial de calentamiento global y el consumo de energía, derivados de la producción de biodiesel de jatropha. En el contexto nacional, existe la meta de generar el 35% de la energía a partir de fuentes limpias para el año 2024 (Prospectiva de Energías Renovables 2015-2029 2015), y para poder incrementar la participación del uso de biocombustibles en el cumplimiento de este objetivo, es necesario generar información que contribuya a la implementación de lo establecido en la LPDB, que como se mencionó en la sección 5.1, busca la integración de información para



garantizar en lo general un desarrollo sustentable, y en lo particular un desarrollo ambientalmente sustentable en la generación de bioenergéticos. En este sentido y haciendo uso de los indicadores antes mencionados, el presente trabajo busca contribuir a la generación e integración de información relacionada con la sustentabilidad ambiental de la producción de biodiesel, utilizando específicamente *jatropha* como materia prima, debido a que es un insumo que no compite directamente con la producción de alimentos y puede contribuir a disminuir el impacto ambiental relacionado con el uso de la tierra (Kumar et al. 2012; Achten et al. 2008). Aunque se reconoce que el impacto ambiental por el uso de la tierra es de suma importancia para el análisis de la producción de biocombustibles (Portugal-Pereira et al. 2016; Achten et al. 2008), este trabajo no analizó este indicador debido a la escasez de información al respecto.

Aunado al cambio en el uso de la tierra, es necesario analizar diferentes impactos ambientales derivados de la producción de biodiesel. Sin embargo, el trabajo que se realizó en el presente estudio se enfoca en analizar la contribución que el biodiesel de *jatropha* puede llegar a tener tanto en la mitigación del potencial de calentamiento global como en la reducción del consumo de energía, identificando áreas de mejora dentro del sistema. Esto debido a la significativa aportación que el sector transporte tiene respecto a las emisiones antropogénicas de GEI y el calentamiento global a nivel internacional, y el importante impacto que los sistemas naturales y humanos están experimentando a causa de ellos; y por la relación directa que el consumo de energía tiene con esta problemática. Además, en México los bioenergéticos deben servir como sustento en la reducción de emisiones de GEI, en el marco de los tratados de los que el país es parte, contemplados en el artículo 1 fracción IV de la LPDB. Ambos indicadores se han evaluado de acuerdo a la metodología desarrollada por el Argonne National Laboratory. Para el calentamiento global, el cálculo se realiza tomando en cuenta las emisiones de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O, agrupándolas en emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente mediante los factores establecidos por el IPCC de 1, 30 y 265 respectivamente (IPCC 2013). En cuanto al consumo de energía, el cálculo se completa al sumar el contenido energético de los materiales y productos utilizados, y la energía empleada en la producción de biodiesel (GREET 2014) Más información sobre el modelo GREET y la forma de estimar las emisiones de GEI y el consumo de energía se muestra en la sección 4.3.

### 5.1.5 Consideraciones

Las consideraciones brindan información sobre el contexto en el que el ACV se conduce. Éstas deben tomarse de acuerdo a la meta y el alcance previamente definidos y aplicarse consistentemente a lo largo del estudio. Describir y aplicar claramente las consideraciones en la evaluación ambiental es un aspecto crítico en la validez de los resultados. A continuación se muestran las consideraciones tomadas en la realización del ACV de la producción de biodiesel de *jatropha*.

### 5.1.5.1 Instalaciones de producción

Se omite contabilizar el impacto ambiental de la fabricación y el mantenimiento de maquinaria e instalaciones de producción durante el ciclo de vida de la producción de biodiesel de *jatropha*, debido a que no se cuenta con información al respecto. Sin embargo, se recomienda que trabajos futuros incluyan la contribución que estos tienen.

### 5.1.5.2 Fertilización de *jatropha*

De acuerdo a la información proporcionada por la empresa, durante la etapa de cultivo considerada en este estudio se utilizaron 1100 kg de composta orgánica por hectárea como fertilizante para el cultivo de *jatropha*. Debido a la falta de información en la base de datos de GREET se seleccionó información de la literatura, específicamente del trabajo llevado a cabo por Boldrin y sus colegas (Boldrin et al. 2010). Estos autores, condujeron un ACV de composta elaborada a partir de residuos de jardín (CRJ), la que conforme a la información obtenida de la empresa productora, tiene una composición muy similar a la composta que se utiliza como fertilizante en las tierras de *jatropha* para el sistema analizado en este estudio. La información que se utilizó del trabajo de Boldrin et al. (2010) corresponde a los datos presentados en el análisis de inventario, en particular a los flujos descritos en la tabla 6 de su estudio. En dicha tabla se indica que se requieren 1.48 toneladas de residuos de jardín para producir una tonelada de composta y se consumen 4.08 litros de diesel para completar el proceso. También, se señala que la producción y utilización de CRJ propicia la emisión a la atmósfera de 4.50 kg de CH<sub>4</sub>, 0.27 kg de N<sub>2</sub>O y 0.07 kg de CO. Aunque existen emisiones de CO<sub>2</sub>, no se incluyen dentro de los límites del sistema del presente estudio por tratarse de CO<sub>2</sub> biogénico. Estos valores se multiplicaron por los 1100 kg de fertilizante orgánico que utilizan por hectárea en el cultivo de *jatropha*, y se incluyeron en la etapa de cultivo dentro del programa GREET para poder cuantificar los impactos ambientales del sistema por unidad funcional. La recolección y el transporte de los residuos no son considerados dentro del sistema de estudio puesto que estos parámetros varían considerablemente de un análisis a otro y contribuyen con un porcentaje muy bajo respecto a los impactos ambientales totales, mientras el consumo energético que se asumió para la producción de la CRJ es típico de las plantas de compostaje (Boldrin et al. 2010). El sistema de producción de la CRJ se muestra en la figura 5.2.

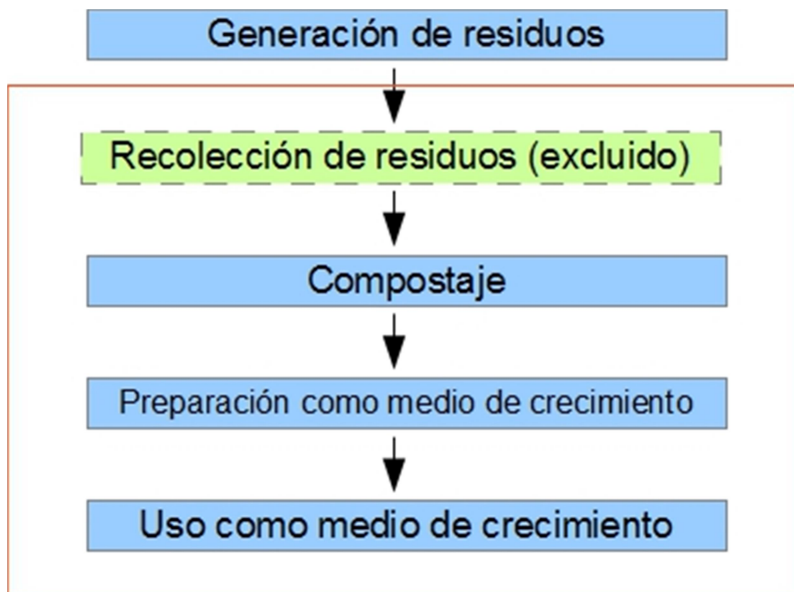


Figura 5.2 Límites del sistema de la producción de composta.

### 5.1.5.3 Plantación de *jatropha*

De acuerdo a la información obtenida de la empresa, el establecimiento de la plantación se realizó mediante la siembra de pequeñas plantas previamente preparadas con este propósito. Las plantas se ubicaron de forma manual en una red cuadrada con una distancia de 3 metros entre cada una de ellas, colocándose así 1100 plantas por cada hectárea. La fertilización se realiza una vez al año, recibiendo cada planta 1 kg de composta orgánica. Si la planta enferma, el tratamiento que recibe también es orgánico. En caso de necesitarlo, los arbustos de *jatropha* reciben 2 litros de agua al mes de forma manual, aunque generalmente estos únicamente utilizan el agua que reciben de la lluvia. La madurez de la fruta se alcanza alrededor de 90 días después de que el arbusto floreció, y se reconoce cuando su color cambia de verde a amarillo oscuro, sin embargo debido a que las frutas no maduran al mismo tiempo, la cosecha debe realizarse a intervalos regulares. La recolección de la fruta ocurre entre septiembre y enero y se realiza de forma manual. Se obtiene en promedio 1 kg de fruta y 0.44 kg de grano seco por arbusto, lo que equivale a 1100 kg de fruta y 484 kg de grano seco por hectárea. La separación del grano se lleva a cabo conforme se cosecha la fruta, es decir que ocurre también entre septiembre y enero, y se realiza igualmente manual. La información sobre el rendimiento de grano seco por hectárea es un asunto sumamente complicado, debido principalmente a que el monitoreo sistemático de cultivos comenzó a realizarse recientemente, y existe por esto en la literatura un amplio rango de valores de rendimiento que van desde 0.4 hasta 12 toneladas de grano seco por hectárea por año (Portugal-Pereira et al. 2016; Kumar et al. 2012; Achten et al. 2010; Ndong et al. 2009; Achten et al. 2008; Prueksakorn & Gheewala 2006). El rendimiento de las tierras cultivadas

que se estudian en este ACV, 0.484 toneladas por hectárea por año, es particularmente pobre, y esto se debe en mayor medida a las prácticas de cultivo con las que se procede: orgánicas, manuales y sin materiales de apoyo para la siembra y cosecha de la jatropha. Por la misma razón, el consumo energético es bajo.

Debido al establecimiento manual de la plantación de jatropha y su cosecha, no se considera ningún uso energético asociado con estas actividades. La fruta de jatropha, contiene dentro de la cáscara una semilla, dentro de la semilla y protegido por una cascarilla se encuentra el grano que se utiliza como materia prima para la extracción de aceite. Tanto la cáscara como la cascarilla pueden ser utilizados con fines energéticos (Kumar et al. 2012), sin embargo no son considerados en esta evaluación.

#### **5.1.5.4 Extracción de aceite**

Una vez que la semilla se encuentra sin cáscara, se coloca durante 12 horas bajo la sombra con la finalidad de deshidratarla, para luego quitarle la cascarilla más fácilmente. Ambas operaciones se llevan a cabo manualmente, y al terminar se obtienen alrededor de 484 kg de grano seco por ha. Utilizando un moto-extractor de 0.373 kW con capacidad para procesar 16 kg de semilla por hora, el grano seco y sin cascarilla se comprime, obteniéndose aproximadamente 0.35 L de aceite y 0.18 kg de pasta de semillas por cada kg de grano seco. La electricidad para este proceso se obtiene de la red del Sistema Eléctrico Nacional.

#### **5.1.5.5 Producción del biodiesel**

El aceite de jatropha se transforma en Éster Metílico de Jatropha (EMJ), es decir biodiesel, mediante transesterificación convencional utilizando metanol e hidróxido de potasio (KOH) como catalizador alcalino (Whitaker & Heath 2009). La transesterificación genera también glicerina y la eficiencia del proceso alcanza 80% en masa como tasa de conversión. El aceite de jatropha se mezcla en un reactor con 20% en masa de metanol y es transesterificado por el 0.01% en masa de KOH.

La reacción ocurre a 60 °C y presión atmosférica. La temperatura se alcanza gracias a un boiler que transfiere energía al reactor mediante un intercambiador de calor durante una hora, el combustible que se utiliza es gas licuado de petróleo. Debido al uso de un compresor, una bomba, un moto-reductor y una centrífuga se consumen 18.65 kWh de electricidad que se obtienen del Sistema Eléctrico Nacional. Por cada kg de aceite que se transesterifican se obtienen 0.8 kg de biodiesel y 0.2 kg de glicerina.

#### **5.1.5.6 Pesticidas e insecticidas**

Se reporta que la jatropha presenta pocas plagas y enfermedades, además de que es altamente resistente a ellas cuando las contrae (Adil et al. 2015; Achten et al. 2008), sin embargo la salud de la planta puede verse comprometida cuando se domestica y se cultiva

con fines comerciales (Achten et al. 2008). En el sistema evaluado, la jatropha presenta dos plagas: araña roja y pulgón, las cuales se combaten mediante un tratamiento orgánico. No obstante, debido a la escasez de datos referentes al tratamiento orgánico, el uso de pesticidas e insecticidas no se incluyen en el análisis.

#### 5.1.5.7 Transporte

De acuerdo a la información obtenida por la empresa, se recorre una distancia de 35 km utilizando una camioneta de una tonelada para transportar la semilla de jatropha desde las tierras de cultivo hasta las instalaciones de extracción de aceite y transesterificación. El transporte del biodiesel hacia los puntos de venta no se considera puesto que las distancias pueden variar de forma significativa y no se cuenta con información al respecto.

#### 5.1.5.8 Electricidad

Como se mencionó en la sección 5.1.5, la generación de la electricidad consumida en el sistema se ajustó a las condiciones específicas de México. GREET permite elegir la tecnología con la que la electricidad se genera, por lo que un módulo de producción de energía eléctrica fue creado dentro del programa para abastecer las etapas de extracción de aceite (en la compresión de los granos) y transesterificación (durante el mezclado de la reacción). Mediante datos de la Agencia Internacional de Energía para 2012 (IEA 2016b) se elaboró una matriz de generación de electricidad sin distribuir. Los porcentajes de generación mexicanos para ese año utilizados en GREET son: gas 53.86%, petróleo 18.30%, carbón 11.12%, hidroenergía 10.38%, nuclear 2.85%, geotérmica 1.90%, eólica 1.20%, biocombustibles y desperdicios 0.38% y fotovoltaica 0.02%. El valor de las pérdidas en la generación eléctrica que reporta la IEA, 14.34%, se utilizó para definir la eficiencia en el módulo de generación eléctrica formado en GREET.

#### 5.1.5.9 Pasta de semillas

La pasta o pastel de semillas es un producto derivado que se recupera en la fase de extracción de aceite. Este producto puede utilizarse como alimento para animales (no todas las especies de jatropha pueden ser usadas con este propósito debido a su toxicidad), y como fertilizante orgánico por su alto contenido nutricional (Portugal-Pereira et al. 2016). La pasta de semillas puede utilizarse también como biopesticida e insecticida, así como para producir biogás. El promedio del contenido de proteínas crudas es de 58.1% en masa y su contenido energético bruto promedio es de 18.2 MJ/kg (Achten et al. 2008). En el sistema analizado, la pasta de semillas se usa para producir pellets, sin embargo como su utilización aún no es consistente, no se toma en cuenta para el caso base. Con la finalidad de ver cómo influyen algunas de las consideraciones en los resultados del estudio, se llevó a cabo un análisis de sensibilidad en el que se definieron diferentes escenarios. En uno de ellos se incluye la recuperación de la pasta de semillas como producto derivado debido a las

características energéticas y nutricionales que posee, las cuales posibilitan que pueda utilizarse de distintas maneras. Los resultados de dicho análisis se encuentran en la sección 6.4.3. De la misma forma, no se considera como parte del sistema en el escenario base la utilización de biomasa derivada de la producción de biodiesel: cáscaras de la fruta, hojas y restos del arbusto procedentes de podarlos no se toman en cuenta en la asignación de cargas ambientales del sistema.

#### **5.1.5.10 Glicerina**

En la cadena de producción de biodiesel, se produce también glicerina. En algunas publicaciones (Kumar et al. 2012; Ndong et al. 2009; Prueksakorn & Gheewala 2006) se utiliza el método de distribución de cargas para tomarla en cuenta en la acreditación el sistema. En el sistema analizado en este estudio, se producen 0.2 kg de glicerina por cada kg de biodiesel, sin embargo este subproducto no es considerado parte del escenario definido como caso base. La glicerina puede utilizarse como materia prima en varios procesos industriales y presenta una oportunidad de mercado para los productores de biodiesel. Por esta razón, la consideración de la glicerina en la distribución de cargas ambientales se incluye en uno de los escenarios del análisis de sensibilidad, cuyos resultados están descritos en la sección 6.4.3.

#### **5.1.6 Limitaciones**

El ACV aborda únicamente los aspectos ambientales especificados en la meta y el alcance del estudio, por lo que los resultados de esta investigación son válidos bajo las consideraciones previamente establecidas. El impacto ambiental en el cambio en el uso de tierra derivado del establecimiento de cultivos con la finalidad de generar de combustibles debe ser analizado, sin embargo por falta de información, este indicador no ha sido considerado en esta evaluación. Se reconoce que es necesario evaluar otros impactos ambientales además de los impactos considerados en el presente estudio, sin embargo como se menciona en la sección de conclusiones y recomendaciones, el trabajo aquí realizado puede ser empleado como punto de partida para evaluaciones futuras enfocadas a la cuantificación de estos y otros impactos ambientales.

#### **5.1.7 Audiencia a la que está dirigido el estudio**

El presente estudio busca contribuir a la escasa información que existe sobre la evaluación de impactos ambientales por la generación de biocombustibles en México, considerando un enfoque de ciclo de vida. El trabajo se enfoca específicamente en la producción de biodiesel utilizando jatropha como materia prima y los resultados se dirigen a los actores vinculados con la producción y el uso de este combustible. Los actores mencionados incluyen: legisladores, comunidad académica, productores y distribuidores de biodiesel y la comunidad en general. Los resultados de este trabajo pueden ser utilizados en el sector

legislativo mexicano, en particular con base en lo establecido por la LPDB, dentro de la Red Nacional de Información e Investigación en materia de Insumos, la cual busca vincular y fortalecer la investigación científica y el desarrollo tecnológico para la administración de los recursos naturales asociados a la producción de bioenergéticos y su desarrollo ordenado (LPDB 2008). Los resultados pueden servir también a éste sector en el análisis de los impactos ambientales de los biocombustibles para el sector transporte mexicano y en la elaboración de nuevas políticas públicas respecto a su desarrollo e implementación. El sector académico puede utilizar el presente estudio como guía para el análisis de otros impactos ambientales y como fuente de información en nuevos trabajos conducidos en otros países de América Latina; mientras el sector industrial, específicamente los productores de biodiesel pueden utilizarlo como herramienta de información con el objetivo de reducir el impacto ambiental y el consumo de energía en la producción del combustible. La información generada en este estudio les permite a los sectores académico, legislativo e industrial, emplearlo como referencia con la finalidad de comunicar a la comunidad en general la importancia de analizar el uso de los biocombustibles.

## **5.2 Análisis de inventario**

El análisis de inventario es la fase del ACV que agrupa y cuantifica las entradas y las salidas para la generación de un producto o servicio a lo largo de su ciclo de vida. Durante esta etapa se recopila la información necesaria para conducir la evaluación siguiendo un proceso iterativo (ISO 14040 2006).

### **5.2.1 Fuentes de información del sistema primario y secundario**

Los resultados de los ACV dependen en gran medida de la información que se utiliza respecto a la geografía y a los inventarios usados, así como de los límites del sistema analizado. En este estudio, toda la información referente al sistema primario, es decir los datos relacionados con las prácticas agrícolas, la extracción del aceite, el transporte y la producción del combustible fueron obtenidos directamente con la empresa dedicada a la fabricación de biodiesel de *jatropha*. Respecto a los flujos del sistema secundario (uso de químicos, electricidad y gas licuado de petróleo empleados durante la extracción de aceite y la transesterificación), la información se obtuvo de la base de datos de GREET. Las emisiones de GEI por el uso de composta orgánica fueron obtenidas de la literatura (Boldrin et al. 2010) como se explica en la sección 5.1.5.2. Con datos obtenidos de la IEA, se llevó a cabo la modificación de los procesos de generación y transmisión de electricidad en la matriz energética de GREET con la finalidad de adaptarla al sistema eléctrico mexicano. Este proceso es importante debido a que la electricidad se utiliza como insumo en dos de los procesos principales dentro de la cadena de producción de biodiesel de *jatropha*: para comprimir los granos (en la etapa de extracción de aceite) y durante el mezclado (en la transesterificación). Más información sobre la electricidad utilizada dentro



del sistema se muestra en la sección 5.1.5.8. La tabla 5.1 muestra el origen de la información para los sistemas primario y secundario utilizada durante el análisis.

Tabla 5.1 Fuentes de información por etapa para los sistemas primario y secundario.

Fuentes de información por etapa empleadas para los sistemas primario y secundario			
Etapa	Material o fuente de energía	Fuente de información	
		Sistema primario	Sistema secundario
Cultivo	Fertilizante orgánico	Empresa productora	Boldrin et al.
	Semilla de jatropha	Empresa productora	Recurso primario
Transporte	Jatropha	Empresa productora	Etapa previa
	Diesel	Empresa productora	Base de datos GREET
Extracción de aceite	Jatropha	Empresa productora	Etapa previa
	Electricidad (compresión de los granos)	Empresa productora	Base de datos GREET (tecnologías de generación), IEA (matriz de generación mexicana y pérdidas)
Transesterificación	Aceite de jatropha	Empresa productora	Etapa previa
	Metanol	Empresa productora	Base de datos GREET
	Hidróxido de potasio	Empresa productora	Base de datos GREET
	Electricidad (mezclado en el reactor)	Empresa productora	Base de datos GREET (tecnologías de generación), IEA (matriz de generación mexicana y pérdidas)
	Gas licuado de petróleo (calentamiento de la reacción)	Empresa productora	Base de datos GREET

### 5.2.2 Plantación de jatropha

Durante la descripción de las consideraciones, se explicó en la sección 5.1.5.3 la manera en que se estableció el cultivo de jatropha, los cuidados que se le aplica y las características de la cosecha de la fruta y la extracción del grano. La figura 5.3 muestra el esquema de los flujos por hectárea para la etapa de cultivo, mientras la tabla 5.2 presenta los flujos por unidad funcional.



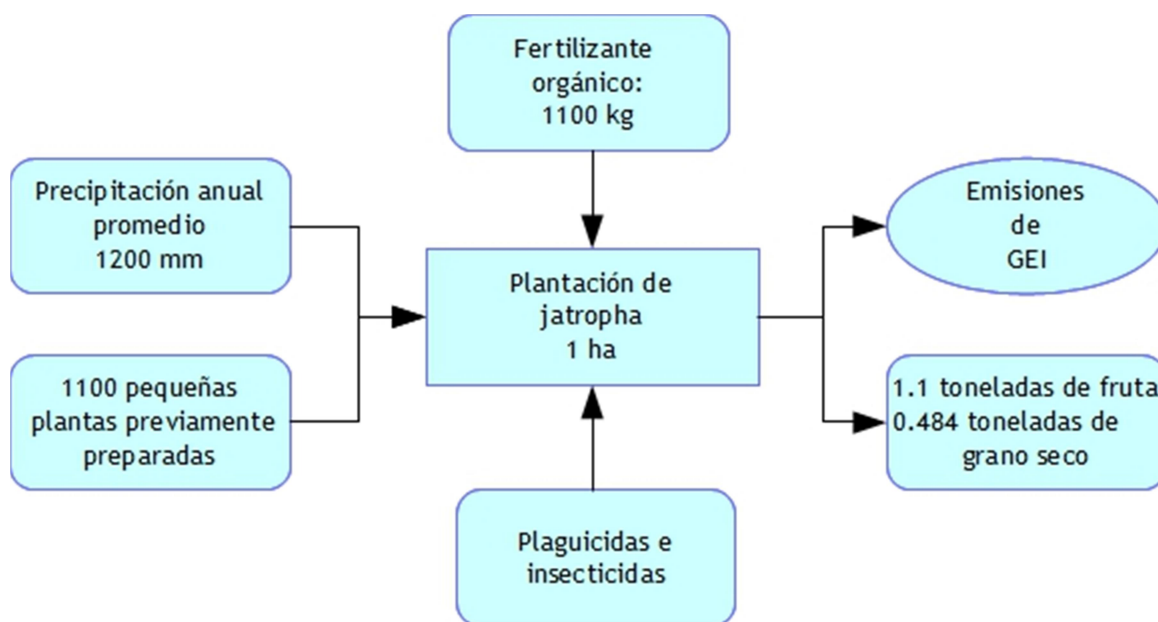


Figura 5.3 Esquema de los flujos de entrada y salida durante la fase de cultivo de jatropha por 1 ha.

Tabla 5.2 Flujos de entrada y salida durante la fase de cultivo de jatropha por unidad funcional.

Entradas y salidas durante el cultivo		
Entrada	Unidades	Valor
Hectáreas	ha/t <sub>biodiesel</sub>	8,31
Plantas	planta/t <sub>biodiesel</sub>	9,141
Fertilizante orgánico	kg/t <sub>biodiesel</sub>	9,141
Salida	Unidades	Valor
Fruta	kg/t <sub>biodiesel</sub>	9,141
Grano	kg/t <sub>biodiesel</sub>	4,022

### 5.2.3 Extracción de aceite

En la sección 5.1.5.4 se describe el procedimiento seguido por los fabricantes de biodiesel para extraer el aceite de los granos de jatropha así como los rendimientos esperados. La figura 5.4 y la tabla 5.3 muestran los flujos de entradas y salidas durante la etapa de extracción de aceite por hectárea y unidad funcional respectivamente.

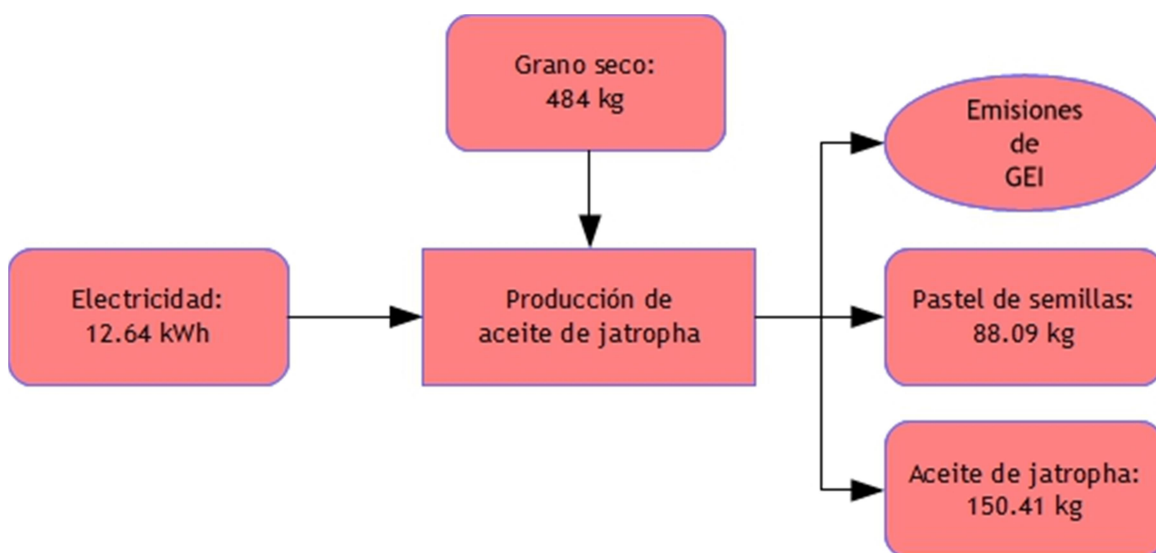


Figura 5.4 Esquema de los flujos de entrada y salida durante la fase de extracción de aceite de jatropha por 1 ha.

Tabla 5.3 Flujos de entrada y salida durante la fase de extracción de aceite de jatropha por unidad funcional.

Entradas y salidas durante la extracción de aceite		
Entrada	Unidades	Valor
Grano	kg/t <sub>biodiesel</sub>	4,022
Electricidad	kWh/t <sub>biodiesel</sub>	105
Salida	Unidades	Valor
Rendimiento de la extracción	% (m/m)	31
Aceite de jatropha	kg/t <sub>biodiesel</sub>	1,250
Pastel de semillas	kg/t <sub>biodiesel</sub>	732

#### 5.2.4 Producción del biodiesel

Las características de la transesterificación mediante la cual el aceite de jatropha se transforma en biodiesel fueron previamente descritas en las consideraciones del estudio en la sección 5.1.5.5. El esquema de los flujos de entrada y salida por hectárea se muestra en la figura 5.5, mientras los flujos de entrada y salida por unidad funcional se presentan en la tabla 5.4.

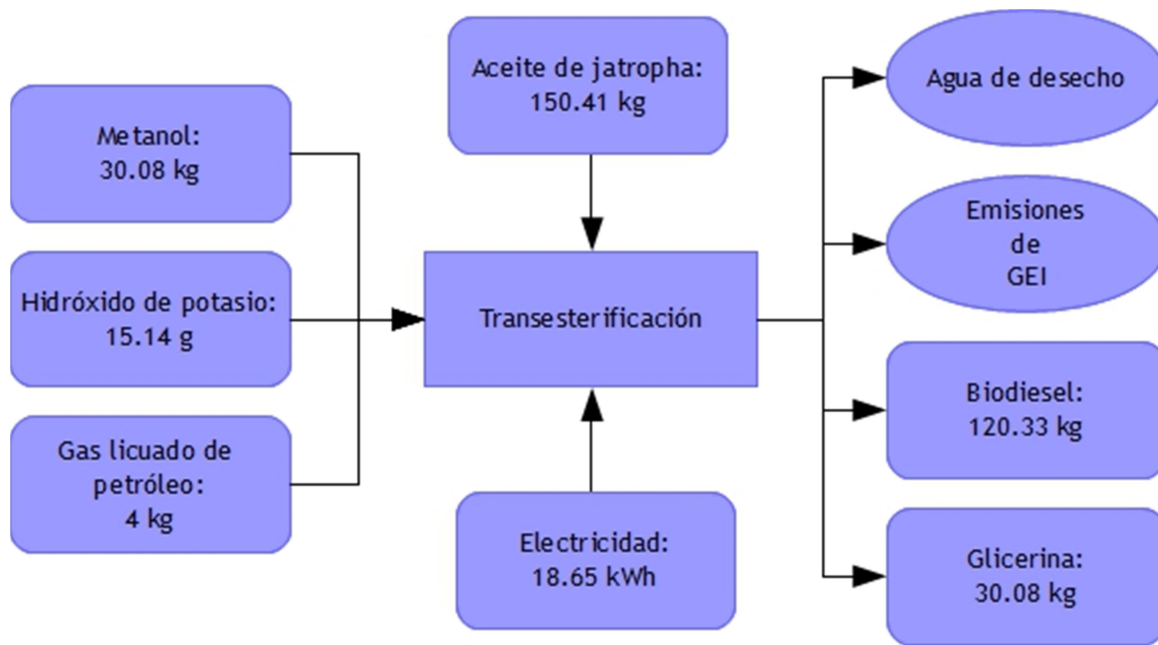


Figura 5.5 Esquema de los flujos de entrada y salida durante la fase de transesterificación por 1 ha.

Tabla 5.4 Flujos de entrada y salida durante la fase de transesterificación por unidad funcional.

Entradas y salidas durante la transesterificación		
Entrada	Unidades	Valor
Aceite de jatropha	kg/t <sub>biodiesel</sub>	1,250
Metanol	kg/t <sub>biodiesel</sub>	250
Hidróxido de potasio	g/t <sub>biodiesel</sub>	125
Gas licuado de petróleo	kg/t <sub>biodiesel</sub>	33
Electricidad	kWh/t <sub>biodiesel</sub>	155
Salida	Unidades	Valor
Eficiencia del proceso	% (m/m)	80
Biodiesel	kg/t <sub>biodiesel</sub>	1,000
Glicerina	kg/t <sub>biodiesel</sub>	250

## 6 Resultados

Generar información acerca de las emisiones de GEI y el consumo de energía a causa de la producción de biodiesel en el contexto mexicano es un elemento crucial en la elaboración de análisis ambientales y evaluaciones de sustentabilidad, con la finalidad de elaborar e implementar políticas públicas encaminadas al desarrollo sustentable. El marco legislativo en el país relacionado con energías limpias, en las que se incluye a las renovables abarca la Ley de Transición Energética (LTE, la cual sustituye a la Ley para el Aprovechamiento Sustentable de la Energía (LASE) y la Ley para el Aprovechamiento de las Energías Renovables y el Financiamiento de la Transición Energética (LAERFTE)); La Ley de la Industria Eléctrica (LIE); la Ley de Energía Geotérmica (LEG); la Ley General de Cambio Climático (LGCC); el Reglamento Interior de la Secretaría de Energía; la Ley de Promoción y Desarrollo de los Biocombustibles (LPDB); y la Ley de Órganos Reguladores Coordinados en Materia Energética (Prospectiva de Energías Renovables 2015-2029 2015).

La LGCC determina que las políticas públicas deberán promover la sustitución gradual del uso y consumo de los combustibles fósiles mediante el uso de fuentes renovables de energía, la LTE ratifica las metas de participación de energías limpias en la generación de energía y agrega una intermedia señalando así una contribución de 25% en 2018, 30% en 2021 y 35% en 2024, y la LPDB conjunta esfuerzos para desarrollar una industria bioenergética robusta y estable. En este sentido, los resultados de los dos indicadores evaluados en este estudio pueden ser de utilidad al sector legislativo del país generando información que permita justificar la mitigación del cambio climático por el uso de los biocombustibles en el sector transporte para el cumplimiento de la LGCC, la LTE y la LPDB. El presente trabajo cuantifica las emisiones de GEI por la producción de biodiesel de jatropha y su potencial reducción respecto al uso de combustibles fósiles, elemento necesario en la implementación de nuevas tecnologías, programas y políticas que impacten en la matriz energética nacional; y los requerimientos de energía, indicador que tiene un efecto directo en las emisiones de GEI debido a que éstas dependen en gran medida del consumo energético, y mide la eficiencia del sistema de producción.

La implementación de políticas públicas y el cumplimiento de las leyes respecto las energías renovables en general, y a los biocombustibles en lo particular, requieren como uno de sus puntos medulares evaluaciones de sustentabilidad. La evaluación ambiental conducida en el presente estudio, es una parte de la evaluación de sustentabilidad del biodiesel de jatropha que debe completarse, y resalta la importancia del posterior análisis de otros indicadores ambientales, estudios que evalúen otros insumos en la producción de biodiesel, y los aspectos sociales y económicos relacionados tanto con la producción de biodiesel a partir de jatropha como mediante distintas materias primas.

Como se mencionó durante la descripción de la meta y el alcance, el objetivo de este estudio es cuantificar e identificar las principales fuentes de las emisiones de GEI y de consumo de energía para la producción de biodiesel a lo largo del ciclo de vida de este proceso productivo. Los resultados obtenidos para estos dos indicadores se describen a continuación.

### 6.1 Consumo de energía

El total del consumo energético estimado para el caso de estudio en el Estado de Morelos por la producción de biodiesel de jatropha es de 14,969 MJ por tonelada. La figura 6.1 muestra el consumo energético total y por etapa a lo largo del ciclo de vida del proceso de producción de biodiesel de jatropha. La principal contribución proviene de la etapa de transesterificación. En la tabla 6.1 se observa que esta etapa representa el 78% (11,688 MJ/t) del total la energía consumida. La principal contribución durante la etapa de transesterificación es debido al gasto energético generado por el metanol empleado durante la reacción. La contribución del metanol al consumo de energía a lo largo del sistema de producción del biodiesel representa el 54% (8,128 MJ/t), y se debe principalmente al consumo de recursos fósiles, específicamente al consumo de gas natural necesario para su fabricación. La utilización de gas licuado de petróleo y electricidad ocupan el segundo y tercer lugar respectivamente en la contribución de la etapa de transesterificación, aportando alrededor del 13% (1,932 MJ/t) y 11% (1,624 MJ/t) del consumo energético total de todo el proceso de producción. La figura 6.2 muestra el consumo de energía para cada insumo durante la etapa de transesterificación.

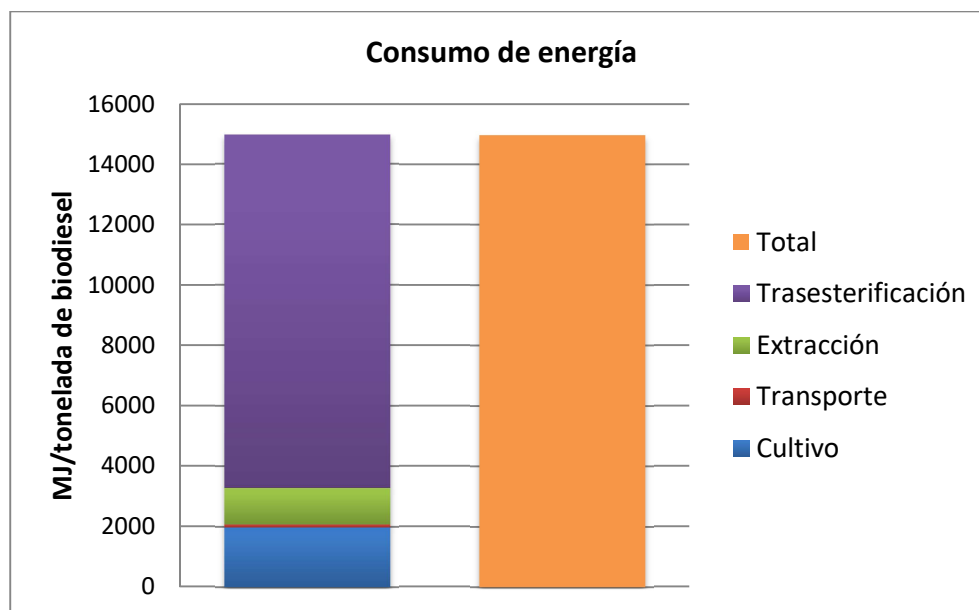


Figura 6.1 Consumo de energía total y por etapa por la producción de una tonelada de biodiesel de jatropha.

Tabla 6.1 Consumo de energía y emisiones de GEI totales y por insumo de la producción de una tonelada de biodiesel de jatropha.

Consumo de energía y emisiones de GEI					
Entrada	Etapa	Consumo energético [MJ]	Consumo energético [%]	Emisiones de GEI [kg de CO <sub>2</sub> e]	Emisiones de GEI [%]
Diesel	Cultivo	1778	12	25	1
Fertilizante	Cultivo	0	0	2076	84
Jatropha	Cultivo	202	1	0	0
<b>Total</b>	<b>Cultivo</b>	<b>1980</b>	<b>13</b>	<b>2101</b>	<b>85</b>
<b>Total</b>	<b>Transporte</b>	<b>92</b>	<b>1</b>	<b>7</b>	<b>0</b>
Electricidad	Extracción	1209	8	82	3
<b>Total</b>	<b>Extracción</b>	<b>1209</b>	<b>8</b>	<b>82</b>	<b>3</b>
Metanol	Transesterificación	8128	54	147	6
Hidróxido de potasio	Transesterificación	4	0	0	0
Gas licuado de petróleo	Transesterificación	1932	13	33	1
Electricidad	Transesterificación	1624	11	110	4
<b>Total</b>	<b>Transesterificación</b>	<b>11688</b>	<b>78</b>	<b>291</b>	<b>12</b>
<b>Total</b>		<b>14969</b>	<b>100</b>	<b>2481</b>	<b>100</b>

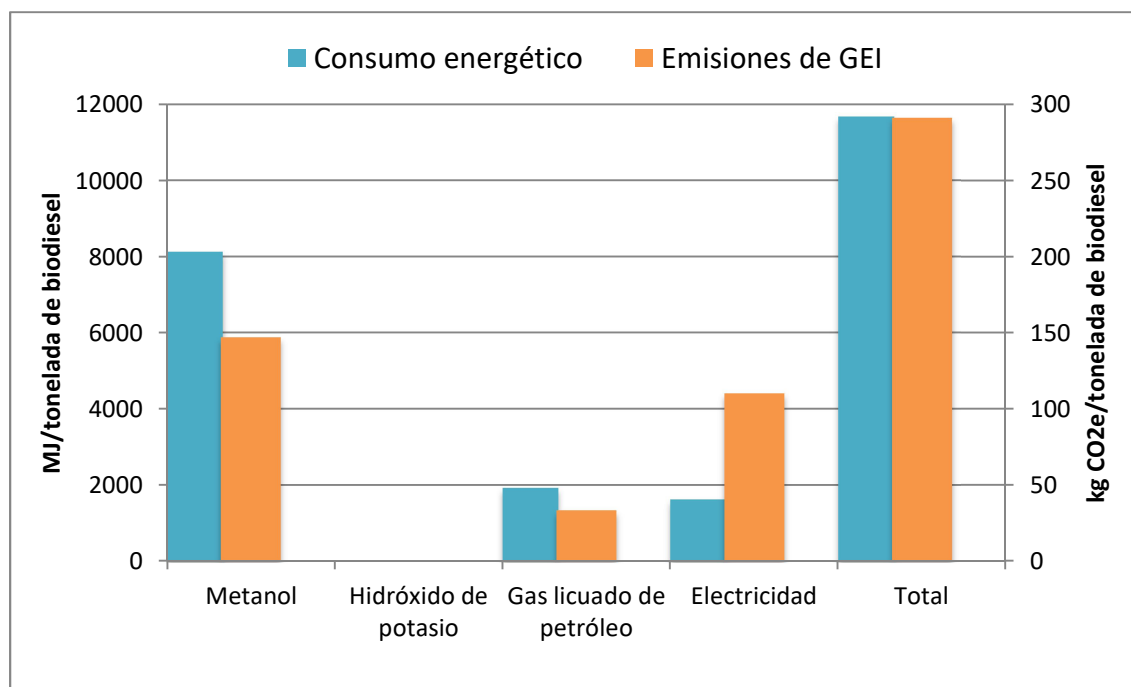


Figura 6.2 Consumo de energía y emisiones de GEI totales y por insumo durante la etapa de transesterificación.

Como se puede observar en la figura 6.3 aproximadamente el 21% restante del total del consumo energético proviene de las etapas de cultivo y extracción del aceite, que respectivamente representan el 13% (1,980 MJ/t) y 8% (1,209 MJ/t) de este valor. En el caso del cultivo, el principal responsable nuevamente es el consumo de combustibles fósiles, específicamente el diesel empleado durante la elaboración de la composta, con una contribución del 84% del porcentaje estimado para la etapa de cultivo. El consumo energético durante esta fase es particularmente bajo debido a que el sistema analizado es de baja intensidad y todas las operaciones agrícolas, como siembra, cosecha, fertilización, riego (cuando ocurre) y obtención del grano se llevan a cabo de forma manual y esta energía no es tomada en cuenta dentro del sistema. En cuanto a la etapa de extracción, el 100% del gasto de energía se debe al consumo de electricidad empleada para comprimir los granos. El consumo de energía en la fase de extracción de aceite es también relativamente bajo puesto que al grano no se le aplica ninguna clase de tratamiento previo y no se utilizan químicos como elementos para hacer más eficiente el proceso de extracción. El consumo energético durante la etapa de transporte entre las tierras de cultivo y las instalaciones de extracción y transesterificación puede considerarse como despreciable ya que contribuye con menos del 1% del consumo energético total durante el proceso. Es importante mencionar que al emplear un modelo modificado que corresponde a la matriz energética de México, es posible identificar que el 19% del consumo energético proviene de la electricidad utilizada durante el proceso, resaltando así la necesidad de migrar hacia una matriz energética que incluya un mayor porcentaje de energías renovables en cumplimiento de la Ley de Transición Energética. La figura 6.3 muestra el consumo de energía por entrada para las etapas de cultivo, extracción de aceite y transporte.

El Índice de Energía Neto (IEN) se utiliza comúnmente para comparar la energía útil que un sistema produce con la energía neta que consume (Kumar et al. 2012). El IEN se calculó dividiendo el contenido energético de una tonelada de biodiesel entre el total de energía necesaria para producirla. Considerando un poder calorífico inferior de 37.44 MJ/kg (Argonne 2016), el IEN resulta de 2.5, lo cual quiere decir que se requieren 0.4 MJ de energía para producir 1 MJ en forma de biodiesel.

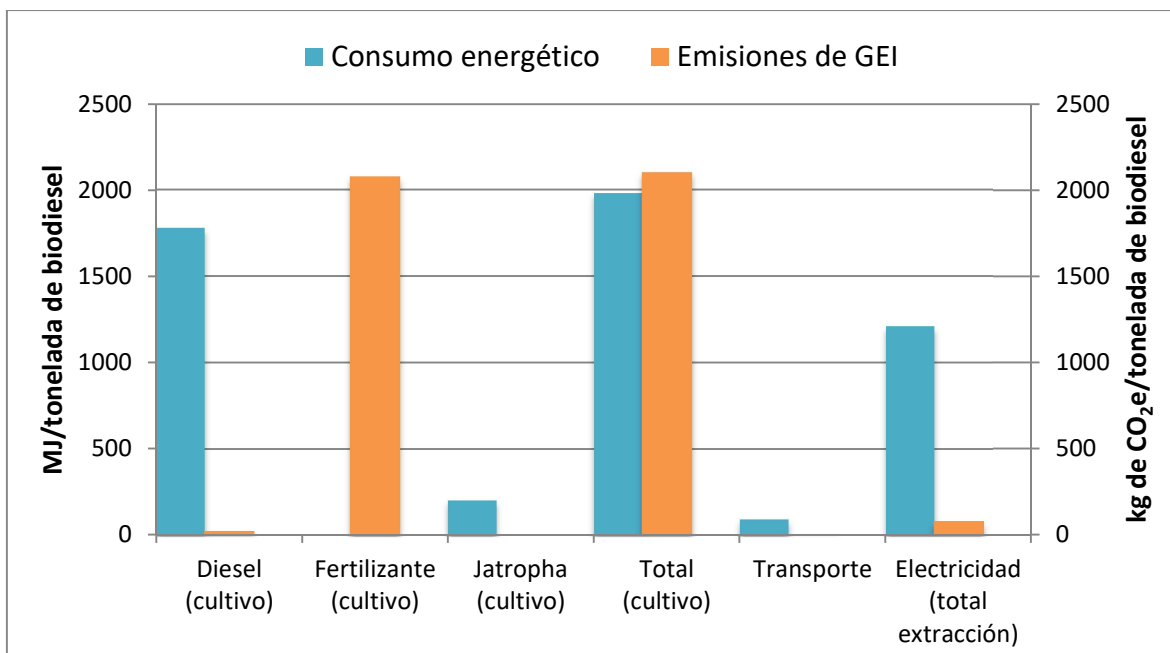


Figura 6.3 Consumo de energía y emisiones de GEI totales y por insumo durante las etapas de cultivo, transporte y extracción de aceite.

## 6.2 Emisiones de GEI

Las emisiones totales de GEI estimadas durante el estudio equivalen a 2481 kg de CO<sub>2</sub> equivalente por la producción de una tonelada de biodiesel. En la tabla 6.1 se observan las emisiones totales y por etapa para el sistema de producción, y se identifica a la etapa de cultivo como la principal responsable de las emisiones de GEI, contribuyendo con el 85% (2101 kg de CO<sub>2</sub>e/t) de las emisiones generadas durante todo el proceso. La razón por la cual la etapa de cultivo tiene la mayor contribución a este impacto es el empleo de composta orgánica, la cual generó el 84% (2076 kg de CO<sub>2</sub>e/t) de las emisiones totales del sistema, mientras el diesel utilizado en el cultivo contribuyó con el 1% (25 kg de CO<sub>2</sub>e/t). La composta orgánica promueve la formación de óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) y metano (CH<sub>4</sub>) y su posterior liberación hacia la atmósfera (IPCC 2014; Boldrin et al. 2010), generando así un impacto ambiental considerable por su utilización. Con base en información encontrada en la literatura el uso de fertilizantes minerales presenta mayor impacto en las emisiones de GEI por área cultivada (Boldrin et al. 2010; Blanco et al. 2008), sin embargo estos impactos “disminuyen” debido al incremento en el rendimiento del cultivo, lo que deriva en una mayor producción de biocombustibles. Este efecto de reducción en la generación de emisiones de GEI se explica en el uso de tonelada de biodiesel producido como unidad funcional, puesto que la relación inversamente proporcional indica que a mayor producción de biodiesel, menor emisión de GEI. Considerar las emisiones de GEI que la materia



orgánica tendría de no ser utilizada como fertilizante en el cultivo de jatropha podría disminuir significativamente los impactos ambientales del sistema analizado (Blanco et al. 2008). Sin embargo por falta de información al respecto y por la complejidad de los modelos para realizar la cuantificación de las emisiones a causa del uso de la tierra (IPCC 2014), dicha consideración no fue tomada en cuenta. La figura 6.4 muestra las emisiones de GEI totales y por etapa por la producción de una tonelada de biodiesel.

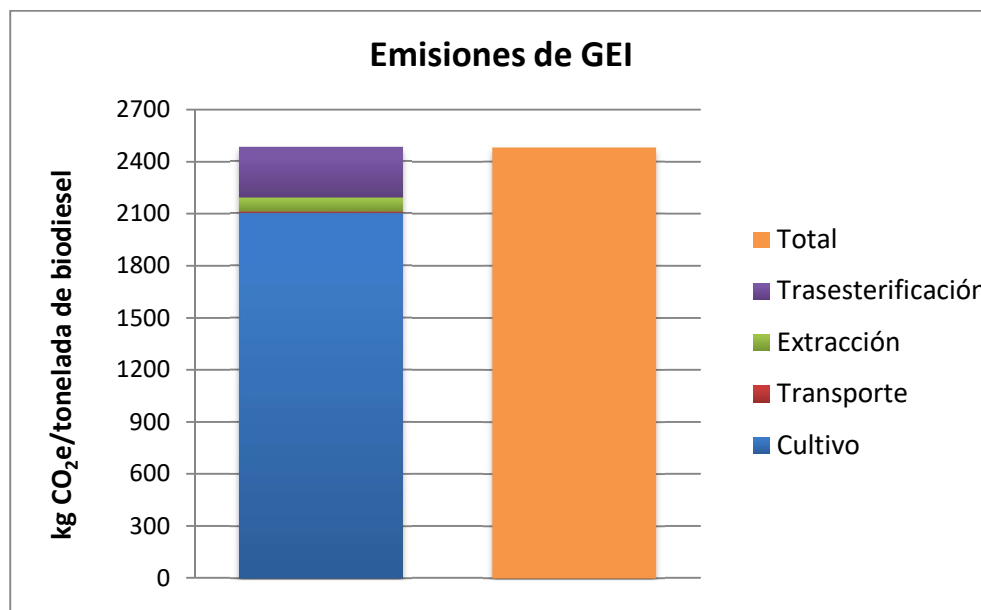


Figura 6.4 Emisiones de GEI totales y por etapa por la producción de una tonelada de biodiesel de jatropha.

El restante 15% (380 kg CO<sub>2</sub>e/t) de las emisiones de GEI fue a causa de las transesterificación y la extracción de aceite, contribuyendo cada etapa con el 12% (291 kg CO<sub>2</sub>e/t) y 3% (82 kg CO<sub>2</sub>e/t) respectivamente. Las emisiones de GEI durante la transesterificación, se deben principalmente al uso de recursos fósiles. El metanol, la electricidad, y el gas licuado de petróleo son insumos que dependen en gran medida de los combustibles fósiles para su generación, y contribuyen con el 51% (147 CO<sub>2</sub>e/t), 38% (110 CO<sub>2</sub>e/t) y 11% (33 CO<sub>2</sub>e/t) respectivamente de las emisiones generadas durante la transesterificación. La contribución del hidróxido de potasio puede considerarse despreciable ya que representa menos del 1% de las emisiones generadas en ésta etapa. Durante la extracción de aceite, la mayor parte de las emisiones se deben nuevamente al uso de recursos fósiles, puesto que la electricidad, única entrada que se registra en ésta etapa, se genera principalmente mediante el uso de combustibles fósiles. El impacto en las emisiones de GEI a causa del transporte, también puede ser considerado como despreciable debido a que éstas contribuyen con menos del 1% de las emisiones globales para todo el proceso. En las figuras 6.2 y 6.3 se muestran las emisiones de GEI de los insumos para cada etapa del ACV por la producción de una tonelada de biodiesel de jatropha.

## 6.3 Validación de resultados

Existe una considerable variación en los resultados reportados en la literatura especializada, referentes a las emisiones de GEI y consumo de energía que presentan los estudios de la evaluación ambiental de la producción de biodiesel de *jatropha*. Las principales razones para que esto ocurra son la imprecisión en el inventario de datos con el que se trabaja y las inconsistencias adoptadas durante la metodología (Portugal-Pereira et al. 2016). Algunos estudios se conducen con base en consideraciones optimistas o pesimistas en cuanto a la producción de semilla de *jatropha*, los insumos necesarios para la etapa de cultivo, y eficiencia durante la extracción de aceite y la transesterificación del biodiesel; mientras que las diferencias en la selección de los límites del sistema, unidad funcional y recuperación de productos derivados dentro de la metodología también contribuyen a las divergencias en los resultados.

La norma ISO 14044 (ISO 14044 2006) señala que la comparación de sistemas debe realizarse utilizando la misma unidad funcional y consideraciones metodológicas equivalentes, mientras las diferencias entre los sistemas deben identificarse y reportarse. La norma señala también que los indicadores que van a utilizarse en comparaciones deben ser por lo menos científica y técnicamente válidos y relevantes ambientalmente, además, deben ser internacionalmente aceptados (ISO 14044 2006).

De la revisión bibliográfica se obtuvieron cinco estudios importantes que analizan la producción de biodiesel obtenido a partir de *jatropha* abarcando sistemas de baja y alta intensidad; con características de cultivo, extracción de aceite y transesterificación distintas; y realizando la distribución de cargas ambientales de los productos derivados de diferentes maneras. Debido a la falta de uniformidad de los resultados presentados, y a la escasez de información para hacerlos consistentes, no puede llevarse a cabo una comparación adecuada con el presente estudio. En su lugar, va a realizarse una breve descripción de los resultados de los estudios tomados de la literatura, y con un propósito meramente informativo, los valores reportados en los estudios se muestran en la tabla 6.2. La información detallada sobre los sistemas de producción de los trabajos revisados se muestra a continuación.

### 6.3.1 Sistemas de producción

#### 6.3.1.1 Prueksakorn & Gheewala (2006)

El objetivo del estudio realizado por Prueksakorn y Gheewala es evaluar el consumo energético y el potencial de calentamiento global para el ciclo de vida de la producción y uso de biodiesel, así como su comparación con diesel convencional para ser usado en

transporte. La información de los procesos que van desde el cultivo de *jatropha* hasta la extracción del aceite fue obtenida de una planta piloto en la Universidad de Kasetsart, mientras la información utilizada referente a los procesos de transesterificación y uso del biodiesel fue tomada de un ACV de biodiesel de soya (Sheehan et al. 1998). La función del sistema es la producción de biodiesel y su posterior uso como combustible para transporte, y aborda las etapas de cultivo, extracción de aceite y transesterificación, utilizando la unidad funcional de 1 GJ de biodiesel. Los productos derivados que se consideran en el sistema son ramas, hojas y cáscara de la fruta (obtenidos durante la etapa de cultivo), pasta de semillas (obtenido durante la extracción de aceite) y glicerina (generada en la etapa de transesterificación). La distribución de cargas ambientales de los productos derivados se hace mediante el método de asignación y se lleva a cabo con base en el contenido energético. La única categoría de impacto ambiental en este estudio es el potencial de calentamiento global caracterizado en kg de CO<sub>2</sub>e. También se cuantifica el consumo de energía respecto a la unidad funcional.

#### **6.3.1.2 Ndong et al. (2009)**

En el estudio que Ndong et al. (2009) realizaron, el objetivo principal es comparar las emisiones de GEI y el consumo de energía no renovable entre biodiesel obtenido a partir de *jatropha* y diesel convencional. La función del sistema es suministrar biodiesel para vehículos carreteros, y la unidad funcional elegida es 1 MJ de biodiesel empleado. El sistema incluye las etapas de preparación de las plantas, transporte de semillas, prensado de los granos, transporte del aceite vegetal crudo, refinamiento del aceite vegetal crudo, refinamiento del aceite, transesterificación y distribución, las cuales pueden agruparse en cultivo, extracción de aceite, transesterificación y transporte. Ndong et al. (2009) también estiman el consumo de energía no renovable y las emisiones de GEI por la combustión del biodiesel en el vehículo, aunque éstas no se toman en cuenta en la descripción de los resultados que se presenta en esta sección. Dentro del estudio, se consideran los productos derivados glicerina y ácidos grasos libres, obtenidos ambos durante la transesterificación, y la distribución de cargas ambientales se realiza mediante el método de asignación con base en el contenido energético. Los datos utilizados durante el estudio se obtuvieron de experimentos en Mali apoyándose con datos de plantaciones de *jatropha* en Costa de Marfil y datos obtenidos de la literatura (Henning 2007; Reinhardt et al. 2007). Dentro del estudio se manejan varios escenarios, en los cuales el rendimiento de semilla por hectárea varía, el transporte de semillas y aceite se realiza de diferentes maneras, se toma en cuenta la mano de obra como consumo energético y el aceite de *jatropha* se usa como combustible.

#### **6.3.1.3 Achten et al. (2010)**

El objetivo del estudio realizado por Achten et al. (2010) es evaluar los impactos ambientales por la producción de biodiesel de *jatropha* en cinco categorías de impacto: consumo de energía no renovable, potencial de calentamiento global, potencial de

eutrofización, potencial de acidificación, e impacto del uso de tierra en la calidad del ecosistema. El sistema incluye las etapas de cultivo, extracción de aceite, transesterificación y uso dentro en el vehículo, aunque en la descripción de los resultados de esta sección únicamente los impactos ambientales por la producción del biocombustible son tomados en cuenta. La unidad funcional considerada en el estudio es 1 MJ de energía liberada en un motor de combustión interna utilizando biodiesel de jatropha como biocombustible. La distribución de las cargas ambientales de los productos derivadas se realizó mediante la expansión de los límites del sistema basada en la situación local. Los productos derivados que se consideraron en el estudio son desperdicios de biomasa (generados durante la etapa de cultivo), pasta de semillas (obtenido durante la extracción de aceite) y glicerina (obtenida en la etapa de transesterificación). Los datos utilizados dentro del estudio se consiguieron de plantaciones de jatropha y una fábrica de biodiesel en India, literatura científica y bases de datos de ACV (Utthan; GEMIS; Darmstadt; Germany; <http://www.gemis.de>). Achten et al. (2010) también elaboran un escenario dentro del cual analizan los impactos ambientales por la producción de biodiesel de jatropha con la incorporación de una instalación de biogás ubicada a un costado de la prensa de semillas, el cual no se incluye en la descripción de resultados.

#### 6.3.1.4 Kumar et al. (2012)

Desarrollar un modelo base de hoja de cálculo para estimar los requerimientos de energía primaria y las emisiones de GEI para cada etapa del ACV de la producción y uso de biodiesel de jatropha, así como el índice de energía neto y el porcentaje de reducción en las emisiones de GEI respecto al diesel de petróleo a través de varios escenarios, es el objetivo del estudio conducido por Kumar et al. (2012). Los límites del sistema analizado abarcan las etapas de cultivo, transporte de semillas, extracción de aceite, transporte de aceite, producción de biodiesel, transporte de biodiesel a los puntos de venta y consumo de biodiesel en un automóvil. En la presentación de los resultados del estudio en esta sección todas las fases de transporte se agrupan en una sola mientras se omite la combustión del biodiesel dentro del motor del vehículo. La unidad funcional elegida en el estudio de Kumar et al. (2012) es una tonelada de biodiesel de jatropha producida. La información utilizada en el inventario del estudio fue obtenida de literatura científica (Alexander 2009; Prueksakorn & Gheewala 2008; Nazir & Setyaningsih 2010; Whitaker & Garvin 2009). Dentro del análisis, se observan dos grupos de escenarios: irrigado y secano (que no tiene riego y sólo recibe el agua de la lluvia). Ambos grupos, conducen un escenario base en el cual no se realiza ninguna clase de distribución de cargas ambientales de los productos derivados; tres escenarios donde la distribución se lleva a cabo mediante el método de asignación con base en masa, contenido energético y valor en el mercado; y dos escenarios en el que las cargas ambientales se distribuyen mediante el método de desplazamiento para sustituir a los fertilizantes químicos y al bagazo de caña como combustible. La descripción de los resultados que se presentan en esta sección son únicamente los referentes al

escenario base, tanto para las condiciones de irrigación como para las de secano. Los productos derivados tomados en cuenta dentro de los límites del sistema son: material de poda, hojas y cáscaras de fruta (obtenidas durante la fase de cultivo); pasta de semillas (generado durante la extracción de aceite); y glicerol crudo (obtenido durante la etapa de transesterificación). Kumar et al. (2012) también varían el porcentaje en el rendimiento de semilla por hectárea más y menos 20% en cada escenario para analizar cómo los resultados se ven afectados por esto.

#### 6.3.1.5 Portugal-Pereira et al. (2016)

El objetivo del estudio elaborado por Portugal-Pereira et al. (2016) es examinar los beneficios ambientales y los ahorros de energía de la cadena de producción actual de biodiesel de *jatropha* y su uso en un vehículo ligero típico en India. Las categorías que se contemplan en el análisis son consumo de energía no renovable, potencial de calentamiento global, potencial de acidificación terrestre y efectos respiratorios derivados de productos inorgánicos. Dentro de los límites del sistema, se consideran las etapas de cultivo, procesado (la cual incluye la extracción de aceite y la transesterificación) y el transporte desde las tierras de cultivo a la refinería y de ahí hasta el centro de distribución. El estudio también incluye el impacto ambiental por el uso del biodiesel dentro del motor de un vehículo de pasajeros ligero adaptado a las condiciones carreteras de India, sin embargo esta parte se omite en la presentación de los resultados de esta sección. La unidad funcional sobre la que se reportan los resultados del escenario base es la generación de una tonelada de biodiesel de *jatropha*. La información utilizada en el inventario fue conseguida mediante encuestas de campo realizadas a expertos en varios sitios de cultivo de *jatropha* en India durante 2010 (Andhra Pradesh, Tamil Nadu y Kerala States); estudios de naturaleza similar publicados (EEA 2009; Adholeya & Dadhich 2008; IPCC 2006a); y de una base de datos para los valores del sistema secundario (Ecoinvent 2006). Además del escenario base, Portugal-Pereira et al. (2016) analizan otros cuatro escenarios donde se asumen mejoras en las prácticas agrícolas y en la extracción de aceite, así como la optimización del proceso de transesterificación. Adicionalmente, se considera la recuperación de productos derivados. Los escenarios alternativos analizados son *ruta de cogeneración* (donde una unidad de calor y potencia combinados se utiliza para producir electricidad y vapor), *ruta de gasificación* (en el que una turbina de gas de ciclo combinado genera electricidad), *síntesis de diesel-FT* (en el que a partir de singás se genera diesel Fischer-Tropsh. –El proceso Fischer-Tropsh implica que un gas de síntesis que contiene H<sub>2</sub> y CO se transforma en diesel mediante un proceso catalítico) y *ruta de aceite vegetal hidrotatado* (donde se asume que el biodiesel se produce mediante un proceso de hidrotatamiento en lugar de transesterificación). En el estudio de Portugal-Pereira et al. (2016) se evitan las cargas ambientales por la producción y uso de los productos derivados mediante el método de desplazamiento. El estudio sigue un enfoque de expansión de los límites del sistema para analizar la contribución de los productos derivados, de los cuales los que se toman en

cuenta dentro del estudio son tallos, cáscaras y cascarillas para ser quemados y producir electricidad o para producir diesel-FT, y pasta de semillas para compensar el uso de fertilizantes químicos. La descripción de los resultados en esta sección incluye únicamente el escenario base el cual no contempla la distribución de cargas por los productos derivados.

### 6.3.2 Análisis de los resultados obtenidos de la revisión literaria

La producción de grano alcanzable por hectárea es un factor determinante en la evaluación del comportamiento ambiental de los sistemas productores de biodiesel. En los estudios revisados, el rango de las suposiciones de los granos que se generan por hectárea va desde 1500 kg hasta 5900 kg, ambos datos obtenidos del análisis de Kumar et al. (2012) en condiciones de secano e irrigación respectivamente. El rendimiento de grano considerado dentro del presente análisis, 484 kg, está muy por debajo de los rendimientos encontrados en la literatura (Achten et al. 2008), y por ésta razón, el potencial de mitigación sobre el impacto ambiental que el sistema posee se ve limitado. En gran medida, la baja producción de fruta de *Jatropha* se debe a la fertilización orgánica con la que se cultiva, así como a que las plantas no reciben agua adicional a la que obtienen de la lluvia. Del estudio de Kumar et al. (2012) se identifica que las tierras sembradas con *Jatropha* constantemente irrigadas pueden mejorar su producción considerablemente, mientras que la fertilización mineral además, reduce el impacto ambiental por unidad de fruta generada, así como también se reduce el impacto ambiental por unidad de biodiesel fabricado. La figura 6.5 y la tabla 6.2 muestran la producción alcanzable de semillas, aceite y biodiesel por hectárea de acuerdo a las condiciones específicas para cada sistema.

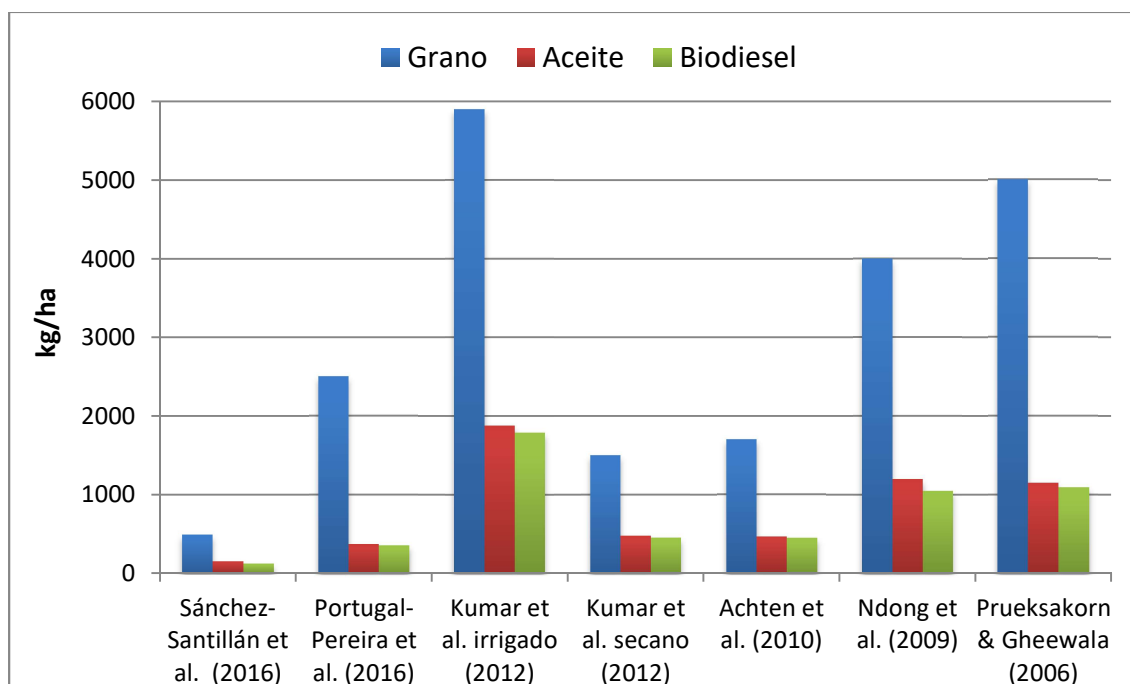


Figura 6.5 Producción alcanzable de grano, aceite y biodiesel por hectárea para los distintos sistemas analizados.

Tabla 6.2 Resultados de la producción por hectárea, el consumo de energía y las emisiones de GEI de los estudios analizados.

Producción, consumo energético y emisiones de GEI							
	Sánchez-Santillán et al. (2016)	Portugal-Pereira et al. (2016)	Kumar et al. irrigado (2012)	Kumar et al. seco (2012)	Achten et al. (2010)	Ndong et al. (2009)	Prueksakorn & Gheewala (2006)
Producción alcanzable por hectárea [kg/ha]							
Grano	484	2500	5900	1500	1695	4000	5000
Aceite	150	375	1879	478	466	1200	1150
<b>Biodiesel</b>	<b>120</b>	<b>356</b>	<b>1790</b>	<b>455</b>	<b>452</b>	<b>1050</b>	<b>1095</b>
Consumo energético [MJ/tonelada de biodiesel]							
Cultivo	1980	29148	9333	15098	1001	946	16587
Extracción	1209	4287	5054	5054	3258	946	3415
Transesterificación	11688		7164	7164	4071	4807	13247
Transporte	92	778	284	284	0	1182	0
<b>Total</b>	<b>14969</b>	<b>34213</b>	<b>21835</b>	<b>27600</b>	<b>8330</b>	<b>7881</b>	<b>33249</b>
Emisiones de GEI [kg de CO <sub>2</sub> e/tonelada de biodiesel]							
Cultivo	2101	1845	680	1114	4003	459	1304
Extracción	82	98	361	361	140	62	306
Transesterificación	291		275	275	501	150	517
Transporte	7	46	18	18	0	71	0
<b>Total</b>	<b>2481</b>	<b>1989</b>	<b>1334</b>	<b>1768</b>	<b>4644</b>	<b>742</b>	<b>2127</b>

La etapa con mayor consumo energético varía de un estudio a otro. Para los trabajos de Portugal-Pereira et al. (2016), Kumar et al. (2012) tanto (irrigado como seco) y Prueksakorn & Gheewala (2006) la etapa con el consumo de energía más alto es el cultivo, mientras que para Achten et al. (2010), Ndong et al. (2009) y el presente estudio, la etapa con mayor gasto de energía es la transesterificación. Una de las razones por la que algunos de los estudios tienen un alto consumo de energía durante la etapa de cultivo se debe a la fabricación de los fertilizantes minerales que emplean en sus estudios de acuerdo a las suposiciones que hacen, y a la maquinaria utilizada para establecer y preparar la plantación. Las prácticas manuales, la eficiencia y si se le da un tratamiento previo a los granos antes de triturarlos durante la extracción de aceite influyen de forma significativa en el consumo energético causado por esta etapa. El consumo energético durante la transesterificación se debe principalmente a la fabricación de los insumos para completar la reacción así como de los combustibles utilizados para mantener la temperatura deseada, y la eficiencia considerada durante ésta etapa determina en gran medida el consumo de energía total del proceso de producción de biodiesel de jatropha. Los estudios que encuentran en la transesterificación una etapa de consumo de energía alto, generalmente asumen en ésta etapa una reacción ineficiente. El transporte representa en la mayoría de los estudios un porcentaje de consumo energético relativamente bajo, salvo en el estudio realizado por Ndong et al. (2009) por las grandes distancias que se recorren. En la figura 6.6 se muestran los resultados del consumo energético de los trabajos analizados.

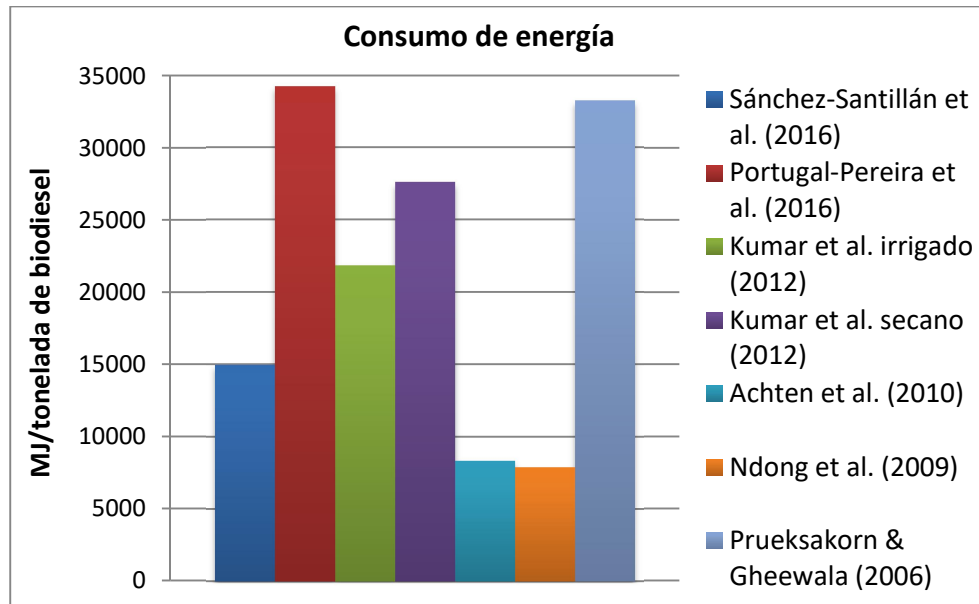


Figura 6.6 Consumo de energía de los distintos sistemas analizados.

Para todos los estudios revisados, es una constante que las mayores emisiones de GEI se exhiben durante la etapa de cultivo. Esto se debe al contenido de nitrógeno en los fertilizantes (orgánicos y minerales) ya que propicia la formación de  $N_2O$  y su posterior



liberación a la atmósfera (IPCC 2014; Boldrin et al. 2010). Éste compuesto tiene una contribución al potencial de calentamiento global 265 veces mayor que el dióxido de carbono (IPCC 2013). En el estudio de Portugal-Pereira et al. (2016) el procesado del biocombustible (es decir la extracción de aceite y la transesterificación) tiene una contribución pequeña a la emisión de GEI total para todo el proceso de producción, y se debe principalmente al proceso de extracción de aceite realizado en forma manual y la forma altamente eficiente en que la etapa de transesterificación se completa. El transporte considerado en el sistema de Portugal-Pereira et al. (2016) tiene una contribución más significativa que otros estudios debido a que toma en cuenta tres etapas de transporte que recorren distancias considerables.

Las emisiones de GEI en el análisis realizado por Kumar et al. (2012) aparecen iguales durante todas las etapas excepto en la fase de cultivo para los escenarios con condiciones de irrigación y secano, y esta variación ocurre por la diferencia en el rendimiento de la tierra en la obtención de grano. De los estudios revisados, éste es el único en el que la extracción de aceite genera más emisiones de GEI que la transesterificación, y se debe a que la extracción se realiza mediante un proceso solvente continuo utilizando hexano, vapor, electricidad y agua. Las emisiones de GEI generadas durante la transesterificación se deben a la producción de metanol e hidróxido de sodio y a la producción y uso de electricidad y vapor. Aunque se consideran tres etapas de transporte dentro del estudio de Kumar et al. (2012) de 10, 100 y 200 km la contribución a las emisiones de GEI globales generadas por la etapa de transporte pueden considerarse despreciables. En el estudio de Achten et al. (2010) las emisiones de GEI generadas por la producción de biodiesel se deben en su mayoría (86%) a la etapa de cultivo. Los autores mencionan que esto se debe a la aplicación de fertilizantes y la posterior formación de  $N_2O$ . La mayor parte de las emisiones generadas durante la etapa de transesterificación son causadas por la producción de metanol (83% del total de la transesterificación), mientras que el resto (17%) es a causa de la producción y uso de electricidad. La etapa de extracción genera emisiones de GEI únicamente por la producción y uso de electricidad.

En el estudio realizado por Ndong et al. (2009) la etapa de transporte contribuye con el 10% (71 kg de  $CO_2e/t$ ) de las emisiones de GEI globales para todo el proceso. La razón de esto, es que en uno de los trayectos de transporte que se realizan se recorren 6528 km en barco mientras en otro el recorrido es de 564 km en ferrocarril. Las emisiones generadas durante la etapa de transesterificación son a causa de la producción de metanol, ácido fosfórico, ácido sulfúrico, sosa cáustica, y por la producción y uso de gas natural y electricidad. Los resultados obtenidos por Prueksakorn y Gheewala (2006) indican que después de la fase de cultivo, la transesterificación es la etapa que más emisiones de GEI genera, esto ocasionado por la producción de metanol, metóxido de sodio, hidróxido de sodio, ácido clorhídrico y por la producción y uso de vapor y electricidad. Las emisiones generadas a causa de la etapa de extracción de aceite son generadas únicamente por la

producción y uso de electricidad. La figura 6.7 muestra los resultados de las emisiones GEI por la producción de biodiesel de jatropha de los estudios analizados.

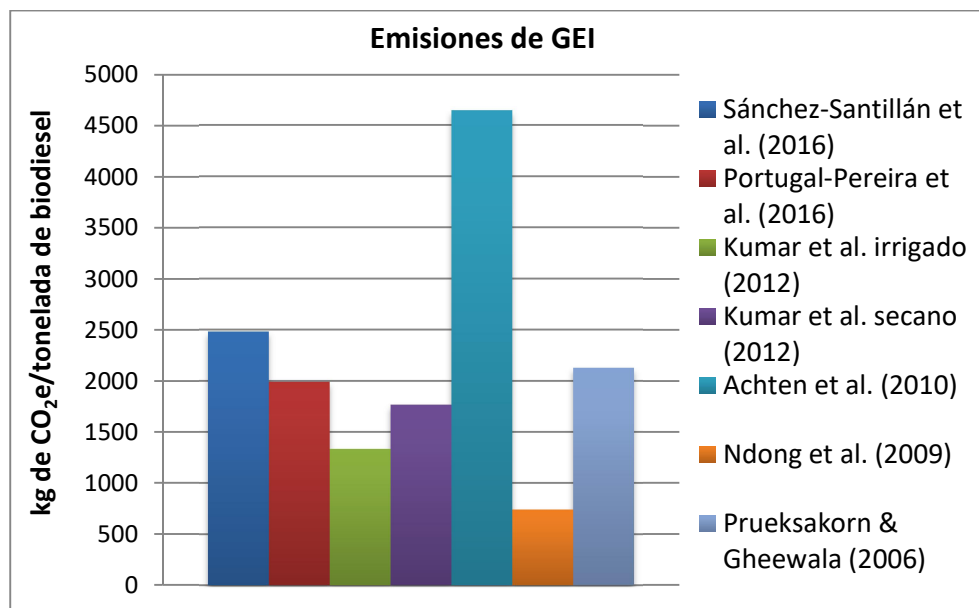


Figura 6.7 Emisiones de GEI de los distintos sistemas analizados.

Del análisis de los resultados de los estudios analizados surgen dos conclusiones: la falta de uniformidad en el ACV al emplearse como herramienta de evaluación ambiental, y las oportunidades potenciales para mejorar el sistema de producción de biodiesel de jatropha. Respecto al segundo punto, el cultivo es la etapa que mayores emisiones de GEI genera, por lo que ésta debe mejorar para hacer que el potencial de mitigación en el impacto ambiental que tienen los biocombustibles se vuelva más significativo. Utilizar la pasta de semillas que se recupera durante la extracción de aceite es una medida adecuada para disminuir el impacto ambiental durante la fertilización. El constante monitoreo de los cultivos energéticos también será de ayuda en la mejora de su desempeño ambiental puesto que se tendrá más control sobre ellos si la información con la que se cuenta aumenta. La etapa de transesterificación muestra otra posible oportunidad. El completar el proceso de conversión de aceite de jatropha en biodiesel de manera más eficiente va a traducirse en menos consumo de energía y en emisiones de GEI inferiores para la cadena de producción de biodiesel.

#### 6.4 Análisis de sensibilidad

A partir de los resultados obtenidos en el ACV sobre la producción de biodiesel obtenido utilizando jatropha como materia prima, se identificó al cultivo como la etapa con las emisiones de GEI más altas y al proceso de transesterificación como la etapa que tiene el mayor consumo de energía durante el ciclo de vida del biodiesel. Luego, con base en la revisión bibliográfica y la validación de resultados se puede concluir que incluir dentro de

los límites del sistema a evaluar la distribución de cargas ambientales por la recuperación de productos es un factor que puede influir de forma considerable en los resultados de la evaluación ambiental. Por estas razones, es necesario llevar a cabo un análisis de sensibilidad con la finalidad de ver como varían los resultados del estudio a causa de la modificación de los parámetros que más influyen en el ACV. En esta sección, van a conducirse tres escenarios en los que se modifican distintos parámetros del ACV. Los escenarios son: fertilización mineral, transesterificación eficiente y recuperación de productos, los cuáles se explican en los párrafos siguientes.

#### 6.4.1 Fertilización mineral

De acuerdo a los resultados del análisis de contribución presentado anteriormente, es posible identificar que la etapa con la mayor contribución al potencial de calentamiento global es la de cultivo. Como se mencionó en la sección 6.2, uno de los elementos de ésta contribución proviene del uso de fertilizante orgánico debido a la disminución en el rendimiento de la producción derivada de dicho uso. Este factor en la reducción de la producción de jatropha obliga a realizar como práctica común el uso de fertilizantes minerales que incrementen la producción de jatropha. En la tabla 6.3 se muestran las variaciones en el uso de fertilizante y en el rendimiento de los cultivos establecidos en los estudios analizados durante la validación de resultados. Por ese motivo, con la finalidad de evaluar el impacto del uso de este tipo de fertilizantes en los indicadores analizados en esta investigación, se establece el primer escenario: sustituir el fertilizante orgánico empleado en el caso base por fertilizante mineral.

Tabla 6.3 Uso de fertilizantes y rendimiento por hectárea de los estudios analizados.

Referencia	Fertilizante	Cantidad [kg/ha]	Rendimiento [kg/ha]
Portugal-Pereira et al. (2016)	Fosfato (como P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	1.5	2,500
	Pastel de semillas	937.5	
Kumar et al. irrigado (2012)	N fertilizante	100	5,900
	P fertilizante	144	
	K fertilizante	100	
Kumar et al. seco (2012)	N fertilizante	60	1,500
	P fertilizante	80	
	K fertilizante	75	
Achten et al. (2010)	Urea (N:P:K: 46:0:0)	111	1,695
	Fosfato diamónico (N:P:K: 18:46:0)	111	
Ndong et al. (2009)	(N:P:K: 16:26:12)	248	4,000
	Nitrato de amonio	201	
Prueksakorn & Gheewala (2006)	(N:P:K: 15:15:15)	625	5,000

De la tabla 6.3 se observa que tanto la aplicación de fertilizantes minerales como el rendimiento de grano esperado en la etapa de cultivo, muestran diferencias significativas de un estudio a otro, revelándose de esta manera la escasez de información respecto a las características agrícolas de la *Jatropha*, así como la falta de monitoreo en los cultivos establecidos. De acuerdo a la información obtenida de la planta productora de biodiesel, las condiciones asumidas por Kumar et al. (2012) en el grupo de escenarios secos se presentan como las más adecuadas a ser implementadas en el sistema analizado dentro de este estudio debido a que no se considera riego, la siembra y la cosecha se asumen realizadas de forma manual y la fertilización permanece constante. La tabla 6.4 muestra la composición del fertilizante utilizado en la elaboración de este escenario.

Tabla 6.4 Uso de fertilizantes y rendimiento por hectárea en la elaboración del escenario de fertilización mineral.

Referencia	Fertilizante	Cantidad [kg/ha]	Rendimiento [kg/ha]
Base de datos GREET	Ácido fosfórico	184	1,500
	Nitrógeno	60	
	Cloruro de potasio, KCl (N:P:K: 0:0:60)	125	

Al asumir fertilización mineral en lugar de fertilización orgánica como se considera en el escenario base las emisiones de GEI se redujeron en 22% durante la etapa de cultivo, y 19% para todo el proceso de producción de una tonelada de biodiesel. Esto se debe al mayor rendimiento de grano seco por hectárea conducido por las prácticas de fertilización mineral (figura 6.8). Por esta razón, aunque el consumo energético del proceso de producción de biodiesel aumentó 140%, las emisiones de GEI por unidad funcional se redujeron. El consumo energético dentro de la etapa de cultivo aumentó 1,056%, mientras que las etapas de extracción de aceite, transesterificación y transporte no presentaron variaciones. El aumento en el consumo energético es causado por la producción de los productos fertilizantes, y la tasa de aumento que sufrió en la etapa de cultivo respecto al escenario base es particularmente notoria debido al sistema orgánico y de baja intensidad con el que la *Jatropha* es cultivada. Este resultado es un claro ejemplo de que los sistemas de baja intensidad así como los orgánicos no siempre tienen un comportamiento ambiental preferible respecto a los sistemas altamente intensivos y los que utilizan herramientas químicas y minerales de mejoramiento de cultivos (Boldrin et al. 2010), pues aunque las emisiones de GEI en los procesos orgánicos son menores respecto a la unidad de tierra cultivada, generalmente presentan conductas ambientales más dañinas por unidad de producto. Sin embargo, en este caso en específico, la fertilización mineral asumida no se presenta como una opción recomendable a implementar con la finalidad de mejorar el sistema pues el IEN, es decir el cociente de la energía que se genera en forma de biodiesel entre la energía que se requiere para producirlo es de 1.05, lo que lo convierte en un sistema altamente ineficiente: incluso teniendo en cuenta que las emisiones de GEI por unidad

funcional disminuyen, se necesita gastar 0.96 MJ de energía por cada MJ de energía en forma de biodiesel que se produce. Los resultados en las emisiones de GEI y consumo de energía del escenario de fertilización mineral se muestran en la tabla 6.5 y en la figura 6.9.

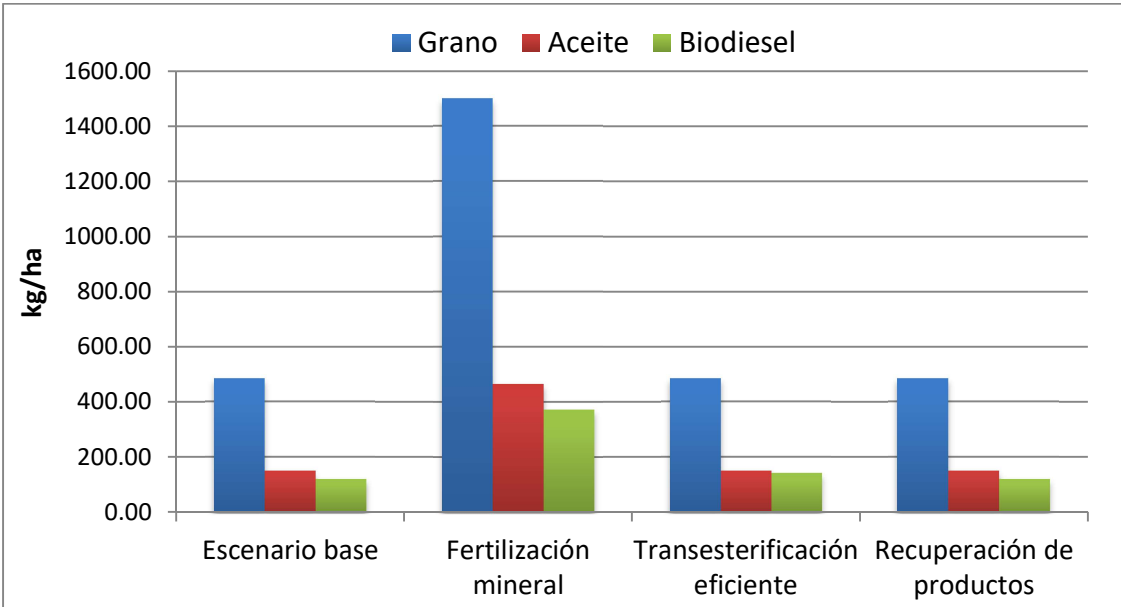


Figura 6.8 Producción alcanzable de grano, aceite y biodiesel por hectárea para los escenarios analizados.

Tabla 6.5 Resultados de la producción por hectárea, el consumo de energía y las emisiones de GEI de los escenarios analizados.

Producción, consumo energético y emisiones de GEI							
	Escenario base	Fertilización mineral	Variación respecto al escenario base	Transesterificación eficiente	Variación respecto al escenario base	Recuperación de productos	Variación respecto al escenario base
Producción alcanzable por hectárea							
	kg/ha	kg/ha	%	kg/ha	%	kg/ha	%
Grano	484	1,500	210	484	0	484	0
Aceite	150	466	210	150	0	150	0
Biodiesel	120	373	210	143	19	120	0
Consumo energético							
Etapa	MJ/t	MJ/t	%	MJ/t	%	MJ/t	%
Cultivo	1,980	22,884	1,056	1,667	-16	1,445	-27
Extracción	1,209	1,209	0	1,018	-16	883	-27
Transesterificación	11,688	11,688	0	6,102	-48	11,226	-4
Transporte	92	92	0	78	-15	67	-27
Total	14,969	35,873	140	8,865	-41	13,621	-9
Emisiones de GEI							
Etapa	kg de CO <sub>2</sub> e/t	kg de CO <sub>2</sub> e/t	%	kg de CO <sub>2</sub> e/t	%	kg de CO <sub>2</sub> e/t	%
Cultivo	2,101	1,639	-22	1,769	-16	1,535	-27
Extracción	82	82	0	69	-16	60	-27
Transesterificación	291	291	0	254	-13	280	-4
Transporte	7	7	0	6	-16	5	-27
Total	2,481	2,019	-19	2,098	-15	1,879	-24

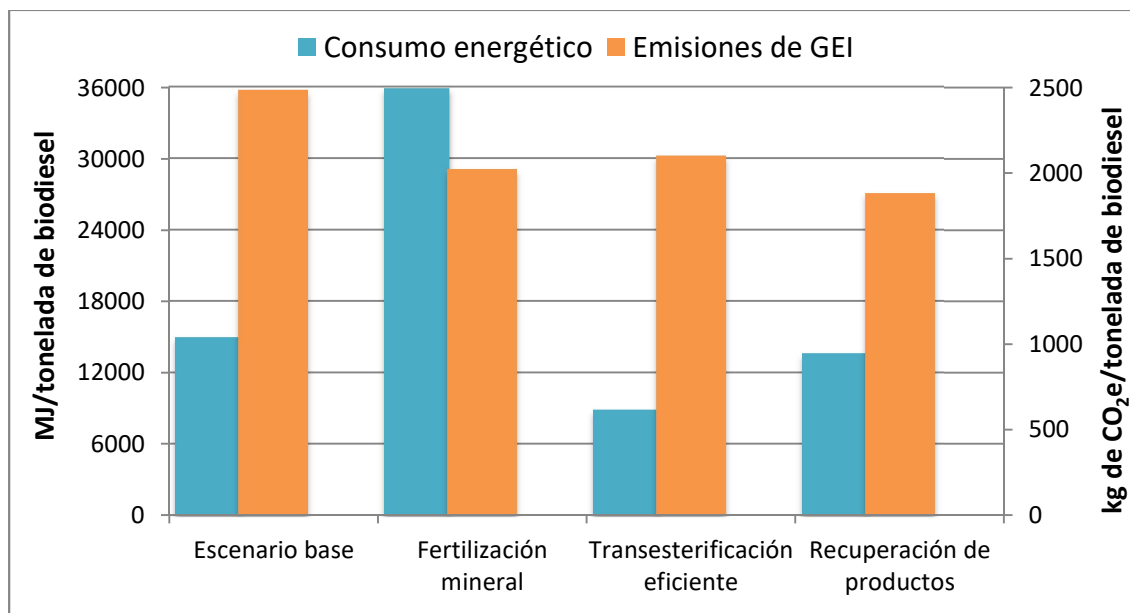


Figura 6.9 Consumo de energía y emisiones de GEI totales para los escenarios analizados.

#### 6.4.2 Transesterificación eficiente

La transesterificación es el proceso que mayor energía consume durante la producción del biocombustible, y el segundo en las emisiones de GEI. Las características asumidas durante esta fase tienen un impacto significativo en los resultados del ACV de la producción de biodiesel de jatropha puesto que si disminuye el consumo de energía durante el proceso de transesterificación es muy probable que también las emisiones de GEI se reduzcan. En el presente estudio, se utiliza metanol e hidróxido de potasio durante la reacción así como gas licuado de petróleo y electricidad para llevarla a cabo. Según los datos obtenidos por el fabricante, el rendimiento en masa es de 80%, es decir, se obtienen 0.8 kg de biodiesel por kg de aceite de jatropha. De acuerdo con Portugal-Pereira et al. (2016), la eficiencia durante el proceso de transesterificación puede ser de 95%, utilizando por tonelada de aceite 0.13 GJ de electricidad, 1.4 GJ de energía en forma de vapor, 14.4 kg de hidróxido de potasio, 4.8 kg de ácido clorhídrico (HCl) y 88 kg de metanol con una tasa de reciclado de 50%. Las características adoptadas por Portugal-Pereira et al. (2016) durante la etapa de transesterificación van a ser aplicadas en esta evaluación debido a que presentan una gran oportunidad de mejora al completar la reacción de manera más eficiente, y el cambio en el proceso para conseguirlo se completa de forma relativamente sencilla.

Cuando el proceso de transesterificación se vuelve más eficiente, los resultados del ACV por la producción de biodiesel de jatropha entregan un impacto ambiental menor respecto al escenario base. Con las consideraciones tomadas al elaborar el escenario, el consumo energético por la producción de una tonelada de biodiesel fue de 8,865 MJ, lo que se

traduce en una reducción del 41% en relación al escenario base. Las fases de cultivo y extracción de aceite redujeron el consumo energético 16% cada una, mientras la transesterificación y el transporte presentaron 48% y 15% respectivamente menos uso de energía en relación al escenario base (figura 6.10). La producción de una tonelada de biodiesel con condiciones eficientes de transesterificación generan la emisión de 2,098 kg de CO<sub>2</sub>e, es decir, 15% menos emisiones de GEI respecto al escenario base. Igualmente, en todos los procesos dentro del sistema de producción de biodiesel se observa una reducción en las emisiones de GEI por tonelada de biodiesel respecto al escenario base: las etapas de cultivo, extracción de aceite y transporte generan 16% menos emisiones de CO<sub>2</sub>e/t cada una en relación a los condiciones con las que se fabrica actualmente el biodiesel, mientras que durante la fase de transesterificación las emisiones se redujeron en 13% (figura 6.11). La producción de grano seco en la fase de cultivo con las condiciones asumidas en el escenario de transesterificación eficiente, así como el rendimiento durante la extracción de aceite no tuvieron variación respecto al escenario base (tabla 6.5), sin embargo, el rendimiento durante la transesterificación mostró un incremento de 19%, obteniendo de este modo 143 kilogramos de biodiesel por hectárea cultivada (950 kg de biodiesel por tonelada de aceite). Lógicamente, el incremento en la eficiencia de la transesterificación es el motivo por el cual el sistema mejoró su comportamiento ambiental tanto en el consumo energético como en la emisión de GEI, además, el IEN resultó en 4.23, mostrando un incremento de 69% en relación al escenario base, estableciendo así que se necesitan 0.24 MJ de energía para producir 1 MJ de energía en forma de biodiesel.

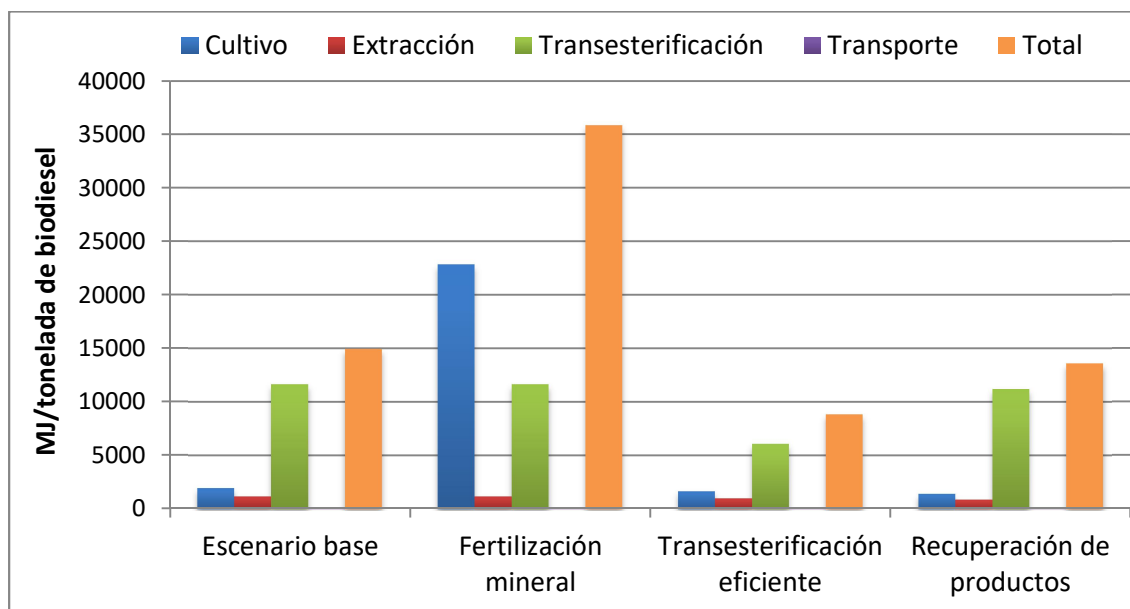


Figura 6.10 Consumo de energía por etapa para los escenarios analizados.



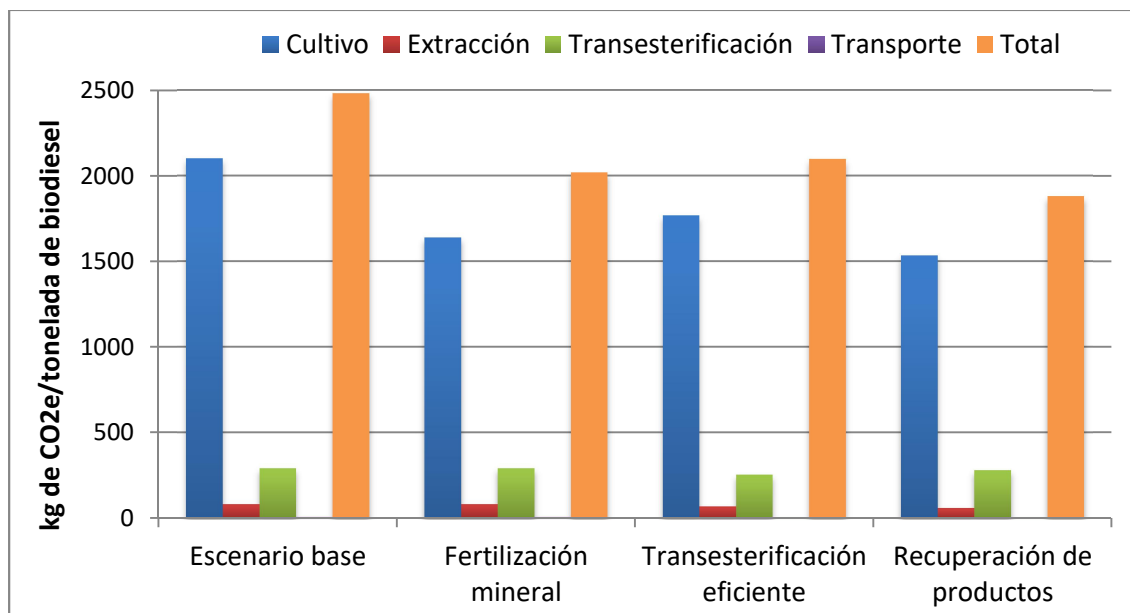


Figura 6.11 Emisiones de GEL por etapa para los escenarios analizados.

### 6.4.3 Recuperación de productos

La distribución de cargas de los productos recuperados es un factor que influye considerablemente en el desempeño ambiental del sistema evaluado. Las cargas ambientales pueden distribuirse por medio de diferentes metodologías entre todos los productos de salida del sistema, haciendo el impacto ambiental del producto de salida principal menor. Las normas ISO 14040/14044 señalan que si es posible la distribución de cargas debe evitarse. Sin embargo, cuando esto no es posible se recomienda que la distribución se realice utilizando causalidad física, y que ésta debe reflejar las relaciones físicas básicas entre las unidades funcionales (Azapagic & Clift 1999). Sin embargo de acuerdo a la meta y el alcance definidas para el presente análisis de ciclo de vida y a la falta de información para conducir un análisis más detallado, la distribución de cargas ambientales que se realiza en este escenario va a llevarse a cabo con base en el contenido energético de los productos, de acuerdo a la metodología empleada en el modelo GREET la cual se describe en la sección 4.3.

La distribución de cargas ambientales por la recuperación de productos derivados no se considera en el escenario base del presente ACV debido a que la generación de los productos que pueden recuperarse es muy variada y depende en gran medida de las condiciones locales, las prácticas de cultivo y el uso que los productos derivados puedan tener, entre otros factores, así como para favorecer la comparabilidad de los resultados de la presente investigación. Las personas que laboran en la planta productora de biodiesel de la que se obtuvieron los datos del sistema para la realización del ACV en el presente estudio,

indican que se recuperan 732 kg de pasta de semilla y 250 kg glicerina por tonelada de biodiesel producida. La glicerina se utiliza con fines industriales que no fueron especificados mientras que con la pasta de semillas se fabrican pellets que posteriormente son enviados a un centro académico con fines de investigación. La figura 6.12 muestra los límites del sistema a evaluar en el escenario de recuperación de productos dentro de los cuáles la pasta de semillas recuperada durante la etapa de extracción de aceite y la glicerina recuperada en el proceso de transesterificación están incluidas. Si bien cáscaras, hojas y ramas pueden recuperarse durante la etapa de cultivo, no son tomadas en cuenta en la elaboración de este escenario.

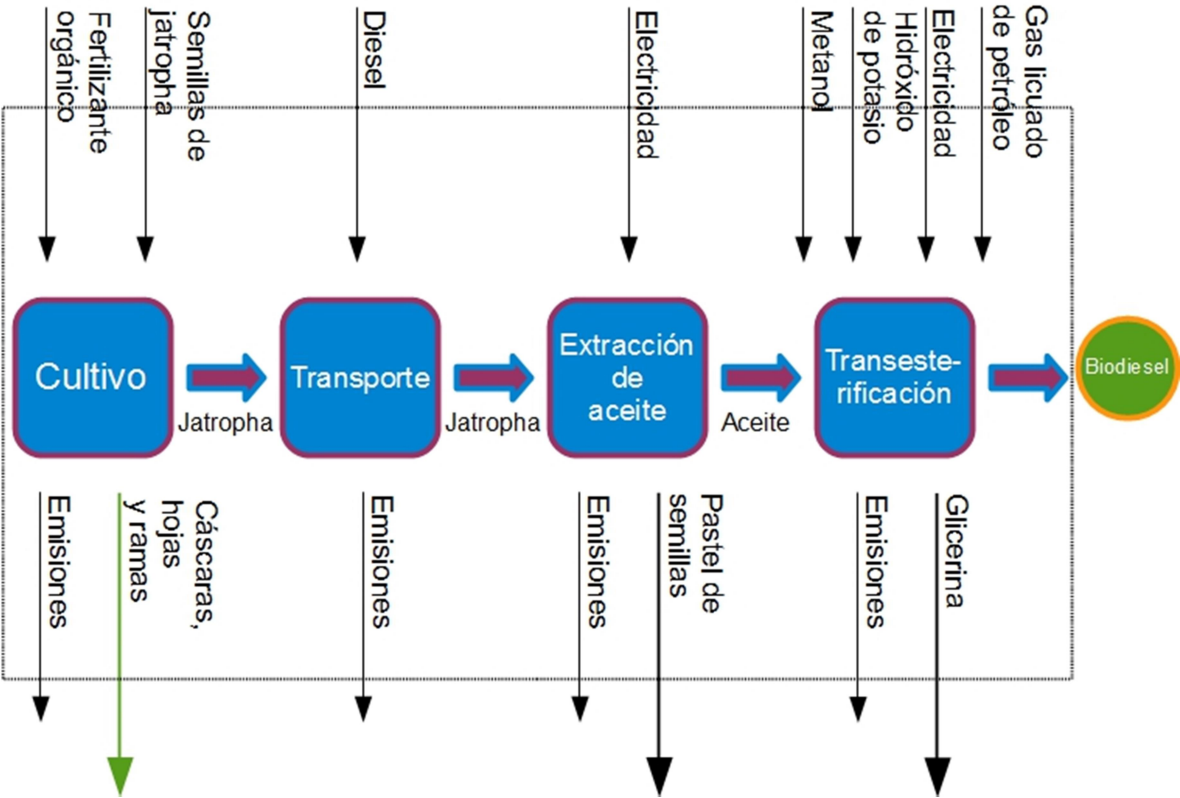


Figura 6.12 Límites del sistema del ACV para el escenario de recuperación de productos.

Las condiciones de producción de biodiesel asumidas en la elaboración del escenario que contempla los productos derivados son las mismas condiciones que se consideran en el escenario base. Sin embargo, durante la elaboración de este escenario se lleva a cabo una distribución de cargas ambientales entre los productos que se generan en el sistema, modificando el resultado total y por proceso obtenido respecto a la unidad funcional. Para realizar la distribución, a los productos generados se les asigna un valor proporcional a su

masa, contenido energético o valor en el mercado, y posteriormente, las cargas ambientales se reparten de acuerdo al valor que cada producto tiene asignado. La distribución de cargas ambientales se realizó de acuerdo al contenido energético entre biodiesel (37.44 MJ/kg), pasta de semillas (18.20 MJ/kg) y glicerina (6.20 MJ/kg). Puesto que el contenido energético de los productos está dado en relación a su masa, la cantidad de los productos derivados que se recupera durante el proceso es un factor determinante en el resultado del análisis. La distribución de las cargas ambientales se completa en las etapas de extracción de aceite y transesterificación pues en éstas se recupera la pasta de semilla y la glicerina respectivamente. Conducido por la recuperación de los productos derivados durante el proceso, el consumo energético se reduce 9% (Figura 6.10) y las emisiones de GEI son mitigadas 24% (Figura 6.11) en relación al escenario base. Debido a que la distribución de cargas ambientales se realiza por medio de un factor que se genera con base en la cantidad de producto recuperado y a su contenido energético, la disminución en el consumo de energía y la mitigación en las emisiones de GEI son iguales en todas las etapas: cultivo 27%, extracción de aceite 27%, transesterificación 4% y transporte 27%. Los resultados totales y por etapa para el escenario de recuperación de productos se muestran en la tabla 6.5. El IEN, es decir el cociente entre la energía que sale en forma de biodiesel y la energía necesaria para generarlo es 2.72, 8% superior al del escenario base, y está conducido por el consumo energético asignado a la pasta de semillas y a la glicerina.

La distribución de cargas ambientales dentro del ACV es un tema delicado que puede llevar a variaciones significativas en los resultados de los estudios, por lo que debe practicarse de forma cuidadosa y de acuerdo al sistema que se está analizando. También, la forma en la que se asignan los factores mediante los cuales se lleva a cabo la distribución de cargas precisa tomar en cuenta importantes consideraciones. Las características escogidas en la elaboración de este escenario, tomando pasta de semillas y glicerina como únicos productos derivados y realizando la asignación de acuerdo a su valor energético, son precavidas de acuerdo al total de productos que pueden recuperarse: si se toma en cuenta todos los productos derivados recuperables (cáscaras de la fruta, hojas y restos del arbusto procedentes de la poda) y la distribución de cargas se realiza con base a la masa, el resultado obtenido presentaría un mejor comportamiento ambiental.

El análisis de sensibilidad presenta dos asuntos importantes: por un lado, muestra las áreas de oportunidad para mejorar el sistema de producción de biodiesel a partir de *jatropha* al hacer más eficiente el proceso de transesterificación, la posibilidad de incluir los fertilizantes minerales dentro del cultivo de *jatropha*, y el tratar de recuperar todos los productos derivados por la producción del biodiesel así como de tener un uso específico para ellos, que propicie el desplazamiento de productos similares que se fabrican de forma menos sustentable; y por el otro, el análisis de sensibilidad manifiesta la importancia de las consideraciones y las suposiciones tomadas en las evaluaciones de desempeño ambiental (entre las que se encuentra el ACV) y cómo afectan a los resultados. En los estudios sobre

biocombustibles, el rendimiento que tienen los cultivos energéticos en la producción de materia prima para producir etanol o biodiesel es un factor que debe manejarse con especial cuidado: debido al gran impacto ambiental que tiene la etapa de cultivo para la producción de biocombustibles las suposiciones optimistas o pesimistas pueden llevar a tener rendimientos inesperados y perjudicar en gran medida los planes que se tengan para los combustibles. Utilizar datos reales y monitorizar los cultivos será de gran ayuda para la correcta evaluación energética de los biocombustibles, sobre todo en casos como el de la *jatropha*, la cual comenzó a estudiarse recientemente y muchos aspectos de su comportamiento siguen sin conocerse del todo (Adil et al. 2015). El análisis de sensibilidad indica que hacer más eficiente el proceso de transesterificación en el sistema de producción de biodiesel es una medida recomendable para incrementar su valor ambiental, los productores no requieren una inversión de infraestructura y únicamente necesitan un cambio en los insumos con los que el biodiesel se fabrica (Portugal-Pereira et al. 2016). Buscar un uso a los productos derivados que no se recuperan también podría traer beneficios ambientales y económicos, aunque lograr esto puede ser más complicado.

La falta de uniformidad al utilizar el ACV para cuantificar los impactos ambientales por la producción de biocombustibles es uno de los principales inconvenientes que ésta herramienta presenta al querer comparar resultados. En gran medida, esto se debe a la escasez de información al respecto. En el caso específico del biodiesel de *jatropha*, el desconocimiento sobre el cultivo de la planta y los rendimientos que puede alcanzar es uno de los principales obstáculos para comparar distintos sistemas. La adopción de diferentes metodologías a la hora de realizar el análisis de impactos ambientales, las consideraciones tomadas, y la recuperación y distribución de cargas ambientales de los productos derivados en los sistemas evaluados pueden presentar también dificultades. Por esta razón, seguir generando información sobre biocombustibles y realizar ACV sobre su producción pueden servir como instrumento para ir reduciendo la falta de homogeneidad en los estudios, lo cual es particularmente cierto para el caso de México donde la información es todavía más escasa. La investigación científica y la generación de información son elementos clave para desarrollar e implementar tecnologías que puedan disminuir la desigualdad social y contribuir al desarrollo sustentable.

## 7 Mitigación en las emisiones de GEI por políticas de uso obligatorio de biodiesel

Los potenciales beneficios que los biocombustibles poseen fueron previamente discutidos. En secciones anteriores se mencionó que adicionalmente a la disminución en las emisiones de GEI que el uso de los biocombustibles puede tener en contraste con la utilización de sus equivalentes fósiles (Silva et al. 2011), se encuentran también la oportunidad de utilizarlos como elemento de desarrollo económico, sobre todo en medios rurales, y su posible aplicación en la diversificación energética (LPDB 2008). Respecto al último punto, la diversificación es un factor clave para alcanzar independencia energética, indicador que pasó en México de 1.42 en el año 2000 a ser de 0.97 en 2015, lo cual quiere decir que la producción de energía del país no fue capaz de satisfacer a la demanda en el último año (SENER 2016). La principal razón para este gradual declive en el Índice de Independencia Energética (IIE) es que en México existe una matriz energética altamente dependiente del petróleo, y la producción de crudo cayó desde 3.01 Mbpd (millones de barriles por día) hasta 2.27 Mbpd en el mismo espacio de tiempo. La Figura 7.1 muestra la relación entre la producción de petróleo y el IIE mexicanos en el periodo 2000-2015. En este contexto los biocombustibles pueden servir como elemento de diversificación en la matriz energética nacional, así como en la mitigación de emisiones de GEI del sector transporte. Aunque se reconoce la importancia de la diversidad y la independencia energética, y se recomienda el posterior estudio de la utilidad de los biocombustibles en este sentido, el presente capítulo se enfoca únicamente en los beneficios ambientales.

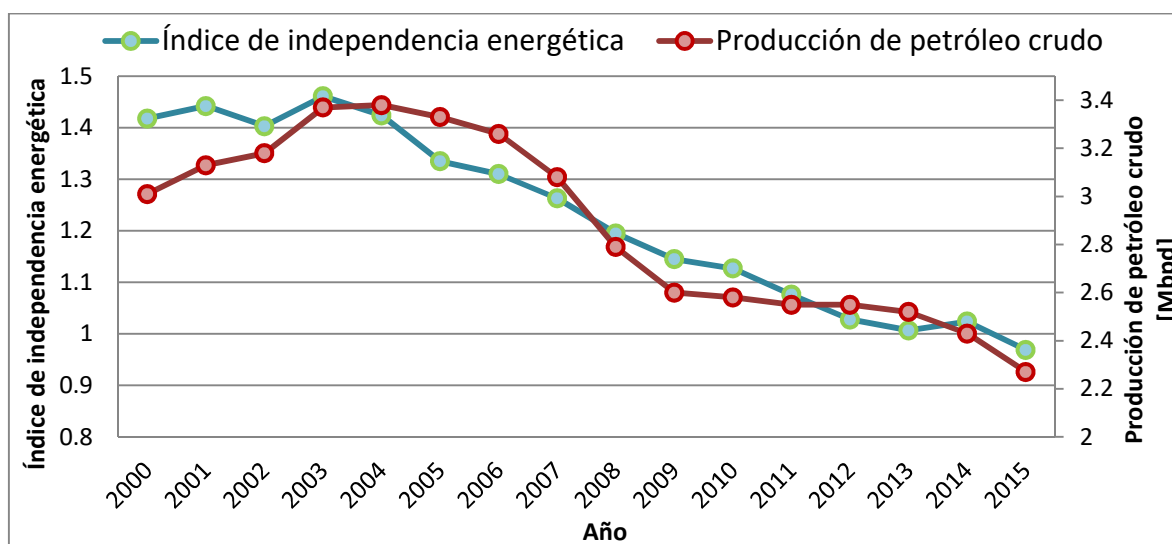


Figura 7.1 Índice de independencia energética y producción de petróleo crudo mexicanos por año.  
Fuente: SENER 2016.

Como se mencionó en la sección 2.2 y durante la descripción de la meta y el alcance del estudio, establecer una industria bioenergética capaz de suministrar combustibles para transporte con la finalidad de descarbonizar el sector, sin que existan políticas públicas que lo propicien va a resultar sumamente complicado. El hecho de que los cinco países líderes en la producción de etanol y biodiesel tengan establecidas rigurosas políticas respecto la utilización de biocombustibles (REN21 2016a), aunado a la información obtenida mediante investigación científica con la que están fundamentadas, muestran que la implementación de políticas públicas es una de las herramientas principales para alcanzar un sector transporte sustentable. En este capítulo, los resultados del ACV completado en el presente estudio van a ser utilizados en la elaboración de diferentes escenarios con el objetivo de evaluar la potencial mitigación en las emisiones de GEI del sector transporte que puede alcanzarse por la implementación de políticas públicas de uso obligatorio de biocombustibles.

### 7.1 Consumo de diesel y plantación de jatropha

En 2015 en México se consumieron 867 PJ de energía en forma de diesel. El sector transporte utilizó 652 PJ, de los cuales el autotransporte fue responsable del consumo de 587 PJ, es decir el 90% del gasto por transporte (SENER 2016). Empleando información del Instituto de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), el documento *Prospectiva de Energías Renovables 2012-2026* (Prospectiva de Energías Renovables 2012-2026 2012) señala que en México existe el potencial de cultivar entre 2.26 y 3.47 Mha de jatropha con la finalidad de producir biodiesel. Respecto a esto, García et al. (García et al. 2015) utilizan 3.2 Mha como valor potencial de cultivo de jatropha con fines energéticos. En este estudio, el valor empleado por García y sus colegas va a ser utilizado en la producción nacional alcanzable de biodiesel.

### 7.2 Emisiones de GEI en combustibles

Las emisiones de CO<sub>2</sub> ocasionadas por el sector transporte se calculan de mejor manera si se cuenta con información sobre el tipo de combustible quemado y su contenido de carbón (IPCC 2006). En general, las emisiones de CO<sub>2</sub> pueden calcularse con la ecuación siguiente:

Ecuación 7.1

$$Emisiones = \sum_a [Combustible_a \cdot FE_a]$$

donde:

Emisiones = emisiones de CO<sub>2</sub> [kg]

Combustible = cantidad de combustible utilizado [TJ]

FE = factor de emisión [kg/TJ]

a = tipo de combustible (gasolina, diesel, gas natural, etcétera)

El factor de emisión de CO<sub>2</sub> representa el 100% de oxidación del carbono contenido en el combustible y considera todo el carbono que se emite como CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, CO, COVDM (Compuestos Orgánicos Volátiles Distintos del Metano) y PM. El IPCC propone factores de emisión de CO<sub>2</sub> para la combustión de diesel de 72,600 kg/TJ como mínimo y de 74,800 kg/TJ como máximo (IPCC 2006), mientras que en el programa GREET se utiliza un valor de 74,690 kg/TJ (Argonne 2016), el cual va a ser considerado para realizar los cálculos en el presente capítulo.

Las emisiones de CO<sub>2</sub> derivadas de carbón biogénico no se incluyen en los totales, debido a que virtualmente éstas fueron previamente absorbidas de la atmósfera mientras la biomasa crecía (Portugal-Pereira et al. 2016; IPCC 2006). Sin embargo para evitar reportar de manera equivocada las emisiones de CO<sub>2</sub> es importante evaluar el origen de los biocombustibles para poder identificar y separar los insumos fósiles de la materia prima biogénica. La cantidad de carbono biogénico puede estimarse por medio de factores de emisión, es decir multiplicando el factor de emisión fósil por su fracción en el biocombustible quemado, para obtener un nuevo factor de emisión (IPCC 2006). Para llevar a cabo los cálculos de las emisiones por la combustión del biodiesel, el factor de emisión que va a utilizarse es de 5,602 kg/TJ, el cual fue obtenido de multiplicar el factor de emisión del diesel fósil (74,690 kg/TJ) por el contenido de insumos fósiles (20% de metanol) y por el contenido de carbono dentro de estos (37.5% (Argonne 2016)).

Las emisiones de CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O por la utilización de combustibles son más difíciles de estimar debido a que el factor de emisión para estos compuestos depende también de la tecnología del vehículo y de las características de operación (IPCC 2006). Las emisiones de CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O pueden cuantificarse de la misma forma en que se calculan las emisiones de CO<sub>2</sub> (ecuación 7.1), utilizando un factor de emisión distinto. Debido a que se desconocen tanto las tecnologías de combustión, como las características con las que va a llevarse a cabo, es posible asumir que las emisiones CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O son iguales para ambos tipos de combustibles (Nanaki et al. 2012). Los factores de emisión de CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O utilizados para realizar la cuantificación en las emisiones de GEI en el presente capítulo son de 4.15E-02 kg/TJ y 3.53E-04 kg/TJ respectivamente (Nanaki et al. 2012).

Las emisiones de GEI (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O) por la producción de diesel fósil van a tomarse del programa GREET, en la modalidad de diesel convencional obtenido de petróleo crudo (Argonne 2016), mientras que los resultados del ACV obtenidos en el presente estudio van a ser utilizados en la estimación de las emisiones de GEI por la producción del biodiesel.

### 7.3 Descripción de escenarios

Con el fin de cuantificar la posible mitigación en las emisiones de GEI generadas por el sector transporte, van a elaborarse cinco escenarios que incluyan mezclas con biodiesel y van a compararse con un escenario de referencia. Tomando en cuenta las características del sistema analizado en el escenario base del ACV, pueden producirse anualmente 120 kg de biodiesel por cada hectárea de jatropha sembrada. Considerando un poder calorífico inferior del biodiesel de 37.44 MJ/kg (Argonne 2016) y 3.2 Mha potencialmente disponibles para cultivo de jatropha, podrían generarse al año 14.38 PJ en forma de biodiesel, es decir el 2.45% del diesel consumido por el autotransporte en México. La energía que puede generarse en forma de biodiesel de acuerdo a las características del ACV y el análisis de sensibilidad conducidos para los escenarios restantes, se calcula siguiendo el mismo procedimiento y los resultados se muestran en la tabla 7.1.

Tabla 7.1 Energía en forma de biodiesel alcanzable de acuerdo a las características del ACV.

Energía alcanzable en forma de biodiesel					
	Producción por ha [kg]	Número de ha [millones de ha]	Producción alcanzable [kg de grano]	Energía [PJ]	% utilización de diesel
Base	120	3.2	384,000,000	14.38	2.45
Recuperación de productos	120	3.2	384,000,000	14.38	2.45
Transesterificación eficiente	143	3.2	457,600,000	17.13	2.92
Fertilización mineral	373	3.2	1,193,600,000	44.69	7.62

Como se muestra en la tabla 7.1, todos los escenarios analizados durante el ACV pueden alcanzar por lo menos el 2% de la energía total utilizada en forma de diesel por el autotransporte en México en 2015, incluyendo el escenario de fertilización mineral que puede satisfacer más del 7%. Por esta razón, en cuatro de los escenarios se va a sustituir el 2% del diesel fósil utilizado por el sector transporte con biodiesel, y en un quinto escenario se reemplazará el 5%. La mitigación en las emisiones de GEI va a resultar de la diferencia de utilizar 100% de diesel fósil en el autotransporte (escenario de referencia) comparado con el uso de mezclas que contengan biodiesel derivadas de la implementación de políticas públicas de uso obligatorio de biocombustible de 2% y 5%.

Las emisiones generadas por la combustión del diesel y el biodiesel dentro del vehículo van a calcularse por el método que se explicó en la sección 7.2. Para las emisiones de GEI a causa de la producción van a utilizarse los resultados del ACV conducido en el caso de los biocombustibles, mientras que se va a emplear un valor de referencia obtenido del



programa GREET para el diesel fósil. La tabla 7.2 muestra información sobre los escenarios analizados en donde la letra *B* indica que existe una política de mezcla obligatoria de combustible que incluye biodiesel, y el número que está enseguida indica el porcentaje de biodiesel contenido en la mezcla.

Tabla 7.2 Características de los escenarios evaluados en la potencial mitigación en las emisiones de GEI por el consumo de diesel en el sector transporte.

Características de los escenarios evaluados				
Escenario	Características del biodiesel	Políticas de uso obligatorio de biodiesel	Factores de emisión de GEI por la producción del combustible [tCO <sub>2</sub> e/TJ]	
			Diesel fósil	Biodiesel
Referencia	-	Inexistente	17.01	-
CB-B2	Caso base del ACV	B2	17.01	66.12
RP-B2	Recuperación de productos AS	B2	17.01	50.08
TE-B2	Transesterificación eficiente AS	B2	17.01	55.92
FM-B2	Fertilización mineral AS	B2	17.01	53.80
FM-B5	Fertilización mineral AS	B5	17.01	53.80

AS = análisis de sensibilidad.

### 7.3.1 Escenario de referencia

En el escenario de referencia se asumen las condiciones de consumo actuales, es decir que únicamente se utiliza diesel fósil dentro de los vehículos de ignición por compresión en el autotransporte en México. Las emisiones de GEI por su producción y combustión son las mencionadas en la sección 7.2.

### 7.3.2 Escenario CB-B2

En este escenario se considera que se implementa la política de mezclar de manera obligatoria 2% de biodiesel con el diesel convencional en el sector transporte mexicano. Las emisiones de GEI por la producción del biodiesel son los resultados obtenidos en el caso base del ACV que se realizó en el presente estudio, mientras que las emisiones por su combustión en el vehículo son las consideradas en la sección 7.2.

### 7.3.3 Escenario RP-B2

En el escenario RP-B2 se asume que existe la política de uso obligatorio de 2% de biodiesel en el autotransporte del país. Las emisiones por la producción son las obtenidas durante el análisis de sensibilidad considerando la recuperación de productos derivados, y las emisiones por la combustión del biodiesel son las que se describen en la sección 7.2.

#### 7.3.4 Escenario TE-B2

De la misma manera, en este escenario se asume que es obligatorio mezclar 2% de biodiesel con diesel convencional para el autotransporte. Las emisiones por la combustión del biodiesel son las mencionadas en la sección 7.2, mientras las emisiones por la producción se asumen de los resultados obtenidos durante el análisis de sensibilidad considerando transesterificación eficiente.

#### 7.3.5 Escenario FM-B2

En el escenario FM-B2 se asume también que es necesario tener 2% de biodiesel en la mezcla de combustible para autotransporte en México, derivado de la implementación de políticas públicas de uso obligatorio. Las emisiones por la producción del biocombustible vienen de los resultados del análisis de sensibilidad considerando fertilización mineral, a la vez que las emisiones por la combustión son las que se describen en la sección 7.2.

#### 7.3.6 Escenario FM-B5

A diferencia de los escenarios anteriormente descritos, en la elaboración de éste se asume que la política de mezclar de manera obligatoria biodiesel con diesel convencional en el autotransporte del país, señala que la mezcla debe contener 5% del biocombustible. Las emisiones por la producción del biodiesel son las mismas asumidas para el escenario FM-B2, es decir las obtenidas en el análisis de sensibilidad considerando fertilización mineral, mientras las emisiones por la combustión son las descritas en la sección 7.2.

### 7.4 Resultados

Las emisiones de GEI por la utilización de diesel en el autotransporte en México para el año 2015 son de casi 54 MtCO<sub>2e</sub>: cerca de 10 MtCO<sub>2e</sub> por la producción del diesel y 44 MtCO<sub>2e</sub> por su combustión en los vehículos. Los resultados arrojados en la evaluación de los escenarios indican que existe un potencial de mitigación anual en las emisiones de GEI por la inclusión del biodiesel en el sector transporte, que va desde 234 ktCO<sub>2e</sub> en el escenario CB-B2, hasta 947 ktCO<sub>2e</sub> posibles con las características del escenario FM-B5 (tabla 7.3). El potencial de mitigación mínimo, 234 ktCO<sub>2e</sub>, se observa en el escenario que contempla la política de uso obligatorio de biodiesel de 2%, con las emisiones durante su producción obtenidas del caso base del ACV conducido. Es seguido por el escenario que contempla la transesterificación eficiente y el uso de 2% de biodiesel de forma obligatoria con 354 ktCO<sub>2e</sub>. De acuerdo al ACV realizado, este escenario podría alcanzarse de manera más o menos sencilla si se modifican las técnicas de producción de biocombustible, específicamente durante la etapa de transesterificación como se explica en la sección 6.4.2. Con un potencial de mitigación de 378 ktCO<sub>2e</sub> se encuentra el escenario que contempla la

fertilización mineral en el cultivo de jatropha y 2% de uso obligatorio de biodiesel. El escenario con el mayor potencial de mitigación en las emisiones de GEI con la política B2 es el RP-B2, el cual considera que los productos derivados de la producción del biodiesel se recuperan durante el proceso y se les distribuye parte de las cargas ambientales del sistema. Ésta suposición aumenta considerablemente la mitigación respecto al escenario CB-B2, y el utilizar los productos recuperados de manera consistente y sistemática en la producción del biodiesel o durante otros procesos productivos podría permitir tomarla en cuenta de manera válida. La implementación de una política B5 con las características de producción de biodiesel derivadas del análisis de sensibilidad en el escenario de fertilización mineral tienen el potencial de disminuir 947 ktCO<sub>2</sub>e por año en el sector transporte. La Figura 7.3 muestra la potencial reducción en las emisiones de GEI por la implementación de políticas públicas de uso obligatorio de biodiesel de acuerdo a los escenarios evaluados.

Tabla 7.3 Mitigación potencial en las emisiones de GEI por el consumo de diesel en el sector transporte mexicano.

Mitigación potencial en las emisiones de GEI										
Escenario	Porcentaje del combustible en la mezcla [%]		Emisiones por la producción [tCO <sub>2</sub> e]			Emisiones por la combustión [tCO <sub>2</sub> e]			Emisiones totales [tCO <sub>2</sub> e]	Mitigación [tCO <sub>2</sub> e]
	Diesel fósil	Biodiesel	Diesel fósil	Biodiesel	Total	Diesel fósil	Biodiesel	Total		
Referencia	100	0	9,977,556	0	<b>9,977,556</b>	43,811,698	0	<b>43,811,698</b>	<b>53,789,254</b>	-
CB-B2	98	2	9,778,005	775,680	<b>10,553,685</b>	42,935,465	65,732	<b>43,001,197</b>	<b>53,554,882</b>	<b>234,373</b>
RP-B2	98	2	9,778,005	587,509	<b>10,365,514</b>	42,935,465	65,732	<b>43,001,197</b>	<b>53,366,711</b>	<b>422,544</b>
TE-B2	98	2	9,778,005	656,020	<b>10,434,025</b>	42,935,465	65,732	<b>43,001,197</b>	<b>53,435,222</b>	<b>354,033</b>
FM-B2	98	2	9,778,005	631,149	<b>10,409,154</b>	42,935,465	65,732	<b>43,001,197</b>	<b>53,410,351</b>	<b>378,904</b>
FM-B5	95	5	9,478,678	1,577,873	<b>11,056,551</b>	41,621,114	164,330	<b>41,785,444</b>	<b>52,841,995</b>	<b>947,260</b>

Al incluir biodiesel, se observa que las emisiones de GEI totales por la producción de la mezcla (diesel fósil y biodiesel) son mayores respecto a las emisiones de producción por utilizar únicamente diesel fósil, y en contraste, las emisiones por la combustión de la mezcla son menores en relación a la combustión de sólo diesel fósil. Esto se debe a que producir biocombustibles, específicamente biodiesel de jatropha, genera un impacto ambiental mayor en relación a los combustibles convencionales, principalmente por los fertilizantes utilizados en el establecimiento de cultivos energéticos (revisar capítulo 4), mientras se considera que la combustión de los biocombustibles emite menos GEI por la virtual absorción del CO<sub>2</sub> que se lleva a cabo mientras la biomasa crece. En el balance total, las emisiones de las mezclas diesel convencional-biodiesel son menores a las de

únicamente diesel convencional debido a que el orden en que disminuyen las emisiones por la combustión, es mayor que el orden en que aumentan las emisiones por la producción.

Es claro que la mitigación en las emisiones de GEI dependen en gran medida de las consideraciones tomadas durante la realización de la evaluación ambiental, sin embargo, los resultados del estudio indican que en el peor de los casos existe un potencial de mitigación superior a las 200,000 toneladas de CO<sub>2</sub>e anuales por la utilización de biodiesel en el sector transporte mexicano, revelando la capacidad de los biocombustibles para contribuir a descarbonizar el sector. De acuerdo a los resultados, mientras mayor sea la participación del biodiesel en la mezcla, mayor será el potencial de mitigación en las emisiones de GEI, sin embargo existen otros aspectos económicos, ambientales y sociales que deben ser contemplados. La disponibilidad de tierra y su competencia con la generación de alimentos es uno de los principales.

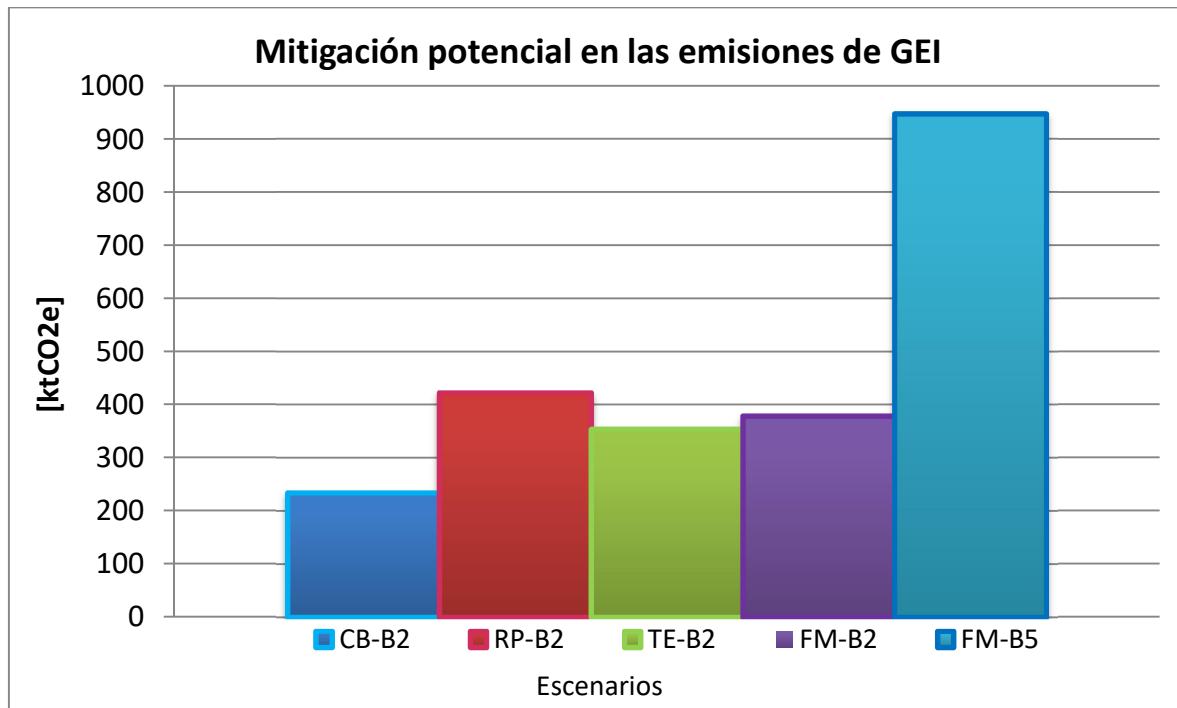


Figura 7.2 Mitigación potencial en las emisiones de GEI en el sector transporte mexicano.

## 8 Conclusiones

### 8.1 Conclusiones globales

Ser sustentable requiere un modelo económico-político distinto al que en el mundo se desarrolla actualmente. Sin embargo, modificar los hábitos de consumo y utilización de energía que han conducido a la crisis social y ambiental tan severa que se está enfrentando no es tarea fácil. Uno de los obstáculos que se presentan es el fenómeno denominado “encierro” (lock-in), el cual es utilizado en economía para explicar que una vez que se realizan ciertas inversiones y que se eligen las vías de desarrollo, los comportamientos relacionados con ellos están más o menos “encerrados” y cambiar esas vías se vuelve difícil y costoso. Un caso particular es el de la generación de electricidad: las fuentes renovables de energía pueden producir electricidad con un posible menor impacto al ambiente respecto a la producción eléctrica a partir de fuentes fósiles, sin embargo aumentar la participación de las energías renovables en el parque de generación eléctrica nacional puede ser complicado debido a que el 85% de la electricidad generada en el país se produce en termoeléctricas que utilizan combustibles fósiles (SENER 2016). Además, las recientes inversiones en ductos para transportar gas desde EUA obstaculizan aún más que inversiones en fuentes renovables de energía se realicen. Por otro lado, y relacionado al tema que se aborda en este trabajo, algunos estudios señalan que la introducción de automóviles eléctricos y de hidrógeno son una herramienta con un gran potencial en la disminución de emisiones de GEI a la atmósfera en el sector transporte, pero nuevamente se presenta la dificultad, para el estado y como individuo, de remplazar la flota de vehículos para transporte en el país. En este sentido, los biocombustibles presentan la oportunidad de introducirse en un mercado menos “encerrado”, pues los automóviles pueden utilizar porcentajes importantes de biocombustible mezclado con combustible convencional con pocas o ninguna modificación al motor con el que trabajan, e incluso ser utilizados como aditivos para el vehículo; mientras los resultados de este estudio muestran que los biocombustibles, específicamente el biodiesel obtenido a partir de jatropha puede reducir las emisiones de GEI en el sector transporte de forma significativa. Por esta razón, los biocombustibles se presentan como una herramienta de gran utilidad en la mitigación del cambio climático, y en la transición hacia una matriz energética más sustentable.

El enfoque en la mitigación del incremento en la temperatura media de la tierra debe conducirse de manera multi-sectorial. El transporte es uno de los sectores que más emisiones de GEI genera y más energía consume, principalmente por el dominio que los combustibles fósiles tienen como energéticos en este sector, por lo que es sumamente importante analizar los impactos ambientales de las alternativas que existen para sustituir a los combustibles fósiles en el transporte, en este caso los biocombustibles. Las políticas públicas pueden ser el principal impedimento o impulsor para completar cualquier cambio

social, ambiental o económico. La investigación llevada en este sentido muestra que existe una fuerte relación entre los países que producen biocombustibles y los países que tienen políticas públicas relacionadas con estos. Brasil, la Unión Europea y Estados Unidos son claros ejemplos de dicha relación. En México se está buscando promover el uso de los biocombustibles como elemento de mitigación en las emisiones de GEI en el sector transporte, aunque el marco jurídico es todavía débil.

Existen retos que deben superarse para poder utilizar los biocombustibles en México, entre los que destacan la competencia con el uso de suelo para la producción de alimentos, el precio que los biocombustibles pueden alcanzar, los impactos potenciales en la biodiversidad y que los biocombustibles se generen y utilicen de forma sustentable. Respecto al último punto, el Gobierno Federal está comprometido mediante la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos en su artículo XV, a impulsar el desarrollo sustentable de la producción y comercialización de insumos, así como de la producción, el transporte, la distribución, la comercialización y el uso eficiente de los bioenergéticos. Sin embargo, no se menciona una metodología para evaluar los impactos ambientales o la sustentabilidad en general de las alternativas bioenergéticas. El presente trabajo de investigación hace una contribución en este sentido al evaluar las emisiones de GEI y el consumo de energía por la producción y uso de biodiesel de jatropha, cuyos resultados arrojan la posibilidad de utilizarlos como elementos de mitigación en el sector transporte mexicano.

El estudio realizado muestra que es necesario establecer en el país un marco legislativo robusto referente a biocombustibles, y realizar inversiones para desarrollar una industria bioenergética bien establecida. Las políticas públicas de uso obligatorio de biocombustibles elaboradas contemplando criterios de sustentabilidad y con la inclusión en el marco legislativo de metodologías para evaluar los aspectos ambientales, económicos y sociales, tienen el potencial de reducir las emisiones de GEI del sector transporte mexicano. Aunque el desarrollo de los biocombustibles en el país se encuentra con años de atraso respecto a otros países, se cuenta con la ventaja de conocer la experiencia que han tenido, tanto política como tecnológica. Adicionalmente, existe la posibilidad de utilizar a los biocombustibles como elemento de diversificación en la matriz energética nacional y al asegurar independencia energética, y como impulsores de la economía del país, a micro y macro escalas, en medios rurales y con una industria bioenergética capaz de realizar exportaciones respectivamente, aunque se recomienda evaluar posteriormente el efecto que los biocombustibles pueden tener en este sentido.

## **8.2 Conclusiones específicas**

El objetivo del estudio es cuantificar las emisiones de GEI y el consumo de energía asociados a la producción de biodiesel obtenido a partir de jatropha, utilizando el análisis de ciclo de vida como herramienta de evaluación. Las emisiones de GEI son caracterizadas

en kg de CO<sub>2</sub> equivalente, en tanto que el consumo energético que incluye los insumos y la energía necesarios para completar el proceso es cuantificado en MJ. Los resultados del escenario base muestran que el consumo de energía por la producción del biocombustible alcanzan los 14,969 MJ por tonelada de biodiesel. La transesterificación es la etapa que mayor consumo tiene, aportando el 78% de la energía utilizada para completar el proceso de producción de biodiesel. Las etapas de cultivo y extracción de aceite aportan el 13% y 8% respectivamente del consumo de energía, mientras el transporte es responsable de menos del 1%. Las emisiones de GEI generadas por la producción del biodiesel son de 2,481 kg de CO<sub>2</sub>e por tonelada de biodiesel, causadas en su mayoría por el cultivo, etapa que generó el 85% de las emisiones totales del proceso. El resto de las emisiones fueron originadas por la transesterificación (12%) y la extracción de aceite (3%). El transporte generó menos del 1% de las emisiones de GEI durante proceso. Los resultados muestran que el consumo de energía y las emisiones de GEI del caso de estudio evaluado, se encuentran dentro de los rangos reportados en otros estudios que cuantifican mediante el ACV la producción de biodiesel de jatropha: por debajo del promedio en cuanto a los requerimientos energéticos y sobre éste en relación a la emisión de GEI.

Los resultados de los ACV dependen en gran medida de las consideraciones tomadas y de la metodología adoptada durante la realización del estudio. Debido a esto, es de suma importancia llevar a cabo un análisis de sensibilidad con la finalidad de observar las variaciones en los resultados originadas por la modificación de los parámetros más importantes en la evaluación ambiental realizada. Los parámetros analizados son: el tipo de fertilizante empleado durante la etapa de cultivo, debido a que su utilización representa el 84% de las emisiones de GEI del sistema; la eficiencia en el proceso de transesterificación por el alto consumo de energía que esta etapa requiere y por la relativa facilidad para modificar la reacción; y la distribución de cargas ambientales por la recuperación de productos derivados debido a que su inclusión en el sistema puede influir de forma significativa en los resultados del ACV.

Los resultados del análisis de sensibilidad señalan que incluir la recuperación de los productos derivados dentro de los límites del sistema analizado podría incrementar el desempeño ambiental de la producción de biodiesel de jatropha y la posible mitigación en las emisiones de GEI del sector transporte. Sin embargo la consideración de los productos derivados no debe realizarse a la ligera: es recomendable llevarla a cabo cuando los productos recuperados tienen fines ya establecidos dentro o fuera del sistema de estudio, o exista un mercado en el cual tengan la oportunidad de introducirse. Respecto al cultivo, utilizar fertilizantes minerales podría disminuir las emisiones de GEI por la producción de biodiesel de jatropha, sin embargo, de acuerdo a Blanco et al. (Blanco et al. 2008), el impacto ambiental por no utilizar la materia orgánica podría ser igual e incluso superior al que se tiene cuando se usa como fertilizante, por lo que es un aspecto que debe analizarse con más detalle. El mejor de los resultados obtenidos durante el análisis de sensibilidad es

el que presenta el escenario de transesterificación eficiente. La disminución en el consumo de energía y las emisiones de GEI del sistema respecto al escenario base, aunado a la manera relativamente sencilla y de bajo costo en que la etapa puede mejorarse, hacen recomendable evaluar esta alternativa.

La planta de *jatropha* es un género exótico que comenzó a utilizarse con fines energéticos hasta hace pocos años, por lo que varios aspectos del cultivo, rendimiento, e impactos que puede generar en el ecosistema permanecen desconocidos. Establecer cultivos de *jatropha* con la finalidad de utilizarla como materia prima para producir biodiesel requiere mayor investigación respecto a las condiciones edáficas y climáticas óptimas para su crecimiento, las cosechas de grano que pueden obtenerse y el impacto potencial en la biodiversidad local y en el uso de la tierra incluyendo la de otros cultivos. El monitorizar las hectáreas cultivadas con *jatropha* y la posterior retroalimentación en las nuevas siembras puede conducir a mejoras constantes en las prácticas agrícolas de la planta. La producción sustentable de biodiesel de *jatropha* tiene como uno de sus elementos primordiales optimizar la etapa de cultivo, específicamente la parte de la fertilización, la cual tiene el mayor impacto en las emisiones de GEI. La eficiencia durante los procesos de extracción y transesterificación juega también un papel importante en el desempeño ambiental de la producción de biodiesel, por lo que es fundamental buscar que mejore.

En el sector eléctrico mexicano los combustibles fósiles son los que más se utilizan para la generación de electricidad. Los resultados del presente trabajo indican que la electricidad requerida para la producción del biodiesel genera alrededor del 8% de los GEI emitidos a la atmósfera en el escenario base, y se debe precisamente a que el sistema eléctrico mexicano utiliza en su mayoría hidrocarburos. Seguramente, si el parque de fuentes renovables de energía fuera mayor en México, los impactos ambientales encontrados en este y otros estudios serían mejores. Para tener una matriz energética sustentable, además de descarbonizar el sector transporte, es necesario descarbonizar el sector eléctrico.

El presente estudio evalúa únicamente las emisiones de GEI y el consumo de energía por la producción de biodiesel de *jatropha*, y no debe considerarse como un estudio de sustentabilidad. Se recomienda continuar con la investigación y conducir un análisis de sustentabilidad que incluya aspectos sociales, económicos y ambientales entre los que destacan el desarrollo económico en medios rurales, la creación de empleos, la descentralización energética, los costos del combustible, el desempeño ambiental considerando otros impactos potenciales como la acidificación y la eutrofización, la reclamación de tierras marginadas, el manejo de la biodiversidad local y las oportunidades empresariales que aparezcan.

En el presente estudio se evalúa la potencial mitigación en las emisiones de GEI en el sector transporte mexicano derivada de la implementación de políticas públicas de uso obligatorio de biocombustibles. Es de destacar, que incluso considerando el peor de los



casos (escenario base) de la producción de biodiesel de jatropha con una mezcla obligatoria B2, este biocombustible tiene el potencial para reducir significativamente las emisiones de GEI del sector transporte mexicano, evitando la generación de más 234,000 toneladas de CO<sub>2</sub>e por año, las cuáles pueden aumentar hasta 947,000 toneladas de CO<sub>2</sub>e en el escenario de fertilización mineral con la mezcla obligatoria B5, aunque para esto existen otros aspectos que deben evaluarse.

El presente estudio contribuye a generar información del desempeño ambiental de biocombustibles en México, particularmente el biodiesel de jatropha evaluando las emisiones de GEI y el consumo de energía asociados a su producción, y pretende servir como punto de partida en futuras investigaciones científicas que se lleven a cabo en México y otros países de América Latina respecto al análisis de otros indicadores ambientales, estudios que evalúen otros insumos en la producción de biodiesel, y los aspectos sociales y económicos relacionados tanto con la producción de biodiesel a partir de jatropha como mediante distintas materias primas. Los resultados de los dos indicadores evaluados en este estudio pueden ser de utilidad como herramienta de consulta para el sector legislativo del país, generando información que permita justificar la mitigación del cambio climático por el uso de los biocombustibles en el sector transporte para el cumplimiento de la LGCC, la LTE y la LPDB.

## 9 Referencias

Achten, WMJ., Verchot, L., Franken, YJ., Mathijs, E., Singh, VP., Aerts, R., Muys, B., 2008. *Jatropha* bio-diesel production and use. *Biomass and Bioenergy*, 32(12), pp.1063–1084. Disponible en: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0961953408000767>.

Achten, WMJ., Almeida, J., Fobelets, V., Bolle, E., Mathijs, E., Singh, VP., Tewari, DN., Verchot, LV., Muys, B., 2010. Life cycle assessment of *Jatropha* biodiesel as transportation fuel in rural India. *Applied Energy*, 87(12), pp.3652–3660. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.07.003>.

Ackom, EK., 2010. Sustainability standards for Canada's bioethanol industry. *Biofuels* 1(2):237–241.

Adholeya, A., Dadhich PK., 2008. *Production and Technology of Bio-diesel: Seeding a Change*, ISBN 978-81-7993-157-8, Teri Press, New Delhi.

Adil, S., Kant, R., Tripathi, V., Bakshi, M., Srivastava, P., Jamil, S., Singh, HB., Singh, N., Abhilash, PC., 2015. *Jatropha curcas* L.: A crucified plant waiting for resurgence. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, pp.855–862. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.08.082>.

Adriaans, T., 2009 Suitability of solvent extraction for *Jatropha curcas*. Eindhoven: FACT Foundation 2006; 9.

Alexander, NE., 2009. Development of the *Jatropha* cultivation and biodiesel production: case study of Karnataka State, Ph.D., Thesis, India, Imperial College, London, pp. 79–80, 71, 173, 175, 176, 185, 188.

Argonne National Laboratory, 2015. GREET Model. Disponible en: <http://www.transportation.anl.gov/fuels/index.html>. Acceso: noviembre, 2016.

Azapagic, A. & Cliff, R., 1999. Allocation of Environmental Burdens in Co-product Systems : Product-related Burdens (Part 1), 4 (Part 1), pp.357–369.

Bailis, R., 2014. Brazil: biodiesel. In: Solomon BD, Bailis R (eds) *Sustainable development of biofuels in Latin America and the Caribbean*. Springer, New York, pp 103–126.

Biofuels, 2016. *Biofuels*. Disponible en: <http://biofuels.org.uk>. Acceso: noviembre, 2016.

Boldrin, A., Hartling, KR., Laugen, M., Christensen, TH., 2010. Resources , Conservation and Recycling Environmental inventory modelling of the use of compost and peat in growth media preparation. “Resources, Conservenion & Recycling”, 54(12), pp.1250–1260. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.04.003>.

Coelho, ST., Guardabassi, P., 2014. Brazil: ethanol. In: Solomon BD, Bailis R (eds) Sustainable development of biofuels in Latin America and the Caribbean. Springer, New York, pp 71–101.

Comisión Europea, 2016. Renewable Energy Directive. Disponible en: <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/renewable-energy/renewable-energy-directive>. Acceso: noviembre, 2016.

Comisión Europea, 2016. Sustainability Criteria. Disponible en: <https://ec.europa.eu/energy/node/73> Acceso: noviembre, 2016.

CONACYT, 2016. Cinvestav Guadalajara lidera trabajos para producir bioetanol y biobutanol. Disponible en: <http://conacytprensa.mx/index.php/tecnologia/energia/6022-cinvestav-guadalajara-lidera-trabajos-para-producir-bioetanol-y-biobutanol>. Acceso: noviembre, 2016.

CONACYT, 2016a. Investigan el potencial el *Jatropha curcas* a través de cultivos experimentales. Disponible en: <http://conacytprensa.mx/index.php/noticias/reportaje/9691-investigan-el-potencial-de-jatropha-curcas-a-traves-de-cultivos-experimentales>. Acceso: noviembre, 2016.

Cornejo Rojas, FA., 2005. Using life cycle assessment (LCA) as a tool to enhance environmental impact assessment (EIA) with a case study application in the pulp and paper industry.

Council of the European Union, 2014. Proposal on indirect land-use change: Council reaches agreement, 7550/14, Luxembourg.

Dante, RC., Güereca, LP., Caballero, CA., Neri, L., 2002. Environmental impact assessment of a wastewater treatment plants through life cycle analysis. Eurosustain 2002. Rhodas Grece.

Division, ES., 2014. Center for Transportenion Research Energy Systems Division Argonne Nenional Laborenory October 3, 2014.

Domínguez, JA., Martínez, E., 2007. Reinserción de los residuos de construcción y demolición al ciclo de vida de la construcción de viviendas. Ing. Rev. Académica la FI-UADY 3:43–54.

Eastmond, A., García, C., Fuentes, A., Becerril- García, J., 2014. Mexico. In: Solomon BD, Bailis R (eds) Sustainable development of biofuels in Latin America and the Caribbean. Springer, New York, pp 203–222.

EC, Directive, 1997. Energy for the future: renewable sources of energy. White paper for a community strategy and action plan. COM(97) 599 final.

EC, Directive, 2009. 2009/30/EC amending Directive 98/70/EC and Directive 1999/32.

EC, Directive, 2009a. 2009/28/EC on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently repealing Directives 2001/77/EC and 2003/30/EC.

EC, Directive, 2012. Proposal for a Directive amending Directive 98/70/EC and Directive 2009/28/EC, COM(2012) 595.

Ecoinvent, Stutter, J., 2006. LCI of Agricultural Production Systems. Ecoinvent report No. 17.

EEA, EMEP/EEA, 2009. Air Pollutant Emission Inventory Guidebook d 2009. Technical report No 9/2009. Copenhagen.

EIA, 2012. Biofuels issues and trends.

EPA, 2016. Renewable Fuel Standar Program. Disponible en: <https://www.epa.gov/renewable-fuel-standard-program/program-overview-renewable-fuel-standard-program>. Acceso: noviembre, 2016.

EurObserv'ER, 2011. The state of renewable energies in Europe, 11th EurObserv'ER report, 2011.

European Council, 2014. Conclusions on 2030 Climate and Energy Policy Framework, EUCO 169/14.

Energy Independence and Security Act of 2007, Pub. L. 110-140, 121 Stat. 1492.

Engineering, MWS., Nrel, GH., 2009. Life Cycle Assessment of the Use of Jatropha Biodiesel in Indian Locomotives Life Cycle Assessment of the Use of Jatropha Biodiesel in Indian Locomotives.

Escobar, N., Ribal, J., Clemente, G., Sanjuán, N., 2014. Consequential LCA of two alternative systems for biodiesel consumption in Spain, considering uncertainty. *Journal of Cleaner Production*, 79, pp.61–73.

FAOSTAT, 2013. FAOSTAT Database. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).

Filson, M., 2006. Master Thesis LCA on transport sector of Denmark.

Fulton, LM., Körner, A., Agency, IE., 2015. The need for biofuels as part of a low carbon energy future., pp.1–8.

Garcez, CAG., Vianna, JN. de S., 2009. Brazilian Biodiesel Policy: Social and environmental considerations of sustainability. *Energy*, 34(5), pp.645–654. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544208003149>.

García, CA., Riegelhaupt, E., Ghilardi, A., Skutsch, M., Islas, J., Manzini, F., Masera, O., 2015. Sustainable bioenergy options for Mexico: GHG mitigation and costs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, pp.545–552. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114010016>.

García, CA., Fuentes A., Hennecke, A., Riegelhaupt, E., Manzini, F., Masera, O., 2011. Life-cycle greenhouse gas emissions and energy balances of sugarcane ethanol production in Mexico. *Applied Energy*, 88(6), pp.2088–2097.

Gheewala, SH., 2011. Life Cycle Assessment (LCA) to Evaluate Environmental Impacts of Bioenergy Projects., pp.35–38.

Goldemberg J., Coelho, ST., Nastari, PM., Lucon, O., 2004. Ethanol learning curve: the Brazilian experience. *Biomass Bioenergy* 26(3):301–304.

Güereca, LP., Ochoa-Sosa, R., Gilbert, HE., Suppen-Reynaga, N., 2015. Life cycle assessment in Mexico : overview of development and implementation., pp.311–317.

Güereca, LP., Agell, N., Gassó, S., Baldasano, JM., 2007. Fuzzy approach to life cycle impact assessment. *Int J Life Cycle Assess* 12:488–496.

Güereca, LP., Juárez-López, CR., 2014. Environmental performance comparison between pumped-hydro energy storage and battery energy storage system in Mexico. SETAC Europe 24th annual meeting. 11–15 May 2014, Basel Switzerland.

Güereca, LP., Gassó, S., Baldasano, JM., Jiménez-Guerrero, P., 2006. Life cycle assessment of two biowaste management systems for Barcelona, Spain. *Resour Conserv Recycl* 49:32–48.

Hanney, P., Secko, D., McIntyre, T., 2013. Sustainable biofuel policy: assessing Canada's biofuel policies against bioethical principles. *Int J Sust Policy Prac* 8:75–88.

Hawkins, TR., Singh, B., Majeau-Bettez, G., Stromman, AH., 2012. Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles. *Journal of Industrial Ecology*, 17(1), pp.53–64. Disponible en: <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1530-9290.2012.00532.x>.

Henning, RK., 2007. Expert meeting *Jatropha*, Brussel 07/12/07, European Commission, 25 pp.

Hernandez-Galvez, G., Probst, O., Lastres, O., 2012. Optimization of autonomous hybrid systems with hydrogen storage: life cycle assessment. *Int J Energy Res* 36:749–763.

Hira, A., de Oliveria, LG., 2009. No substitute for oil? How Brazil developed its ethanol industry. *Energy Policy* 37(6):2450–2456.

IEA, 2012. *Energy Technology Perspectives 2012*.

IEA, 2016. *Key World Energy Statistics*.

IEA, 2016a. *Statistics Key CO<sub>2</sub> Emissions Trends*.

IEA, 2016b. *Matriz Energética Mexicana*. Disponible en: <http://www.iea.org/statistics/statisticssearch/report/?country=MEXICO&product=electricityandheat&year=2012>. Acceso: noviembre, 2016.

Indian Planning Commission, 2003. *Report of the Committee on Development of Bio-Fuel*.

INECC, 2015. *Inventario Nacional de Emisiones GEI - SECTORES | INTERÉS NACIONAL Carbono Negro (CN)*.

INECC, 2016. *Inventario Nacional de Emisiones GEI - SECTORES | INTERÉS NACIONAL Carbono Negro (CN)*.

IPCC, 2006. *Mobile Combustion. CHAPTER 3*.

IPCC, 2006a. *IPCC: Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme*. Bern, Germany.

IPCC, 2013. *Anthropogenic and Natural Radiative Forcing*.

IPCC, 2014. Smith P., M. Bustamante, H. Ahammad, H. Clark, H. Dong, E. A. Elsiddig, H. Haberl, R. Harper, J. House, M. Jafari, O. Masera, C. Mbow, N. H. Ravindranath, C. W. Rice, C. Robledo Abad, A. Romanovskaya, F. Sperling, and F. Tubiello, 2014: Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU). In: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

ISO 14040, 2006. *Environmental Management - Life Cycle Assessment – Principles and Framework*.

ISO 14044, 2006. *Environmental Management - Life Cycle Assessment - Requirements and Guidelines*.

Joseph, K., 2014. Argentina biofuels annual 2014. U.S. Department of Agriculture, GAIN Report, Foreign Agriculture Service, Buenos Aires.

Juárez-López, CR., 2008. Análisis de ciclo de vida del sistema de gestión de residuos sólidos de la Ciudad de México. Master Degree Thesis. Directed by Leonor Patricia Güereca PhD. Tecnológico de Monterrey. Campus Estado de México. México.

JWK Law Office, 2012. EC's Anti-subsidy investigation on biodiesel originating from Indonesia and Argentina.

Kumar, S., Singh, J., Nanoti, SM., Garg, MO., 2012. A comprehensive life cycle assessment (LCA) of Jatropha biodiesel production in India. *Bioresource Technology*, 110, pp.723–729. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2012.01.142>.

Laan T., Litman TA., Steenblik R., 2011. Biofuels: at what cost? Government support for ethanol and biodiesel in Canada. International Institute for Sustainable Development, Winnipeg & Geneva, updated report.

LPDB, 2008. Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos.

Makkar, HPS., Kumar, V., Oyeleye, OO., Akinleye, AO., Angulo-Escalante, MA., Becker, K., 2011. *Jatropha platyphylla*, a new non-toxic *Jatropha* species: physical properties and chemical constituents including toxic and anti nutritional factors of seeds. *Food Chem*; 125:63–71.

Masera OR., 2006. La bioenergía en México, Red Mexicana de Bioenergía. pp-95.

Muñoz, P., Antón, A., Rieradevall, J., 2008. LCA of the application of compost from organic municipal solid waste in horticulture fertilization.

Nanaki, EA., Koroneos, CJ., 2012. Comparative LCA of the use of biodiesel, diesel and gasoline for transportation. *Journal of Cleaner Production*, 20(1), pp.14–19. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.07.026>.

Nazir, N., Setyaningsih, D., 2010. Seventh Biomass Asia Workshop, November 29–December 01, 2010, Jakarta, Indonesia.

Ndong, R., Montrejaud-Vignoles, M., Girons, OS., Gabrielles, B., Pirot, R., Domergue, M., Sablayrolles, C., 2009. Life cycle assessment of biofuels from *Jatropha curcas* in West Africa: a field study. *GCB Bioenergy*, 1(3), pp.197–210. Disponible en: <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1757-1707.2009.01014.x>.

Ontario Ministry of the Environment, 2007. Ethanol in gasoline.

OPEP, 2016. Annual Statistical Bulletin.

Padilla-Rivera, A., 2010. Análisis de ciclo de vida del plan de manejo de celulares al final de su vida útil en la Ciudad de México. Master Degree Thesis. Directed by Leonor Patricia Güereca PhD. Tecnológico de Monterrey. Campus Estado de México. México.

Portugal-Pereira, J., Nakatani, J., Kurisu, K., Hanaki, K., 2016. Life cycle assessment of conventional and optimised *Jatropha* biodiesel fuels. *Renewable Energy*, 86(x), pp.585–593. Disponible en: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0960148115302470>.

Prueksakorn, K., Gheewala, SH., 2006. Energy and Greenhouse Gas Implications of Biodiesel Production from *Jatropha curcas* L. The 2nd Joint Conference on “Sustainable Energy and Environment (SEE 2006)”, 21-23 November 2006, Bangkok, Thailand, 53(November), p.E-053 (0).

Prueksakorn, K., Gheewala, SH., 2008. Full chain energy analysis of biodiesel from *Jatropha curca* L. in Thailand. *Environ. Sci. Technol.* 42 (9), 3388–3393.

Pulido, R., Fernández, G., 2007. Mexican bottom of barrel life cycle environmental improvement proposal. *Energy* 32:619–626.

Reinhardt, G., Gärtner, S., Rettenmaier, N., Münch, J., Falkenstein, E., 2007. Screening life cycle assessment of *Jatropha* biodiesel. Final Report, Institute for Energy and Environmental Research Heidelberg, 56 pp.

Renewable Fuels Regulations, 2011. Canadian Environmental Protection Act, 1999, SOR/2010-189.

REN21, 2016. Renewables 2016 Global Status Report.

REN21, 2016a. Energías renovables 2016 reporte de la situación mundial.

Rocha, MH., Silva, R., Silva, EE., Horta, LA., Leme, MMV., Grillo, ML., Almazán, O., 2014. Life cycle assessment (LCA) for biofuels in Brazilian conditions: A meta-analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 37, pp.435–459. Disponible en: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S136403211400361X>.

Romero-Hernández, O., Masera, O., Romero, S., Grunstein, M., 2011. Legal and institutional frameworks at national and subnational levels for biofuel promotion in Mexico. Working Paper 63, Center for International Forestry Research, Bogor, Indonesia.

Romero-Hernández, O., Romero-Hernández, S., Muñoz, D., 2009. Environmental implications and market analysis of soft drink packaging systems in Mexico. A waste management approach. *Int J Life Cycle Assess* 14:107–113.



Romero-Hernandez, O., 2004. Applying life cycle tools and process engineering to determine the most adequate treatment process conditions. A tool in environmental policy. *Int J Life Cycle Assess* 10:355–363.

Santoyo-Castelazo, E., Azapagic, A., 2014. Sustainability assessment of energy systems: integrating environmental, economic and social aspects. *J Clean Prod* 80:119–138.

Scarlat, N., Dallemand, JF., Monforti-Ferrario, F., Banja, M., Motola, V., 2015. Renewable energy policy framework and bioenergy contribution in the European Union – An overview from National Renewable Energy Action Plans and Progress Reports. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, pp.969–985. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.06.062>.

Selfa, T., 2014. Interrogating social sustainability in the biofuels sector in Latin America: global standards and local experiences in Mexico, Brazil and Colombia.

SEMARNAT-INE, UNAM-CIEco, 2008. Análisis integrado de las tecnologías, el ciclo de vida y la sustentabilidad de las opciones y escenarios para el aprovechamiento de la bioenergía en México: Reporte final.

SENER, 2012. *Prospectiva de Energías Renovables 2012-2026*.

SENER, 2013. *Estrategia Nacional de Energía 2013-2027*.

SENER, 2014. *Balance Nacional de Energía 2014*.

SENER, 2015. *Prospectiva de Energías Renovables 2015-2029*.

SENER, 2016. *Sistema de Información Energética*. Disponible en: <http://sie.energia.gob.mx>. Acceso: noviembre, 2016.

Sheehan, J., Camobreco, V., Duffield, J., Graboski, M., and Shapouri, H., 1998. Life cycle inventory of biodiesel and petroleum diesel for use in an urban bus, final report, National Renewable Energy Laboratory, Disponible en: <http://www.nrel.gov/docs/legosti/fy98/24089.pdf>.

Silva Lora, EE., Escobar, JC., Rocha, MH., Grillo, ML., Venturini, OJ., Almazán, O. 2011. Issues to consider, existing tools and constraints in biofuels sustainability assessments. *Energy*, 36(4), pp.2097–2110. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544210003336>.

Smeets, E., Junginger, M., Faaij, A., Walter, A., Dolzan, P., Turkenburg, W., 2008.) The sustainability of Brazilian ethanol: an assessment of the possibilities of certified production. *Biomass Bioenerg* 32(8):781–813.

Solomon, BD., Banerjee, A., Acevedo, A., Halvorsen, KE., Eastmond, A., 2015. Policies for the Sustainable Development of Biofuels in the Pan American Region : A Review and Synthesis of Five Countries. *Environmental Management*, pp.1276–1294. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1007/s00267-014-0424-6>.

Souza, SP., Seabra, JEA., 2014. Integrened production of sugarcane ethanol and soybean biodiesel: Environmental and economic implicenions of fossil diesel displacement. *Energy Conversion and Management*, 87, pp.1170–1179. Disponible en: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0196890414005408>.

Suppen, N. ed., 2013. Análisis de ciclo de vida y ecodiseño para la construcción en México. *Hábitat Sustentable*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí y CADIS.

Thrän D., Hennig C., Thiffault E., Heinimo J., Andrade O., 2014. Development of bioenergy trade in four different settings: the role of potential and policies. In: Junginger M, Goh CS, Faaij A (eds) *International bioenergy trade*. Springer, New York, pp 65–101.

Vargas, AV., Zenón, E., Oswald, U., Islas, JM., Güereca, LP., Manzini, FL., 2014. Life cycle assessment: a case study of two wind turbines used in Mexico. *Applied Thermal Engineering* (2014), <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.10.056>.

Whitaker, M., Garvin, H., 2009. Life Cycle Assessment of the Use of Jatropha Biodiesel in Indian Locomotives, Technical Report, NREL/TP-6A2-44428.

Yacobucci, BD., 2012. Biofuels incentives: a summary of federal programs. Congressional Research Service, Washington, DC.

Židonienė, S., Kruopienė, J., 2015. Life Cycle Assessment in environmental impact assessments of industrial projects: towards the improvement. *Journal of Cleaner Production*, 106, pp.533–540. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652614008099>.