

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
“ANTONIO NARRO”**

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



**CARACTERIZACIÓN DE LA CAÑA DE AZÚCAR, CUANTIFICACIÓN Y
CARTOGRAFÍA DE SU POTENCIAL PARA PRODUCIR BIOETANOL EN
VERACRUZ**

Por:

Roberto Hernández Laguna

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 DE LA CAÑA DE AZUCAR, CUANTIFICACIÓN Y
CARTOGRAFÍA DE SU POTENCIAL PARA PRODUCIR BIOETANOL EN
VERACRUZ.

POR:

Roberto Hernández Laguna

TESIS

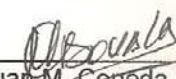
Que se somete a consideración del H. jurado examinador como
requisito para obtener el título:

INGENIERO AGRICOLA Y AMBIENTAL

Presidente


Dr. José de Jesús Rodríguez Sahagún

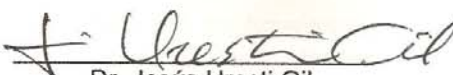
Sinodal


M.C. Juan M. Cepeda Dovala

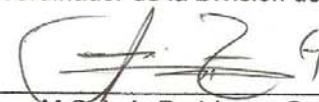
Sinodal


M.C. Alejandra R. Escobar Sánchez

Asesor externo


Dr. Jesús Uresti Gil

Coordinador de la División de Ingeniería.


M.C. Luis Rodríguez Gutiérrez

Universidad Autónoma Agraria
"ANTONIO NARRO"



Coordinación de
Ingeniería

AGRADECIMIENTOS

ADIOS

Por hacer realidad mi sueño que tanto anhele, y estar conmigo en los momentos mas difíciles de mi vida, sobre todo porque me brindaste esa luz que permitió dirigir mi camino para no tropezar en la obscuridad, gracias dios por tu gran paciencia, por tu compañía y sobre todo por la salud que me brindaste en el transcurso de mi carrera.

A la universidad Autónoma Agraria "Antonio Narro", por cobijarme entre sus aulas y brindarme el apoyo para mi formación profesional.

Asesores

Al Dr. José de Jesús Rodríguez Sahagún, por la atención brindada y confianza en la elaboración de este trabajo muchas gracias.

A la Mc. Alejandra, gracias por su cooperación, apoyo y confianza.

M.C. J. Manuel Cepeda Dovala; por su apoyo, respeto y confianza muchas gracias.

En especial Al Dr. Jesús Uresti Gil, Por la atención y extraordinaria asesoría. Sobre todo por los conocimientos que me brindo en el cual sacaron adelante el trabajo de esta investigación gracias.

Mi total agradecimiento al Campo Experimental Cotaxtla del INIFAPy 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.

A todos mis compañeros de generación por la amistad que me brindaron y de todo corazón a mis admirables compañeros: Ricardo, Josué, Madain, Bertimeo, Bertín, Eliseo, Fernando, Pedro, Alex, Edgar, Saúl. A todos ellos por el apoyo brindado para mi formación profesional y su inmensa amistad. Gracias

DEDICATORIA

Gracias dios, por brindarme una familia tan especial.

Con respeto y cariño a mis queridos padres:

Jorge Hernández Martínez

Olga Laguna Vázquez

Gracias por la confianza y paciencia que me tuvieron, por sus esfuerzos, sacrificios y sus sabios consejos que me sirvió de mucho para mi formación como profesionista y como persona, les estoy muy agradecidos ya que es la mejor herencia que he recibido de ustedes deseo de todo corazón que diosito los llene de bendiciones.

A mis queridos hermanos:

Julio cesar

Jorge Luis

Guadalupe

Hernán

Aymer

Quienes agradezco de todo corazón el apoyo que brindaron para mi formación profesional, sobre todo por la confianza, sus sabios consejos, por las bendiciones que recibí y por ser lo mas importante en mi vida con quienes he compartido momentos de alegría y tristeza.

A MIS CUÑADAS.

Rosi

Mirena

Odalís

Por formar parte importante en mi familia con quienes he pasado mementos de felicidad y de tristeza, por sus sabios consejos y bendiciones.

A MIS SOBRINOS.

Erika

Julio cesar

Liseth

Jorge Luis

Andreita

Ya que son los ángeles que nos han llenado de alegría y amor a toda la familia y por las cuales nos inspiran a seguir adelante.

A mi novia Miriam Abigail Vázquez Porto, gracias por estar siempre a mi lado en las buenas y en la malas, por tu paciencia en la elaboración de este trabajo gracias cosita te amo eres la personita mas hermosa que existe.

ÍNDICE DE CONTENIDO

	pág.
AGRADECIMIENTOS.....	i
DIDICATORIA.....	ii
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	iv
ÍNDICE DE CUADRO.....	vi
INDICE DE FIGURAS.....	vii
RESUMEN.....	viii
ABTRAC.....	ix
1. INTRODUCCION.....	1
.....	
	4
2. OBJETIVOS.....	4
.....	
2.1. Objetivos	4
General.....	
2.2. Objetivos	5
Específicos.....	
3. HIPOTESIS.....	
.....	

5. MATERIALES Y METODOS.....	20
5.1. Descripción del área de estudio.....	20
5.1.1. Clima y suelo.....	21
5.1.2. Topografía y uso actual del suelo.....	24
5.2. Caracterización del cultivo de caña de azúcar.....	27
5.2.1. Puntos considerados para la caracterización de la caña de azúcar.....	28
5.2.2. Tecnología y costos de producción de la caña de azúcar.....	30
5.3. Simulación del rendimiento de la caña de azúcar.....	30
5.3.1. El modelo de simulación SWAT.....	31
5.3.2. Cartografía utilizada.....	33
5.3.3. Base de datos utilizadas.....	38
5.3.3.1. Suelo.....	33
5.3.3.2. Clima.....	34
5.3.3.3. Manejo de la caña de azúcar.....	36
5.3.3.4. Parámetros fisiológico de la caña de azúcar.....	37
5.4. Procesos generales de simulación.....	40
5.4.1. Delimitación de la cuenca, sub-cuenca y formación de URH.....	41
5.4.2. Metodología para elaborar la cartografía del potencial de producción.....	44

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	45
6.1. Caracterización del cultivo de caña de azúcar.....	45
6.1.1. Estadística y producción potencial de la caña de azúcar....	45
6.1.2. Características del producto económicamente importante (tallo fresco).....	46
6.1.3. Características de los co-productos resultantes del proceso industrial.....	47
6.1.4. Composición química de los co-productos de caña de azúcar.....	49
6.1.5. Cantidad y composición química de los residuos de cosecha.....	50
6.1.6. Uso de los productos, co-productos y residuos de cosecha de la caña de azúcar.....	51
6.1.7. Paquete tecnológico y costos de producción de la caña de azúcar.....	52
6.1.8. Parámetros fisiológicos de la caña de azúcar.....	53
6.2. Potencial de rendimiento de tallo fresco y bioetanol de la caña de azúcar.....	53
6.3. Relación Potencial de rendimiento-Uso actual del suelo.....	56
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	59
8. LITERATURA CONSULTADA.....	61

INDICE DE CUADROS

	Pág.
Cuadro 1. Clima y tipos de suelo en el estado de Veracruz.....	22
Cuadro 2. Grados de pendiente (topografía) del terreno y uso actual del suelo en el estado de Veracruz.....	25
Cuadro 3. Características del perfil típico del suelo Cambisol calcárico.....	34
Cuadro 4. Fuentes de datos y metodologías usadas para calcular los datos utilizados por el modelo de simulación SWAT.....	35
Cuadro 5. 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.....	37
Cuadro 6. Paquete tecnológico y costos de producción por unidad de superficie del cultivo de caña de azúcar (Plantilla) en el estado de Veracruz...	38
Cuadro 6. Paquete tecnológico y costos de producción por unidad de superficie del cultivo de caña de azúcar (Soca) en el estado de Veracruz.....	39
Cuadro 7. Parámetros fisiológicos de la caña de azúcar utilizados en el presente trabajo.....	44
Cuadro 8. Estadísticas generales de producción promedio (2001-2009) y producción potencial esperada bajo condiciones de temporal en el estado de Veracruz de la caña de azúcar.....	45
Cuadro 10. Valores promedio típicos de la composición de los co-productos resultantes del proceso industrial para producir etanol de caña de azúcar (bagazo).....	45
Cuadro 9. Valores promedio típicos de la composición de los productos económicamente importantes de la caña de azúcar (Tallo fresco) y su tasa de conversión a etanol de primera generación.....	46
Cuadro 10. Valores promedio típicos de la composición de los co-productos resultantes del proceso industrial para producir etanol de caña de azúcar....	48
Cuadro 11. Composición química promedio, típica de los co-productos industriales del proceso para producir etanol de caña de azúcar.....	49

Cuadro 12. Composición química promedio, típica de los residuos de cosecha de la caña de azúcar.....	49
Cuadro 13. Uso actual y potencial en México de los productos económicamente importantes, co-productos y residuos de cosecha de la caña de azúcar.....	51
Cuadro 14. Superficie ocupada por cada categoría de potencial de rendimiento de caña de azúcar, distribuida entre los diferentes usos actuales del suelo (agrícola, pecuario y forestal) del estado de Veracruz.....	58

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Producción mundial de biocombustibles en el año 2009. Producción total: 94.92 billones de litros por año.....	10
Figura 2. Dinámica de la producción de biocombustibles 2005 -2009 (litros año ⁻¹).....	10
Figura 3. Producción mundial de etanol en el 2009.....	11
Figura 4. Dinámica de la producción de etanol 2005 – 2009(litros año ⁻¹).....	12
Figura 5. Localización del estado de Veracruz.....	21
Figura 6. Distribución espacial de los tipos de clima en el estado de Veracruz	23
Figura 7. Distribución espacial de las clases de suelos en el estado de Veracruz.....	24
Figura 8. Topografía y pendiente del terreno en el estado de Veracruz.....	26
Figura 9. Uso de suelo en el estado de Veracruz.....	26
Figura 10. Ubicación de las 95 estaciones climáticas en Veracruz por SWAT	36
Figura 11. Estado de Veracruz dividido en 224 sub-cuencas por SWAT.....	42
Figura 12. Estado de Veracruz dividido en las 4,053 URH generadas por SWAT.....	43
Figura 13. Rendimiento de caña de azúcar por municipio por el modelo SWAT.....	55
Figura 14. Rendimiento de caña de azúcar por uso de suelo simulado por el modelo SWAT.....	57

RESUMEN

El estado de Veracruz se localiza en una posición geográfica privilegiada dentro de las zonas intertropicales y presenta condiciones físicas adecuadas para producir una amplia gama de especies vegetales con alto rendimiento de biomasa y azúcares para producir bioetanol. Los objetivos del presente trabajo fueron caracterizar al cultivo de caña de azúcar y cuantificar y cartografiar su potencial de rendimiento de caña fresca y bioetanol, con el propósito de generar información para la toma de decisiones para el establecimiento y manejo de la caña de azúcar para producir bioetanol en Veracruz. La caña de azúcar se caracterizó en función de las estadísticas de producción, cantidad y composición química de la caña y su tasa de conversión a bioetanol, características de los co-productos, su cantidad y composición química, cantidad y composición química de los residuos de cosecha y producción de bioetanol de segunda generación, uso de la caña fresca, co-productos y residuos de cosecha, parámetros fisiológicos y paquete tecnológico y costos de producción. La cuantificación del rendimiento se realizó con el modelo de simulación Soil and WaterAssessmentTool, mientras que la cartografía se realizó con el ArcMapVr. 9.3. Se cuantificó y cartografió el estado de Veracruz en función de su potencial para producir caña fresca y bioetanol de primera y segunda generación. Dicha cartografía permite identificar las áreas más adecuadas para el desarrollo de la industria del bioetanol sin impactar en forma negativa la producción de alimentos y la deforestación en el estado de Veracruz.

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

ABSTRACT

The state of Veracruz is located in a privileged geographical position within the intertropical areas and presents suitable conditions to produce a wide range of plant species with high biomass yield and sugar to produce bioethanol. The objective of this study was to characterize the sugarcane crop and quantify and map its potential production of fresh sugarcane and bioethanol, in order to generate information for decision-making for the establishment and management of sugar cane to produce bioethanol in Veracruz. Sugarcane was characterized in terms of production statistics, amount and chemical composition of sugarcane and bioethanol conversion rate, characteristics of co-products, their quantity and chemical composition, amount and chemical composition of crop residues and production of second generation bioethanol, sugarcane physiological parameters and crop management technology and production costs. Quantification of sugarcane yield was done with the simulation model Soil and Water Assessment Tool, while mapping was performed using ArcMap V.9.3. The state of Veracruz was mapped in terms of their potential to produce fresh sugarcane and first and second generation bioethanol. From such mapping it may be possible to identify the most suitable areas for the development of the bioethanol industry without negatively impacting food production and deforestation in the state of Veracruz.

KEYWORDS: Biofuels, simulation models, Zoning, crop yield.

1. INTRODUCCIÓN

El estado de Veracruz se localiza en una posición geográfica privilegiada dentro de las zonas intertropicales y presenta condiciones físicas adecuadas para producir una amplia gama de especies vegetales (cultivos anuales, pastos, frutales y especies forestales) con alto rendimiento de biomasa, azúcares y aceites para producir etanol de primera y segunda generación. Además, posee infraestructura, física, humana y tecnológica, suficiente para apoyar la producción y transformación de biomasa en biocombustibles. Lo anterior sugiere plantear la hipótesis que en Veracruz la producción de biocombustibles líquidos puede ser rentable. Sin embargo, para aprovechar en forma sustentable las condiciones edafoclimáticas, 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 bioenergéticos requeridos, es también necesario cuantificar su potencial de producción e identificar las áreas más productivas donde proponer la planeación de polos de desarrollo económico derivados de la producción de biocombustibles en forma tecnológica, económica y sustentablemente viables. Lo anterior es la principal razón de los objetivos del presente trabajo, como se muestra en los siguientes apartados.

La caña de azúcar es considerada como una de las especies vegetales con mayor potencial para producir bioetanol. En México, para producir azúcar, se cultivan cada año aproximadamente 710,000 has., con caña de azúcar, de las

cuales, 273,000 has., (39%) son cultivadas en Veracruz; 199,000 y 74,000 has., bajo condiciones de temporal y riego, con rendimientos de caña fresca de 60 y 80 t ha⁻¹, respectivamente. Dicha superficie se distribuye en 22 ingenios azucareros, de los cuales 15 se localizan en la zona centro de Veracruz, dentro del área de influencia del Campo Experimental Cotaxtla del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Comparados con el potencial de las variedades mejoradas que existen en el mercado, los rendimientos promedio reportados para Veracruz se consideran bajos.

Aún y con rendimientos relativamente bajos, actualmente el cultivo de la caña de azúcar en Veracruz es una de las actividades más rentables en la agricultura y; por lo menos en Veracruz, existe mercado seguro para el producto como caña para producir azúcar o bioetanol. En Veracruz, el ciclo del cultivo de caña de azúcar es en promedio de ocho años con cosechas anuales. El primer año, el año de establecimiento del cultivo, llamado “plantilla”, tiene una duración de 12 meses, a este le sigue una serie de siete “socas”, las primeras cinco “socas” son las más productivas y en las últimas dos el rendimiento de caña empieza a decrecer a niveles menos rentables. Durante las socas, sólo es necesario dar mantenimiento al cultivo. Una vez que el rendimiento decrece a niveles menos rentables, el cultivo debe “voltearse”, mediante un barbecho, para posteriormente establecer una nueva “plantilla” e iniciar otro ciclo de siete “socas” y así sucesivamente. Por lo anterior, actualmente, aún y con rendimientos de caña relativamente bajos, el cultivo de caña de azúcar es uno de los más rentables en

Veracruz y puede ser el más rentable si se obtienen mayores rendimientos utilizando las variedades y tecnología mejorada desarrollada por el INIFAP.

Así, a raíz de las investigaciones realizadas sobre el cultivo de caña de azúcar, ha sido posible obtener bioetanol a partir de la fermentación del azúcar; combustible a partir del bagazo; la obtención de alimentos para ganado; pulpa de papel y cartón a partir de las fibras del bagazo. Sin embargo, además del azúcar, uno de los productos más importantes que se obtiene a partir del cultivo de la caña de azúcar es el bioetanol. El bioetanol es combustible que no contamina como los de origen fósil y proviene de una fuente renovable, además de ser más económica su producción (Domínguez, 2008).

El uso de los modelos de simulación bajo una situación particular, con el fin de mejorar la productividad de cultivos, permite orientar la toma de decisiones y reducir los costos de investigación, lo cual resulta particularmente útil en países de desarrollo. La modelación puede entenderse como la aplicación de métodos predictivos para analizar problemas complejos del mundo real. Por su parte, la simulación es el resultado de aplicar el modelo bajo una condición particular, de manera que se pueda predecir el resultado de diferentes acciones, siendo validada posteriormente con información del mundo real (Matthew et al., 2002).

Los modelos ayudan a la comprensión de las interacciones fisiológicas y ambientales, permitiendo realizar la planeación del cultivo y así contribuir de manera significativa a la toma de decisiones en etapas determinantes del ciclo de

cultivo, como labores culturales, fertilización, irrigación, uso y manejo de productos fitosanitarios. Igualmente, los modelos de cultivo sirven como herramienta de planificación para cuantificar a través de pronósticos, el impacto de diferentes acciones y los resultados esperados en términos de producción; con algunos de estos es posible evaluar impactos ambientales y definir estrategias para reducirlos.

Por lo anterior, es necesario cuantificar el potencial de producción de la caña de azúcar e identificar y cartografiar las áreas más productivas donde proponer la planeación de polos de desarrollo económico derivados de la producción de bioetanol en forma tecnológica, económica y sustentablemente viables.

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 de la caña de azúcar para producir bioetanol en Veracruz.

2.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

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

- 2.2.2.** Cuantificar y cartografiar el potencial de producción del estado de Veracruz para producir caña de azúcar y bioetanol.

3. HIPÓTESIS

- 3.1. La caracterización del cultivo de caña de azúcar permite identificar sus insumos bioenergéticos, co-productos resultantes del proceso industrial y residuos de cosecha para producir bioetanol.
- 3.2. El estado de Veracruz presenta áreas con diferente potencial de producción de caña de azúcar, lo cual permite identificar aquellas con mayor potencial para producir bioetanol sin impactar en forma negativa la producción de alimentos y la deforestación.

4. REVISIÓN DE LITERATURA

4.1. Factores que promueven la producción de biocombustibles.

4.1.1. El petróleo y la seguridad energética.

El desarrollo de gran parte de nuestra época moderna tuvo que ver con la explotación y el uso creciente de los recursos energéticos no renovables. El

petróleo que se ha formado durante millones de años es un recurso finito lo cual representa el 90% del transporte y de la agricultura (Cocotti, et al, 2010).

Los recursos petrolíferos que se encuentran en el mundo ya han sido explorados casi en su totalidad y, se está alcanzando el nivel máximo de extracción en todo el mundo (Ferrari, 2009). En México, el pico máximo de la extracción de petróleo ya se ha alcanzado: la producción está bajando y es posible que ya no haya excedentes exportables desde el 2015.

La diversificación de la matriz energética mundial no es una respuesta ideológica sino una necesidad real para sostener la demanda global energética creciente. El cómo se resuelve esta diversificación energética es un punto que se encuentra en debate, y que se resume en el concepto de “transición energética”; cómo transitar de una economía de alta intensidad energética y basada en energías fósiles a una economía diferente, de menor intensidad energética y basada en energías renovables (biocombustibles) que son una alternativa para sustituir al crudo, (Rodríguez, 2006).

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

El problema del cambio climático del último siglo es que existe una tendencia al calentamiento global a tal grado que afecta a los seres vivos. La causa de este calentamiento es el aumento de la concentración de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en la atmósfera, que es debido por un lado a los

patrones actuales de consumo de energía a partir de carbón mineral y combustible fósil, por otro lado a la destrucción de la cubierta vegetal por cambio de uso del suelo (Coralli, et al 2010).

El efecto invernadero es un fenómeno natural causado por una serie de gases que se encuentran en la atmósfera. Hace que una parte del calor del sol que nuestro planeta refleja quede atrapado manteniendo la temperatura media global en 15° centígrados, y así permite la vida en la Tierra. Sin embargo, el aumento de la concentración de GEI está provocando el aumento de la temperatura global(Riegelhaupt, et al 2010).

Por lo anterior, el uso de biocombustibles como el bioetanol, puede contribuir a reducir la emisión de GEI y por lo tanto a mitigar el cambio climático.

4.1.3. El desarrollo rural.

Una de las principales motivaciones tras la promoción de los biocombustibles es el desarrollo económico rural. La producción de los biocombustibles puede tener un impacto positivo sobre el empleo agrícola y los medios de vida, especialmente cuando el cultivo involucra a agricultores de

pequeña escala e instalaciones para la conversión que se localizan cerca de la fuente de los cultivos en áreas rurales (SAGARPA, 2009-2012).

Por ejemplo, la caña de azúcar en Brasil (que está directamente relacionada con la producción de bioetanol), emplea cerca de 1 millón de trabajadores y se espera que este número crezca en 204.000 en los próximos 5 años. Esto es bastante superior a los trabajos generados por la producción de combustibles fósiles. La mayoría de los trabajos relacionados con el bioetanol involucran a trabajadores de poca calificación y pobres en áreas rurales y la calidad del trabajo es mejor en términos de una menor estacionalidad y salarios crecientes en el tiempo (Dufey, 2006).

La producción de biocombustibles en otras partes del mundo también puede crear oportunidades para los pequeños agricultores y los trabajadores rurales. Por ejemplo, el gobierno de Colombia estima que cada familia de agricultores ganará unas dos veces el salario mínimo (US\$ 4.000 al año) a través de la producción de bioetanol. En China, se espera que el programa de biocombustibles líquidos cree hasta 9,26 millones de empleos en el país, conllevando a mejoras significativas en la generación de ingreso y desarrollo rural (IICA, 2010).

4.1.4. La seguridad alimentaria.

En el Informe del Estado Mundial de la Agricultura y la Alimentación (SOFA 2008 por sus siglas en inglés) la FAO plantea una preocupación sobre el incremento de la producción de biocombustibles en los países en desarrollo que consiste en que se generaría mayor presión y competencia sobre los recursos naturales que ya son escasos, con consecuencias potencialmente negativas en materia social y medioambiental (Castello, et 2008).

Existe un desafío que consiste en promover la producción de las bioenergía sin perjudicar la oferta de los alimentos, mediante la inserción de los biocombustibles en la matriz energética de los países de ALC (América latina y el caribe), específicamente el bioetanol, lo que permitiría pasar de una agricultura dependiente del petróleo a una mas sustentable (IICA 2010; 2009).

4.2. Estadísticas de producción de biocombustibles.

En las Figuras 1 Y 2, se muestran las estadísticas básicas de la producción total por región de los Biocombustibles líquidos 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.

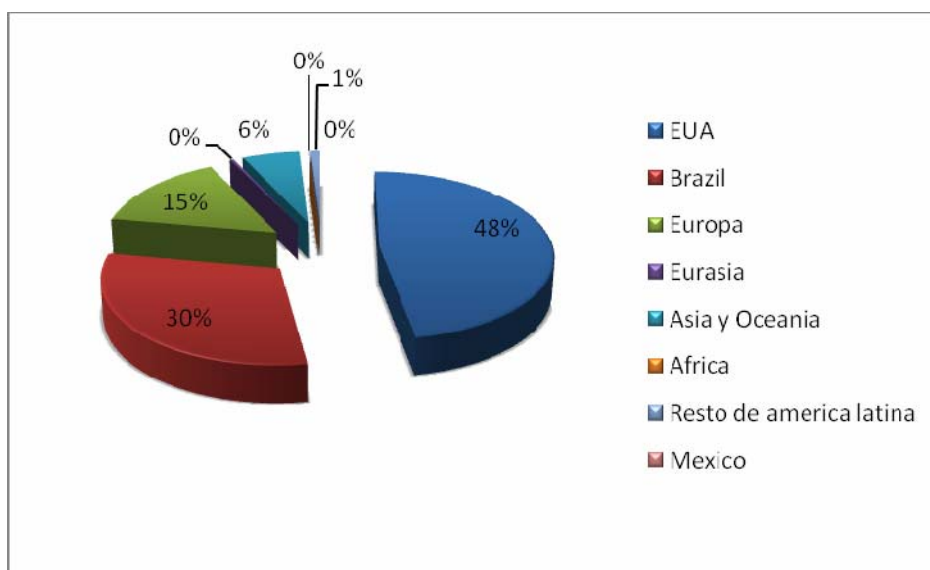


Figura 1. Producción mundial de biocombustibles en el año 2009.

Producción total: 94.92 billones de litros por año.

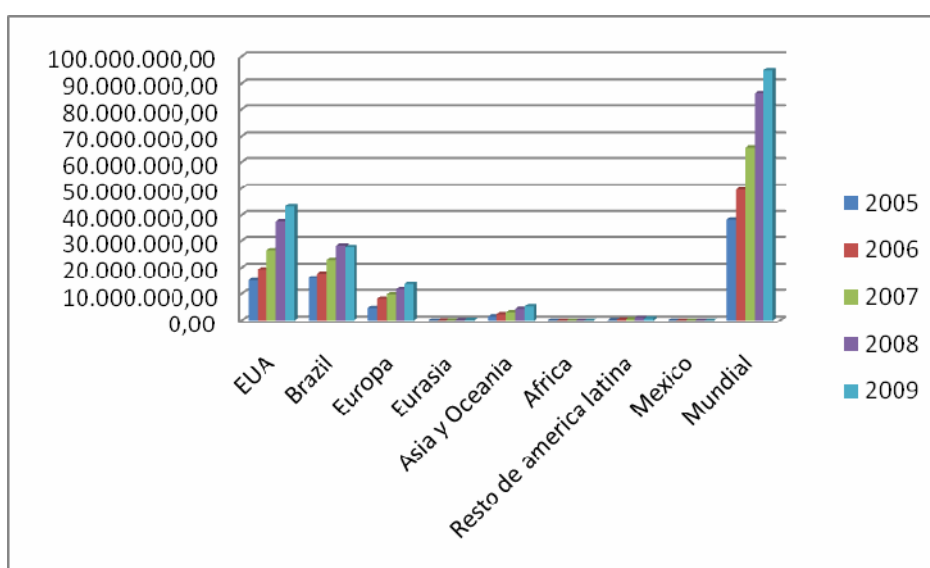


Figura 2. Dinámica de la producción de biocombustibles 2005 -2009(litros año⁻¹).

4.2.1. Bioetanol

Es un líquido incoloro, con un olor y sabor característicos. Usualmente llamado alcohol de grano o simplemente alcohol. El bioetanol es el alcohol que

contienen las cervezas, los vinos, los licores y un sin número de productos químicos. Puede obtenerse mediante el proceso de fermentación de azúcares a través de la acción de levaduras (cueva, et 2001).

El alcohol es purificado y concentrado por destilación, obteniéndose inicialmente un alcohol etílico rectificado (bioetanol), el cual se deshidrata mediante un método conocido como Adsorción. Existen otros métodos convencionales como la destilación azeotrópica, al vacío. Todos estos métodos sirven para obtener un producto final llamado Alcohol Anhidro, el cual es mezclado con la gasolina para ser usado como combustible en vehículos (cueva, et 2001).

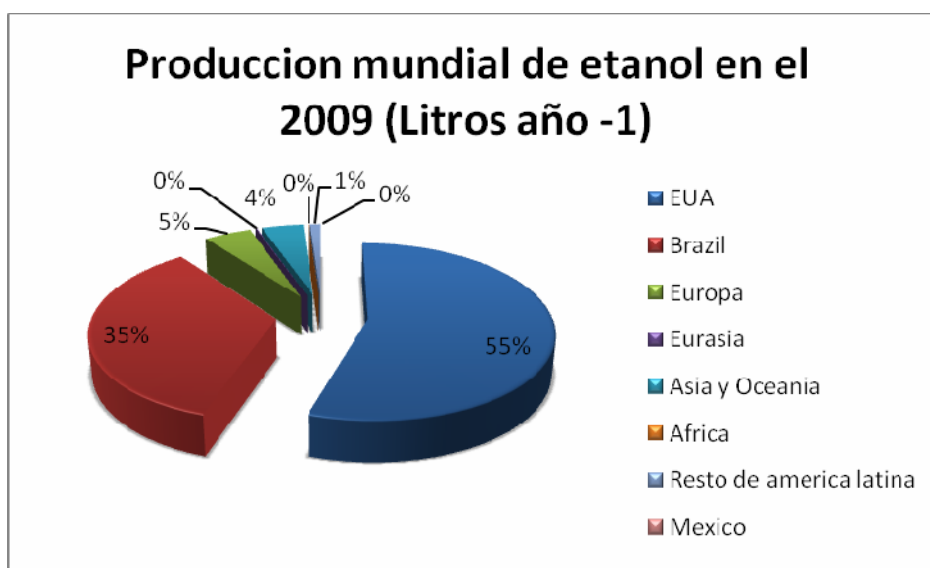


Figura 3. Producción mundial de bioetanol en el 2009.
Producción total: 77.03 billones de litros por año.

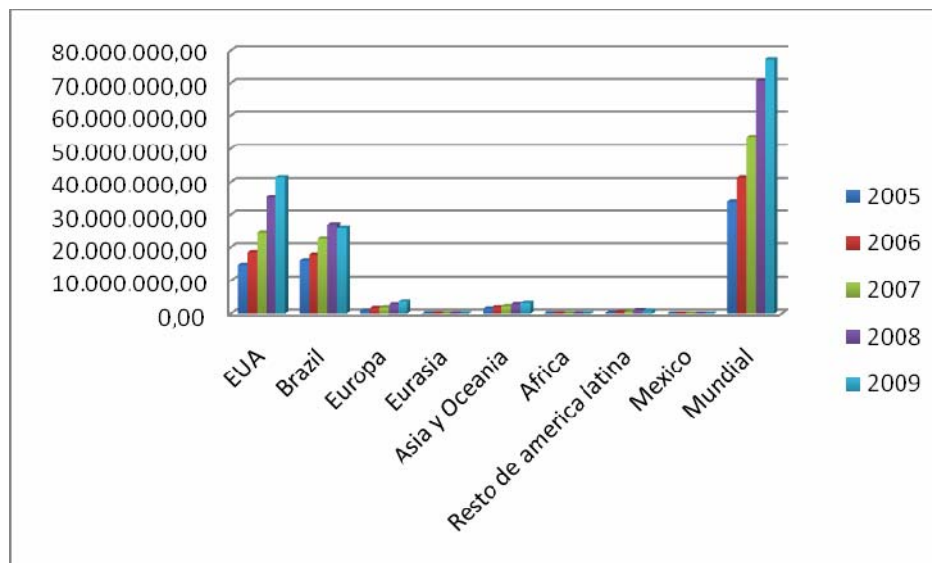


Figura 4. Dinámica de la producción de etanol 2005 – 2009(litros año⁻¹).

4.2.2. Bioetanol de primera y segunda generación.

El etanol de primera generación se obtiene de plantas que poseen un alto contenido de azúcares simples y fermentables, como la glucosa, la fructosa, la galactosa y la sacarosa. Entre las más importantes se incluye a la caña de azúcar. La ventaja de utilizar este tipo de fuentes consiste en que no es necesario realizar tratamientos previos para obtener los azúcares fermentables, ya que estos se encuentran presentes (Avella, 2006).

Los biocombustibles de segunda generación se diferencian de los biocombustibles convencionales o de primera generación en cuanto a dos aspectos claves: las materias primas utilizadas y las tecnologías que se aplican para su fabricación (Hackenberg, 2008).

4.2.3. Políticas públicas para la producción de biocombustibles.

Un aspecto fundamental para impulsar la producción y el consumo de biocombustibles son las políticas públicas que se adopten en esa materia; es decir, las reglas de juego que se establezcan y el papel que asuma el gobierno en la producción de una actividad que, sobre todos los países desarrollados es relativamente nueva (IICA, 2007).

Los países que lideran la producción de etanol, como EE UU, Brasil, Colombia, Argentina, y México cuentan con un marco regulador para la producción, uso y manejo del bioetanol, han establecido porcentajes para la mezcla de gasolina y bioetanol, y brindan incentivos para su producción. En América Latina y el Caribe, algunos países todavía no han formulado un marco regulador (IICA, 2007).

El elemento más constante en la política de impulso a la producción de biocombustibles en la región es la garantía que se les da a los productores de que habrá una demanda interna, en algunos países, esta medida va acompañada de incentivos a la producción y de un control del precio interno del bioetanol, de forma tal que garantice un mayor beneficio a los productores en cuanto a costos de oportunidad (IICA, 2010).

4.2.4. Rentabilidad de los biocombustibles.

En este contexto los biocombustibles aparecen como una alternativa para sustituir al crudo en declive y poder mantener la maquinaria del mercado global en funcionamiento. En el corto plazo (10 a 20 años) se espera además contar con la llamada “Segunda generación” de biocombustibles basada en materias primas provenientes de la silvicultura (bosques naturales o plantaciones con finalidades energéticas). Los defensores de la segunda generación argumentan que la eficiencia de estos es muy superior a los de la primera y se evitarían problemas como los de la competencia por los alimentos (honty, 2008).

Existe una gran presión sobre los precios de los biocombustibles para hacerlos competitivos frente a los biocombustibles fósiles, extendiéndola a los costos de producción de los insumos agrícolas, los cuales suelen presentar entre un 70-80 % del costo total del biocombustible (CEPAL, 2008).

4.3. Concepto de zonificación agroecológica.

Las zonas agro-ecológicas se definen como aquellas que tienen combinaciones similares de clima y características de suelo, y el mismo potencial biofísico para la producción agrícola.

La zonificación agro-ecológica (ZAE), de acuerdo con los criterios de FAO, define zonas en base a combinaciones de suelo, fisiografía y características climáticas. Los parámetros particulares usados en la definición se centran en los

requerimientos climáticos y edáficos de los cultivos y en los sistemas de manejo bajo los que éstos se desarrollan. Cada zona tiene una combinación similar de limitaciones y potencialidades para el uso de tierras, y sirve como punto de referencia de las recomendaciones diseñadas para mejorar la situación existente de uso de tierras, ya sea incrementando la producción o limitando la degradación de los recursos (FAO, 1981).

El propósito de zonificar, es separar áreas con similares potencialidades y limitaciones para el desarrollo delineando zonas agroecológicas que se definen como aquellas que tienen combinaciones similares de clima y características de suelo, y el mismo potencial biofísico para la producción agrícola. Además se puede combinar con otras capas de información, tales como uso, tenencia y disponibilidad de tierras, los requisitos nutricionales de las poblaciones humana y ganadera, las infraestructuras, costos y precios para generar programas específicos para cada zona (FAO, 1997).

4.4. Modelos de simulación

El uso de los modelos de simulación bajo una situación particular, con el fin de mejorar la productividad de cultivos, permite orientar la toma de decisiones y reducir los costos de investigación, lo cual resulta particularmente útil en países de desarrollo. La modelación puede entenderse como la aplicación de métodos predictivos para analizar problemas complejos del mundo real. Por su parte, la simulación es el resultado de aplicar el modelo bajo una condición particular, de

manera que se pueda predecir el resultado de diferentes acciones, siendo validada posteriormente con información del mundo real (Matthew et al., 2002).

Los modelos ayudan a la comprensión de las interacciones fisiológicas y ambientales, permitiendo realizar la planeación del cultivo y así contribuir de manera significativa a la toma de decisiones en etapas determinantes del ciclo de cultivo, como labores culturales, fertilización, irrigación, uso y manejo de productos fitosanitarios. Igualmente, los modelos de cultivo sirven como herramienta de planificación para cuantificar a través de pronósticos, el impacto de diferentes acciones y los resultados esperados en términos de producción; con algunos de estos es posible evaluar impactos ambientales y definir estrategias para reducirlos (Arnold, 2006).

4.4.1. El modelode simulaciónSoil and Water Assessment Tool (SWAT)

El SWAT es un modelo matemático de simulación basado en procesos espacial y temporalmente explícito gracias a una versión con interfaz en SIG's que trabaja a nivel de cuenca 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 a)Clima, b)Hidrología, c) Erosión, d)Temperatura del suelo, e)Crecimiento de cultivos, f) Nutrientes, g)Plaguicida, h) Manejo, i) Bacterias y patógenos (Arnold, et al., 1998;; Guzman, et al., 2004).

4.4.2. El Modelo ErosionProductivityImpactCalculator (EPIC)

El Modelo EPIC (Erosión ProductivityImpactCalculator) fue desarrollado por Williams (1984) con la finalidad de contar con una herramienta para la determinación de la influencia de las pérdidas de suelo en los procesos productivos. El modelo ha sufrido muchas transformaciones desde su versión inicial y en la actualidad el mismo incluye aspectos de calidad de agua, riego y drenaje. Recientemente se está cambiando el nombre por el de: “EnviromentalPolicyIntegratedClimate”.

El modelo EPIC es una herramienta muy útil para la planificación del uso de la tierra y manejo de cuencas. Como el modelo trabaja a escala diaria, proporciona valores muchos más realistas de erosión del suelo que la USLE y RUSLE, modelosa las cuales intenta sustituir.

4.5. SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

4.5.1. Definición de un Sistema de Información Geográfica (SIG):

Un Sistema de Información Geográfica (SIG) es una colección organizada de hardware, software y datos geográficos diseñados para la eficiente captura, almacenamiento, integración, actualización, modificación, ANÁLISIS ESPACIAL, y despliegue de todo tipo de información geográficamente referenciada (ESRI, 1993).

Un SIG es un sistema de hardware, software y procedimientos elaborados para facilitar la obtención, gestión, manipulación, análisis, modelado, representación y salida de datos espacialmente referenciados, para resolver problemas complejos de planificación y gestión" (Giménez, 2005).

Burrough (1986) los define como un conjunto de herramientas potentes para recoger, almacenar, recuperar, transformar y mostrar datos espaciales del mundo real para unos propósitos particulares.

Una definición semejante es la de Aranoff (1989) que los considera como un sistema informático que permite cuatro grupos de operaciones para manejar datos georreferenciados: entrada, almacenamiento y recuperación, manipulación y análisis, y salida.

El Environmental Systems Research Institute Inc. (ESRI, 1993) que es la principal empresa que comercializa este tipo de herramientas informáticas, los define Como un conjunto organizado de hardware, software y datos geográficos, diseñados específicamente para capturar, almacenar, actualizar, manipular, analizar y mostrar todo tipo de información referenciada geográficamente.

4.5.2. 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 (FAO 2003).

4.5.3. ArcView.

Es un programa diseñado de forma modular, permitiendo añadir, según las necesidades de análisis, EXTENSIONES que van aumentando las capacidades del SIG, ofreciendo optimización de los recursos (FAO/UNESCO 1996).

Los mapas han sido usado por personas de hace miles de años hasta el presente, así como también hace miles de años que se hace análisis de información geográfica. Arcview no es más que una extensión, consta de un conjunto de datos útiles listo para ser usados para crear muchos mapas diferentes, sin embargo en internet encontramos más datos para arcview (FAO/UNESCO 1996).

Arcview puede ser usado para acceder los datos almacenados en un formato propio conocido como shapefile, además se puede usar arcview para crear sus propios datos geográficos. Una vez que se ha creado el mapa que uno desea es fácil agregar información tabular, a ese mapa que puede estar en archivos DBASE u otros servidores de bases de datos. Con esto se podrá desplegar, consultar, resumir y organizar los datos geográficamente.

5. MATERIALES Y METODOS

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. Localización del estado de Veracruz

5.1.1. Clima y suelos

Como se deduce del Cuadro 1 y las Figuras 6 y 7, 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 7).

Cuadro 1. 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 ¹	38	Pesados, arcillosos (VR, GL) ²	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
Total	100	Total	100

¹Clave para clasificación climática de Köppen. ²Clave para Clasificación de suelos FAO.

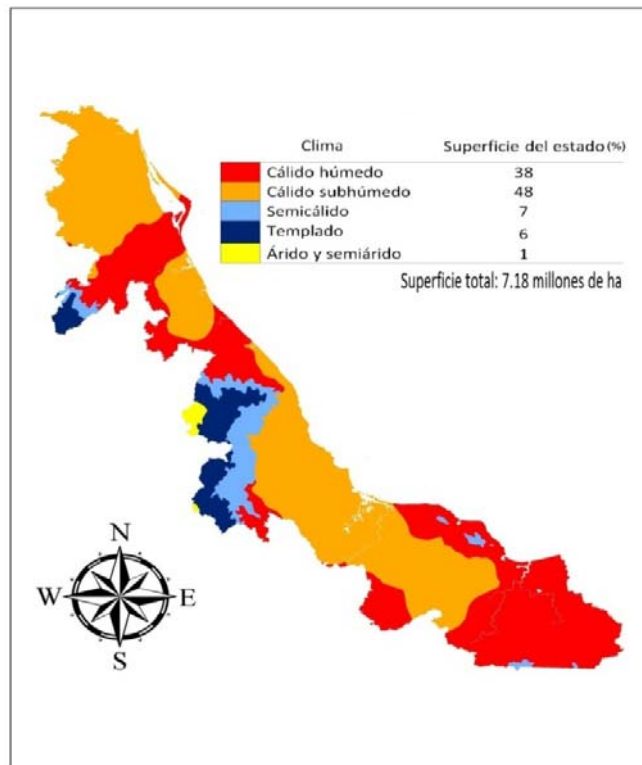


Figura 6. Distribución espacial de los tipos de clima en el estado de Veracruz.

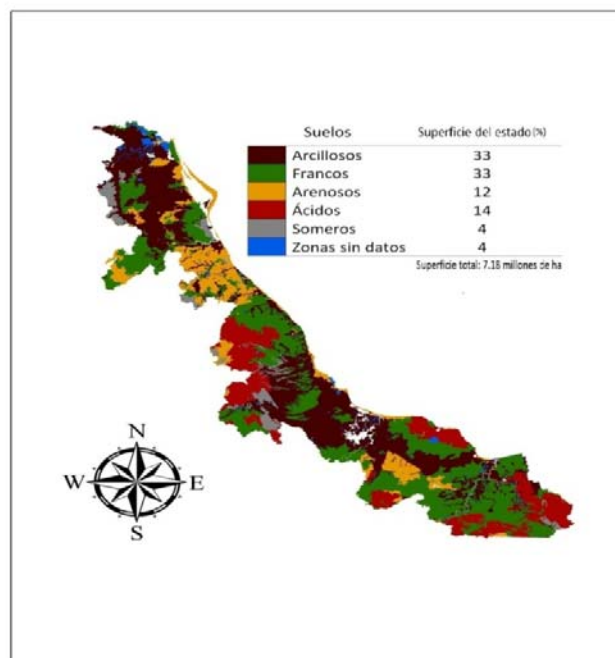


Figura 7. Distribución espacial de las clases de suelos en el estado de Veracruz.

5.1.2. Topografía y uso actual del suelo

Como se puede deducir a partir del Cuadro 2 y las Figuras 8 y 9, 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 8. 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.

La Figura 9 muestra el uso del suelo Forestal, Agrícola, Pecuario y zonas urbanas y cuerpos de agua en el estado de Veracruz. Como se observa, las zonas forestales con selvas y bosques ocupan el 18% de la superficie, y se distribuyen principalmente en áreas montañosas con pendientes mayores del 15%; en suelos ácidos y francos de buena fertilidad y bajo climas cálidos húmedos y semicálidos húmedos y sub-húmedos. Los pastizales ocupan el 53% de la superficie y se localizan a lo largo y ancho del estado, sin embargo, las mayores superficies se encuentran en los extremos norte y sur del estado, ocupando principalmente suelos arcillosos y francos.

Cuadro 2. 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		

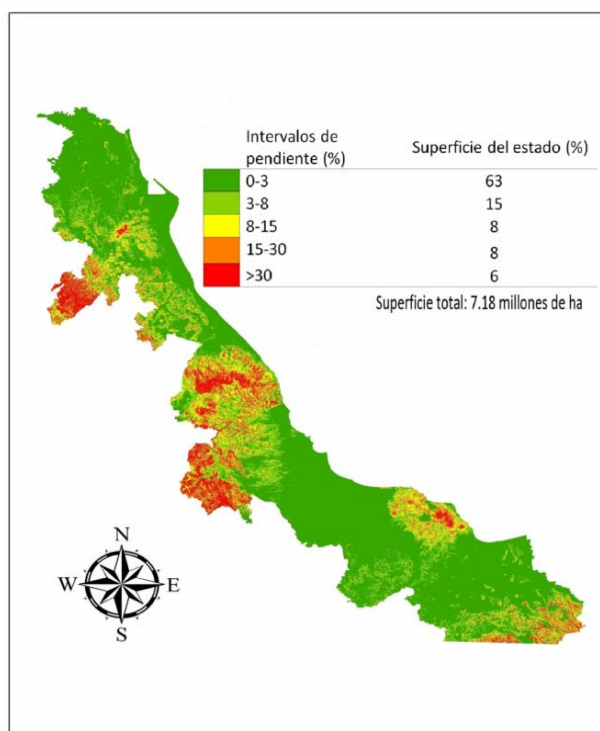


Figura 8. Topografía y pendiente del terreno en el estado de Veracruz.

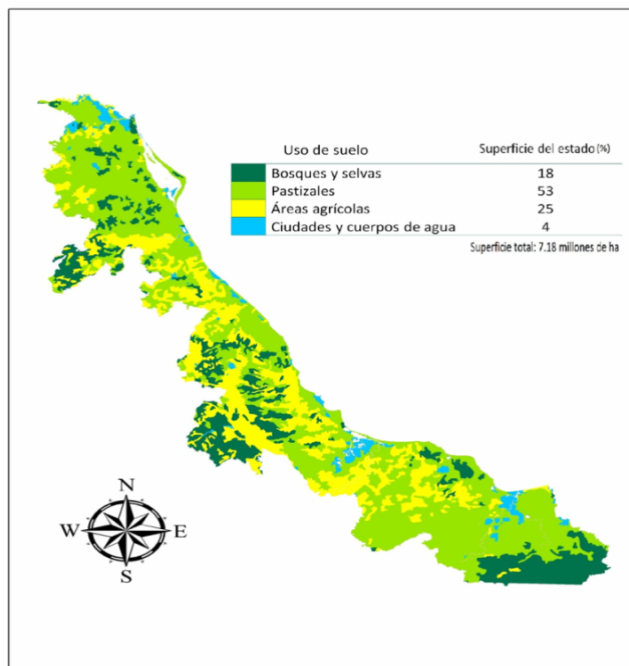


Figura 9. Uso de suelo en el estado de Veracruz.

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) para la elaboración de biocombustibles líquidos (bioetanol de primera y segunda generación). 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, principalmente en sistemas de producción extensivos de doble propósito con muy baja eficiencia en términos de uso del suelo y baja rentabilidad.

5.2. Caracterización del cultivo de caña de azúcar

La caracterización del cultivo de caña de azúcar se realizó considerando los siguientes nueve aspectos generales:

5.2.1. Puntos considerados para la caracterización de la caña de azúcar.

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

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 caña de azúcar.

La tecnología de producción para la caña de azúcar 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 caña de azúcar, 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 caña de azúcar.

Los principales y más sensibles parámetros fisiológicos de la caña de azúcar 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 caña de azúcar.

5.3. Simulación del rendimiento de la caña de azúcar

La simulación o estimación del rendimiento de la caña de azúcar se realizó con el modelo de simulación Soil and WaterAssessmentTool (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 caña fresca.
- Estimación del rendimiento teórico de bioetanol para la caña de azúcar.
- Cartografía del rendimiento de biomasa total, caña fresca y el bioetanol asociado.

5.3.1. El modelo de simulación SWAT.

De acuerdo con Inurreta, (2012) El modelo Soil and WaterAssessmentTool (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 (Guzmán *et al.* 2004; Neitsch, *et al.* 2005; Garg, *et al.* 2011; Luo, *et al.* 2008). 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 (Arnold, *et al.* 1998; Narasimhan, *et al.* 2005; Garg, *et al.* 2011). 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 caña de azúcar, 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 del cultivo, 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” contruidos 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.

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 3 se presenta, a manera de ejemplo, el perfil típico del suelo Cambisolcalcárico; mientras que en el Cuadro 4 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 3. Características del perfil típico del suelo Cambisolcalcárico.

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 g cm^{-3} , **H.D.:** Humedad disponible en mm mm^{-1} , **C.O.:** Carbono orgánico en porcentaje de suelo total, **C.H.S.:** Conductividad hidráulica saturada en 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 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 EnvironmentPolicyIntegratedClimate (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 5, para la estación 30100.

Cuadro 4. 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 ¹
Textura	Reportado en cartas edafológicas ¹
Materia orgánica	Reportado en cartas edafológicas ¹
Conductividad eléctrica	Reportado en cartas edafológicas ¹
Conductividad hidráulica saturada	a partir de la textura del suelo ²
Densidad aparente	a partir de la textura del suelo ²
Capacidad de agua disponible	a partir de la textura del suelo ²
Carbono orgánico	Carbono orgánico=0.95*(Materia orgánica) ³

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

Albedo Estimado a partir del contenido de materia orgánica⁴

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

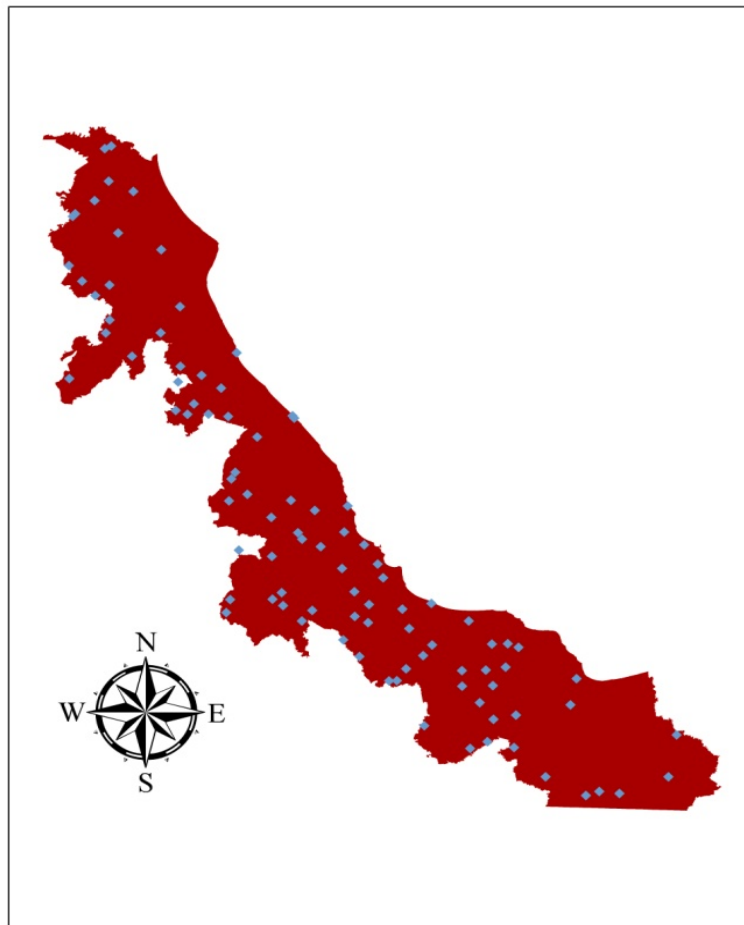


Figura 10. Ubicación en el estado de Veracruz de las 95 estaciones climáticas usadas por SWAT en este trabajo.

5.3.3.3. Manejo de la caña de azúcar

El manejo de la caña de azúcar que se cargó en el modelo SWAT para realizar el presente trabajo, se integró como se describió en el punto 5.2.2 y se presentan en el Cuadro 6.

Cuadro 5. 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
PDHDS	0.27	0.32	0.35	0.28	0.47	0.63	0.64	0.6	0.67	0.49	0.35	0.15
PDPHDS	30.4	2	2.5	5	7.6	14.6	16.6	15.7	16	10.8	6.2	3.3
PDPHDS	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; **PDHDS:** probabilidad de un día húmedo después de un día húmedo; **PDPHDS:** Promedio de días con precipitación pluvial al mes; **PDPHDS:** Precipitación pluvial máxima en media hora; **RS:** Radiación solar.

5.3.3.4. Parámetros fisiológicos de la caña de azúcar.

Los principales y más sensibles parámetros fisiológicos de la caña de azúcar considerados en este trabajo y utilizados en el modelo de simulación SWAT se obtuvieron como se describió en el punto 5.2.3 y se presentan en el Cuadro 7.

Cuadro 6. Paquete tecnológico y costos de producción por unidad de superficie del cultivo de caña de azúcar (Plantilla) en el estado de Veracruz.

Actividades	Fecha de Aplicación	DDS	Unidades	Cantidad	Producto comercial	Ingrediente activo		Tasa de aplicación		Costos (\$ ha-1)	
						Nombre	Concentración	Producto comercial	Ingrediente activo	Unitario	Total
PREPARACION DEL TERRENO											
Limpia del terreno	41183	-62	Servicio	1						1000	1000
Chapeo	41192	-52	Servicio	1						650	650
PREPARACION DEL SUELO											
Subsuelo	41202	-42	Servicio	1						800	800
Barbecho	41214	-32	Servicio	1						650	650
Barbecho cruzado	41228	-17	Servicio	1						650	650
Rastro	41238	-7	Servicio	1						500	500
Rastro cruzado	41243	-2	Servicio	1						500	500
Surcado	41244	-1	Servicio	1						500	500
ESTABLECIMIENTO DEL CULTIVO			t ha-1	Caña de 0.60m de				12		900	10800
Siembra	41245	0	jornales	24						150	3600
RIEGOS											
1er Riego	41247	3	jornales	3						150	450
Combustible			litros	30						11	330
2do Riego	41268	21	jornales	3						150	450
Combustible			litros	30						11	330
3er Riego	41289	42	jornales	3						150	450
Combustible			litros	30						11	330
4to Riego	05/02/2013	63	jornales	3						150	450
Combustible			litros	30						11	330
5to Riego	25/02/2013	83	jornales	3						150	450
Combustible			litros	30						11	330
6to Riego	15/03/2013	101	jornales	3						150	450
Combustible			litros	30						11	330
7mo Riego	05/04/2013	122	jornales	3						150	450
Combustible			litros	30						11	330
8vo Riego	25/04/2013	142	jornales	3						150	450
Combustible			litros	30						11	330
9no Riego	15/05/2013	162	jornales	3						150	450
Combustible			litros	30						11	330
10mo Riego	30/05/2013	177	jornales	3						150	450
Combustible			litros	30						11	330
FERTILIZACIÓN			kg ha-1	230-65-18 NPK		NPK		952			7800
1ra Fertilización			kg ha-1		130-65-90 NPK		NPK	519			
Nitrógeno fuente 1			kg ha-1		18-46-00 N		180 g kg-1		25		
Nitrógeno fuente 2			kg ha-1		Urea N		460 g kg-1	228	105	8	1824
Fósforo fuente 1			kg ha-1		18-46-00 P		460 g kg-1	141	65	12	1692
Potasio fuente 1			kg ha-1		KCl K		600 g kg-1	150	90	10	1500
Aplicación	41245	0	jornales	3						150	450
2da Fertilización			kg ha-1		130-00-90 NK		NK	433			
Nitrógeno fuente 1			kg ha-1		Urea N		460 g kg-1	283	130	8	2264
Potasio fuente 1			kg ha-1		KCl K		600 g kg-1	150	90	10	1500
Aplicación	01/03/2013	88	jornales	3						150	450
CONTROL DE MALEZAS											
Químico Preemergente			kg ha-1		Gesapax c	Ametrina + Atrazina	382+382 g kg-1	4	528 + 1.52	230	920
Aplicación	05/12/2012	3	jornales	2						150	300
Químico postemergente 1			kg ha-1		Gesapax F	Ametrina + 2,4-D	363 + 204 g	5	815 + 1.02	225	1125
Aplicación	15/02/2013	75	jornales	2						150	300
Cultivo	02/01/2013	31	servicio	1						500	500
Aporque	01/02/2013	60	Servicio	1						500	500
Químico postemergente 1			kg ha-1		Gesapax F	Ametrina + 2,4-D	363 + 204 g	5	815 + 1.02	225	1125
Aplicación	01/04/2013	120	jornales	2						150	300
CONTROL DE PLAGAS											
1er Ctrpl plagas suelo			kg ha-1		Furadan 35	Carbofuran	350 g kg-1	5	1.75	185	925
Aplicación	41245	0	jornales	2						150	300
1er Ctrpl plagas follaje			kg ha-1		Lucadrin	Monocrotophos	400 g L-1	3	1.2	170	510
Aplicación	41384	110	jornales	2						150	300
2do Ctrpl plagas follaje			kg ha-1		Furadan 35	Carbofuran	350 g kg-1	3	1.05	185	555
Aplicación	30/05/2013	180	jornales	2						150	300
3er Ctrpl plagas follaje			kg ha-1		Lucadrin	Monocrotophos	400 g L-1	3	1.2	170	510
Aplicación	27/07/2013	240	jornales	2						150	300
COSECHA											
Despunte	01/12/2013	364	jornales	4						150	600
Cosecha	02/12/2013	365	jornales	40						150	6000
Traslado al ingenio de la caña			Servicio	7						6000	42000
COSTO DE PLANTILLA											
2012-2013											102,300.00
PRODUCCION PLANTILLA											
2013			t ha-1	140						750	105,000.00

CONTINÚA Cuadro 6. Paquete tecnológico y costos de producción por unidad de superficie del cultivo de caña de azúcar (Soca) en el estado de Veracruz.

Actividades	Fecha de Aplicación	DDS	Unidades	Cantidad	Producto comercial	Ingrediente activo		Tasa de aplicación		Costos (\$ ha-1)	
						Nombre	Concentración	producto comercial	Ingrediente activo	Unitario	Total
SOCA 1											
PREPARACIÓN DE CEPA											
Destronque	15/12/2013	13	jornales	4						150	600
Junta y quema	16/12/2013	14	jornales	2						150	300
PREPARACIÓN DEL TERRENO											
Subsileo-Desaporque	30/12/2013	28	Servicio	1						800	800
RIEGOS											
1er Riego	04/12/2014	2	jornales	3						150	450
Combustible			litros	30						11	330
2do Riego	25/12/2014	21	jornales	3						150	450
Combustible			litros	30						11	330
3er Riego	15/01/2014	42	jornales	3						150	450
Combustible			litros	30						11	330
4to Riego	05/02/2014	63	jornales	3						150	450
Combustible			litros	30						11	330
5to Riego	25/02/2014	83	jornales	3						150	450
Combustible			litros	30						11	330
6to Riego	15/03/2014	101	jornales	3						150	450
Combustible			litros	30						11	330
7mo Riego	05/04/2014	122	jornales	3						150	450
Combustible			litros	30						11	330
8vo Riego	25/04/2014	142	jornales	3						150	450
Combustible			litros	30						11	330
9no Riego	15/05/2014	162	jornales	3						150	450
Combustible			litros	30						11	330
10mo Riego	30/05/2014	177	jornales	3						150	450
Combustible			litros	30						11	330
FERTILIZACIÓN			kg ha-1		230-65-180	NPK	NPK	952			
1ra Fertilización			kg ha-1		130-65-90	NPK	NPK	519			
Nitrógeno fuente 1			kg ha-1		18-46-00	N	180 g kg-1		25		
Nitrógeno fuente 2			kg ha-1		Urea	N	460 g kg-1	228	105	8	1824
Fósforo fuente 1			kg ha-1		18-46-00	P	460 g kg-1	141	65	12	1692
Potasio fuente 1			kg ha-1		KCl	K	600 g kg-1	150	90	10	1500
Aplicación	29/12/2014	27	jornales	3						150	450
2da Fertilización			kg ha-1		130-00-90	NK	NK	433			
Nitrógeno fuente 1			kg ha-1		Urea	N	460 g kg-1	283	130	8	2264
Potasio fuente 1			kg ha-1		KCl	K	600 g kg-1	150	90	10	1500
Aplicación	01/03/2014	88	jornales	3						150	450
CONTROL DE MALEZAS											
Químico Preemergente			kg ha-1		Gesapax com	Ametrina + 382+382 g kg-1		4	1.528 + 1.528	230	920
Aplicación	05/12/2013	3	jornales	2						150	300
Químico postemergente 1			kg ha-1		Gesapax H37	Ametrina + 363 + 204 g kg-1		5	1.815 + 1.020	225	1125
Aplicación	15/02/2014	75	jornales	2						150	300
Cultivo	02/01/2014	31	servicio	1						500	500
Aporque	01/02/2014	60	Servicio	1						500	500
Químico postemergente 1			kg ha-1		Gesapax H37	Ametrina + 363 + 204 g kg-1		5	1.815 + 1.020	225	1125
Aplicación	01/04/2014	120	jornales	2						150	300
CONTROL DE PLAGAS											
1er Ctról plagas suelo			kg ha-1		Furadan 350	Carbofurar 350 g kg-1		5	1.75	185	925
Aplicación	02/12/2013	0	jornales	2						150	300
1er Ctról plagas follaje			kg ha-1		Lucadrin	Monocroto 400 g L-1		3	1.2	170	510
Aplicación	20/04/2014	110	jornales	2						150	300
2do Ctról plagas follaje			kg ha-1		Furadan 350	Carbofurar 350 g kg-1		3	1.05	185	555
Aplicación	30/05/2014	180	jornales	2						150	300
3er Ctról plagas follaje			kg ha-1		Lucadrin	Monocroto 400 g L-1		3	1.2	170	510
Aplicación	27/07/2014	240	jornales	2						150	300
COSECHA											0
Despunte	03/12/2014	360	jornales	4						150	600
Cosecha	04/12/2014	364	jornales	40						150	6000
Traslado al ingenio de la caña				7						6000	42000
COSTO DE SOCA 1	2014										76,550.00
PRODUCCION SOCA 1	2014		t ha-1	140						900	126,000.00

Cuadro 7. Parámetros fisiológicos de la caña de azúcar utilizados en el presente trabajo.

Parámetros fisiológicos	Valores
Temperatura optima (°C)	35
Temperatura base (°C)	18
Índice de área foliar máximo[m ² m ⁻²]	8
Eficiencia en el uso de la radiación [(Kg ha ⁻¹)(MJ m ⁻²) ⁻¹]	35
Segundo punto de la curva de eficiencia en el uso de la radiación [(Kg ha ⁻¹)(MJ m ⁻²) ⁻¹]	43
Índice de cosecha (Adimensional)	0.7
Profundidad máxima de raíces (m)	2
Altura máxima del dosel (m)	3
Coeficiente de extinción de la luz (Adimensional)	0.65
Altura mínima (msnm)	0
Altura máxima (msnm)	1200

5.4. Proceso general de simulación

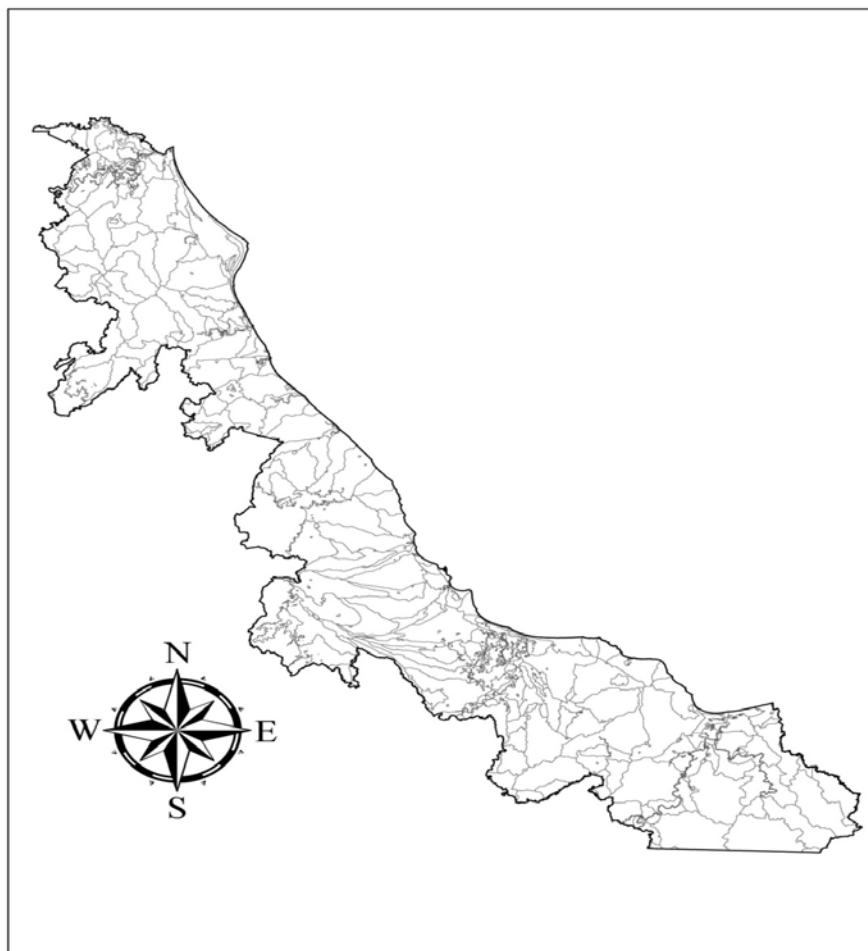
El SWAT es un modelo que simula el ciclo hidrológico a nivel de cuenca a través de dos principales fases: La fase de escurrimiento superficial y la fase de seguimiento al escurrimiento en los diferentes cauces de la cuenca hasta la salida de ésta. En ambas fases el modelo considera la cubierta vegetal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



Fig

ura 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 caña de azúcar. Éste procedimiento resulto 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.

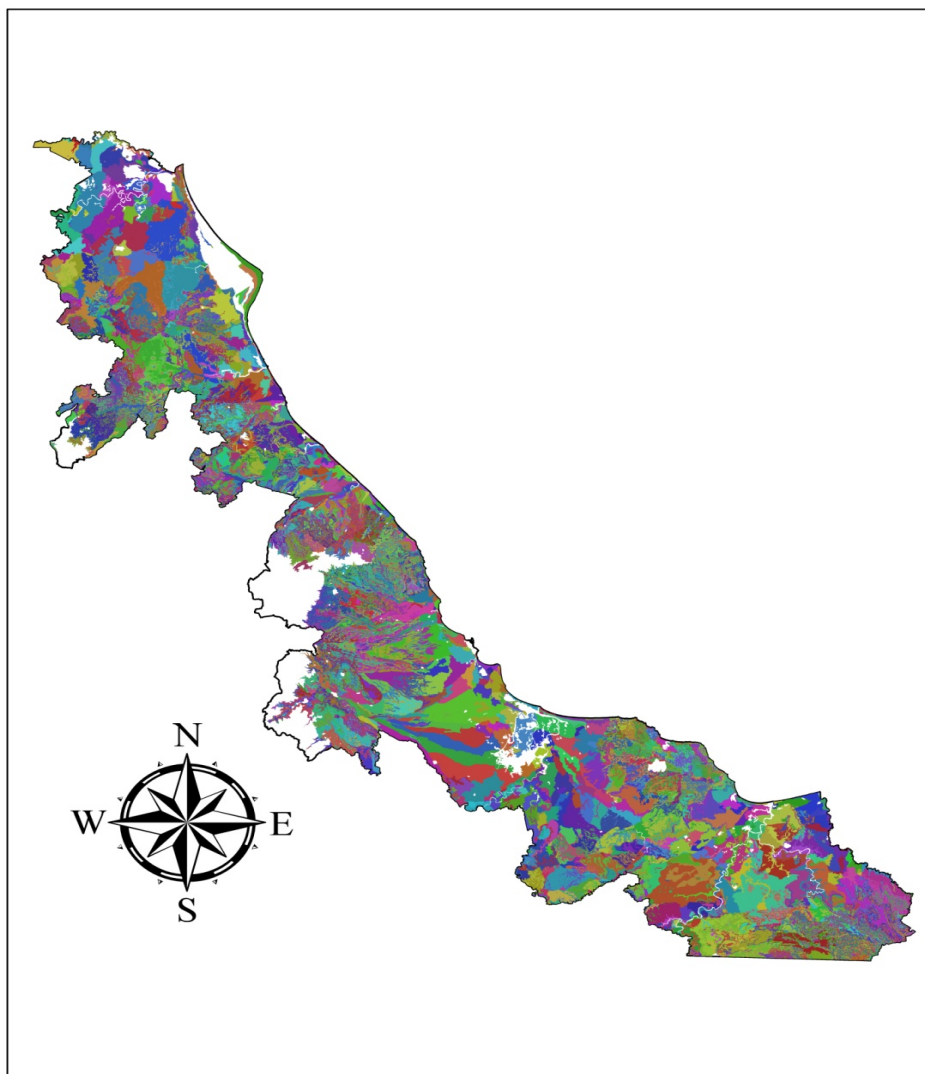


Figura 12. Estado de Veracruz dividido en las 4,053 URH generadas por SWAT.

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 asignaron los valores de los parámetros fisiológicos más sensibles de la caña de azúcar.

5.4.2. Metodología para elaborar la cartografía del potencial de producción

La cartografía del potencial de producción de la caña de azúcar fue elaborada a partir de los resultados obtenidos de la simulación del rendimiento de biomasa seca total y tallo fresco en cada URH, por lo que el mapa de rendimiento de la caña esta integrado a partir de 4,053 datos de rendimiento de caña fresca, bioetanol de primera y segunda generación.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.1. Caracterización del cultivo de caña de azúcar.

6.1.1. Estadísticas y producción potencial de la caña de azúcar.

En el Cuadro 8 se muestran las estadísticas generales de la superficie cultivada, bajo las condiciones del temporal en el estado de Veracruz durante el período 2001-2009; y el rendimiento promedio actual y potencial por unidad de superficie del producto económicamente importante (tallo fresco), del insumo bioenergético (azúcar), de los residuos de cosecha, de la biomasa seca total y el rendimiento potencial de etanol de primera generación, El rendimiento promedio actual de caña de azúcar puede calificarse como “bueno”, sin embargo, se encuentra por debajo del rendimiento potencial de las variedades mejoradas. Con todo y ello, se considera que la caña de azúcares un cultivo con alto potencial para producir bioetanol de primera generación a partir de los azucares (glucosa) que pueden fermentarse directamente.

Cuadro 8. Estadísticas generales de producción promedio (2001-2009) y producción potencial esperada bajo condiciones de temporal en el estado de Veracruz de la caña de azúcar.

Indicador		Cultivo
		Caña de azúcar
Superficie sembrada (x1000 has.)		253
Superficie cosechada (x1000 has.)		248
Rendimiento de tallo fresco (t ha^{-1})	Promedio actual	72.3
	Potencial	120
Rendimiento de tallo seco (t ha^{-1})	Promedio actual	25.3
	Potencial	42.0
Rendimiento de azúcar	kg t^{-1} fresca de tallo	112
	kg t^{-1} seca de tallo	320
	t ha^{-1}	13.44
Rendimiento de residuos de cosecha (t ha^{-1}) base seca.	Promedio actual	11
	Potencial	18
Rendimiento total de biomasa seca aérea (t ha^{-1})	Promedio actual	36
	Potencial	60
Rendimiento potencial de etanol (L ha^{-1})		8,780

6.1.2. Características del producto económicamente importante (tallo fresco)

El Cuadro 9, muestra la composición promedio típica del tallo de la caña de azúcar, en términos de contenido de humedad, materia seca, azúcares y la tasa de conversión del producto económicamente importante (tallos frescos) en bioetanol. La caña de azúcar presenta menos contenido de agua y mayor proporción de materia seca que otros cultivos. Así mismo, su contenido de azúcares y la tasa de conversión de tallo fresco a bioetanol se encuentran entre los más altos, comparados con otros cultivos.

Cuadro 9. Valores promedio típicos de la composición de los productos económicamente importantes de la caña de azúcar (Tallo fresco) y su tasa de conversión a etanol de primera generación.

Características		Caña (tallo fresco)
Humedad del tallo fresco (%)		65
Materia seca del tallo fresco (%)		35
Almidón (%)		SD
Azúcares (% del producto)		20
Sacarosa (% sobre el contenido de azúcar)		83
Fructuosa (% sobre el contenido del azúcar)		3
Glucosa (% sobre el contenido del azúcar)		14
Tasa de conversión Tallo fresco-bioetanol (L t ⁻¹)	Base fresca	73
	Base seca	209

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

Las características de los co-productos del proceso industrial para producir el bioetanol de primera generación a partir de la caña de azúcar se muestran en el Cuadro 10. La caña de azúcar produce bagazo en una proporción de 30% con respecto al total del tallo fresco procesado y tiene una proporción 1:1 de materia seca y agua. En términos de proteína cruda, grasas, contenido de nitrógeno, fósforo y potasio y fibra, el bagazo de la caña de azúcar presenta proporciones adecuadas para utilizarlo como mejorador del suelo.

El bióxido de carbono es otro co-producto que se obtiene de la producción industrial de bioetanol. El volumen del gas producido con el proceso industrial de

la caña de azúcar es 40% sobre el volumen de bioetanol producido. Las vinazas son otro co-producto que se producen en pequeñas cantidades durante el proceso industrial para producir bioetanol, son ricas en nutrientes, por lo que actualmente en los ingenios azucareros de México se utilizan como biofertilizantes.

Varios autores coinciden en que el uso de los co-productos es indispensable para mejorar la rentabilidad, retorno energético y mitigación de la emisión de gases de efecto invernadero de los biocombustibles líquidos. Así mismo, dichos autores también coinciden en que el uso de los co-productos como alimento para ganado y/o como biofertilizantes, es indispensable porque pueden coadyuvar significativamente con la producción de alimentos.

Cuadro 10. Valores promedio típicos de la composición de los co-productos resultantes del proceso industrial para producir etanol de caña de azúcar.

Características	Co-producto
Nombre del co-producto	Bagazo
Proporción del co-producto con relación a la materia prima procesada (%)	30
Materia seca (%)	50
Contenido de humedad (%)	50
Proteína cruda (%)	1.14
Grasas (%)	0.52
Fibra cruda (%)	27.9
Nitrógeno (%)	1.33
Fósforo (%)	0.83
Potasio (%)	2.78
Nombre del co-producto	CO ₂
Proporción del co-producto con relación a la producción de etanol (%)	40

6.1.4. Composición química de los co-productos de caña de azúcar

La composición química, en términos de los componentes celulares y sus respectivos azúcares del bagazo de la caña de azúcar y su producción unitaria teórica de bioetanol de segunda generación se muestran en el Cuadro 11. A partir de la información presentada en este Cuadro, se puede decir la cantidad de bioetanol que teóricamente se puede producir a partir del bagazo de la caña de azúcar, es tan importante como el bioetanol de primera generación producido por los azúcares en la caña. Sin embargo, el proceso para producir bioetanol de segunda generación es mucho más complicado que la simple fermentación de los azúcares para producir el bioetanol de primera generación y a la fecha solo USA, Canadá y la Unión Europea cuentan con tecnología experimental y plantas piloto para producir bioetanol celulósico. El inicio del desarrollo de tecnología para producir bioetanol hemicelulósico aún se encuentra en lista de espera. Por lo anterior, en el corto y mediano plazo, es preferible la biomasa con mayor proporción de celulosa.

Cuadro 11. Composición química promedio, típica de los co-productos industriales del proceso para producir etanol de caña de azúcar

Parámetros		Caña de azúcar
Nombre del co-producto		Bagazo
Componentes celulares (% de materia seca)	Celulosa	42.31
	Hemicelulosa	23.26
	Lignina	20.85
Azúcares de 6-Carbonos (% de materia seca)	Glucan	40.23
	Galactan	0.50

	Manosan	0.33
Azúcares de 5-Carbonos (% de materia seca)	Xilan	21.87
	Arabinan	1.68
Bioetanol de celulosa-azúcares de 6 carbonos (L t ⁻¹)		269
% de etanol celulósico		63
Bioetanol de hemicelulosa-azúcares de 5 carbonos (L t ⁻¹)		158
% de etanol hemicelulósico		37
Bioetanol total de segunda generación (L t ⁻¹)		427

6.1.5. 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, para el caso de la caña de azúcar los residuos de cosecha son las hojas y el cogollo de la planta. 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 12, muestra la proporción y composición química, en términos de los componentes celulares y sus respectivos azúcares, de los residuos de cosecha de la caña de azúcar. Como se observa, la composición química de los residuos de cosecha es en general similar a la composición química del bagazo, sin embargo, presentan menos lignina. En términos del rendimiento de bioetanol de segunda generación, el ofrecido por los residuos de cosecha es similar al ofrecido por el bagazo.

Cuadro 12. Composición química promedio, típica de los residuos de cosecha de la caña de azúcar.

Parámetros		Caña de azúcar
		Residuos de cosecha
Descripción de los residuos de cosecha		Hoja y "cogollo"
Índice de residuos de cosecha (%)		30
Contenido de humedad (%)		75
Componentes celulares (% de materia seca)	Celulosa	44.17
	Hemicelulosa	25.77
	Lignina	11.62
Azúcares de 6-Carbonos (% de materia seca)	Glucan	44.17
	Galactan	0.50
	Manosan	0.33
Azúcares de 5-Carbonos (% de materia seca)	Xilan	22.38
	Arabinan	1.68
Etanol de celulosa-azúcares de 6 carbonos (L t ⁻¹)		295
% de etanol celulósico		64
Etanol de hemicelulosa-azúcares de 5 carbonos (L t ⁻¹)		161
% de etanol hemicelulósico		36
Total de etanol 2G (L t ⁻¹)		456

6.1.6. Uso de los productos, co-productos y residuos de cosecha de la caña de azúcar

En el Cuadro 13, se muestra el uso actual y potencial en México de los productos económicamente importantes, co-productos y residuos de cosecha de la caña de azúcar. El producto económicamente importante (tallo fresco) o insumo bioenergético de la caña de azúcar es usado o puede usarse para la alimentación humana y animal, como biofertilizante y para uso en la industria.

Cuadro 13. Uso actual y potencial en México de los productos económicamente importantes, co-productos y residuos de cosecha de la caña de azúcar.

Nombre del producto/ Insumo bioenergético		Uso actual/potencial para	Cultivo
Genérico	Específico		Caña de azúcar
Producto económica- mente importante	Tallo/ azúcar	Alimento humano	✓
		Alimento animal	✓
		Producción etanol 1G	✓
Co-productos	Bagazo	Alimento humano	-
		Alimento animal	-
		Generación de energía	✓
		Mejorador de suelo	✓
		Producción etanol 2G	✓
		Producción de papel	✓
	CO ₂	Industria	✓
		Agricultura	✓
	Vinazas	Industria	✓
		Mejorador de suelo	✓
Residuos de cosecha	Celulosa y hemicelulosa	Alimento animal	✓
		Generación de energía	-
		Mejorador de suelo	✓
		Producción etanol 2G	✓
		Producción de papel	✓

6.1.7. Paquete tecnológico y costos de producción de la caña de azúcar

El paquete tecnológico y los costos de producción de la caña de azúcar en Veracruz se presentaron en el Cuadro 6 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 caña de azúcar. Como se puede ver, el paquete tecnológico cubre todas las

actividades y costos desde la preparación del terreno hasta la cosecha y transporte de la caña fresca al ingenio. Así mismo, se presentan los costos para “Plantilla”, es decir para el ciclo cuando se establece el cultivo, en el cual la relación Beneficio/Costo es muy baja de 1.03 debido a los costos involucrados en el establecimiento, mientras que en la soca es de 1.65 debido a que ya no involucra costos de establecimiento y por lo tanto el costo total de producción es menor.

6.1.8. Parámetros fisiológicos de la caña de azúcar

Al igual que el punto anterior, los parámetros fisiológicos de la caña de azúcar se presentaron en el Cuadro 7 del punto 5.3.3.4., de materiales y métodos. Se presentó en esta sección debido a que los parámetros fisiológicos de la caña fueron considerados como parte de la información utilizada para simular el rendimiento de la caña de azúcar.

6.2. Potencial de rendimiento de tallo fresco y bioetanol de la caña de azúcar.

La Figura 13 muestra el mapa de potencial de rendimiento de la caña de azúcar en el estado de Veracruz. Dicho potencial de rendimiento está dividido en diez categorías y está descrito por las variables rendimiento de caña de azúcar (tallo fresco y tallo seco), rendimiento de residuos de cosecha y bagazo,

rendimiento teórico de bioetanol de primera y segunda generación y rendimiento total; 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 10% ofrece rendimientos de caña de azúcar entre 70 y 106 t ha⁻¹, el 73% ofrece rendimientos entre 40 y 70 t ha⁻¹, mientras que el 4% ofrece rendimientos menores de 40 t ha⁻¹. El resto de la superficie (13%) presenta condiciones no aptas para el cultivo de la caña de azúcar, por lo que fueron eliminadas de este trabajo. Para estas tres categorías de potencial de producción el rendimiento de bioetanol de primera generación varía entre 5,110 y 7,740, entre 2,920 y 5,110 y menos de 2,920 L ha⁻¹, respectivamente, mientras que para el bioetanol de segunda generación el rendimiento varía entre 5,660 y 8,570, entre 3,240 y 5,660 y menos de 3,240 L ha⁻¹, respectivamente. Como se puede ver, en el cultivo de caña de azúcar el rendimiento de bioetanol de segunda generación es tan importante como el rendimiento de bioetanol de primera generación.

Respecto a la localización de estas tres grandes categorías del potencial de rendimiento de la caña de azúcar, se puede decir en general que el mayor potencial de rendimiento se localiza en las áreas donde actualmente están ubicados la mayoría de los ingenios azucareros, como es la zona central de Veracruz y la cuenca baja del río Papaloapan. Por lo tanto para producir bioetanol a partir de la caña de azúcar, es necesario considerar principalmente a las áreas con potencial de rendimiento entre 40 y 70 t ha⁻¹, y preferentemente bajo un uso

actual del suelo de pastizales, esto con el objetivo de no impactar en forma negativa la producción de alimentos ni la deforestación.

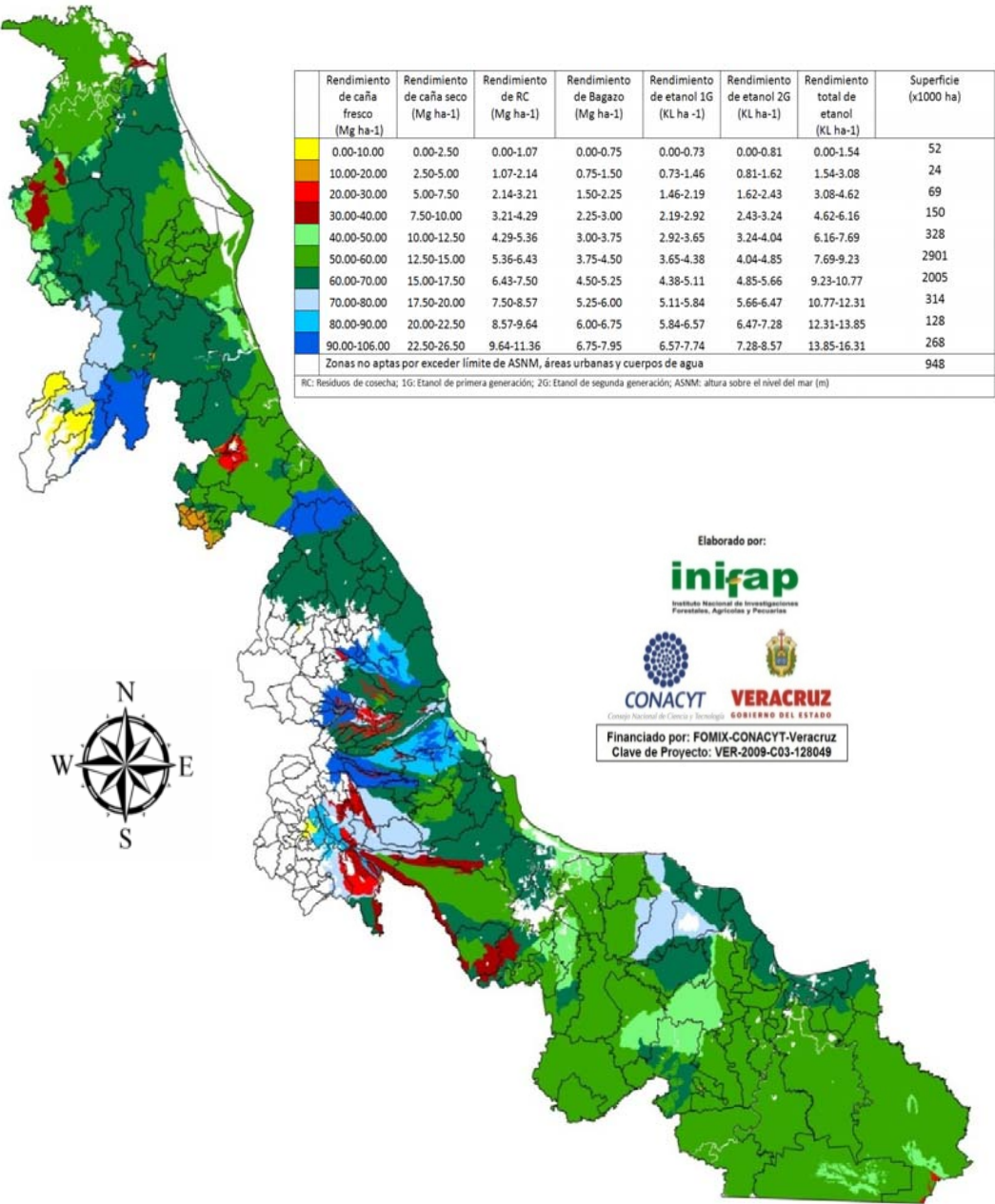


Figura 13. Rendimiento de caña fresca de caña de azúcar simulado por el modelo SWAT y estimación del rendimiento teórico de bioetanol de primera y segunda generación en el estado de Veracruz.

6.3. Relación Potencial de rendimiento-Uso actual del suelo

En la Figura 14 se presenta el mapa que muestra la relación entre el potencial de rendimiento de la caña de azúcar y el uso actual del suelo, mientras que el Cuadro 14 muestra la superficie ocupada por cada categoría de potencial de rendimiento de caña de azúcar, 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 bioetanol.

A partir del Cuadro 14 se observa que de la superficie apta para el cultivo de caña en Veracruz, el 20.9%, 49.6% y 13.8% está actualmente siendo usada por actividades agrícolas, pecuarias y forestales, respectivamente. Así mismo, se puede deducir que de la superficie actualmente con uso agrícola (1,500.000 has), sólo el 21% presenta alto potencial de rendimiento (entre 70 y 106 t ha⁻¹), el 71%

presenta potencial medio (entre 40 y 70 t ha⁻¹) y el 8% presenta potencial bajo (menos de 40 t ha⁻¹).

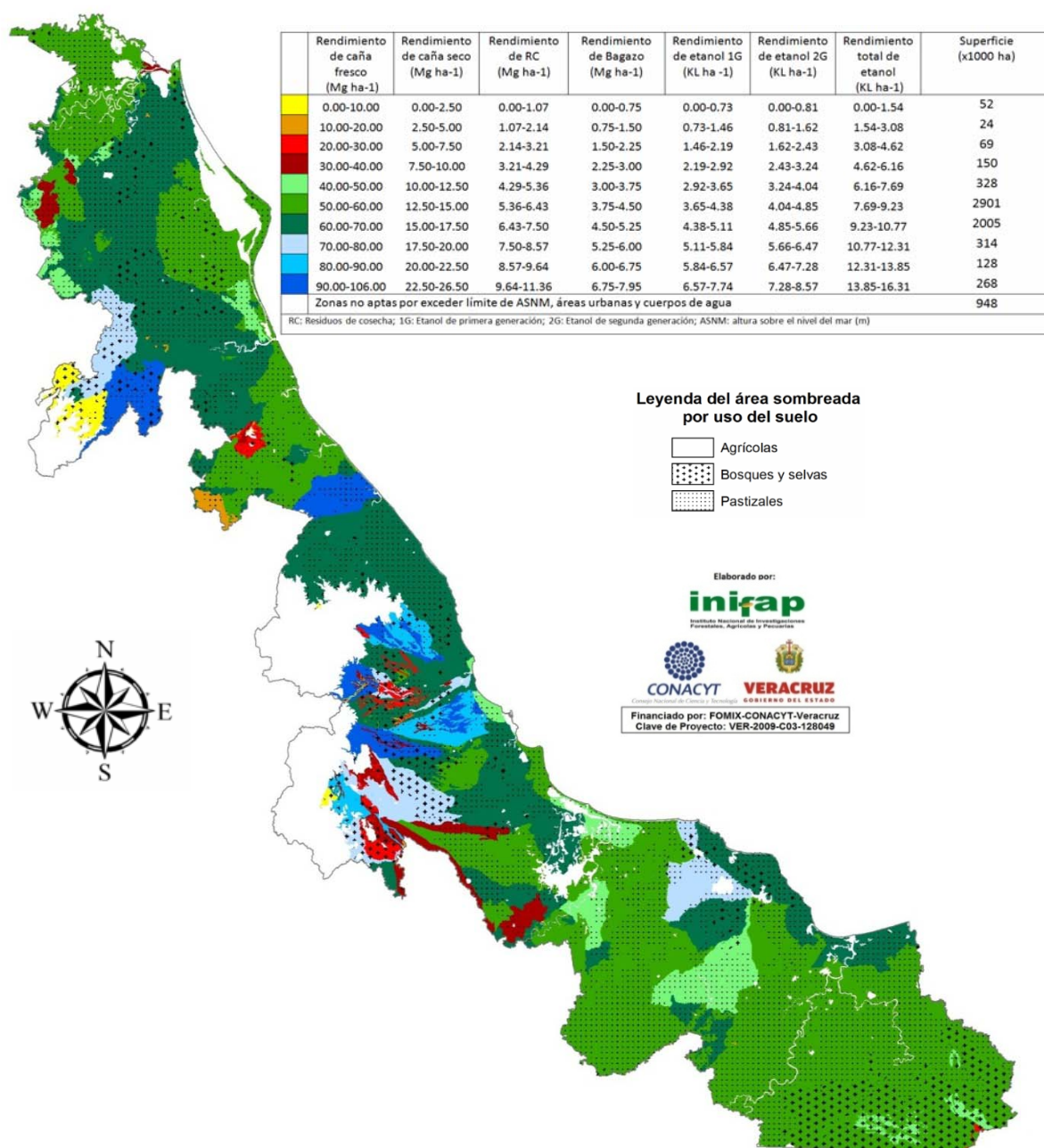


Figura 14. Rendimiento de caña fresca de caña de azúcar simulado por el modelo SWAT y estimación del rendimiento teórico de bioetanol de primera y segunda generación en el estado de Veracruz. Con uso actual del suelo.

Cuadro 14. Superficie ocupada por cada categoría de potencial de rendimiento de caña de azúcar, distribuida entre los diferentes usos actuales del suelo (agrícola, pecuario y forestal) del estado de Veracruz.

Rendimiento de caña fresca (t ha ⁻¹)	Área total (x1000 has)	Área (%)	Uso actual del suelo				Área descartada
			Agrícola	Pecuario (Pastizales)	Bosques y selvas	Cuerpos de agua y áreas urbanas	
0-10	52	0.7	14	5	32	0	0
10-20	24	0.3	11	11	1	0	0
20-30	69	1.0	19	14	34	1	0
30-40	150	2.1	74	53	20	4	0
40-50	328	4.6	70	204	40	14	0
50-60	2,901	40.4	489	1,854	457	101	0
60-70	2,005	27.9	511	1,209	225	60	0
70-80	314	4.4	131	82	100	1	0
80-90	128	1.8	58	39	29	1	0
90-106	268	3.7	121	94	49	5	0
Área descartada	-	-	-	-	-	-	948
Total	6,239	86.8	1,500 (20.9%)	3,565 (49.6%)	989 (13.8%)	186 (2.6%)	948 (13.2%)

De la superficie actualmente con uso pecuario (3,565,000 has), sólo el 6% presenta alto potencial de rendimiento (entre 70 y 106 t ha⁻¹), en cambio el 92% presenta potencial medio (entre 40 y 70 t ha⁻¹) y el 2% presenta potencial bajo (menos de 40 t ha⁻¹). Esta superficie con uso actual del suelo pecuario y con rendimiento medio, es la superficie donde debe buscarse el desarrollo de la industria del bioetanol para no impactar en forma negativa la producción de alimentos.

Finalmente, de la superficie actualmente con uso forestal (989,000 has), el 18% presenta alto potencial de rendimiento (entre 70 y 106 t ha⁻¹), el 73% presenta potencial medio (entre 40 y 70 t ha⁻¹) y el 9% presenta potencial bajo (menos de 40 t ha⁻¹).

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 caña de azúcar en función de su rendimiento de caña fresca, co-productos del proceso industrial para producir bioetanol, residuos de cosecha, paquete tecnológico y costos de producción y los principales parámetros utilizados en modelos de simulación. Dicha caracterización permitió obtener información para cuantificar el potencial de rendimiento de caña fresca y bioetanol de primera y segunda generación en el estado de Veracruz.
- Se cuantificó y cartografió el estado de Veracruz en función de su potencial para producir caña fresca y bioetanol de primera y segunda generación. Dicha cartografía permite identificar las áreas más adecuadas para el desarrollo de la industria del bioetanol 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 bioetanol 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 bioetanol en Veracruz.

8. Literatura consultada

Arnold, et al., 1998; Narasimhan, et al., 2005; Garg, et al., 2001; Neitsch, et al., 2005; Gassman, et al., 2007).

ARONOFF, STAN. Geographic Information System: A Management Perspective 1989. WDL Publications.Otawa, Canadá.

Arnold. 2006. Evaluation of SWAT in Simulating Nitrate Nitrogen and Atrazine Fates in a Watershed with Tiles and Potholes. American Society of Agricultural and Biological Engineers 49: 949-959.

Avella, O. R. G. 2006. Etanol celulósico a partir de residuos agrícolas. Investigador de la universidad distrital, consultor Ambiental. Lima, Perú.

Burrough, P.A. 1986. Principles of geographical information systems for land resources assessment. Monographs on Soil and Resources Survey N0.12., Oxford University Press. 193p.

Castello, Luis, 2008. Biocombustibles y seguridad alimentaria. FAO, Colombia.

Cecotti L., Coralli F. y Riegelhaupt. 2010. Bioenergía, biocombustibles de la agricultura en México. Pag. 6.

- Cepal. 2008a. aporte de los biocombustibles a la sustentabilidad del desarrollo en ALC: elementos para la formulación de políticas públicas. Pistonesi, H., Nadal, G., Bravo, V., Bouille, D. Santiago de CL.
- Coralli, 2010. Bioenergía, biocombustibles y sostenibilidad de la agricultura en México, México, D.F. p. 9-26.
- Cueva, García J. E. 2001. Instalación de una planta productora de alcohol a partir de la caña de azúcar en la provincia del guayas para el uso en vehículos. Tesis de grado en economía con mención en gestión empresarial, especialización en finanzas. Ecuador.
- Domínguez, P. C. A. 2008. Un análisis económico costo-beneficio del etanol en México. Tesis en maestro en economía aplicada. Tijuana, B. C., México.
- Dufey, A. 2006. Producción y comercio de biocombustibles y desarrollo sustentable. Programa de economía ambiental/ grupo mercados sustentables, costa rica.
- ESRI. 1993. Digital Chart of the World for use with ARC /INFO. Data dictionary. Redlands, CA. USA.
- FAO 2003 proyecto regional "ordenamiento territorial rural sostenible" febrero – marzo de 2003.
- FAO. 1981. Informe del Proyecto de Zonas Agro-Ecológicas. Vol. 3, Metodología y resultados para América del Sur y Central. Roma, Italia.
- FAO. 1997. Zonificación agroecológica, Guía general. BOLETIN DE SUELOS DE LA FAO 73. Servicio de Recursos, Manejo y Conservación de suelos

Dirección de Fomento de Tierras y Aguas, FAO. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación.

FAO/UNESCO. Balance hídrico de África. Introducción a ArcView en África occidental, preparado por David R. Maidment y sean M. Reed. 19 julio del 1996.

Ferrari, 2009. México después del petróleo. Presentación para la IV Reunión Nacional de la Red Mexicana de Bioenergía A. C. 26 al 29 de octubre, Querétaro, México.

Guzman E., J. Bonini, D. Matamoros. 2004. Aplicación del modelo hidrológico SWAT (Soil and WaterAssessmentTool) para la predicción de caudales y sedimentos en una cuenca hidrográfica Caso de estudio: Cuenca del Rio Chaguana. Revista Tecnológica 17: 152-161.

Hackenberg. N. 2008, biocombustibles de segunda generación revista virtual redesma, vol. 2(2).

Honty, G. 2008. Agrocombustible y sustentabilidad en América latina. Ponencia presentada en el IV Congreso Regional de Ingeniería Química, Montevideo.
Medina, Juan, J. 2008. Insumos para la producción de biocombustibles. Ministerio de ciencia, tecnología e innovación productiva. IES-INTA, Buenos Aires.

IICA, 2007. Preguntas y respuestas más frecuentes sobre los biocombustibles. IICA, san José, Costa Rica.

IICA. 2010. América latina y el caribe. Mapeo político – institucional y análisis de la competencia entre producción de alimentos y bioenergía. San José, C.R.

IICA, 2010. Extensión rural para el desarrollo de la agricultura y la seguridad alimentaria: aspectos conceptuales, situación y una visión de futuro/ Jorge ardilla. San José, C.R.: IICA, 2010 128 P., 19 X 26 cm.

Jiménez, Moreno A. (2005, coordinador): Sistemas y análisis de la información geográfica. Manual de autoaprendizaje con ArcGIS. Madrid, Editorial RA-MA, 895 páginas y CD de datos, ISBN: 84-7897-665-5.

Matthews, R.; Stephens, W. 2002. Crop simulation models. Application in developing countries. CABI publishing, UK.

Riegelhaupt, 2010. . Bioenergía, biocombustibles y sostenibilidad de la agricultura en México, México, D.F. p. 9-26.

Rodríguez R. M., P. CORVALAN V., M. GUTIÉRREZ D. 2006. La utilización potencial de la biomasa como fuente de energía. Santiago de Chile. Inédito.

SAGARPA 2009-2012 programa de producción sustentable de insumos para bioenergéticos y de desarrollo científico y tecnológico, 12/julio/2011.