

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA  
“ANTONIO NARRO”**

**DIVISIÓN DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DEL SUELO**



**CARACTERIZACIÓN, CUANTIFICACIÓN Y CARTOGRAFÍA DEL POTENCIAL  
PRODUCTIVO DE HIGUERILLA (*Ricinus communis* L.) PARA BIODIESEL EN  
VERACRUZ**

**Por:**

**RICARDO LOPEZ SARMIENTOS**

**TESIS**

**Presentada como requisito parcial para obtener el título de:**

**INGENIERO AGRICOLA Y AMBIENTAL**

**Buenavista, Saltillo, Coahuila, México**

**Noviembre del 2012.**

# UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA "ANTONIO NARRO"

DIVISIÓN DE INGENIERIA  
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DEL SUELO

CARACTERIZACIÓN, CUANTIFICACIÓN Y CARTOGRAFÍA DEL POTENCIAL PRODUCTIVO DE HIGUERILLA (*Ricinus cummunis* L.) PARA PRODUCIR BIODIESEL EN VERACRUZ

POR:

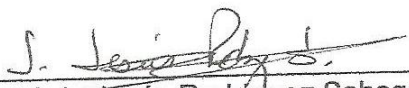
**Ricardo López Sarmientos**

TESIS

Que se somete a consideración del H. jurado examinador como requisito para obtener el título:

**INGENIERO AGRICOLA Y AMBIENTAL**

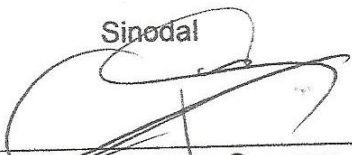
Presidente

  
Dr. José de Jesús Rodríguez Sahagún


Sinodal

  
M.C. Juan M. Cepeda Dovala

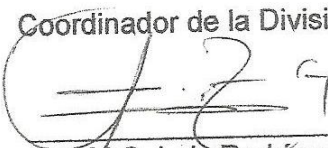
Sinodal

  
Dr. Enrique Navarro Guerrero.

Asesor externo

  
Dr. Jesús Uresti Gil  
Universidad Autónoma Agraria  
"ANTONIO NARRO"

Coordinador de la División de Ingeniería.

  
M.C. Luis Rodríguez Gutiérrez  
Coordinación de  
Ingeniería

## **AGRADECIMIENTOS**

*A mi "alma mater" gracias por todos los aprendizajes que hasta la fecha he tenido, me diste la oportunidad de formarme como profesionista, comprendí la importancia de lo que significa ser un amigo, compañero, hermano e hijo. Los momentos vividos aquí durante el tiempo que duro este trayecto los llevare conmigo siempre y no terminare de expresar el profundo orgullo que me da el pertenecer a esta gloriosa universidad.*

*Mi agradecimiento al Campo Experimental Cotaxtla del INIFAP y a los fondos mixtos FOMIX CONACYT-Veracruz por el apoyo financiero que a través del proyecto con clave VER-2009-C03-128049 me otorgaron para realizar el presente trabajo.*

*Al Dr. Jesús Uresti Gil por la confianza depositada al encomendarme la realización de este proyecto del cual me siento orgulloso de haber formado parte y más aun bajo su asesoría, "gracias" por su paciencia, disposición y apoyo para culminación del proyecto.*

*Al Dr. José de Jesús Rodríguez Sahagún por haber aceptado formar parte de este proyecto, su colaboración y asesoría me ayudo mucho.*

*Al Dr. Enrique Navarro Guerrero por su apoyo, disposición, y sugerencia para la culminación de este proyecto.*

*Al M.C. Juan M. Cepeda Dovala por su apoyo como asesor y por ser una persona muy amable y muy accesible, mis más grande agradecimientos y formar parte de este proyecto.*

## DEDICATORIA

*Primeramente a DIOS por prestarme vida cada día, por darme la fortaleza y sabiduría necesaria para enfrentar cada uno de los obstáculos y aprender de ellos, por darme la oportunidad de terminar esta etapa tan importante para mí y mi familia.*

*A mi padre Sr. Abenamar López Ríos, quiero expresar todo el respeto que tengo para ti, gracias por enseñarme que cada cosa que uno se propone debe luchar hasta alcanzarlo, por enseñarme a trabajar por lo que uno desea, y por toda la confianza depositada en mí, no te decepcione hoy este trabajo es dedicado para ti.*

*A mi madre Sra. María Elena Sarmiento Corzo por ser la mamá más linda, por apoyarme en todo momento y por cada uno de sus consejos durante el tiempo que estuve fuera de casa, mis más profundo cariño y respeto, hoy este logro es para ti.*

*A mis hermanos (Ma. Jesús, Alejandro, Margoth, Maricela, Lourdes, Adriana, Daniela, Rogelio y Yoshio) gracias por todo su apoyo durante esta etapa, por sus buenos deseos y por estar ahí siempre cuando más necesite, este logro es también de ustedes "gracias carnales".*

*A mis sobrinos(a) Sindy, Vanesa, Alejandro, los dos Lalo, Erik, Boris, Cesar, Tadeo, Diego y los que estén por llegar o no conozco. Por cada momento de alegría compartida con ustedes, y por hacer de ellos momentos únicos, espero que tengan presente que cuentan con mí y ahí estaré cuando me necesiten, este trabajo se los dedico y espero que luchen por alcanzar sus metas.*

*A mis cuñados(a) Miguel, Tito, Dileri, Lenin, Lalo, Alex, Araceli) gracias por el apoyo y consejos recibidos por parte de ellos, les deseo todo lo mejor.*

**Con cariño de Richard.**

## ÍNDICE CONTENIDO

Pag

<b>AGRADECIMIENTOS.....</b>	<b>i</b>
<b>DEDICATORIA.....</b>	<b>ii</b>
<b>ÍNDICE DE CONTENIDO.....</b>	<b>iv</b>
<b>ÍNDICE DE CUADROS.....</b>	<b>Vii</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>ix</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>X</b>
<b>ABSTRAC.....</b>	<b>xi</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>3</b>
2.1 Objetivo general.....	3
2.2 Objetivos específicos.....	3
<b>3. HIPOTESIS.....</b>	<b>4</b>
<b>4. REVISION DE LITERATURA.....</b>	<b>4</b>
<b>4.1. FUERZAS PROMOTORAS DE LOS BIOCOMBUSTIBLES</b>	
<b>LIQUIDOS.....</b>	<b>4</b>
4.1.1. El petróleo y la seguridad energética.....	4
4.1.2. La emisión de gas de efecto invernadero y el cambio climático.....	6
4.1.3. El desarrollo rural y los biocombustibles.....	7
4.1.4. La seguridad alimentaria y los biocombustible.....	9
4.2. Tipos, estadísticas y procesos para producir biocombustibles.....	13
4.2.1. Tipos de biocombustibles líquidos.....	13
4.2.2. Estadísticas de producción de biocombustibles líquidos.....	14
4.2.3. Estadísticas de producción de biodiesel.....	16
4.2.4. Proceso para producir biodiesel a partir de aceites vegetales.....	18
4.3. MARCO LEGAL PARA PRODUCIR BIOCOMBUSTIBLES.....	21
4.3.1 Políticas e instituciones sobre biocombustibles.....	21
4.3.2 Leyes y reglamentos para producir biocombustibles.....	23
4.3.3 Programas de apoyos y financiamiento para producir Biocombustibles..	24

4.3.4 Rentabilidad de los biocombustibles.....	24
4.4. El cultivo de Higuierilla( <i>Ricinus communis</i> L).....	26
4.4.1. La planta de higuierilla.....	26
4.4.2. Tipo, cantidad y calidad del aceite.....	28
4.4.3. Sub-productos obtenidos.....	29
4.4.4. Residuos de cosecha producidos.....	30
4.4.5. Uso actual de los productos de la higuierilla.....	30
4.4.6. Superficie cultivada con higuierilla en Veracruz.....	31
4.5. Tecnología de producción.....	31
4.5.1. Limpieza del terreno.....	31
4.5.2. Preparación del suelo.....	31
4.5.3. Siembra.....	32
4.5.4. Fertilización.....	32
4.5.5. Control de maleza y raleo.....	33
4.5.6. Control de Plagas y enfermedades.....	33
4.5.7. Cosecha del grano de higuierilla.....	34
4.6. Parámetros fisiológicos de la higuierilla ( <i>Ricinus communis</i> L).....	34
4.6.1. Índice de Área Foliar (IAF).....	34
4.6.2. Temperatura base.....	35
4.6.3. Eficiencia en uso de la radiación solar.....	35
4.6.4. Partición de biomasa.....	36
4.7. Zonificación agroecológica.....	36
4.8. Sistemas de Información Geográfica.....	37
4.8.1. ArcMap.....	37
4.9. El modelo de simulación Sol and Water Assessment Tool (SWAT).....	38
<b>5. MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>41</b>
5.1 Descripción del área de estudio.....	41
5.2. Caracterización del cultivo de higuierilla.....	47
5.2.1. Puntos considerados para la caracterización de la higuierilla.....	47

5.2.2. Tecnología y costos de producción de la higuera.....	48
5.2.3. Parámetros fisiológicos de la higuera.....	49
5.3. Simulación del rendimiento de la higuera.....	50
5.3.1. El modelo de simulación SWAT.....	50
5.3.2. Cartografía utilizada.....	51
5.3.3. Bases de datos utilizadas.....	52
5.3.3.1. Suelos.....	53
5.3.3.2. Clima.....	53
5.3.3.3. Manejo de la higuera.....	55
5.3.3.4. Parámetros fisiológicos de la higuera.....	56
5.4. Proceso general de simulación.....	58
5.4.1. Delimitación de la cuenca, sub-cuencas y formación de las URH.....	59
5.4.2. Metodología para elaborar la cartografía del potencial de producción.....	62
<b>6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>62</b>
6.1. Caracterización del cultivo de higuera.....	62
6.1.1. Estadísticas y producción.....	62
6.1.2. Características del producto económicamente importante (grano).....	63
6.1.3. Características de los co-productos resultantes del proceso industrial.....	65
6.1.4. Cantidad y composición química de los residuos de cosecha.....	66
6.1.5. Uso de los productos, co-productos y residuos de cosecha.....	67
6.1.6. Paquete tecnológico y costos de producción de la higuera.....	68
6.1.7. Parámetros fisiológicos de la higuera.....	69
6.2. Potencial de rendimiento de grano y biodiesel de higuera.....	69
6.3. Relación rendimiento potencial-Uso actual del suelo.....	72
<b>7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>75</b>
<b>8. LITERATURA CONSULTADA.....</b>	<b>76</b>



## INDICE DE CUADROS

	Pág.
<b>Cuadro 1.</b> Posibles Efectos de Biocombustibles Modernos.....	12
<b>Cuadro 2.</b> Principales tipos de biocombustibles líquidos y principales insumos bioenergéticos necesarios para su producción.....	14
<b>Cuadro 3.</b> Grados de pendiente (topografía) del terreno y uso actual del suelo en el estado de Veracruz, México. Área total: 7.18 millones de hectáreas.....	42
<b>Cuadro 4.</b> Clima (Clasificación de Köppen) y tipos de suelo (Clasificación de la FAO) en el estado de Veracruz, México. Área Total: 7.18 millones de hectáreas.....	45
<b>Cuadro 5.</b> Características del perfil típico del suelo Cambisol calcárico.....	53
<b>Cuadro 6.</b> Fuentes de datos y metodologías usadas para calcular los datos utilizados por el modelo de simulación SWAT.....	54
<b>Cuadro 7.</b> Ejemplo de datos estadísticos generados por el simulador climático del modelo EPIC y requeridos por SWAT. Datos de la estación meteorológica 30100 del estado de Veracruz.....	56
<b>Cuadro 8.</b> Paquete tecnológico y costos de producción por unidad de superficie del cultivo de higuierilla en el estado de Veracruz.....	57
<b>Cuadro 9.</b> Parámetros fisiológicos de la higuierilla utilizados en el presente trabajo.....	58
<b>Cuadro 10.</b> Estadísticas generales de producción y producción potencial de higuierilla esperada bajo condiciones de temporal en el estado de Veracruz.....	63
<b>Cuadro 11.</b> Valores promedio típicos de la composición del producto económicamente importante (grano) de higuierilla y su tasa de conversión a Biodiesel.....	64
<b>Cuadro 12.</b> Valores promedio típicos de la composición de los co-productos	

resultantes del proceso industrial de producción de biodiesel de higuerilla.....	66
<b>Cuadro 13.</b> Composición promedio típica de los residuos de cosecha del cultivo de higuerilla.....	67
<b>Cuadro 14.</b> Uso actual y potencial en México de los productos económicamente importantes, co-productos y residuos de cosecha de la higuerilla.....	68
<b>Cuadro 15.</b> Superficie ocupada por cada categoría de potencial de rendimiento de higuerilla, distribuida entre los diferentes usos actuales del suelo (agrícola, pecuario y forestal) del estado de Veracruz.....	74

## INDICE DE FIGURAS

Pág.

<b>Figura 1.</b> Producción mundial de biocombustible en el 2009 (billones de litros año <sup>-1</sup> ).....	16
<b>Figura 2.</b> Distribución por región de la producción Total de biodiesel 4e(17.89 billones de litros por año) en el año 2009. Fuente:(USA-DOE, 2010).....	17
<b>Figura 3.</b> Diagrama de Flujo para Producir Biodiesel a partir del Aceite Vegetal.....	20
<b>Figura 4.</b> Características de la semilla de higuera.....	27
<b>Figura 5.</b> Localización del estado de Veracruz en la república mexicana.....	42
<b>Figura 6.</b> Topografía y pendiente del terreno en el estado de Veracruz.....	43
<b>Figura 7.</b> Distribución espacial del uso actual del suelo en el estado de Veracruz.....	43
<b>Figura 8.</b> Climas del estado de Veracruz.....	45
<b>Figura 9.</b> Mapa de suelo del estado de Veracruz.....	46
<b>Figura 10.</b> Ubicación en el estado de Veracruz de las 95 estaciones climáticas usadas por SWAT en este trabajo.....	55
<b>Figura 11.</b> Estado de Veracruz dividido en las 224 sub-cuencas generadas por SWAT.....	60
<b>Figura 12.</b> Estado de Veracruz dividido en las 4,053 URH generadas por SWAT.....	61
<b>Figura 13.</b> Rendimiento de semilla de higuera simulado por el modelo SWAT y estimación del rendimiento teórico de biodiesel en el estado de Veracruz.....	71
<b>Figura 14.</b> Rendimiento de semilla de higuera simulado por el modelo SWAT y estimación del rendimiento teórico de biodiesel en el estado de Veracruz. Con uso actual del suelo.....	73

## RESUMEN

Los objetivos del presente trabajo fueron caracterizar al cultivo de higuierilla, cuantificar y cartografiar su potencial de rendimiento de grano y biodiesel, con el propósito de generar información para la toma razonada de decisiones para el establecimiento y manejo de la higuierilla para producir biodiesel en Veracruz. La higuierilla se caracterizó en función de ocho principales características relacionadas con producción, cantidad y composición química del grano y su tasa de conversión a biodiesel, cantidad, composición química y uso de los co-productos y residuos de cosecha, parámetros fisiológicos, tecnología y costos de producción. La cuantificación del rendimiento se realizó con el modelo de simulación Soil and Water Assessment Tool (SWAT), mientras que la cartografía se realizó con ArcMap Vr. 9.3. La higuierilla se adapta al 92% de la superficie de Veracruz con un rendimiento máximo de  $4 \text{ t ha}^{-1}$  y una producción de biodiesel de  $1,590 \text{ L ha}^{-1}$ . De la superficie total de Veracruz ( $7.18 \text{ Mha}$ ), el 6% ofrece rendimiento de grano entre  $3$  y  $4 \text{ t ha}^{-1}$ , el 77% entre  $1.5$  y  $3 \text{ t ha}^{-1}$ , mientras que 9% ofrece rendimiento menor de  $1.5 \text{ t ha}^{-1}$ , con rendimiento de biodiesel que varían entre  $1,170$  y  $1,560$ , entre  $580$  y  $1,170$  y menos de  $580 \text{ L ha}^{-1}$ , respectivamente. La información del presente trabajo permite identificar las áreas más adecuadas para el desarrollo de la industria del biodiesel sin impactar en forma negativa la producción de alimentos y la deforestación en Veracruz.

**PALABRAS CLAVE:** Biocombustibles, Modelos de simulación, Zonificación, Rendimiento de cultivos, Oleaginosas.

## ABSTRACT

The objective of this study was to characterize the castor bean crop and quantify and map its grain and biodiesel potential production, in order to generate information for decision-making for the establishment and management of castor bean to produce biodiesel in Veracruz. The castor bean crop was characterized in terms of eight major characteristics related to production, quantity and chemical composition of the grain and biodiesel conversion rate, amount and chemical composition and use of co-products and crop residues, physiological parameters, technology and costs production. Quantification of the castor bean yield was done with the simulation model Soil and Water Assessment Tool (SWAT), while mapping was performed with ArcMap Vr. 9.3. The castor bean crop may be adapted to 92% of the area of Veracruz with maximum yield of 4 t ha<sup>-1</sup> and a biodiesel production of 1,590 L ha<sup>-1</sup>. From the total area of Veracruz (7.18 million of hectares), 6% has potential to produce between 3 and 4 t ha<sup>-1</sup> of castor bean grain, 77% between 1.5 and 3 t ha<sup>-1</sup>, while 9% offer lower yields of 1.5 t ha<sup>-1</sup>. The corresponding biodiesel yield ranges between 1,170 and 1,560, between 580 and 1,170 and less than 580 L ha<sup>-1</sup>, respectively. The findings of this study allow identifying the most suitable areas for the development of the biodiesel industry, without negatively impacting food production and deforestation in Veracruz.

**KEYWORDS:** Biofuels, simulation models, Zoning, crop yield, oilseed crops.

## 1. INTRODUCCIÓN

La creciente importancia y el renovado interés por el eficiente manejo de los recursos energéticos, ha desembocado en un crecimiento acelerado de la producción y utilización de biocombustibles en muchas partes del mundo, en paralelo a un progresivo aumento en el precio del petróleo y sus derivados. La preocupación por el medio ambiente y la necesidad imperiosa de reducir las emisiones de carbono para disminuir sus consecuencias sobre el clima global han redundado en numerosos acuerdos y compromisos entre los países, tendientes a fomentar el desarrollo de energías alternativas renovables de menor impacto ambiental.

Los biocombustibles líquidos como el biodiesel y el bioetanol aparecen como una alternativa viable, con muchos argumentos a favor comúnmente citados por sus promotores. Además de tratarse de alternativas energéticas que son renovables y que contribuyen a la mitigación del cambio climático a través de la reducción de emisiones de gases con efecto invernadero al sustituir combustibles de origen fósil, se posicionan como una clara opción para lograr diversificación y seguridad energética, generar nuevos empleos y promover el desarrollo económico de zonas rurales.

Los cultivos oleaginosos son importantes para la producción de biodiesel de primera generación y bioetanol de segunda generación a partir de los residuos

de cosecha, también se obtienen co-productos como la pasta que resulta de proceso de extracción del aceite y que puede utilizarse como alimento para ganado y como mejorador de suelos degradados y la glicerina que puede utilizares para alimento de ganado y en la industria.

El estado de Veracruz se localiza en la zona tropical de México presenta condiciones físicas adecuadas para producir una amplia gama de especies vegetales, como los cultivos oleaginosos con alto rendimiento de biomasa y aceites para producir biodiesel. Además, posee infraestructura, física, humana y tecnológica, suficiente para apoyar la producción y transformación de la biomasa y aceite en biocombustibles. Lo anterior sugiere que en Veracruz la producción de biocombustibles líquidos puede ser rentable. Sin embargo, para aprovechar en forma sustentable las condiciones edafoclimaticas, físicas y socio-económicas del estado de Veracruz para desarrollar la industria de los biocombustibles, es necesario realizar estudios que además de identificar a las especies vegetales más adecuadas para producir los insumos bioenergético requeridos, en este caso el aceite vegetal, es también necesario cuantificar su potencial de producción e identificar las áreas más productivas para promover el establecimiento de polos de desarrollo económico derivados de la industria de los biocombustibles en forma tecnológica, económica y sustentablemente viables.

La utilización de modelos de simulación y sistemas de información geográfica para cuantificar y cartografiar el rendimiento de biomasa y aceite de especies vegetales oleaginosas es una actividad que puede contribuir significativamente con la planeación razonada para la producción de biodiesel en Veracruz.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVO GENERAL**

Generar información que ayuden en la toma de decisiones durante el proceso de planeación para el establecimiento y manejo del cultivo de higuierilla (*Ricinus communis* L.) para producir biodiesel en Veracruz.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS**

**2.2.1.** Caracterizar al cultivo de higuierilla en función de sus insumos bioenergéticos, co-productos resultantes del proceso industrial y residuos de cosecha para producir biodiesel.

**2.2.2.** Cuantificar y cartografiar el potencial de producción del estado de Veracruz para producir higuierilla y biodiesel.



### **3. HIPÓTESIS**

- 3.1. La caracterización del cultivo de higuera permite identificar sus insumos bioenergéticos, co-productos resultantes del proceso industrial y residuos de cosecha para producir biodiesel.
- 3.2. Con el uso de un modelo de simulación y sistema de información geográfica, es posible cuantificar y cartografiar el potencial productivo de la higuera en el estado de Veracruz.
- 3.3. El estado de Veracruz presenta áreas con diferente potencial de producción de higuera, lo cual permite identificar aquellas con mayor potencial para producir biodiesel sin impactar en forma negativa la producción de alimentos y la deforestación.

### **4. REVISION DE LITERATURA**

#### **4.1. FUERZAS PROMOTORAS DE LOS BIOCOMBUSTIBLES LÍQUIDOS.**

##### **4.1.1. El petróleo y la seguridad energética.**

Los incrementos abruptos en los precios del petróleo, provocan graves problemas de índole económico en las naciones importadoras que podrían desencadenar protestas, huelgas, levantamientos y otras formas de resistencia civil. En el ámbito

económico y social el petróleo es la principal fuente de las consideraciones energéticas, en materia de seguridad en el hemisferio (González 2008).

La diversificación de las fuentes de energía primaria, representa una oportunidad para el fortalecimiento de la seguridad energética de México. Sin embargo, para su implementación, se debe buscar balance con los costos y efectos que pueden tener sobre las empresas del sector energía y el costo de los combustibles al consumidor (SENER, 2008).

A partir de diciembre del 2009, el Gobierno Federal reinicio los deslizamientos mensuales de los precios de las gasolinas y el diesel con el objetivo de reducir los subsidios a favor de los consumidores nacionales. De diciembre del 2009 a julio del 2011, la gasolina Premium pasó de 9.57 a 10.38 pesos por litro; la Magna de 7.77 a 9.32 pesos por litro y el diesel de 8.16 a 9.68 pesos por litro.(Reyes et al., 2011). El aumento en los precios del petróleo ha impactado los precios de los insumos agrícolas como los fertilizantes y productos fitosanitarios agrícolas, energía y costo de transporte (REDPA, 2008).

Una de las alternativas que tenemos cuando el petróleo suba de precio o se llegue a su fin son los biocombustibles. Por lo tanto, tener información sobre ellos para utilizarlos en el futuro con nuevas tecnologías es de vital importancia.

#### **4.1.2. La emisión de gases de efecto invernadero y el cambio climático.**

El efecto invernadero es un proceso natural por el cual los gases que están presentes en la atmósfera “atrapan” la radiación que la Tierra, a su vez, re-emite al espacio. Esta emisión de la Tierra es producto del calentamiento de su superficie por la radiación solar. Los productos de muchas actividades humanas contribuyen en forma sustancial al incremento del efecto invernadero: la quema de combustibles fósiles, la agricultura, la ganadería, la deforestación, algunos procesos industriales y los depósitos de residuos urbanos provocan el aumento de las concentraciones de estos gases con efecto invernadero en la atmósfera (IPCC, 2007).

El clima de la Tierra ha cambiado muchas veces a lo largo de su historia. Esta variación se debió a cambios naturales que se han producido en el equilibrio energético entre la energía solar entrante y la energía re-emitida por la Tierra hacia el espacio. Recién en la segunda mitad del siglo pasado se intensificaron los estudios sobre cuestiones ambientales. Las observaciones recientes detallan que la temperatura global del planeta se incrementó en el último siglo entre 0.3°C a 0.6°C. La combinación de modificaciones en el sistema Tierra-Atmósfera-Océanos-Biosfera a escala planetaria suele denominarse *cambio global*. Así este concepto resulta más amplio y abarcador que el de cambio climático (IPCC, 2007).

Hasta hace poco tiempo, muchas autoridades legisladoras asumían que la sustitución de los combustibles fósiles por combustibles obtenidos a partir de biomasa tendría unos efectos importantes y positivos sobre el cambio climático mediante la generación de unos niveles menores de gases de efecto invernadero, contribuidores al calentamiento global (FAO 2008).

#### **4.1.3. El desarrollo rural y los biocombustibles.**

El desarrollo de la industria de los bioenergéticos podría ampliar el acceso a los sistemas de energía, crear fuentes de trabajo y aumentar el ingreso en zonas rurales de México. Este es un punto que requiere especial consideración ya que el desarrollo sustentable de las zonas rurales y, en especial, de zonas remotas o marginadas, es una prioridad de la nación.

Las zonas donde no existe un alto potencial para la producción de alimentos pueden ser aptas para el desarrollo de especies útiles como insumos para la producción de bioenergéticos (Herrera, 2008).

La bioenergía debe ser considerada como una herramienta para generar oportunidades de desarrollo rural sustentable. Sin embargo, en caso de que los cultivos energéticos o la utilización de residuos agrícolas o forestales comprometa la seguridad alimentaria, afecte negativamente a la biodiversidad o produzca emisiones contaminantes netas relativamente altas en comparación con otros

sistemas de energía, se abatirían los beneficios del uso de este tipo de energía renovable (Herrera, 2008).

Los elementos claves que se deben de considerar para establecer programas de bioenergía que tengan un efecto positivo sobre el desarrollo rural son los siguientes: Integrar la implementación de sistemas de bioenergía modernos dentro de las políticas y programas de desarrollo rural, Potenciar la calidad y cantidad de los empleos que podrán ser creados bajo los diferentes escenarios de implementación de la bioenergía, respecto al desarrollo humano y sistemas de seguridad laboral e higiene, Determinar líneas de base e indicadores para dar seguimiento a los impactos que la bioenergía pueda tener sobre el desarrollo rural sustentable, Determinar indicadores para el monitoreo y evaluación de nuevas inversiones dado el crecimiento del uso de la bioenergía (Kessel 2008).

Se considera que los cultivos de los que se puede producir aceite, y por ende biodiesel, son más aptos para la agricultura familiar, ya que existen algunos cultivos, como la higuera y la *Jatropha curcas*, que se adaptan a condiciones menos exigentes y que no requieren una gran cantidad de agua ni muchos cuidados agronómicos, por lo que se pueden cultivar con inversiones mucho menores (Zamarripa, 2009).

Otra ventaja de estos cultivos es que pueden utilizarse en sistemas de policultivo; por ejemplo, entre las hileras de higuerilla o *Jatropha* se puede cultivar frijol, que además de proveer alimento, fija nitrógeno en el suelo, lo que mejora la fertilidad de este. Por otra parte, la unión de varios pequeños productores sería suficiente para adquirir una pequeña planta para la producción de biodiesel que les permita suplir las necesidades energéticas locales o abrir nuevas oportunidades comerciales para sus productos, los que podrían vender como materia prima, o a los que podrían agregar valor mediante la extracción del aceite que contienen y la transesterificación de este en biodiesel. También es importante mencionar que el precio de algunos de los cultivos con potencial para la producción de biocombustibles se ha incrementado, lo que ha mejorado los ingresos de los agricultores (*IICA 2010*).

#### **4.1.4. La seguridad alimentaria y los biocombustibles.**

La expansión de la producción de los biocombustibles líquidos, podrá afectar la seguridad alimentaria a nivel doméstico, nacional e inclusive global a través de las cuatro dimensiones principales que la definen: disponibilidad, acceso, estabilidad y utilización. Estos efectos podrán ser positivos o negativos. Por ejemplo, el hecho de que una región sea una productora neta o una importadora neta de servicios de bioenergía y productos alimenticios, definirá si los biocombustibles serán benéficos o perjudiciales para su situación.

La magnitud del efecto que pueden alcanzar los biocombustibles sobre los sistemas de producción agrícola, requiere un cuidadoso análisis y balance, no solamente a nivel nacional sino a nivel global. México ya ha resentido los efectos de desbalances en el precio de los alimentos que se atribuyen en cierta medida a una variación en los precios de los diversos mercados de combustibles y productos agrícolas.

La implementación en gran escala de la bioenergía, puede afectar la seguridad alimentaria de México de maneras positivas, pero también de maneras negativas (Torres, 2006). Los riesgos a la seguridad alimentaria bajo diversos escenarios de desarrollo de la bioenergía y opciones para evitar dichos retos identificados se enlistan abajo y se presentan en forma resumida en el Cuadro 1:

Impactos positivos del uso de la bioenergía debido a la creación de empleos y el desarrollo de infraestructura en las zonas rurales y, sobre todo, en zonas marginadas o remotas (Brathwaite 2009).

Implicaciones de la bioenergía sobre los precios de los productos agrícolas presentes y futuros, así como los mercados de dichos productos.

Efectos del desarrollo tecnológico, en particular la implementación de los biocombustibles de segunda generación, en la estructura de los sistemas agrícolas.

En el futuro, el desarrollo a gran escala de los biocombustibles podría aumentar los precios de los productos agrícolas, aumentando los ingresos para los productores, incentivando la producción y el empleo, reduciendo de esta manera, las presiones en materia de subsidios. Sin embargo, esto podría darse a costo de un aumento en los precios de los alimentos que afectaría a todos los sectores de la sociedad.

El desarrollo y expansión de la bioenergía podría afectar a la producción agropecuaria a nivel global. Actualmente, el debate se basa en discutir el balance entre “energía y alimentación humana y animal”. Este debate tiende a ser simplista y no representa la complejidad de los factores que incluye la seguridad alimentaria o la seguridad energética. Los mayores impactos de corto y mediano plazo que podrían afectar a la seguridad alimentaria, serán resultado de la producción masiva de biocombustibles de primera generación que dependan, casi exclusivamente, en cultivos alimenticios.



Cuadro1. Posibles Efectos de Biocombustibles Modernos (REDPA, 2008)

<b>Ámbito</b>	<b>Clase de efecto</b>	<b>Ejemplo</b>
Alimentario	Seguridad alimentaria	Incremento en precios de alimentos y efecto en su disponibilidad.
Ambiente	Biodiversidad	Intensificación de monocultivos, conversión de ecosistemas naturales en agrícolas. Modificación en la distribución de especies.
	Uso de químicos	Incrementos en el uso de químicos que contaminan aire y agua.
	Deforestación	Efectos en la vida silvestre, erosión de suelos, incremento en efectos de gases de tipo invernadero.
	Efectos inesperados	No previstos bajo este tipo de esquemas
Salud	Contaminación, Toxicidad y alergenidad	Disminución de efectos asociados al uso de combustibles fósiles. Efectos asociados al uso intensivo de agroquímicos.
Agrícola	Uso de la tierra y estabilidad en el suministro de materias primas	Competencia con alimentos, cambios en el uso de la tierra, Sustentabilidad, tendencia al monocultivo y desequilibrios en los precios.
	Práctica agrícola.	Capacitación por sustitución de prácticas tradicionales, recursos requeridos por cultivos intensivos. Incrementos en precios de los cultivos agrícolas.
Energía	Seguridad energética	Incrementos en el suministro de combustibles, estabilidad en los precios, diversificación de fuentes de suministro.
Económico	P/el consumidor	Precios a nivel detalle
	P/el productor	Rendimiento, valor agregado, costos de insumos y de producción. Nuevos productos competitividad.
	P/el procesador	Utilidad, aceptación de los productos, competitividad Generación de nuevas actividades económicas, sustitución de importaciones, acceso a la tecnología, exportación.
	Empleo	Rural/Urbano, Tipo de calificación, Tasa.
Social	Individuos	Elección de los consumidores, transparencia, accesibilidad, participación. Migración rural-urbana
	Instituciones	Concentración de poder, confianza institucional, complejidad regulatoria, procesos de certificación.
	Necesidades sociales	Oportunidades, costos de oportunidad, participación social en dar dirección a una tecnología, calidad de vida, necesidad de generar acuerdos entre actores sociales.
	Pobreza	Modificación de índices (expectativas de vida, estándares de vida, educación
	Empleo Desigualdad	Trabajo infantil, trabajo para la mujer, En distribución del ingreso, en oportunidades.

## **4.2. Tipos, estadísticas y procesos para producir biocombustibles**

### **4.2.1. Tipos de biocombustibles líquidos**

La bioenergía es energía producida a partir de materia orgánica o biomasa. En el contexto global, la bioenergía se está convirtiendo en una industria altamente dinámica. El acelerado crecimiento en la producción y uso de los biocombustibles, a nivel global, requiere una detallada revisión de las implicaciones y oportunidades que tendrá su desarrollo en México. Las tecnologías que utilizan bioenergéticos para producir energía ya sean en forma de calor, electricidad o combustibles para el transporte están avanzando rápidamente. Recientemente, el principal enfoque se ha dirigido hacia los biocombustibles líquidos, en particular hacia el bioetanol y el biodiesel (SAGARPA 2009).

Actualmente, a nivel global se producen dos principales tipos de biocombustibles líquidos: el bioetanol y el biodiesel (Cuadro 2). El bioetanol se produce a partir de tres principales fuentes de insumos bioenergéticos: 1) Los azúcares solubles que pueden ser directamente fermentados (sacarosa, glucosa y fructuosa), contenidos en cultivos como la caña de azúcar, remolacha azucarera y sorgo dulce. 2) Los azúcares (glucosa) derivados del almidón de una amplia gama de cultivos cereales como maíz, sorgo, trigo, arroz y tubérculos como la yuca, principalmente; Estados Unidos de Norteamérica (USA) es el principal productos de bioetanol a partir del grano de maíz. 3) El Biodiesel es el segundo biocombustible líquido más

importante y se produce a partir del aceite vegetal de una amplia gama de cultivos y grasa animal. La Unión Europea es el principal productor de biodiesel a partir del aceite de la colza y girasol, seguido por USA y Brasil que producen biodiesel de soya y varios países asiáticos que lo producen a partir de palma de aceite. El aceite vegetal y/o grasas animales son transformados a biodiesel a través del proceso de transesterificación la cual puede ser con base química, física o enzimática. La transesterificación con base química es la más usada.

Cuadro 2. Principales tipos de biocombustibles líquidos y principales insumos bioenergéticos necesarios para su producción.

<b>Biocombustible</b>	<b>Insumo bioenergético</b>	<b>Principales azúcares derivados</b>
Etanol de primera generación	Azúcares solubles	Sacarosa, fructosa, glucosa
	Almidón	Glucosa
Etanol de segunda generación	Celulosa	Glucanes, galactanes, manosans
	Hemicelulosa	Xilanes, arabinans
Biodiesel	Grasa vegetal y animal	

#### **4.2.2. Estadísticas de producción de biocombustibles líquidos.**

Aún y cuando actualmente existe alto interés en la producción y uso de los biocombustibles líquidos, a nivel mundial su producción y uso sigue siendo limitada, aunque tiende a incrementarse significativamente. Según la (FAO, 2008<sup>a</sup>), la matriz energética mundial corresponde a 11,400 Megatoneladas equivalentes de petróleo (Mtoe); de las cuales, el 81% se deriva de energía fósil y

el 19% restante de energía renovable; de la cual, el 6, 2, 1 y 10 por ciento corresponde a energía nuclear, hídrica, eólica y biocombustibles, respectivamente. De éstos últimos, el 8.1% corresponde a biocombustibles sólidos, principalmente la leña utilizada en la mayoría de los países en vías de desarrollo y sólo el 1.9% corresponde a biocombustibles líquidos; de los cuales, el 1% se utiliza en el sector de transportes y el 0.9% en otros sectores, como la generación de electricidad. Se estima que para 2030 la producción y uso de biocombustibles líquidos para el sector de transportes se incremente hasta 4%. En México, la fuente y producción de energía primaria se distribuye en 92.5% de combustibles fósiles y 7.5 de energía renovable, de la cual, el 3.4 corresponde a biocombustibles originados en la leña y el bagazo de caña de la industria azucarera. La producción de biocombustibles líquidos en México es insignificante.

En la Figura 1 se muestran las estadísticas básicas de la producción total por región de los Biocombustibles líquidos (etanol + biodiesel) en los últimos cinco años (2005-2009). Se observa que USA produce aproximadamente la mitad del total seguido por Brasil, la Unión Europea y Asia y Oceanía. En el resto del mundo, incluyendo México, la producción es insignificante. A partir de la gráfica de Durante el período en cuestión la producción mundial y por región se incrementó 147% en forma lineal, con una tasa de incremento anual de 14.99 billones de litros. En México, la producción de tres millones de litros (sin considerar el año 2005) es muy baja, comparada con el resto de países, sin embargo la tendencia en crecimiento es significativa.

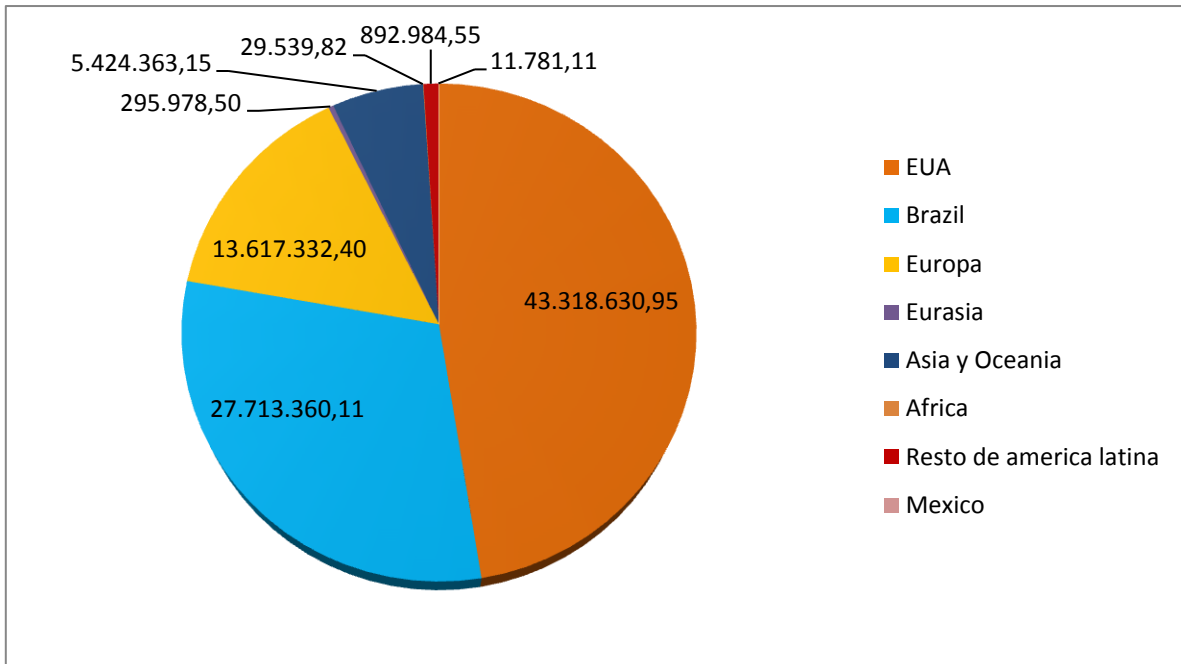


Figura 1. Producción mundial de biocombustible en el 2009 (billones de litros año<sup>-1</sup>).

#### 4.2.3. Estadísticas de producción de biodiesel.

La producción mundial de biodiesel se mantuvo relativamente estable entre dos y tres billones de toneladas anuales hasta el 2004, y no es hasta el 2005, cuando la producción se dispara hasta alcanzar en el 2008 11,1 billones de toneladas. Con ello se registra una tasa anual de crecimiento de 37.4 % para el período 2004-2008. En la actualidad, la producción mundial de biodiesel se concentra en pocos países. Por ejemplo, del total durante el 2006, alrededor del 75% se produjo en Europa, donde Alemania contribuyó con el 55%, y la mayor parte del 25% restante fue producido por Estados Unidos de América. Estas cifras son muy dinámicas

entre los países de América que reportan la producción de biodiesel a cierta escala comercial (como Canadá, Brasil y Argentina), mientras que la mayoría de los demás países informan una producción incipiente o en una escala de prueba (IICA 2010).

La Figura 2 muestra la distribución, entre los diferentes países, de la producción mundial de biodiesel. Como se observa, los países con más producción de biodiesel son Europa y EUA, mientras que México se encuentra muy abajo con menos del 1% como lo muestra la Figura 2.

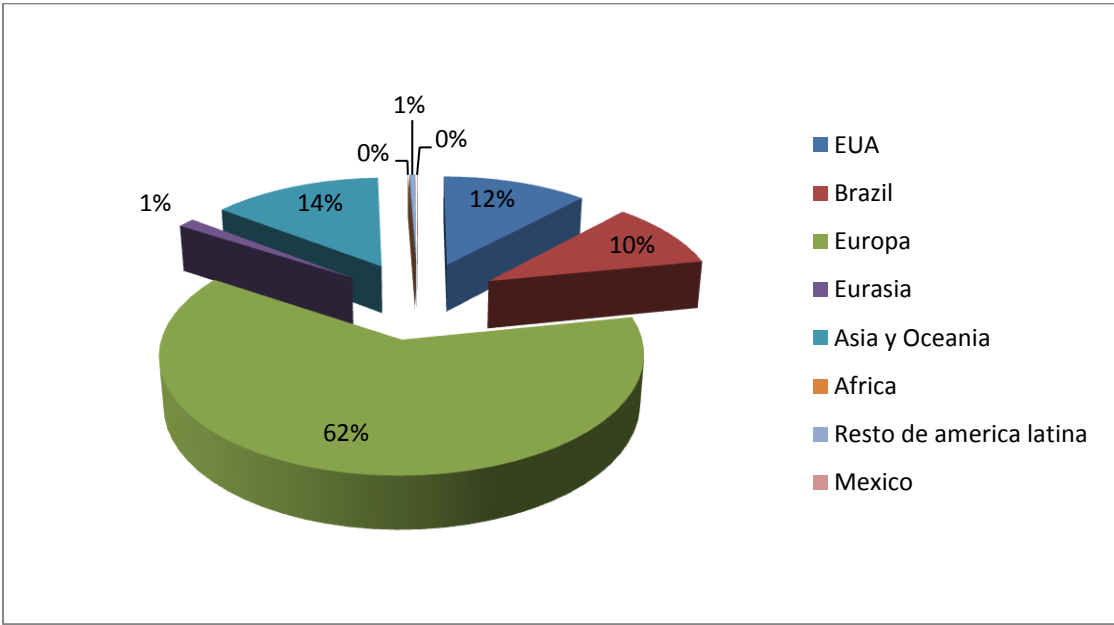


Figura 2. Distribución por región de la producción Total de biodiesel (17.89 billones de litros por año) en el año 2009. Fuente:(USA-DOE, 2010).

#### **4.2.4. Proceso para producir biodiesel a partir de aceites vegetales.**

La clave de la economía de la producción del biodiesel se encuentra en las materias primas utilizadas. En Colombia se han realizado varias investigaciones, a nivel de laboratorio y planta piloto, con el fin de obtener biodiesel a partir de diversas materias primas, tales como aceite de palma, aceite de higuera, aceites fritos y subproductos de la industria avícola. El aceite de higuera pertenece al grupo de materias primas consideradas estratégicas para la producción de biodiesel en el país. En lo referente a motores diesel, el biodiesel, dadas las ventajas técnicas, estratégicas y ambientales que ofrece, constituye la mejor alternativa para sustituir parcial o totalmente al combustible diesel derivado del petróleo (Benavides, Benjumea y Pashova, 2007).

El biodiesel ha alcanzado gran interés como fuente alternativa de energía, ya que presenta muchas características atractivas: no tóxico, biodegradable, no inflamable, técnicamente viable y competitivo económicamente.

Desde una definición general, el biodiesel corresponde a un combustible renovable, derivado de lípidos naturales como aceites vegetales o grasas animales, obtenido a través de un proceso industrial relativamente simple de transesterificación del aceite vegetal. Después del proceso y a diferencia del aceite que le dio origen, el biodiesel tiene una viscosidad semejante a la del diésel derivado del petróleo y puede reemplazarlo en los usos más comunes (NU.2009).

El diagrama de flujo que muestra el proceso para la obtención del biodiesel se presenta en la Figura 3 y consta de cinco etapas principales: Acondicionamiento de la materia prima, Extracción del Aceite, Transesterificación, Separación del producto y Obtención de los co-productos. El acondicionamiento de la materia prima es un proceso previo a la extracción del aceite, el cual tiene por objeto el pesado y selección de la semilla su limpieza y calentamiento, esto último, con el fin de facilitar la extracción del aceite. El aceite es extraído de las semillas en forma mecánica, mediante prensado, en forma química con solventes y/o generalmente utilizando ambos métodos; ya que con el prensado sólo se recupera aproximadamente entre el 50 y 70% del aceite; y el restante es generalmente extraído con solventes. Durante el proceso de extracción del aceite se genera una “torta” rica en nutrimentos que puede utilizarse para alimentación de ganado si es desintoxicada como biofertilizante o para la generación de energía. El aceite se somete al proceso de transesterificación, en el que se mezcla con alcohol y un catalizador a temperatura, proporciones, mezclado y presiones óptimas. Lograda la transesterificación, el producto pasa por un proceso de neutralización y destilación para recuperar el alcohol que no reaccionó y ser reciclado. Después, por medio de decantación o centrifugación, se separa en biodiesel crudo como producto principal y glicerina cruda como co-producto. La glicerina cruda puede ser utilizada como alimento para ganado o una vez sometida a un proceso de purificación esta puede ser utilizada en la industria farmacéutica. El biodiesel crudo pasa por un proceso de purificación (lavado y secado), el cual, después de



haber pasado por pruebas de control de calidad, puede ser empacado y almacenado para su uso.

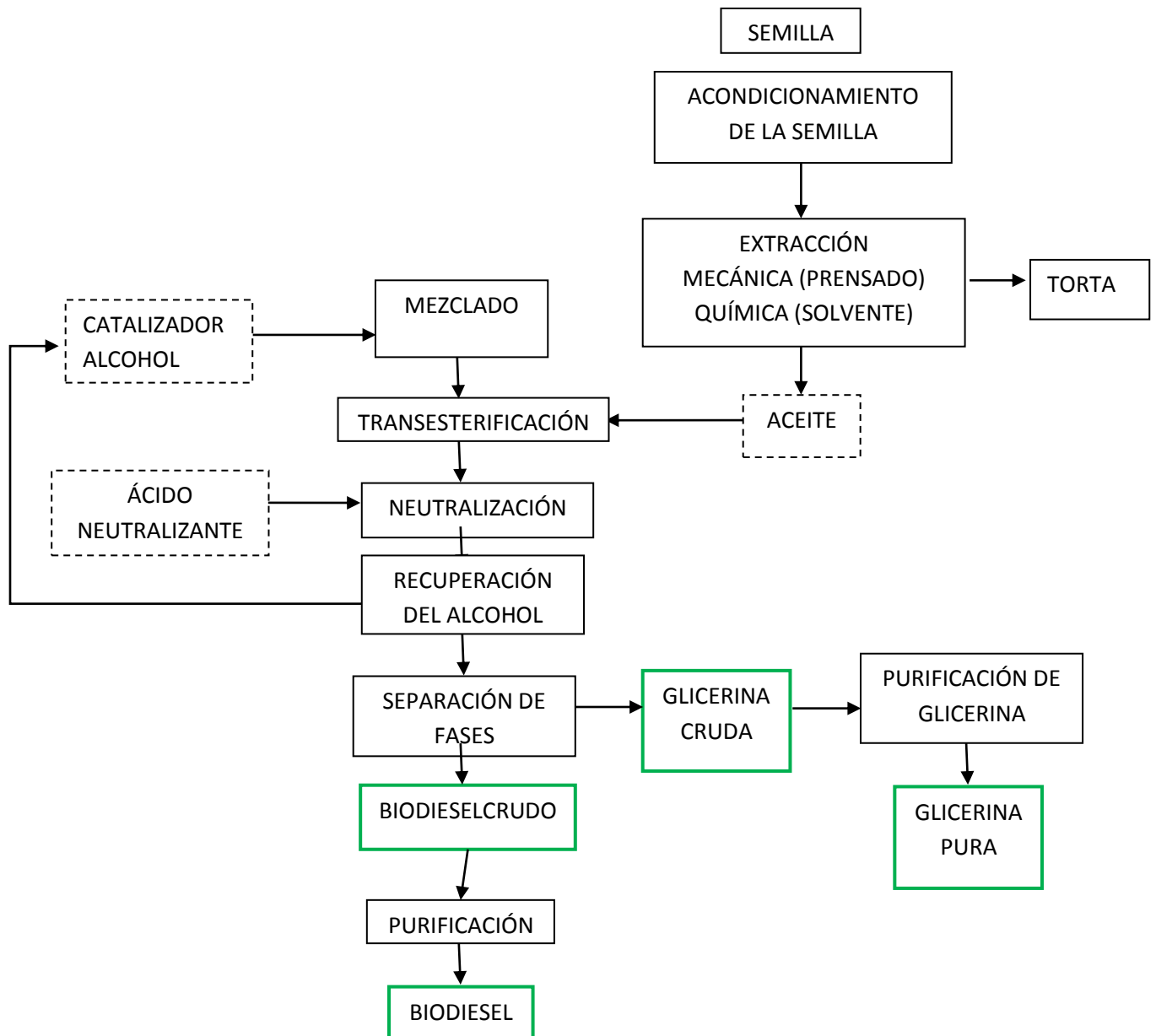


Figura 3. Diagrama de Flujo para Producir Biodiesel a partir del Aceite Vegetal.

### **4.3. MARCO LEGAL PARA PRODUCIR BIOCOMBUSTIBLES.**

#### **4.3.1. Políticas e instituciones sobre biocombustibles.**

El 1 de febrero de 2008 se publicó en el Diario Oficial de la Federación la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticas, primer cuerpo legal para normar el desarrollo de la industria de los biocombustibles en México (*DOF 2008*). Aquí se establecen los principios rectores que guían la actividad de los biocombustibles. Estos principios guardan relación con los fines que persigue la ley. Por ejemplo, el estricto cumplimiento de las normas de calidad y cantidad del producto; la protección de los derechos de los consumidores (*OLADE 2007*). En el Aspecto Ambiental establecer la obligatoriedad de cuidar el medio ambiente en todas las fases de la industria de los biocombustibles; así como la responsabilidad de remediación e indemnización por daños ambientales. También se puede indicar que los proyectos de biocombustibles se someterán a un proceso de Evaluación de Impacto Ambiental (*OLADE 2007*).

Sobre los Aspectos Agrícolas señalar que el Estado adoptará las políticas necesarias para fomentar al sector agrícola especialmente en el cultivo de especies vegetales que se utilizan como materias primas para la industria de los biocombustibles (*SAGARPA, SENER 2009*).

En el aspecto social mediante la ley se busca la reactivación del sector agrícola, la generación de empleo y por ende una mejor calidad de vida para la población. La Participación ciudadana solicita que se elaboren normas para participar en el proceso de aprobación de proyectos que generen o puedan generar impacto ambiental (Ajila y Chiliquinga, 2007). Es necesario reconocer y otorgar a la ciudadanía el acceso a la información pública de las entidades u organismos involucrados en los biocombustibles y Exoneraciones o rebajas impositivas y arancelarias para los automotores que utilicen biocombustibles (Ajila y Chiliquinga, 2007).

En el contexto de la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos, se reconoce la responsabilidad multidisciplinaria para el desarrollo del tema, con la finalidad de brindar certidumbre a la producción de insumos, bioenergéticos y al consumo. Se reconocen las siguientes áreas de acción: La producción de insumos en apego de criterios de sustentabilidad para la producción de bioenergéticos, considerando la elaboración del programa y su evaluación periódica, a través del otorgamiento de permisos para la producción de insumos, a cargo de la SAGARPA. La SENER está facultada para regular la producción, almacenamiento, transportación y comercialización de los biocombustibles, a través del otorgamiento de permisos. La SEMARNAT, por su parte evaluará y vigilará los aspectos de sustentabilidad dentro de todas las actividades relacionadas con los

bioenergéticos que puedan generar emisiones a la atmósfera, agua o suelo (SENER, 2008).

#### **4.3.2. Leyes y reglamentos para producir biocombustibles.**

El marco legal que regula las actividades del sector privado para la producción de biocombustibles se ha venido desarrollando a lo largo de las últimas décadas ligado al interés específico que ciertos países han puesto en estos productos como alternativa energética. Brasil es el primer país que inició sus actividades con este enfoque y por tanto observo la necesidad de crear las condiciones para promover la producción y uso del bioetanol y posteriormente del biodiesel. La normativa más relevante de Brasil se lista a continuación (Ajila y Chiliquina, 2007).

En 1993, se expidió la obligatoriedad de la mezcla de alcohol anhidro y gasolina. En 2000, se crea el Consejo Interministerial del Azúcar y del Alcohol (CIMA), para definir la política del sector. En 2005, se establece porcentajes mínimos de mezcla de biodiesel/diesel y define a la Agencia Nacional de Petróleo como órgano responsable por la regulación y algunos países de América Central mostraron interés sobre la aplicación del bioetanol como energético en la década de los ochenta y establecieron un marco legal de soporte, como en el caso de Guatemala (1985) y Honduras (1988) que expidieron sus leyes sobre alcohol carburante (OLADE 2007).

En la presente década, varios países expidieron leyes u otras disposiciones legales, como paso previo para lograr la participación de los inversionistas privados en la producción, como el caso de Nicaragua (2002), Perú (2003), Colombia , Costa Rica , Ecuador (2004), Paraguay , Bolivia (2005) y Argentina (2006). Actualmente, varios países se encuentran en diferente fase de la elaboración y expedición de sus leyes respectivas (Chile, Cuba, El Salvador, México, Nicaragua, Panamá, República Dominicana, Uruguay, Venezuela), y en algunos casos, actualización de las leyes en países como: Costa Rica, Guatemala y Honduras (OLADE 2007).

#### **4.3.3. Programas de apoyos y financiamiento para producir biocombustibles.**

Aspecto Tributario. Señalar los beneficios a los que pueden acceder los agentes económicos que operen en la industria, determinando en primer lugar quienes son los sujetos beneficiarios y el procedimiento para calificar a este régimen. Incentivos al Sector agrícola, exoneraciones tributarias a la renta líquida obtenida por pequeños y medianos agricultores que cultiven especies necesarias para la industria de los biocombustibles. Exoneración de aranceles a los insumos agrícolas. Creación de Programas Especiales Relacionados con la Industria como Programas para Investigación sobre Biocombustibles, Programas para adquisición y renovación de tecnología aplicada en la industria, Programas sociales (SAGARPA y SENER 2009).

Fases de la Producción de Biocombustibles. Determinar si un mismo actor puede participar en toda la cadena productiva. En todas las fases se debe contemplar la obligación de los agentes económicos de reportar información sobre su actividad a la Autoridad de Aplicación con la periodicidad que esta establezca.

Producción; Medio para la generación de empleo-fin social, obtención del componente vegetal, materias primas nacionales, registro de productores, habilitación o licencia para operar, actividad amigable con el medio ambiente, obligación de observar normas técnicas o estándares internacionales(Normas de calidad), (SAGARPA, SENER 2009).

#### **4.3.4. Rentabilidad de los biocombustibles.**

La producción y uso de los biocombustibles actualmente no es redituable, por lo que están altamente subsidiados por los gobiernos. Un litro de biodiesel en la Unión Europea presenta un subsidio de aproximadamente un dólar de USA, mientras que en USA el bioetanol cuenta con subsidios que varían entre 0.40 y 0.60 dólares. A nivel mundial el bioetanol producido en Brasil a partir de la caña de azúcar es el único ejemplo que muestra rentabilidad positiva.

En el entorno ecológico, los biocombustibles representan rentabilidad y sustentabilidad para el desarrollo del campo, siendo los más usados en la actualidad, el bioetanol y el biodiesel, cuyo uso tiene ventajas ambientales,

comparadas con los combustibles derivados del petróleo. Lo anterior (en comunicación personal) informó la bióloga Karina de la Paz García Mariscal, investigadora de bioenergéticos en el campo experimental Tecomán, Colima del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP).

#### **4.4. El cultivo de Higuierilla (*Ricinus communis* L.)**

##### **4.4.1. La planta de higuierilla**

La higuierilla, (*Ricinus communis* L.) o también conocida como tártago, higuiereta o ricino, sobrevive y puede crecer en las tierras marginales, bajo condiciones limitantes de humedad en regiones subhúmedas y semiáridas. Es originaria de África de donde se extendió al Medio Oriente como planta silvestre. En la India y la China fue conocida hace unos 3000 años y probablemente se introdujo en América después del descubrimiento. Los egipcios hace más de 4000 años, empleaban la higuierilla en la iluminación o alumbrado de sus casas, parece que era una planta altamente estimada porque en algunas tumbas egipcias se han encontrado sus semillas. La higuierilla es una planta que se encuentra distribuida desde el nivel del mar hasta los 3000 msnm. Se encuentra en los bordes de los caminos, de las quebradas y de los ríos, en solares, en huertas y también sembrada en cultivos comerciales con todas las normas técnicas de la agricultura moderna (OSORNO 1986). Crece silvestre en la mayor parte de las regiones tropicales sus semillas son venenosas por lo cual no son consumidas

directamente sino que son prensadas y sometidas a extracción por solventes para obtener aceite y torta (OSORNO 1986).



Figura 4. Características de la semilla de higuera.

Su taxonomía nos dice que es una planta arbustiva que resiste climas variados. Todos los autores hablan de una sola especie *Ricinus communis* y de muchas variedades botánicas con características bien definidas (OSORNO 1986).

- *Orden: Euphorbiales*
- *Familia: Euphorbiaceae*
- *Genero: Ricinus*
- *Especie: Ricinus communis*



La planta de higuera tiene un contenido de aceite entre el 40 y 60% según las variedades comerciales mejoradas las cuales presentan un crecimiento mejorado, amplias propiedades físicas y químicas en el cultivo (Bonjean, 1991), también existen variedades que producen hasta  $4 \text{ t ha}^{-1}$  o más. Según Galeano, (1992), el rendimiento de aceite en kilogramos por Hectárea depende del manejo y la variedad ya que el grano contiene 46% a 48% de aceite. El producto activo es la risina que es altamente tóxica para el hombre y los animales, debiendo tener cuidado con los residuos de este compuesto en la extracción del aceite.

#### **4.4.2. Tipo, cantidad y calidad del aceite.**

Hoy día, el aceite de ricino se usa en más de 700 aplicaciones. Según el EMBRAPA (2004) el aceite de ricino es el mejor para producir biodiesel por ser el único soluble en alcohol y que no requiere calor, con el consecuente gasto de energía que exigen otros aceites vegetales. Constituye la única fuente comercial de ácidos grasos hidroxilados, pues posee alrededor de un 85% de ácido ricinoleico. El aceite normalmente no es considerado como comestible, sin embargo posee múltiples usos:

- El aceite refinado tiene uso farmacéutico.
- En aceite bruto se usa como emulsificante para desinfectantes del hogar, industria y pesticidas.

- Modificado se emplea como aceite hidráulico, disolvente de pinturas, impregnación de tintura para textiles y cuero, fusión de ceras naturales y químicas así como en la fabricación de polímeros.

El creciente desarrollo de la aviación y el constante empleo de motores de altas revoluciones, le dan gran demanda al aceite como lubricante por su gran densidad, porque conserva su viscosidad a diferentes temperaturas y porque solo se congela a los 10°C bajo cero. Como purgante drástico puede usarse sin peligro pues no irrita el intestino (Samayoa. 2007).

El aceite de higuierilla posee características químicas que lo califican como el único de su naturaleza. El cual está compuesto casi exclusivamente (90%) de un único ácido graso (ácido ricinoleico) que contiene un radical hidroxilo que lo hace soluble en alcohol a baja temperatura, es muy viscoso y propiedades físicas especiales (Silva al 2005).

#### **4.4.3. Sub-productos obtenidos.**

Una vez extraído el aceite de la semilla de higuierilla se obtienen como subproductos la torta y la glicerina.

La torta de higuierilla no se utiliza como alimento animal debido a la presencia de toxinas y de sustancias alergénicas. Su empleo se limita especialmente en aplicaciones de fertilizantes orgánicos ya que posee alto contenido de proteína,

con valores que varían entre el 36% y el 48% (Samayoa. 2007). Solamente después de desintoxicar la torta esta podría ser utilizada como materia prima, en la elaboración de concentrados para ganado bovino. Actualmente se están realizando investigaciones sobre la forma de desintoxicar la semilla. (EMBRAPA 2004). La torta de higuera contiene nitrógeno, fósforo y potasio, después de la extracción de aceite, esta se puede utilizar como biofertilizantes, mejorador del suelo y como un insecticida biológico (Delgado 2006). Además de la torta, como producto del proceso industrial para obtener biodiesel se obtiene glicerina, la cual puede ser utilizada en la industria farmacéutica.

#### **4.4.4. Residuos de cosecha producidos.**

Los residuos de cosecha de la higuera son las hojas y tallos, principalmente, las cuales se depositan en el terreno, para incorporarlas al suelo y mejorar su condición de este y evitar la erosión. En otros estudios están proponiendo utilizar los tallos para la elaboración de papel y bioetanol de segunda generación.

#### **4.4.5. Uso actual de los productos de la higuera.**

El aceite se utiliza para la producción de biodiesel que es usado en la industria de motores de alta revolución, en pinturas, lacas, barnices, plásticos, fertilizantes, para uso antiparasitario en humanos. La torta es utilizada como biofertilizante y los residuos de cosecha se incorporan al terreno para mejorar del mismo.

#### **4.4.6. Superficie cultivada con higuera en Veracruz.**

Actualmente en el Estado de Veracruz no se reporta superficie cultivada con higuera, sólo se encuentra superficie en investigación y en experimentación para su cultivo comercial.

### **4.5. Tecnología de producción**

#### **4.5.1. Limpieza del terreno.**

La limpieza del terreno debe realizarse para dejar libre el terreno de malezas con el propósito de facilitar el barbecho del terreno. Esta actividad se realiza con maquinaria o manual, los residuos que se quedan en el terreno se incorporan al suelo (Samayoa 2007).

#### **4.5.2. Preparación del suelo.**

Esta actividad es una parte importante en la plantación de la higuera porque se acondiciona al suelo por medio del arado de forma mecánica esto para airear, exponer plagas, más penetración de raíces, infiltración y drenaje del agua y los pasos de rastra para romper terrones. El surcado consiste en trazar surcos de manera conveniente de acuerdo al arreglo topológico del cultivo, también sirve como apoyo geométrico para la planeación; desalojar volúmenes excesivos de agua superficial en caso de lluvias abundantes (Mavesa 2000).

#### **4.5.3. Siembra.**

La siembra se debe realizar manualmente, sobre uno de los costados del surco, sobre tierra avenida, la distancia entre surcos debe ser de dos metros y 1.5m entre plantas. Con cuatro kilos de semilla se siembra un hectárea aproximadamente. La mejor época para la siembra es al inicio de las lluvias. Esta se hace de forma directa y su distancia de siembra depende de la variedad y del tipo de cultivo a establecer. Se siembra por sitio de 3-4 semillas a 3-5 cm de profundidad para conseguir un alto porcentaje de germinación, se recomienda usar semilla certificada. La germinación puede variar en un ciclo de 8-10 días. Durante los dos últimos meses del cultivo es importante que este no reciba agua (OSORNO 1986).

#### **4.5.4. Fertilización.**

La higuera es exigente en nutrientes para producir buenos rendimientos, razón por la cual se debe conocer el nivel nutricional del suelo mediante el análisis en el laboratorio, para suplir los nutrientes que le hagan falta. Cuando el pH está debajo de 5 se puede aplicar cal para corregir el pH, por lo menos tres meses antes a la siembra (Solares 2005). Altos niveles de nitrógeno perjudican la cantidad de flores y frutos pues se incrementa el desarrollo de hojas innecesarias. Para obtener un adecuado equilibrio se debe hacer análisis de suelos y darle importancia a las aplicaciones de calcio y fósforo (OSORNO 1986).

#### **4.5.5. Control de maleza y raleo**

El cultivo de higuera es sensible a la competencia con las malezas. Estas pueden reducir la productividad del cultivo en el periodo crítico de competencia por nutrientes que es en los primeros 70 días después de la emergencia de la planta. Se pueden usar diferentes métodos de control de malezas manual, mecánico, cultural con coberturas vegetales y químico con uso de herbicidas, integrando o involucrando uno o más métodos al mismo tiempo de los ya mencionados. Cuando hay escasez de mano de obra se pueden usar herbicidas selectivos, y utilizando correctores del pH del agua para lograr mayor eficiencia en el control (Samayoa 2007). A los 8-10 días germinan las semillas y a los 30 días aproximadamente se debe realizar el primer raleo, eliminando las plantas más débiles, con crecimiento defectuoso, con daños mecánicos, (OSORNO 1986).

#### **4.5.6. Control de Plagas y enfermedades.**

Las plagas más importantes que deben controlarse son las que atacan el follaje como ácaros, chicharritas y otras. Y las enfermedades de esta planta es la presencia de hongos que dependen del ambiente, estos atacan raíz y tallo, dañando seriamente a la planta, es necesario la rotación de cultivos .

#### **4.5.7. Cosecha del grano de higuera.**

Es la realizada cuando la madurez fisiológica del fruto ha llegado a su final y en esta etapa el fruto inicia un cambio de color de verde a verde oscuro o café oscuro y se empieza a rajarse la cáscara del fruto en forma longitudinal, especialmente en la hendidura natural que tiene el fruto. Cuando las variedades son dehiscentes o que sueltan la semilla del fruto, se deben cosechar en horas frescas de la mañana antes que se deshidraten los frutos y suspender la cosecha en horas cercanas al medio día que es el período en que los frutos se abren y las semillas caen al suelo. (Samayoa 2007).

#### **4.6. Parámetros fisiológicos de la higuera (*Ricinus communis* L.)**

##### **4.6.1. Índice de Área Foliar (IAF).**

Se define generalmente como el área de una cara (el haz) de tejido fotosintético por unidad de superficie horizontal de suelo y representa el tamaño de la interfase planta-atmósfera, por lo que es la principal variable utilizada para modelar fotosíntesis y evapotranspiración, evaluar la radiación fotosintéticamente activa absorbida (FAPAR) y describir el microclima de la planta (.Aguirre et al., 2010), indica que el IAF es una variable adimensional definida como el área total de una cara del tejido fotosintético por unidad de terreno; es aceptable en especies con hoja ancha ya que ambas caras de la hoja tienen la misma superficie. El Índice de área foliar (IAF) es una variable de vital importancia para el monitoreo de los cultivos y que se suele medir por muestreo destructivo en campo. Las

estimaciones indirectas no destructivas hechas con instrumentos ópticos son una alternativa competitiva a los métodos directos para las mediciones de frecuencia y en grandes áreas.

#### **4.6.2. Temperatura base.**

Temperatura base es la temperatura más baja en los procesos metabólicos. La temperatura de base, también se refiere a la temperatura mínima, es un parámetro esencial para la determinación del inicio y el final de la temporada de cultivo. Por ello, ha influido en el modelado de la fenología y en consecuencia del aumento de la biomasa. Algunos autores más difieren entre las distintas partes de plantas tales como tallos u hojas, aspectos regionales de la temperatura de base o adaptaciones de las plantas específicas, como la procedencia de árboles o cultivos. La mayoría de los valores de los parámetros citados para la temperatura base se basan en cálculos aproximados y se presentan en los libros de texto (Keller et al. 1997, Aufammer 1998).

#### **4.6.3. Eficiencia en uso de la radiación solar.**

La producción de biomasa total es una función de la radiación solar fotosintéticamente activa incidente (RFA<sub>inc</sub>), de la eficiencia con la que el cultivo la intercepta y la eficiencia con que la planta utiliza la energía interceptada (EUR) para convertirla en materia seca . Tanto la eficiencia de interceptación como la RFA interceptada (RFA<sub>int</sub>) tienen una relación directa con el Índice de Área Foliar, no



toda la radiación incidente durante los sucesivos rebrotes es utilizada por el cultivo, debido a que en los primeros periodos de crecimiento las plantas carecen del área foliar suficiente como para interceptarla. Es por ello que para lograr las mayores tasas de crecimiento se debería alcanzar valores próximos al Índice de Área Foliar (IAF) crítico que se define como el IAF cuando se intercepta el 95 % de la RFAinc y se estima que en alfalfa alcanza un valor de 5 .

#### **4.6.4. Partición de biomasa.**

La partición de biomasa se refiere a la proporción de biomasa que cada planta presenta en sus diferentes órganos. La expresión más conocida de la partición de biomasa es el índice de cosecha, el cual se define como la proporción de biomasa que un cultivo dado parte al producto económicamente importante, como es, en el caso de la higuera el grano.

#### **4.7. Zonificación agroecológica.**

Se considera a la diferenciación de los espacios encontrados en un ecosistema de acuerdo a las variables que afectan directamente al uso de la tierra. La zonificación permite así planificar no solo los sistemas de producción más apropiados, sino las prioridades de investigación así como facilitar la extensión de los resultados. Existen diversas propuestas de zonificación con diferentes prioridades, sin embargo en ellas prevalecen las condiciones ecológicas, tales como clima, suelo, topografía, etc., que permiten definir las unidades con una mayor uniformidad (Tapia 1984).

#### **4.8. Sistemas de Información Geográfica.**

Un SIG se define como un conjunto de métodos, herramientas y datos que están diseñados para actuar coordinada y lógicamente para capturar, almacenar, analizar, transformar y presentar toda la información geográfica y de sus atributos con el fin de satisfacer múltiples propósitos. Los SIG son una nueva tecnología que permite gestionar y analizar la información espacial y que surgió como resultado de la necesidad de disponer rápidamente de información para resolver problemas y contestar a preguntas de modo inmediato. Existen otras muchas definiciones de SIG, algunas de ellas acentúan su componente de base de datos, otras sus funcionalidades y otras enfatizan el hecho de ser una herramienta de apoyo en la toma de decisiones, pero todas coinciden en referirse a un SIG como un sistema integrado para trabajar con información espacial, herramienta esencial para el análisis y toma de decisiones en muchas áreas vitales para el desarrollo nacional, incluyendo la relacionada con la infraestructura de un municipio, estado o incluso a nivel nacional.

##### **4.8.1. ArcMap.**

Es un software de Sistema de Información Geográfico (SIG) creado por ESRI para mapeo digital. En ArcMap se puede visualizar y ver asociaciones en la información geográfica y modelos a diferentes escalas. ArcMap también permite la creación de mapas que llevan implícito mensajes o resultados de análisis

geográficos. ArcMap puede ser utilizado para entender las relaciones existentes en información espacial geográfica, para la toma de decisiones. Finalmente, la presentación de resultados en forma profesional de mapas, gráficos, tablas, etc. hace que ArcMap puede ser utilizado para publicaciones de artículos y material científico.

#### **4.9. El modelo de simulación Soil and Water Assessment Tool (SWAT).**

De acuerdo con Inurreta, (2012), El modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT) es un modelo matemático de simulación basado en procesos físicos, espacial y temporalmente explícito gracias a una versión con interfaz en Sistemas de Información Geográfica (SIG's), que trabaja a nivel de cuenca. El SWAT es capaz de simular procesos ecológicos, hidrológicos, químicos y ambientales, usando información disponible de clima, suelo, uso de suelo y topografía permitiendo predecir el impacto de prácticas de manejo sobre los recursos naturales. Los mayores componentes del modelo son 1) Clima, 2) Hidrología, 3) Nutrientes y Pesticidas, 4) Erosión del suelo, 5) Uso del suelo y crecimiento de cultivos, 6) Prácticas de manejo, 7) Flujo de agua en canales y 8) Cuerpos de agua. Para la parametrización espacialmente explícita, el SWAT divide las cuencas en subcuencas basado en la topografía del terreno y estas posteriormente son divididas en Unidades de Respuesta Hidrológica (URH) que son áreas geográficas que pertenecen a una misma subcuenca y comparten un mismo tipo de suelo, uso actual del suelo y pertenecen a un mismo rango de

pendiente. El rendimiento de cultivo es simulado por el modelo SWAT utilizando una simplificación del modelo EPIC. Utiliza un solo modelo para simular tanto para cultivos anuales como perennes. La fenología está basada en el acumulación diario de unidades calor sobre una temperatura base para cada cultivo; y la biomasa acumulada está basada en la radiación interceptada por el área foliar (LAI) y la eficiencia del cultivo en el uso de esta (RUE), el rendimiento está dado por la cantidad de esa biomasa que se destina a la parte del cultivo económicamente importante llamado índice de cosecha (HI). Inicialmente SWAT simula el rendimiento potencial de una especie vegetal dada y posteriormente, para obtener el rendimiento actual, el modelo considera tres factores de estrés: a) temperatura, b) nutrientes (nitrógeno y fosforo) y c) agua, los cuales reducen el rendimiento potencial en forma proporcional a la severidad del estrés, por lo tanto, para hacer estos cálculos el modelo requiere de una base de datos con los parámetros fisiológicos de cada cultivo, la cual la heredo del EPIC, la base de datos de la versión 2009 de ArcSWAT incluye 73 cultivos, además es posible añadir manualmente los parámetros de un nuevo cultivo para su simulación. Las variables de suelo utilizadas por SWAT son: a) Textura, b) Densidad aparente, c) Cantidad de agua disponible, d) Conductividad hidráulica saturada, e) Albedo del suelo y f) profundidad del suelo. Las variables climáticas que requiere el modelo son: a) Precipitación pluvial diaria, b) Temperatura diaria (máxima y mínima), c) Velocidad del viento, e) Humedad relativa, f) Radiación solar. El clima para simular

el rendimiento de todas las URH en una subcuenca dada es asignado de la estación meteorológica más cercana al centroide de dicha subcuenca dada.

Hasta el 2007 se habían realizado más de 150 publicaciones utilizando el modelo SWAT. Al ser un modelo tan versátil las aplicaciones han sido muy variadas. Lo usaron para estimar el efecto potencial en la carga de nitratos fluviales como resultado de sustituir los cultivos convencionales por *Miscanthus giganteus*, logrando simular el desarrollo del cultivo con razonable precisión y mostrando una reducción en las cargas de nitratos que depende del porcentaje de cambio de uso del suelo y la cantidad de nitrógeno aplicado. De la misma forma modelaron con SWAT la cantidad y dinámica de lixiviación del nitrógeno en los cultivos de papa y trigo en la cuenca Hamadan-Bahar en Irán en el periodo de 1997-2008. Las variaciones espaciales en el nitrógeno lixiviado fueron razonablemente aceptables. A partir de la simulación es posible detectar áreas de oportunidad para implementar mejoras en el manejo utilizaron el SWAT para medir la producción de agua en zonas agrícolas. Otra de las ventajas del SWAT es que es susceptible a ciertas modificaciones para adecuarlo a las condiciones de la zona en estudio.

## 5. MATERIALES Y MÉTODOS

### 5.1. Descripción del área de estudio.

La información siguiente que describe al estado de Veracruz fue adaptada a partir de los mapas temáticos digitales publicados por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). El estado de Veracruz se localiza entre los 17° 00' y 22° 20' de latitud norte y entre los grados -93° 35' and -98 ° 34' de longitud oeste, a lo largo del golfo de México, en el sureste tropical de México (Figura 5). La superficie total del estado de Veracruz es de 7.18 millones de hectáreas. Veracruz limita al norte con el estado de Tamaulipas; al sur con Oaxaca y Chiapas; al este con Tabasco y el Golfo de México; y al oeste con los estados de Puebla, Hidalgo y San Luis Potosí.

El Cuadro 3 muestra el porcentaje de superficie ocupado por diferentes grados de pendiente del terreno (topografía) y el uso actual del suelo; mientras que en el Cuadro 4 se muestra el porcentaje de superficie ocupado por las diferentes “clases de suelo y clima” del estado de Veracruz. Las Figuras 6, 7, 8 y 9 muestran los mapas con la distribución espacial de los grados de pendiente del terreno, el uso actual del suelo y las clases de suelo y climas.



Figura 5. Localización del estado de Veracruz en la república mexicana.

Cuadro 3. Grados de pendiente (topografía) del terreno y uso actual del suelo en el estado de Veracruz, México. Área total: 7.18 millones de hectáreas.

Intervalos de Pendiente del Terreno (%)	% del area	Uso Actual del Suelo	% del area
0 - 3	63	Pecuario (pastizales)	53
3 - 8	15	Agrícola	25
8 -15	8	Forestal	18
15-30	8	Cuerpos de agua y urbano	4
>30	6	Total	100
Total	100		

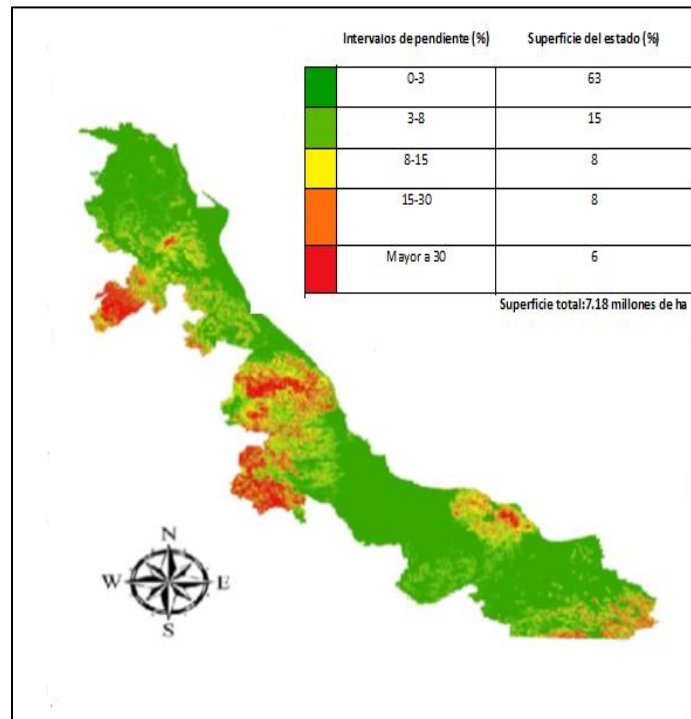


Figura 6. Topografía y pendiente del terreno en el estado de Veracruz.

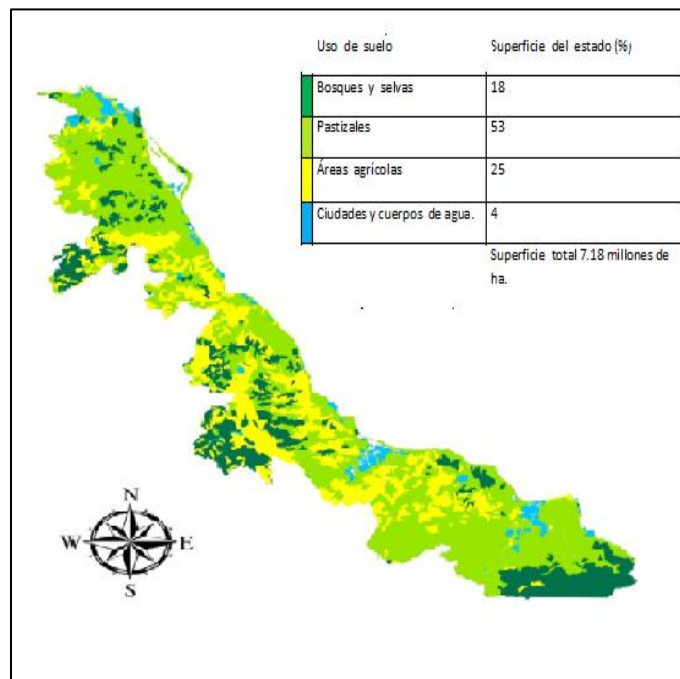




Figura 7. Distribución espacial del uso actual del suelo en el estado de Veracruz.

Como se puede deducir a partir del Cuadro 3, la mayor parte de la superficie del estado (78%) es plana con pendientes del terreno menores de 8% localizadas en todo el estado como se observa en la Figura 6. El 22% restante corresponde a áreas con pendientes mayores del 8%, localizadas principalmente en la zona centro y norte del estado como parte de las estribaciones de la sierra madre oriental y el volcán pico de Orizaba y en la zona de los Tuxtlas, en el sur del estado. El uso actual del suelo está dedicado principalmente a las actividades pecuarias con 53% de la superficie ocupada por pastizales, seguida por un 25% de la superficie dedicada a la agricultura y 18% ocupada con selvas y bosques. La Figura 7 muestra la distribución espacial del uso actual del suelo.

Como se deduce del Cuadro 4 y la Figura 8, en la mayor parte de la superficie del estado (86%), predomina el clima tropical cálido húmedo y sub-húmedo, en el 14% restante de la superficie predomina el clima semi-cálido, templado y semi-árido, los cuales se localizan principalmente en la zona montañosa del centro de Veracruz. La mayoría de los suelos del estado de Veracruz (67%) son suelos fértiles que van de suelos pesados con textura arcillosa, a suelos medios de textura franca. El 27% de la superficie del estado está cubierta con suelos menos fértiles como los suelos ligeros de textura arenosa y suelos ácidos, mientras que el 6% corresponde a suelos someros que se localizan principalmente en las zonas montañosas (Figura 9).

Cuadro 4. Clima (Clasificación de Köppen) y tipos de suelo (Clasificación de la FAO) en el estado de Veracruz, México. Área Total: 7.18 millones de hectáreas.

Tipo de Clima	% del área	Clase de suelo	% del área
Cálido, húmedo: Am <sup>1</sup>	38	Pesados, arcillosos (VR, GL) <sup>2</sup>	34
Cálido sub-húmedo: Aw	48	Medios, Francos (PH, FL, KS, CM, LV, O)	33
Semi-cálido, húmedo y sub-húmedo: (A)C(m) and (A)C(w)	7	Ligeros, Arenosos (RG, AR, CL, SC)	12
Templado, húmedo y sub-húmedo: C(m) and C(w)	6	Ácidos (AC, AN, NT, PL)	15
Árido y semi-árido: Bs	1	Someros (LP)	6
<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>Total</b>	<b>100</b>

<sup>1</sup>Clave para clasificación climática de Köppen. <sup>2</sup>Clave para Clasificación de suelos FAO.

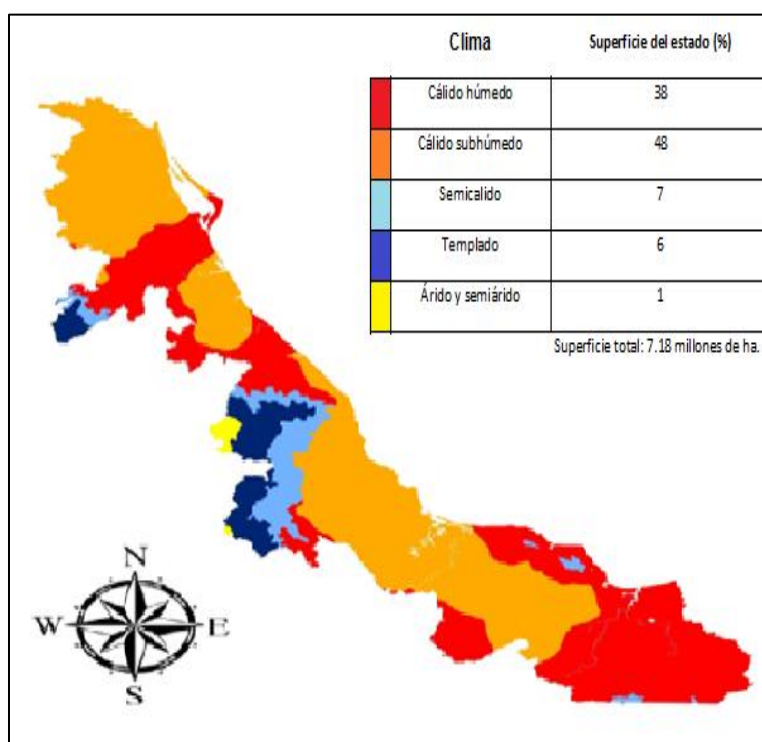


Figura 8. Climas del estado de Veracruz.

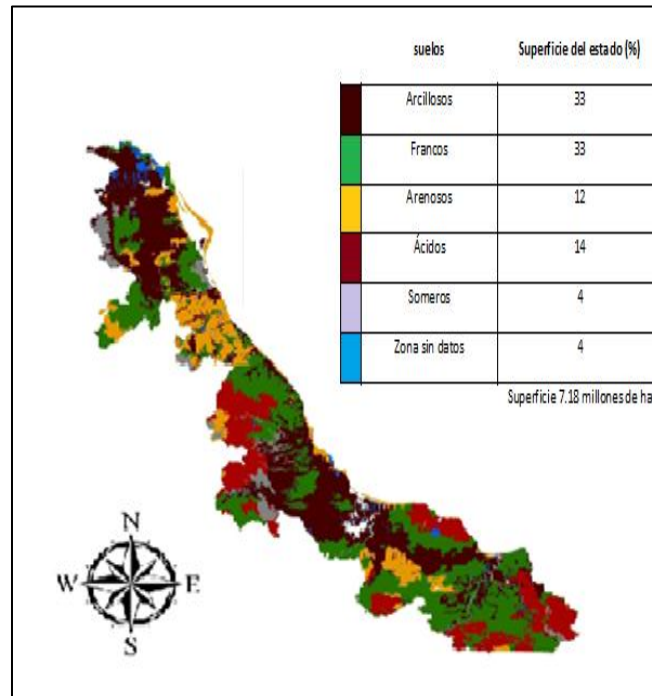


Figura 9. Mapa de suelos del estado de Veracruz.

De acuerdo con la descripción anterior, se puede decir que el estado de Veracruz presenta condiciones edáficas y climáticas adecuadas para el establecimiento de una amplia gama de cultivos que produzcan los insumos bioenergéticos necesarios (azúcares, almidón, biomasa y aceite) para la elaboración de biocombustibles líquidos (bioetanol de primera y segunda generación y biodiesel). Así mismo, se puede decir que más de la mitad de la superficie estatal está ocupada por actividades pecuarias (pastizales), donde se produce ganado bovino. El uso de sistemas de producciones más intensivas y eficientes, pueden producir la misma o mayor cantidad de alimentos (carne y leche) en menor superficie y en

forma más rentable, lo que podría liberar una superficie considerable de pastizales para otros usos, como en este caso, para producir biocombustibles.

## **5.2. Caracterización del cultivo de higuera.**

### **5.2.1. Puntos considerados para la caracterización de la higuera.**

La caracterización del cultivo de higuera se realizó considerando los siguientes ocho aspectos generales:

- Estadísticas generales de producción y producción potencial del insumo bioenergético y biodiesel en Veracruz.
- Cantidad y composición química de la higuera, su insumo bioenergético (aceite) y su tasa de conversión a biodiesel.
- Características de los co-productos resultantes del proceso industrial para producir el biodiesel.
- Cantidad y composición química del co-producto torta.
- Cantidad producida y composición química de los residuos de cosecha y producción de biodiesel de segunda generación.
- Uso actual y potencial de la higuera, co-productos y residuos de cosecha.
- Principales parámetros fisiológicos utilizados para simular el crecimiento y rendimiento de la higuera.
- Paquete tecnológico y costos de producción del cultivo de higuera.

Lo anterior se realizó a partir de una amplia revisión de literatura, primeramente de artículos con revisión por pares, publicados en revistas seriadas de circulación internacional; en segunda instancia se consideraron publicaciones de instituciones nacionales e internacionales de reconocido prestigio, especializadas en el tema de los biocombustibles líquidos y de investigación sobre tecnologías de producción de cultivos, finalmente y en el menor grado, también se consideró literatura no formal publicada en memorias de congresos, folletos técnicos, etc., y literatura publicada en internet.

### **5.2.2. Tecnología y costos de producción de la higuera.**

La tecnología de producción para la higuera se obtuvo a partir de la revisión de paquetes tecnológicos como sigue:

- En primer lugar se consideraron los paquetes tecnológicos publicados por el INIFAP para el estado de Veracruz.
- En segundo lugar se consideraron los paquetes tecnológicos publicados por el INIFAP para otros estados y regiones de México, pero que sus características fueran similares a las condiciones, principalmente edáficas y climáticas, del estado de Veracruz.

- En tercer lugar, se consideraron los paquetes tecnológicos publicados por diferentes instituciones mexicanas para el estado de Veracruz y otros estados y regiones de la república mexicana, pero con características similares a éste.
- Finalmente, cuando no se encontró literatura local o nacional, se utilizó información sobre la tecnología de producción utilizada en otros países, principalmente de Centro y Sudamérica, para condiciones edáficas y climáticas (tropicales), similares a las del estado de Veracruz.

Con relación a los costos de producción del cultivo de higuera, éstos se calcularon a partir de la asignación de un costo a todas las actividades, servicios, mano de obra e insumos utilizados y marcados por el paquete tecnológico. En todos los casos sólo se consideraron los costos de operación y en ningún caso se consideraron costos de inversión. El costo utilizado para cada rubro se tomó de los costos prevalecientes en el sector agrícola de la zona centro del estado de Veracruz.

### **5.2.3. Parámetros fisiológicos de la higuera.**

Los principales y más sensibles parámetros fisiológicos de la higuera que son utilizados por el modelo SWAT para simular su crecimiento y rendimiento, fueron identificados partir de los manuales y documentos soporte del modelo. Los valores de cada parámetro fisiológico que se utilizaron en la simulación fueron obtenidos

de la base de datos original del SWAT, de artículos científicos con revisión por pares publicados en revistas seriadas de circulación nacional e internacional; se consideraron también publicaciones de instituciones nacionales e internacionales de reconocido prestigio, con investigaciones sobre fisiología vegetal. En menor grado, también se consideró literatura no formal publicada en memorias de congresos, folletos técnicos, etc., y literatura publicada en internet. Finalmente, también se consideró la opinión experta de los especialistas del INIFAP que trabajan con higuera.

### **5.3. Simulación del rendimiento de la higuera.**

La simulación o estimación del rendimiento de la higuera se realizó con el modelo de simulación Soil and Water Assessment Tool (SWAT por sus siglas en inglés). En los siguientes apartados se describen los materiales y metodología sobre:

- El modelo de simulación SWAT.
- La cartografía y bases de datos utilizados.
- El procedimiento de simulación para cuantificar el rendimiento de biomasa y grano.
- Estimación del rendimiento teórico de biodiesel para la higuera.
- Cartografía del rendimiento de biomasa total, grano y el biodiesel asociado.

### **5.3.1. El modelo de simulación SWAT.**

De acuerdo con Inurreta, (2012) El modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT), es un modelo matemático de simulación basado en procesos físicos, espacial y temporalmente explícito gracias a una versión con interfaz en Sistemas de Información Geográfica, que trabaja a nivel de cuenca. El SWAT es capaz de simular procesos ecológicos, hidrológicos, químicos y ambientales, usando información disponible de clima, suelo, uso de suelo y topografía, permitiendo predecir el impacto de prácticas de manejo sobre los recursos naturales. Los mayores componentes del modelo son 1) Clima, 2) Hidrología, 3) Nutrientes y pesticidas, 4) Erosión del suelo, 5) Uso del suelo y crecimiento de cultivos, 6) Prácticas de manejo, 7) Flujo de agua en canales y 8) Cuerpos de agua. Para la parametrización espacialmente explícita, el SWAT divide las cuencas en subcuencas basado en la topografía del terreno y estas posteriormente son divididas en Unidades de Respuesta Hidrológica (URH) que son áreas geográficas que pertenecen a una misma subcuenca y comparten un mismo tipo de suelo, uso actual del suelo y pertenecen a un mismo rango de pendiente.

### **5.3.2. Cartografía utilizada**

El SWAT utiliza mapas básicos temáticos de topografía, suelos, uso actual del suelo y en este caso de hidrología superficial (ríos). Todos los mapas temáticos anteriores que se usaron en este trabajo están en formato "grid" (requerimiento del software) con cuadrícula de 90 m y se les asignó una proyección Universal



Transversa de Mercator (UTM) en zona 14 de hemisferio norte, con base en el elipsoide WGS84. Se eligió esta proyección por ser la que más se ajusta a la superficie de Veracruz, pese al hecho de que cierta superficie de la entidad se localiza sobre la zona 15 del mismo hemisferio. Se utilizaron cuatro mapas: a) El Modelo de elevación digital (DEM) que fue elaborado a partir del mapa de curvas de nivel de INEGI, b) El mapa de edafología que se elaboró a partir del mapa de edafología escala 1:250,000 serie 3 de INEGI y que se adaptó para cartografiar los suelos que presentan fase lítica, c) El mapa de ríos de INEGI y d) Un mapa de uso actual de suelo el cual, debido a los objetivos de éste trabajo, se elaboró considerando toda la superficie del estado como área potencial para la siembra de higuierilla, es decir, se elaboró un mapa con una sola categoría de uso actual del suelo (uso agrícola).

### **5.3.3. Bases de datos utilizadas**

Para simular el rendimiento de cultivos, el SWAT utiliza cuatro principales bases de datos: suelos, clima, manejo de la especie vegetal y parámetros fisiológicos de cada cultivo o especie vegetal que se simula. Mediante “catálogos” construidos por el “usuario”, el SWAT liga o relaciona las bases de datos con los mapas de suelo y uso actual del suelo (integrados en las URH), de tal manera que para cada URH cartografiada, SWAT genera un dato de rendimiento. En los siguientes apartados se describen las bases de datos utilizadas en este proyecto

### 5.3.3.1. Suelos

De acuerdo con el mapa de suelos del INEGI, en el estado de Veracruz se presentan 46 sub-unidades de suelos (clasificación FAO), para las cuales se integró (describió) su perfil típico a partir de los datos analíticos de 829 perfiles de suelo presentados por INEGI en las cartas edafológicas que cubren los siete estados de la zona tropical del sureste de México (Veracruz, Tabasco, Campeche, Yucatán, Quintana Roo, Chiapas y Oaxaca). En el Cuadro 5 se presenta, a manera de ejemplo, el perfil típico del suelo Cambisol calcárico; mientras que en el Cuadro 6 se presentan las fuentes de información a partir de las cuales se obtuvo y/o se estimó la información requerida por el modelo de simulación SWAT.

Cuadro 5. Características del perfil típico del suelo Cambisol calcárico.

Horizonte	Prof.	Text.	D.A.	H. D.	C.O.	C.H.S.	C.R.	Albedo	USLE K	C.E
A	153	28-30-42	1.37	0.13	3.36	4.1	0	0.05	0.18	1
B1	362	28-31-41	1.36	0.13	1.76	3.9	0	0.1	0.26	1
B2	455	25-37-38	1.37	0.14	0.41	5.6	0	0.2	0.26	1

**Prof.:** Profundidad en mm, **Text.:** textura en porcentajes de suelo total y en el siguiente orden arcilla-limo-arena, **D.A.:** Densidad aparente en  $\text{g cm}^{-3}$ , **H.D.:** Humedad disponible en  $\text{mm mm}^{-1}$ , **C.O.:** Carbono orgánico en porcentaje de suelo total, **C.H.S.:** Conductividad hidráulica saturada en  $\text{mm hr}^{-1}$ , **C.R.:** Contenido de rocas en porcentaje de suelo total, **Alb:** Albedo adimensional, **USLE K:** Factor "K" de la ecuación universal de pérdida de suelo, **C.E.:** Conductividad eléctrica en  $\text{dS m}^{-1}$ .

### 5.3.3.2. Clima

Se utilizaron los datos diarios de clima de 95 estaciones climatológicas distribuidas en todo el estado de Veracruz que se muestran en la Figura 10. Todas estas estaciones cuentan con datos de precipitación pluvial, temperatura máxima y mínima diaria de al menos 20 años durante el periodo 1960-2008. Con esta información y usando el generador climático del modelo Environment Policy

Integrated Climate (EPIC) desarrollado por Sharply y Williams (1990) se simuló diariamente la temperatura máxima, temperatura mínima, precipitación pluvial, radiación solar y humedad relativa para el periodo 1960-2010 y además, para cada una de las 95 estaciones se obtuvieron los datos estadísticos requeridos por SWAT, que a manera de ejemplo se muestran en el Cuadro 7, para la estación 30100.

Cuadro 6. Fuentes de datos y metodologías usadas para calcular los datos utilizados por el modelo de simulación SWAT.

Parámetro	Método usado para su obtención
Profundidad	Reportado en cartas edafológicas <sup>1</sup>
Textura	Reportado en cartas edafológicas <sup>1</sup>
Materia orgánica	Reportado en cartas edafológicas <sup>1</sup>
Conductividad eléctrica	Reportado en cartas edafológicas <sup>1</sup>
Conductividad hidráulica saturada	a partir de la textura del suelo <sup>2</sup>
Densidad aparente	a partir de la textura del suelo <sup>2</sup>
Capacidad de agua disponible	a partir de la textura del suelo <sup>2</sup>
Carbono orgánico	Carbono orgánico=0.95*(Materia orgánica) <sup>3</sup>

$$USLE\_K = \frac{K_{usle} \cdot 0.00021 * M^{1.14} * (12 - MO) + 3.25 * (C_{soilstr} - 2) + 2.5(C_{perm} - 3)}{100}$$

Albedo                      Estimado a partir del contenido de materia orgánica<sup>4</sup>

Fuentes: 1. INEGI, 2. Saxton, *et al.* (1986), 3. Neitsch, *et al.* (2005), 4. Ecuación de Harris (software Curve Expert 2.0.)

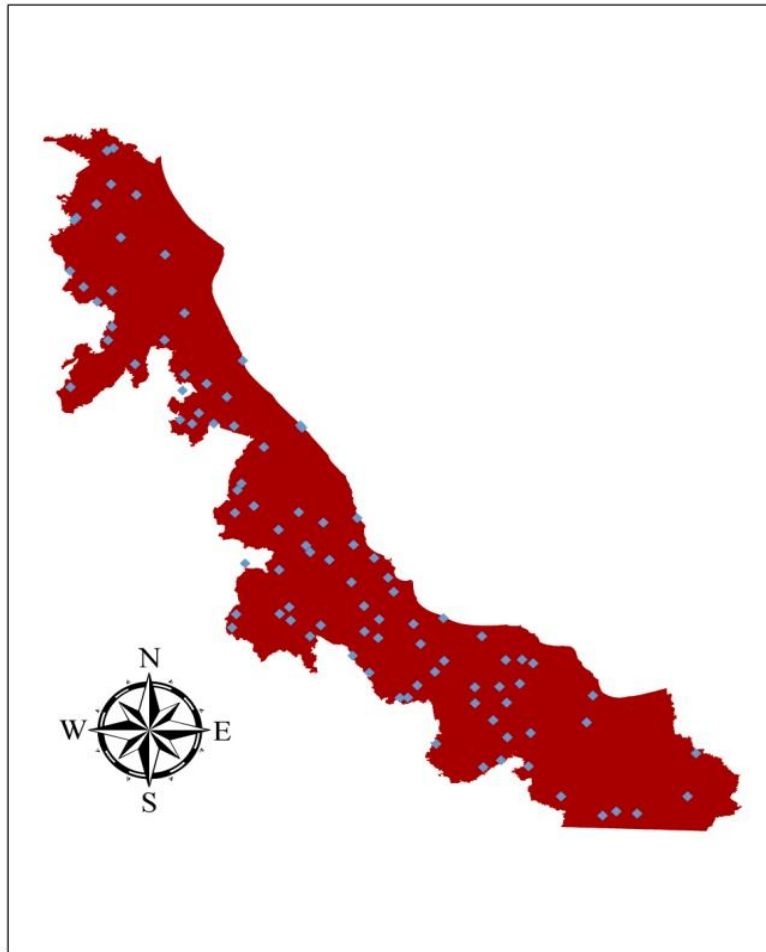


Figura 10. Ubicación en el estado de Veracruz de las 95 estaciones climáticas usadas por SWAT en este trabajo.

#### **5.3.3.3. Manejo de la higuera.**

El manejo de la higuera que se cargó en el modelo SWAT para realizar el presente trabajo se presenta en el Cuadro 8.

Cuadro 7. Ejemplo de datos estadísticos generados por el simulador climático del modelo EPIC y requeridos por SWAT. Datos de la estación meteorológica 30100 del estado de Veracruz.

	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Tmax	21.5	22	25.7	26.1	26.6	23.7	22.4	22.5	23	22.5	22.1	21.4
Tmin	6.5	6.9	9.4	10.7	12.3	12.5	11.4	11.4	11.8	10.3	8.6	7.2
DETmax	4.8	5	5.2	4.7	4.3	3.6	3.5	3.4	3.5	3.7	4.1	4.1
DETmin	2.7	3.3	3.1	2.6	2.7	1.9	2.2	2.2	2.4	2.4	2.9	2.9
PPM	8.8	8.8	12.2	21.1	50.1	147.7	143.2	140.3	148.4	77.6	23.1	10.7
DEPPM	2.27	3.09	3.99	3.4	4.96	8.73	7.35	7.52	11.04	5.86	3.37	2.24
CAPPM	4.27	1.75	1.7	1.36	1.19	1.54	1.56	1.62	3.39	1.69	1.67	1.36
PDHDS	0.09	0.05	0.06	0.14	0.17	0.34	0.41	0.42	0.38	0.27	0.17	0.1
PDHDH	0.27	0.32	0.35	0.28	0.47	0.63	0.64	0.6	0.67	0.49	0.35	0.15
PDPM	30.4	2	2.5	5	7.6	14.6	16.6	15.7	16	10.8	6.2	3.3
PMMH	40.8	8.1	10.2	9.3	13.3	18	15.8	16	19.6	13	7.2	5.9
RS	16	18	22	23	23	21	21	21	20	19	18	16

**Tmax:** Temperatura máxima; **Tmin:** Temperatura mínima; **DETmax:** Desviación estándar de la temperatura máxima; **DETmin:** Desviación estándar de la temperatura mínima; **PPM:** Precipitación pluvial promedio mensual; **DEPPM:** Desviación estándar de la precipitación pluvial promedio mensual; **CAPPM:** Coeficiente de asimetría de la precipitación pluvial promedio mensual; **PDHDS:** probabilidad de un día húmedo después de un día seco; **PDHDH:** probabilidad de un día húmedo después de un día húmedo; **PDM:** Promedio de días con precipitación pluvial al mes; **PMMH:** Precipitación pluvial máxima en media hora; **RS:** Radiación solar.

#### 5.3.3.4. Parámetros fisiológicos de la higuera.

Los principales y más sensibles parámetros fisiológicos de la higuera considerados en este trabajo y utilizados en el modelo de simulación SWAT se presentan en el Cuadro 9.

Cuadro 8. Paquete tecnológico y costos de producción por unidad de superficie del cultivo de higuera en el estado de Veracruz.

Fecha de aplicación	DDS		Cantidad	Producto comercial	Ingrediente activo		Tasa de aplicación		Costos		
					Nombre	Concentración	Producto comercial	Ingrediente activo	Unitario	Total	
									0	0	
25-may	-21	Servicio	1						650	650	
									0	0	
30-may	-16	Servicio	1						650	650	
06-jun	-8	Servicio	1						500	500	
07-jun	-7	Servicio	1						500	500	
08-jun	-6	Servicio	1						500	500	
		kg ha-1		Semilla			50		20	1000	
15-jun	0	Jornales	6						150	900	
									0	0	
		kg ha-1		60-80-60	NPK				0	0	
		kg ha-1		SPT	P	460 g kg-1		174	80	7	1218
15-jun	0	Jornales	2						150	300	
									0	0	
		kg ha-1		Urea	N	460 g kg-1		130	60	7	910
		kg ha-1		KCl	K	600 g kg-1		100	60	10	1000
15-ago	60	Jornales	2						150	300	
									0	0	
		kg ha-1	3	Gesaprim Nueve-090 WG	atrazina	900 g kg-1		3	2.7	183	549
18-jun	3	Jornales	2						150	300	
10-jul	25	Servicio	1						500	500	
20-jul	35	Jornales	3						150	450	
15-ago	60	Jornales		Faena	glifosato	480 g L-1		2	960	106	212
15-ago	60	Jornales	2						150	300	
15-sep	90	Jornales		Faena	glifosato	480 g L-1		2	960	106	212
15-sep	90	Jornales	2						150	300	
15-oct	120	Jornales		Faena	glifosato	480 g L-1		2	960	106	212
15-oct	120	Jornales	2						150	300	
25-jul	40	Jornales	6						150	900	
									0	0	
				Fitoclor	metil paration	480 g L-1		2	960	40	80
15-jul	30	Jornales	2						150	300	
				Malation 1000E	malathion	604 g L-1		1.5	906	115	172.5
15-ago	60	Jornales	2						150	300	
									0	0	
		kg ha-1		Manzate	mancozeb	350 g L-1		2	0.7	104	208
17-sep	92	Jornales	2						150	300	
		kg ha-1		Manzate	mancozeb	350 g L-1		2	0.7	104	208
									0	0	
14-nov	150	Jornales	8						150	1200	
										<b>15432</b>	

Cuadro 9. Parámetros fisiológicos de la higuera utilizados en el presente trabajo.

<b>Parámetros fisiológicos</b>	<b>Valores</b>
Temperatura optima (°C)	23
Temperatura base (°C)	12
Índice de área foliar máximo [ $m^2 m^{-2}$ ]	3
Eficiencia en el uso de la radiación [ $(Kg ha^{-1})(MJ m^{-2})^{-1}$ ]	17.5
Segundo punto de la curva de eficiencia en el uso de la radiación [ $(Kg ha^{-1})(MJ m^{-2})^{-1}$ ]	21
Índice de cosecha (Adimensional)	0.25
Profundidad máxima de raíces (m)	1.5
Altura máxima del dosel (m)	2
Coeficiente de extinción de la luz (Adimensional)	0.45
Altura mínima (msnm)	0
Altura máxima (msnm)	1200

#### 5.4. Proceso general de simulación

El SWAT es un modelo que simula el ciclo hidrológico a nivel de cuenca a través de dos principales fases: La fase de escurrimiento superficial y la fase de seguimiento al escurrimiento en los diferentes cauces de la cuenca hasta la salida de ésta. En ambas fases el modelo considera la cubierta vegetal del terreno y la simula a través de un sub-modelo del crecimiento y rendimiento de materia seca y

producto económicamente importante de una amplia gama de especies vegetales de ciclo anual, bianual, perennes y especies forestales. El SWAT simula el ciclo hidrológico y el crecimiento y rendimiento de las especies vegetales con base en los procesos físicos que ocurren en una cuenca, sin embargo, la unidad básica donde se simulan todos los procesos es la Unidad de Respuesta Hidrológica (URH). Por lo tanto se puede decir que el SWAT simuló el crecimiento y rendimiento de las especies vegetales aquí consideradas con base en cuatro principales bases de datos: 1) Unidades de Respuesta Hidrológica. Fueron formadas a partir de las Interacciones de tipos de suelo, relieve/grado de pendiente del terreno y tipo de vegetación o uso del suelo, 2) Clima diario. Se utilizó la temperatura promedio diaria máxima y mínima, lluvia y radiación solar, 3) Parámetros fisiológicos de cultivos.

#### **5.4.1. Delimitación de la cuenca, sub-cuencas y formación de las URH**

Se consideró al área total del estado de Veracruz como una sola cuenca y se delineó a partir del modelo de elevación digital (MED) con tamaño de pixel de 90x90 metros, el cual fue adquirido del INEGI. Así mismo, la cuenca fue delimitada utilizando todas las salidas de agua marcadas por el MED. Para incrementar la precisión sobre los procesos hidrológicos en la cuenca, se sobrepuso un mapa con los ríos de Veracruz. La dirección y acumulación de los flujos de agua se llevó a cabo con base en el MED. La red de drenaje se creó utilizando el comando de área mínima mapeada para incrementar precisión. Mediante el procedimiento



anterior, el estado de Veracruz fue dividido en 224 sub-cuencas, las cuales se muestran en la Figura 11.

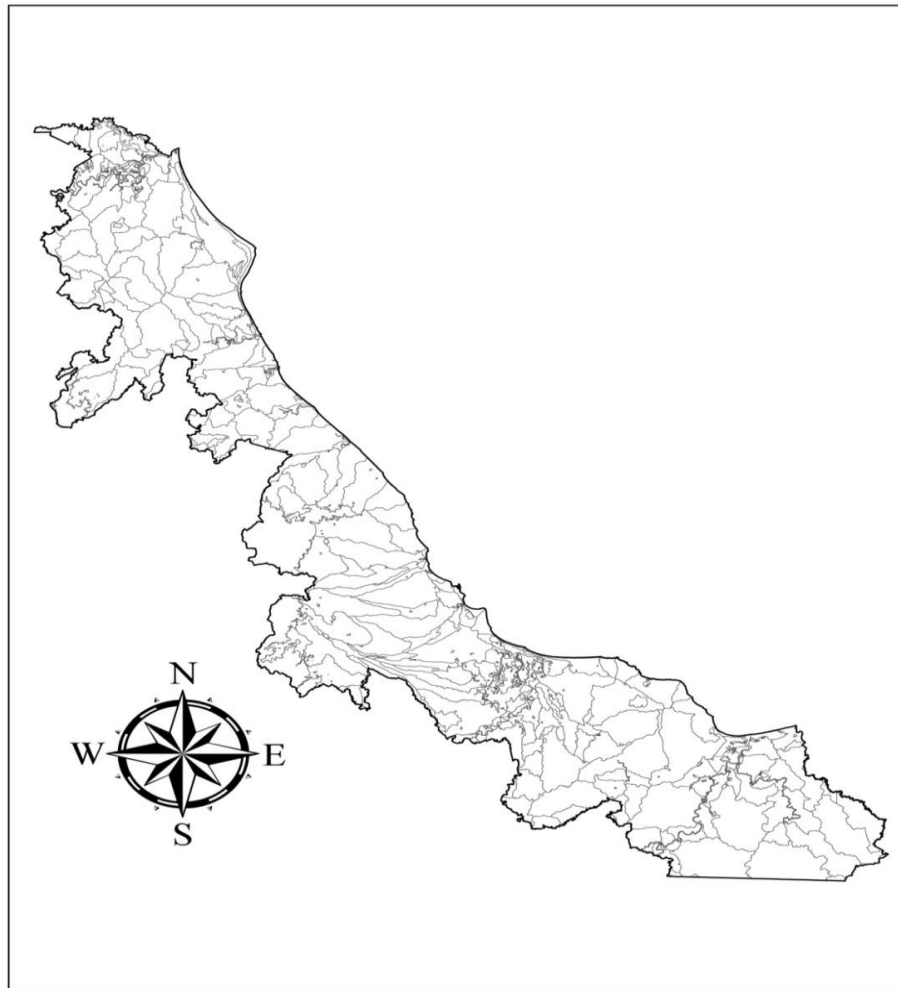


Figura 11. Estado de Veracruz dividido en las 224 sub-cuencas generadas por SWAT.

Las URH fueron definidas a partir de los mapas de pendiente del terreno con cinco intervalos de pendiente del terreno (0-3, 3-8, 8-15, 15-30 y >30 por ciento) elaborado a partir del MED, 46 sub-unidades de suelo según la clasificación de la

FAO y un solo uso del suelo, ya que se asumió que toda el área del estado de Veracruz era susceptible de ser cultivada con higuera. Éste procedimiento resultó en 4,053 URH, es decir los mapas de potencial de rendimiento que se presentan en la sección de resultados están integrados con 4,053 datos de rendimiento. En la Figura 12, se muestra al estado de Veracruz dividido en las 4,053 URH.

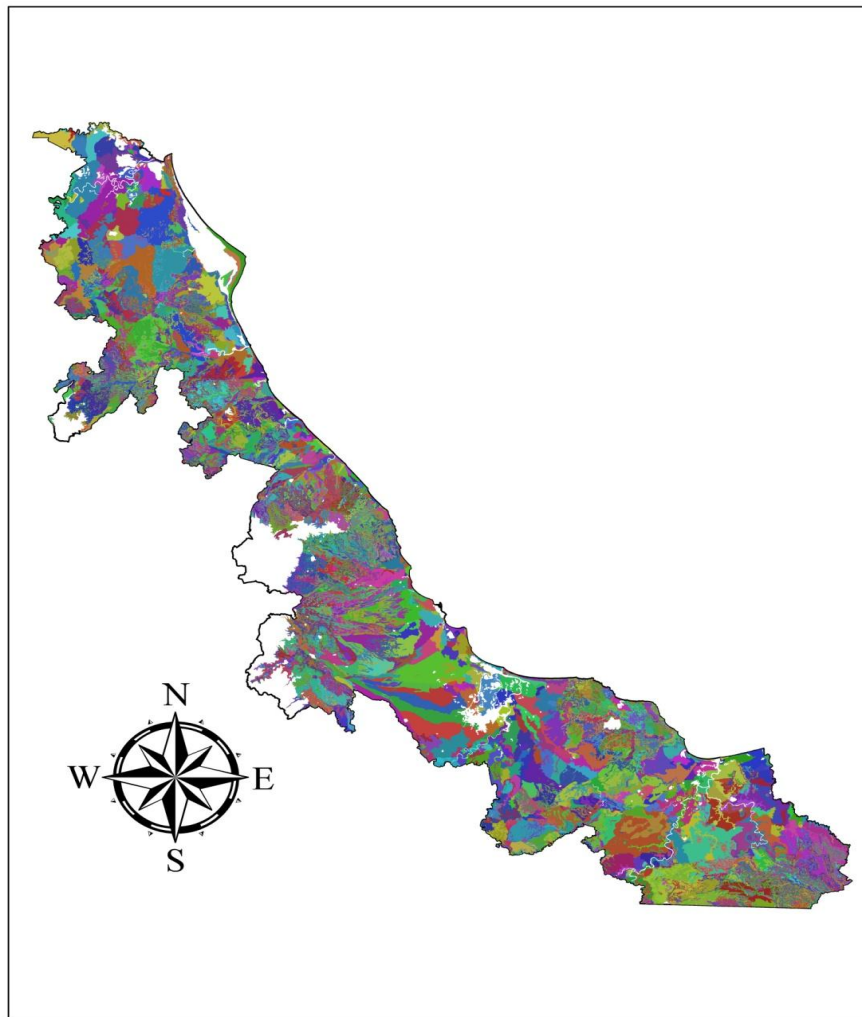


Figura 12. Estado de Veracruz dividido en las 4,053 URH generadas por SWAT.

Una vez formadas la URH, es decir el mapa de URH, a cada una de ellas, mediante la construcción de catálogos o tablas, el modelo les asignó los valores correspondientes de las variables de suelos y climas, es decir parametrizó cada URH. Los valores de las variables de suelos y climas fueron tomados de la base de datos ya descrita en los puntos anteriores. Posteriormente, se cargó el manejo de la higuera y se asignaron los valores de los parámetros fisiológicos más sensibles de la higuera.

#### **5.4.2. Metodología para elaborar la cartografía del potencial de producción**

La cartografía del potencial de producción de la higuera fue elaborada a partir de los resultados obtenidos de la simulación del rendimiento de biomasa seca total y grano en cada URH, por lo que el mapa de rendimiento de la higuera está integrado a partir de 4,053 datos de rendimiento de grano y biodiésel.

## **6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.**

### **6.1. Caracterización del cultivo de higuera.**

#### **6.1.1. Estadísticas y producción.**

En el Cuadro 10 se muestran las estadísticas generales de producción bajo condiciones de temporal en el estado de Veracruz. Desafortunadamente no se tiene registro de superficie cultivada ni rendimiento de grano, por lo que la información presentada corresponde a situaciones de rendimiento potencial.

La higuera es un cultivo que tiene una gran cantidad de aceite, con un rendimiento promedio de 463 kg t<sup>-1</sup> de grano, por lo que ofrece mayor rendimiento de grano, aceite y biodiesel que otros cultivos como la soya. Debido a esto, la higuera es el cultivo con mayor rendimiento potencial de biodiesel, de hasta 1,560 L ha<sup>-1</sup>.

Cuadro 10. Estadísticas generales de producción y producción potencial de higuera esperada bajo condiciones de temporal en el estado de Veracruz.

Indicador		Higuera
Superficie sembrada (x1000 has.)		Sin dato
Superficie cosechada (x1000 has.)		Sin dato
Rendimiento de grano (t ha <sup>-1</sup> )	Promedio actual	Sin dato
	Potencial	4.0
Rendimiento de aceite (kg t <sup>-1</sup> de grano seco)	Extracción por prensa	336
	Extracción por solvente	420
Rendimiento de residuos de cosecha (t ha <sup>-1</sup> ) base seca.	Promedio actual	Sin dato
	Potencial	12
Rendimiento total de biomasa seca aérea (t ha <sup>-1</sup> )	Promedio actual	Sin dato
	Potencial	16
Rendimiento potencial de biodiesel (L ha <sup>-1</sup> )		1,560

### 6.1.2. Características del producto económicamente importante (grano).

En el Cuadro 11 se muestran los valores promedio típicos de la composición del grano de higuera. El contenido de materia seca en el grano es alto ya que solo contiene 6% de humedad. Posee mayor cantidad de ácidos grasos insaturados

(entre ellos el ácido ricinoléico) que saturados, una cantidad de aceite con un porcentaje promedio de 46.3% sobre el peso del grano seco. Dado su alto contenido de aceite por unidad de peso, su rendimiento de biodiesel es mayor que otros cultivos como la soya. Por lo anterior y para reducir la competencia con la producción de alimentos, se recomienda a la higuierilla como cultivo bioenergético.

Cuadro 11. Valores promedio típicos de la composición del producto económicamente importante (grano) de higuierilla y su tasa de conversión a Biodiesel.

Componente		Higuierilla	
Humedad del producto fresco (%)		6	
Materia seca del producto fresco (%)		94	
Aceite totales (%)		42	
Perfil de ácidos grasos	Insaturados	Linoléico(18:2)	5
		Oleico (18:1)	3.3
		Palmitoléico (16:1)	0.65
		Ricinoléico (18:1)	87
	Saturados	Estearico (18:0)	1.3
		Palmítico(16:0)	1
Propiedades Físico-químicas del Aceite		Densidad ( $\text{g cm}^{-3}$ )	0.962
		Viscosidad ( $\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$ ) a 40°C	35
		Índice de peróxido (meq. $\text{O}_2$ 100 $\text{g}^{-1}$ )	SD
		Índice de saponificación (g KOH $\text{kg}^{-1}$ )	187
		Índice de Yodo (g $\text{I}_2$ 100 $\text{g}^{-1}$ )	93
		Índice de refracción	1.468
Tasa de conversión grano-biodiesel ( $\text{L t}^{-1}$ ). Base seca <sup>1</sup> .		390	

<sup>1</sup>Se asume 100% de extracción de aceite y eficiencia de conversión aceite-biodiesel de 93%.

### **6.1.3. Características de los co-productos resultantes del proceso industrial.**

El Cuadro 12 muestra los valores promedio típicos de la composición de los co-productos del proceso industrial de la producción de biodiesel a partir de las semillas de higuera. Se obtienen dos co-productos básicos: la torta como resultado del proceso de extracción del aceite y la glicerina como resultado del proceso de transesterificación. De la torta se puede producir biofertilizantes y/o biogás,

La torta representa el 58% del peso total de la semilla que ingresa al proceso de extracción. En todos los casos, dicha torta está compuesta en promedio de 91% de materia seca y 9% de humedad. La torta de higuera presenta valores relativamente bajos de proteínas con 21%. A partir de la torta también es posible elaborar biogás, donde se pueden obtener hasta  $620 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$  de torta. En cualquier caso, la torta también puede ser utilizada como biofertilizante, lo cual, para el caso de la higuera es más importante ya que por su alto grado de toxicidad no se puede utilizar como alimento para ganado. Como resultado del proceso industrial, se obtiene glicerina que también puede utilizarse para la alimentación de ganado o una vez purificada puede usarse en la industria, principalmente, farmacéutica. El uso de los co-productos es indispensable en la industria del biodiesel para mejorar su rentabilidad y balance energético; así como coadyuvar con la producción de alimentos.

Cuadro 12. Valores promedio típicos de la composición de los **co-productos** resultantes del proceso industrial de producción de biodiesel de higuera.

Componente	Higuera
	Nombre del co-producto
Proporción de la torta con relación a la materia prima procesada (%)	58
Materia seca (%)	91
Contenido de humedad (%)	9
Proteína cruda (%)	21
Grasas (%)	6.5
Fibra cruda (%)	Sin Dato
Nitrógeno (%)	6
Fósforo (%)	2
Potasio (%)	1.1
Nombre del co-producto	Glicerina
Proporción de la glicerina con relación al biodiesel producido (%)	11.11
Nombre del co-producto	biogás
Proporción de biogás con relación a la materia seca Procesada ( $m^3 t^{-1}$ )	620
Nombre del co-producto	biofertilizante
Proporción de bio-fertilizante con relación a la materia prima Procesada (%)	53%

\*Se refiere sólo a la almendra del cacahuate, sin la cáscara.

#### 6.1.4. Cantidad y composición química de los residuos de cosecha.

Los residuos de cosecha son la proporción de biomasa aérea dejada en campo una vez que el producto económicamente importante fue cosechado. En este trabajo, la proporción de esta biomasa, se identifica como índice de residuos de cosecha; y se cuantifica como la diferencia, contra la unidad, del índice de cosecha. El Cuadro 13 muestra la proporción de los residuos de cosecha y su

contenido de humedad. Para este cultivo no se encontró en la literatura información sobre su composición química, en términos de los componentes celulares y sus respectivos azúcares, por lo que no fue posible estimar su producción unitaria teórica de etanol de segunda generación.

Cuadro 13. Composición promedio típica de los residuos de cosecha del cultivo de higuierilla.

Componente	Higuierilla
Índice de residuos de cosecha (%)	0.75
Contenido de humedad en residuos de cosecha (%)	80
Contenido de materia orgánica en residuos de cosecha (%)	20

#### **6.1.5. Uso de los productos, co-productos y residuos de cosecha**

En el Cuadro 14 se muestra el uso actual y potencial en México del producto económicamente importante, co-productos y residuos de cosecha del higuierilla. El producto económicamente importante (grano) de higuierilla puede utilizarse para producir biodiesel, la torta debido a su alto valor nutritivo, debe usarse principalmente para la alimentación de ganado si es desintoxicada y contribuir con la producción de carne y seguridad alimentaria. Otros usos de la torta son la producción de biogás y biofertilizantes para coadyuvar con la producción de alimentos. La glicerina es un co-producto del proceso industrial que puede ser utilizada para la alimentación animal o una vez purificada, puede utilizarse en la industria farmacéutica.



En todos los casos los residuos de cosecha pueden utilizarse como mejoradores del suelo y no se recomiendan para producir energía debido a su alto contenido de humedad y bajo valor calorífico. Respecto al uso de los residuos de cosecha para producir bioetanol de segunda generación, se recomienda en forma limitada su uso, debido a la baja producción (máximo de 12 t ha<sup>-1</sup>) por unidad de superficie.

Cuadro 14. Uso actual y potencial en México de los productos económicamente importantes, co-productos y residuos de cosecha de higuera.

Nombre del producto/ Insumo bioenergético		Uso actual/potencial para	Higuera
Genérico	Específico		
Producto económicamente importante	Grano	Alimento humano	-
		Alimento animal	-
		Biodiesel	✓
Co-productos	Torta	Alimento humano	-
		Alimento animal	-
		Generación de biogás	✓
		Biofertilizante	✓
	Glicerina	Alimento animal	✓
Industria		✓	
Residuos de cosecha	Celulosa y hemicelulosa	Alimento animal	-
		Generación de energía	-
		Mejorador de suelo	✓
		Producción etanol de segunda generación	✓
		Producción de papel	✓

#### 6.1.6. Paquete tecnológico y costos de producción de la higuera.

El paquete tecnológico y los costos de producción de la higuera en Veracruz se presentaron en el Cuadro 8 del punto 5.3.3.3 de la sección de materiales y métodos. Se presentó en esa sección debido a que se consideró como parte de la información que se utilizó para simular el rendimiento de la higuera. Como se puede ver, el paquete tecnológico cubre todas las actividades y costos desde la preparación del terreno hasta la cosecha. Por el momento no es posible obtener una relación Beneficio/Costo debido a que no se encontró en la literatura el precio de venta de la semilla de higuera, sin embargo, se puede decir que con un rendimiento de grano de  $4 \text{ t ha}^{-1}$ , para obtener una ganancia mínima de 30% es necesario que el precio de venta por tonelada de semilla sea de \$5,000.00 aproximadamente, lo cual, aparentemente es factible de lograrlo.

#### **6.1.7. Parámetros fisiológicos de la higuera.**

Al igual que el punto anterior, los parámetros fisiológicos de la higuera se presentaron en el Cuadro 9 del punto 5.3.3.4., de materiales y métodos. Se presentó en esta sección debido a que los parámetros fisiológicos de la higuera fueron considerados como parte de la información utilizada para simular el rendimiento de biomasa y grano.

#### **6.2. Potencial de rendimiento de grano y biodiesel de higuera.**

La Figura 13 muestra el mapa de potencial de rendimiento de la higuera en cada uno de los municipios del estado de Veracruz. Dicho potencial de rendimiento

esta dividido en ocho categorías y esta descrito por las variables rendimiento de grano, rendimiento de residuos de cosecha, rendimiento de biodiesel y superficie ocupada por cada categoría del potencial de rendimiento.

A partir de la información de dicha Figura 13, se puede deducir que de las 7.18 millones de hectáreas de Veracruz, el 6% ofrece rendimientos de grano de higuierilla entre 3 y 4 t ha<sup>-1</sup>, el 77% ofrece rendimientos entre 1.5 y 3 t ha<sup>-1</sup>, mientras que el 9% ofrece rendimientos menores de 1.5 t ha<sup>-1</sup>. El resto de la superficie (8%) presenta condiciones no aptas para el cultivo de la higuierilla, por lo que fueron eliminadas de este trabajo. Para estas tres categorías de potencial de producción el rendimiento de biodiesel varía entre 1,170 y 1,560, entre 580 y 1170 y menos de 580 L ha<sup>-1</sup>, respectivamente.

Respecto a la localización de estas tres grandes categorías del potencial de rendimiento de la higuierilla, se puede decir en general que, el mayor potencial de rendimiento se localiza en las zonas centro y centro-norte del estado. Como es de esperarse, debido a la mayor cantidad de superficie que ocupa, el potencial medio de rendimiento se localiza distribuido en todo el estado de Veracruz. El potencial de rendimiento bajo se localiza principalmente en la zonas de montañas donde predominan los suelos delgados.

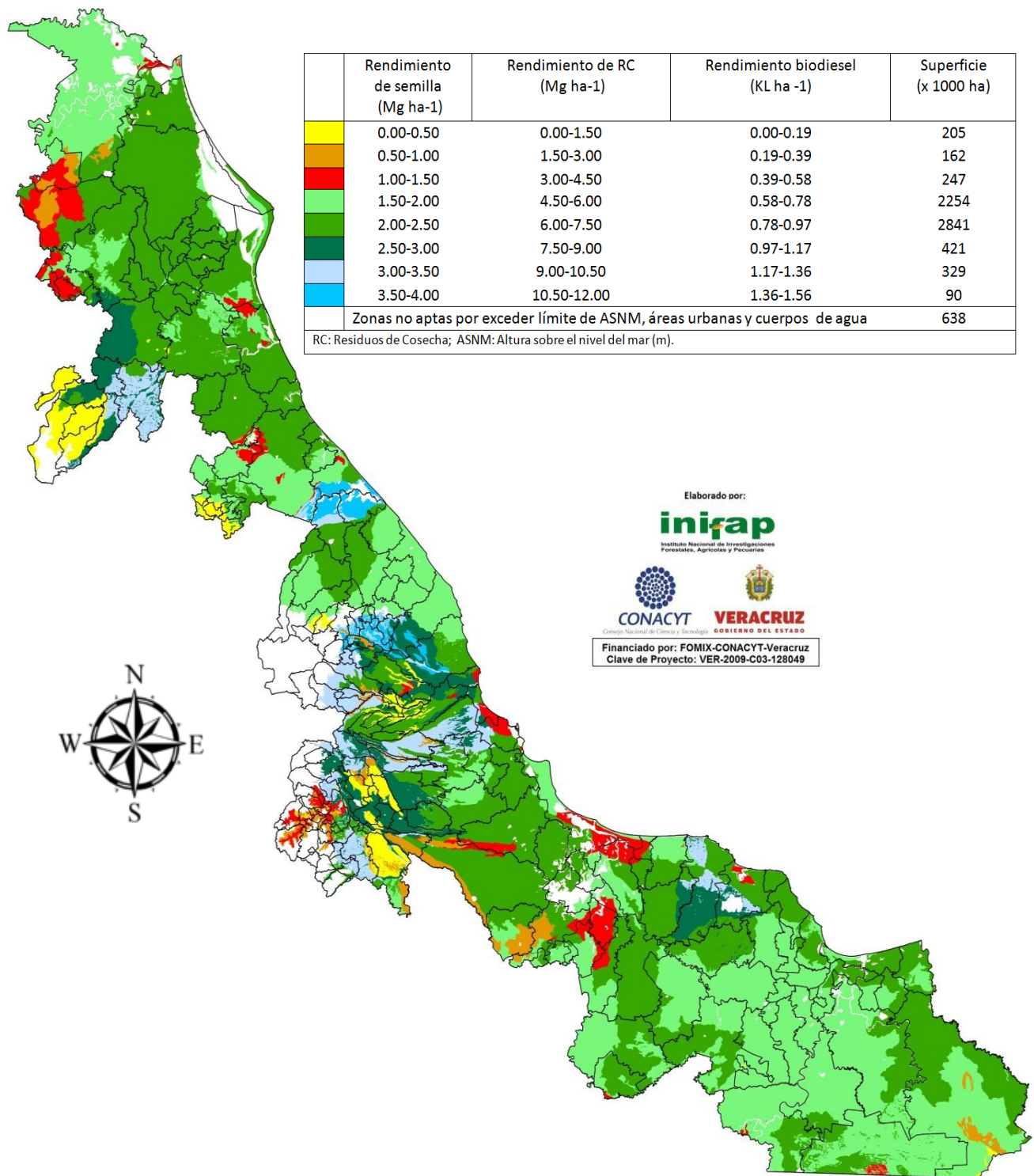


Figura 13. Rendimiento de semilla de higuierilla simulado por el modelo SWAT y estimación del rendimiento teórico de biodiesel en el estado de Veracruz.

### **6.3. Relación rendimiento potencial-Uso actual del suelo**

En la Figura 14 se presenta el mapa que muestra la relación entre el potencial de rendimiento de la higuierilla y el uso actual del suelo, mientras que el Cuadro 14 muestra la superficie ocupada por cada categoría de potencial de rendimiento de higuierilla, distribuida entre los diferentes usos actuales del suelo (agrícola, pecuario y forestal) en el estado de Veracruz.

Las categorías del potencial de rendimiento y su magnitud son las mismas que en la Figura 13, la diferencia radica en que la Figura 14 presenta la capa o “máscara” de uso actual del suelo sobrepuesta al mapa de potencial de rendimiento, lo cual permite identificar para cada unidad cartográfica del potencial de rendimiento que uso (agrícola, pastizal, forestal) se le está dando actualmente al suelo. Este mapa permite identificar las áreas no agrícolas ni forestales (es decir áreas de pastizales) con alto potencial de rendimiento que pueden ser recomendadas para el desarrollo de la industria del biodiesel.

A partir del Cuadro 15 se observa que de la superficie apta para el cultivo de higuierilla en Veracruz, el 22.3%, 50.3% y 15.9% es actualmente usada con actividades agrícolas, pecuarias y forestales, respectivamente. Así mismo, se puede deducir que de la superficie actualmente con uso agrícola (1,600.000 has), sólo el 10% presenta alto potencial de rendimiento (entre 3 y 4 t ha<sup>-1</sup>), el 78% presenta potencial medio (entre 1.5 y 3 t ha<sup>-1</sup>) y el 12% presenta potencial bajo (menos de 1.5 t ha<sup>-1</sup>). De la superficie actualmente con uso pecuario (3,619,000

has), sólo el 4% presenta alto potencial de rendimiento (entre 3 y 4 t ha<sup>-1</sup>), en cambio el 90% presenta potencial medio (entre 1.5 y 3 t ha<sup>-1</sup>) y el 6% presenta potencial bajo (menos de 1.5 t ha<sup>-1</sup>).

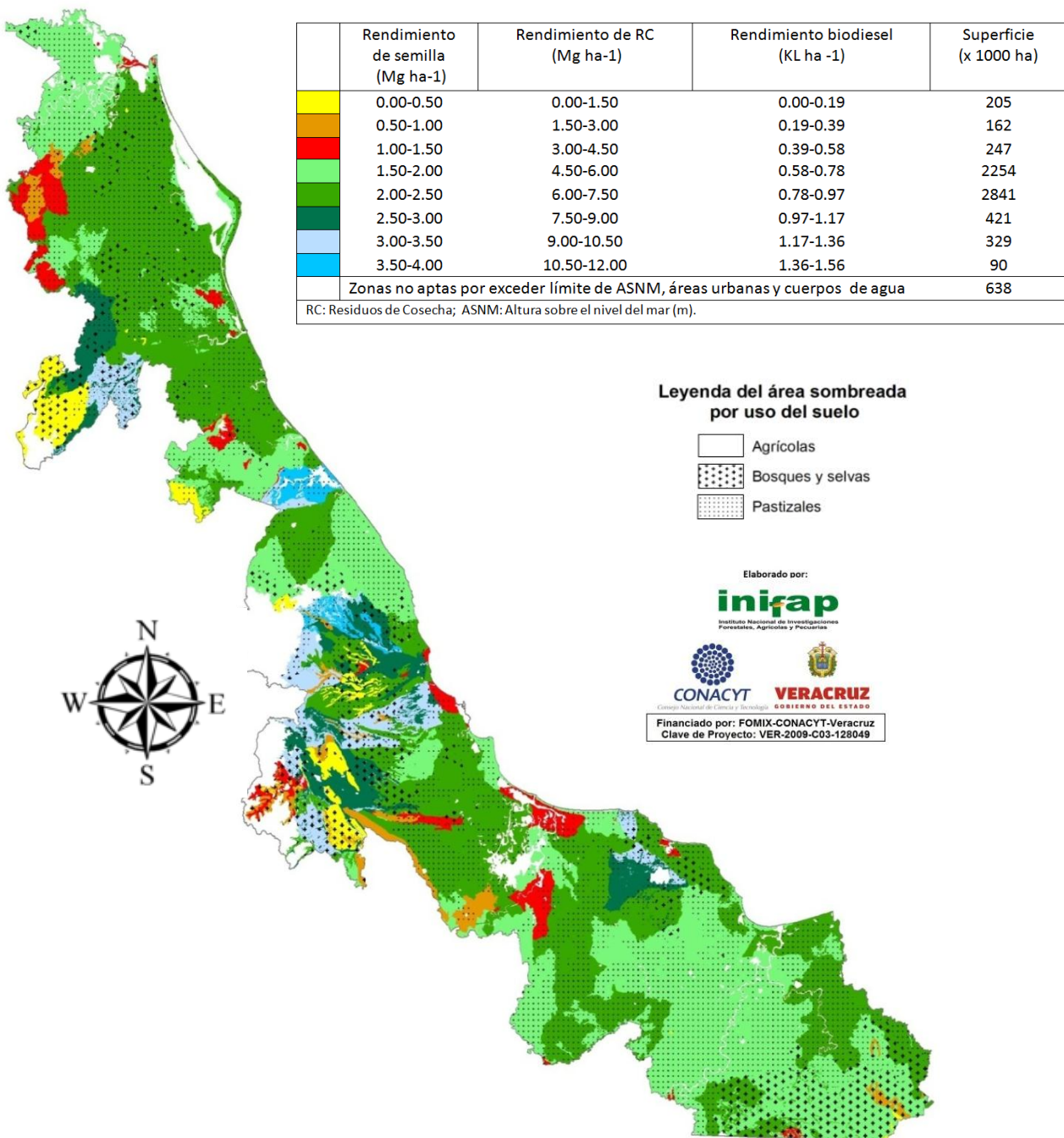


Figura 14. Rendimiento de semilla de higuerrilla simulado por el modelo SWAT y estimación del rendimiento teórico de biodiesel en el estado de Veracruz. Con uso actual del suelo.

Esta superficie con uso actual del suelo pecuario y con rendimiento medio, es la superficie donde debe buscarse el desarrollo de la industria del biodiesel para no impactar en forma negativa la producción de alimentos. Finalmente, de la superficie actualmente con uso forestal (1,140,000 has), el 9% presenta alto potencial de rendimiento (entre 3 y 4 t ha<sup>-1</sup>), el 75% presenta potencial medio (entre 1.5 y 3 t ha<sup>-1</sup>) y el 16% presenta potencial bajo (menos de 1.5 t ha<sup>-1</sup>).

Cuadro 15. Superficie ocupada por cada categoría de potencial de rendimiento de higuierilla, distribuida entre los diferentes usos actuales del suelo (agrícola, pecuario y forestal) del estado de Veracruz.

Rendimiento de semilla (t ha <sup>-1</sup> )	Área total (x1000 has)	Área (%)	Uso actual del suelo				Área descartada
			Agrícola	Pecuario (Pastizales)	Bosques y selvas	Cuerpos de agua y áreas urbanas	
0.0-0.5	205	2.9	70	26	109	0	0
0.5-1.0	162	2.3	63	54	44	1	0
1.0-1.5	247	3.4	59	142	27	18	0
1.5-2.0	2,254	31.4	431	1,368	380	75	0
2.0-2.5	2,841	39.5	603	1,774	378	86	0
2.5-3.0	421	5.9	220	104	95	2	0
3.0-3.5	329	4.6	120	102	105	3	0
3.5-4.0	90	1.3	33	49	3	5	0
Área descartada	-	-	-	-	-	-	638
Total	6,549	91.1	1,600 (22.3%)	3,618 (50.3%)	1,140 (15.9%)	191 (2.7%)	638 (8.9%)

## 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De acuerdo con los objetivos e hipótesis planteadas en el presente trabajo, se concluye lo siguiente:

- Se caracterizó al cultivo de higuera en función de su rendimiento de grano, co-productos del proceso industrial para producir biodiesel, residuos de cosecha, paquete tecnológico y costos de producción y los principales parámetros fisiológicos utilizados en modelos de simulación. Dicha caracterización permitió obtener información para cuantificar el potencial de rendimiento de grano y biodiesel en el estado de Veracruz.
- Se cuantificó y cartografió el estado de Veracruz en función de su potencial para producir grano de higuera y biodiesel. Dicha cartografía permite identificar las áreas más adecuadas para el desarrollo de la industria del biodiesel sin impactar en forma negativa la producción de alimentos y la deforestación en el estado de Veracruz.
- Se generó información para apoyar la toma de decisiones sobre el desarrollo rural y la industria del biodiesel en Veracruz.



- Se sugiere identificar y cuantificar en forma precisa las áreas propuestas para promover el establecimiento de polos de desarrollo económico por la industria del biodiesel a partir del cultivo de higuierilla en Veracruz.

## 8. LITERATURA CONSULTADA

Ajila M., chiliquinga M. 2007. Análisis de Legislación sobre biocombustibles en america. 2007. pp11-27. contacto.victorhugo.ajila@olade.org.ec; byron.chiliquinga@olade.org.ec

Arnold, J.G. y Williams, J.R. 1987. Validation of SWRRB - A simulator for water

Aufammer. W, 1998-granos y otros cultivos. Es decir, su uso y cultivo Eugen Ulmer, pp Stuttgart, 560

Benavides, A., Benjumea, P., Pashova, V. (2007). El biodiesel de aceite de higuierilla como combustible alternativo para motores diesel. Revista Dyna, Redalyc, 141-150

Brathwaite, Ch. 2009. La seguridad alimentaria en las Américas: la exigencia de un nuevo modelo de desarrollo para el siglo XXI. Posición Institucional. En COMUNIICA. p.10.

CEPAL. y FAO (2007). "Oportunidades y Riesgos del Uso de la Bioenergía para la Seguridad Alimentaria en América Latina y el Caribe". Documento de trabajo conjunto CEPAL-FAO. 11-11-2008.

Delgado. 2006. La Higuierilla, petróleo verde. Medellín 17 de junio de 2006. www.higueroil.com.

DOF. 2008, Diario Oficial de la Federación. 2008 Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos 1º de febrero de 2008.

- EMBRAPA. 2004. Información técnica sobre el cultivo del higuierillo para agricultura familiar. EMBRAPA, Algodón, Campina Grande. Brasil.2004.
- FAO. 2008a, "Climate change, bioenergy and land tenure, Technical background document, HLC/08/BAK/9, FAO:Rome, 109 pp.
- FAO 2008. El cambio climático, el agua y la seguridad alimentaria. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.
- GALEANO C., G. A, 199. Caracterización y evaluación de 34 entradas de higuierilla (*Ricinus communis* L.). 1992. Tesis. Universidad Nacional de Colombia. Medellín.
- .
- González A. Y Castañeda Y. 2008. Biocombustible, Biotecnología y Alimentos. Impacto sociales para México. UAM, México 2008.
- Herrera ,2008. Bioenergeticos Perspectivas del desarrollo en Mexico.SENER. México, D.F. junio 2008. Pp. 12-15.
- IICA 2010. Atlas de la agroenergía y los biocombustibles en las Américas: II Biodiesel / Programa Hemisférico en Agroenergía y Biocombustibles – San José, C.R. 2010. 377 p.9 a 10.
- Inurreta. 2012. potencial para producir *jatropha curcas* l. como materia prima para biodiesel en el estado de Veracruz.
- IPCC. 2007. (El Panel Intergubernamental del Cambio Climático). Aumento regional de las temperaturas 1901- 2005.
- Keller. ER, Hanus H, Heyland KU, 1997. Fundamentos de la producción agrícola. . Eugen Ulmer, Stuttgart, 860 pp.
- Kessel. 2008. Secretaria de Energía. Programa de Introducción de Bioenergéticos Programa de Introducción de Bioenergéticos.

MAVESA. S.A. (2000) Proyecto Ricino .PDF.

NU.2009. Naciones Unidas, abril de 2009, Santiago de Chile. Países más productores de biodiesel en el mundo.

OLADE. 2007 Organización Latinoamericana de Energia.2007.Analisis de Legislación Sobre Biocombustibles en América Latina. [www.olade.org](http://www.olade.org).

OSORNO. G., G.A. 1986 , Algunos aspectos de la higuera en Colombia. 1986 Seminario. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 70 p

REDPA. 2008, Red de Coordinación de Políticas Agropecuarias (2008) El alza de los precios de los alimentos. La situación en los países del CAS junio. (En línea: <http://www.iica.int>; consultado 15 de agosto de 2008).

SAGARPA, SENER 2009. Estrategia Intersecretarial de los Bioenergéticos. México 2009.PDF.Pag.5.

Samayoa. 2007. Manual tecnico del higuera. Centro nacional de tecnología agropecuaria y forestal, centa. Disponible en línea.

SENER. 2008. Programa de introducción de bioenergéticos.Mexico2008-[www.energia.gob.mx](http://www.energia.gob.mx)

Silva. al 2005. Curso sobre el cultivo de higuera, investigadores INIA-Venezuela, octubre 2005.

Tapia. 1984. Zonificación agroecológica basada en el uso de la tierra, el conocimiento local y las alternativas de producción.1984.

Torres. F. (coord.)2006. Seguridad alimentaria: seguridad nacional, UNAM/IIEc/Plaza y Valdés Editores, México, 2006.

Zamarripa. 2009. Primera Reunión de la Red Mesoamericana de Investigación y Desarrollo en Biocombustibles, Situación actual de los Biocombustibles en México, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, 2009.

<http://www.finagro.com.co/html/cache/HTML/SIS/Cacao/congreso>.

[http://www.ine.gob.mx/descargas/est\\_intersecretarial\\_bioenergéticos.pdf](http://www.ine.gob.mx/descargas/est_intersecretarial_bioenergéticos.pdf).

<http://www.rlc.fao.org/es/prioridades/bioenergia/pdf/bioenergiaen.pdf>.

<http://www.unalmed.edu.co/~crsequed/HIGUERILLA.htm>





