



Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C.

Posgrado en Ciencias en Energía Renovable

**VIABILIDAD ECONÓMICA DE LA PRODUCCIÓN DE  
BIODIESEL DE *Jatropha curcas* EN EL ESTADO DE  
YUCATÁN, MÉXICO**

Tesis que presenta

**Ing. FREDDY SEGUNDO NAVARRO PINEDA**

En opción al título de

**MAESTRO EN CIENCIAS EN ENERGÍA RENOVABLE**

Mérida, Yucatán. Enero 2013



## **DECLARACIÓN DE PROPIEDAD**

Declaro que la información contenida en la sección de Materiales y Métodos Experimentales, los Resultados y Discusión de este documento proviene de las actividades de experimentación realizadas durante el período que se me asignó, para desarrollar mi trabajo de tesis, en las Unidades y Laboratorios del Centro de Investigación Científica de Yucatán, A. C., y que a razón de lo anterior y en contraprestación de los servicios educativos o de apoyo que me fueron brindados, dicha información, en términos de la Ley de la Propiedad Industrial, le pertenece patrimonialmente a dicho Centro de Investigación. Por otra parte, en virtud de lo ya manifestado, reconozco que de igual manera los productos intelectuales o desarrollos tecnológicos que deriven o puedan derivar de lo correspondiente a dicha información, le pertenecen patrimonialmente al Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., y en el mismo tenor, reconozco que si se deriven de este trabajo productos intelectuales o desarrollos tecnológicos, en lo especial, estos se registrarán en todo caso por lo dispuesto por la Ley Federal del Derecho de Autor y la Ley de Propiedad Industrial, en el tenor de lo expuesto en la presente declaración.

Mérida, Yucatán, México

Enero de 2013

---

Ing. Freddy Segundo Navarro Pineda



El trabajo de tesis titulado “Viabilidad económica de la producción de biodiesel de *Jatropha curcas* en el estado de Yucatán, México”, fue desarrollado por el estudiante Freddy Segundo Navarro Pineda en el laboratorio USF15 de la Unidad de Energía Renovable del Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., bajo la dirección del Dr. Luis Felipe Barahona Pérez y del Dr. Donny Víctor Ponce Marbán en el Programa de Posgrado en Ciencias en Energía Renovable de este Centro.

---

Dr. Felipe A. Vázquez Flota  
Coordinador de Docencia  
Centro de Investigación Científica de Yucatán A.C.



*Esta tesis corresponde a los estudios realizados con una beca otorgada por el Gobierno de México, a través de la Secretaría de Relaciones Exteriores.*



## DEDICATORIA

*A mis padres Freddy y Jacqueline*

*A mi hermana Ingrid*

*A Dios*

*Ustedes son mi soporte, mi inspiración, mi familia. Espero tener la oportunidad de brindarles sólo lo mejor de mí y mi trabajo.*



## **AGRADECIMIENTOS**

Mis sinceros agradecimientos a mis asesores de tesis, el Dr. Luis Felipe Barahona Pérez y el Dr. Donny Víctor Ponce Marbán por su atención y ayuda en la realización del presente trabajo. A la Dra. Mascha Smit y al Dr. Julio Sacramento por sus comentarios y observaciones que permitieron el enriquecimiento de esta tesis, espero que hayan disfrutado leyendo esta tesis tanto como yo cuando la escribí.

A la Secretaría de Relaciones Exteriores (SRE) del gobierno de México y al Instituto Colombiano de Crédito Educativo y Estudios en el Exterior (ICETEX) del gobierno de Colombia por brindarme la oportunidad de realizar este grato viaje a través del conocimiento y de nuestro mundo. A la Dra. Liliana Álzate y a la Lic. Gilma Michell por su ayuda en la realización de trámites administrativos, consejos y hacer posible esta meta. Al Dr. Roger Orellana y al Dr. Javier Mijangos por compartir sus amplios conocimientos y experiencias vividas y a la empresa KUOSOL S.A. de C.V. por la información suministrada.

A mis amigos mexicanos, Aldo Contreras, Nancy Eb Rejón, Denise Gutiérrez, Paco del Río, Javier Barrón, Marilyn Pat Narváez, Mayra Chim, Miguel Canseco, Anahí Arriaga por sus risas, bromas y apoyo en esta aventura. A Sara Villanueva Villareal por sus aportes y enseñanzas que me dejó para la vida y a Paty Contreras por su cariño y gratas experiencias vividas. Espero poder atenderlos en mi país en alguna ocasión y, en la distancia, seguir compartiendo risas, burlas y sonrisas.

A mis compañeros y amigos del alma colombianos, Nicolás Restrepo, Daniel Cortés, Edward Vega, los hermanos Erazo, Martín Pedraza, Juan Grisales, Santiago Rodríguez, y Margarita Salazar. Son mis hermanos de otras madres.



## ÍNDICE

ÍNDICE .....	i
LISTADO DE TABLAS.....	iv
LISTADO DE FIGURAS.....	vi
GLOSARIO.....	viii
RESUMEN.....	xiii
ABSTRACT .....	xiv
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1.....	3
ANTECEDENTES.....	3
1.1    El biodiesel .....	5
1.2    Análisis energético e implicaciones ambientales de la producción de biodiesel...	7
1.3    Costos de producción de biodiesel .....	9
1.4 <i>Jatropha curcas</i> .....	11
1.5    Aprovechamiento de los subproductos de la <i>Jatropha curcas</i> .....	12
1.6    Justificación.....	15
1.7    Hipótesis.....	15
1.8    Objetivos .....	16
1.8.1    Objetivo General .....	16
1.8.2    Objetivos Específicos.....	16

CAPÍTULO 2.....	17
METODOLOGÍA.....	17
2.1 Estimación del área potencial máxima para la siembra de <i>Jatropha curcas</i> en Yucatán.....	19
2.2 Estimación de la máxima producción de biodiesel de <i>Jatropha curcas</i> y planteamiento de escenarios.....	19
2.3 Cuantificación de insumos y productos, energía, costos e inversiones .....	21
2.3.1 Fase agrícola .....	22
2.3.2 Fase industrial.....	25
2.4 Evaluación energética .....	35
2.5 Evaluación ambiental.....	36
2.6 Evaluación económica.....	38
CAPÍTULO 3.....	41
RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	41
3.1 Área potencial para la siembra de <i>Jatropha curcas</i> en Yucatán.....	41
3.2 Definición de escenarios de producción de biodiesel de <i>Jatropha curcas</i> en Yucatán.....	46
3.3 Insumos, productos, energía, costos e inversiones para la producción de biodiesel de <i>Jatropha curcas</i> en Yucatán .....	47
3.3.1 Fase agrícola .....	47
3.3.2 Fase industrial.....	48
3.4 Evaluación energética .....	50

3.5	Evaluación ambiental.....	53
3.6	Evaluación económica.....	59
3.7	Variaciones por uso de la torta de <i>Jatropha curcas</i> para el autoconsumo como fertilizante.....	65
	CONCLUSIONES .....	68
	PERSPECTIVAS .....	70
	BIBLIOGRAFÍA.....	72
	ANEXO A.....	81
	PARÁMETROS EMPLEADOS PARA LA REALIZACIÓN DE CÁLCULOS .....	81
	A.1 Parámetros empleados en la fase agrícola .....	81
	A.2 Parámetros empleados en la fase industrial.....	82
	A.3 Parámetros empleados para la evaluación energética .....	85
	A.4 Parámetros empleados para la evaluación económica .....	85

## LISTADO DE TABLAS

Tabla 1.1. Resumen de algunos trabajos de investigación en torno al análisis energético y/o de emisiones de gases invernadero de la producción de biodiesel. ....	7
Tabla 1.2. Resumen de algunos trabajos de investigación en torno a los costos de producción de biodiesel. ....	10
Tabla 3.1. Requisitos sugeridos para la siembra de <i>J. curcas</i> .....	41
Tabla 3.2. Principales tipos de suelo presentes en el estado de Yucatán, México. ....	43
Tabla 3.3. Cuantificación del área potencial para la siembra de <i>J. curcas</i> en Yucatán.....	45
Tabla 3.4. Datos necesarios para la estimación del máximo potencial de producción de biodiesel de <i>J. curcas</i> en Yucatán.....	46
Tabla 3.5. Insumos, energía, costos e inversiones en la fase agrícola de la producción de biodiesel de <i>J. curcas</i> en Yucatán.....	47
Tabla 3.6. Insumos, energía, costos e inversiones en la fase industrial de la producción de biodiesel de <i>J. curcas</i> en Yucatán.....	49
Tabla 3.7. Energía entregada y consumida en cada uno de los escenarios de producción de biodiesel planteados. ....	50
Tabla 3.8. Emisiones de gases de efecto invernadero por la producción de biodiesel de <i>J. curcas</i> .....	54
Tabla 3.9. Variables causantes e impactos ambientales asociados a la producción de biodiesel de <i>J. curcas</i> en el tiempo. ....	57
Tabla 3.10. Ingresos y egresos de la producción de biodiesel de <i>J. curcas</i> .....	60
Tabla 3.11. Costos de producción de biodiesel en un período estable.....	61
Tabla 3.12. Cantidad requerida de fertilizantes con aportes de la torta de <i>J. curcas</i> .....	66

Tabla 3.13. Resultados energéticos, emisión de gases invernadero y económicos al aprovechar la torta residual de la <i>J. curcas</i> para el autoconsumo como fertilizante. ....	66
Tabla A.1. Parámetros empleados para la cuantificación de insumos, energía, costos e inversiones en la fase agrícola de la producción de biodiesel de <i>J. curcas</i> . ....	81
Tabla A.2. Parámetros empleados para la cuantificación de insumos, energía, costos e inversiones en la fase industrial de la producción de biodiesel de <i>J. curcas</i> . ....	83
Tabla A.3. Factores de energía del biodiesel, glicerina, torta y cáscaras de fruto de la <i>J. curcas</i> . ....	85
Tabla A.4. Precios del biodiesel, glicerina, torta y cáscaras de fruto de la <i>J. curcas</i> . ....	85
Tabla A.5. Inflación predicha $infj$ y ajuste por inflación $Ainf_n$ para el cálculo del VPN*..	86

## LISTADO DE FIGURAS

Figura 1.1. Desarrollo del consumo de combustible diesel y su precio (pesos corrientes) en México en el período 1995 - 2010.....	4
Figura 1.2. Consumo de combustible diesel Pemex, de diesel marino y de diesel industrial en el estado de Yucatán..	4
Figura 1.3. Dispersión trimestral del consumo agregado de combustible diesel en el estado de Yucatán.....	5
Figura 1.4.Reacción de transesterificación..	6
Figura 1.5. Distribución geográfica de la <i>J. curcas</i> .....	12
Figura 2.1. Metodología para la evaluación energética, ambiental y económica de la producción de biodiesel de <i>J. curcas</i> .....	17
Figura 2.2. Balances de masas de la producción de biodiesel de <i>J. curcas</i> .....	18
Figura 2.3. Proceso de producción de biodiesel de aceite de <i>J. curcas</i> .....	21
Figura 2.4. Esquema de la planta de biodiesel.....	27
Figura 3.1. Área potencial para la siembra de <i>J. curcas</i> en Yucatán.....	44
Figura 3.2. Relación del balance de energía neto <i>BEN</i> y la razón de energía neta <i>REN</i> con respecto a la producción de biodiesel de <i>J. curcas</i> .....	51
Figura 3.3. Distribución de la energía consumida y entregada en la producción de biodiesel de <i>J. curcas</i> .....	52
Figura 3.4. Relación de la <i>REN</i> con respecto a la productividad de semillas de <i>J. curcas</i> .....	53
Figura 3.5. Relación entre el valor de <i>FEGET</i> y la producción de biodiesel de <i>J. curcas</i> .....	54
Figura 3.6. Diagramas de causa efecto de implicaciones ambientales.....	56

Figura 3.7. Tendencia de los impactos ambientales en el tiempo. ....	58
Figura 3.8. Relación entre los costos de biodiesel y la capacidad de producción.....	62
Figura 3.9. Relación entre la producción de biodiesel y el <i>VPN</i> .....	63
Figura 3.10. Productividad mínima de semilla de <i>J. curcas</i> requerida en función de la producción de biodiesel. ....	64
Figura A.1. Relación costos de maquinaria vs capacidad de producción de una planta de biodiesel y una planta de pellets.. ....	84
Figura A.2. Desarrollo de la inflación en México en el período 2004-2012. ....	86

## GLOSARIO

$\rho_a$	Densidad del aceite de <i>J. curcas</i> [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]
$\rho_b$	Densidad del biodiesel [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]
$\rho_{MeOH}$	Densidad del metanol [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]
$Ainf_n$	Ajuste por inflación en el año $n$
$A_p$	Superficie ocupada por las plantaciones de <i>J. curcas</i> [ha]
$A_{p-m\acute{a}x}$	Área potencial máxima para la siembra de <i>J. curcas</i> [ha]
$A_s$	Contenido de aceite en la semilla de <i>J. curcas</i> [%]
$BEN$	Balance de energía neto [MJ]
$CTO_{KOH}$	Costo unitario del KOH [ $\text{\$}\cdot\text{kg}^{-1}$ ]
$CTO_{MeOH}$	Costo unitario del metanol [ $\text{\$}\cdot\text{m}^{-3}$ ]
$CTO_{bc}$	Costo de una planta de biodiesel de capacidad $V_{bc}$ conocida [ $\text{\$}$ ]
$CTO_{cd}$	Costo unitario del combustible diesel [ $\text{\$}\cdot\text{m}^{-3}$ ]
$CTO_d$	Costo de la máquina de descascarillado [ $\text{\$}$ ]
$CTO_{dep-n}$	Costo de depreciación en el año $n$ [ $\text{\$}\cdot\text{año}^{-1}$ ]
$CTO_{ee-n}$	Costos de energía eléctrica en el año $n$ [ $\text{\$}\cdot\text{año}^{-1}$ ]
$CTO_f$	Costo de la máquina de filtrado [ $\text{\$}$ ]
$CTO_{fa}$	Costo de la fase agrícola [ $\text{\$}\cdot\text{año}^{-1}$ ]
$CTO_{fert}$	Costo de fertilizantes por unidad de superficie [ $\text{\$}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ ]
$CTO_{fi-n}$	Costo de la fase industrial en el año $n$ [ $\text{\$}\cdot\text{año}^{-1}$ ]
$CTO_{inv}$	Costo de invernadero para las plántulas [ $\text{\$}\cdot\text{plántula}^{-1}$ ]
$CTO_{mofa}$	Costo de mano de obra [ $\text{\$}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ ]
$CTO_{moi-n}$	Costo de mano de obra industrial en el año $n$ [ $\text{\$}\cdot\text{año}^{-1}$ ]
$CTO_{mp-n}$	Costo de materias primas en el año $n$ [ $\text{\$}\cdot\text{año}^{-1}$ ]
$CTO_{mto-n}$	Costo de mantenimiento en el año $n$ [ $\text{\$}\cdot\text{año}^{-1}$ ]
$CTO_p$	Costo de la máquina de prensado [ $\text{\$}$ ]
$CTO_{pc}$	Costo de una planta de pellets de capacidad $C_{pc}$ conocida [ $\text{\$}$ ]
$CTO_{prpt}$	Costo de preparación del terrero [ $\text{\$}\cdot\text{ha}^{-1}$ ]
$CTO_{pst}$	Costo de pesticidas [ $\text{\$}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ ]
$CTO_{sem}$	Costo de semillas para plantar [ $\text{\$}\cdot\text{kg}^{-1}$ ]

$CTO_{sup}$	Costo de adquisición del área de siembra [ $\$.ha^{-1}$ ]
$CTO_{trp-n}$	Costo de transporte en el año $n$ [ $\$.año^{-1}$ ]
$CTO_{trppl}$	Costo del transporte de las plántulas desde el invernadero hasta área de siembra [ $\$.plántula^{-1}$ ]
$C_{cc}$	Capacidad de carga por camión [ $kg\cdot camión^{-1}$ ]
$C_d$	Capacidad de producción de la máquina de descascarillado [ $kg\cdot h^{-1}$ ]
$C_f$	Capacidad de producción de la máquina de filtrado [ $m^3\cdot h^{-1}$ ]
$C_p$	Capacidad de producción de la máquina de prensado [ $kg\cdot h^{-1}$ ]
$C_{pc}$	Capacidad de producción de una planta de pellets conocida [ $kg\cdot año^{-1}$ ]
$C_{pdc}$	Consumo promedio de combustible diesel por camión [ $km\cdot L^{-1}$ ]
$d$	Distancia promedio entre plantaciones de <i>J. curcas</i> y la planta industrial [km]
$d_{fert-i}$	Dosis de fertilizante tipo $i$ requerido por unidad de superficie [ $kg\cdot ha^{-1}\cdot año^{-1}$ ]
$d_{pst-i}$	Dosis de pesticida tipo $i$ requerido por unidad de superficie [ $kg\cdot ha^{-1}\cdot año^{-1}$ ]
$E_{consumida-n}$	Energía consumida por el sistema en el año $n$ [ $MJ\cdot año^{-1}$ ]
$E_{consumida-n}$	Energía total consumida [ $MJ\cdot año^{-1}$ ]
$E_{dpf-e}$	Energía consumida por las máquinas de descascarillado, prensado y filtrado en un período estable [ $kwh\cdot año^{-1}$ ]
$E_{dpf-n}$	Energía consumida por las máquinas de descascarillado, prensado y filtrado en un año $n$ [ $kwh\cdot año^{-1}$ ]
$E_{entregada-n}$	Energía entregada por el sistema en el año $n$ [ $MJ\cdot año^{-1}$ ]
$E_{entregada-e}$	Energía consumida por el sistema en un período estable [ $MJ\cdot año^{-1}$ ]
$E_{fa}$	Energía que ingresa en la fase agrícola [ $MJ\cdot año^{-1}$ ]
$E_{fi-n}$	Energía total consumida en la fase industrial en el año $n$ [ $MJ\cdot año^{-1}$ ]
$EGEI$	Emisiones de gases de efecto invernadero del sistema en un período estable [ $g\ CO_{2eq}\cdot año^{-1}$ ]
$Eg_n$	Egresos en un año $n$ [ $\$.año^{-1}$ ]
$Eg_n$	Egresos totales del año $n$ [ $\$.año^{-1}$ ]
$E_{maq-n}$	Energía requerida para las maquinarias de la fase industrial en el año $n$ [ $kwh\cdot año^{-1}$ ]
$E_p$	Eficiencia de prensado [%]

$E_{pb-e}$	Energía consumida por la planta de biodiesel en un período estable [kwh·año <sup>-1</sup> ]
$E_{pb-n}$	Energía consumida por la planta de biodiesel en un año $n$ [kwh·año <sup>-1</sup> ]
$E_{pp-e}$	Energía consumida por la planta de pellets en un período estable [kwh·año <sup>-1</sup> ]
$E_{pp-n}$	Energía consumida por la planta de pellets en un año $n$ [kwh·año <sup>-1</sup> ]
$E_{trp-n}$	Energía requerida para el transporte en el año $n$ [MJ·año <sup>-1</sup> ]
$fb$	Factor de escalamiento de una planta de biodiesel
$fp$	Factor de escalamiento de una planta de pellets
$FE_{KOH}$	Factor de energía del KOH [MJ·kg <sup>-1</sup> ]
$FE_{MeOH}$	Factor de energía del metanol [MJ·m <sup>-3</sup> ]
$FE_b$	Factor de energía del biodiesel [MJ·m <sup>-3</sup> ]
$FE_{cf}$	Factor de energía de las cáscaras de <i>J. curcas</i> [MJ·kg <sup>-1</sup> ]
$FE_d$	Factor de energía del diesel [MJ·m <sup>-3</sup> ]
$FE_{fert-i}$	Factor de energía del fertilizante tipo $i$ [MJ·kg <sup>-1</sup> ]
$FE_{gl}$	Factor de energía de la glicerina [MJ·kg <sup>-1</sup> ]
$FE_{GEI}$	Factor de emisión de gases invernadero por unidad de energía aportada por el sistema en un período estable [g CO <sub>2eq</sub> ·MJ <sup>-1</sup> ]
$FE_{moa}$	Factor de energía de mano de obra agrícola [MJ·h <sup>-1</sup> ·hombre <sup>-1</sup> ]
$FE_{pra}$	Factor de energía del pellet de residuos agrícolas [MJ·kg <sup>-1</sup> ]
$FE_{pst-i}$	Factor de energía de pesticida tipo $i$ [MJ·kg <sup>-1</sup> ]
$FE_t$	Factor de energía de la torta de la <i>J. curcas</i> [MJ·kg <sup>-1</sup> ]
$GA_n$	Gastos administrativos en un año $n$ [\$·año <sup>-1</sup> ]
$Ig_n$	Ingresos totales del año $n$ [\$·año <sup>-1</sup> ]
$Ig_e$	Ingresos en un período estable [\$·año <sup>-1</sup> ]
$inf_j$	Índice de inflación en el año $j$ [%]
$INV_0$	Inversión inicial del proyecto [\$]
$INV_{fa}$	Inversión en la fase agrícola [\$]
$INV_{fi}$	Inversión en la fase industrial [\$]
$n_{c-e}$	Número de camiones necesarios en un período estable para transportar una cantidad de biomasa $P_f \cdot A_p$ [camiones·día·año <sup>-1</sup> ]

$n_{c-n}$	Número de camiones requeridos en el año $n$ [camiones·día·año <sup>-1</sup> ]
$n_d$	Número de máquinas de descascarillado necesarias
$n_f$	Número de máquinas de filtrado necesarias
$n_p$	Número de máquinas de prensado necesarias
$n_{pl}$	Número de plántulas necesarias para iniciar las plantaciones [plántulas·ha <sup>-1</sup> ]
$n_v$	Número de viajes posibles al día [día <sup>-1</sup> ]
$P_a$	Productividad de aceite de <i>J. curcas</i> [m <sup>3</sup> ·ha <sup>1</sup> ·año <sup>-1</sup> ]
$P_{cf}$	Producción de cáscaras de frutos de <i>J. curcas</i> [kg·año <sup>-1</sup> ]
$P_f$	Producción de frutos por unidad de superficie [kg·ha <sup>-1</sup> ·año <sup>-1</sup> ]
$P_{gl-e}$	Producción de glicerina en un período estable [kg·año <sup>-1</sup> ]
$P_{gl-n}$	Producción de glicerina en el año $n$ [kg·año <sup>-1</sup> ]
$Pr_b$	Precio del biodiesel [\$.m <sup>-3</sup> ]
$Pr_{gl}$	Precio de la glicerina cruda [\$.kg <sup>-1</sup> ]
$Pr_{pcf}$	Precio de los pellets de cáscaras de <i>J. curcas</i> [\$.kg <sup>-1</sup> ]
$Pr_{pra}$	Precio de pellets de residuos agrícolas [\$.kg <sup>-1</sup> ]
$Pr_t$	Precio de la torta de la <i>J. curcas</i> [\$.kg <sup>-1</sup> ]
$P_s$	Producción de semilla por unidad de superficie [kg·ha <sup>-1</sup> ·año <sup>-1</sup> ]
$Pt_{bc}$	Potencia de una planta de biodiesel de una capacidad $V_{bb}$ conocida [kw]
$Pt_d$	Potencia de la máquina de descascarillado [kw]
$Pt_{t-e}$	Producción de torta de <i>J. curcas</i> en un período estable [kg·año <sup>-1</sup> ]
$Pt_f$	Potencia de la máquina de filtrado [kw]
$Pt_{t-n}$	Producción de torta de <i>J. curcas</i> en el año $n$ [kg·año <sup>-1</sup> ]
$Pt_p$	Potencia de la máquina de prensado [kw]
$Pt_{pc}$	Potencia de una planta de pellets de una capacidad $C_{pc}$ conocida [kw]
$Q_{KOH-e}$	Cantidad de KOH necesario en un período estable [kg·año <sup>-1</sup> ]
$Q_{KOH-n}$	Cantidad de KOH necesario para un año $n$ [kg·año <sup>-1</sup> ]
$Q_{fert-i}$	Cantidad de fertilizante tipo $i$ requerido [kg·año <sup>-1</sup> ]
$Q_{pst-i}$	Cantidad de pesticida tipo $i$ requerido [kg·año <sup>-1</sup> ]
$Q_{sem}$	Cantidad de semillas de <i>J. curcas</i> necesarias para iniciar la plantación [kg·ha <sup>-1</sup> ]
$r$	Tasa de retorno mínima de aceptación [%]

$REN$	Razón de energía neta
$r_{moa}$	Mano de obra por unidad de superficie [hombre·ha <sup>-1</sup> ]
$R_{moa}$	Requerimientos de mano de obra agrícola [hombre·h·año <sup>-1</sup> ]
$TOA_{fa}$	Tiempo de operación anual de la fase agrícola [h·año <sup>-1</sup> ]
$TOA_{fi}$	Tiempo de operación anual de la fase industrial [h·año <sup>-1</sup> ]
$TEE$	Tarifa unitaria de energía eléctrica [\$.kwh <sup>-1</sup> ]
$TT$	Tarifa de renta por camión [\$.camión <sup>-1</sup> ·día <sup>-1</sup> ]
$t_v$	Tiempo de viaje [h]
$V_a$	Volumen de aceite de <i>J. curcas</i> necesario [m <sup>3</sup> ·año <sup>-1</sup> ]
$V_{a-máx}$	Máximo volumen potencial de aceite de <i>J. curcas</i> en Yucatán [m <sup>3</sup> ·ha <sup>1</sup> ·año <sup>-1</sup> ]
$V_b$	Volumen de aceite de <i>J. curcas</i> requerido [m <sup>3</sup> ·año <sup>-1</sup> ]
$V_{bc}$	Volumen de producción de una planta de biodiesel conocida [m <sup>3</sup> ·año <sup>-1</sup> ]
$V_{b-máx}$	Máximo volumen potencial de biodiesel en Yucatán [m <sup>3</sup> ·año <sup>-1</sup> ]
$V_{dtrp-n}$	Volumen de combustible diesel requerido para las labores de transporte en el año $n$ [m <sup>3</sup> ·año <sup>-1</sup> ]
$v_c$	Velocidad promedio del camión [km·h <sup>-1</sup> ]
$V_{MeOHT}$	Volumen de metanol teórico requerido [m <sup>3</sup> ·año <sup>-1</sup> ]
$VPN$	Valor presente neto de la inversión [\\$]
$VS$	Valor de salvamento de la inversión [\\$]
$X_n$	Efecto ambiental $X$ en el momento $n$
$X_{n+1}$	Efecto ambiental $X$ en el momento $n + 1$
$\Delta X_{n,n+1}$	Cambio del efecto $X$ del tiempo $n$ al tiempo $n + 1$

## RESUMEN

La alternativa renovable para el combustible diesel es el biodiesel. Las plantas oleaginosas como la *Jatropha curcas* son consideradas como fuentes promisorias de aceite para la producción del biocombustible debido a que su resistencia a las sequías y su capacidad de desarrollarse en suelos con bajo contenido de nutrientes evitan que su cultivo compita en uso de suelo para fines alimenticios. Éstas características incentivaron a grupos empresariales a llevar a cabo siembras sistemáticas de *J. curcas* para la producción de aceite en Yucatán; sin embargo, no se han realizado estudios de viabilidad económica de producción de biodiesel en la entidad.

Con el fin de cubrir este vacío, en el presente trabajo se realizó una estimación de viabilidad económica de la producción de biodiesel de *J. curcas* en Yucatán. Otros factores como el balance energético y las implicaciones ambientales derivados de la producción del biocombustible también fueron analizados.

Bajo la condiciones del presente trabajo, los resultados indican que el estado de Yucatán cuenta, teóricamente, con superficie suficiente para abastecer de aceite de *J. curcas* y reemplazar, hasta en un 10-11%, su consumo actual de diesel por biodiesel. El balance energético de la producción del biocombustible presenta una razón de energía neta (*REN*) de 1.19, en el entendido que un valor mayor a uno es deseable pues implica que el sistema aporta más energía de la que consume y esta razón no cambia con el nivel de producción. Asimismo, se estimó que las emisiones de gases de efecto invernadero, sin tener en cuenta las provocadas por el cambio en el uso del suelo, alcanzan un valor mínimo de 64.8 g CO<sub>2eq</sub>·MJ<sup>-1</sup> y aunque es menor a las emisiones del diesel fósil, este aumenta conforme lo hace el nivel de producción. Los resultados económicos indican que la producción del biodiesel de *J. curcas* no es económicamente factible debido a que su costo de producción se mantiene constante con respecto al nivel de producción entre \$21,400 - \$22,000 MXN por metro cúbico, es decir, aproximadamente el doble del precio de la alternativa fósil. Los mayores costos se presentan en la mano de obra para llevar a cabo las plantaciones de *J. curcas*, el uso de pesticidas y el de fertilizantes, ya que representan el 64.3, 16.3 y el 11.5% del costo del biodiesel, respectivamente.

## ABSTRACT

Biodiesel is the renewable alternative for diesel fuel. Oilseed plants such as *Jatropha curcas* are considered as promissory oil feedstock for biodiesel production due to its drought resistance and capacity to develop on low-nutrient-content soils. With these features *J. curcas* do not compete against agriculture crops for land use. In Yucatan, some enterprises have started a systematic *J. curcas* cultivation for oil production. However, economic feasibility studies for biodiesel production have not been elaborated for the region.

In order to cope with this gap, an estimation of the economic feasibility for the biodiesel production from *J. curcas* in Yucatan was undertaken, as well as an analysis toward the energetic balance and environmental issues derived from the biodiesel production system.

Under the conditions of the present work, results indicate that Yucatan have a sufficient cultivation surface to supply enough *J. curcas* oil and replace 10 to 11% of its diesel fuel consumption with biodiesel. The energetic balance of the biodiesel production indicates that the system provides more energy than consumed since its net energy ratio (NER) is 1.19 (a value higher than 1). Regarding environmental issues, a minimum emission of greenhouse gases of 64.8 g CO<sub>2eq</sub>·MJ<sup>-1</sup> was estimated without considering change in land use. This value is lower than that for diesel fuel but increases as the biodiesel production does. Economic results indicate that biodiesel production from *J. curcas* is not economically feasible because its cost remains constant with production levels at \$21,400 - \$22,000 MXN per cubic meter, that is, about two times higher than diesel price. Major costs are labor at *J. curcas* plantations, pesticides and fertilizers and represent 64.3, 16.3 and 11.5% of total biodiesel cost, respectively.

## INTRODUCCIÓN

El inevitable agotamiento de los combustibles fósiles ha impulsado la investigación mundial en torno a la producción de fuentes de energía renovable, en especial de combustibles derivados de la biomasa que puedan ser aprovechados para el sector transporte [1]. De esta manera se define el inicio de los biocombustibles como una fuente de energía “inagotable” y son contemplados por países con un bajo nivel de desarrollo y una gran biodiversidad, como una fuente de progreso que contribuye a la seguridad energética de un país [2].

La alternativa renovable para el combustible diesel es el biodiesel, el cual se obtiene de la transesterificación catalizada de aceites vegetales o grasas animales con un alcohol, obteniendo glicerina cruda como un subproducto en el proceso [3]. La producción mundial de biodiesel se incrementó diez veces en el período 2001-2007, alcanzando los nueve millones de litros al año, lo cual representa menos del 0.2% del diesel consumido para el transporte [4]. Esta producción se ve limitada por la disponibilidad de aceite [5]. La clave de la producción de biodiesel se encuentra entonces en el aceite utilizado, ya que la obtención del mismo dependerá de las condiciones geográficas y ambientales a nivel local [1]. Asimismo, el estudio de aceites y plantas oleaginosas potenciales para la producción de biodiesel, resulta ser una línea de interés científico [3, 6].

Se ha presentado un creciente interés por la siembra sistemática de *Jatropha curcas* para la producción de biodiesel (sobre todo en países del sureste asiático), principalmente por la naturaleza no comestible de la mencionada planta, su capacidad para desarrollarse en terrenos marginales y su resistencia a la sequía [7, 8]. Grupos empresariales como KUOSOL S.A. de C.V. y BIOCUM S.A. de C.V., se encuentran interesados en el desarrollo de plantaciones de *J. curcas* para la producción de aceite y biodiesel en Yucatán; sin embargo, no se han realizado estudios de viabilidad económica que justifiquen su implementación.

Teniendo en cuenta lo anterior, en el presente trabajo se realizó un análisis de viabilidad económica de la producción de biodiesel de *J. curcas* en Yucatán. Varios han sido los trabajos de investigación que manifiestan la viabilidad técnica de la producción de

biodiesel de *J. curcas* [9-11]; sin embargo, son pocos los que han estudiado su viabilidad económica [12-15], lo cual motivó a la realización de este trabajo.

En un primer paso, se identificaron las necesidades agroclimáticas para llevar a cabo la producción de semilla de *J. curcas* para, posteriormente, estimar la superficie disponible que cubren con dichas necesidades en Yucatán. Consecutivamente, se generaron modelos matemáticos en Microsoft Excel 2007 para calcular los insumos, energía, costos e inversiones necesarias tanto para llevar a cabo las plantaciones de *J. curcas*, como para la transformación de su aceite en biodiesel. Finalmente, se evaluó el desempeño energético, ambiental y económico del proceso mediante una serie de indicadores preestablecidos.

## **CAPÍTULO 1**

### **ANTECEDENTES**

El incremento de los precios del petróleo en el año 1973, la crisis energética de 1979 y la nueva subida de los precios del petróleo en 2003, que se mantuvo hasta el 2008, han tenido como consecuencia un cambio en la política económica energética de varios países [16]. Las anteriores crisis se presentaron por situaciones de conflicto entre países productores de medio oriente y economías desarrolladas (grandes consumidores de combustibles fósiles).

Actualmente, combustibles de fuentes no renovables proveen el 85% de la energía primaria mundial [17]. El consumo de energía crece aceleradamente y uno de los objetivos de toda sociedad moderna es la estabilidad del precio de la energía respecto a la variación en las importaciones de combustibles fósiles [16]. Para el año 2050 se estima que debido al aumento de la población mundial, el consumo de energía global aumentará a 1500 EJ, es decir, tres veces el consumo actual [17].

Durante el período comprendido entre los años 1995 y 2010 el consumo de energía en México ha aumentado de 5,493 a 8,152 PJ. El aporte promedio de energía del combustible diesel a lo largo de dichos años ha sido aproximadamente del 9 – 10.6% [18]. La figura 1.1 muestra el comportamiento del consumo y el precio del combustible diesel en México en el período mencionado. De 2002 a 2008, el precio del diesel se incrementó a una tasa menor que en el período 1995 a 2001. En el año 2009 se presenta una variación en el valor del hidrocarburo del 19%, lo que provoca que, en ese mismo año, su consumo disminuyera, aunque se incrementó en el año siguiente. Una situación similar se presentó en el año 1999. De 2010 a 2012 el precio del diesel se ha incrementado mensualmente en promedio \$82.3 de MXN por metro cúbico. Todo parece indicar que pese al incremento de los precios del diesel, su consumo tiende a aumentar en el tiempo.

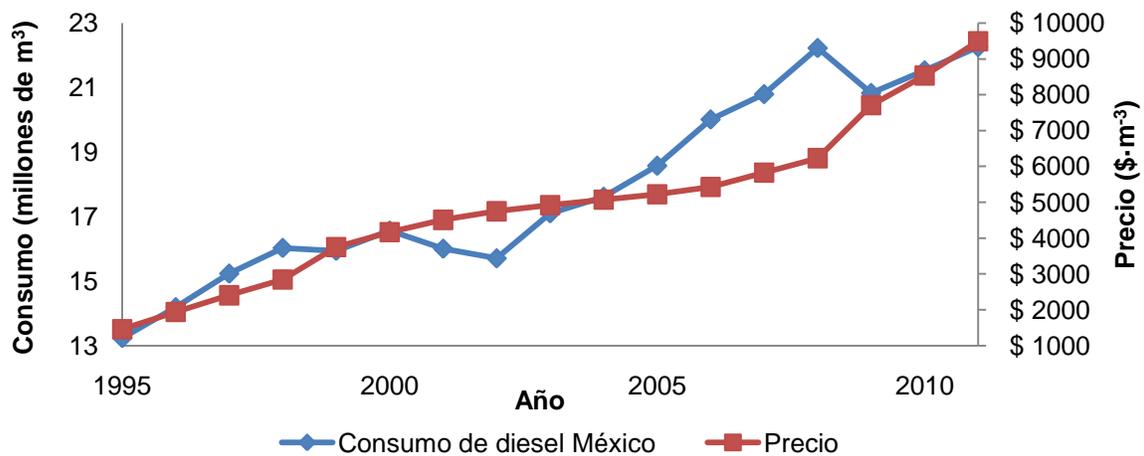


Figura 1.1. Desarrollo del consumo de combustible diesel y su precio (pesos corrientes) en México en el período 1995 - 2010. Fuente: Datos de [18].

La demanda agregada de combustible diesel en México está compuesta por el consumo de: diesel Pemex, diesel marino y diesel industrial. El primero es empleado para vehículos de carga y pasajeros, el segundo, como su nombre lo indica, es empleado para embarcaciones con motores diesel y, por último, el tercero se caracteriza por su bajo contenido de azufre (con bajas emisiones de gases contaminantes) empleado para fines industriales [19]. La figura 1.2 muestra el desarrollo del consumo de cada uno de estos tipos de combustible fósil en el estado de Yucatán, México.

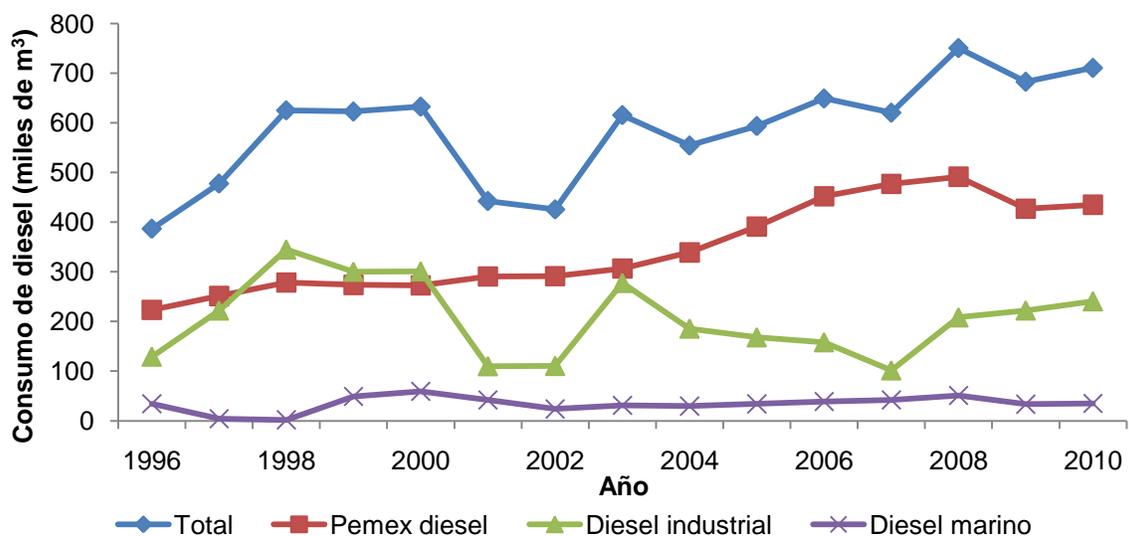


Figura 1.2. Consumo de combustible diesel Pemex, de diesel marino y de diesel industrial en el estado de Yucatán. Fuente: Datos de [18, 20].

En promedio, el consumo de combustible diesel en el estado de Yucatán es del 3.15% del total consumido en México [18]. Tal y como se muestra en la figura 1.3, no hay una diferencia significativa en el consumo trimestral de combustible diesel, lo que sugiere que no hay una estacionalidad trimestral en la demanda de dichos combustibles.

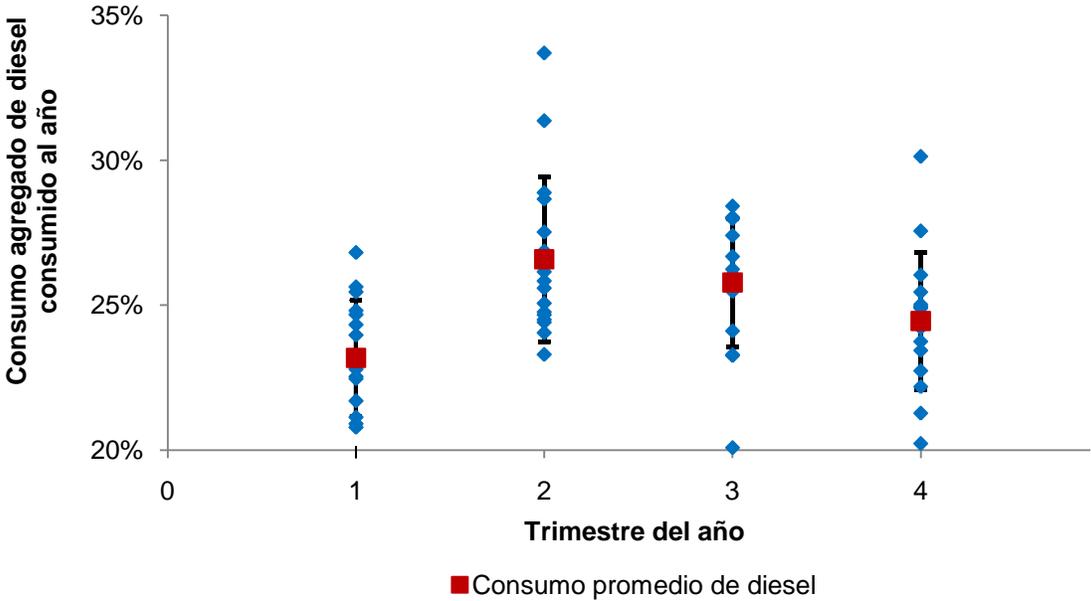


Figura 1.3. Dispersión trimestral del consumo agregado de combustible diesel en el estado de Yucatán (período 1995-2010). Datos de [18].

México busca fomentar su seguridad energética mediante fuentes de energías renovables para reducir su dependencia en los combustibles fósiles. De esta manera, el gobierno mexicano aprobó la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos, la cual entró en vigor el 2 de febrero de 2008, generando así un marco legal para promover y desarrollar los biocombustibles a nivel nacional [21].

**1.1 El biodiesel**

Al ser un combustible derivado del petróleo, el diesel resulta ser un recurso energético de carácter no renovable. El biodiesel es una alternativa factible y directa a este recurso, ya que una de sus ventajas es, precisamente, su naturaleza renovable al originarse de aceites vegetales. El biodiesel es definido como aquellos ésteres de metilo obtenidos

mediante el proceso de transesterificación y que poseen características físico-químicas muy parecidas al diesel [3].

La reacción de transesterificación se muestra en la figura 1.4.  $R_1$ ,  $R_2$  y  $R_3$  representan cadenas largas de hidrocarburos llamadas ácidos grasos. En esta reacción, el grupo triglicérido presente en aceites vegetales, reacciona con alcohol, en presencia de un catalizador alcalino, para producir ésteres (biodiesel) y glicerina [3]. Aproximadamente 100 kg de aceite reaccionan con 10 kg de metanol para producir 100 kg de biodiesel y 10 kg de glicerina [6]. La mayor parte del desarrollo del proceso de producción de biodiesel tuvo lugar a principios los cuarenta y, en un principio, se deseaba encontrar un método simple para extraer glicerina derivado de la producción de jabón (ya que era necesaria para la producción de explosivos en tiempos de guerra) [22].

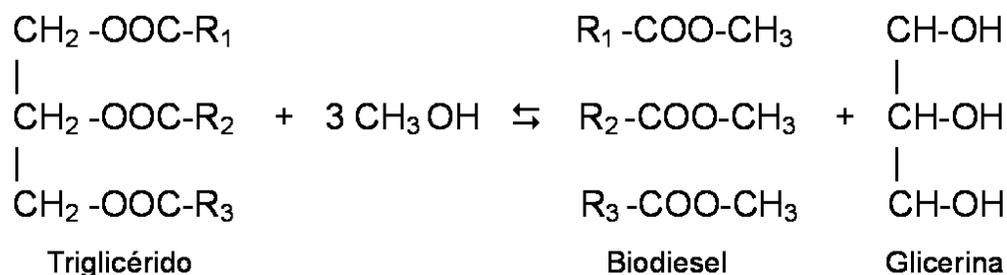


Figura 1.4.Reacción de transesterificación. Fuente: [22].

Lozada *et al.* [23] estimaron que el biodiesel cubrirá en un 9% la demanda energética del sector transporte en México para el año 2031; esto requeriría de la construcción de 113 plantas de biodiesel con una capacidad de 37,854 m<sup>3</sup> al año cada una. Bajo estas condiciones, la penetración del biodiesel en el mercado nacional de combustible reduciría el consumo volumétrico del diesel en un 7.8% [23]. Análisis gubernamentales concluyen que, para alcanzar mezclas de entre el 2 al 5% después del 2012, se requiere de la construcción de 10 plantas de biodiesel de 112,311 m<sup>3</sup> al año cada una [24].

## 1.2 Análisis energético e implicaciones ambientales de la producción de biodiesel

Una metodología para evaluar el potencial de mitigación de gases de efecto invernadero de los biocombustibles consiste en comparar sus emisiones con el factor de referencia para las gasolinas y el diesel de  $83.8 \text{ g CO}_{2\text{eq}}\cdot\text{MJ}^{-1}$ , según la Directiva Europea de Energía Renovable [25]. Ou *et al.* [26] emplearon un factor de referencia de  $102.6 \text{ g CO}_{2\text{eq}}\cdot\text{MJ}^{-1}$  para el diesel en las condiciones de China. Ya que el factor de referencia resalta las emisiones de gases de efecto invernadero de los recursos fósiles por su cantidad de energía entregada, se hace necesario evaluar estas propiedades en la producción y uso de los biocombustibles. La tabla 1.1 recopila algunos trabajos de investigación en torno a dichas propiedades.

Tabla 1.1. Resumen de algunos trabajos de investigación en torno al análisis energético y/o de emisiones de gases invernadero de la producción de biodiesel.

Autor(es)	Objetivos	Observaciones
Pleanjai <i>et al.</i> , 2009 [27]	Analizar el desempeño energético de la producción de biodiesel de palma.	La producción de biodiesel de palma aporta más energía de la que consume.
Ou <i>et al.</i> , 2009 [26]	Evaluar el análisis energético y las emisiones de gases invernadero de seis biocombustibles a partir de varias materias primas.	La producción de biodiesel de <i>J. curcas</i> y de aceite de cocina usado es energética y ambientalmente más eficiente que el diesel fósil.
Majer <i>et al.</i> , 2009 [25]	Analizar las implicaciones de las emisiones de gases invernadero por la producción y uso de biodiesel, a partir de varias materias primas.	La producción de biodiesel puede evitar emisiones significativas de gases invernadero, siempre y cuando no se realicen intensas labores de cambio en el uso del suelo.
Hou <i>et al.</i> , 2011 [28]	Evaluar el desempeño ambiental de la producción de biodiesel a partir de <i>J. curcas</i> , microalgas y soya.	La producción de biodiesel de <i>J. curcas</i> , microalgas y soya reduce las emisiones de gases invernadero debido a la fotosíntesis.
Prueksakorn <i>et al.</i> , 2010 [29]	Analizar el desempeño energético de la producción de biodiesel de <i>J. curcas</i>	La producción de biodiesel de <i>J. curcas</i> aporta más energía de la que consume.
Deng, 2012 [30]	Analizar el balance de energía neta y las emisiones de gases invernadero en la producción de biodiesel de <i>J. curcas</i> .	La producción de biodiesel de <i>J. curcas</i> brinda más energía de la que consume y resulta ser una fuente de mitigación.

El análisis energético de los sistemas de producción de biocombustibles es evaluado por medio de la razón de energía neta (*REN*) [16] y el balance de energía neto (*BEN*)<sup>1</sup> [30]. De acuerdo con los resultados de Prueksakorn y Gheewala [31], en la producción de biodiesel de *J. curcas* la *REN* depende de la productividad de semilla de la planta y el aprovechamiento de los subproductos. El mayor consumo de energía se presenta en las plantaciones [29-31].

Ou *et al.* [26] estimaron que las emisiones por la producción de biodiesel de *J. curcas* son inferiores a las del diesel, una conclusión similar a la reportada en [25]. Dichos resultados no toman en cuenta los cambios en el uso del suelo como fuente adicional de emisiones. En [25] se reporta un factor mayor a los 200 g CO<sub>2eq</sub>.MJ<sup>-1</sup> para la producción de biodiesel de diferentes materias primas (incluyendo *J. curcas*) cuando considera el cambio en el uso del suelo. Lo anterior implica que la producción de biodiesel podría resultar en una fuente de emisión, más que de mitigación, de gases de efecto invernadero.

En la producción de biodiesel a partir de cultivos oleaginosos, hay otros impactos ambientales además de las emisiones de gases de efecto invernadero. Entre ellos se han identificado: un incremento en la erosión, descargas de gases y/o materiales tóxicos, eutrofización, deforestación, contaminación del agua, entre otros [5, 28]. La intensidad de estos efectos está estrechamente vinculada con la ubicación de las plantaciones. Hou *et al.* [28] reporta que, si bien la producción de biodiesel de diferentes materias primas (incluyendo *J. curcas*) puede llegar a ser una fuente mitigadora de gases de efecto invernadero, esta característica queda opacada por el incremento en otros efectos ambientales incluyendo el aumento en los índices de acidez del suelo y eutrofización.

---

<sup>1</sup> La *REN* es definida como la relación entre la energía entregada y consumida por parte del sistema de producción del biocombustible. Si dicha relación es mayor a uno, el sistema entrega más energía de la que consume, si es igual a uno, el sistema entrega la misma cantidad de energía que consume y, si es inferior a uno, el sistema consume más energía de la que entrega. Por su parte, el *BEN* es definido como el aporte de energía por parte del sistema de producción del biocombustible. Si es mayor que cero, el sistema aporta energía, si es igual a 0, la energía que aporta el sistema es la misma que la que consume, finalmente, si es menor a 0, el sistema consume más energía que la que aporta.

### 1.3 Costos de producción de biodiesel

Los aceites más comunes destinados para la producción de biodiesel son: soya, canola, maíz, colza y palma, otras materias primas potenciales son las semillas de girasol, algodón y maní [32]. El costo relativamente alto de los aceites vegetales hace que la producción de biodiesel sea económicamente no factible ya que pueden representar más del 75% de los costos totales [4, 6, 9]. Los costos de capital para una planta de biodiesel no resultan significativos [32], ya que la maquinaria para la producción de biodiesel se adapta fácilmente a los diferentes aceites que pueden ser empleados como materias primas potenciales.

Apostolakou *et al.* [6] estima que los costos de los aceites vegetales pueden representar hasta el 85 - 90% de los costos totales en plantas de producción de biodiesel de amplia capacidad de producción (mayor de  $22,700 \text{ m}^3 \cdot \text{año}^{-1}$ ). Otra materia prima potencial para la producción de biodiesel es el aceite de cocina usado. Sin embargo, a pesar de que su costo puede llegar a ser la mitad, o incluso un tercio del costo de los aceites vegetales [33-35], el aceite de cocina usado requiere de un tratamiento previo (esterificación) que puede opacar esta ventaja [33].

La tabla 1.2 muestra un resumen de algunos trabajos de investigación realizados en torno al análisis de los costos de producción de biodiesel a partir de diferentes aceites.

Tabla 1.2. Resumen de algunos trabajos de investigación en torno a los costos de producción de biodiesel.

Autor(es)	Materia Prima	Objetivos	Observaciones
Bender, 1999 [36]	Diversos aceites vegetales, aceite usado y grasas animales	Evaluar la viabilidad económica de la producción de biodiesel en varias capacidades de producción (de 2000 m <sup>3</sup> hasta 115000 m <sup>3</sup> ).	El costo de la semilla oscila entre el 75% y el 80% de los costos totales y, por tanto, la producción de biodiesel en los Estados Unidos no sería económicamente factible bajo ninguna de las capacidades de producción analizadas.
Hass <i>et al.</i> , 2006 [37]	Aceite de soya	Elaborar un modelo de simulación para la estimación de los costos de producción de biodiesel.	El costo del aceite de soya abarca un 88% de los costos totales. Los ingresos extra por la venta de la glicerina hacían que el costo final del biodiesel variara de forma lineal.
Apostolakou <i>et al.</i> , 2009 [6]	Aceites vegetales	Evaluar la viabilidad tecno económica de la producción de biodiesel a partir de diferentes aceites vegetales.	Las capacidades de producción que podrían resultar económicamente viables se encuentran por encima de los 56200 m <sup>3</sup> al año.
Lozada <i>et al.</i> , 2010 [23]	Aceite de palma	Analizar la factibilidad económica y ambiental de la producción de biodiesel de palma para usarlo en mezclas B5 y B10 en el sector transporte en México.	El biodiesel de palma podría ser competitivo con el diesel del petróleo siempre y cuando obtenga una exención al impuesto especial sobre la producción de bienes y servicios.
Seth <i>et al.</i> , 2011 [38]	Aceite de canola y soya	Realizar un estudio de viabilidad económica de la producción de biodiesel para el autoconsumo del sector rural.	La producción de biodiesel en plantas rurales resultaba en un ahorro para sus propietarios siempre y cuando el biocombustible fuese destinado al autoconsumo y no para fines comerciales.
Biswas <i>et al.</i> , 2010 [39]	Aceite de <i>J. curcas</i>	Analizar las posibilidades de la India para alcanzar mezclas B20 de biodiesel, resaltando la disponibilidad de terreno y los costos de producción.	Los costos del biodiesel de <i>J. curcas</i> resultan ser un 11.11% más elevados que los del diesel, lo que dificulta su viabilidad económica.
Wang <i>et al.</i> , 2011 [12]	Aceite de <i>J. curcas</i>	Evaluar el desempeño económico, ambiental y energético de la producción de biodiesel de <i>J. curcas</i> (producción de 56830 m <sup>3</sup> ·año <sup>-1</sup> ) en China, incluyendo la fase agrícola del proceso.	Los desempeños energéticos y ambientales de la producción del biocombustible resultan positivos; sin embargo, no resulta económicamente factible debido a que la producción de la semilla representa un 83% de los costos totales.
Quintero <i>et al.</i> , 2012 [15]	Aceite de palma y de <i>J. curcas</i>	Realizar un análisis social y tecno-económico de la producción de biodiesel de palma y/o <i>J. curcas</i> en el Perú.	Las materias primas para el biodiesel de <i>J. curcas</i> y palma representan el 78 y el 73-78% de los costos totales, respectivamente. La incertidumbre respecto a la <i>J. curcas</i> es el mayor obstáculo para la producción de biodiesel.

#### 1.4 *Jatropha curcas*

Existen diversos cultivos cuyos aceites podrían ser potenciales materias primas para la producción de biodiesel. Entre los más competitivos se encuentran la palma y la colza; sin embargo, estos aceites son comestibles y, por lo tanto, su uso para la producción de biodiesel es limitado, e incluso, criticable [40]. De esta manera, ha surgido un gran interés en torno a la producción de biodiesel de *J. curcas*, ya que su aceite es de naturaleza no comestible [5]. Otras características en torno a esta planta descritas extensamente en la bibliografía son:

- Su cultivo es más fácil que el de los árboles, presenta resistencia a la sequía y un período de gestación más corto [39, 41].
- Requiere de una precipitación media anual de entre 600 a 1500 mm [42], la cual es menor que la requerida por la palmera aceitera y el cocotero, que requieren precipitaciones anuales superiores a los 1800 y 1300 mm, respectivamente [43].
- Su capacidad de desarrollarse en suelos con bajos contenidos de nutrientes (áridos y marginales) permite un control de la erosión debido al desarrollo de una densa red de finas raíces cercanas a la superficie del suelo que mejoran su drenaje [8]. Asimismo, el cultivo de *J. curcas* en suelos degradados brinda la posibilidad de que éstos sean recuperados al incrementar su contenido de materia orgánica [44]; sin embargo, la viabilidad del cultivo en dichos suelos es incierta [45].

La *J. curcas* es una planta perenne, de origen tropical, que pertenece a la familia Euphorbiaceae y comprende un rango de distribución geográfica más amplio que el de la palmera aceitera [46] (figura 1.5). En México, la *J. curcas* se encuentra extensamente distribuida y puede ser hallada de manera silvestre en más de 15 estados [47]. De acuerdo con Núñez-Colín y Goytia-Jiménez [48], el sur de Sinaloa, la costa de Michoacán, la parte del sur y del centro de Veracruz, el Istmo de Tehuantepec en Oaxaca, Chiapas, el sureste de Campeche y el noreste de Yucatán, son las regiones con las condiciones climáticas más adecuadas donde podría sembrarse *J. curcas* en México.



Figura 1.5. Distribución geográfica de la *J. curcas*. Fuente: [42].

Aunque en la bibliografía consultada se reporta que la *J. curcas* presenta una productividad anual de semillas mayor que el de otras oleaginosas cuyos aceites tampoco son comestibles (tales como la higuera o *Hevea brasiliensis*) [7, 40], dicha productividad depende de las condiciones de producción y se encuentra en el rango de 0.2 a 12 t·ha<sup>-1</sup> [7, 49]. La *J. curcas* es una planta no domesticada, por lo que sus condiciones óptimas de cultivo para alcanzar la mayor productividad de semillas son aún inciertas [8]. La aplicación de fertilizantes es necesaria y, a pesar de la toxicidad de la planta, también se debe emplear pesticidas para mantener las plantaciones sanas [44, 50].

El aceite de *J. curcas* es considerado en México como una materia prima potencial para el Programa Nacional de Producción y Uso de Biodiesel y, por tanto, instituciones mexicanas como la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SARGARPA) y el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) estudian diversas formas para mejorar su productividad de semilla [51].

### 1.5 Aprovechamiento de los subproductos de la *Jatropha curcas*

La distribución de la materia seca producida por la *J. curcas* es 25% p/p en tallos, 25% p/p en hojas y 50% p/p en frutos [17]. Estos últimos contienen aproximadamente 3 semillas las cuales representan el 60-70% de su peso [8, 42]. El aceite equivale al 30-50% del peso de las semillas [11] y es obtenido hasta un 70% de él mediante prensado,

generándose una torta residual en el proceso [17, 52]. De esta manera, los subproductos obtenidos durante la extracción de aceite de *J. curcas* son: la torta con restos de aceite y las cáscaras de los frutos. El aprovechamiento de estos subproductos puede aportar a una reducción en los costos del aceite e incluso darle un mayor valor agregado a la semilla de *J. curcas* [17].

Un posible uso para la torta de la *J. curcas* es emplearla como fertilizante ya que su contenido de nitrógeno, fósforo y potasio es del 6, 3 y 1%, respectivamente, dicha torta también contiene pequeñas cantidades de calcio y magnesio [7, 44, 50]. Sin embargo, su uso directo como fertilizante puede afectar a las plantas debido a que su contenido de aceite disminuye la permeabilidad del suelo [42]. El contenido energético de la torta de la *J. curcas* como combustible es de 18.81-25 MJ·kg<sup>-1</sup> lo que también hace factible su conversión a briquetas para calderas industriales (no es recomendable para uso doméstico pues se genera mucho humo durante su combustión) [31, 42]. En experimentos preliminares, la torta de la *J. curcas* ha sido empleada como materia prima para producir biogás. Cuando se mezcla con estiércol de cerdo, se ha reportado una productividad de biogás de 0.466 m<sup>3</sup> por kilogramo de torta seca, con un contenido de metano del 70% [7]. Otras productividades están en el rango de 0.5-0.6 m<sup>3</sup> por kilogramo [42, 53]. Otros estudios [17, 54, 55] reportan que es posible extraer proteínas de la torta de la *J. curcas* para aplicaciones técnicas (como emulsificante o adhesivo); sin embargo, dichas aplicaciones se encuentran en fase experimental.

Otro posible uso de la biomasa residual de la *J. curcas*, en especial para las cáscaras del fruto, es su transformación en pellets. Los pellets son biocombustibles sólidos con forma cilíndrica de 6-8 mm de diámetro y una longitud de 10-12 mm. Son producidos principalmente de aserrín de madera comprimida a alta presión y empleados como sustitutos del carbón [56, 57]. Su proceso de producción consta de los siguientes pasos: primera trituración, secado, segunda trituración, pelletizado, enfriamiento y empaquetado [58]. La ventaja de emplear residuos agrícolas en lugar de maderas para la producción de pellets, es la posibilidad de eliminar los procesos de la primera trituración y secado, como es el caso de las cáscaras de nuez o las cáscaras de la soya [59]. Así, sería posible un ahorro en la inversión de equipos y en energía. Una desventaja de los pellets de residuos

agrícolas es su calidad inferior comparada con los pellets de madera, debido a un contenido de cenizas mayor [59].

La glicerina obtenida como subproducto de la reacción de transesterificación tiene una pureza del 60-80%, por ello, es clasificada como glicerina cruda (ni pura, ni incolora) [60, 61]. Su proceso de refinado es costoso y su mercado se encuentra saturado, de hecho, el precio de la glicerina cruda tiene una tendencia a la baja lo que provoca que los ingresos extras, obtenidos de su venta, se reduzcan [61]<sup>2</sup>. Esta situación ha dado como resultado el inicio de investigaciones en torno a usos alternos para la glicerina cruda, tales como: su gasificación para la producción de biogás [60], su conversión biológica mediante fermentación para la producción de ácido succínico [62], su uso como aditivo para pellets de residuos de biomasa [63], o incluso, su reformado para la producción de hidrógeno [64].

---

<sup>2</sup> En Europa, el precio de la glicerina cruda (con un 80% de pureza) se redujo en un 88% en el periodo 1995 - 2005 debido al incremento global en la producción de biodiesel, mientras que el precio de la glicerina a un grado de pureza del 99.5%, se redujo aproximadamente en un 50% durante el mismo periodo [60].

## 1.6 Justificación

Se han hecho muchos estudios en torno al análisis de los costos de producción de biodiesel a partir de diferentes fuentes; sin embargo, hay pocos estudios de viabilidad económica que toman en cuenta a la *J. curcas* como materia prima [12-15] y realizado un análisis de costos vs capacidad de producción que tenga en cuenta la demanda del diesel en Yucatán.

Debido a que estudios previos en otras partes del mundo han mostrado resultados prometedores, empresarios del estado de Yucatán han visto con interés esta alternativa de producción ante la inminente reducción de la producción de combustibles fósiles. La relación entre el costo y la capacidad de producción, también conocida como “masa crítica técnica”, plantea que un incremento en la producción conlleva a una reducción de los costos unitarios de operación [65]. Es por ello que es necesario determinar si la producción de biodiesel de *J. curcas* en el estado de Yucatán resulta técnica y económicamente viable, como un bien complementario al diesel, ya que representa toda una conversión productiva tanto en el ámbito rural como empresarial en la región.

Al abordar el tema desde el estudio de la demanda potencial hasta la fase productiva, se pretende enfatizar sobre aquellos procesos que más influyen en el costo de producción permitiendo determinar a partir de qué niveles de productividad ( $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ ) de semilla de *J. curcas* es posible plantear posteriores investigaciones en cuanto a su simplificación y/o integración.

## 1.7 Hipótesis

Existe un tamaño de producción en el cual la obtención del biodiesel de *J. curcas* es económicamente viable.

## **1.8 Objetivos**

### **1.8.1 Objetivo General**

Analizar la viabilidad económica de varios escenarios o capacidades de producción de biodiesel de *J. curcas* en el estado de Yucatán, México.

### **1.8.2 Objetivos Específicos**

- Definir los diferentes escenarios o capacidades de producción potenciales de biodiesel de *J. curcas* en el estado de Yucatán, México.
- Cuantificar las entradas (materias primas e insumos), maquinaria, herramientas y salidas (productos finales, co-productos y residuos) del proceso de obtención de biodiesel de *J. curcas* para cada escenario de producción identificado.
- Estimar el balance energético, emisiones de gases de invernadero y los costos de producción para los diferentes escenarios de producción, estableciendo la viabilidad económica de cada uno de ellos.

## CAPÍTULO 2 METODOLOGÍA

Se llevó a cabo un análisis de ciclo de vida con el objetivo de identificar y cuantificar los insumos y productos en la obtención de biodiesel de *Jatropha curcas*. El análisis del sistema se enfocó en el área energética, ambiental (de manera cualitativa) y económica (figura 2.1) bajo un horizonte de planeación de 20 años. La producción de biodiesel a partir de *J. curcas* se dividió en dos fases, una agrícola y otra industrial. La primera fase consta de la producción suficiente de frutos necesarios para cubrir los requerimientos de materia prima de la siguiente fase, la cual consta de la extracción de aceite de dichos frutos y su transformación a biodiesel.

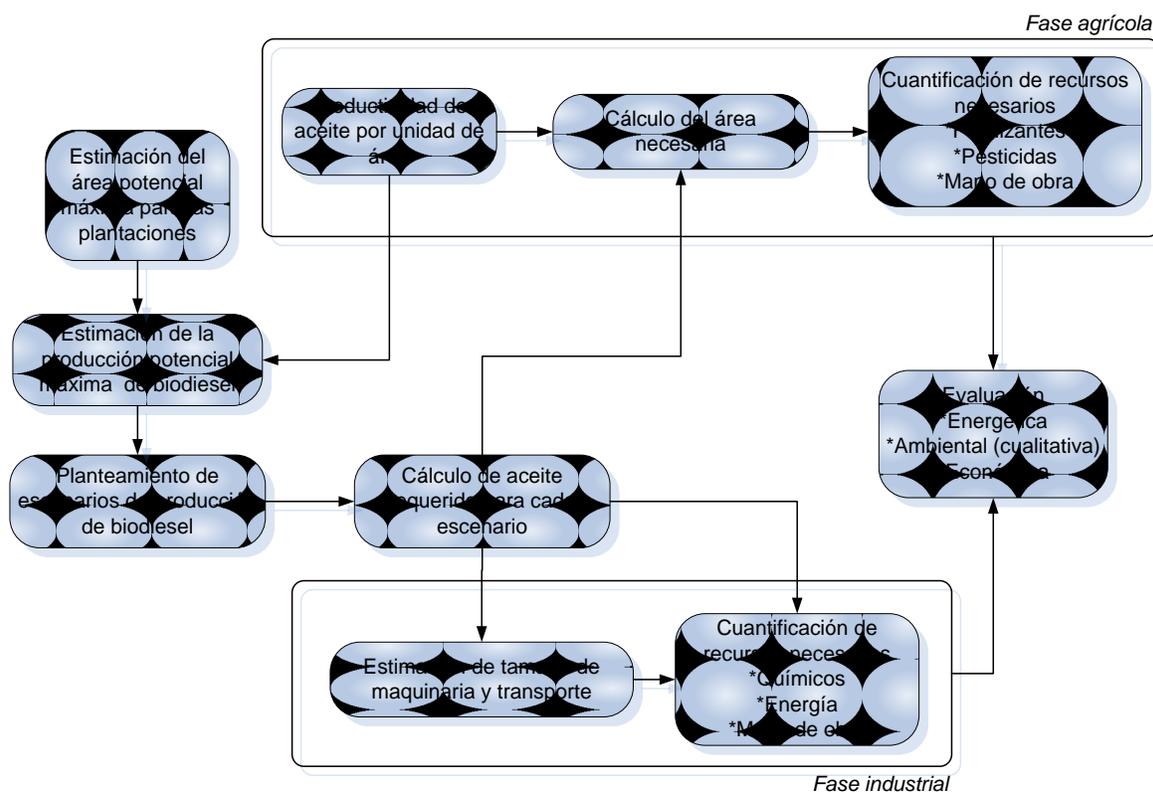
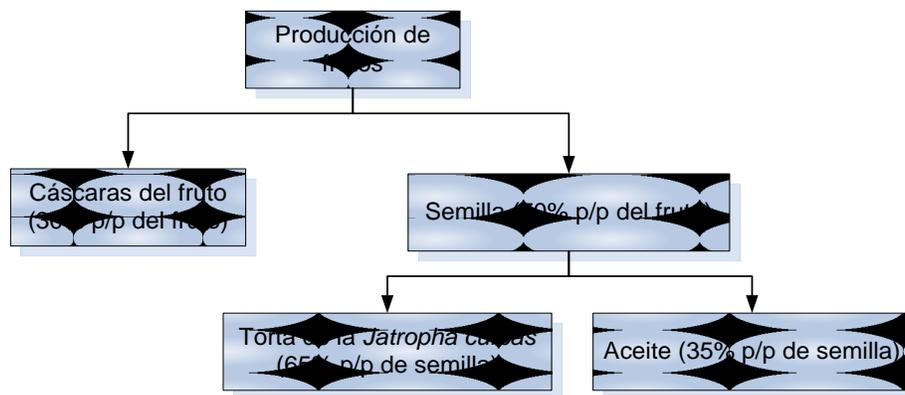
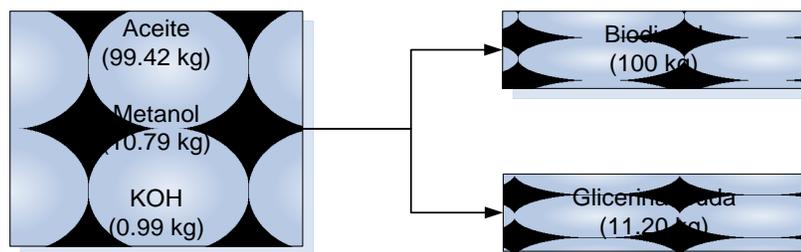


Figura 2.1. Metodología para la evaluación energética, ambiental y económica de la producción de biodiesel de *J. curcas*.

El balance de masas de la fase agrícola corresponde a la producción de biomasa de *J. curcas* y se muestra en la figura 2.2 (a). El balance de masas de la fase industrial corresponde a la reacción de transesterificación y se muestra en la figura 2.2 (b).



(a)



(b)

Figura 2.2. Balances de masas de la producción de biodiesel de *J. curcas*. (a) Fase agrícola [8, 17]. (b) Fase industrial (Empresa KUOSOL S.A. de C.V., comunicación personal).

Se realizó una recolección de información sobre la fase agrícola e industrial de la producción de biodiesel de *J. curcas* consultando artículos científicos y realizando consultas personales con:

- Representantes de la empresa KUOSOL S.A. de C.V.
- La consultoría independiente BIOANTROPO S.A. de C.V.
- El Dr. Alfredo Zamarripa en el campo experimental Rosario Izapa del INIFAP.
- El Ing. Eder Caballero en la planta de biodiesel del estado de Chiapas, México.

Por medio de una base de datos en Microsoft Excel 2007, se realizaron los cálculos concernientes al área, insumos agrícolas, tamaño de planta, transporte e insumos industriales necesarios para cubrir la producción de biodiesel de *J. curcas*.

## 2.1 Estimación del área potencial máxima para la siembra de *Jatropha curcas* en Yucatán

La estimación del área potencial máxima para la siembra de *J. curcas*, en el estado de Yucatán, se realizó teniendo en cuenta las condiciones de temperatura, precipitación anual, altitud y factores edafológicos (profundidad, pH y textura del suelo), sugeridas por la bibliografía consultada en artículos científicos. La distribución de estos factores a lo largo del estado se muestra en los mapas realizados por [66]. Dichos mapas fueron visualizados y analizados por medio del programa ArcGIS Explorer Desktop. La estimación del área potencial para la siembra de *J. curcas* en Yucatán también se calculó empleando dicho programa.

## 2.2 Estimación de la máxima producción de biodiesel de *Jatropha curcas* y planteamiento de escenarios

La máxima producción potencial de biodiesel de *J. curcas* en Yucatán se calculó mediante la ecuación 1

$$V_{b-m\acute{a}x} = \frac{100}{99.42} \cdot \frac{V_{a-m\acute{a}x} \cdot \rho_a}{\rho_b} \quad (1)$$

siendo

- $V_{b-m\acute{a}x}$  = Máximo volumen potencial de biodiesel en Yucatán [ $\text{m}^3 \cdot \text{a}\acute{\text{n}}\text{o}^{-1}$ ]
- $V_{a-m\acute{a}x}$  = Máximo volumen potencial de aceite de *J. curcas* en Yucatán [ $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{a}\acute{\text{n}}\text{o}^{-1}$ ]
- $\rho_a$  = Densidad del aceite de *J. curcas* [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]
- $\rho_b$  = Densidad del biodiesel [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]
- $\frac{100}{99.42}$  = Proporción biodiesel – aceite de *J. curcas* (figura 2.2 (b))

La máxima producción de aceite de *J. curcas* en el estado de Yucatán  $V_{a-m\acute{a}x}$  está dada por la ecuación 2

$$V_{a-m\acute{a}x} = P_a \cdot A_{p-m\acute{a}x} \quad (2)$$

donde

- $P_a$  = Productividad de aceite de *J. curcas* [ $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ ]
- $A_{p\text{-m}\acute{a}x}$  = Área potencial máxima para la siembra de *J. curcas* [ha], la cual fue calculada como se indicó en la sección 2.1

Ya que el aceite de *J. curcas* es extraído por prensado, su tasa de recuperación será menor al 35% (figura 2.2 (a)). Por medio de la ecuación 3, la cual tiene en cuenta el efecto de la eficiencia del prensado, se calculó la productividad anual de aceite de *J. curcas*  $P_a$

$$P_a = P_s \cdot \frac{A_s}{100} \cdot \frac{E_p}{100} \cdot \frac{1}{\rho_a} \quad (3)$$

siendo

- $P_s$  = Producción de semilla por unidad de superficie [ $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ ]
- $A_s$  = Contenido de aceite en la semilla de *J. curcas* [%]
- $E_p$  = Eficiencia de prensado [%]

El volumen de aceite de *J. curcas* necesario para producir una cantidad de biodiesel  $V_b$  [ $\text{m}^3 \cdot \text{año}^{-1}$ ] se calculó por medio de la ecuación 4

$$V_a = \frac{99.42}{100} \cdot \frac{V_b \cdot \rho_b}{\rho_a} \quad (4)$$

donde

- $V_a$  = Volumen de aceite de *J. curcas* necesario [ $\text{m}^3 \cdot \text{año}^{-1}$ ]
- $V_b$  = Volumen de producción de biodiesel [ $\text{m}^3 \cdot \text{año}^{-1}$ ]
- $\frac{99.42}{100}$  = Proporción aceite de *J. curcas* – biodiesel

Para cada escenario de producción se varió el valor de  $V_b$ , el cual estuvo sujeto a las siguientes restricciones:

- Debe ser menor o igual a la demanda de diesel en Yucatán.
- No debe ser mayor que  $V_{b\text{-m}\acute{a}x}$ .

### 2.3 Cuantificación de insumos y productos, energía, costos e inversiones

Las entradas y salidas del sistema de producción de biodiesel de *J. curcas* se muestran en la figura 2.3.

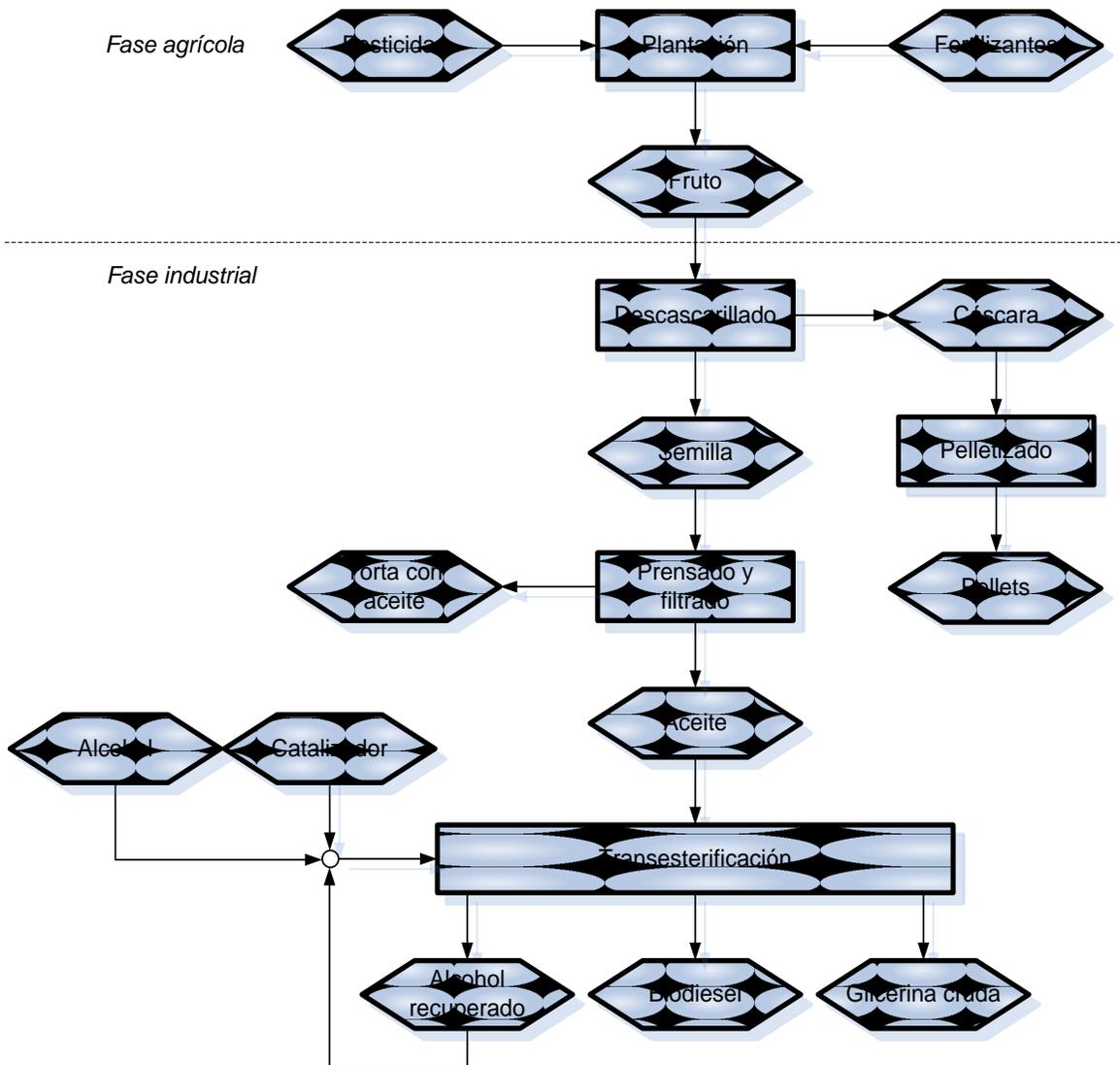


Figura 2.3. Proceso de producción de biodiesel de aceite de *J. curcas*.

A continuación se explica en detalle los supuestos y cálculos para la identificación y cuantificación de insumos de cada fase.

### 2.3.1 Fase agrícola

La cuantificación de área e insumos requeridos en la fase agrícola se realizó por medio de las ecuaciones 5-9

$$A_p = \frac{V_a}{P_a} \quad (5)$$

$$Q_{fert-i} = A_p \cdot d_{fert-i} \quad (6)$$

$$Q_{pst-i} = A_p \cdot d_{pst-i} \quad (7)$$

$$R_{moa} = A_p \cdot r_{moa} \cdot TOA_{fa} \quad (8)$$

$$E_{fa} = FE_{fert-i} \cdot Q_{fert-i} + FE_{pst-i} \cdot Q_{pst-i} + FE_{moa} \cdot R_{moa} \quad (9)$$

donde

- $A_p$  = Superficie ocupada por las plantaciones de *J. curcas* [ha]
- $Q_{fert-i}$  = Cantidad de fertilizante tipo *i* requerido [kg·año<sup>-1</sup>]
- $Q_{pst-i}$  = Cantidad de pesticida tipo *i* requerido [kg·año<sup>-1</sup>]
- $R_{moa}$  = Requerimientos de mano de obra agrícola [hombre·h·año<sup>-1</sup>]
- $E_{fa}$  = Energía que ingresa en la fase agrícola<sup>3</sup> [MJ·año<sup>-1</sup>]
- $d_{fert-i}$  = Dosis de fertilizante tipo *i* requerido por unidad de superficie [kg·ha<sup>-1</sup>·año<sup>-1</sup>]
- $d_{pst-i}$  = Dosis de pesticida tipo *i* requerido por unidad de superficie [kg·ha<sup>-1</sup>·año<sup>-1</sup>]
- $r_{moa}$  = Mano de obra por unidad de superficie [hombre·ha<sup>-1</sup>]
- $TOA_{fa}$  = Tiempo de operación anual de la fase agrícola [h·año<sup>-1</sup>]
- $FE_{fert-i}$  = Factor de energía del fertilizante tipo *i* [MJ·kg<sup>-1</sup>]
- $FE_{pst-i}$  = Factor de energía de pesticida tipo *i* [MJ·kg<sup>-1</sup>]
- $FE_{moa}$  = Factor de energía de mano de obra agrícola [MJ·h<sup>-1</sup>·hombre<sup>-1</sup>]

Ya que la productividad de la *J. curcas* se mide con respecto a la cantidad de semilla, la productividad de frutos se calculó mediante la ecuación 10

---

<sup>3</sup> La energía que ingresa a la fase agrícola es la energía necesaria para la producción de fertilizantes, pesticidas y la energía de la mano de obra.

$$P_f = \frac{100}{70} \cdot P_s \quad (10)$$

siendo

- $P_f$  = Producción de frutos por unidad de superficie [ $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ ]
- $\frac{100}{70}$  = Proporción frutos – semilla (figura 2.2 (a))

Ya que no se encontró una productividad definida de semilla de *J. curcas* en Yucatán, se tomó como referencia la máxima reportada en [51] para Michoacán. Basándose en el historial de productividad de frijol en ambos estados [67], se consideró que la productividad de semillas de *J. curcas* en Yucatán sería de un 81% de la reportada en Michoacán.

Los costos de la fase agrícola fueron calculados mediante la ecuación 11

$$CTO_{fa} = A_p \cdot (CTO_{fert} + CTO_{pst} + CTO_{mofa}) \quad (11)$$

donde

- $CTO_{fa}$  = Costo de la fase agrícola [ $\text{\$} \cdot \text{año}^{-1}$ ]
- $CTO_{fert}$  = Costo de fertilizantes por unidad de superficie [ $\text{\$} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ ]
- $CTO_{pst}$  = Costo de pesticidas [ $\text{\$} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ ]
- $CTO_{mofa}$  = Costo de mano de obra [ $\text{\$} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ ]

Las inversiones necesarias para dar inicio a la fase agrícola están dadas por: el costo de las semillas para plantar, los costos de invernadero para el crecimiento de las plántulas de *J. curcas*, el costo de adquisición y preparación del terreno y los costos de transporte desde el invernadero hasta el terreno. Las inversiones agrícolas se calcularon mediante la ecuación 12

$$INV_{fa} = A_p \cdot (CTO_{sem} \cdot Q_{sem} + CTO_{inv} \cdot n_{pl} + CTO_{prpt} + CTO_{trppl} \cdot n_{pl} + CTO_{sup}) \quad (12)$$

siendo

- $INV_{fa}$  = Inversión en la fase agrícola [ $\text{\$}$ ]
- $CTO_{sem}$  = Costo de semillas para plantar [ $\text{\$} \cdot \text{kg}^{-1}$ ]

- $Q_{sem}$  = Cantidad de semillas de *J. curcas* necesarias para iniciar la plantación [ $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ]
- $CTO_{inv}$  = Costo de invernadero para las plántulas [ $\text{\$}\cdot\text{plántula}^{-1}$ ]
- $n_{pl}$  = Número de plántulas necesarias para iniciar las plantaciones [ $\text{plántulas}\cdot\text{ha}^{-1}$ ]
- $CTO_{prpt}$  = Costo de preparación del terrero [ $\text{\$}\cdot\text{ha}^{-1}$ ]
- $CTO_{trppl}$  = Costo del transporte de las plántulas desde el invernadero hasta área de siembra [ $\text{\$}\cdot\text{plántula}^{-1}$ ]
- $CTO_{sup}$  = Costo de adquisición del área de siembra [ $\text{\$}\cdot\text{ha}^{-1}$ ]

Los costos necesarios para las inversiones agrícolas fueron consultados a la empresa KUOSOL S.A. de C.V. La cantidad de semillas y el número de plántulas necesarias para dar inicio a una plantación de *J. curcas* se consultó en [42] y se ajustó a las condiciones de la plantación de la empresa KUOSOL S.A. de C.V.

Los supuestos empleados para la fase agrícola fueron los siguientes:

- La densidad de árboles por hectárea sería la misma que la empleada por la empresa KUOSOL S.A. de C.V.
- Los primeros rendimientos de productividad de frutos en las plantaciones de *J. curcas* se dan a partir del tercer año de haberlas iniciado (lo que implica que no habrá cosecha en los dos primeros años) y son de un tercio del máximo esperado. En el cuarto año, se asumió que dichos rendimientos aumentan al doble y que, finalmente, en el quinto año, se presentan los rendimientos de productividad de frutos a plenitud. Teniendo en cuenta lo anterior, la fase industrial inicia labores hasta el tercer año de haber realizado la plantación; sin embargo, en dicho año la producción de biodiesel es  $\frac{1}{3} \cdot V_b$  (la planta trabaja a un tercio de su capacidad) y en el año siguiente dicha producción es de  $\frac{2}{3} \cdot V_b$  (la planta trabaja a dos tercios de su capacidad). La estabilización en la producción de frutos y biodiesel en las fases agrícola e industrial, respectivamente, se alcanza entonces a partir del quinto año de haber iniciado la plantación.

- Los insumos en la fase agrícola son constantes en el tiempo independientemente del rendimiento en la productividad de frutos, por tanto, lo son su energía consumida y sus costos.

### 2.3.2 Fase industrial

A diferencia de la fase agrícola, la maquinaria, insumos, energía y costos implícitos en la fase industrial no son constantes en el tiempo; sin embargo, llegan a estabilizarse conforme lo hace la productividad de frutos (y por tanto, la producción de biodiesel). Los cálculos para la cuantificación de maquinaria, insumos, energía y costos durante los primeros años de la fase industrial, se realizaron basándose en una producción estable en la fase industrial.

El cálculo para el número de máquinas de descascarillado, prensado y filtrado necesarias para obtener el aceite de los frutos de *J. curcas* se realizó por medio de las ecuaciones 13, 14 y 15, respectivamente. La energía consumida por estas máquinas se calculó mediante las ecuaciones 16 y 17.

$$n_d = \frac{P_f \cdot A_p}{C_d \cdot TOA_{fi}} \quad (13)$$

$$n_p = \frac{P_s \cdot A_p}{C_p \cdot TOA_{fi}} \quad (14)$$

$$n_f = \frac{P_a \cdot A_p}{C_f \cdot TOA_{fi}} \quad (15)$$

$$E_{dpf-n} = \begin{cases} 0 \forall n \leq 2 \\ \frac{1}{3} \cdot E_{dpf-e} \Leftrightarrow n = 3 \\ \frac{2}{3} \cdot E_{dpf-e} \Leftrightarrow n = 4 \\ E_{dpf-e} \forall n \geq 5 \end{cases} \quad (16)$$

$$E_{dpf-e} = TOA_{fi} \cdot (Pt_d \cdot n_d + Pt_p \cdot n_p + Pt_f \cdot n_f) \quad (17)$$

siendo

- $n_d$  = Número de máquinas de descascarillado necesarias
- $n_p$  = Número de máquinas de prensado necesarias

- $n_f$  = Número de máquinas de filtrado necesarias
- $E_{dpf-n}$  = Energía consumida por las máquinas de descascarillado, prensado y filtrado en un año  $n$  [kwh·año<sup>-1</sup>]
- $E_{dpf-e}$  = Energía consumida por las máquinas de descascarillado, prensado y filtrado en un período estable [kwh·año<sup>-1</sup>]
- $C_d$  = Capacidad de producción de la máquina de descascarillado [kg·h<sup>-1</sup>]
- $C_p$  = Capacidad de producción de la máquina de prensado [kg·h<sup>-1</sup>]
- $C_f$  = Capacidad de producción de la máquina de filtrado [m<sup>3</sup>·h<sup>-1</sup>]
- $Pt_d$  = Potencia de la máquina de descascarillado [kw]
- $Pt_p$  = Potencia de la máquina de prensado [kw]
- $Pt_f$  = Potencia de la máquina de filtrado [kw]
- $TOA_{fi}$  = Tiempo de operación anual de la fase industrial [h·año<sup>-1</sup>]

Las máquinas para la transformación del aceite en biodiesel son proporcionadas en conjunto como una planta integral cuya capacidad se adecúa a los requerimientos de producción deseados  $V_b$ . El esquema de una planta de biodiesel se muestra en la figura 2.4 y consta de cuatro etapas. En la primera, el aceite es calentado hasta la temperatura adecuada para llevar a cabo siguiente etapa, es decir, la reacción de transesterificación. La tercera etapa consta de la separación del biodiesel y la glicerina, ésta última, a su vez, es calentada para recuperar el metanol agregado en exceso para la reacción. Finalmente, la etapa 4 consta de la purificación del biodiesel por resina.

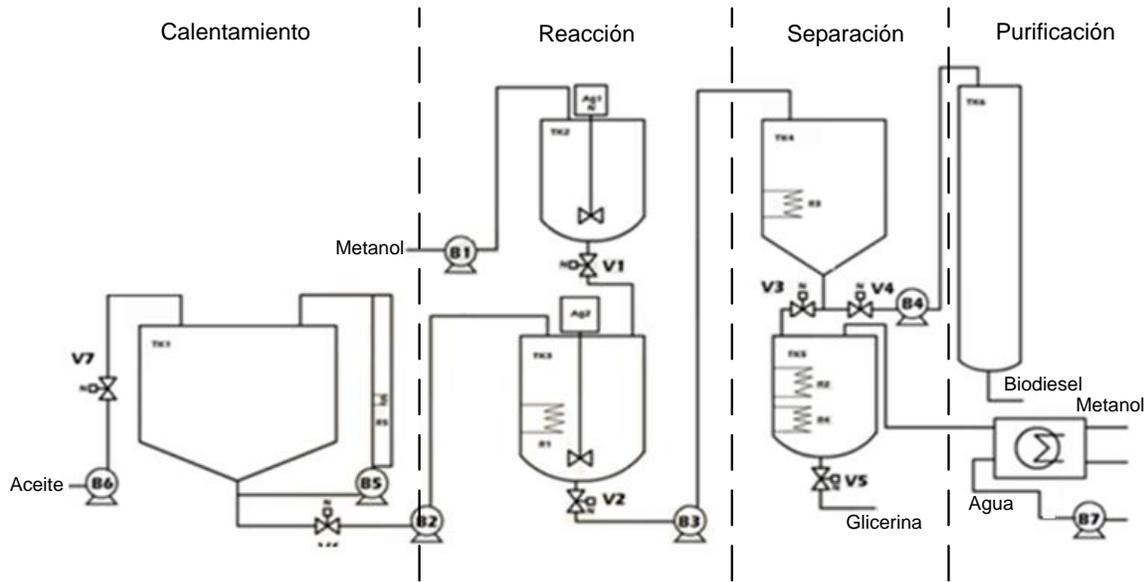


Figura 2.4. Esquema de la planta de biodiesel. Fuente: Adaptado de la empresa SOLBEN S.A de C.V., comunicación personal.

La energía consumida por la planta de biodiesel se estimó teniendo en cuenta la potencia de una planta de este biocombustible con capacidad de producción anual conocida, como se muestra en las ecuaciones 18 y 19

$$E_{pb-n} = \begin{cases} 0 \forall n \leq 2 \\ \frac{1}{3} E_{pb-e} \Leftrightarrow n = 3 \\ \frac{2}{3} E_{pb-e} \Leftrightarrow n = 4 \\ E_{pb-e} \forall n \geq 5 \end{cases} \quad (18)$$

$$E_{pb-e} = \frac{Pt_{bc} \cdot TOA_{fi}}{V_{bc}} \cdot V_b \quad (19)$$

donde

- $E_{pb-n}$  = Energía consumida por la planta de biodiesel en un año  $n$  [kwh·año<sup>-1</sup>]
- $E_{pb-e}$  = Energía consumida por la planta de biodiesel en un período estable [kwh·año<sup>-1</sup>]
- $Pt_{bc}$  = Potencia de una planta de biodiesel de una capacidad  $V_{bb}$  conocida [kw]
- $V_{bc}$  = Volumen de producción de una planta de biodiesel conocida [m<sup>3</sup>·año<sup>-1</sup>]

Al igual que con la planta de biodiesel, las máquinas para la producción de pellets son proporcionadas en conjunto como una planta integral. Su capacidad se adecuó a la producción de cáscaras de frutos de *J. curcas* calculada con la ecuación 20

$$P_{cf} = \frac{30}{100} \cdot P_f \cdot A_p \quad (20)$$

siendo

- $P_{cf}$  = Producción de cáscaras de frutos de *J. curcas* [ $\text{kg} \cdot \text{año}^{-1}$ ]
- $\frac{30}{100}$  = Proporción cáscaras – fruto de *J. curcas* (figura 2.2 (a))

La energía consumida por la planta de producción de pellets se estimó mediante las ecuaciones 21 y 22

$$E_{pp-n} = \begin{cases} 0 \quad \forall n \leq 0 \\ \frac{1}{3} E_{pp-e} \Leftrightarrow n = 3 \\ \frac{2}{3} E_{pp-e} \Leftrightarrow n = 4 \\ E_{pp-e} \quad \forall n \geq 5 \end{cases} \quad (21)$$

$$E_{pp-e} = \frac{Pt_{pc} \cdot TOA_{fi}}{C_{pc}} \cdot P_{cf} \quad (22)$$

donde

- $E_{pp-n}$  = Energía consumida por la planta de pellets en un año  $n$  [ $\text{kwh} \cdot \text{año}^{-1}$ ]
- $E_{pp-e}$  = Energía consumida por la planta de pellets en un período estable [ $\text{kwh} \cdot \text{año}^{-1}$ ]
- $Pt_{pc}$  = Potencia de una planta de pellets de una capacidad  $C_{pc}$  conocida [ $\text{kw}$ ]
- $C_{pc}$  = Capacidad de producción de una planta de pellets conocida [ $\text{kg} \cdot \text{año}^{-1}$ ]

La cantidad de camiones necesarios para cubrir las necesidades de transporte se calculó mediante las ecuaciones 23 y 24

$$n_{c-n} = \begin{cases} 0 \forall n \leq 0 \\ \frac{1}{3} \cdot n_{c-e} \Leftrightarrow n = 4 \\ \frac{2}{3} \cdot n_{c-e} \Leftrightarrow n = 4 \\ n_{c-e} \forall n \geq 5 \end{cases} \quad (23)$$

$$n_{c-e} = \frac{P_f \cdot A_p}{C_{cc} \cdot n_v} \quad (24)$$

siendo

- $n_{c-n}$  = Número de camiones requeridos en el año  $n$  [camiones·día·año<sup>-1</sup>]
- $n_{c-e}$  = Número de camiones necesarios en un período estable para transportar una cantidad de biomasa  $P_f \cdot A_p$  [camiones·día·año<sup>-1</sup>]
- $C_{cc}$  = Capacidad de carga por camión [kg·camión<sup>-1</sup>]
- $n_v$  = Número de viajes posibles al día [día<sup>-1</sup>]

El número de viajes posibles al día es proporcional al tiempo de viaje, los cuales son calculados por medio de las ecuaciones 25 y 26, respectivamente

$$n_v = \frac{24}{t_v} \quad (25)$$

$$t_v = 2 \cdot \frac{d}{v_c} \quad (26)$$

donde

- $t_v$  = Tiempo de viaje [h]. Este tiempo no tiene en cuenta las labores de carga y descarga del camión, ya que se asumió que el tiempo de esta tarea es muy pequeño y se despreció
- $d$  = Distancia promedio entre plantaciones de *J. curcas* y la planta industrial [km]
- $v_c$  = Velocidad promedio del camión [km·h<sup>-1</sup>]
- 2 = Recorrido completo (planta industrial – plantaciones, plantaciones – planta industrial)
- 24 = Horas al día asignadas para labores de transporte [h·día<sup>-1</sup>]

El consumo de diesel para los camiones y la energía requerida en el proceso de transporte se calculó mediante las ecuaciones 27 y 28, respectivamente

$$V_{dtrp-n} = 2 \cdot \frac{1}{1000} \cdot \frac{n_{c-n} \cdot n_v \cdot d}{C_{pdc}} \quad (27)$$

$$E_{trp-n} = FE_d \cdot V_{dtrp-n} \quad (28)$$

siendo

- $V_{dtrp-n}$  = Volumen de combustible diesel requerido para las labores de transporte en el año  $n$  [ $m^3 \cdot \text{año}^{-1}$ ]
- $E_{trp-n}$  = Energía requerida para el transporte en el año  $n$  [ $MJ \cdot \text{año}^{-1}$ ]
- $C_{pdc}$  = Consumo promedio de combustible diesel por camión [ $km \cdot L^{-1}$ ]
- $FE_d$  = Factor de energía del diesel [ $MJ \cdot m^{-3}$ ]
- 2 = Recorrido completo (planta industrial – plantaciones, plantaciones – planta industrial)
- $\frac{1}{1000}$  = Factor de conversión metros cúbicos – litros

La planta industrial se ubicará en medio de las plantaciones de *J. curcas*, por tanto, la distancia promedio que deben recorrer los camiones para las operaciones de transporte es calculado como se indica en la ecuación 29 [68]

$$d = \frac{2}{3} \cdot \sqrt{\frac{0.01 \cdot A_p}{\pi}} \quad (29)$$

donde 0.01 es el factor de conversión de hectáreas a  $km^2$ .

El volumen de metanol teórico necesario para producir un volumen  $V_b$  de biodiesel, se calculó mediante la ecuación 30

$$V_{MeOHT} = \frac{10.78}{100} \cdot \frac{V_b \cdot \rho_b}{\rho_{MeOH}} \quad (30)$$

siendo:

- $V_{MeOHT}$  = Volumen de metanol teórico requerido [ $m^3 \cdot \text{año}^{-1}$ ]
- $\rho_{MeOH}$  = Densidad del metanol [ $kg \cdot m^{-3}$ ]
- $\frac{10.79}{100}$  = Proporción metanol – biodiesel (figura 2.2 (b))

En la práctica, para que la reacción de transesterificación tenga lugar, el volumen de metanol necesario es el doble del mostrado en la figura 2.2. El volumen de alcohol agregado en exceso se recupera en un 60% [36]. Por medio de la ecuación 31, se calculó el volumen de metanol  $V_{MeOH-n}$  [ $m^3 \cdot año^{-1}$ ] que se debe adquirir en un año  $n$  para llevar a cabo la reacción de transesterificación

$$V_{MeOH-n} = \begin{cases} 0 \quad \forall n \leq 2 \\ 2 \cdot \frac{1}{3} \cdot V_{MeOHT} \Leftrightarrow n = 3 \\ 2 \cdot \frac{2}{3} \cdot V_{MeOHT} - \frac{60}{100} \cdot \frac{1}{2} \cdot V_{MeOH-3} \Leftrightarrow n = 4 \\ 2 \cdot V_{MeOHT} - \frac{60}{100} \cdot \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot \frac{2}{3} \cdot V_{MeOHT} \Leftrightarrow n = 5 \\ 2 \cdot V_{MeOHT} - \frac{60}{100} \cdot \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot V_{MeOHT} \quad \forall n \geq 6 \end{cases} \quad (31)$$

La cantidad de catalizador KOH necesario para la reacción se calculó por medio de las ecuaciones 32 y 33. La energía para la maquinaria industrial y el total de energía consumida en dicha fase se calculó mediante las ecuaciones 34 y 35, respectivamente

$$Q_{KOH-n} = \begin{cases} 0 \quad \forall n \leq 2 \\ \frac{1}{3} \cdot Q_{KOH-e} \Leftrightarrow n = 3 \\ \frac{2}{3} \cdot Q_{KOH-e} \Leftrightarrow n = 4 \\ Q_{KOH-e} \quad \forall n \geq 5 \end{cases} \quad (32)$$

$$Q_{KOH-e} = \frac{0.99}{100} \cdot V_b \cdot \rho_b \quad (33)$$

$$E_{maq-n} = E_{dpf-n} + E_{pb-n} + E_{pp-n} \quad (34)$$

$$E_{fi-n} = 3.6 \cdot E_{maq-n} + FE_{MeOH} \cdot V_{MeOH-n} + FE_{KOH} \cdot Q_{KOH-n} + E_{trp-n} \quad (35)$$

siendo

- $Q_{KOH-n}$  = Cantidad de KOH necesario para un año  $n$  [ $kg \cdot año^{-1}$ ]
- $Q_{KOH-e}$  = Cantidad de KOH necesario en un período estable [ $kg \cdot año^{-1}$ ]
- $E_{maq-n}$  = Energía requerida para las maquinarias de la fase industrial en el año  $n$  [ $kwh \cdot año^{-1}$ ]
- $E_{fi-n}$  = Energía total consumida en la fase industrial en el año  $n$  [ $MJ \cdot año^{-1}$ ]<sup>4</sup>
- $FE_{MeOH}$  = Factor de energía del metanol [ $MJ \cdot m^{-3}$ ]

<sup>4</sup> Esta energía incluye la necesaria para la producción de los químicos para llevar a cabo la reacción de transesterificación y la energía del combustible para el transporte.

- $FE_{KOH}$  = Factor de energía del KOH [ $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ]
- $\frac{0.99}{100}$  = Proporción KOH – biodiesel (figura 2.2 (b))
- 3.6 = Factor de conversión de kwh a MJ

Los subproductos de la fase industrial se cuantificaron mediante las ecuaciones 36-39

$$P_{gl-n} = \begin{cases} 0 \forall n \leq 2 \\ \frac{1}{3}P_{gl-e} \Leftrightarrow n = 3 \\ \frac{2}{3}P_{gl-e} \Leftrightarrow n = 4 \\ P_{gl-e} \forall n \geq 5 \end{cases} \quad (36)$$

$$P_{gl-e} = \frac{11.19}{100} \cdot V_b \cdot \rho_b \quad (37)$$

$$P_{t-n} = \begin{cases} 0 \forall n \leq 2 \\ \frac{1}{3}P_{t-e} \Leftrightarrow n = 3 \\ \frac{2}{3}P_{t-e} \Leftrightarrow n = 4 \\ P_{t-e} \forall n \geq 5 \end{cases} \quad (38)$$

$$P_{t-e} = A_p \cdot P_s \cdot \left(1 - \frac{A_s}{100} \cdot \frac{E_p}{100}\right) \quad (39)$$

donde

- $P_{gl-n}$  = Producción de glicerina en el año  $n$  [ $\text{kg}\cdot\text{año}^{-1}$ ]
- $P_{gl-e}$  = Producción de glicerina en un período estable [ $\text{kg}\cdot\text{año}^{-1}$ ]
- $P_{t-n}$  = Producción de torta de *J. curcas* en el año  $n$  [ $\text{kg}\cdot\text{año}^{-1}$ ]
- $P_{t-e}$  = Producción de torta de *J. curcas* en un período estable [ $\text{kg}\cdot\text{año}^{-1}$ ]
- $\frac{11.20}{100}$  = Proporción glicerina cruda – biodiesel (figura 2.2 (b))

Los costos de la fase industrial fueron calculados por medio de la ecuación 40

$$CTO_{fi-n} = CTO_{mp-n} + CTO_{moi-n} + CTO_{trp-n} + CTO_{dep-n} + CTO_{mto-n} + CTO_{ee-n} \quad (40)$$

siendo

- $CTO_{fi-n}$  = Costo de la fase industrial en el año  $n$  [ $\text{\$}\cdot\text{año}^{-1}$ ]
- $CTO_{mp-n}$  = Costo de materias primas en el año  $n$  [ $\text{\$}\cdot\text{año}^{-1}$ ]

- $CTO_{moi-n}$  = Costo de mano de obra industrial en el año  $n$  [ $\$ \cdot \text{año}^{-1}$ ]
- $CTO_{trp-n}$  = Costo de transporte en el año  $n$  [ $\$ \cdot \text{año}^{-1}$ ]
- $CTO_{dep-n}$  = Costo de depreciación en el año  $n$  [ $\$ \cdot \text{año}^{-1}$ ]
- $CTO_{mto-n}$  = Costo de mantenimiento en el año  $n$  [ $\$ \cdot \text{año}^{-1}$ ]
- $CTO_{ee-n}$  = Costos de energía eléctrica en el año  $n$  [ $\$ \cdot \text{año}^{-1}$ ]

Los costos de materias primas, transporte y energía eléctrica fueron calculados por medio de las ecuaciones 41,42 y 43, respectivamente

$$CTO_{mp-n} = CTO_{MeOH} \cdot V_{MeOH-n} + CTO_{KOH} \cdot Q_{KOH-n} \quad (41)$$

$$CTO_{trp-n} = TT \cdot n_{c-n} + CTO_{cd} \cdot V_{dtrp-n} \quad (42)$$

$$CTO_{ee-n} = TEE \cdot E_{maq-n} \quad (43)$$

donde

- $CTO_{MeOH}$  = Costo unitario del metanol [ $\$ \cdot \text{m}^{-3}$ ]
- $CTO_{KOH}$  = Costo unitario del KOH [ $\$ \cdot \text{kg}^{-1}$ ]
- $TT$  = Tarifa de renta por camión [ $\$ \cdot \text{camión}^{-1} \cdot \text{día}^{-1}$ ]
- $CTO_{cd}$  = Costo unitario del combustible diesel [ $\$ \cdot \text{m}^{-3}$ ]
- $TEE$  = Tarifa unitaria de energía eléctrica [ $\$ \cdot \text{kwh}^{-1}$ ]

Los datos concernientes a la tarifa por renta de un camión  $TT$ , de una capacidad  $C_{cc}$ , fueron obtenidos de la empresa CASANOVA RENT VOLKS, S.A. de C.V. La tarifa de unitaria de energía eléctrica  $TEE$  se obtuvo de la Comisión Federal de Electricidad.

La inversión de la fase industrial se calculó mediante la ecuación 44 (los valores de  $n_d$ ,  $n_p$  y  $n_f$  se redondearon al entero inmediato mayor)

$$INV_{fi} = CTO_d \cdot n_d + CTO_p \cdot n_p + CTO_f \cdot n_f + CTO_{bc} \cdot \left(\frac{V_b}{V_{bc}}\right)^{fb} + CTO_{pc} \cdot \left(\frac{P_{cf}}{C_{pc}}\right)^{fp} \quad (44)$$

siendo

- $INV_{fi}$  = Inversión en la fase industrial [ $\$$ ]

- $CTO_d$  = Costo de la máquina de descascarillado [\\$]
- $CTO_p$  = Costo de la máquina de prensado [\\$]
- $CTO_f$  = Costo de la máquina de filtrado [\\$]
- $CTO_{bc}$  = Costo de una planta de biodiesel de capacidad  $V_{bc}$  conocida [\\$]
- $fb$  = Factor de escalamiento de una planta de biodiesel
- $CTO_{pc}$  = Costo de una planta de pellets de capacidad  $C_{pc}$  conocida [\\$]
- $fp$  = Factor de escalamiento de una planta de pellets

El factor de escalamiento  $fb$  se calculó mediante la regresión de la relación entre los costos de maquinaria de una planta de biodiesel y su capacidad de producción. Dicha relación se obtuvo mediante la simulación de una planta de biodiesel realizada por [37] en el programa SuperPro Designer v. 8.5, la cual se adaptó al esquema de la figura 2.4. La regresión se realizó en el programa Microsoft Excel 2007. El factor de escalamiento  $fp$  se calculó de manera similar; sin embargo, los costos de maquinaria en función de la capacidad de producción de pellets se obtuvieron de [59].

Las capacidades de producción, potencia y costos de las máquinas de descascarillado y prensado fueron consultados a la empresa mexicana SOLBEN S.A de C.V. Los datos de la máquina de filtrado fueron consultados a la empresa China NAKIN OIL PURIFIER COMPANY. A la variable  $CTO_{bc}$  se le asignó el costo de una planta de biodiesel de una capacidad  $V_{bc}$  cotizada por la empresa mexicana SOLBEN S.A de C.V. De manera similar, a la variable  $CTO_{pc}$  se le asignó el costo de una planta de pellets de capacidad  $C_{pc}$  cotizada por la empresa china ZHANQIU FADA PELLET MACHINERY CO., LTD.

Los supuestos de la fase industrial son los siguientes:

- Los requerimientos de mano de obra para producción de biodiesel de *J. curcas* son los mismos que los de la planta de biodiesel de Chiapas. Para la producción de pellets, los requerimientos de mano de obra son los mismos que los considerados por [68].
- Los requerimientos de mano de obra industrial no cambian con la capacidad de producción.

- Ya que la producción de pellets a partir de las cáscaras de nuez o de soja no requiere de un proceso de primera trituración y secado [59], las cáscaras de *J. curcas* tampoco requieren de estos procesos para ser transformadas a pellets.
- No hay desperdicio en la producción de pellets de cáscaras de *J. curcas*, es decir, la cantidad de pellets producidos será igual a  $P_{cf}$ .
- El consumo promedio de combustible diesel de un camión pesado es el mismo que el considerado por [31].
- La depreciación anual corresponde al 5.55% de la inversión de la fase industrial  $INV_{fi}$  (para depreciar la maquinaria industrial hasta el año 20) y estará presente desde el año 3.
- El costo de mantenimiento anual corresponde al 1% de la inversión de la fase industrial  $INV_{fi}$ .

Los costos concernientes al almacenamiento no se tuvieron en cuenta para el análisis debido a falta de datos suficientes para ello.

## 2.4 Evaluación energética

La evaluación energética se realizó por medio del cálculo de la razón de energía neta y el balance de energía neto, los cuales son expresados matemáticamente mediante las ecuaciones 45 y 46, respectivamente

$$REN = \frac{\sum_{n=1}^{20} E_{entregada-n}}{\sum_{n=1}^{20} E_{consumida-n}} \quad (45)$$

$$BEN = \sum_{n=1}^{20} E_{entregada-n} - E_{consumida-n} \quad (46)$$

siendo

- $REN$  = Razón de energía neta
- $BEN$  = Balance de energía neto [MJ]
- $E_{entregada-n}$  = Energía entregada por el sistema en el año  $n$  [MJ·año<sup>-1</sup>]
- $E_{consumida-n}$  = Energía consumida por el sistema en el año  $n$  [MJ·año<sup>-1</sup>]

La energía entregada por el sistema se calculó como se indica en las ecuaciones 47 y 48

$$E_{entregada-n} = \begin{cases} 0 \forall n \leq 2 \\ \frac{1}{3} E_{entregada-e} \Leftrightarrow n = 3 \\ \frac{2}{3} E_{entregada-e} \Leftrightarrow n = 4 \\ E_{entregada-e} \forall n \geq 5 \end{cases} \quad (47)$$

$$E_{entregada-e} = FE_b \cdot V_b + FE_{gl} \cdot P_{gl-e} + FE_t \cdot P_{t-e} + FE_{cf} \cdot P_{cf} \quad (48)$$

donde

- $E_{entregada-e}$  = Energía consumida por el sistema en un período estable [ $\text{MJ} \cdot \text{año}^{-1}$ ]
- $FE_b$  = Factor de energía del biodiesel [ $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3}$ ]
- $FE_{gl}$  = Factor de energía de la glicerina [ $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ]
- $FE_t$  = Factor de energía de la torta de la *J. curcas* [ $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ]
- $FE_{cf}$  = Factor de energía de las cáscaras de *J. curcas* [ $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ]. Se asumió que los pellets producidos, tienen el mismo contenido de energía que las cáscaras de los frutos de *J. curcas*

La energía total consumida  $E_{consumida-n}$  es la suma de la energía consumida en la fase agrícola  $E_{fa}$  y en la industrial  $E_{fi-n}$ , tal y como se muestra en la ecuación 49 —la energía consumida en la fase agrícola es constante en cada año (sección 2.3.1) —.

$$E_{consumida-n} = E_{fa} + E_{fi-n} \quad (49)$$

## 2.5 Evaluación ambiental

Las emisiones de gases invernadero involucradas en la producción de biodiesel de *J. curcas* se compararon con las emisiones provocadas por combustibles fósiles. El factor de comparación se calculó como se muestra en la ecuación 50. Aunque tanto la fase agrícola como la industrial estabilizan su producción en el año 5, la cantidad de alcohol requerido para la fase industrial se torna constante a partir del año 6, por tanto, se tomó en cuenta este año para el análisis

$$FEGEI = \frac{EGEI}{E_{entragada-6} - E_{consumida-6}} \quad (50)$$

donde

- $FEGEI$  = Factor de emisión de gases invernadero por unidad de energía aportada por el sistema en un período estable [ $\text{g CO}_{2\text{eq}} \cdot \text{MJ}^{-1}$ ]
- $EGEI$  = Emisiones de gases de efecto invernadero del sistema en un período estable [ $\text{g CO}_{2\text{eq}} \cdot \text{año}^{-1}$ ]

El cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero  $EGEI$ , se realizó mediante la plataforma *The Cool Farm Tool* de [69], la cual se alimentó mediante los siguientes datos (calculados como se indica en la sección 2.3):

- Generales: Área de producción para la fase agrícola, producción total de frutos, tipo de clima y temperatura media anual.
- Cultivos: Tipo de cultivo, datos edafológicos (textura, contenido de materia orgánica, humedad, drenado y pH del suelo), tipos de fertilizante utilizados (con sus respectivas dosis) y cambios en el uso del suelo.
- Uso de energía: Consumo de electricidad y combustibles.

Para realizar una evaluación de otros impactos ambientales asociados a la producción de biodiesel de *J. curcas*, se empleó una metodología cualitativa descrita por [70], la cual consta de un modelo de simulación denominada GSIM, apoyada por diagramas de causa-efecto<sup>5</sup>. La formulación para este tipo de simulación se basa en la siguiente ecuación general

$$X_{n+1} = X_n + \Delta X_{n,n+1} \quad (51)$$

siendo

- $X_{n+1}$  = Efecto ambiental  $X$  en el momento  $n + 1$
- $X_n$  = Efecto ambiental  $X$  en el momento  $n$

---

<sup>5</sup> Este tipo de simulación es empleado cuando las variables ecológicas son conocidas en un sentido geométrico ( A un incremento del efecto A, corresponde una reducción o incremento en el efecto B).

- $\Delta X_{n,n+1}$  = Cambio del efecto  $X$  del tiempo  $n$  al tiempo  $n + 1$

A  $\Delta X_{n,n+1}$  se le asignó el valor de 1 si el efecto  $X$  aumenta, 0 si  $X$  no cambia, o -1 si  $X$  disminuye (mitigación). El comportamiento de cada uno de los efectos  $X$ , se analizó mediante una gráfica de tiempo (variable independiente) vs efectos (la variable dependiente).

## 2.6 Evaluación económica

La viabilidad económica fue calculada por medio de las ecuaciones 52 y 53

$$VPN = \sum_{n=1}^{20} \frac{(I g_n - E g_n) \cdot Ainf_n}{\left(1 + \frac{r}{100}\right)^n} - INV_0 \quad (52)$$

$$Ainf_n = \prod_{j=1}^n \left(1 + \frac{inf_j}{100}\right) \quad (53)$$

donde

- $VPN$  = Valor presente neto de la inversión [\\$]
- $Ainf_n$  = Ajuste por inflación en el año  $n$
- $I g_n$  = Ingresos totales del año  $n$  [\\$·año<sup>-1</sup>]
- $E g_n$  = Egresos totales del año  $n$  [\\$·año<sup>-1</sup>]
- $r$  = Tasa de retorno mínima de aceptación [%]. Ésta se igualó a la tasa de los Certificados de la Tesorería de la Federación (CETES), 28 días
- $INV_0$  = Inversión inicial del proyecto [\\$]. Ésta inversión se igualó a la inversión de la fase agrícola  $INV_{fa}$
- $inf_j$  = Índice de inflación en el año  $j$  [%]. La inflación para cada año se calculó teniendo en cuenta el promedio histórico de éste índice y estimándolo a futuro.
- 20 = Período de planeación [años]

Los ingresos fueron calculados mediante las ecuaciones 54 y 55

$$I g_n = \begin{cases} 0 \forall n \leq 2 \\ \frac{1}{3} I g_e \Leftrightarrow n = 3 \\ \frac{2}{3} I g_e \Leftrightarrow n = 4 \\ I g_e \forall 5 \leq n < 20 \\ I g_e + VS \Leftrightarrow n = 20 \end{cases} \quad (54)$$

$$I g_e = Pr_b \cdot V_b + Pr_{gl} \cdot P_{gl-e} + Pr_t \cdot P_{t-e} + Pr_{pcf} \cdot P_{cf} \quad (55)$$

siendo

- $I g_e$  = Ingresos en un período estable [ $\$ \cdot \text{año}^{-1}$ ]
- $Pr_b$  = Precio del biodiesel [ $\$ \cdot \text{m}^{-3}$ ]
- $Pr_{gl}$  = Precio de la glicerina cruda [ $\$ \cdot \text{kg}^{-1}$ ]
- $Pr_t$  = Precio de la torta de la *J. curcas* [ $\$ \cdot \text{kg}^{-1}$ ]
- $Pr_{pcf}$  = Precio de los pellets de cáscaras de *J. curcas* [ $\$ \cdot \text{kg}^{-1}$ ]
- $VS$  = Valor de salvamento de la inversión [ $\$$ ]

El precio actual del diesel se tomó como referencia para el precio del biodiesel, ya que el biocombustible es un bien sustituto directo a la alternativa fósil. El precio de la glicerina fue suministrado por la Dra. Elizabeth Ortiz del Instituto Tecnológico de Mérida. A la torta de *J. curcas* se le asignó el valor asumido por [39]. El precio de los pellets de las cáscaras de frutos de *J. curcas* se calculó como se muestra en la ecuación 56

$$Pr_{pcf} = FE_{cf} \cdot \frac{Pr_{pra}}{FE_{pra}} \quad (56)$$

donde

- $Pr_{pra}$  = Precio de pellets de residuos agrícolas [ $\$ \cdot \text{kg}^{-1}$ ]
- $FE_{pra}$  = Factor de energía del pellet de residuos agrícolas [ $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ ]

El precio de los pellets de residuos agrícolas y su contenido energético fue consultado a la empresa VICA DELICIAS S.P.R. DE R.L. DE C.V.

El valor de salvamento  $VS$  se calculó de acuerdo con la ecuación 57. Se asumió que la maquinaria se vende en un 10%  $\left(\frac{10}{100}\right)$  de su valor inicial y que los terrenos se vendían en

el mismo precio en el que se han comprado (el valor del terreno aumenta sólo por efectos de la inflación)

$$VS = \frac{10}{100} \cdot INV_{fi} + CTO_{sup} \cdot A_p \quad (57)$$

Los egresos y gastos administrativos fueron calculados por medio de las ecuaciones 58 y 59, respectivamente. Ya que la fase industrial inicia labores en el año 3, la inversión en maquinaria  $INV_{fi}$  para dicha fase se realiza en el año 2. Para el cálculo del valor presente neto  $VPN$ , los egresos no deben contemplar los costos de depreciación de la maquinaria  $CTO_{dep-n}$

$$Eg_n = \begin{cases} CTO_{fa} + GA_n & \Leftrightarrow n = 1 \\ CTO_{fa} + GA_n + INV_{fi} & \Leftrightarrow n = 2 \\ CTO_{fa} + CTO_{fi-n} - CTO_{dep-n} + GA_n & \forall n \geq 3 \end{cases} \quad (58)$$

$$GA_n = \frac{1}{100} \cdot (CTO_{fa} + CTO_{fi-n}) \quad (59)$$

donde

- $Eg_n$  = Egresos en un año  $n$  [ $\$ \cdot \text{año}^{-1}$ ]
- $GA_n$  = Gastos administrativos en un año  $n$  [ $\$ \cdot \text{año}^{-1}$ ]
- $\frac{1}{100}$  = Asignación del 1% de los costos de producción para cubrir los gastos administrativos

### CAPÍTULO 3

#### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De acuerdo con los objetivos planteados, se estimó el área potencial para la siembra de *Jatropha curcas* en Yucatán para definir los escenarios de niveles de producción de biodiesel, se cuantificaron los insumos, energía, costos e inversiones necesarias para llevar a cabo la obtención del biocombustible y, finalmente, se realizó la evaluación energética, ambiental y económica del proceso.

#### 3.1 Área potencial para la siembra de *Jatropha curcas* en Yucatán

Los criterios sugeridos por la bibliografía consultada para la puesta en marcha de una plantación de *J. curcas* se muestran en la Tabla 3.1. Entre otras recomendaciones, es deseable que el contenido de materia orgánica en el suelo sea mayor al 5% y que la temperatura mínima extrema no sea inferior a los 2 °C [71]. Con respecto a la textura del suelo, [72] reporta que los suelos migajón – arenosos presentan los mayores desarrollos de plántula seguidos por los suelos migajón – arcillosos; sin embargo, sugiere que éstos últimos podrían resultar más adecuados si su contenido nutricional es mayor.

Tabla 3.1. Requisitos sugeridos para la siembra de *J. curcas*.

Parámetro	Criterio	Referencia
Temperatura	18 - 40 °C	[8, 73]
Precipitación media anual	600 – 1500 mm	[8, 42]
Altitud	< 500 m	[73]
Profundidad del suelo	≥ 45 cm	[42, 72, 73]
pH del suelo	5.5 – 8.5	[42, 72]

El estado de Yucatán presenta temperaturas mínimas y máximas promedio de 16 y 36°C, respectivamente y una temperatura media anual de 26°C [74], por tanto, este factor no resultó relevante en la búsqueda de áreas potenciales para la siembra de *J. curcas* en Yucatán. La mayor parte del estado presenta una precipitación anual promedio que oscila entre los 800 hasta los 1,000 mm [75], por lo que dicho factor tampoco resultó relevante. La misma situación ocurrió con la altitud, ya que la elevación más alta en el estado es de

210 msnm, en la sierrita de Ticul [74]. En cuanto al factor edafológico, los suelos de Yucatán presentan una naturaleza pedregosa y poco profunda [76], lo cual podría resultar en una gran limitante para los cultivos de *J. curcas*. La cuantificación del máximo potencial para la siembra de esta planta resulta, entonces, en aquellas zonas que presentan el tipo de suelo adecuado para ella.

La Tabla 3.2 presenta información referente a los distintos tipos de suelo presentes en Yucatán junto con observaciones referentes a su uso potencial para realizar plantaciones de *J. curcas*. Las condiciones que presenta el suelo cambisol crómico parecen adecuarse a los criterios de la bibliografía consultada. En general, los suelos tipo cambisol son jóvenes y poco desarrollados con tendencia a acumular ligeras cantidades de arcilla, carbonato de calcio, hierro, entre otros componentes, además, son susceptibles a la erosión (por lo que la siembra de *J. curcas* podría resultar benéfica). El suelo tipo cambisol crómico en particular, presenta un color rojizo o pardo oscuro [77].

Tabla 3.2. Principales tipos de suelo presentes en el estado de Yucatán, México.

Tipo de suelo	Localización	Textura	Espesor (cm)	pH	Materia orgánica (%)	Observaciones
Litosol	Planadas, altillos, montículos y cerros	Migajón arenoso y migajón arcilloso	< 10	7 – 8	0 – 40	Demasiado delgado para la siembra de <i>J. curcas</i> .
Solonchak	Cuencas palustres	Arena	< 50	> 8	< 3	Puede presentar problemas para la siembra debido al espesor del suelo y al alto pH. La zona donde se encuentra se considera como área natural protegida.*
Rendzina	Altillos, montículos, planadas y cerros	Migajón arcilloso	< 50	> 8	15 - 20	Puede presentar problemas para la siembra debido al espesor del suelo y al alto pH.
Cambisol crómico	Planadas	Migajón arcilloso	50 – 100	7 - 7.5	5 – 10	Adaptable para la siembra de <i>J. curcas</i> .
Cambisol calcárico	Planadas	Arcilla	50 – 100	7.5 - 8	< 5	No recomendable debido a su naturaleza arcillosa.
Luvisol	Planadas	Arcilla	> 100	7 - 7.5	5 – 10	No recomendable debido a su naturaleza arcillosa.
Vertisol	Bajos inundables	Arcilla	> 100	6.5 - 7	< 3	El suelo presenta alto potencial para uso agricultura. Puede presentar problemas debido a su textura arcillosa.**
Regosol calcárico	Cuencas palustres	Arena	> 100	>8	<5	Adaptable para la siembra de <i>J. curcas</i> y bosques. Puede haber dificultades debido al pH. La zona donde se encuentra se considera como área natural protegida.*
Histosol	Cuencas palustres	Migajón arcilloso	< 50	>8	35-40	Puede presentar problemas para la siembra debido al espesor del suelo y al alto pH. La zona donde se encuentra se considera como área natural protegida.
Nitosol	Planadas	Arcilla	> 200	6.5 - 7	< 5	No recomendable debido a su naturaleza arcillosa.

Datos de [76]. \*[66]. \*\*[72, 73].

La figura 3.1 y la tabla 3.3 muestran la distribución y disponibilidad del terreno apto para la siembra de *J. curcas* en Yucatán, respectivamente. La superficie naranja muestra la distribución del suelo tipo cambisol crómico. La superficie roja presenta las zonas consideradas como áreas protegidas o empleadas para la agricultura. Las líneas color morado representan las carreteras rurales pavimentadas. El municipio que presenta la mayor área potencial de siembra es Yaxcabá con un 42% del total máximo estimado, seguido por el municipio de Cantamayec, con una participación del 11.25%.

En lo referente a la ubicación de la planta de biodiesel, de acuerdo con Nilsson *et al.* [58] y Sultana *et al.* [68] éstas deben ser ubicadas en el centro de las zonas agrícolas donde se desarrolla su materia prima, ya que se reducen los costos de transporte. De esta manera, una posible ubicación para la planta de biodiesel es el municipio de Yaxcabá. Sin embargo, actualmente no se cuenta con estudios suficientes para complementar esta afirmación (infraestructura de comunicaciones, disponibilidad de mano de obra calificada, insumos, entre otros).

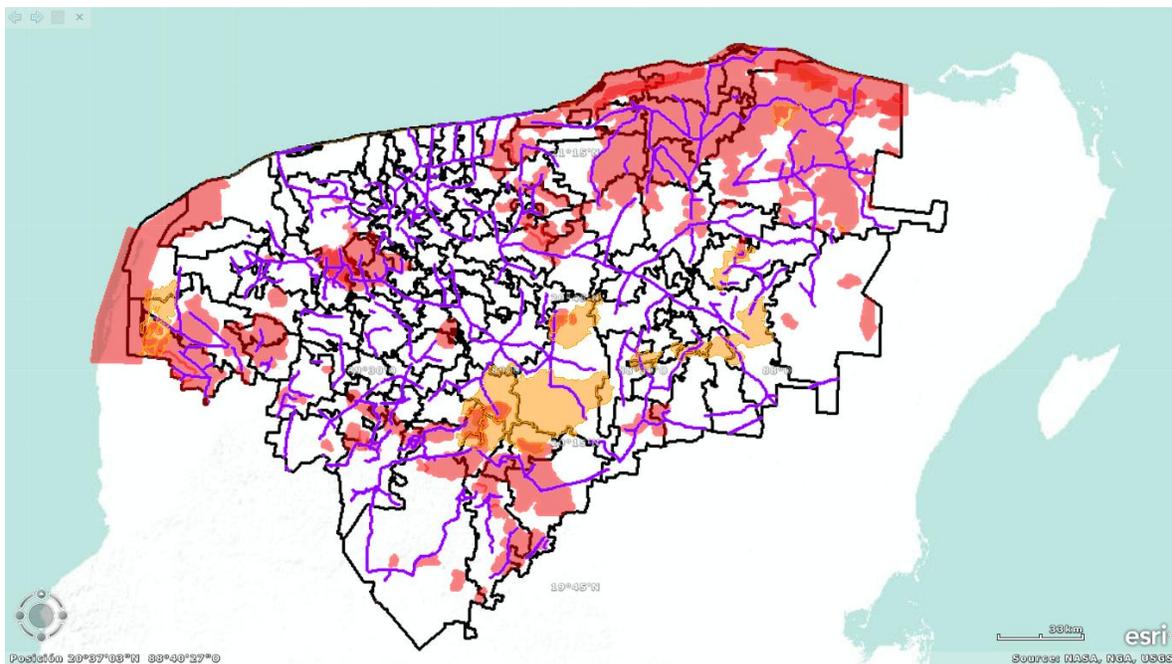


Figura 3.1. Área potencial para la siembra de *J. curcas* en Yucatán. Datos de [66].

Tabla 3.3. Cuantificación del área potencial para la siembra de *J. curcas* en Yucatán.

Municipio	Área potencial (ha)	Área descartada (ha)*	Área estimada para cultivos de <i>J. curcas</i> (ha)
Dzitás	623.14	0.00	623.14
Chacsinkín	741.60	0.00	741.60
Peto	742.65	0.00	742.65
Tixcacalcupul	1,079.38	0.00	1,079.38
Cuncunul	1,176.07	0.00	1,176.07
Tekax	6,141.21	4,463.06	1,678.16
Teabo	2,193.46	234.69	1,958.77
Sotuta	2,120.95	0.00	2,120.95
Tinúm	2,253.24	0.00	2,253.24
Tzimin	12,425.96	9,817.14	2,608.83
Kaua	3,173.08	0.00	3,173.08
Halachó	9,779.38	6,525.43	3,253.95
Celestún	4,664.59	372.66	4,291.93
Tekom	4,744.71	0.00	4,744.71
Chichimilá	5,970.26	0.00	5,970.26
Valladolid	6,216.91	0.00	6,216.91
Maxcanú	7,659.03	700.80	6,958.24
Chankom	7,206.24	0.00	7,206.24
Temozón	8,915.87	747.86	8,168.01
Tixméhuac	12,157.86	2,382.79	9,775.07
Tahdziú	13,718.23	3,812.24	9,905.99
Cantamayec	24,754.27	4,343.55	20,410.72
Yaxcabá	79,501.67	3,076.66	76,425.01
Total	217,959.75	36,476.86	181,482.91

\*Superficie correspondiente a uso agrícola y/o considerada como protegida.

### 3.2 Definición de escenarios de producción de biodiesel de *Jatropha curcas* en Yucatán

La máxima producción de biodiesel de *J. curcas* en Yucatán, teniendo en cuenta los datos de la tabla 3.4, se estima en  $75,952.35 \text{ m}^3 \cdot \text{año}^{-1}$ , es decir, hasta un 10.68% del consumo en volumen de diesel en el estado en 2010 (figura 1.2).

Tabla 3.4. Datos necesarios para la estimación del máximo potencial de producción de biodiesel de *J. curcas* en Yucatán.

Parámetro	Variable	Valor	Referencias
Productividad de semilla [ $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ ]	$P_s$	1495	Datos de [51, 67]
Aceite contenido en la semilla [%]	$A_s$	35	[11]
Eficiencia de prensado [%]	$E_p$	70	[17, 52]
Densidad del aceite de <i>J. curcas</i> [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]	$\rho_a$	920	[11]
Productividad de aceite [ $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ ]	$P_a$	0.398	Ecuación 3
Densidad del biodiesel [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]	$\rho_b$	880	[11]
Área máxima disponible [ha]	$A_{p-\text{máx}}$	181,482.91	Tabla 3.3
Volumen máximo de aceite [ $\text{m}^3 \cdot \text{año}^{-1}$ ]	$V_{a-\text{máx}}$	72,228.71	Ecuación 2

De esta manera, conforme las restricciones presentes en la sección 2.2, se plantearon los siguientes escenarios de producción:

- Escenario B5: La producción de biodiesel  $V_b$  es de  $35,537 \text{ m}^3 \cdot \text{año}^{-1}$ , una cantidad suficiente para realizar mezclas B5 para el estado de Yucatán.
- Escenario B10: La producción de biodiesel  $V_b$  es de  $71,074 \text{ m}^3 \cdot \text{año}^{-1}$ , una cantidad suficiente para realizar mezclas B10 para el estado de Yucatán.

### 3.3 Insumos, productos, energía, costos e inversiones para la producción de biodiesel de *Jatropha curcas* en Yucatán

#### 3.3.1 Fase agrícola

Las constantes empleadas para realizar los cálculos de insumos, energía, costos e inversiones para la fase agrícola se muestran en el anexo A. La tabla 3.5 muestra los insumos, energía, costos e inversiones implícitas en la fase agrícola de la producción de biodiesel de *J. curcas* en Yucatán para los escenarios B5 y B10. La relación insumos, energía, costos e inversiones versus capacidad de producción de biodiesel es lineal, es decir, si se desea aumentar la producción al doble, se requerirá del doble de superficie plantada y, por ende, el doble de insumos, energía, costos e inversiones.

Tabla 3.5. Insumos, energía, costos e inversiones en la fase agrícola de la producción de biodiesel de *J. curcas* en Yucatán.

Parámetro	Variable	Escenario B5	Escenario B10
<i>Insumos</i>			
Aceite [m <sup>3</sup> ·año <sup>-1</sup> ]	$V_a$	33793.71	67587.42
Superficie [ha]	$A_p$	84882.16	169764.32
Fertilizante de sulfato de amonio [ton·año <sup>-1</sup> ]	$Q_{fert-N}$	21220.54	42441.08
Fertilizante superfosfato [ton·año <sup>-1</sup> ]	$Q_{fert-P}$	8488.22	16976.43
Fertilizante cloruro de potasio [ton·año <sup>-1</sup> ]	$Q_{fert-K}$	5687.10	11374.21
Pesticidas [ton·año <sup>-1</sup> ]	$Q_{pst-i}$	Variable	Variable
Mano de obra agrícola [hombre·h·año <sup>-1</sup> ]	$R_{moa}$	44817779.84	89635559.68
<i>Energía</i>			
Uso de fertilizantes [GJ·año <sup>-1</sup> ]	—	1244666.14	2489332.28
Mano de obra agrícola [GJ·año <sup>-1</sup> ]	—	103080.89	206161.79
Total fase agrícola [GJ·año <sup>-1</sup> ]	$E_{fa}$	1347747.03	2695494.06
<i>Costos e inversiones*</i>			
Fertilizantes [\$.año <sup>-1</sup> ]	—	\$ 106,187,580	\$ 212,375,161
Pesticidas [\$.año <sup>-1</sup> ]	—	\$ 143,875,259	\$ 287,750,518
Mano de obra agrícola [\$.año <sup>-1</sup> ]	—	\$ 565,994,234	\$ 1,131,988,470
Total fase agrícola [\$.año <sup>-1</sup> ]	$CTO_{fa}$	\$ 811,899,275	\$ 1,623,798,551
Inversión de la fase agrícola [\$]	$INV_{fa}$	\$2,342,747,582	\$4,685,495,165
<i>Productos</i>			
Frutos de <i>J. curcas</i> [ton·año <sup>-1</sup> ] <sup>a</sup>	$P_f \cdot A_p$	181284.00	362568.1

<sup>a</sup> Este valor se presenta del año 5-20 (estado estable), durante los años 3 y 4, dicho valor es  $\frac{1}{3}$  y  $\frac{2}{3}$  de lo que se presenta en estado estable, respectivamente.

\* Datos en MXN.

### 3.3.2 Fase industrial

Las constantes empleadas para realizar los cálculos de insumos, energía, costos e inversiones para la fase industrial se muestran en el anexo A. Todos los insumos, a excepción del número de camiones  $n_{c-n}$  y el volumen de combustible diesel para las labores de transporte  $V_{dtrp-n}$ , varían conforme lo hace la capacidad de producción de biodiesel en la misma proporción. La energía y costos implícitos en las labores de transporte dependen del número de camiones  $n_{c-n}$  por tanto, estos parámetros tampoco varían conforme lo hace la capacidad de producción de biodiesel en la misma proporción.

Los requerimientos de mano de obra totales son:

- Tres técnicos para el manejo de la planta de biodiesel, tres técnicos para el manejo de las máquinas de descascarillado, prensado y filtrado y un ingeniero para la supervisión del proceso. Trabajando tres turnos de ocho horas al día, los requerimientos de mano de obra para la producción de biodiesel ascienden a 18 técnicos y 3 ingenieros.
- Cinco técnicos y un ingeniero para el manejo de la planta de pellets. Trabajando tres turnos al día, los requerimientos de mano de obra para la producción de pellets asciende a 15 técnicos y 3 ingenieros.
- En total, se requieren de 6 ingenieros y 33 técnicos para las labores de la fase industrial. Cada ingeniero tiene un costo de \$141,420 MXN al año y cada técnico un costo de \$110,760 MXN al año.

La tabla 3.6 muestra los insumos, energía, costos e inversiones en la fase industrial de la producción de biodiesel de *J. curcas*. El costo de mano de obra para la producción de biodiesel es el 54% del mostrado en la tabla 3.6, el 46% restante es el correspondiente a la producción de pellets. De manera similar, el costo de mantenimiento, energía eléctrica y depreciación de la producción de biodiesel es del 95, 64 y 95% de los mostrados en la tabla 3.6, respectivamente. La fracción restante es asignada a la producción de pellets.

Tabla 3.6. Insumos, energía, costos e inversiones en la fase industrial de la producción de biodiesel de *J. curcas* en Yucatán.

Parámetro	Variable	Año <i>n</i>	Escenario B5	Escenario B10
<i>Maquinaria, transporte e insumos</i>				
Máquinas de descascarillado	$n_d$	—	5	10
Máquinas de prensado	$n_p$	—	3	6
Máquinas de filtrado	$n_f$	—	1	2
Número de camiones [camiones·día·año <sup>-1</sup> ] <sup>a</sup>	$n_{c-n}$	5-20	769.98	2177.84
Número de viajes posibles al día	$n_v$	—	54.74	38.71
Tiempo de viaje [h]	$t_v$	—	0.44	0.62
Combustible diesel (transporte) [m <sup>3</sup> ·año <sup>-1</sup> ] <sup>a</sup>	$V_{dtrp-n}$	5-20	231.00	653.35
Distancia sembradíos - planta industrial [km]	$d$	—	10.96	15.50
Volumen de metanol [m <sup>3</sup> ·año <sup>-1</sup> ]	$V_{MeOH-n}$	3	2843.17	5686.35
		4	4833.39	9666.79
		5	6823.62	13647.23
		6-20	5970.66	11941.33
Cantidad de KOH [ton·año <sup>-1</sup> ] <sup>a</sup>	$Q_{KOH-n}$	5-20	310.90	621.80
<i>Energía</i>				
Descascarillado, prensado y filtrado [MJ·año <sup>-1</sup> ] <sup>a</sup>	$E_{dpcf-n}$	5-20	23239.50	46478.99
Planta de biodiesel [GJ·año <sup>-1</sup> ] <sup>a</sup>	$E_{pb-n}$	5-20	11513.99	23027.98
Planta de pellets [GJ·año <sup>-1</sup> ] <sup>a</sup>	$E_{pp-n}$	5-20	19500.36	39000.72
Total maquinaria industrial [GJ·año <sup>-1</sup> ] <sup>a</sup>	$E_{maq-n}$	5-20	54253.85	108507.69
Labores de transporte [GJ·año <sup>-1</sup> ] <sup>a</sup>	$E_{trp-n}$	5-20	8881.77	25121.44
Producción de materias primas [GJ·año <sup>-1</sup> ]	—	3	89993.15	179986.30
		4	153606.12	307212.23
		5	217219.08	434438.17
		6-20	190839.00	381677.80
Total Fase industrial [GJ·año <sup>-1</sup> ]	$E_{fi-n}$	3	111038.35	224529.34
		4	195696.53	396298.32
		5	280354.70	568071.50
		6-20	253974.52	515306.93
<i>Costos e inversiones*</i>				
Materias primas industriales [\$·año <sup>-1</sup> ]	$CTO_{mp-n}$	3	\$ 22,997,690	\$ 45,995,381
		4	\$ 39,781,302	\$ 79,562,604
		5	\$ 56,564,914	\$ 113,129,827
		6-20	\$ 50,350,835	\$ 100,701,670
Mano de obra [\$·año <sup>-1</sup> ]	$CTO_{moi-n}$	3-20	\$ 4,503,600	\$ 4,503,600
Transporte [\$·año <sup>-1</sup> ] <sup>a</sup>	$CTO_{trp-n}$	5-20	\$ 3,266,341	\$ 9,238,607
Depreciación de maquinaria [\$·año <sup>-1</sup> ]	$CTO_{dep-n}$	3-20	\$ 3,079,453	\$ 5,680,393
Mantenimiento de maquinaria [\$·año <sup>-1</sup> ]	$CTO_{mto-n}$	3-20	\$ 553,859	\$ 1,021,653
Energía eléctrica [\$·año <sup>-1</sup> ] <sup>a</sup>	$CTO_{ee-n}$	5-20	\$ 15,568,263	\$ 31,316,526
Total fase industrial [\$·año <sup>-1</sup> ]	$CTO_{fi-n}$	3	\$ 37,442,804	\$ 70,719,405
		4	\$ 60,534,616	\$ 117,805,006
		5	\$ 83,626,429	\$ 164,890,607
		6-20	\$ 77,412,351	\$ 152,462,449
Inversión en maquinaria [\$]	$INV_{fi}$	—	\$ 55,385,852	\$ 102,165,344
<i>Coproductos</i>				
Cáscaras de frutos [ton·año <sup>-1</sup> ] <sup>a</sup>	$P_{cf}$	5-20	54385.21	108770.42
Glicerina cruda [ton·año <sup>-1</sup> ] <sup>a</sup>	$P_{gl-n}$	5-20	3501.98	7003.96
Torta residual de <i>J. curcas</i> [ton·año <sup>-1</sup> ] <sup>a</sup>	$P_{t-n}$	5-20	95808.61	191617.23

<sup>a</sup> El valor de este parámetro en los años 3 y 4 es de  $\frac{1}{3}$  y  $\frac{2}{3}$  del valor de los años 5-20, respectivamente.

\* Valores en MXN.

### 3.4 Evaluación energética

La tabla 3.7 muestra la energía entregada y consumida en cada uno de los escenarios de producción de biodiesel de *J. curcas* planteados. El sistema de producción aporta energía al medio a partir del quinto año, de hecho, no es sino hasta el año 10 que dicho sistema aporta la energía suficiente para recuperar la consumida durante los primeros 5 años.

Tabla 3.7. Energía entregada y consumida en cada uno de los escenarios de producción de biodiesel planteados (datos en GJ).

Año ( <i>n</i> )	Escenario B5			Escenario B10		
	$E_{entregada-n}$	$E_{consumida-n}$	$BEN$	$E_{entregada-n}$	$E_{consumida-n}$	$BEN$
1	0	1347747	-1347747	0	2695494	-2695494
2	0	1347747	-1347747	0	2695494	-2695494
3	733646	1458785	-725139	1467292	2920023	-1452731
4	1467292	1543443	-76151	2934585	3091792	-157207
5	2200938	1628101	572837	4401877	3263561	1138316
6-20	2200938	1601721	599217	4401877	3210801	1191076
Total*	37415959	31351648	6064311	74831917	62828380	12003537

\* Hasta 20 años.

La relación entre el balance de energía neto  $BEN$  y la producción de biodiesel es de carácter lineal; sin embargo, la razón de energía neta  $REN$  no depende del volumen de producción de biodiesel, tal y como se muestra en la figura 3.2. La razón de energía neta  $REN$  se calculó en 1.19, lo que significa que el sistema aporta un 19% de energía con respecto a la que consume; sin embargo, si no se tiene en cuenta la energía aportada por los subproductos (glicerina, torta de *J. curcas* y los pellets) el valor de la  $REN$  se reduce a 0.63. Esto indica que la producción de biodiesel de *J. curcas* aporta energía sólo si se aprovecha el contenido energético de los subproductos, ya que el contenido de energía del biocombustible cubre hasta el 63% de la energía necesaria para su producción.

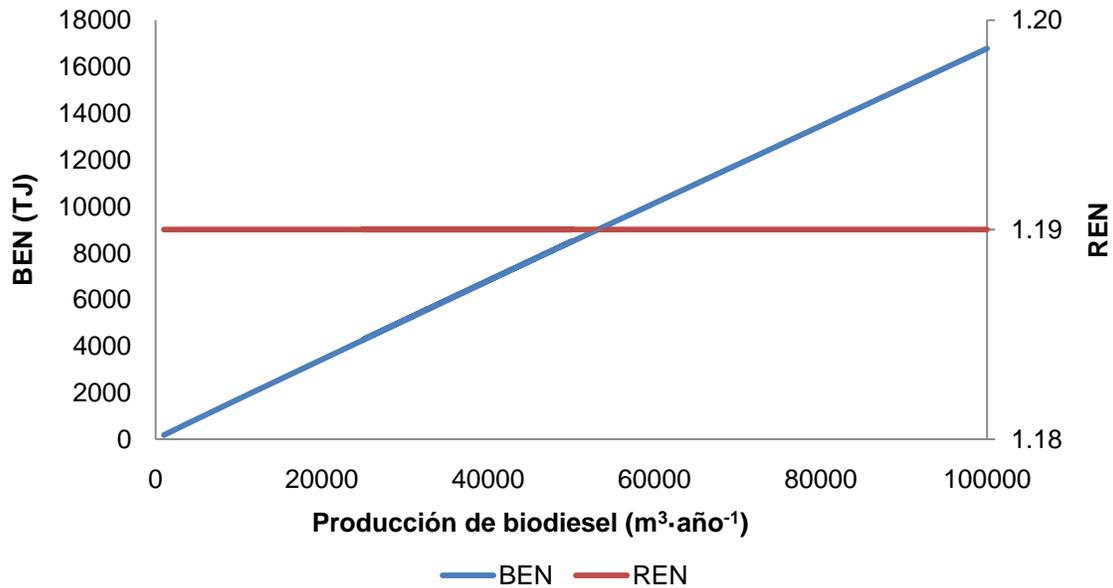


Figura 3.2. Relación del balance de energía neto *BEN* y la razón de energía neta *REN* con respecto a la producción de biodiesel de *J. curcas*.

Los resultados en torno a la *REN* para el presente estudio, son similares a los reportados en otros trabajos de investigación. En [31], se concluye que la *REN* para el biodiesel de *J. curcas* en condiciones de baja productividad es de 1.93 cuando se aprovechan los subproductos, sino es así, este indicador disminuye a 0.53. En [26] se reporta una *REN* de 2.0 aprovechando los subproductos. En [30] se reporta que el biodiesel de *J. curcas* aporta un 3% más energía de la que consume.

La distribución de energía consumida y entregada por el sistema de producción de biodiesel de *J. curcas* se muestra en la figura 3.3. Dichas distribuciones de energía no cambian con la producción de biodiesel. Los fertilizantes resultan ser aquellos insumos que más contribuyen al consumo de energía, un resultado similar al reportado en [30], donde los fertilizantes representan el 73% de la energía consumida.

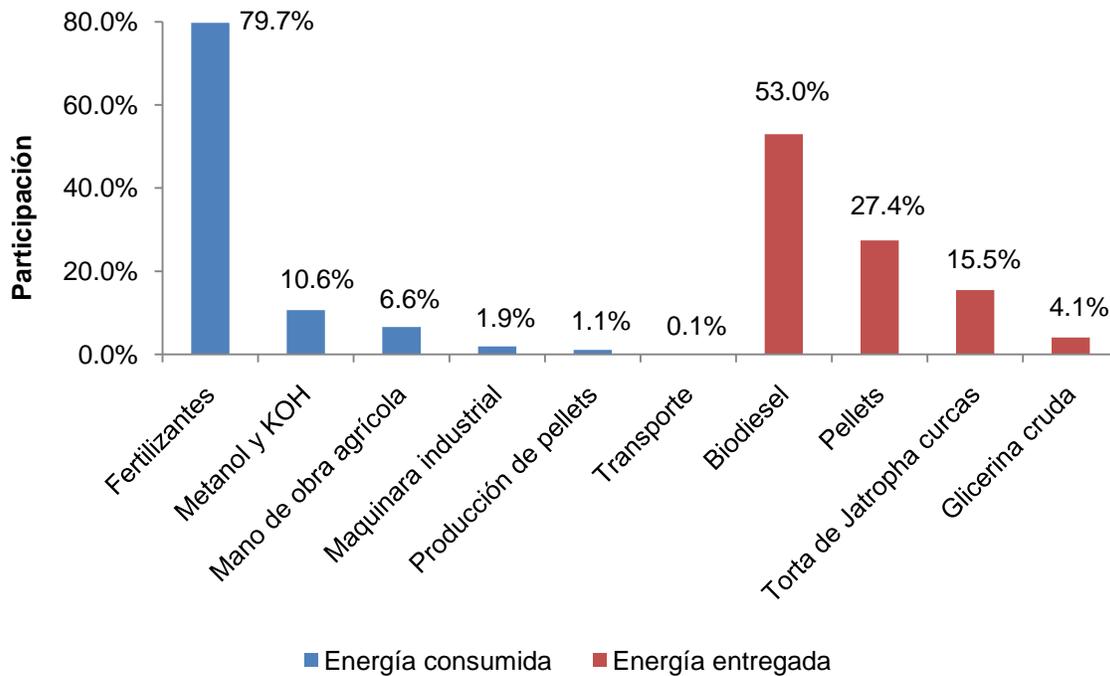


Figura 3.3. Distribución de la energía consumida y entregada en la producción de biodiesel de *J. curcas*.

La figura 3.4 muestra la relación de la *REN* en función de la productividad de semillas de *Jatropha curcas*. A medida que dicha productividad se incrementa, también lo hace la *REN* y la participación en el consumo de energía del metanol. La participación del fertilizante, por el contrario, disminuye. Cuando la productividad de semilla es de  $11.56 \text{ ton}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ , ambos insumos consumen la misma cantidad de energía. En este punto, la *REN* es de 2.55 sin tener en cuenta el aporte energético de los subproductos. Este resultado es similar al reportado por [31], quien estimó una *REN* de 2.7, sin el aporte de energía de los subproductos, bajo una productividad de semilla de  $11.99 \text{ ton}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ . La productividad mínima de semillas de *J. curcas* para que el valor de la *REN* sea 1 se encuentra en  $1.22 \text{ ton}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ , si no se tiene en cuenta el aporte de energía de los subproductos, dicha productividad debe ser mayor que  $2.6 \text{ ton}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ .

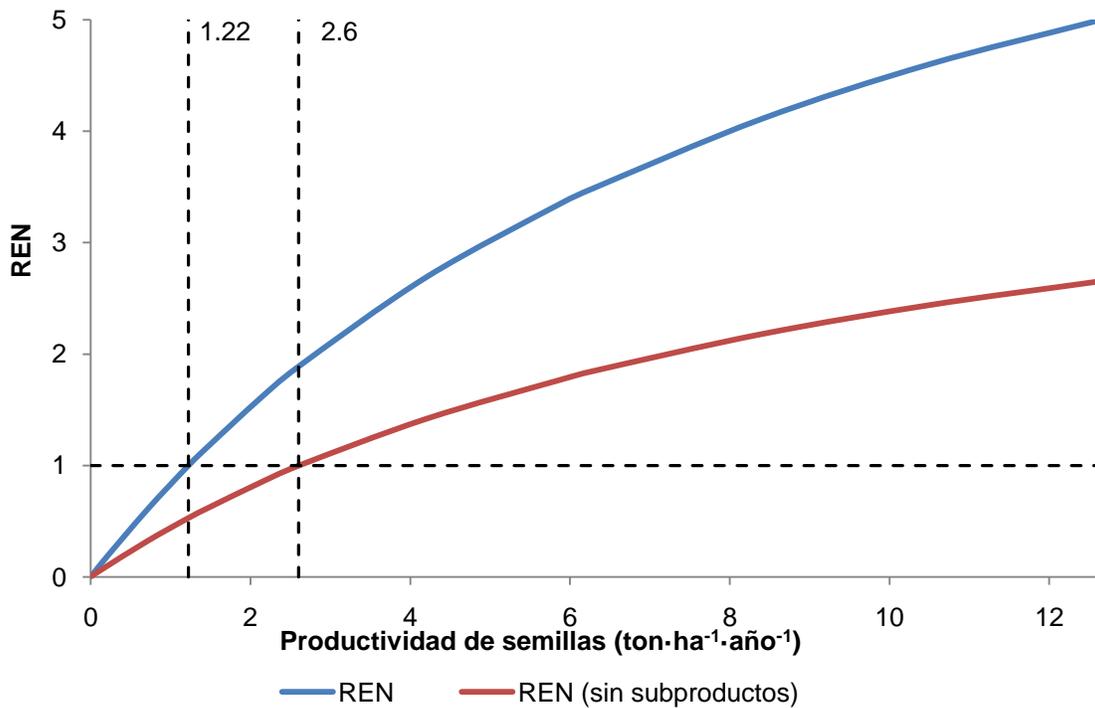


Figura 3.4. Relación de la *REN* con respecto a la productividad de semillas de *J. curcas*.

### 3.5 Evaluación ambiental

Las emisiones de gases de efecto invernadero obtenidas de la base de datos *The Cool Farm Tool* de [69] para cada escenario se muestran en la tabla 3.8. Los factores de emisión de gases de efecto invernadero (*FEGEI*) para los escenarios B5 y B10 son 66.82 y 67.66 g CO<sub>2eq</sub>·MJ<sup>-1</sup>, respectivamente, sino se tienen en cuenta las emisiones por cambio en el uso del suelo. Estos resultados son similares a los reportados en [25] de 60 g CO<sub>2eq</sub>·MJ<sup>-1</sup> y mayor al reportado por [26] de 52 g CO<sub>2eq</sub>·MJ<sup>-1</sup>. Las emisiones evitadas por el aprovechamiento de energía obtenida de la producción de biodiesel de *J. curcas* son de 16.98 g CO<sub>2eq</sub>·MJ<sup>-1</sup> y 16.14 g CO<sub>2eq</sub>·MJ<sup>-1</sup> para los escenarios B5 y B10, respectivamente, y son menores si se comparan con las emisiones por uso de diesel de 83.8 g CO<sub>2eq</sub>·MJ<sup>-1</sup>.

Tabla 3.8. Emisiones de gases de efecto invernadero por la producción de biodiesel de *J. curcas*.

Parámetro	Emisiones (ton CO <sub>2</sub> eq·año <sup>-1</sup> )	
	Escenario B5	Escenario B10
Producción de fertilizantes	19336.58	38673.16
Emisiones inducidas por fertilizantes	11506.34	23012.69
Pesticidas	1740.08	3480.17
Maquinaria industrial y transporte	7456.70	15426.24
<i>EGEI</i> sin cambio en el uso del suelo	40039.70	80592.26
Emisiones por cambio en el uso del suelo	1147055.05	2294110.11
<i>EGEI</i> con cambio en el uso del suelo	1187094.76	2374702.37

Entre mayor sea la producción de biodiesel, mayor será el valor de *FEGEI*, tal y como se muestra en la figura 3.5. De acuerdo al modelo generado en dicha figura, se estima que, por más pequeña que sea la producción de biodiesel, las emisiones de gases de efecto invernadero no serán inferiores a 64.8 g CO<sub>2</sub>eq·MJ<sup>-1</sup>.

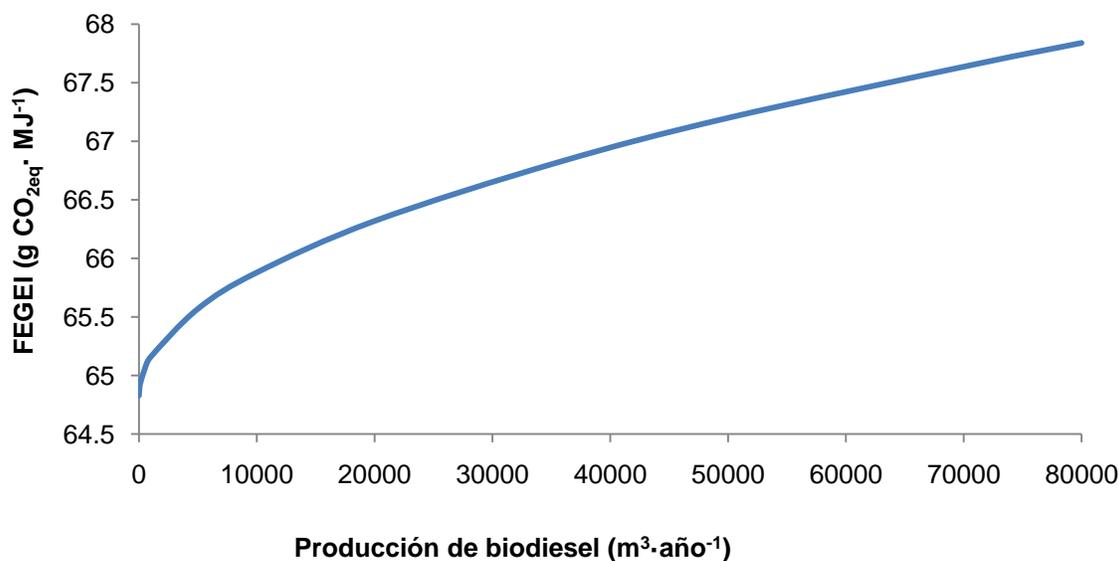
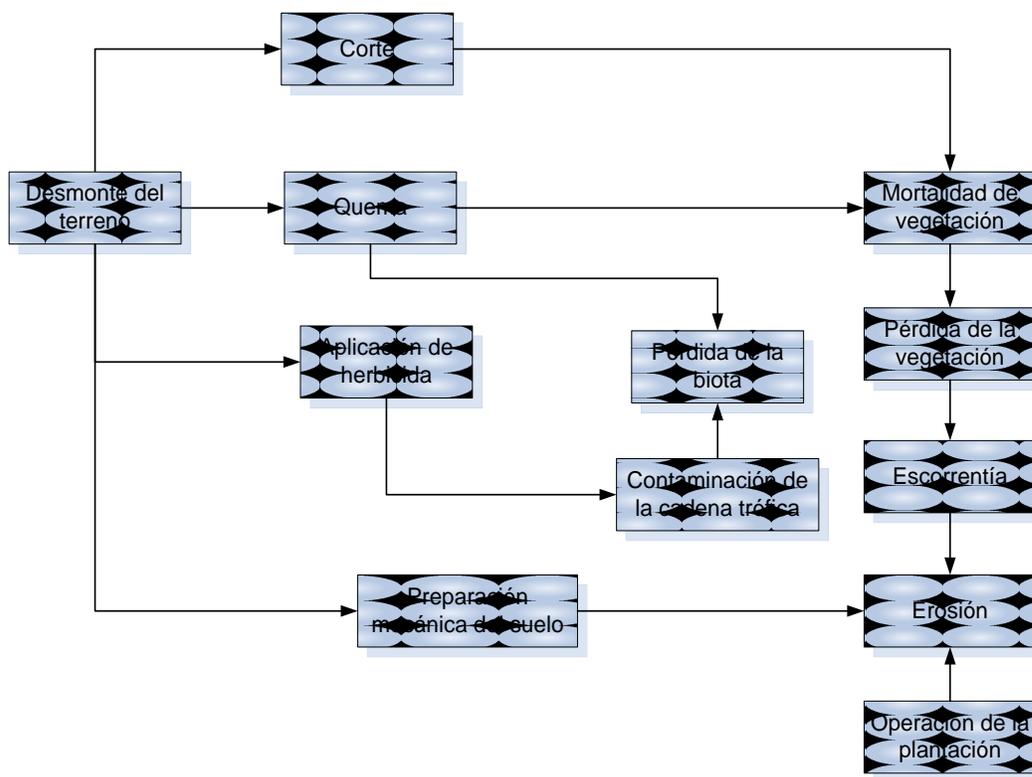


Figura 3.5. Relación entre el valor de *FEGEI* y la producción de biodiesel de *J. curcas*.

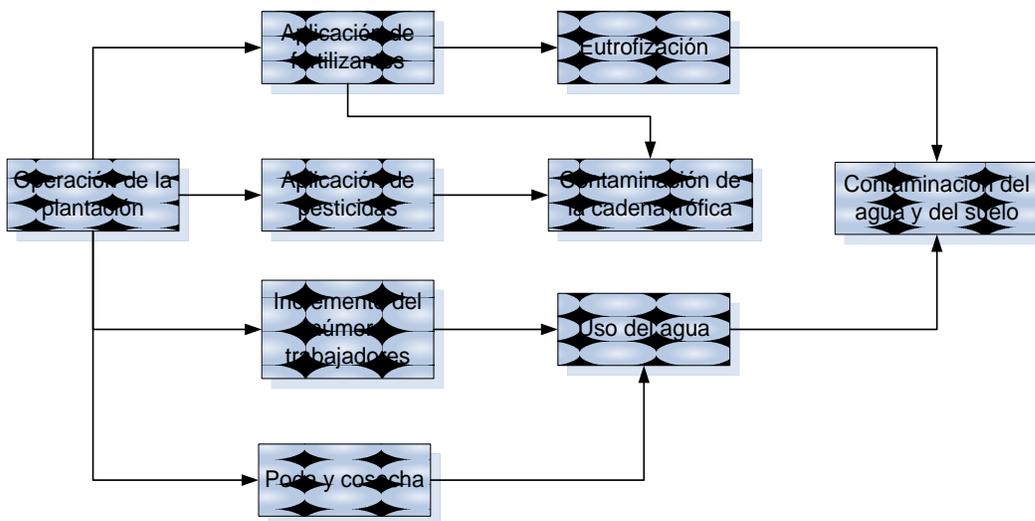
Si se toma en cuenta el efecto del cambio en el uso del suelo, la producción de biodiesel de *J. curcas* resulta en una fuente de emisión de gases invernadero, ya que el valor de *FEGET* alcanza los 1891.08 g CO<sub>2eq</sub>·MJ<sup>-1</sup> para el escenario B5 y los 1993.74 g CO<sub>2eq</sub>·MJ<sup>-1</sup> para el escenario B10. De esta manera, sólo si se evita realizar intensas labores de cambio en el uso del suelo para la siembra de *J. curcas*, el sistema resulta en una fuente de mitigación de gases invernadero. Éste sería el caso en el que las plantaciones se realicen en terrenos degradados ubicados dentro de los límites del área potencial para la siembra de *J. curcas* en Yucatán, mostrados en la figura 3.1.

Otras implicaciones ambientales se evaluaron mediante el análisis del inicio y operación de las plantaciones. La figura 3.6 muestra el diagrama causa – efecto del impacto ambiental debido al desmonte y operación de la plantación, las cuales se describen a continuación:

- En el desmonte, se requiere realizar labores de corte y quema de plantas maderables, aplicación de herbicidas para la remoción de malezas y una preparación mecánica del suelo. La consecuencia final es un cambio en el índice de escorrentía debido a la falta de plantas que se encargarían de absorber el agua de lluvia, así como el aumento en la erosión del suelo. Estos efectos serán más severos en las superficies que albergaban parches selváticos.
- La operación de la plantación requiere de la aplicación de fertilizantes y pesticidas, así como de labores de cosecha y poda. Los efectos principales son el aumento en la eutrofización y la contaminación en la cadena trófica, los cuales inciden en la contaminación del suelo y el agua. La operación de la plantación puede mitigar en parte la erosión en los suelos debido a las propiedades de la *J. curcas*.



(a)



(b)

Figura 3.6. Diagramas de causa efecto de implicaciones ambientales. a) Por labores de desmonte. b) Por labores de operación de la plantación.

El desarrollo de los impactos ambientales se muestra en la tabla 3.9.

Tabla 3.9. Variables causantes e impactos ambientales asociados a la producción de biodiesel de *J. curcas* en el tiempo (años).

Variables causantes e impactos ambientales ( <i>X</i> )	<i>n</i> = 0		<i>n</i> = 1		<i>n</i> = 2		<i>n</i> = 3		<i>n</i> = 4		<i>n</i> = 5		<i>n</i> = 6
	$X_0$	$\Delta X_{0,1}$	$X_1$	$\Delta X_{1,2}$	$X_2$	$\Delta X_{2,3}$	$X_3$	$\Delta X_{3,4}$	$X_4$	$\Delta X_{4,5}$	$X_5$	$\Delta X_{5,6}$	$X_6$
Desmonte <sup>a</sup>	0	1	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Corte <sup>a</sup>	0	1	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Quema <sup>a</sup>	0	1	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Aplic. de herbicidas <sup>a</sup>	0	1	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Prep. mecánica del suelo <sup>a</sup>	0	1	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pérdida de la biota <sup>b</sup>	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
Cont. Cadena trófica <sup>b</sup>	0	1	1	2	3	2	5	2	7	2	9	2	11
Mort. De vegetación <sup>b</sup>	0	2	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2
Pérdida de vegetación <sup>b</sup>	0	2	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2
Escorrentía <sup>b</sup>	0	2	2	0	2	0	2	0	2	0	2	0	2
Erosión <sup>b</sup>	0	3	3	-1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Operación de la plantación <sup>a</sup>	0	0	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1
Aplic. de fertilizantes <sup>a</sup>	0	0	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1
Aplic. de pesticidas <sup>a</sup>	0	0	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1
Incremento número de trabajadores <sup>a</sup>	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
Poda y cosecha <sup>b</sup>	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
Eutrofización <sup>b</sup>	0	0	0	1	1	1	2	1	3	1	4	1	5
Uso del agua <sup>b</sup>	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
Cont. Agua y del suelo <sup>b</sup>	0	1	1	2	3	2	5	2	7	2	9	2	11

Datos de: [70].

<sup>a</sup> Variable causante de impacto ambientales.

<sup>b</sup> Impacto ambiental.

La figura 3.7 muestra la tendencia de los impactos ambientales en el tiempo. Se espera que la pérdida y la mortalidad de la vegetación sean proporcionales entre sí e incrementen durante el transcurso del año 0 a 1 debido a las labores de desmonte, lo que conlleva a un aumento en el índice de escorrentía. Una vez finalizadas las labores de desmonte, la escorrentía, la pérdida y mortalidad de la vegetación cesan su incremento y permanecen constantes en el tiempo a menos que se realizan labores de mitigación. Se espera que la erosión se incremente durante el transcurso del año 0 a 1 debido al desmonte; sin embargo, al iniciar la operación de la plantación, este efecto sería mitigado debido a las propiedades de la *J. curcas*. La eutrofización, la contaminación en la cadena trófica, en el agua y el suelo son los impactos ambientales que incrementan en el tiempo y requerirían mayores labores de mitigación y control.

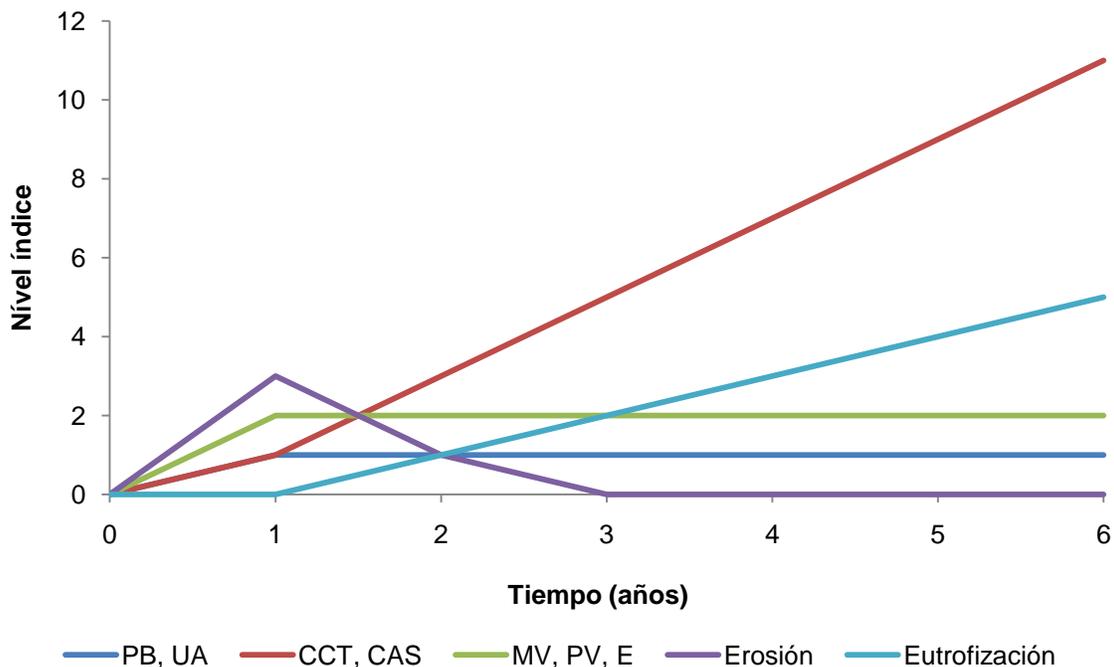


Figura 3.7. Tendencia de los impactos ambientales en el tiempo. PB, Pérdida de la biota, UA, Uso el agua, CCT, Contaminación de la cadena trófica, CAS, Contaminación del agua y el suelo, MV, Mortalidad de la vegetación, PV, Pérdida de la vegetación, E, Escorrentía.

### 3.6 Evaluación económica

Los precios del biodiesel, la glicerina, la torta de la *J. curcas* y los pellets, así como los ajustes por inflación, se muestran en el anexo A. La tabla 3.10 muestra los ingresos y egresos para cada uno de los escenarios planteados. El biodiesel, la glicerina, la torta de la *J. curcas* y los pellets representan el 76, 0.7, 4.7 y 18.6% de los ingresos totales, respectivamente. La producción de biodiesel de *J. curcas* no produce los ingresos suficientes para cubrir los egresos, sólo hasta el año 20 de operación esta relación se revierte debido al valor de salvamento del proyecto, es decir, a la venta de la superficie de siembra de *J. curcas* y la maquinaria industrial. Esta situación hace que el valor presente neto sea negativo, es decir, la producción de biodiesel de *J. curcas* resulte no viable en términos económicos.

Tabla 3.10. Ingresos y egresos de la producción de biodiesel de *J. curcas*\*.

<i>n</i>	Escenario B5			Escenario B10		
	Ingresos ( $Ig_n$ )	Egresos ( $Eg_n$ )	Flujos de efectivo <sup>a</sup>	Ingresos ( $Ig_n$ )	Egresos ( $Eg_n$ )	Flujos de efectivo <sup>a</sup>
1	\$ -	\$820,018,268	\$(820,018,268)	\$ -	\$1,640,036,536	\$(1,640,036,536)
2	\$ -	\$875,404,120	\$(875,404,120)	\$ -	\$1,742,201,880	\$(1,742,201,880)
3	\$170,161,710	\$854,756,046	\$(684,594,336)	\$ 340,323,420	\$1,705,782,742	\$(1,365,459,322)
4	\$340,323,420	\$878,078,777	\$(537,755,358)	\$ 680,646,840	\$1,753,339,199	\$(1,072,692,360)
5	\$510,485,130	\$901,401,508	\$(390,916,379)	\$1,020,970,260	\$1,800,895,656	\$(779,925,397)
6 - 19	\$510,485,130	\$895,125,289	\$(384,640,159)	\$1,020,970,260	\$1,788,343,217	\$(767,372,957)
20	\$1,025,316,668	\$895,125,289	\$130,191,379	\$2,049,772,699	\$1,788,343,217	\$ 261,429,482
<i>VPN</i> <sup>b</sup>	\$ (10,995,077,748)			\$ (21,944,853,165)		

<sup>a</sup> Definido como la diferencia entre los ingresos y los egresos.

<sup>b</sup> La tasa de aceptación *r* es del 4.23%, correspondiente a los bonos CETES 28 días del Banco de México al 4 de Diciembre de 2012.

\* Datos en MXN. Los valores entre paréntesis son negativos.

El costo de producción del biodiesel de *J. curcas*, para cada escenario y en un período estable (año 6-20), se muestra en la tabla 3.11. Éste costo resulta ser aproximadamente el doble del costo del diesel, un resultado similar al reportado en [78]. El costo de producción de los pellets de cáscaras de *J. curcas* es de \$145.04 MXN por tonelada y de \$125.59 MXN por tonelada para los escenarios B5 y B10, respectivamente. La glicerina y la torta de la *J. curcas* no requieren de un proceso de transformación, por tanto, no se les asigna ninguna fracción de los costos.

Tabla 3.11. Costos de producción de biodiesel en un período estable\*

Parámetro	Escenario B5		Escenario B10	
	Costo (\$·m <sup>-3</sup> )	Participación <sup>a</sup>	Costo (\$·m <sup>-3</sup> )	Participación <sup>a</sup>
Mano de obra (fase agrícola)	\$ 15,926.90	64.21%	\$ 15,926.90	64.22%
Pesticidas	\$ 4,048.60	16.32%	\$ 4,048.60	16.33%
Fertilizantes	\$ 2,871.09	11.58%	\$ 2,871.09	11.58%
Metanol y KOH	\$ 1,416.86	5.71%	\$ 1,416.86	5.71%
Energía eléctrica	\$ 282.25	1.14%	\$ 282.25	1.14%
Transporte	\$ 91.91	0.37%	\$ 129.99	0.52%
Depreciación	\$ 82.49	0.33%	\$ 76.12	0.31%
Mano de obra (fase industrial)	\$ 68.04	0.27%	\$ 34.02	0.14%
Mantenimiento	\$ 14.84	0.06%	\$ 13.69	0.06%
Costo total sin aportes	\$ 24,802.98	100%	\$ 24,799.51	100%
Aporte por venta de glicerina	\$ 98.54	0.40%	\$ 98.54	0.40%
Aporte por venta de torta de <i>J. curcas</i>	\$ 674.01	2.72%	\$ 674.01	2.72%
Aporte por venta de pellets	\$ 2,450.07	9.88%	\$ 2,479.84	10.00%
Costo total con aportes	\$ 21,580.35	87.01%	\$ 21,547.11	86.89%

<sup>a</sup> Sobre los costos totales sin aportes.

\* Datos en MXN.

Los mayores rubros de costo resultan ser los implícitos en la mano de obra agrícola, pesticidas y fertilizantes, un resultado similar al reportado por [12]. Los únicos costos que se reducen a medida que la producción aumenta son los correspondientes a la depreciación y al mantenimiento de la maquinaria, así como de la mano de obra industrial.

La figura 3.8 muestra la relación entre los costos de biodiesel y su producción. Cuando ésta es inferior a los 833 m<sup>3</sup>·año<sup>-1</sup>, la producción de pellets resulta en pérdidas y, por tanto, en lugar de disminuir los costos del biodiesel, los aumenta. Cuando la producción es mayor a los 8,500 m<sup>3</sup>·año<sup>-1</sup>, los costos prácticamente se mantienen constantes entre \$21,400 - \$22,000 MXN por metro cúbico.

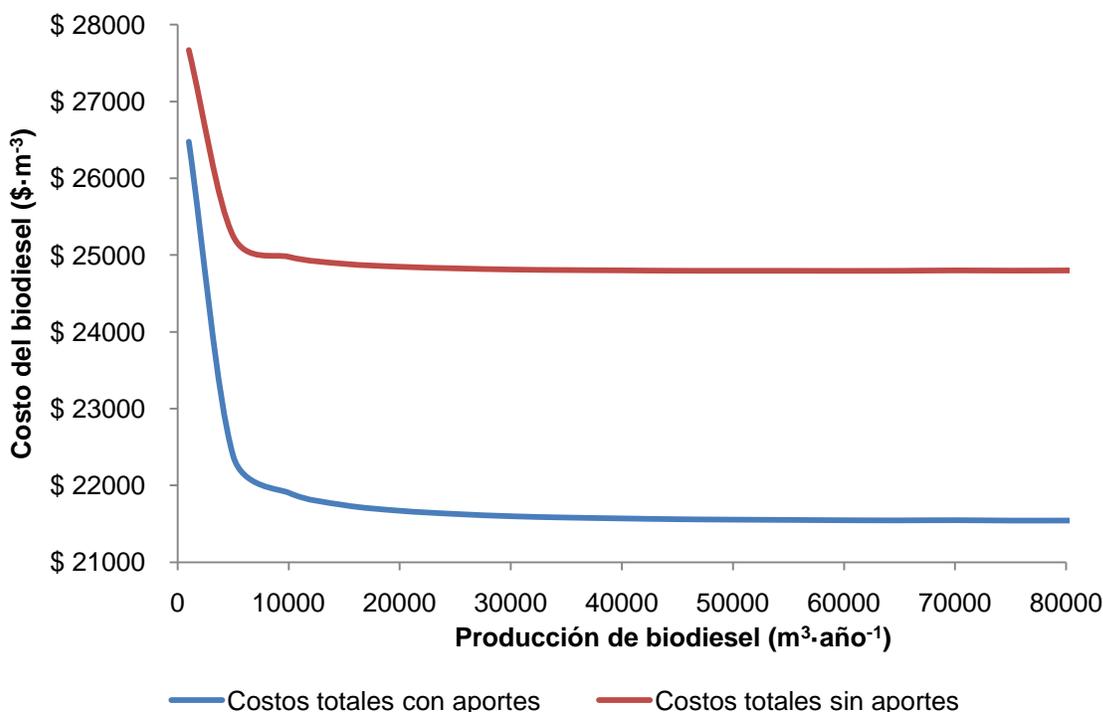


Figura 3.8. Relación entre los costos de biodiesel y la capacidad de producción.

Por más grande que sea la producción, los costos del biodiesel, con aportes y sin aportes, no llegan a ser inferiores a \$21,400 MXN y \$24,800 MXN por metro cúbico, respectivamente (figura 3.8). De hecho, cuando la producción de biodiesel es de 69,300 – 69,310 m<sup>3</sup>·año<sup>-1</sup>, los costos alcanzan un valor mínimo en \$21,541 MXN por metro cúbico. Cuando la producción aumenta por encima de los 69,310 m<sup>3</sup>·año<sup>-1</sup>, los costos de producción empiezan a incrementarse, lo cual se debe a que los costos de depreciación y mantenimiento de la máquina de prensado aumentan, en lugar de disminuir. Lo anterior podría deberse a que la maquinaria de prensado debe contar con una capacidad de producción mayor cuando la producción de biodiesel aumenta por encima de los 69,310 m<sup>3</sup>·año<sup>-1</sup>.

La relación entre el valor presente neto *VPN* y la producción de biodiesel es lineal, tal y como se muestra en la figura 3.9. Esto se debe a que las inversiones de la fase agrícola con respecto a la producción tienen el mismo comportamiento y representan el 97.69% de las inversiones totales. De acuerdo con el modelo generado en la figura 3.9, por más pequeña que sea la producción de biodiesel, el valor máximo esperado del *VPN* es de \$(92.75) millones de MXN.

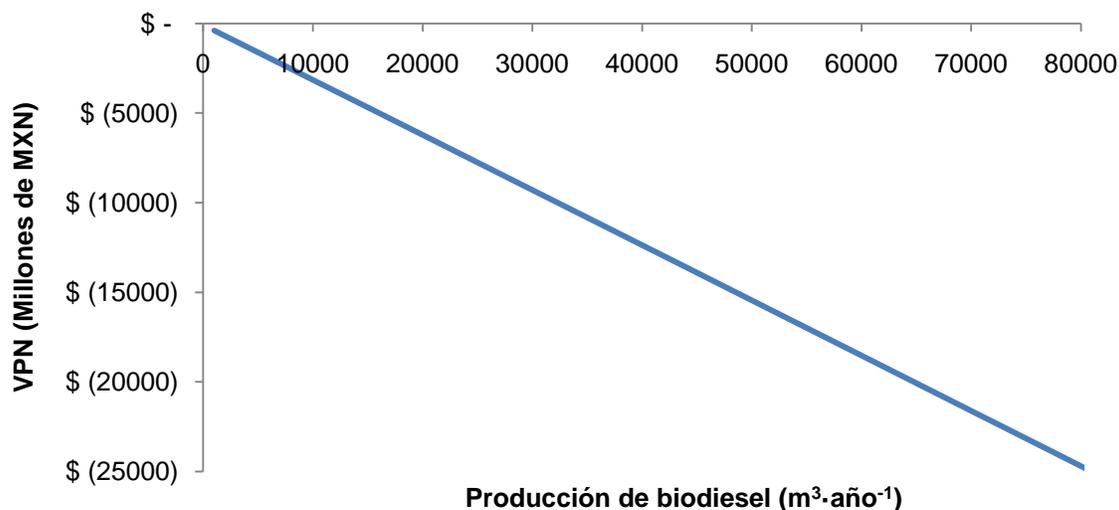


Figura 3.9. Relación entre la producción de biodiesel y el *VPN* (los valores entre paréntesis son negativos).

Todo parece indicar que, bajo los supuestos del presente trabajo, no existe una producción en la cual se alcancen costos lo suficientemente competitivos para que el biodiesel de *J. curcas* sea económicamente viable. De hecho, al aumentar la producción, el sistema tenderá a alejarse de una viabilidad, ya que no hay un beneficio en la productividad de la fase agrícola (ni industrial) que permita una reducción de costos. Aparentemente, las únicas ventajas que se obtienen al intentar escalar el sistema de producción es una reducción en los costos de mano de obra de la fase industrial así como en los costos de depreciación de la maquinaria; sin embargo estos rubros de costo no resultan ser significativos con respecto a los costos totales de producción. De esta manera, es posible rechazar la hipótesis planteada para el presente trabajo.

La figura 3.10 muestra la productividad mínima de semillas de *J. curcas* requerida para una de producción de biodiesel determinada. Las líneas P<sub>MIN</sub> Costo y P<sub>MIN</sub> VPN,

representan la productividad mínima de semillas requerida para que el costo del biodiesel (con aportes) se iguale al costo del diesel (\$10,920.29 MXN por metro cúbico) y para que el *VPN* sea cero, respectivamente, bajo una producción determinada del biocombustible.

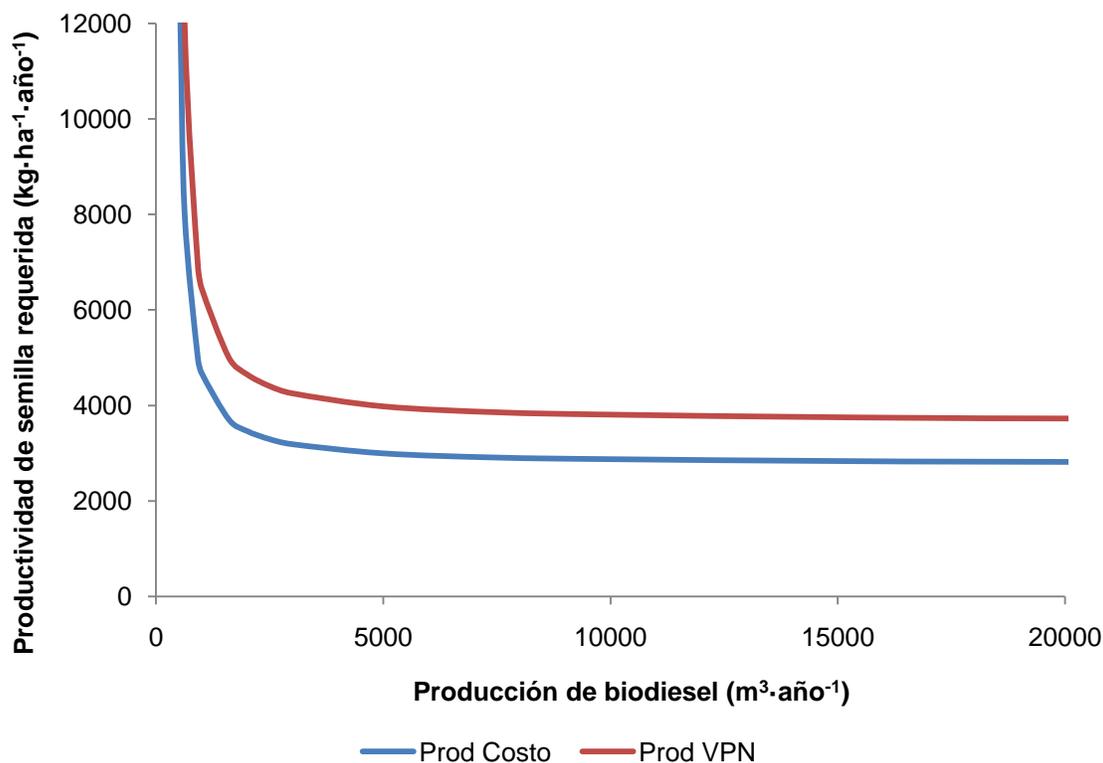


Figura 3.10. Productividad mínima de semilla de *J. curcas* requerida en función de la producción de biodiesel.

Para una productividad máxima de  $12 \text{ ton}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$  (reportada en la bibliografía consultada [7]), la producción mínima de biodiesel de *J. curcas* debe ser de  $534 \text{ m}^3\cdot\text{año}^{-1}$  para que el costo del biodiesel se equipare al precio del diesel Pemex, si se desea alcanzar una viabilidad económica (el *VPN* sea mayor a cero) dicha producción debe ser mayor a  $626 \text{ m}^3\cdot\text{año}^{-1}$ . De acuerdo con la figura 3.10, sólo cuando la productividad de semillas es superior a  $2800 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ , es posible lograr que los costos de producción de biodiesel de *J. curcas* se igualen (o incluso, sean inferiores) al precio del diesel Pemex. Este resultado es útil si se pretenden realizar inversiones públicas futuras para la producción de biodiesel de *J. curcas* si la intención es hacer que el costo del biocombustible sea, al menos, competitivo con el precio del diesel y no se esperen

ganancias; sin embargo, si el fin es alcanzar una viabilidad económica plena, la productividad mínima de semillas de *J. curcas* debería ser superior a  $3700 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ .

### 3.7 Variaciones por uso de la torta de *Jatropha curcas* para el autoconsumo como fertilizante

La torta de la *J. curcas* podría ser empleada en el sistema como fertilizante para sustituir cierta cantidad de nutrientes comerciales (autoconsumo). Lo anterior requeriría la adquisición de un mayor número de camiones debido a que se requeriría transportar la torta de la planta industrial hacia las plantaciones de *J. curcas*. La ecuación 24 cambiaría ligeramente a:

$$n_{c-e} = \frac{P_f \cdot A_p + P_{t-e}}{C_{cc} \cdot n_v} \quad (60)$$

Teniendo en cuenta que el que el contenido de nitrógeno, fósforo y potasio de la torta de la *J. curcas* es del 6, 3 y 1% respectivamente, se estima que la máxima cantidad obtenida de éste subproducto  $P_{t-e}$  es suficiente para disminuir la cantidad agregada de fertilizantes químicos hasta en un 27%, es decir, a partir del año 5 (tabla 3.12). De acuerdo con los escenarios planteados, no hay aporte de torta de *J. curcas* en los años 1 y 2 debido a que en dichos períodos no hay producción de frutos. En los años 3 y 4, el aporte reduciría la cantidad agregada de fertilizantes en un 9 y en un 18%, respectivamente.

Como resultado de las estimaciones se obtuvo que los costos por uso de fertilizantes se reducen en la misma proporción de sustitución asumiendo que el contenido de nitrógeno, fósforo y potasio de la *J. curcas* puede ser aprovechado en su totalidad.

Tabla 3.12. Cantidad requerida de fertilizantes con aportes de la torta de *J. curcas*.

Fertilizante	Variable	Dosis requerida <sup>a</sup>	Aporte de torta de <i>J. curcas</i>	Fertilizante requerido
Sulfato de amonio [kg·ha <sup>-1</sup> ·año <sup>-1</sup> ]	$d_{fert-N}$	250	67,72	182,28
Superfosfato [kg·ha <sup>-1</sup> ·año <sup>-1</sup> ]	$d_{fert-P}$	100	33,86	66,14
Cloruro de potasio [kg·ha <sup>-1</sup> ·año <sup>-1</sup> ]	$d_{fert-K}$	67	11,29	55,71
Cantidad agregada de fertilizante [kg·ha <sup>-1</sup> ·año <sup>-1</sup> ]	—	417	112.87	304.13

<sup>a</sup> Dato proporcionado por la empresa KUOSOL S.A. de C.V., comunicación personal.

<sup>b</sup> Este aporte se presenta a partir del año 5, en los años 1 y 2 no hay aportes y, en los años 3 y 4, dicho aporte es de  $\frac{1}{3}$  y  $\frac{2}{3}$  de los aportes en el año 5, respectivamente.

La tabla 3.13 muestra los resultados energéticos, de emisiones de gases de efecto invernadero y económicos de la producción de biodiesel de *J. curcas* cuando se emplea la torta residual para el autoconsumo como fertilizante. En este enfoque, el sistema aporta un 3.36% más energía, reduce sus emisiones en un 12.5%, aumenta su valor presente neto en un 0.35% y reduciría el costo del biodiesel en un 0.17 - 0.26%.

Tabla 3.13. Resultados energéticos, emisión de gases invernadero y económicos al aprovechar la torta residual de la *J. curcas* para el autoconsumo como fertilizante.

Parámetro	Escenario B5	Escenario B10
<b>REN</b>	1.23	1.23
<b>FEGEI</b> [g CO <sub>2eq</sub> ·MJ <sup>-1</sup> ]	58.89	60.12
<b>VPN</b> [\$]*	\$(10,957,167,517)	\$(21,893,948,735)
Costo de producción del biodiesel [\$·m <sup>-3</sup> ]*	\$ 21,525.79	\$ 21,512.68

\* Datos en MXN. Los valores entre paréntesis son negativos.

Aunque al aprovechar la torta de la *J. curcas* para el autoconsumo como fertilizante se pueden obtener mejores resultados que al venderla, surgen ciertas limitaciones técnicas para este nuevo enfoque, los cuales se indican a continuación:

- La producción de frutos en la fase agrícola del proceso es por lotes, es decir, se produce una gran cantidad de biomasa la cual es recolectada y transportada en un tiempo relativamente corto (tiempo de cosecha). En contraste, la producción de torta residual es continua y, por ende, debe almacenarse. En almacén, dicha torta puede ser susceptible al ataque de plagas, hongos y/o patógenos que, al ser transportados a las plantaciones, afectarían a la *J. curcas* reduciendo su productividad de semilla.
- La cantidad másica de la mezcla de fertilizantes químicos y la torta de *J. curcas* es mucho mayor que si sólo se empleasen fertilizantes químicos. Además del aporte de nitrógeno, fósforo y potasio, la torta de la *J. curcas* contiene proteínas y carbohidratos que podrían incrementar los índices de contaminación de la cadena trófica, eutrofización y contaminación en el agua y el suelo a un ritmo mayor del mostrado en la figura 3.7.
- El contenido de aceite no recuperado en el proceso de prensado queda contenido en la torta de *J. curcas* y podría disminuir la permeabilidad del suelo.

## CONCLUSIONES

Bajo las condiciones locales analizadas en el presente trabajo, Yucatán cuenta teóricamente con suficiente superficie (tipo cambisol crómico) como para reemplazar su consumo actual (2010) de diesel por biodiesel de *J. curcas* en un 10.68%, por tanto, las mezclas B5 y B10 son posibles.

El sistema de producción de biodiesel de *J. curcas* puede aportar un 19% más energía de la que consume, si se tiene en cuenta el contenido energético de los subproductos derivados del proceso. Esta tasa no cambia con el volumen de producción; sin embargo, sí lo hace con respecto a la productividad de semillas. Si dicha productividad es inferior a  $1.22 \text{ ton}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ , el sistema no resulta energéticamente factible. Cuando dicha productividad es mayor a  $2.6 \text{ ton}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ , el sistema no depende de los subproductos para alcanzar una viabilidad energética.

Las emisiones de gases de efecto invernadero provocadas por la obtención de energía de la producción de biodiesel de *J. curcas* son inferiores a las inducidas por la obtención de energía del diesel. Al aumentar la producción, las emisiones aumentan y, por más pequeña que sea la producción, dichas emisiones no serán inferiores a  $64.8 \text{ g CO}_{2\text{eq}}\cdot\text{MJ}^{-1}$ . Esta situación cambia si se tiene en cuenta las emisiones provocadas por el cambio en el uso del suelo ya que, de ser así, la producción de biodiesel de *J. curcas* resulta en una fuente de emisión, más que de mitigación, de gases de efecto invernadero. Otros impactos ambientales asociados que requerirían controlarse son: la contaminación de la cadena trófica, la contaminación del agua y el suelo y la eutrofización.

La producción de biodiesel no resulta económicamente viable debido a altos costos incurridos en la mano de obra para la fase industrial, los cuales representan un 64% de los costos totales. Los costos no se reducen al mismo ritmo con el que se incrementa la producción de biodiesel, de hecho, tienden a ser constantes entre \$21,400 - \$22,000 MXN por metro cúbico cuando la producción es mayor a los  $8,500 \text{ m}^3\cdot\text{año}^{-1}$ . La fase agrícola representa el 92% de los costos totales y el 97% de las inversiones totales. Asimismo, no hay una ventaja en la productividad de la *J. curcas* al aumentar el área de siembra, por tanto, la fase agrícola del proceso de producción de biodiesel es la que dificulta la viabilidad económica del sistema. De esta manera, la hipótesis del presente trabajo es

rechazada, ya que no hay un nivel de producción de biodiesel que presente una viabilidad económica para el biocombustible.

Bajo los supuestos y escenarios evaluados en el presente trabajo de investigación, sólo productividades de semilla de *J. curcas* mayores a  $2800 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$  permitirían que el costo del biocombustible se equipare al precio del diesel. Y sólo productividades de semilla mayores a  $3700 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$  presentarán una viabilidad económica bajo el enfoque de sistema integrado.

## PERSPECTIVAS

La mano de obra agrícola para las plantaciones de *Jatropha curcas* es aquel rubro que representa los mayores costos de producción (tabla 3.11) debido a que no es posible mecanizar los procesos implícitos en la recolección de los frutos. Esta operación en particular es intensiva ya que la maduración de los frutos no es homogénea y, por tanto, tampoco lo es su recolección [5, 12, 42]. Una sugerencia para reducir los costos de mano de obra agrícola es realizar colectas masivas de frutos independientemente de su estado de maduración para, posteriormente, someterlos a una cámara de maduración artificial. Esto requeriría de estudios de investigación que revelen si es posible incentivar la maduración de los frutos de *J. curcas* en forma artificial; así como los cambios provocados en el contenido de aceite en sus semillas. Suponiendo que es así, se esperaría que, al implementar este posible nuevo método de recolección de frutos, se reduzca la productividad de aceite por hectárea ya que el crecimiento de los frutos, al igual que su maduración, tampoco es homogéneo (los frutos que no hayan crecido lo suficiente, producirían menos cantidad de aceite); sin embargo, puede que el ahorro en los costos sea lo suficientemente relevante para justificar dichas pérdidas en la productividad de aceite.

La fase agrícola del proceso de producción de biodiesel es aquella que implica un mayor consumo de recursos y energía así como la que acapara la mayor parte de los costos e inversiones. Las implicaciones ambientales debido al uso de fertilizantes, pesticidas y cambio en el uso del suelo deberían ser justificables si el fin es el cultivo de alimentos. La producción de biodiesel debería prescindir de una fase agrícola, y enfocarse en la recolección y transformación de aceites residuales de industria de comida rápida, hoteles, restaurantes, etc. (previniendo que éstos contaminen los recursos hídricos) usando únicamente el aceite vegetal comestible cuando proviene de un superávit de producción. De esta manera, las investigaciones futuras en torno a la producción de biodiesel deberían enfocarse a mejorar el proceso de reutilización y pre tratamiento del aceite de cocina usado. Puede que al someter el aceite de cocina usado directamente a la reacción de transesterificación bajo condiciones supercríticas de temperatura y presión no se requiera de un pre tratamiento.

Algunas alternativas para que la producción de biodiesel de *J. curcas* presente mejores resultados económicos incluyen: el mejoramiento genético de la planta enfocándose en incrementar su productividad de semilla, la posible introducción de policultivos que permitan un mayor aprovechamiento del área de siembra y la integración de la torta residual de la *J. curcas* al proceso de pelletizado.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] A. Benavides; P. Benjumea; V. Pashova, El biodiesel de aceite de higuera como combustible alternativo para motores diesel, *Dyna* 74, 141-150, 2007.
- [2] C. Cardona, Perspectivas de la producción de biocombustibles en Colombia: contextos latinoamericano y mundial, *Revista de Ingeniería* 29, 109-120, 2009.
- [3] F. Ma; M Hanna, Biodiesel production: a review, *Bioresource Technology* 70, 1-15, 1999.
- [4] A. Demirbas, Political, economic and environmental impacts of biofuels: A review, *Applied Energy* 86, 108-117, 2009.
- [5] Z. Wang, M. Calderon; Y. Lu; S. Li, *Producing biodiesel from Jatropha curcas L. in Yunnan, China: Life-cycle environmental, economic and energy performance*, Economy and Environment Program for Southeast Asia, South Bridge Court, 2010, 1-5; 11-17; 26-31. Disponible en: [http://web.idrc.ca/uploads/user-S/12759619121Wang\\_Zanxin\\_2009-RR12.pdf](http://web.idrc.ca/uploads/user-S/12759619121Wang_Zanxin_2009-RR12.pdf) [Accedido Enero 2012].
- [6] A. A. Apostolakou; I. K. Kookos; C. Marazioti; K.C. Angelopoulos, Techno-economic analysis of a biodiesel production process from vegetable oils, *Fuel Processing Technology* 90, 1023-1031, 2009.
- [7] V. Pandey; K. Singh; J. Singh; A. Kumar; B. Singh; R. Singh, *Jatropha curcas*: A potential biofuel plant for sustainable environmental development, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16, 2870-2883, 2012.
- [8] N. Contran; L. Chessa; M. Lubino; D. Bellavite; P. P. Roggero; G. Enne, State-of-the-art of the *Jatropha curcas* productive chain: From sowing to biodiesel and by-products, *Industrial Crops and Products* 42, 202-215, 2013.
- [9] M. Y. Koh; T. I. Mohd, A review of biodiesel production from *Jatropha curcas L.* oil, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15, 2240-2251, 2011.

- [10] S. Jain; M.P. Sharma, Biodiesel production from *Jatropha curcas* oil, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14, 3140-3147, 2010.
- [11] A. Chhetri A; M. Tango; S. Budge; K. Watts; M. Islam, Non-Edible plant oils as new sources for biodiesel production, *International Journal of Molecular Science* 9, 169-180, 2008.
- [12] Z. Wang; M. Calderon; Y. Lu, Lifecycle assessment of the economic, environmental and energy performance of *Jatropha curcas* L. biodiesel in China, *Biomass and Bioenergy* 35, 2893-2902, 2011.
- [13] P. Shinoj; S.S. Raju; P. Kumar; S. Msangi; P. Yadav; V. S. Thorat; K.R. Chaudhary, An economic assessment along the *Jatropha*-based biodiesel value chain in India, *Agricultural Economics Research Review* 23, 393-404, 2010.
- [14] S. R. Tewfik; S. I. Hawash; N. K. Atteya; G. I. El Diwani; I. H. Farag, Techno-economic appraisal of biodiesel from *Jatropha curcas*: An Egyptian case study, *Journal of Agricultural Science and Technology* 2, 287-297, 2012.
- [15] J. A. Quintero; E. R. Felix; L. E. Rincón; M. Crisspín; J. F. Baca; Y. Khwaja; C. A. Cardona, Social and techno-economical analysis of biodiesel production in Peru, *Energy Policy* 43, 427-435, 2012.
- [16] M. Camps; F. Marcos en *Los biocombustibles*, Mundi-Prensa Ed.; Madrid, 2008; Vol. 2, 251-253; 313-321.
- [17] D. Lestari, Non-food applications of *Jatropha* proteins, PhD Tesis, Wageningen University, Netherlands, 2012.
- [18] Secretaria de energía, Sistema de información energética. Disponible en: Información estadística, <http://sie.energia.gob.mx/sie/bdiController>, 2011 [Accedido Marzo 2011].
- [19] Petróleos Mexicanos, Productos. Disponible en: <http://www.pemex.com/index.cfm?action=content&sectionid=4&catid=10015>, 2011 [Accedido Noviembre 2011].

- [20] Instituto federal de acceso a la información y protección de datos. Disponible en: Infomex, <https://www.infomex.org.mx/gobiernofederal/home.action>, 2007 [Accedido 2011].
- [21] Diario oficial de la Federación (DOF). Ley de promoción y desarrollo de los bioenergéticos; 2008. DOF. Publicada en Febrero 1, 2008. Disponible en: [http://www.energia.gob.mx/webSener/res/Acerca\\_de/SENER01022008.pdf](http://www.energia.gob.mx/webSener/res/Acerca_de/SENER01022008.pdf) [Accedido Agosto 2012].
- [22] J. V. Gerpen, Biodiesel processing and production, Fuel Processing Technology 86, 1097-1107, 2005.
- [23] I. Lozada; J. Islas; G. Grande, Environmental and economic feasibility of palm oil biodiesel in the Mexican transportation sector, Renewable and Sustainable Energy Reviews 14, 486-492, 2010.
- [24] Secretaria de Energía, Potenciales y viabilidad del uso de bioetanol y biodiesel para el transporte en México. Disponible en: [http://www.sener.gob.mx/res/169/Biocombustibles\\_en\\_Mexico\\_Resumen\\_Ejecutivo.pdf](http://www.sener.gob.mx/res/169/Biocombustibles_en_Mexico_Resumen_Ejecutivo.pdf), 2006 [Accedido Enero 2012].
- [25] S. Majer; F. Muller-Langer; V. Zeller; M. Kaltschmitt, Implications of biodiesel production and utilisation on global climate – A literature review, European Journal of Lipid Science and Technology 111, 747-762, 2009.
- [26] O. Xunmin; Z. Xiliang; C. Shiyan; G. Qingfang, Energy consumption and GHG emissions of six biofuel pathways by LCA in (the) People’s Republic of China, Applied Energy 86, 197-208, 2009.
- [27] S. Pleanjai; S. H. Gheewala, Full chain energy analysis of biodiesel production from palm oil in Thailand, Applied Energy 86, 209-214, 2009.
- [28] H. Jian; P. Zhang; X. Yuan; Y. Zheng, Life cycle assessment of biodiesel from soybean, jatropha and microalgae in China conditions, Renewable and Sustainable Energy Reviews 15, 5081-5091, 2011.

- [29] K. Prueksakorn; S. H. Gheewala; P. Malakul; S. Bonnet, Energy analysis of *Jatropha* plantation systems for biodiesel production in Thailand, *Energy for Sustainable Development* 14, 1-5, 2010.
- [30] X. Deng; J. Han; F. Yin, Net energy, CO<sub>2</sub> emission and land-based cost-benefit analyses of *Jatropha* Biodiesel: A Case Study of the Panzhihua Region of Sichuan Province in China, *Energies* 5, 2150-2164, 2012.
- [31] K. Prueksakorn; S. H. Gheewala, Full chain energy analysis of biodiesel from *Jatropha curcas* L., The Joint Graduate School of Energy and Environment, 2008.
- [32] L. Tao; A. Aden, The economics of current and future biofuels, *In Vitro Cellular & Developmental Biology – Plant* 45, 199-217, 2009.
- [33] Y. Zhang; M. A. Dubé; D.D. McLean; M. Kates, Biodiesel production from waste cooking oil: 2. Economic assessment and sensitivity analysis, *Bioresource Technology* 90, 229-240, 2003.
- [34] M. Canackci, The potential of restaurant waste lipids as biodiesel feedstocks, *Bioresource Technology* 98, 183-190, 2007.
- [35] A. B. Chhetri; K. C. Watts; M. R. Islam, Waste cooking oil as an alternate feedstock for biodiesel production, *Energies* 1, 3-18, 2008.
- [36] M. Bender, Economic feasibility review for community-scale farmer cooperatives for biodiesel, *Bioresource Technology* 70, 81-87, 1999.
- [37] M. J. Hass; A. J. McAloon; W. C. Yee; T. A. Foglia, A process model to estimate biodiesel production costs, *Bioresource Technology* 97, 671-678, 2006.
- [38] S. R. Fore; W. Lazarus; P. Porter; N. Jordan, Economics of small-scale on-farm use of canola and soybean for biodiesel and straight vegetable oil biofuels, *Biomass and Bioenergy* 35, 193-202, 2011.
- [39] P. Biswas; S. Pohit; R. Kumar, Biodiesel from *jatropha*: Can India meet the 20% blending target?, *Energy Policy* 38, 1477-1484, 2010.

- [40] M. Hasheminejad; M. Tabatabaei; Y. Mansourpanah; M. Khatami; A. Javani, Upstream and downstream strategies to economize biodiesel production, *Bioresource Technology* 102, 461-468, 2011.
- [41] P. Abhilash; P. Srivastava; S. Jamil; N. Singh, Revisited *Jatropha curcas* as an oil plant of multiple benefits: critical research needs and prospects for the future, *Environmental Science & Pollution Research* 18, 127-131, 2011.
- [42] Fuels from Agriculture in Communal Technology, *Manual de Jatropha*, FACT Foundation, Eindhoven, 2009, 10-16; 43-55; 121-124. Disponible en: [http://www.fact-foundation.com/en/Knowledge\\_and\\_Expertise/Handbooks](http://www.fact-foundation.com/en/Knowledge_and_Expertise/Handbooks), 2009 [Accedido Marzo 2011].
- [43] R. R. Sánchez en *Producción de oleaginosas y textiles*; Limusa, Ed.; México D.F., 1980; Vol. 1, 403; 588.
- [44] K. Openshaw, A review of *Jatropha curcas*: an oil plant of unfulfilled promise, *Biomass and Bioenergy* 19, 1-15, 2000.
- [45] D. Ragajopal; D. Zilberman. Review of Environmental, Economic and Policy Aspects of Biofuels. Policy Research Working Paper No. 4341. Disponible en: <http://ssrn.com/abstract=1012473>, 2007 [Accedido Junio 2012].
- [46] A. King; W. He; J. Cuevas; M. Freudenberger; D. Ramiaramanana; I. Graham, Potential of *Jatropha curcas* as a source of renewable oil and animal feed, *Journal of Experimental Botany* 60, 2897-2905, 2009.
- [47] H. Martinez; A. Martinez; H. Makkar; G. Francis; K. Becker, Agroclimatic conditions, chemical and nutritional characterization of different provenances of *Jatropha Curcas* L. from Mexico, *European Journal of Scientific Research* 39, 396-407, 2010.
- [48] C.A. Núñez-Colín; M. A. Goytia-Jiménez, Distribution and agroclimatic characterization of potential cultivation regions of physic nut in Mexico, *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 44, 1078-1085, 2009.

- [49] R. Jingura, Technical options for optimization of production of *Jatropha* as a biofuel feedstock in arid and semi-arid areas of Zimbabwe, *Biomass and Bioenergy* 35, 2127-2132, 2011.
- [50] G.M. Gubitz; M. Mittelbach; M. Trabi, Exploitation of the tropical oil seed plant *Jatropha curcas* L., *Bioresource Technology* 67, 73-82, 1999.
- [51] Teniente O. R., L. M. Tapia V., A. González A., A. Zamarripa C., J. L. Solís B., B. Martínez V., M. Hernández M. Guía técnica para la producción de piñón mexicano (*Jatropha curcas* L.) en Michoacán. Folleto Técnico No. 2 SAGARPA. INIFAP-CIRPAC Campo Experimental Valle de Apatzingán. Apatzingán, Michoacán, México 52 p.
- [52] Secretaria de agricultura, ganadería, desarrollo rural, pesca y alimentación (SAGARPA), Bioenergéticos. Disponible en: Producción de biodiesel de a partir de la *Jatropha* <http://www.bioenergeticos.gob.mx/index.php/biodiesel/produccion-a-partir-de-jatropha.html>, 2011 [Accedido Enero 2012].
- [53] A. Kumar; S. Sharma, An evaluation of multipurpose oil seed crop for industrial uses (*Jatropha curcas* L.): A review, *Industrial Crops and Products* 28, 1-10, 2008.
- [54] D. Lestari; W. J. Mulder; J. P. Sanders, *Jatropha* seed protein functional properties for technical applications, *Biochemical Engineering Journal* 53, 297-304, 2011.
- [55] D. Lestari; W. Mulder; J. Sanders, Improving *Jatropha curcas* seed protein recovery by using counter current multistage extraction, *Biochemical Engineering Journal* 50, 16-23, 2010.
- [56] C. Wang; J. Yan, Feasibility analysis of wood pellets production and utilisation in China as a substitute for coal, *International Journal of Green Energy* 2, 91-107, 2005.
- [57] S. Mani; S. Sokhansanj; X. Bi; A. Turhollow, Economics of producing fuel pellets from biomass, *Applied Engineering in Agriculture* 22, 421-426, 2006.
- [58] D. Nilsson; S. Bernesson; P.A. Hansson, Pellet production from agricultural raw materials – A systems study, *Biomass and bioenergy* 35, 679-689, 2011.

- [59] K. Campbell, *A feasibility study guide for an agricultural biomass pellet company*, Agricultural Utilisation Research Institute, St. Paul, 2007, 27; 28; 45; 50; 68-75; 84.
- [60] A.Singhabhandhu; T. Tezuka, A perspective on incorporation of glycerin purification process in biodiesel plants using waste cooking oil as feedstock, *Energy* 35, 2493-2504, 2010.
- [61] M. Ayoub; A. Z. Abdullah, Critical review on the current scenario and significance of crude glycerol resulting from biodiesel industry towards more sustainable renewable energy industry, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16, 2671-2686, 2012.
- [62] A. Vlysidis; M. Binns; C. Webb; C. Theodoropoulos, A techno-economic analysis of biodiesel biorefineries: Assessment of integrated designs for the co-production of fuels and chemicals, *Energy* 36, 4671-4683, 2011.
- [63] V. Sricharoenchaikul; D. Puavilaj; S. Thassanaprichayanont; D. Atong, Investigation on thermochemical conversion of pelletized Jatropha residue and glycerol waste using single particle reactivity technique, *Chemical Engineering Journal* 176-177, 217-224, 2011.
- [64] G. Chen; L. Zhao, Preliminary investigation on hydrogen-rich gas production by co-steam-reforming of biomass and crude glycerin, *International Journal of Hydrogen Energy* 37, 765-773, 2012.
- [65] N. Sapag; R. Sapag en *Preparación y evaluación de proyectos*; Mc Graw-Hill Ed.; México D.F., 2003; Vol. 5, 137-142.
- [66] Bitácora ambiental del programa de ordenamiento ecológico territorial del estado de Yucatán. Disponible en: Productos <http://www.bitacoraordenamiento.yucatan.gob.mx/galeria/index.php?IdOrdenamiento=2>, [Accedido Septiembre 2011].
- [67] M. Caballero; A. Velazquez, Estudio de gran visión y factibilidad económica y financiera para el desarrollo de infraestructura de almacenamiento y distribución de granos y oleaginosas para el mediano y largo plazo a nivel nacional: Informe en

Cuadro A 36. Rendimiento de frijol en México, 1998-2008 (toneladas/hectárea), México D.F., 2010, 234.

- [68] A. Sultana; A. Kumar; D. Harfield, Development of agri-pellet production cost and optimum size, *Bioresource Technology* 101, 5609-5621, 2010.
- [69] J. Hillier; C. Walter; D. Malin; T. Garcia-Suarez; L. Mila-i-Canals; P. Smith, A farm-focused calculator for emissions from crop and livestock production, *Environmental Modelling & Software* 26, 1070-1078, 2011.
- [70] L. Bojórquez; A. Ortega, *Las evaluaciones de impacto ambiental: Conceptos y metodologías*. Centro de investigaciones biológicas de Baja California Sur, A.C., La Paz, 1988, 28-30.
- [71] W. G. Wu; J. K. Huang; X. Z. Deng, Potential land for plantation of *Jatropha curcas* as feedstocks for biodiesel in China, *Science in China Series D: Earth Sciences* 53, 120-127, 2010.
- [72] O. Valdes-Rodriguez; O. Sánchez-Sánchez; A. Pérez-Vázquez; R. Ruiz-Bello, Soil texture effects on the development of *Jatropha* seedlings - Mexican variety 'piñón manso', *Biomass and Bioenergy* 35, 3529-3536, 2011.
- [73] R. Jingura; R. Matengaifa; D. Musadamba; K. Musiyiwa, Characterisation of land types and agro-ecological conditions for production of *Jatropha* as a feedstock for biofuels in Zimbabwe, *Biomass and Bioenergy* 35, 2080-2086, 2011.
- [74] Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), Territorio, Población y Economía de México. Disponible en: Información por entidad Federativa, Yucatán, <http://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/yuc/default.aspx?tema=me&e=31>, [Accedido Septiembre 2012].
- [75] C. Delgado; J. Pacheco; A. Cabrera; E. Batllori; R. Orellana; F. Bautista, Quality of groundwater for irrigation in tropical karst environment: The case of Yucatán, México, *Agricultural Water Management* 97, 1423-1433, 2010.

- [76] J.G. Duch, *La conformación territorial del estado de Yucatán: los componentes del medio físico*, Universidad Autónoma de Chapingo, México D.F., 1988, 380-395.
- [77] Bautisa F., D. Palma-Lopez, W. Huchin-Malta, 2005. Actualización de la clasificación de los suelos de la Península de Yucatán, p.105-122. *En*: F. Bautista y G. Palacio (Eds.) *Caracterización y Manejo de los Suelos de la Península de Yucatán: Implicaciones Agropecuarias, Forestales y Ambientales*. Universidad Autónoma de Campeche, Universidad Autónoma de Yucatán, Instituto Nacional de Ecología. 282 p.
- [78] M. A. Carriquiry; X. Du; G. R. Timilsina, Second generation biofuels: Economics and policies, *Energy Policy* 39, 4222-4234, 2011.
- [79] E. E. Yáñez; E. E. Silva; R. E. daCosta; E. Andrade, The energy balance in the Palm Oil-Derived Methyl Ester (PME) life cycle for the cases in Brazil and Colombia, *Renewable Energy* 34, 2905-2913, 2009.
- [80] Sigma – Aldrich, Chemistry, Solvent Center, Methanol, Disponible en: <http://www.sigmaaldrich.com/chemistry/solvents/methanol-center.html>, 2012 [Accedido Septiembre 2012].
- [81] Comisión Federal de Electricidad, Conoce tu tarifa. Disponible en: [http://app.cfe.gob.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/Tarifas/Tarifas\\_industria.asp?Tarifa=CMAAT&Anio=2012](http://app.cfe.gob.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/Tarifas/Tarifas_industria.asp?Tarifa=CMAAT&Anio=2012), 2012 [Accedido Diciembre 2012].
- [82] T. Sakai; S. Kawashima; T. Koshikawa, Economic assessment of batch biodiesel production processes using homogeneous and heterogeneous alkali catalysts, *Bioresource Technology* 100, 3268-3276, 2009.
- [83] Banco de México, Inflación. Disponible en: <http://www.banxico.org.mx/portal-inflacion/inflacion.html>, 2012 [Accedido Septiembre 2012].

## ANEXO A

### PARÁMETROS EMPLEADOS PARA LA REALIZACIÓN DE CÁLCULOS

#### A.1 Parámetros empleados en la fase agrícola

La tabla A.1 muestra los parámetros empleados para la cuantificación de insumos, energía, costos e inversiones de la fase agrícola de la producción de biodiesel de *Jatropha curcas*.

Tabla A.1. Parámetros empleados para la cuantificación de insumos, energía, costos e inversiones en la fase agrícola de la producción de biodiesel de *J. curcas*.

Parámetro	Variable	Valor
Dosis de fertilizante sulfato de amonio [ $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ ] <sup>a</sup>	$d_{fert-N}$	250
Dosis de fertilizante superfosfato [ $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ ] <sup>a</sup>	$d_{fert-P}$	100
Dosis de fertilizante cloruro de potasio [ $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ ] <sup>a</sup>	$d_{fert-K}$	67
Mano de obra fase agrícola [ $\text{hombre}\cdot\text{ha}^{-1}$ ] <sup>a</sup>	$r_{moa}$	0.20
Tiempo de operación anual agrícola [ $\text{h}\cdot\text{año}^{-1}$ ] <sup>b</sup>	$TOA_{fa}$	2640
Factor de energía para mano de obra agrícola [ $\text{MJ}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{hombre}^{-1}$ ] <sup>c</sup>	$FE_{moa}$	2.3
Factor de energía fertilizante de nitrógeno [ $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ] <sup>d</sup>	$FE_{fert-N}$	48.9
Factor de energía fertilizante de fósforo [ $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ] <sup>d</sup>	$FE_{fert-P}$	17.43
Factor de energía fertilizante de potasio [ $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ] <sup>d</sup>	$FE_{fert-K}$	10.38
Productividad de frutos [ $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ ] <sup>e</sup>	$P_f$	2135
Costo de fertilizantes [ $\text{\$}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ ] <sup>a</sup>	$CTO_{fert}$	\$ 1,251
Costo de pesticidas [ $\text{\$}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ ] <sup>a</sup>	$CTO_{pst}$	\$ 1,695
Costo de mano de obra [ $\text{\$}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ ] <sup>a</sup>	$CTO_{mofa}$	\$ 6,668
Semillas necesarias para iniciar la plantación [ $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ ]	$Q_{sem}$	1.5
Plántulas necesarias para iniciar la plantación [ $\text{plántula}\cdot\text{ha}^{-1}$ ]	$n_{pl}$	2500
Costo de semillas para plantar [ $\text{\$}\cdot\text{kg}^{-1}$ ] <sup>a</sup>	$CTO_{sem}$	\$ 161.79
Costo de invernadero para las plántulas [ $\text{\$}\cdot\text{plántula}^{-1}$ ] <sup>a</sup>	$CTO_{inv}$	\$ 0.65
Costo de preparación del terreno [ $\text{\$}\cdot\text{ha}^{-1}$ ] <sup>a</sup>	$CTO_{prpt}$	\$ 19,415.73
Costo del transporte de las plántulas [ $\text{\$}\cdot\text{plántula}^{-1}$ ] <sup>a</sup>	$CTO_{trppt}$	\$ 0.13
Costo de adquisición del área de siembra [ $\text{\$}\cdot\text{ha}^{-1}$ ] <sup>f</sup>	$CTO_{sup}$	\$ 6,000.00

<sup>a</sup> Dato proporcionado por la empresa KUOSOL S.A. de C.V., comunicación personal.

<sup>b</sup> Dato calculado, 8 horas al día por 330 días al año.

<sup>c</sup> [12].

<sup>d</sup> [79].

<sup>e</sup> Calculado según la ecuación 10.

<sup>f</sup> Dato proporcionado por el Dr. Abelardo Navarrete de la consultoría BIOANTROPO S.A. de C.V.

La empresa KUOSOL S.A. de C.V. no tiene una dosis estándar sobre el uso de pesticidas, es decir, emplea los que necesita conforme la situación, por tanto, no se tomó en cuenta la energía que ingresa al sistema debido a la producción de pesticidas. El costo sobre este rubro que aparece en la tabla 3.5 es un promedio de lo que ha gastado la empresa desde que iniciaron las plantaciones de *J. curcas*. Según [42], para iniciar una plantación de *J. curcas* en una densidad de 1333 plantas por hectárea se requiere de 1.2 kg de semilla, es decir, 2000 plántulas (ya que se tiene en cuenta las posibles pérdidas), por tanto, se estimó que la cantidad de semillas  $Q_{sem}$  y de plántulas  $n_p$  necesarias para dar inicio a una plantación de 1666 plantas por hectárea es de  $1.5 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  y 2500, respectivamente.

## **A.2 Parámetros empleados en la fase industrial**

La tabla A.2 muestra los parámetros empleados para la cuantificación de insumos, energía, costos e inversiones en la fase industrial de la producción de biodiesel de *J. curcas*.

Tabla A.2. Parámetros empleados para la cuantificación de insumos, energía, costos e inversiones en la fase industrial de la producción de biodiesel de *J. curcas*.

Parámetro	Variable	Valor
Potencia máquina de descascarillado [kw] <sup>a</sup>	$Pt_d$	38
Potencia de la máquina de prensado [kw] <sup>a</sup>	$Pt_p$	254
Potencia de la máquina de filtrado [kw] <sup>b</sup>	$Pt_f$	98
Cap. de producción de la máquina de descascarillado [kg·h <sup>-1</sup> ] <sup>a</sup>	$C_d$	5000
Cap. de producción de la máquina de prensado [kg·h <sup>-1</sup> ] <sup>a</sup>	$C_p$	6250
Cap. de producción de la máquina de filtrado [m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> ] <sup>b</sup>	$C_f$	5.43
Tiempo de operación anual industrial [h·año <sup>-1</sup> ] <sup>c</sup>	$TOA_{fi}$	7920
Potencia de una planta de biodiesel conocida [kw] <sup>a</sup>	$Pt_{bc}$	30
Cap. de producción de una planta de biodiesel conocida [m <sup>3</sup> ·año <sup>-1</sup> ] <sup>a</sup>	$V_{bc}$	2640
Potencia de una planta de pellets conocida [kw] <sup>d</sup>	$Pt_{pc}$	298.8
Cap. de producción de una planta de pellets conocida [ton·año <sup>-1</sup> ] <sup>d</sup>	$C_{pc}$	23760
Cap. de carga por camión [kg·camión <sup>-1</sup> ] <sup>e</sup>	$C_{cc}$	4300
Velocidad promedio del camión [km·h <sup>-1</sup> ] <sup>f</sup>	$v_c$	50
Consumo promedio de combustible diesel por camión [km·L <sup>-1</sup> ] <sup>g</sup>	$C_{pdc}$	4
Densidad del metanol [kg·m <sup>-3</sup> ] <sup>h</sup>	$\rho_{MeOH}$	791
Factor de energía del metanol [MJ·m <sup>-3</sup> ] <sup>i</sup>	$FE_{MeOH}$	30928.1
Factor de energía del diesel [MJ·m <sup>-3</sup> ] <sup>i</sup>	$FE_d$	38450
Factor de energía del KOH [MJ·kg <sup>-1</sup> ] <sup>i</sup>	$FE_{KOH}$	19.87
Costo del metanol [\$.m <sup>-3</sup> ] <sup>j</sup>	$CTO_{MeOH}$	\$ 7,285.38
Costo del KOH [\$.kg <sup>-1</sup> ] <sup>j</sup>	$CTO_{KOH}$	\$ 22.04
Tarifa de renta por camión [\$.camión <sup>-1</sup> ·día <sup>-1</sup> ] <sup>e</sup>	$TT$	\$ 966
Costo del combustible diesel [\$.m <sup>-3</sup> ] <sup>l</sup>	$CTO_{cd}$	\$ 10,920.29
Costo de la máquina de descascarillado [\$.] <sup>a</sup>	$CTO_d$	\$ 4,905,624
Tarifa de energía eléctrica [\$.kwh <sup>-1</sup> ] <sup>k</sup>	$TEE$	\$ 1.0390
Costo de la máquina de prensado [\$.] <sup>a</sup>	$CTO_p$	\$ 3,466,641
Costo de la máquina de filtrado [\$.] <sup>b</sup>	$CTO_f$	\$ 203,363
Costo de una planta de biodiesel conocida [\$.] <sup>a</sup>	$CTO_{bc}$	\$ 3,510,000
Costo de una planta de pellets conocida [\$.] <sup>d</sup>	$CTO_{pc}$	\$ 1,295,000

<sup>a</sup> Dato proporcionado por la empresa mexicana SOLBEN S.A. de C.V.

<sup>b</sup> Dato proporcionado por la empresa china NAKIN OIL PURIFIER COMPANY.

<sup>c</sup> Dato calculado, 3 turnos al día, 8 horas por turno y 330 días al año.

<sup>d</sup> Dato proporcionado por la empresa china ZHANQIU FADA PELLET MACHINERY CO., LTD.

<sup>e</sup> Dato obtenido de la empresa CASANOVA RENT VOLKS S.A. de C.V.

<sup>f</sup> Dato asumido para el presente trabajo.

<sup>g</sup> [31].

<sup>h</sup> [80]

<sup>i</sup> [79].

<sup>j</sup> Dato proporcionado por el grupo POCHTECA S.A. de C.V.

<sup>k</sup> [81].

<sup>l</sup> [18].

La figura A.1 muestra los costos de maquinaria para una planta de biodiesel y una planta de pellets en función de su capacidad de producción. El factor de escalamiento para la planta de biodiesel  $fb$  se estimó en 0.62, un resultado similar empleado para industrias petroquímicas y aceiteras de 0.5 [65] y al empleado por [82] de 0.7. El factor de escalamiento para una planta de pellets se estimó en 0.87, un resultado mayor al empleado por [57] de 0.6. El valor más bajo de  $fb$  indica que la variación en las inversiones para una planta de biodiesel, con respecto a los cambios en la producción, será menor que la variación en las inversiones para una planta de pellets; sin embargo, las inversiones en una planta de biodiesel son mayores que las necesarias para una planta de pellets, debido a: un valor agregado más alto del biocombustible líquido sobre el biocombustible sólido, una mayor complejidad en la tecnología para la transformación del aceite y, un mayor nivel de automatización de una planta de biodiesel.

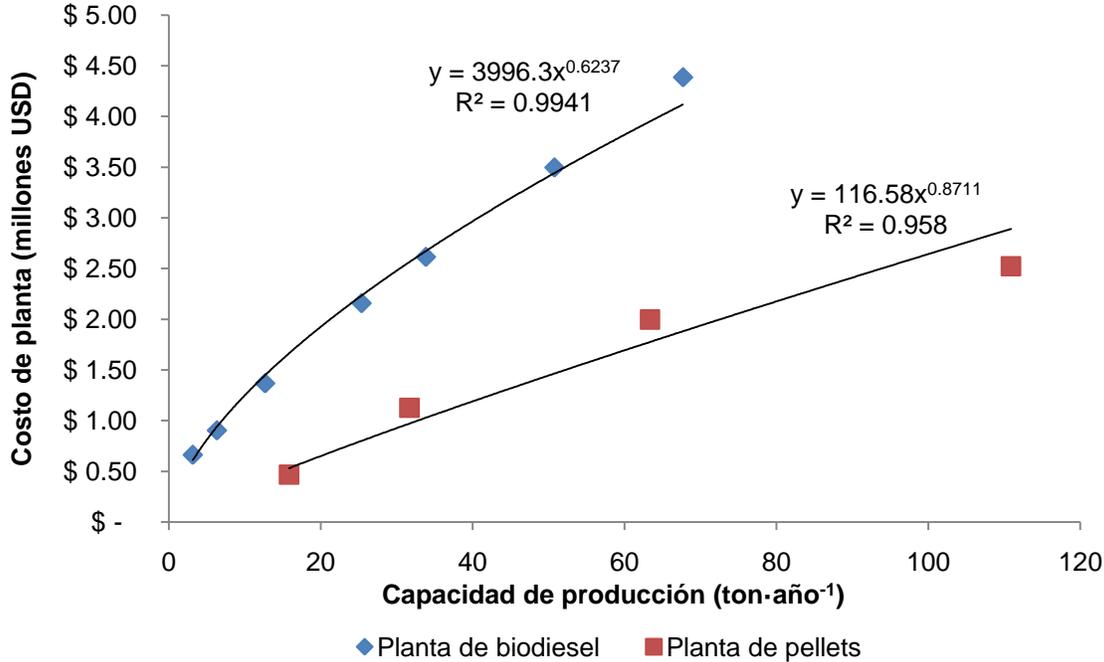


Figura A.1. Relación costos de maquinaria vs capacidad de producción de una planta de biodiesel y una planta de pellets. Datos de [37, 59].

### A.3 Parámetros empleados para la evaluación energética

La tabla A.3 muestra los factores de energía del biodiesel, la glicerina, la torta y cáscaras de fruto de la *J. curcas*.

Tabla A.3. Factores de energía del biodiesel, glicerina, torta y cáscaras de fruto de la *J. curcas*.

Parámetro	Variable	Valor
Factor de energía del biodiesel [ $\text{MJ}\cdot\text{m}^{-3}$ ] <sup>a</sup>	$FE_b$	32824
Factor de energía de la glicerina [ $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ] <sup>a</sup>	$FE_{gl}$	25.60
Factor de energía de la torta de <i>J. curcas</i> [ $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ] <sup>b</sup>	$FE_t$	3.56
Factor de energía de las cáscaras de fruto de <i>J. curcas</i> [ $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ] <sup>c</sup>	$FE_{cf}$	11.10

<sup>a</sup> [29].

<sup>b</sup> Calculado teniendo en cuenta que el contenido de nitrógeno, fósforo y potasio de la torta de la *J. curcas* es del 6%, 3% y 1%, respectivamente, [44], junto con el factor de energía de éstos fertilizantes (tabla A.1.).

<sup>c</sup> [44].

### A.4 Parámetros empleados para la evaluación económica

Los precios del biodiesel, la glicerina, la torta de la *J. curcas* y los pellets se muestran en la tabla A.4.

Tabla A.4. Precios del biodiesel, glicerina, torta y cáscaras de fruto de la *J. curcas*.

Parámetro	Variable	Valor
Precio del biodiesel [ $\text{\$}\cdot\text{m}^{-3}$ ] <sup>a</sup>	$Pr_b$	\$ 10,920.29
Precio de la glicerina [ $\text{\$}\cdot\text{kg}^{-1}$ ] <sup>b</sup>	$Pr_{gl}$	\$ 1.00
Precio de la torta de <i>J. curcas</i> [ $\text{\$}\cdot\text{kg}^{-1}$ ] <sup>c</sup>	$Pr_t$	\$0.25
Precio de pellet de residuos agrícolas [ $\text{\$}\cdot\text{kg}^{-1}$ ] <sup>d</sup>	$Pr_{pra}$	\$ 2.80
Precio de los pellets de cáscaras de fruto de <i>J. curcas</i> [ $\text{\$}\cdot\text{kg}^{-1}$ ] <sup>e</sup>	$Pr_{pcf}$	\$ 1.746

<sup>a</sup> Se igualó el precio del biodiesel al precio del diesel.

<sup>b</sup> Dra. Elizabeth Ortiz, Instituto Tecnológico de Mérida, comunicación personal.

<sup>c</sup> A la torta de la *J. curcas* se le asignó el mismo valor asumido por [39].

<sup>d</sup> Empresa VICA DELICIAS S.P.R. DE R.L. DE C.V., comunicación personal.

<sup>e</sup> Calculado según la ecuación 58. El factor de energía de los pellets de residuos agrícolas  $FE_{pra}$  es de  $17.8 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$  (Empresa VICA DELICIAS S.P.R. DE R.L. DE C.V., comunicación personal).

La figura A.2 muestra el desarrollo de la inflación en México desde el año 2004, hasta el año 2011. Aunque no se muestra, la línea intersecta en el origen ya que, de lo contrario, el modelo no resultaría congruente con la tendencia esperada, es decir, a la alza.

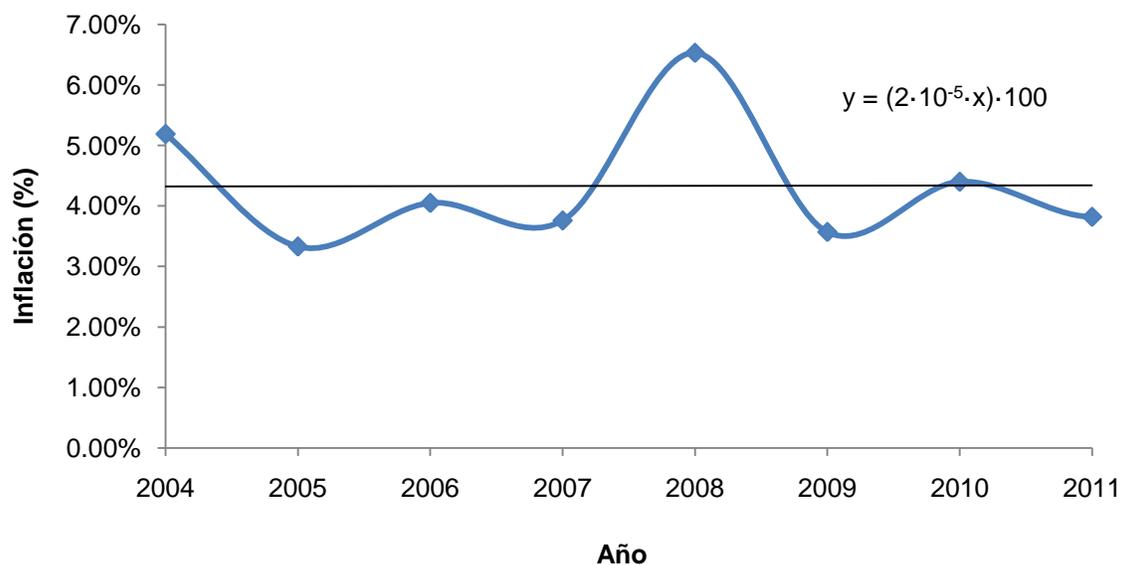


Figura A.2. Desarrollo de la inflación en México en el período 2004-2012. Fuente: [83].

La tabla A.5 muestra los valores de ajuste por inflación para el cálculo del valor presente neto *VPN*, teniendo en cuenta la tendencia de la figura A.2.

Tabla A.5. Inflación predicha  $inf_j$  y ajuste por inflación  $Ainf_n$  para el cálculo del *VPN*\*.

Período	$inf_j$	$Ainf_n$	Período	$inf_j$	$Ainf_n$
1	4.34%	1.04	11	4.36%	1.60
2	4.34%	1.09	12	4.37%	1.67
3	4.35%	1.14	13	4.37%	1.74
4	4.35%	1.19	14	4.37%	1.82
5	4.35%	1.24	15	4.37%	1.90
6	4.35%	1.29	16	4.38%	1.98
7	4.36%	1.35	17	4.38%	2.07
8	4.36%	1.41	18	4.38%	2.16
9	4.36%	1.47	19	4.38%	2.25
10	4.36%	1.53	20	4.38%	2.35

\*El período 1 comprende el año 2013.