

**U N I V E R S I D A D D E L M A R**  
**Campus Puerto Ángel**



**"EVALUACIÓN DE LA APTITUD DEL TERRITORIO VERACRUZANO PARA LA  
PRODUCCIÓN TEÓRICA DE BIOETANOL A PARTIR DE CAÑA DE AZÚCAR, SORGO  
DULCE Y REMOLACHA AZUCARERA "**

**T E S I S**

Que para obtener el título de:

**INGENIERO AMBIENTAL**

Presenta:

**Ana Isabel Morales Rangel**

Puerto Ángel, Oaxaca.

Septiembre 2012

<b>Índice General</b>	
i Índice de cuadros .....	iii
ii Índice de figuras .....	iv
iii Prólogo .....	v
RESUMEN .....	vii
1 INTRODUCCIÓN.....	1
2 MARCO TEÓRICO .....	3
2.1 Biocombustibles.....	3
2.2 Bioetanol y sus usos .....	4
2.2.1 Beneficios y riesgos del uso de bioetanol como biocombustible .....	5
2.2.2 Situación del bioetanol en México y el mundo.....	7
2.2.3 Producción de bioetanol .....	9
2.3 Los cultivos energéticos .....	10
2.3.1 Caña de azúcar .....	11
2.3.2 Sorgo Dulce .....	13
2.3.3 Remolacha azucarera.....	14
2.4 Zonificación agroecológica.....	15
2.5 Sistema de información geográfica (SIG).....	16
2.6 Modelo SWAT (Soil & Water Assessment Tool).....	17
3 ANTECEDENTES .....	18
4 JUSTIFICACIÓN .....	22
5 HIPÓTESIS.....	23
6 OBJETIVOS.....	23
6.1 Objetivo general.....	23
6.2 Objetivos particulares .....	23
7 MATERIAL Y MÉTODOS .....	24
7.1 Descripción del área de estudio.....	24
7.2 Actividades generales a realizar.....	27
7.3 Simulación del rendimiento de biomasa .....	27
7.3.1 El Modelo de simulación SWAT .....	27

---

7.3.2	Cartografía utilizada.....	29
7.3.3	Bases de datos .....	30
7.3.3.1	Suelos .....	30
7.3.3.2	Información Climática .....	31
7.3.3.3	Parámetros fisiológicos de los cultivos .....	32
7.3.3.4	Manejo agronómico de los cultivos .....	32
7.4	Estimación teórica de bioetanol .....	32
7.5	Cartografía del rendimiento de biomasa y bioetanol.....	32
7.6	Validación.....	33
7.7	Relación Rendimiento potencial y el Uso actual del suelo .....	33
7.8	Identificación de áreas recomendadas para producir biomasa.....	33
8	RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	35
8.1	Cartografía del rendimiento de biomasa y bioetanol.....	35
8.1.1	Caña de azúcar .....	35
8.1.2	Sorgo Dulce .....	38
8.1.3	Remolacha azucarera.....	40
8.2	Validación.....	42
8.3	Relación del Rendimiento potencial y el Uso actual del suelo .....	44
8.4	Identificación de áreas recomendadas para producir biomasa.....	46
9	CONCLUSIONES.....	50
10	RECOMENDACIONES.....	52
11	LITERATURA CITADA .....	53
12	ANEXOS .....	61

**i Índice de cuadros**

<i>Cuadro 1.</i> Insumo y procesos para la generación de biocombustibles .....	4
<i>Cuadro 2.</i> Beneficios y riesgos del uso de Bioetanol como biocombustibles. ....	6
<i>Cuadro 3.</i> Producción de bioetanol en México y capacidad instalada.....	9
<i>Cuadro 4.</i> Principales cultivos, regiones y uso de agua en la producción de bioetanol.....	11
<i>Cuadro 5.</i> Aspectos generales para la producción de bioetanol en México. ....	11
<i>Cuadro 6.</i> Parámetros edafológicos requeridos por el SWAT.....	30
<i>Cuadro 7.</i> Características del perfil típico del suelo Vertisol pélico (Vp).....	30
<i>Cuadro 8.</i> Datos estadísticos mensuales requeridos por el modelo SWAT.....	31
<i>Cuadro 9.</i> Tasa de conversión de producto - bioetanol .....	32
<i>Cuadro 10.</i> Superficie ocupada por cada categoría de potencial de rendimiento de caña de azúcar, distribuida entre los diferentes usos actuales del suelo.....	44
<i>Cuadro 11.</i> Superficie ocupada por cada categoría de potencial de rendimiento de sorgo dulce, distribuida entre los diferentes usos actuales del suelo .....	45
<i>Cuadro 12.</i> Superficie ocupada por cada categoría de potencial de rendimiento de remolacha azucarera, distribuida entre los diferentes usos actuales del suelo.....	45
<i>Cuadro 13.</i> Zonas de abastecimiento de 25 km para plantas productoras de bioetanol.....	49
<i>Cuadro 14.</i> Parámetros fisiológicos de los cultivos requeridos por el modelo SWAT.....	62
<i>Cuadro 15.</i> Manejo agronómico de Caña de azúcar .....	64
<i>Cuadro 16.</i> Manejo agronómico de Sorgo dulce .....	65
<i>Cuadro 17.</i> Manejo agronómico de Remolacha azucarera .....	66

## ii Índice de figuras

<i>Figura 1.</i> Producción mundial de bioetanol. (USA-DOE, 2010). .....	7
<i>Figura 2.</i> Estructura de la producción de energía primaria en México, 2004 (10,330.774 Petajoules). (SENER / BID / GTZ, 2006).....	8
<i>Figura 3.</i> Consumo energético nacional por sector. (SENER / BID / GTZ, 2006). .....	8
<i>Figura 4.</i> Proceso de producción de bioetanol (García y García, 2006).....	10
<i>Figura 5.</i> Aplicaciones de la Zonificación agroecológica. (FAO, 1997).....	16
<i>Figura 6.</i> Área de estudio. Elaborado a partir de INEGI, 2005. ....	24
<i>Figura 7.</i> Distribución geográfica de a) climas, b) pendientes del terreno, c) suelo y d) uso de suelo del estado de Veracruz. Elaborados a partir de INEGI, 2005.....	26
<i>Figura 8.</i> Subcuencas y estaciones meteorológicas.....	28
<i>Figura 9.</i> Esquema de trabajo.....	29
<i>Figura 10.</i> Rendimiento promedio de caña de azúcar simulado por el modelo SWAT durante el periodo 2000-2010 y estimación del rendimiento teórico de bioetanol en el estado de Veracruz.....	36
<i>Figura 11.</i> Rendimiento promedio de sorgo dulce simulado por el modelo SWAT durante el periodo 2000-2010 y estimación del rendimiento teórico de bioetanol en el estado de Veracruz.....	39
<i>Figura 12.</i> Rendimiento promedio de remolacha azucarera simulado por el modelo SWAT durante el periodo 2000-2010 y estimación del rendimiento teórico de bioetanol en el estado de Veracruz. ....	41
<i>Figura 13.</i> Ubicación de los Ingenios Azucareros del estado de Veracruz .....	42
<i>Figura 14.</i> Comparación del rendimiento promedio de caña de azúcar observado y simulado con el modelo SWAT en las zonas de abastecimiento de los ingenios azucareros.....	43
<i>Figura 15.</i> Zona de pastizal con rendimientos promedios superior a 70 t ha <sup>-1</sup> de caña de azúcar, sorgo dulce y remolacha azucarera, simulados por el modelo SWAT para el estado de Veracruz.....	47
<i>Figura 16.</i> Áreas propuestas para establecer biorefinerías de bioetanol.....	48
<i>Figura 17.</i> Clases de suelo y superficie ocupada en el estado de Veracruz.....	61

### **iii Prólogo**

Uno de los problemas actuales es la sobreexplotación de combustibles fósiles, debido a su creciente demanda, principalmente en el sector de transporte, generando una fuerte crisis energética, a partir de la cual, surge el interés por encontrar nuevas formas para generar combustibles que sean amigables con el ambiente, como son los biocombustibles, con la finalidad de contribuir a la seguridad energética, disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) e impulsar al sector rural.

El tema de los biocombustibles es relativamente nuevo en México, pero ha comenzado a tomar fuerza por ser una alternativa prometedora al integrar aspectos sociales, políticos, económicos y ambientales, siendo ya una realidad en países como Estados Unidos y Brasil, líderes en este sector.

Entre los campos de acción de la Ingeniería Ambiental se encuentran las Energías renovables, las cuales, emplean materiales o procesos naturales que se regeneran naturalmente, implementando de esta manera tecnologías limpias que minimizan los impactos ambientales y contribuyen en la solución de los problemas relacionados con el agua, suelo y aire.

Por ello, es importante continuar realizando estudios que garanticen y respalden la sustentabilidad de la producción de biocombustibles, en este sentido, el presente trabajo busca contribuir en posteriores tomas de decisiones para el aprovechamiento y optimización de los recursos naturales como el suelo, agua, condiciones climáticas, etc., generando información sobre la ubicación de cultivos energéticos con el fin de producir bioetanol como alternativa a los combustibles convencionales.

El presente trabajo se divide en secciones que permitirán ir avanzando en el tema, comenzando con una breve introducción acerca de la situación actual de los energéticos, seguido por el marco teórico donde se desarrollan los conceptos de los biocombustibles, su producción, los cultivos energéticos y la zonificación

---

agroecológica, así como los sistemas de información geográfica y el modelo SWAT (Soil & Water Assessment Tool) empleado en éste estudio. En la sección de antecedentes se presentan algunos trabajos de experiencias similares con el modelo y la zonificación de cultivos, posteriormente en la justificación se exponen las razones por las cuales es importante realizar este tipo de trabajo, la hipótesis plantea lo que se espera encontrar al final de la investigación, seguido por los objetivos que ofrecen una visión del alcance que tendrá la misma; en la sección de materiales y métodos se describe la forma en que se obtuvo la información y los pasos necesarios para lograr cumplir con los objetivos planteados, a continuación la sección de resultados mostrará la aptitud territorial encontrada para los tres cultivos y las zonas homogéneas con mayor rendimiento potencial de cultivo y producción de bioetanol, para finalizar se presentan las conclusiones y sugerencias que pueden servir para trabajos posteriores.

## RESUMEN

La actual crisis petrolera, los problemas ambientales y el desarrollo de las zonas rurales son las razones que han motivado la generación de biocombustibles, como el bioetanol, producido principalmente de la fermentación directa de productos azucarados (caña de azúcar, sorgo dulce y remolacha azucarera). La zonificación agroecológica permite identificar áreas aptas para el establecimiento de cultivos, generando información para el aprovechamiento y optimización de los recursos naturales, el objetivo del trabajo fue evaluar el rendimiento potencial de caña de azúcar, sorgo dulce y remolacha azucarera para la producción de bioetanol en el estado de Veracruz. Para lo cual, se utilizó el modelo SWAT, el cual, requirió de un modelo de elevación digital (DEM) con resolución espacial de 90 m, definida por cinco intervalos de pendientes (0-3, 3-8, 8-15, 15-30 y >30%), mapas de suelo y uso de suelo obtenidos de INEGI (escala 1:250000), además se emplearon datos climáticos de 137 estaciones y datos edafológicos de cartas de INEGI, información de parámetros y del manejo de los cultivos obtenida de revisión de literatura para altos rendimientos de cultivo, se calculó la producción teórica de bioetanol y se realizó un análisis de sobreposición para identificar las zonas de mayor producción de cultivo en pastizales. El rendimiento potencial varió de 0 a 106 t ha<sup>-1</sup>, 0 a 79 t ha<sup>-1</sup> y 0 a 99 t ha<sup>-1</sup> para caña de azúcar, sorgo dulce y remolacha azucarera respectivamente, los rendimientos de bioetanol estimados a partir de los rendimientos potenciales de los cultivos fluctuaron entre 0 - 7 420 L ha<sup>-1</sup> por ciclo de cultivo de caña de azúcar, de 0 - 4 345 L ha<sup>-1</sup> por ciclo de cultivo de sorgo dulce y de 0 - 9 900 L ha<sup>-1</sup> por ciclo de cultivo de remolacha azucarera. De acuerdo con el análisis de sobreposición, el territorio presenta mayor aptitud para producir sorgo dulce con rendimientos mayores a 70 t ha<sup>-1</sup> ocupando el 13.4 % del territorio de pastizales, seguida por la caña de azúcar (6 %) y la remolacha azucarera (5.4%), lo cual permitió identificar diez zonas homogéneas y compactas para la producción de uno de los tres cultivos energéticos, generando así información cuantitativa y cartográfica para la toma de decisiones.

**Palabras claves:** Biocombustibles, cultivos energéticos, modelo SWAT, zonificación agroecológica



## ABSTRACT

The current oil crisis, environmental problems and development of rural areas are the reasons for the generation of biofuels, such as bioethanol, produced mainly by direct fermentation of sugar products (sugar cane, sweet sorghum and sugar beet). The agroecological zoning identifies areas suitable for crop establishment, generating information for the development and optimization of natural resources, the objective was to evaluate the potential yield of sugar cane, sweet sorghum and sugar beet for bioethanol production in the state of Veracruz. For this purpose, we used the SWAT model, which required a digital elevation model (DEM) with a spatial resolution of 90 m, defined by five outstanding intervals (0-3, 3-8, 8-15, 15 - 30 and > 30%), soil maps and land use obtained from INEGI (1:250,000 scale) also used data from 137 weather stations and Soil data **INEGI letters**, parameter information and crop management literature review obtained for higher crop yields, was calculated the theoretical production of bioethanol and overlay analysis was performed to identify the areas of greatest crop production in grasslands. The potential yield ranged from 0 to 106 t ha<sup>-1</sup>, 0-79 t ha<sup>-1</sup> and 0-99 t ha<sup>-1</sup> for sugar cane, sweet sorghum and sugar beet, respectively, ethanol yields estimated from the potential crop yields fluctuated between 0-7 420 L ha<sup>-1</sup> per crop cycle of sugarcane, from 0-4 345 L ha<sup>-1</sup> per crop cycle and sweet sorghum 0-9 900 L ha<sup>-1</sup> cycle of sugar beet. According to the overlay analysis, the territory has a greater ability to produce sweet sorghum yields above 70 t ha<sup>-1</sup> occupying 13.4% of the territory of grassland, followed by sugarcane (6%) and sugar beet (5.4%), which identified ten areas homogeneous and compact for the production of one of the three energy crops, generating quantitative and cartographic information for decision making.

**Keywords:** Biofuels, energy crops, SWAT model, agroecological zoning

## 1 INTRODUCCIÓN

La sociedad moderna en la búsqueda por el bienestar, demanda cada día mayores servicios y productos, que a su vez dependen de una gran diversidad de materias primas y un consumo mayor de energía, esta situación ha traído consigo un escenario preocupante debido al abuso en la extracción de recursos naturales y el deterioro ambiental por la contaminación del agua, suelo y aire (Ascher *et al.*, 2010).

La generación de energía es un tema de relevancia debido al agotamiento de los recursos energéticos (BNDES y CGEE, 2008), por lo que actualmente se busca incrementar el empleo de energías renovables como son; la energía solar, eólica, mareomotriz, hidráulica, geotérmica y de biomasa, esta última se define como cualquier materia orgánica formada en algún proceso biológico (plantas, árboles, madera, estiércol de animales, residuos agrícolas y municipales etc.) (USA-DOE, 2010). En lo que se refiere al suministro de combustibles para vehículos, la preocupación se centra en el agotamiento del petróleo, siendo la biomasa una alternativa renovable para este sector, al ser generada a partir de energía solar, disminuyendo la dependencia energética de los recursos fósiles, además de presentar múltiples beneficios ambientales al contribuir con la reducción de gases de efecto invernadero, e impulsando al sector agroindustrial y el crecimiento económico (IDEA, 2007). Un estudio integral desarrollado en Australia, indicó que con 10% de etanol en la gasolina se disminuye un 32% las emisiones de CO, 12% las emisiones de hidrocarburos y más del 27% de aromáticos, reduciendo el riesgo carcinogénico en personas en un 24% (BNDES y CGEE, 2008).

Mundialmente en la actualidad, para la producción de bioetanol, se utilizan como principales materias primas el maíz, caña de azúcar, sin embargo, son productos alimenticios, por lo que se buscan otras fuentes de azúcares, almidones y residuos lignocelulósicos que no afecten la producción de alimentos y generen mayores beneficios ambientales y económicos, propiciando la necesidad de realizar más estudios sobre la viabilidad de los cultivos energéticos; desde, el proceso productivo, los costos, los impactos ambientales, la evaluación de materias primas y el retorno

energético, etc. Por ello, se planteó realizar éste estudio en el que se evalúa el potencial productivo del rendimiento teórico de caña de azúcar, sorgo dulce y remolacha azucarera, como precursores de la producción de bioetanol además de ubicar las zonas más apropiadas para la producción de dichos cultivos en el estado de Veracruz.

## 2 MARCO TEÓRICO

### 2.1 Biocombustibles

Los biocombustibles son recursos energéticos procesados por el ser humano, a partir de materia producida por seres vivos, a la cual se le denomina biomasa; por lo tanto, son considerados una energía renovable (Álvarez, 2009). Son utilizados en sustitución a los combustibles derivados del petróleo o como aditivos de éstos para su uso en el transporte (AFG-INTERREG IIIB-FEDER, 2007). Los altos precios del petróleo, así como la reducción de los costos para su producción, los han hecho más competitivos respecto de combustibles convencionales derivados del petróleo (Ruíz, 2007).

*Bioenergéticos: Combustibles obtenidos de la biomasa provenientes de materia orgánica de las actividades, agrícola, pecuaria, silvícola, acuicultura, algacultura, residuos de la pesca, domésticas, comerciales, industriales, de microorganismos, y de enzimas, así como sus derivados, producidos, por procesos tecnológicos sustentables que cumplan con las especificaciones y normas de calidad establecidas por la autoridad competente en los términos de esta Ley (Ley de promoción y desarrollo de los bioenergéticos, 2008).*

Existen distintas formas de clasificar a los biocombustibles: a) de acuerdo a su estado de agregación se clasifican en: sólido (residuos vegetales, leña, carbón vegetal, pellets, fracción biodegradable de los residuos urbanos o industriales), líquido (bioetanol, biodiesel) y gaseoso (biogás, hidrógeno) (García y García, 2006; FAO, 2008); b) por la materia prima o insumo se clasifican en: agrocombustibles, combustibles de madera o derivados y residuos municipales; y finalmente c) por la tecnología empleada para producirlos en: primera, segunda y tercera generación (Cuadro 1).

**Cuadro 1. Insumo y procesos para la generación de biocombustibles**

Generación	Insumos		Proceso productivo	Productos
Primera generación	Procedencia agrícola (partes alimenticias de las plantas)	Almidones	Fermentación	Bioetanol, metanol y n-butanol
		Azúcares	Fermentación	
		Aceites	Transesterificación	Biodiesel
	Grasas animales, grasas y aceites de desecho		Transesterificación	
	Desperdicios sólidos orgánicos.		Digestión anaerobia	Biogas
Segunda generación	Residuos agrícolas y forestales (celulosa). Vegetales no alimenticios de crecimiento rápido y con alta densidad energética. Ejemplos: pastos perennes, árboles y plantas de crecimiento rápido		Sacarificación-fermentación y el proceso Fischer-Tropsch	Bioetanol, metanol, gas de síntesis (mezcla de CO e H <sub>2</sub> ), Biodiesel, 2.5-dimetilfurano (DMF).
Tercera generación	Algas verdes y verde azules.		Procesos en fase de desarrollo a nivel planta piloto.	Bioetanol y Biodiesel

Fuente: Álvarez, 2009.

## 2.2 Bioetanol y sus usos

El bioetanol o alcohol etílico (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH) es un líquido inflamable, incoloro y es el alcohol de menor toxicidad, se utiliza en bebidas alcohólicas, desinfectante o como disolvente (Rutz y Janssen, 2007) obtenido a partir de la fermentación de los azúcares combinados en forma de sacarosa, almidón, hemicelulosa y celulosa que se encuentran en cereales, vegetales o biomasa (García y García, 2006). Los cultivos comúnmente usados como materia prima para obtener sacarosa son: la caña de azúcar, la remolacha azucarera y el sorgo dulce; entre los de almidón se encuentran el maíz, trigo y yuca. El bioetanol posee un nivel elevado de octano, reduce la emisión de CO<sub>2</sub>, así como CO e hidrocarburos y contiene una cantidad menor de azufre, lo cual reduce las emisiones de óxido de azufre, componente de la lluvia ácida y carcinógeno, sin embargo, produce una reacción más fuerte con el nitrógeno de la atmósfera, aumentando los gases de óxido de nitrógeno (FAO, 2008).

El bioetanol se utiliza en mezclas con la gasolina en concentraciones del 5 ó el 10% (E5 y E10 respectivamente) generando un producto con alto poder energético que contribuye en la reducción de emisiones contaminantes; además, no requiere modificaciones en los motores actuales, otro uso es como aditivo de la gasolina en forma de etil-terbutil éter (ETBE) (García y García, 2006). El ETBE se obtiene de la síntesis del bioetanol con isobutileno, este último es subproducto de la destilación del petróleo. El ETBE es menos volátil y más miscible con la gasolina que el propio bioetanol, aumenta el índice de octano de la gasolina, evitando la adición de sales de plomo y MTBE (metil-terbutil éter) ya que tienen efectos nocivos sobre la salud y el medio ambiente (California Environmental Protection Agency, 2002).

### **2.2.1 Beneficios y riesgos del uso de bioetanol como biocombustible**

La producción y uso de los biocombustibles es un tema que genera gran polémica ya que involucra aspectos importantes como: económico, político, industrial, social y ambiental, además de ser un tema relativamente nuevo, en el Cuadro 2 se presenta los beneficios y riesgos del uso del bioetanol como biocombustible.

Las políticas sobre biocombustibles son impulsadas por tres factores principales (Pistonesi *et al* 2008), los cuales son:

- Motivación energética, con el fin de garantizar la seguridad de abastecimiento, disminuir la dependencia hacia el petróleo.
- Motivación ambiental, mediante la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero e incluyendo los posibles impactos ambientales.
- Motivación del desarrollo agrícola, mediante mejoras en precios de las materias primas, la creación de empleos y la mitigación de la pobreza.

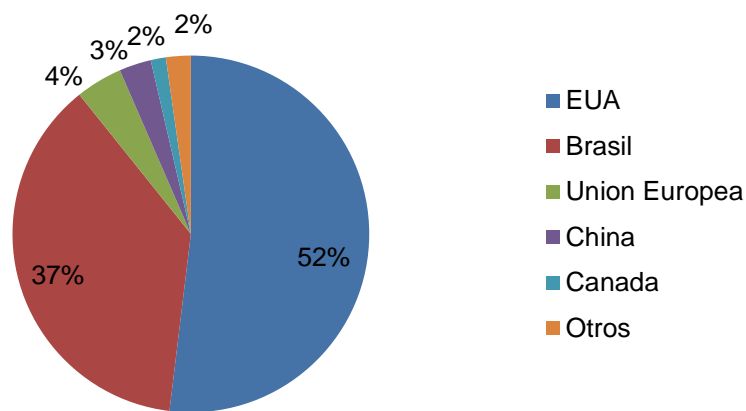
**Cuadro 2. Beneficios y riesgos del uso de Bioetanol como biocombustibles.**

Beneficios	Riesgos
• Es un recurso energético renovable. <sup>1</sup>	• El bioetanol se consume de un 25% a un 30% más rápidamente que la gasolina. <sup>1</sup>
• Promueve la diversificación del mercado energético. <sup>3</sup>	• Pueden competir con la producción de alimentos o con los recursos para producirlos: tierra, agua y recursos financieros, principalmente en el caso de combustible de primera generación. <sup>3</sup>
• Disminuye la dependencia del petróleo. <sup>2</sup>	• La tecnología de producción podría ser muy intensa en insumos y energía fósil lo que limitaría la mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). <sup>3</sup>
• La producción de biomasa es menos propensa a la monopolización. <sup>3</sup>	• Podría aumentar la deforestación o cambio de uso de suelo por el aumento en el área para fines de cultivos energéticos. <sup>3</sup>
• Impulsa el desarrollo de cultivos. <sup>1</sup>	• La expansión de monocultivos puede generar la pérdida de la agrobiodiversidad. <sup>3</sup>
• Mejora el octanaje de las gasolinas, reduciendo la emisión de gases de efecto invernadero, azufre e hidrocarburos. <sup>2</sup>	
• Como aditivo oxigenante, reemplaza a aditivos como el plomo y MTBE (Metil terbutil eter). <sup>1</sup>	
• Posibilidad de obtener co-productos con valor forrajero, alimenticio o industrial. <sup>3</sup>	
• Los precios tienen baja interferencia política. <sup>3</sup>	
• Representan nuevas fuentes de trabajo e ingresos rurales, mejorando su situación socioeconómica. <sup>3</sup>	

Fuente: <sup>1</sup>IICA, 2007; <sup>2</sup>IDEA, 2007; <sup>3</sup>Riengelhaupt *et al.*, 2010.

### 2.2.2 Situación del bioetanol en el mundo y en México

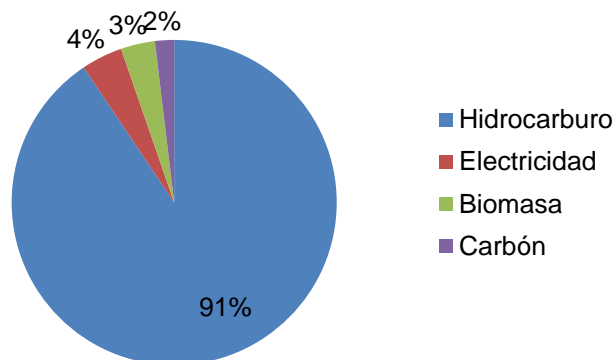
El bioetanol es el biocombustible más utilizado en el mundo, de acuerdo con la Renewable Fuel Association, en el 2008 se produjeron 65 613.7 millones de litros de bioetanol, el mayor productor fue Estados Unidos con 34 065.0 millones de litros, lo que representó el 52% de la producción mundial, seguido por Brasil con 24 497.3 millones de litros, es decir el 37%, como se observa en la Figura 1 (USA-DOE, 2010).



**Figura 1. Producción mundial de bioetanol. (USA-DOE, 2010).**

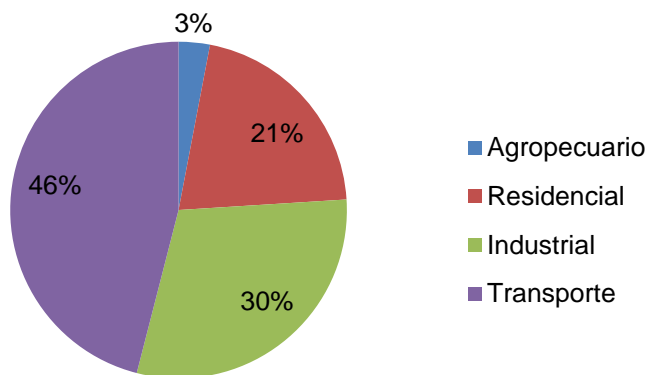
En México la producción primaria de energía se encuentra concentrada en el uso de hidrocarburos con un 90%, a diferencia de las energías renovables para la producción de electricidad (energía nuclear, hidráulica, geotérmica y eólica) que ocupan un 4.1% y la biomasa (bagazo de caña y leña) con un 3.4% de la producción primaria de energía (Figura 2)





**Figura 2. Estructura de la producción de energía primaria en México, 2004 (10,330.774 Petajoules). (SENER / BID / GTZ, 2006)**

Del 90% de la energía primaria proveniente de hidrocarburos, el 46% es destinada al sector transporte (Figura 3) y de éstos, el 65% es para las gasolinas.



**Figura 3. Consumo energético nacional por sector. (SENER / BID / GTZ, 2006).**

Desde finales de la década de los 90's México ha producido bioetanol de caña de azúcar pero debido a la inexistencia de un marco legal para utilizarlo como energético, la producción se dirigió a la industria de cosméticos, química, farmacéutica y bebidas, obteniéndose principalmente de la melaza de la caña. De acuerdo a la capacidad utilizada por los ingenios mostrados en el Cuadro 3, en el ciclo agrícola 2002-2003, la producción de bioetanol fue de 39.2 millones de litros, considerando que no todo el bioetanol es anhidro. El ingenio San Nicolás, ubicado en el estado de Veracruz, fue uno de los mayores productores de bioetanol para combustible (Becerra, 2009).

**Cuadro 3. Producción de bioetanol en México y capacidad instalada.  
(Litros por ciclo agrícola)**

Ingenio	Capacidad instalada	Capacidad utilizada (%)	Localidad, Estado
AaronSaenz	8 550 000	57.9	Xicotencátl, Tamaulipas
Calipam	2 400 000	41.3	Calipam, Puebla
Constancia	9 000 000	55.5	Tezonapa, Veracruz
El Carmen	5 400 000	54.1	Cuautlapan, Veracruz
El Mante	7 200 000	70.6	Ciudad Mante, Tamaulipas
Independencia	4 500 000	27.8	Martínez de la Torre, Veracruz
La Joya	4 200 000	31.1	Champotón, Campeche
La providencia	7 500 000	24.2	Cuichapa, Veracruz
Pujilic	6 000 000	56.2	Venustiano Carranza, Chiapas
San José de Abajo	7 500 000	14.9	Cuitláhuac, Veracruz
San Nicolás	12 000 000	21.2	Cuichapa, Veracruz
San Pedro	7 500 000	42.8	Lerdo de Tejada, Veracruz
Tamazula	7 500 000	75.3	Tamazula de Gordiano, Jalisco
Total	89 250 000	43.9	

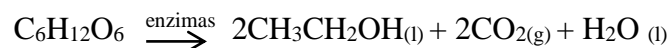
Fuente: Modificado de Becerra, 2009

### 2.2.3 Producción de bioetanol

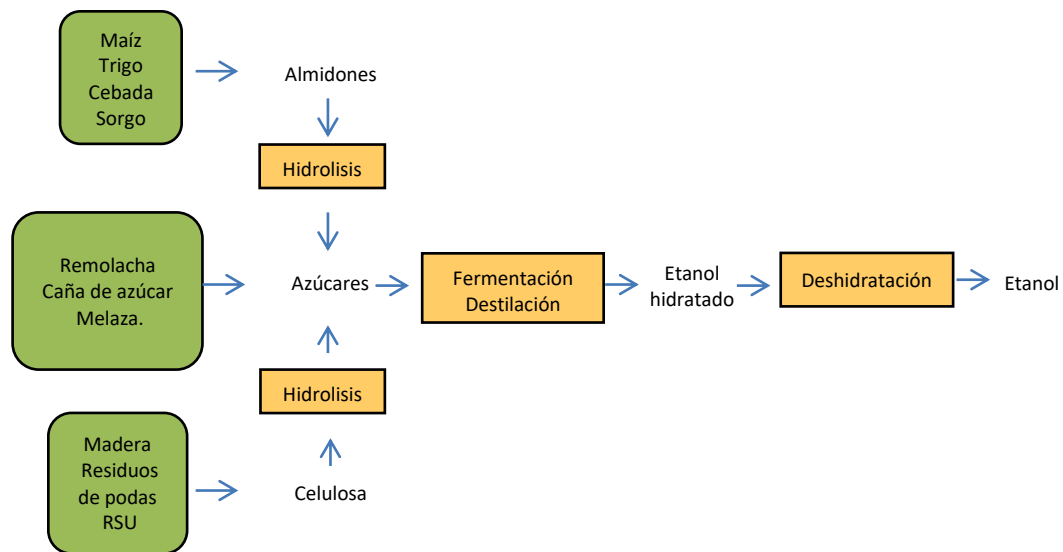
El bioetanol se produce por la fermentación de los azúcares contenidos en la materia orgánica de las plantas, del proceso se obtiene el alcohol hidratado (5 % de agua en peso), al ser deshidratado (0.4% de agua en peso) puede ser utilizado como combustible para automóviles (bioetanol anhídrido) (García y García, 2006).

Para la producción del bioetanol, se utilizan tres fuentes de materia prima: azúcares, almidón y celulosa.

La forma más común y la utilizada industrialmente para producir bioetanol es a partir de la fermentación directa de productos azucarados, la cual, se lleva a cabo mediante la siguiente reacción:



En el caso de cereales y materiales lignocelulósicos se realiza una hidrólisis para obtener los azúcares y posteriormente ser fermentados y destilados, el producto final puede almacenarse como bioetanol hidratado o pasar a una columna de deshidratación de donde se obtiene el bioetanol anhidro (Figura 4).



**Figura 4. Proceso de producción de bioetanol (García y García, 2006).**

### 2.3 Los cultivos energéticos

Los cultivos energéticos son el conjunto de especies vegetales que se cultivan en terrenos agrícolas o forestales destinadas a la cosecha y producción de material vegetal que va a ser utilizado para la generación de energía como producto final o en procesos de conversión (AFG-INTERREG IIIB-FEDER, 2007). Algunas de las características de los cultivos con fines energéticos son (Castro *et al.*, 2007):

- Altos niveles de productividad en biomasa con bajos costos de producción.
- No contribuyen a la degradación del medio ambiente.
- Posibilidad de desarrollarse en tierras marginales.
- Posibilidad de recuperar las tierras.
- Requerimientos técnicos convencionales y disponibles.
- Tener un balance energético positivo, es decir, que la energía neta contenida en la biomasa producida sea superior a la gastada en el cultivo, en la obtención de los productos y en la generación y distribución de energía utilizable.

Por las características de producción agrícola, la localización geográfica las condiciones propicias de suelo y clima y el grado de conocimientos en la actividad productiva, los principales cultivos energéticos a utilizarse para la elaboración de bioetanol en México son: la caña de azúcar, maíz, trigo grano, sorgo grano, remolacha azucarera, yuca y sorgo dulce (Cuadro 4) (SENER-BID-GTZ, 2006). Siendo la caña la de mayor posibilidad para la producción de bioetanol al contar con el conocimiento agronómico y con una tecnología madura para su producción (hidrólisis de sacarosa y fermentación alcohólica) (Cuadro 5).

**Cuadro 4. Principales cultivos, regiones y uso de agua en la producción de bioetanol.**

Cultivos	Regiones	Uso de agua
Caña de azúcar	Papaloapan, Huastecas, Balsas	Temporal y riego
Maíz grano	Mar de Cortés	Riego
Trigo grano y paja	Mar de Cortés	Riego
Sorgo	Golfo Norte	Temporal
Remolacha azucarera	Mar de Cortés	Riego
Yuca	Papaloapan, Peninsular	Temporal

Fuente: SENER-BID-GTZ, 2006

**Cuadro 5. Estado actual de los aspectos generales para la producción de bioetanol en México.**

Cultivo	Conocimiento agronómico	Requerimiento edafoclimático	Tecnología para la producción de bioetanol	Posibilidad de integración productiva y uso de subproductos
Caña	alto	alta	conocida y practicada	alta
Maíz	alto	alta	conocida y practicada	mediana
Sorgo dulce	mediano	mediana	conocida	mediana
Yuca	limitado	baja	poco conocida	baja
Remolacha azucarera	bajo	mediana	conocida	baja

Fuente: SENER-BID-GTZ, 2006

### 2.3.1 Caña de azúcar

La caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) es una gramínea tropical de tipo C4 de alta eficiencia fotosintética, es perenne de tallos gruesos y fibrosos que puede crecer entre 2 y 5 metros de altura con 5 ó 6 cm de diámetro, su sistema radicular contiene

un robusto rizoma; los grados Brix fluctúan entre 12 y 16 % (SIAP, 2010). La propagación de la caña se realiza por estaca y la cosecha es conocida como zafra, la cual, puede ser mecanizada o manual. Se pueden cosechar de 4 ó 5 cortes y posteriormente se renueva el cultivo (Subirós, 2000; Ramírez, 2008). Una vez cortada, la caña puede almacenarse por 2 o hasta 5 días, por lo que las plantas de producción de azúcar o bioetanol operan únicamente durante el periodo de cosecha. Se cultiva desde una latitud 38°N y 32°S, en climas tropicales y subtropicales, a una altura entre los 0 y 1200 msnm, requiere de un clima húmedo, con temperaturas entre 16 y 35 °C y precipitación mínima de 1500 mm por temporada. El tipo de suelo apto para el desarrollo del cultivo es el franco, profundo y bien drenado, con un rango de pH de 5.5 a 7.8 (Subirós, 2000).

En México la superficie cultivada de caña de azúcar se clasificó en 14 regiones ubicadas en los estados de: Veracruz, Chiapas, Tabasco, Oaxaca, Puebla, Jalisco, Michoacán, Nayarit, Tamaulipas, Sinaloa, Quintana Roo y Yucatán; siendo las zonas de temporal (Huasteca y Veracruz Centro) con rendimientos de 60 t ha<sup>-1</sup> y las regiones de riego (Huasteca y Balsas) alcanzaron rendimientos de 111 t ha<sup>-1</sup> (SENER / BID / GTZ, 2006). De acuerdo con el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) en el 2010, se reportaron en el estado de Veracruz una superficie sembrada de caña de azúcar de riego de 74 263.57 ha, con una producción de 5 889 237.08 t y un rendimiento de 80.33 t ha<sup>-1</sup>, mientras que, para el azúcar de temporal se tiene registrada una superficie de 198 743.10 ha, con una producción de 12 739 497.51 t y un rendimiento de 64.76 t ha<sup>-1</sup>, sumando una superficie de 273 006.67 ha, una producción de 18 628 734.59 t y un rendimiento de 68.99 t ha<sup>-1</sup> (SIAP, 2010).

La producción de bioetanol a partir de caña de azúcar visualiza un nuevo y futuro mercado de energías renovables en México y genera flexibilidad en la producción de azúcar y bioetanol en los ingenios (Aguilar-Rivera, 2007), siendo la tasa de conversión de caña a etanol de 70 L t<sup>-1</sup> (SAGARPA, 2011).

### 2.3.2 Sorgo Dulce

El sorgo dulce (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) pertenece a la familia de las gramíneas, es una planta anual C4 de origen tropical, con alto potencial para la producción de biomasa, debido a su eficiencia fotosintética (Fazaeli *et al.*, 2006). Puede crecer a una altura entre 2 a 4 metros, con 12 a 14 entrenudos, el contenido de azúcar en el tallo varía de acuerdo a las variedades, los grados Brix fluctúan entre 14 y 22. Se propaga por semilla y el sistema de producción del cultivo es totalmente mecanizable. Se caracteriza por tener una amplia adaptabilidad, resistencia a la sequía, tolerancia salina-alkalina, rápido crecimiento, alta acumulación de azúcar y biomasa, presenta resistencia a las inundaciones y a la toxicidad por acidez (Montes *et al.*, 2010).

Su requerimiento de agua es de 600-800 mm. (Montes *et al.*, 2010). En un clima tropical requiere de 3 a 5 meses para madurar (Hills *et al.*, 1990). Crece satisfactoriamente a una altitud de entre 500 y 1000 msnm, con precipitación mínima de 400 mm, una temperatura de 22 - 32°C alcanzando hasta los 35°C y en terrenos con una pendiente máxima de 4% (SAGARPA, 2011), se adapta a un amplio rango de pH del suelo de 5.5 a 8.2 (SENER / BID / GTZ, 2006).

En México se cultiva en el centro y sur de Sinaloa, Coahuila, en las regiones de la Laguna y del Bajío con buenos rendimientos bajo riego. De temporal se cultiva en Sinaloa, Chihuahua, Guerrero, Michoacán y Jalisco. El material vegetativo es el producto de interés para la producción de bioetanol, por lo que tanto en riego como en temporal, se puede dar hasta cinco cortes en un año, con un rendimiento acumulado de hasta 100 t ha<sup>-1</sup> de materia verde en el riego y de 60 t ha<sup>-1</sup> en el temporal (SENER / BID / GTZ, 2006). No hay registros de su producción en el estado de Veracruz. Sin embargo, el sorgo dulce es uno de los cultivos que ha recibido mayor impulso como fuente renovable de energía, debido al alto contenido energético, lo cual, lo convierte en un candidato ideal para la producción de bioetanol y es la principal materia prima que puede complementar el uso de caña de azúcar en la producción de dicho biocombustible (Montes *et al.*, 2010). La tasa de conversión a etanol es de 55 L t<sup>-1</sup> (SAGARPA, 2011). Actualmente los mayores productores de

sorgo dulce en el mundo son India, Estados Unidos, Nigeria, China (FAOSTAT, 2010)

### 2.3.3 Remolacha azucarera

La remolacha azucarera (*Beta vulgaris* L.) es una planta bianual de raíz redonda perteneciente a la familia de las quenapodiáceas. El sistema radicular es muy extenso, lo que le permite soportar sequías cortas y recuperarse rápidamente. Los grados Brix fluctúan entre 15 y 18, la siembra puede ser por trasplante o de forma directa (Morales, 1995).

Tradicionalmente cultivada en regiones de clima templado, aunque recientemente se ha desarrollado variedades tropicales extendiéndose a regiones tropicales y subtropicales, requiere de mucha insolación para la producción de azúcar. El requerimiento de agua es de 550-750 mm, siendo el primer mes del cultivo el más sensible a la escasez del líquido. El cultivo se adapta a una amplia variedad de suelos, preferentemente a los de textura media o ligeramente pesados, bien drenados y profundos, presenta buena resistencia a la salinidad del suelo de  $7 \text{ dS m}^{-1}$  (ARPEL-ICA, 2009). Crece bien en suelos con pH cercanos a la neutralidad (6.5-7.5) (Morales, 1995), se recomiendan pendientes de 0 a 2% (SAGARPA, 2011). El intervalo óptimo de temperaturas para la germinación es de 20 a 25 °C, temperaturas mayores a 25°C durante la formación de la raíz pueden reducir la calidad del producto.

En México es escasa la experiencia con el cultivo (SAGARPA, 2009), sin embargo se tiene registros del cultivo en Baja California, Sinaloa y Sonora, en tierras marginales (salinidad y sodio) en estas condiciones tuvo un rendimiento de  $40 \text{ t ha}^{-1}$  de raíz (SENER / BID / GTZ, 2006). La tasa de conversión del tubérculo a bioetanol es de  $100 \text{ L t}^{-1}$  (SAGARPA, 2011), siendo mayor al de la caña de azúcar (ARPEL-ICA, 2009).

Los principales países productores de remolacha azucarera son Francia con 31 910 400 MT, EU con 28 940 100 MT y Alemania con 23 858 400 MT (FAOSTAT, 2010).

## 2.4 Zonificación agroecológica

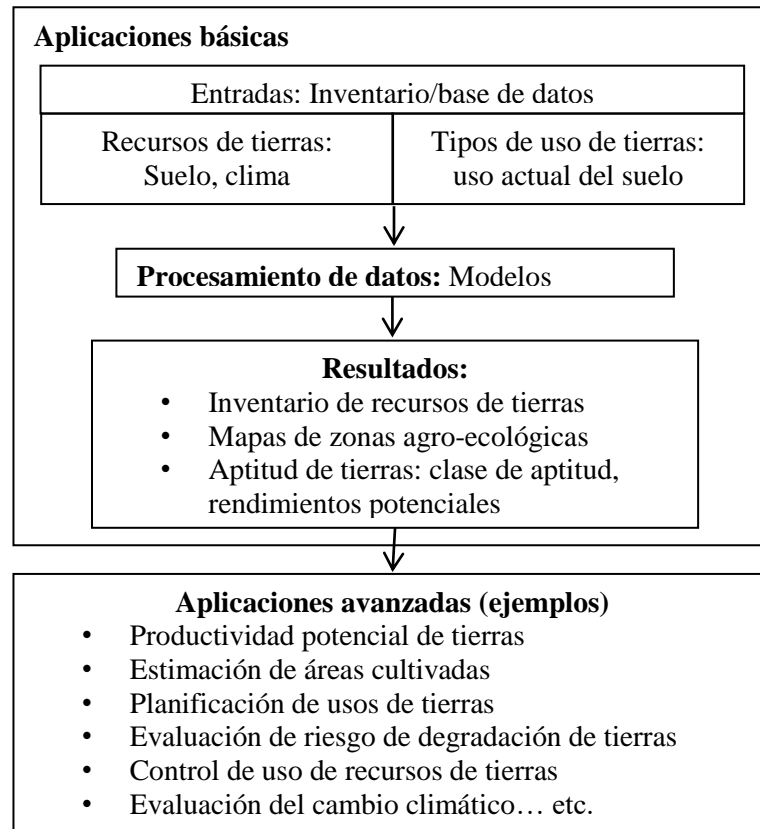
La zonificación es un instrumento orientador de políticas para el financiamiento e inversión en infraestructura, permite definir las áreas aptas para el establecimiento de cultivos a gran escala mediante la combinación de mapas de suelo, clima, áreas de reserva ambiental, topografía, el uso de suelo actual, además de analizar los requerimientos agronómicos de la planta como temperatura ideal para su crecimiento, el suelo donde se desarrolla, necesidades hídricas, entre otras (FAO 1997; BNDES y CGEE, 2008).

El propósito de zonificar, es separar áreas con características similares relacionadas con la aptitud de tierras, la producción potencial y el impacto ambiental (FAO, 1997), generando información de las áreas de mayor potencial para el establecimiento de plantaciones y donde no se recomienda el cultivo (BNDES y CGEE, 2008), permitiendo la disminución de incertidumbre y la cuantificación del riesgo, además de generar información para un mejor aprovechamiento u optimización de los recursos naturales existentes en la región a estudiar (suelo, agua, condiciones climáticas, etc.) (Rojas y Eldin, 1983). El grado de precisión de la zonificación depende en gran medida del nivel de información y de los métodos de análisis usados (Armuelles, 1969).

El análisis implica la combinación de capas de información espacial para definir zonas, por lo que el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y modelos computarizados tienen aplicaciones potenciales en el manejo de recursos naturales y planificación del uso de las tierras. Los resultados obtenidos tienen aplicaciones tanto básicas como avanzadas ( Figura 5) (FAO, 1997).

De acuerdo con el estudio *Land resource potential and constraints at regional and country levels* realizado por la FAO en el 2000, México se encuentra en el grupo de países con alta disponibilidad para la expansión agrícola, con 11.7 millones de hectáreas, por lo que se puede aumentar el área para la agricultura de alimentos y cultivos energéticos (Gazzoni, 2009; Ascher *et al.*, 2010).





**Figura 5. Aplicaciones de la Zonificación agroecológica. (FAO, 1997)**

## 2.5 Sistema de información geográfica (SIG)

Es un proceso que consta de cinco etapas, las cuales son: 1) adquisición de datos, 2) procesamiento, 3) manejo de datos, 4) manipulación y 5) análisis y generación del producto; cuyo fin es servir para la toma de decisiones, además de ser una herramienta capaz de combinar información gráfica (mapas) y alfanuméricas (estadísticas) para obtener información sobre el espacio, utiliza la integración de datos, métodos de análisis geográficos como el análisis de superposición de mapas y el georreferencial, así como la modelación matemática (Domínguez, 2000). Fue diseñado para la captura, gestión, manipulación, análisis y representación de datos referenciados espacialmente, a través de un software, hardware y un procedimiento (Antenucci *et al.*, 1991). La integración de las variables ambientales se realiza en sistemas de elementos interrelacionados e interdependientes (Felicísimo, 1994).

Surge de la necesidad de disponer rápidamente de información para resolver problemas de planteamiento y gestión, contestar a preguntas de manera inmediata y tomar decisiones (FAO, 1999; Mena, 2007).

Su aplicación es amplia desde el ámbito de administración pública, desastres naturales, medio ambiente, turismo, educación, seguridad, entre otros proyectos que requieran un análisis de elementos geográficos (Domínguez, 2000).

## **2.6 Modelo SWAT (Soil & Water Assessment Tool)**

El modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT) es un modelo que trabaja a nivel de cuencas hidrológicas, desarrollado para predecir el impacto de las prácticas de manejo de suelo, agua, sedimentos y rendimiento de cultivos agrícolas en cuencas grandes y complejas, a través de la variación de los suelos, sus usos y condiciones de manejo por largos periodos de tiempo. El modelo fue desarrollado por el Dr. Jeff Arnold para la USDA-ARS (Agricultural Research Service) (Winchell *et al.*, 2010).

SWAT requiere información específica del clima, propiedades del suelo, topografía, vegetación y prácticas de manejo de suelo presentes en la cuenca, además de mapas y un Modelo de Elevación Digital (DEM), el cual, es una estructura numérica de datos que representan la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno, lo que permite definir propiedades de la red de drenaje de la cuenca hidrológica. Los procesos asociados con el ciclo del agua, los sedimentos, el crecimiento de los cultivos, los ciclos de los nutrientes son modelados a partir de datos de entrada. Con el fin de obtener información más certera sobre todo en cuencas donde existen diferentes tipos de suelo, el modelo divide a la cuenca en subcuencas. Cada subcuenca es dividida en unidades de respuesta hidrológica (URH) que comparten el mismo uso, tipo de suelo e intervalo de pendiente. Se puede simular desde una sola cuenca hasta un sistema de múltiples cuencas hidrológica. Los componentes que incluye el modelo son: clima, hidrología, cobertura de suelo/crecimiento de cultivo, erosión, nutrientes, pesticidas, y prácticas de manejo agronómico (Neitsch *et al.*, 2011).

### 3 ANTECEDENTES

Existen diversos trabajos sobre la evaluación del rendimiento de los cultivos mediante el modelo SWAT, así como de la zonificación agroecológica mediante el empleo de sistemas de información geográfica, algunos de ellos se presentan a continuación:

Garg *et al.* (2011) utilizaron el modelo SWAT para evaluar el rendimiento y productividad del agua (productividad del cultivo por unidad de agua consumida) en zonas agrícolas de caña de azúcar, sorgo y mijo, en la cuenca alta del río Bhima en India. Estimaron para el año 2000-01 con una precipitación anual de 711 mm, un rendimiento promedio de 40 ( $\pm 19.1$ ), 1.4 ( $\pm 1.0$ ) y 0.75 ( $\pm 0.5$ ) t ha<sup>-1</sup> para la caña, sorgo y mijo, respectivamente, los cuales fueron comparados con los rendimientos promedio reportados por el departamento de agricultura del Maharashtra, India de 90 ( $\pm 13$ ), 1.3 ( $\pm 0.3$ ), 1.1 ( $\pm 0.4$ ) t ha<sup>-1</sup> para caña de azúcar, sorgo y mijo; siendo menor el rendimiento simulado de caña por la baja disponibilidad de agua. También fueron ubicados geográficamente en la cuenca los rendimientos y productividad del agua de caña de azúcar y sorgo durante el año 1999 y 2003, encontrando variaciones en el rendimiento de sorgo de 0.01 a 5.8 t ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> y de 10 a 90 t ha<sup>-1</sup> para caña. El promedio de la productividad del agua para los cultivos de caña de azúcar, sorgo y mijo fue de 2.9, 0.51 y 0.30 kg m<sup>-3</sup> respectivamente, existe potencial para mejorar los rendimientos y la producción de agua mediante innovaciones tecnológicas y prácticas adecuadas del uso de agua y suelo.

Por otra parte el modelo SWAT se usó en el estudio de la cuenca de Bouregreg, localizada en el centro-norte de Marruecos, para determinar el volumen mensual de entrada a la presa SMBA situada en la salida de la cuenca, el área es de 9 570 km<sup>2</sup>, con elevaciones entre 46 m en la salida y 1 630 m en las montañas, dos ríos principales Bouregreg (125 km) y Grou (260 km), el clima de la región es semiárido con una precipitación anual promedio de 400 mm y un volumen promedio de entrada a la presa estimado en 600 mm<sup>3</sup> año<sup>-1</sup>, para el análisis utilizaron un DEM de 30 m de resolución espacial, mapa de uso de suelo de la imagen proveniente del satélite Landsat (30 m), datos climáticos de la Unidad de Investigación del Clima de Reino

Unido de 5 estaciones localizadas en la cuenca y el mapa de suelo de la FAO-UN (Food and Agricultural Organization of the United Nation), se delinearon 20 subcuencas y se trabajó con 250 URH, se encontró una buena relación entre los valores mensuales del flujo de la corriente observados y los simulados con un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0.81 para el periodo de calibración (1989-1996) y  $R^2$  de 0.89 para la validación (1998-2005), el ingreso mensual de la presa se estimó a partir del caudal de los ríos aguas abajo en la salida de la cuenca, estos valores simulados se compararon con los afluentes medidos obteniendo una buena correlación con  $R^2$  0.92, por lo que; el modelo puede ser utilizado para predecir y facilitar el almacenamiento y gestión del agua, pudiendo mejorar con la entrada de datos más precisa (Fadil *et al.*, 2011).

Una versión modificada de SWAT (SWAT-M) fue evaluada para zonas con depresiones superficiales para simular la dinámica de nitratos ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ), atrazina, así como la producción de maíz y soya en la cuenca de Walnut Creek EUA. El modelo fue calibrado y validado con datos de 1992-1995 y 1996-2001 respectivamente; establecieron tres puntos de medición, en el centro, salida de la cuenca y un punto subsuperficial en la zona alta de la misma. El modelo delineó siete subcuencas y 65 URH, obteniendo un rendimiento de maíz de 7 767 - 8 956  $\text{kg ha}^{-1}$  y 1 356 - 2 245  $\text{kg ha}^{-1}$  de soya, se eligió una URH para evaluar el rendimiento con rotación de cultivo soya-maíz; en 1996 encontraron un rendimiento de maíz de 8 865  $\text{kg ha}^{-1}$  con una producción total de biomasa de 12 471  $\text{kg ha}^{-1}$  y un consumo de nitrógeno de 109  $\text{kg ha}^{-1}$ , para 1997 el rendimiento de soya fue de 2 135  $\text{kg ha}^{-1}$  (4 449  $\text{kg ha}^{-1}$  de biomasa) y el consumo de nitrógeno de 115  $\text{kg ha}^{-1}$ , los cuales fueron similares a los registros de datos medidos en la cuenca (rendimiento: 8 320  $\text{kg ha}^{-1}$  de maíz y 2 510  $\text{kg ha}^{-1}$  de soya; consumo de nitrógeno: 95.8 y 156  $\text{kg ha}^{-1}$  en maíz y soya respectivamente). La simulación mediante SWAT-M de las cargas mensuales de  $\text{NO}_3\text{-N}$ , así como las pérdidas mensuales de atrazina fueron similares a los registros de datos medidos, no así en la simulación diaria, sin embargo; se registraron mejores resultados que con la versión SWAT 2000 debido a que la versión fue mejorada en la simulación del drenaje y en zonas bajas (Du *et al.*, 2006).

Así mismo, Srinivasan *et al.* (2010) evaluaron el caudal del río, el rendimiento de maíz, soya y el cultivo energético Switchgrass en la cuenca alta del río Mississippi con un área aproximada de 491 665 km<sup>2</sup>, siendo el 40 % de la superficie dedicada a la agricultura. Trabajaron con 14 568 URH's y emplearon la opción del modelo de auto fertilización para el cultivo de maíz. Los datos simulados fueron comparados con los registros de caudal del U.S. Geological Survey (USGS) y los registros de rendimiento de cultivos de la National Agricultural Statistics Service (NASS). La estimación del caudal mediante SWAT fue satisfactoria con menos del 10 % de sesgo en los 11 puntos monitoreados. Predijeron buenos rendimientos: 6.56-8.27 t ha<sup>-1</sup> de maíz y 1.79-2.36 t ha<sup>-1</sup> de soya, con porcentajes de sesgo menores al 20 % en 11 de las 14 subcuencas para ambos cultivos, estimaron una producción potencial anual de *Panicum virgatum* de 380 000 millones de toneladas en toda la cuenca, con una producción promedio anual de 17.44 t ha<sup>-1</sup>, por lo que el modelo SWAT puede predecir satisfactoriamente los procesos hidrológicos, cambios de uso de suelo y rendimientos de cultivos energéticos.

Uno de los trabajos que resultó fundamental para la elaboración de la tesis fue la propuesta de zonificación agroecológica del sistema Café - Palma Camedor en la zona central del estado de Veracruz, utilizaron datos climatológicos de 90 estaciones (CONAGUA), información edafológica de cartas de INEGI de 1983 y requerimientos agroecológicos obtenidos de revisión de literatura; generaron 2 mapas, uno de aptitud climática y otro edafológico para el sistema Café - Palma Camedor, encontraron que el 2.9 % y el 9.4 % de la superficie estudiada es apta en el aspecto climático y edafológico respectivamente; siendo las variables climáticas más restrictivas que las edafológicas, posiblemente por el amplio gradiente térmico e hídrico que presenta el área de estudio debido a la variación de la altitud y la circulación atmosférica; respecto a la edafología, se encontró que la baja fertilidad está asociada a texturas arenosas y suelos mal drenados en la planicie costera. Finalmente mediante el análisis de sobre posición se generó el mapa de aptitud agroecológica, donde la mayor parte del área de estudio (85.5 %) presenta condiciones agroecológicas restrictivas para el desarrollo del sistema, el área con condiciones favorables (3011 m<sup>2</sup>) presentó una

distribución en zonas de clima semiárido y húmedo además de suelos de pendiente moderada, lo que permite ubicar zonas con potencial productivo, cuantificar áreas e identificar variables ambientales limitantes (Pérez-Portilla y Geissert-Kientz, 2006).

## 4 JUSTIFICACIÓN

La actual crisis energética causada por la sobre explotación de los yacimientos de petróleo para abastecer las necesidades humanas ha traído consigo la búsqueda de nuevas formas para generar biocombustibles en los que se procure la conservación de los recursos naturales, se minimice la emisión de gases de efecto invernadero para reducir los efectos del calentamiento global, además de, generar sistemas de producción sustentables que contribuyan de manera importante con la demanda energética.

La implementación del bioetanol como combustible trae consigo grandes beneficios como es la creación de empleos, mejora de la calidad de vida y promueve el desarrollo de la economía rural, contribuye a la ampliación de la infraestructura en zonas rurales, al mejoramiento de la seguridad energética, conservación de los recursos petrolíferos, expansión de la agricultura, motivación de la comunidad científica y tecnológica además de la mejora del ambiente tanto de forma local como global. No se espera que el bioetanol desplace completamente a la gasolina del mercado, por el contrario puede alargar los recursos petrolíferos, moderando el precio en el mercado y ahorrando gasolina, formando parte de una transición hacia sistemas de transporte sustentables.

Se requiere ampliar el estudio de los cultivos de los cuales se pueda obtener bioetanol y conocer las áreas con vocación para ello, lo que permitirá la sostenibilidad de futuras plantaciones. El modelo SWAT presenta grandes ventajas para este tipo de estudios debido a que involucra fenómenos del ciclo hidrológico, es un modelo continuo en el tiempo, usa entradas fácilmente disponibles y es espacialmente explícito, haciendo amigable su manejo. Por lo cual, el presente trabajo pretende evaluar el potencial de la región para la producción de bioetanol a partir de caña de azúcar, sorgo dulce y remolacha azucarera, e identificar las zonas propicias para dichos cultivos energéticos, de tal manera que no se tomen en consideración áreas que ya están siendo utilizadas para la producción de alimentos, áreas forestales o selvas por la importancia ambiental que estas tienen, generando información sobre la ubicación estratégica de estos cultivos y auxiliar en la toma de decisiones.

## 5 HIPÓTESIS

- El estado de Veracruz presenta condiciones edafoclimáticas aptas para obtener rendimientos mayores a  $70 \text{ t ha}^{-1}$  de los cultivos de caña de azúcar, sorgo dulce y remolacha azucarera.
- Para la producción de Bioetanol, la aptitud territorial para altos rendimiento será mayor para caña de azúcar en comparación con sorgo dulce y remolacha azucarera en los pastizales de Veracruz.

## 6 OBJETIVOS

### 6.1 Objetivo general

Generar información cuantitativa y cartográfica sobre el cultivo de caña de azúcar, sorgo dulce y remolacha azucarera y la producción de bioetanol en Veracruz.

### 6.2 Objetivos particulares

- Simular mediante el programa SWAT el rendimiento potencial de caña de azúcar, sorgo dulce y remolacha azucarera.
- Estimar el rendimiento teórico de bioetanol de los tres cultivos.
- Cartografiar el estado de Veracruz en función del rendimiento estimado de insumos bioenergéticos y la producción de bioetanol.
- Identificar áreas en zonas de pastizales con alto potencial para la producción de bioetanol.



## 7 MATERIAL Y MÉTODOS

### 7.1 Descripción del área de estudio

El estado de Veracruz de Ignacio de la Llave se encuentra ubicado en las siguientes coordenadas geográficas: al Norte 22°28', al Sur 17°09' de latitud Norte, al Este 93°36', al Oeste 98°39' de longitud Oeste, colinda al norte con Tamaulipas y el Golfo de México; al este con el Golfo de México, Tabasco y Chiapas; al sur con Chiapas y Oaxaca; al oeste con Puebla, Hidalgo y San Luis Potosí (Figura 6).



**Figura 6.** Área de estudio. Elaborado a partir de INEGI, 2005.

Tiene una extensión territorial de 71 699 km<sup>2</sup>, la cual, representa el 3.7% de la superficie del país y cuenta con 212 municipios.

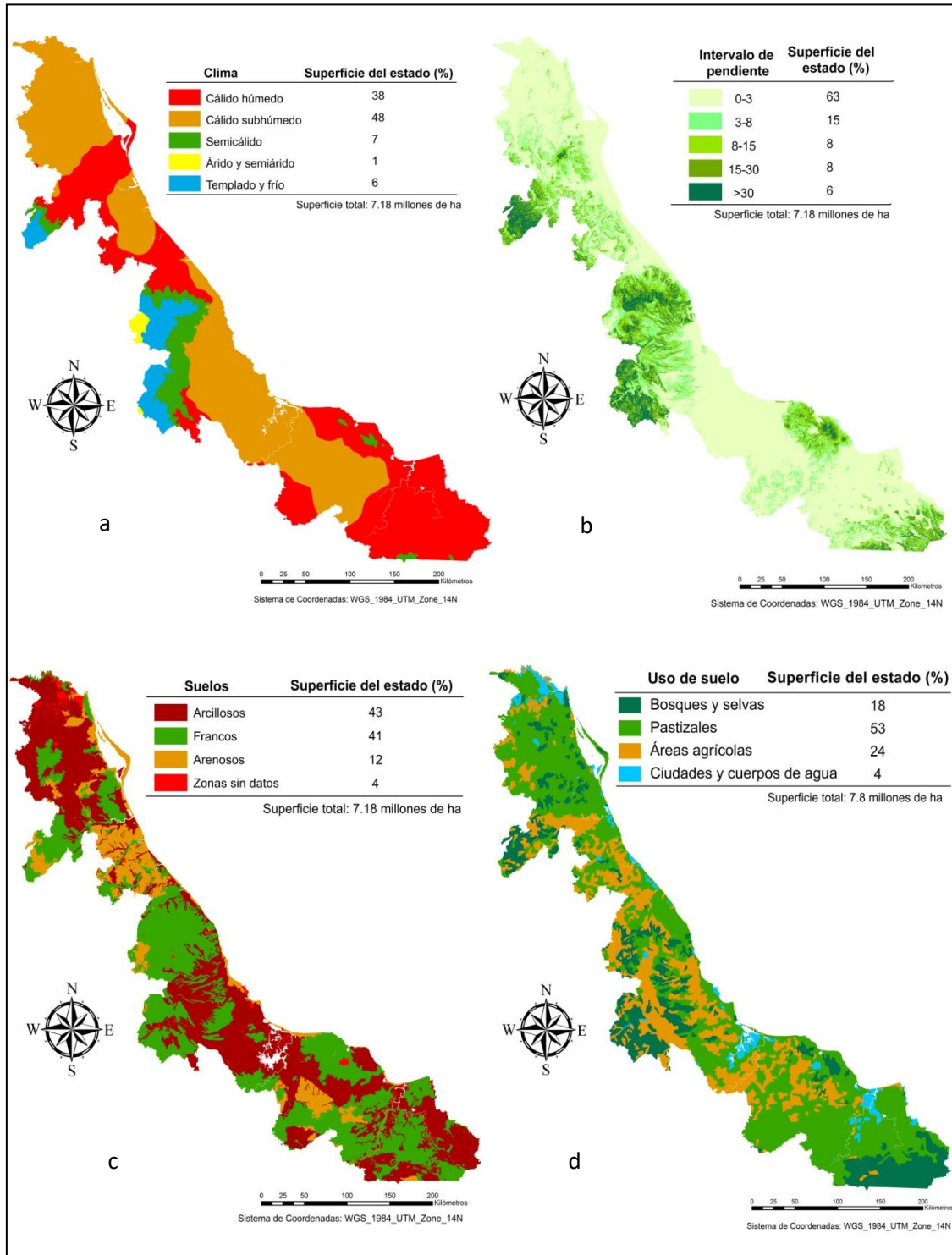
Atraviesan al estado la Sierra Madre Oriental, la Llanura Costera del Norte, el eje Neovolcánico, la Sierra Madre del Sur, la Llanura Costera del Golfo Sur, la Sierra de Chiapas y Guatemala y la cordillera Centroamericana. Los ríos que destacan son:

Panuco, Tuxpan, Cazonas, Jamapa, Papaloapan y Coatzacoalcos, quedando dividido el territorio en 6 regiones hidrológicas: Balsas, Pánuco, Tuxpan-Nautla, Papaloapan, Coatzacoalcos y Grijalva-Usumacinta (INEGI, 2011).

El clima es variado, predominando los climas tropicales cálidos húmedos (Am y Af) en un 48 % del territorio del estado y en un 38 % los cálidos subhúmedos ( $Aw_0$ ,  $Aw_1$  y  $Aw_2$ ), el 14 % restante corresponde a los climas semicálido húmedo y subhúmedo, templado húmedo y subhúmedo y árido y semiárido (Figura 7a).

La mayor parte de territorio (78%) presenta pendientes menores al 8%, mientras que el 16% tiene pendientes entre 8-30 %, el 6 % restante presenta pendientes mayores a 30%, las cuales corresponden a zonas montañosas (Figura 7b). Los suelos arcillosos predominan en el estado en un 43%, los francos corresponden al 41% del territorio y los arenosos al 12% (Figura 7c) (INEGI,2005).

Respecto al uso actual del suelo, los bosques y selvas ocupan el 18% del estado, las áreas agrícolas el 25 % y los pastizales ocupan la mayor parte el 53 % distribuidos en todo el estado, coincidiendo en zonas franco y arcillosos, con climas cálidos húmedos y subhúmedos (Figura 7d). Estas últimas siendo principalmente tierras ociosas y subutilizadas, debido a que producen solamente el 30% de su potencial de forraje para el sector ganadero y presenta una baja productividad por el manejo inadecuado del pastoreo. Los pastizales en su mayor parte son explotados para producir carne y leche de bovinos en sistemas extensivos de doble propósito con muy baja eficiencia en términos productivos y de uso del suelo, por lo anterior, Román *et al.*, (2009) están de acuerdo que la actividad pecuaria en Veracruz debe cambiar a sistemas de producción más intensivos, que al mismo tiempo que incrementan la productividad y sean más rentables, liberen superficie que pueda ser usada en otras actividades más productivas y rentables como el caso de los biocombustibles.



**Figura 7. Distribución geográfica de a) climas, b) pendientes del terreno, c) suelo y d) uso de suelo del estado de Veracruz. Elaborados a partir de INEGI, 2005.**

## 7.2 Actividades generales a realizar

Para cumplir con los objetivos planteados se realizaron las siguientes actividades:

- Se simuló el rendimiento de los cultivos de caña de azúcar, sorgo dulce y remolacha azucarera.
- Se estimó el rendimiento teórico de bioetanol.
- Se cartografiaron los rendimientos de biomasa y bioetanol.
- Se identificaron las zonas potenciales para la producción de biomasa (polos de desarrollo).

## 7.3 Simulación del rendimiento de biomasa

La simulación del rendimiento de los tres cultivos se realizó mediante el modelo SWAT.

### 7.3.1 El Modelo de simulación SWAT

Se usó la versión del modelo SWAT2005 con interfaz gráfica ArcSWAT y el software ArcGis 9.3, aplicación ArcMap 9.3 para la proyección y manejo de mapas.

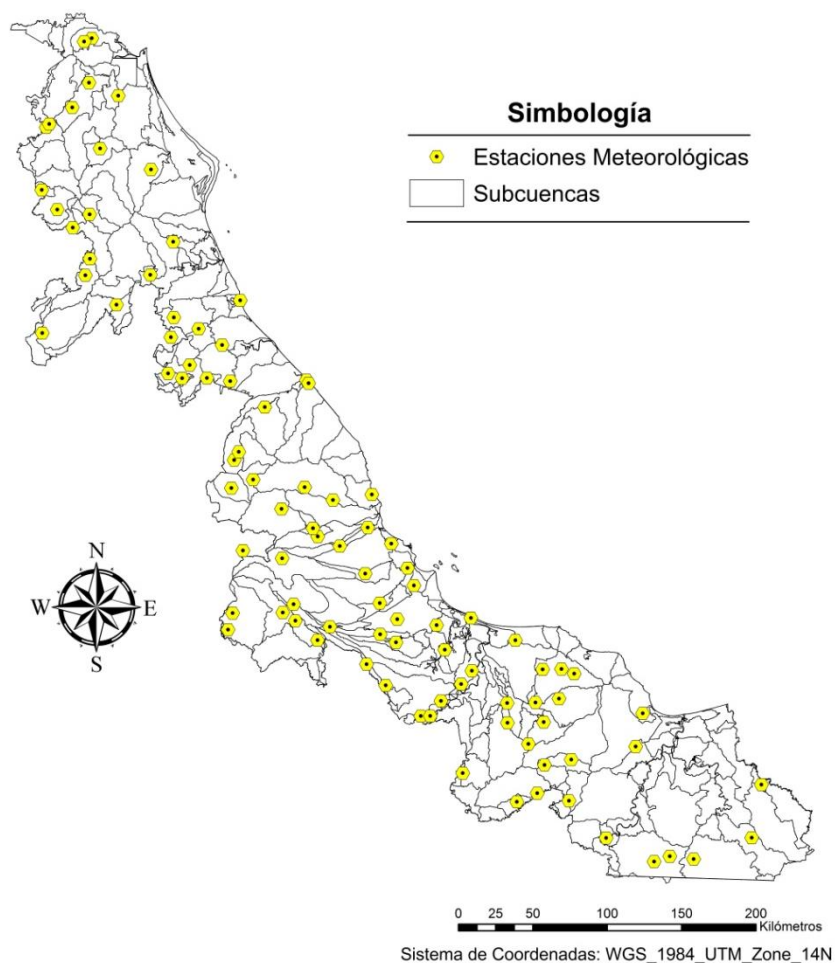
El modelo delimitó las subcuencas en el estado, para ello el SWAT requirió el Modelo de Elevación Digital (DEM), el mapa de ríos y una máscara para delimitar el área de trabajo, a partir de éstos, el modelo calculó la dirección y acumulación del flujo delineando la red de ríos que complementa el mapa añadido, se asignó el área mínima en hectáreas para generar la mayor cantidad de subcuencas y presentar la red de drenaje con mayor detalle, se creó la red de drenaje de acuerdo a los puntos donde convergen los ríos, los cuales, se seleccionaron para delimitar las subcuencas.

Posteriormente se procedió a la delimitación de las URH's para cada subcuenca, relacionando 3 factores: el suelo, su uso y la pendiente del terreno. Se seleccionaron los mapas de uso de suelo y edafología con sus respectivas bases de datos y se asignaron 5 intervalos de pendientes del terreno (0-3,3-8,8-15,15-30 y >30%) tomando como referencia el DEM.

Se ingresaron los archivos con datos diarios de precipitación, temperatura máxima y mínima, datos estadísticos de clima y la ubicación de 137 estaciones climáticas, de las cuales el modelo utilizó 95 debido a que a cada subcuenca se asigna el clima de la estación más cercana a su centroide.

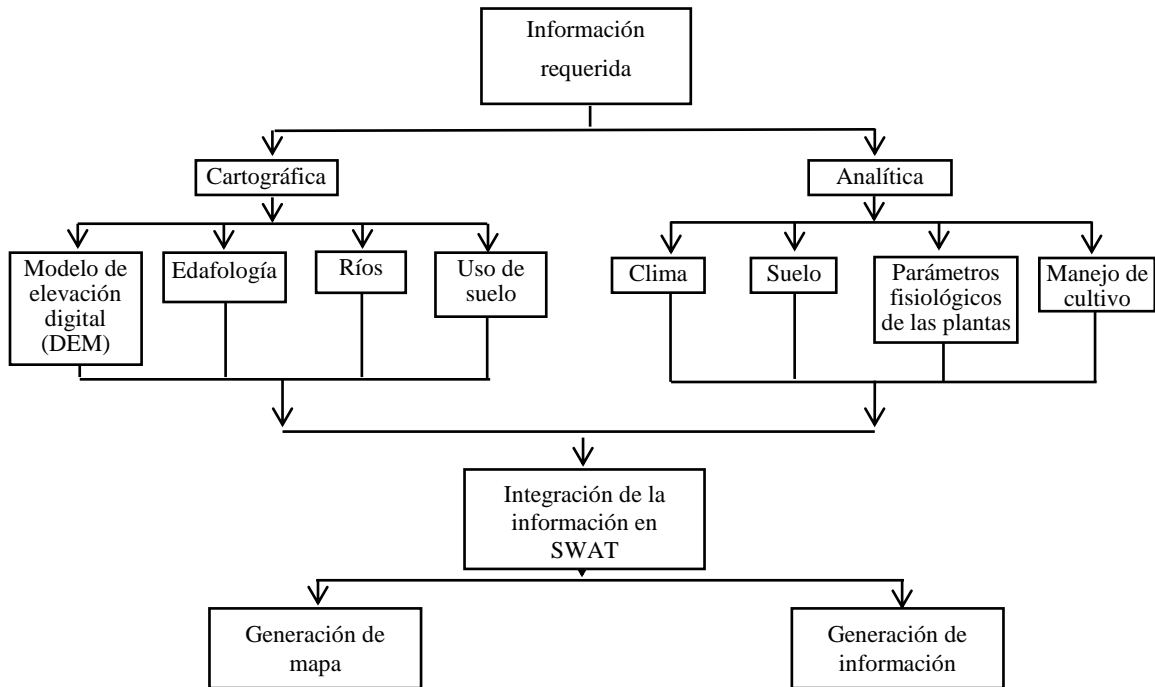
A partir de éste procedimiento se crearon 224 cuencas, 4 053 URH's y las estaciones se desplegaron en el mapa, la interfaz localizó las tablas en formato dbf conteniendo los datos meteorológicos (Figura 8).

Se asignó a las URH's el manejo agronómico del cultivo a trabajar y finalmente se corrió el modelo para el periodo de 2000-2010, para obtener el rendimiento promedio del cultivo por URH.



**Figura 8. Subcuencas y estaciones meteorológicas**

La Figura 9 muestra el diagrama de trabajo empleado para los tres cultivos, caña de azúcar, sorgo dulce y remolacha azucarera.



**Figura 9. Esquema de trabajo.**

A continuación se describe de manera más detallada los mapas y bases de datos requeridos por el modelo SWAT

### 7.3.2 Cartografía utilizada

Se emplearon mapas en formato grid con tamaño de 90 m, en proyecciones Universal Transversa de Mercator (UTM) en la zona 14 del hemisferio norte de acuerdo con el Datum WGS84, se utilizó el modelo de elevación digital (DEM) y mapas de edafología, ríos y uso de suelo, obtenidos del INEGI a escala 1:250 000. El mapa de uso de suelo fue modificado considerando toda la superficie del estado como área potencial para los cultivos, con el fin de obtener información de las zonas de pastizales así como de las zonas agrícolas para la validación.

### 7.3.3 Bases de datos

Las bases de datos que se requirieron son las características fisicoquímicas del suelo, datos climáticos y manejo agronómico del estado de Veracruz, así como parámetros fisiológicos de los cultivos.

#### 7.3.3.1 Suelos

La información edafológica requerida por el modelo se obtuvo de los perfiles típicos del suelo elaborados por cada clase de las 58 clases de suelo (45 sub unidades FAO más 13 clases creadas por presentar fase lítica) (Anexo 1), a partir de las descripción de la subunidad y los datos analíticos de 829 perfiles de suelo reportados en las cartas edafológicas del INEGI para los 7 estados (Veracruz, Tabasco, Campeche, Yucatán Quintana Roo, Chiapas y Oaxaca) con el fin de contar con mayor información por clase de suelo, el Cuadro 6 presenta los parámetros solicitados por el modelo y el Cuadro 7 muestra los datos del perfil típico Vertisol pélico, cuya superficie abarca el 23% del estado.

**Cuadro 6. Parámetros edafológicos requeridos por el SWAT.**

Parámetros	Fuente o método de obtención
Profundidad	Cartas edafológicas <sup>1</sup>
Textura	Cartas edafológicas <sup>1</sup>
Materia orgánica	Cartas edafológicas <sup>1</sup>
Conductividad eléctrica	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 = 0.58*Materia orgánica <sup>(3)</sup>
USLE_K (Ecuación Universal de Pérdida de Suelo)	$K_{usle} = \frac{0.00021 * M^{1.14} * (12 - MO) + 3.25 * (C_{soilstr} - 2) + 2.5 * (C_{perm} - 3)}{100}$ <sup>(3)</sup>
Albedo	Estimado a partir de la materia orgánica <sup>4</sup>

1. INEGI, 2. Saxton *et al.* (1986), 3. Neitsch, *et al.* (2011), 4. Ecuación de Harris (software Curve Expert 2.0.)

**Cuadro 7. Características del perfil típico del suelo Vertisol pélico (Vp)**

Horizonte	Prof.	Textura	D.A.	C.A.D.	C.O.	Ks	Albedo	USLE K	C.E
A	210	48-20-32	1.26	0.12	1.99	1.5	0.09	0.19	1.98
B1	684	51-21-28	1.25	0.13	1.24	1.6	0.13	0.17	2.93
B2	686	46-22-32	1.27	0.13	0.37	1.7	0.2	0.23	3.14

Prof.:Profundidad (mm); Textura: arcilla-limo-arena (%); D.A.: Densidad aparente (g cm<sup>-3</sup>); C.A.D.: Capacidad de agua disponible (mm mm<sup>-1</sup>); C.O.: Carbono orgánico (%); Ks: Conductividad hidráulica saturada (mm h<sup>-1</sup>); Albedo (adimensional); USLE K: Factor "K" (Factor de erodabilidad del suelo); C.E.: Conductividad eléctrica (dS m<sup>-1</sup>).

### 7.3.3.2 Información Climática

Se consideró la información climática de 137 estaciones meteorológicas distribuidas en el estado de Veracruz, información obtenida de CONAGUA (Comisión Nacional del Agua), se emplearon datos diarios de precipitación pluvial, temperatura máxima y mínima de por lo menos 20 años durante el periodo de 1960-2000, a partir de esta información se simularon los datos faltantes, radiación solar, humedad relativa y datos estadísticos mensuales por estación climática requeridos por el modelo, correspondientes al periodo de 1960-2010 (Cuadro 8), utilizando el generador climático del modelo Environment Policy Integrated Climate (EPIC). Finalmente se trabajó con 95 estaciones debido a que el modelo asigna a cada subcuenca el clima de la estación más cercana a su centroide.

**Cuadro 8. Datos estadísticos mensuales requeridos por el modelo SWAT. Estación meteorológica 30202, San Pedro Amatitlán.**

Parámetros	Meses											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Tmax	26.5	28.5	31.7	34	36.1	34.1	32.4	32.7	32.2	30.4	29.1	27.3
Tmin	17.8	17.8	20.1	22.1	23.5	23.1	22.5	22.9	22.9	21.6	20.1	18.7
DETmax	4	4.5	4	4.1	3.3	4.5	3.1	2.9	3.2	3.8	3.5	3.7
DETmin	2.5	2.6	2.4	2.1	1.9	2.1	1.3	1.3	1.4	1.8	2.2	2.4
PPM	45.7	27.2	16	35.9	28.3	108.4	218.2	204.8	266	284.1	115	576
DEPPM	8.53	10	15.32	22.59	13.72	19.91	17.22	24.34	21.86	31.98	16.83	10.4
CAPPM	2.22	2.87	3.18	2.10	1.91	1.71	2.08	4.33	2.08	2.54	1.98	3.15
PDHDS	0.15	0.08	0.04	0.05	0.05	0.23	0.34	0.27	0.27	0.23	0.13	0.17
PDHDH	0.33	0.40	0.09	0.23	0.34	0.47	0.57	0.56	0.65	0.61	0.54	0.39
PDPM	5.7	3.6	1.6	2	2.3	9.3	13.8	12	13.3	11.8	6.9	6.9
PMMH	14.3	14.2	18.2	25.6	29	37.4	31.6	34.5	41.4	43.4	29.3	13.9
RS	13	15	18	20	22	21	20	19	18	16	14	13

**Tmax:** Temperatura máxima promedio (°C); **Tmin:** Temperatura mínima promedio (°C); **DETmax:** Desviación estándar de la temperatura máxima; **DETmin:** Desviación estándar de la temperatura mínima; **PPM:** Precipitación pluvial promedio (mm); **DEPPM:** Desviación estándar de la precipitación pluvial; **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; **PDPM:** Promedio de días con precipitación pluvial al mes; **PMMH:** Precipitación pluvial máxima en media hora (mm); **RS:** Radiación solar promedio diaria (MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>).



### 7.3.3.3 Parámetros fisiológicos de los cultivos

Los parámetros fisiológicos requeridos para la simulación de los cultivos se muestran en el Anexo 2, fueron obtenidos en su mayoría de la base de datos del modelo SWAT.

### 7.3.3.4 Manejo agronómico de los cultivos

La información del manejo agronómico de los cultivos fue para un rendimiento alto y bajo condiciones de temporal de acuerdo con los paquetes tecnológicos publicados para cada cultivo por el Instituto Nacional de Investigaciones, Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) y revisión de literatura, señalando las actividades realizadas al cultivo, las fechas en las que se llevan a cabo, los plaguicidas y fertilizantes usados con la respectiva cantidad empleada (Anexo 3).

## 7.4 Estimación teórica de bioetanol

Se utilizaron los rendimientos promedios obtenidos en la simulación y mediante los factores de conversión del cultivo mostrados en el Cuadro 9, se estimó el potencial de producción de bioetanol industrial.

**Cuadro 9. Tasa de conversión de producto - bioetanol**

Cultivo energético	Tasa de conversión producto - bioetanol (L t <sup>-1</sup> )
Caña de azúcar	70
Sorgo dulce	55
Remolacha azucarera	100

Fuente: SAGARPA, 2011

## 7.5 Cartografía del rendimiento de biomasa y bioetanol

Una vez obtenido el archivo de salida del modelo SWAT para cada cultivo, con los valores de rendimiento de biomasa por cada URH de la superficie de Veracruz, excepto ciudades y cuerpos de agua, se realizó una unión con el cuadro de atributos de la capa de URH generada por el modelo durante el proceso de simulación, una vez integrada la información se realizó la representación del territorio de la biomasa promedio generada por cada cultivo, así como la producción de bioetanol obtenida a partir de dicha biomasa. Los mapas fueron editados en ArcMap, se usó el método de

clasificación de Jenks para generar agrupaciones con homogeneidad interna y al mismo tiempo la máxima diferencia entre clases (ArcGIS 9.2 Desktop Help).

## **7.6 Validación**

Los datos de rendimiento promedio de caña simulados por el modelo SWAT fueron comparados con datos de rendimiento promedio observado durante el periodo 2000 a 2010 de 17 ingenios azucareros, la información se obtuvo de la Unión Nacional de Cañeros A. C., para los otros cultivos no se encontraron registros de datos observados.

Con el apoyo de la herramienta de Google Earth se observó el área de influencia de cada uno de los ingenios, se identificaron dichas áreas en el mapa de potencial productivo y se registró el rendimiento potencial de las unidades cartográficas comprendidas, se realizó una regresión lineal entre los rendimientos promedio observados y los simulados para analizar la relación entre los pares de datos.

## **7.7 Relación Rendimiento potencial y el Uso actual del suelo**

Con el objetivo de identificar el uso actual del suelo en que se ubica cada unidad cartográfica de potencial productivo, a dichos mapas se sobrepuso el mapa de uso actual del suelo, escala 1:250 000, elaborado por la Conabio - Conafor del cual, se consideraron tres unidades cartográficas genéricas: uso agrícola, pastizales y forestales, para cada cultivo se calculó la superficie ocupada por cada categoría de potencial de rendimiento, distribuida entre los diferentes usos actuales del suelo.

## **7.8 Identificación de áreas recomendadas para producir biomasa**

Se realizó un análisis de sobre posición de capas en Arc Map 9.3 a partir de los mapas creados de potencial productivo para los tres cultivos, el mapa de zonas naturales protegidas y el de uso de suelo, se descartaron las tierras dedicadas a la agricultura, bosques, selvas, ciudades y cuerpos de agua. Los terrenos de pastizales fueron las zonas propuestas para la producción del cultivo con fines energéticos por ser en su mayoría tierras subutilizadas, a partir de las cuales se seleccionaron las áreas con rendimientos superiores a  $70 \text{ t ha}^{-1}$  para los tres cultivos. Una vez identificadas las

áreas más propicias para los tres cultivos se integraron en un solo mapa y se calculó el área por cultivo.

Finalmente a partir del último mapa de aptitud del terreno para la producción de los tres cultivos energéticos, se realizaron cortes en forma de círculos de 25 km de radio, seleccionando las áreas más compactas como propuesta de áreas de abastecimiento de industrias productoras de bioetanol. Se calculó el área con aptitud para producir los cultivos, comprendida dentro de las zonas de abastecimiento, así como la producción de bioetanol que se generaría por zona de abastecimiento de acuerdo a la tasa de conversión de cada cultivo.

## 8 RESULTADOS Y DISCUSIONES

Los resultados obtenidos a partir de la simulación con el modelo SWAT de los cultivos de caña de azúcar, sorgo dulce y remolacha azucarera.

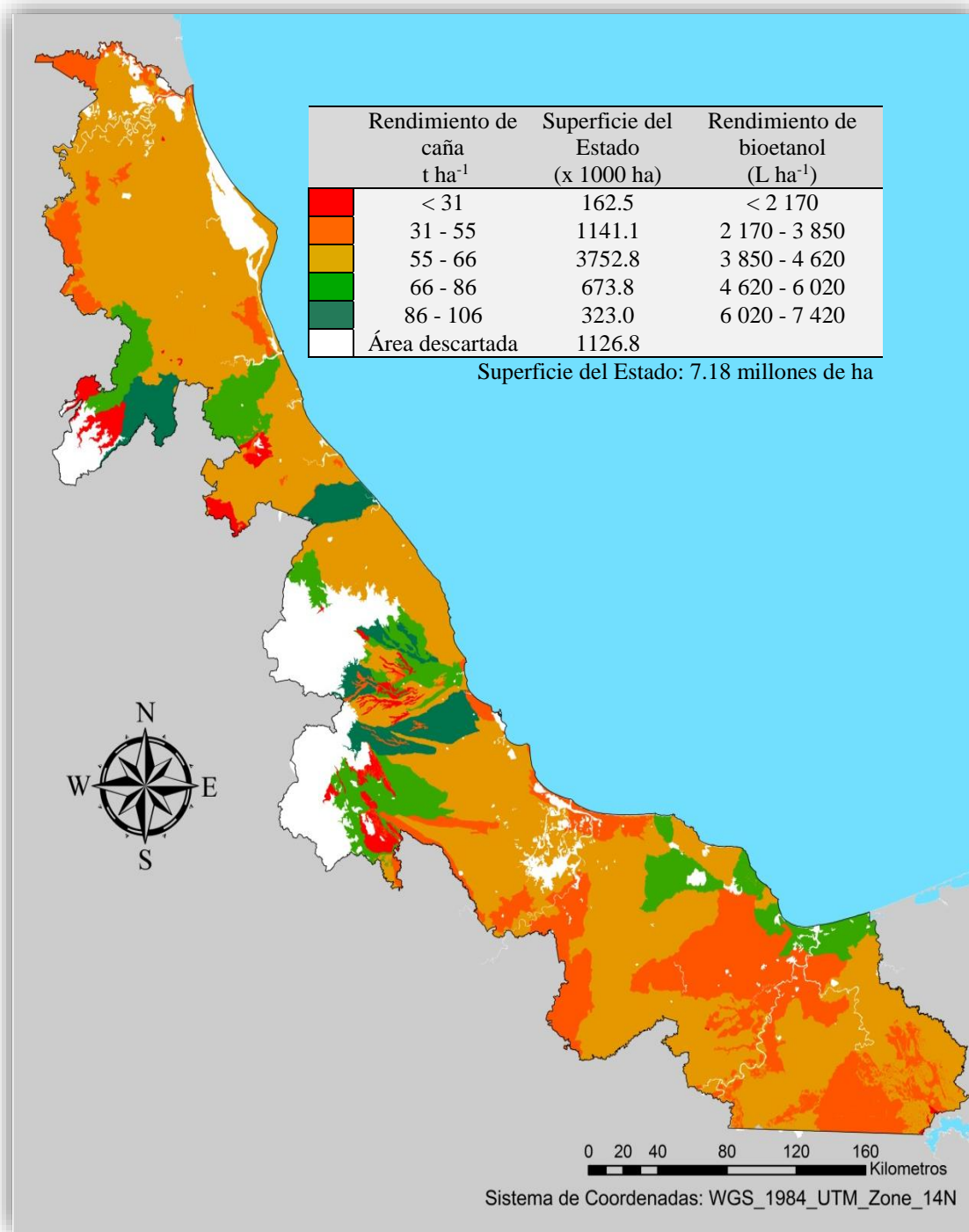
### 8.1 Cartografía del rendimiento de biomasa y bioetanol

El área descartada corresponde a ciudades, cuerpos de agua y áreas con altura sobre el nivel del mar superiores a la tolerada por el cultivo, siendo para caña de azúcar y sorgo dulce de 1 200 msnm y para la remolacha azucarera 1 800 msnm, por lo tanto la superficie simulada para caña de azúcar y sorgo dulce fue de 6.05 millones de ha y para remolacha azucarera 6.29 millones de ha, lo que representa el 84.3 y 87.6 % del territorio estatal respectivamente.

#### 8.1.1 Caña de azúcar

La Figura 10 muestra el mapa de los rendimientos promedio de caña de azúcar por cada URH a lo largo del territorio del estado de Veracruz durante el periodo 2000 - 2010, los cuales variaron de 0 a 106 t ha<sup>-1</sup>, los intervalos establecidos con el método de clasificación Jenks fueron: 0 - 31, 31 - 55, 55 - 66, 66 - 86 y 86 - 106 t ha<sup>-1</sup>. El rendimiento promedio de todas las URH fue de 59 t ha<sup>-1</sup>, ligeramente inferior al intervalo de rendimiento promedio en México de 60-70 ton ha<sup>-1</sup> reportado por Zavala-García *et al.* (2010) y por SIAP (2010) para el cultivo de temporal de 64.76 t ha<sup>-1</sup>.

La mayor superficie del estado (52.3 %), presenta rendimientos del 55 - 66 t ha<sup>-1</sup> distribuidas a lo largo del territorio, el 15.9 % del estado tiene valores de 31 - 55 t ha<sup>-1</sup> principalmente en el norte y sur del estado, los rendimientos 66 - 86 t ha<sup>-1</sup> ocupan el 9.7 % mientras que los rendimientos más altos (86 - 106 t ha<sup>-1</sup>) y los más bajos (menores a 30 t ha<sup>-1</sup>) ocuparon la menor superficie el 4.5 y 2.3 % del territorio respectivamente.



**Figura 10. Rendimiento promedio de caña de azúcar simulado por el modelo SWAT durante el periodo 2000-2010 y estimación del rendimiento teórico de bioetanol en el estado de Veracruz.**

De acuerdo con las características edafoclimáticas del estado, mostradas en la Figura 7, los rendimientos más altos de caña de azúcar se localizaron en zonas con clima cálido húmedo, suelos francos o arcillosos y pendientes de entre 0 a 8 %, mientras que los rendimientos más bajos se observan en zonas con suelos delgados y pendientes de suelo mayor a 15 %. Lo anterior se aproxima a lo reportado por Jiménez *et al.* (2004), en su estudio sobre la aptitud agroecológica para el cultivo de caña de azúcar en el sur de Tamaulipas, donde mediante la sobreposición de mapas se muestra que en las zonas con condiciones óptimas para el cultivo predominaron los suelos Vertisol pélico (Vp) caracterizados por ser suelos fértiles, con textura media a fina, alto contenido de materia orgánica, buena permeabilidad, aireación y pendientes menores al 8%, en cambio para las zonas no propicias encontraron unidades de suelo: Litosoles, Luvisoles, Gleysoles y Solonchak, la mayoría de estos suelos poco profundos, bajo contenido de materia orgánica y pendientes superiores al 30 %, también señala que la pendiente es la última variable edáfica que puede modificar la aptitud de la caña de azúcar, así mismo Paiboonsak *et al.* (2004) reporta como zonas no aptas territorio con pendientes mayores a 12% y suelos poco profundos (< 25 cm) .

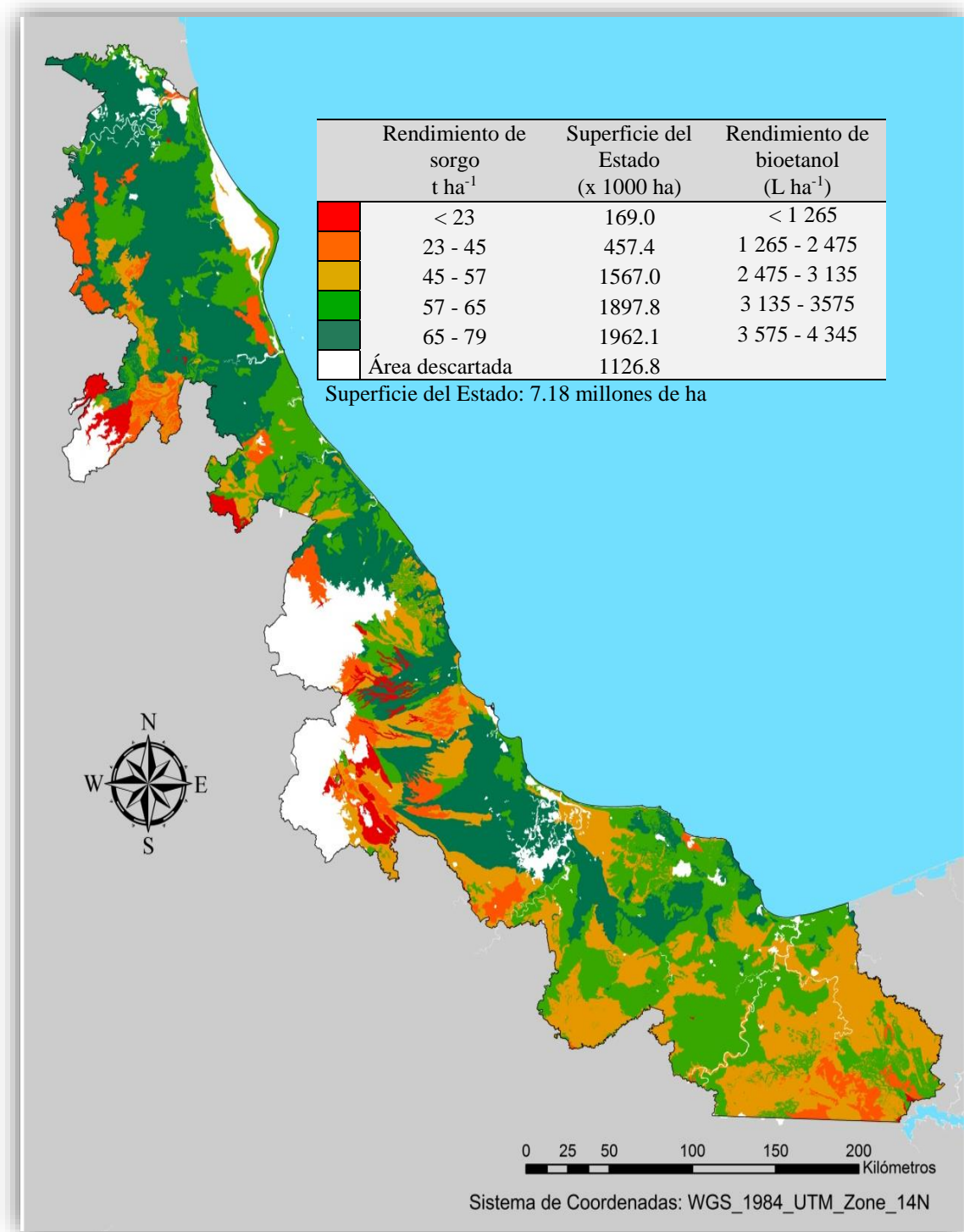
Jiménez *et al.* (2004) considera para la zona apta del sur de Tamaulipas por lo menos 1452 mm por ciclo fenológico anual para cubrir las necesidades hídricas, similar a lo reportado por Aguilar *et al.* (2010) con una precipitación media anual mayor a los 1 500 mm, así como un intervalo de temperatura entre 22 a 32 °C.

El rendimiento de bioetanol varió de los 0 a los 7 420 L ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> de acuerdo a los rendimientos de caña de azúcar registrados por cada URH. Las zonas con los rendimientos más altos de caña de azúcar (86 - 106 t ha<sup>-1</sup>) presentaron un rendimiento promedio de 99 t ha<sup>-1</sup> y un rendimiento potencial promedio bioetanol de 6 930 L ha<sup>-1</sup>.

### 8.1.2 Sorgo Dulce

Los rendimientos de sorgo dulce por URH variaron de 0 a 79 t ha<sup>-1</sup>, el promedio fue de 56 t ha<sup>-1</sup>, similar al rendimiento reportado por SENER / BID / GTZ (2006) para el cultivo de temporal de 60 t ha<sup>-1</sup> y a lo señalado por Almodares y Hadi (2009) de 54 a 69 t ha<sup>-1</sup>; los intervalos generados fueron: 0 - 23, 23 - 45, 45 - 57, 57 - 65, 65 - 79 t ha<sup>-1</sup>, siendo los rendimientos más altos (65 - 79 t ha<sup>-1</sup>) los que ocuparon la mayor superficie estatal con un 27.3% del territorio principalmente en el norte y centro del estado, en seguida ligeramente con menor porcentaje (26.4 %) se encuentran los rendimientos de 57 - 65 t ha<sup>-1</sup> distribuidos a lo largo del estado, los rendimientos anteriores se presentaron en zonas con climas cálido húmedo, cálido subhúmedo o semicálido, suelos arcillosos, francos o arenosos y pendientes de hasta 15 %, debido a la mayor tolerancia que presenta el cultivo a regiones semiárida y áridas (Almodares *et al.*, 2011) y al buen crecimiento en suelos Vertisoles pesados, con grietas profundas y suelos arenosos (Almodares y Hadi, 2009). El rendimiento de 45 - 57 t ha<sup>-1</sup> es ocupado por el 21.8 % del territorio predominando al sur del estado, finalmente los rendimientos más bajos (menor a 23 t ha<sup>-1</sup> y 23 - 45 t ha<sup>-1</sup>) ocuparon la menor área (6.4 % y 2.4 %) como se observa en la Figura 11.

Con respecto al rendimiento de bioetanol, este varió de 0 a 4 345 L ha<sup>-1</sup> por ciclo del cultivo de cuatro meses, pudiendo incrementar el rendimiento de biomasa y bioetanol si se tienen dos o tres ciclos durante el año. Las zonas con altos rendimientos de sorgo dulce (65 - 79 t ha<sup>-1</sup>) presentaron un rendimiento promedio de 69 t ha<sup>-1</sup> con un rendimiento potencial promedio de biocombustible de 3 795 L ha<sup>-1</sup>.



**Figura 11.** Rendimiento promedio de sorgo dulce simulado por el modelo SWAT durante el periodo 2000-2010 y estimación del rendimiento teórico de bioetanol en el estado de Veracruz.

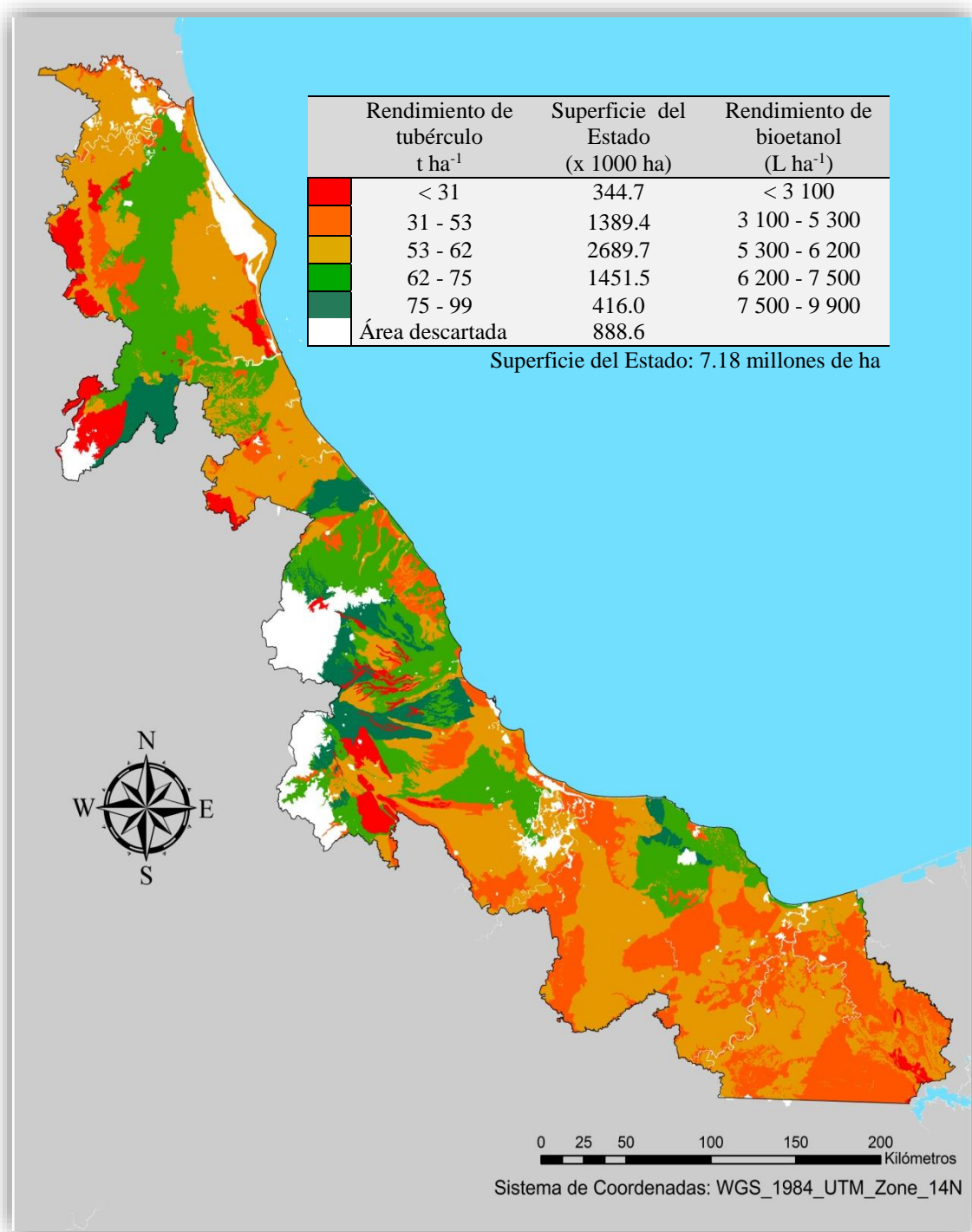


### 8.1.3 Remolacha azucarera

Para la remolacha azucarera el rendimiento promedio de las URH fue de  $55 \text{ t ha}^{-1}$ , los rendimientos fluctuaron entre 0 y  $99 \text{ t ha}^{-1}$ , generando los siguiente intervalos: 0 - 31, 31 - 53, 53 - 62, 62 - 75, 75 - 99  $\text{t ha}^{-1}$ . Zavala-García *et al.* (2010) indica que los rendimientos del cultivo pueden variar desde 50 hasta  $100 \text{ t ha}^{-1}$ , por lo que el rendimiento promedio esta en límite inferior del intervalo, lo cual indica que hay poco territorio que presenta altos rendimientos.

La mayor superficie del estado (37.5 %) fue ocupada por los rendimientos de 53 - 62  $\text{t ha}^{-1}$ , en seguida los rendimientos de 62 - 75 y 31 - 53  $\text{t ha}^{-1}$  ocuparon el 20.2 y 19.4 % respectivamente, mientras que la menor área fue ocupada por los rendimientos más bajos y altos (0 - 31 y 76 - 99  $\text{t ha}^{-1}$ ) con el 4.8 y 5.8 % del territorio (Figura 12). Los rendimientos altos fueron encontrados en zonas con climas cálido húmedo, subhúmedo o semicálido, en suelos arcillosos, francos y en menor proporción se encontraron en suelos arenosos lo que facilita el desarrollo de la raíz, las pendientes encontradas van de los 0 a 15 %, además se presentan altos rendimientos hacia las zonas montañosas, es decir a mayor altitud debido a que crecen bien en climas templados (ARPEL-ICA, 2009).

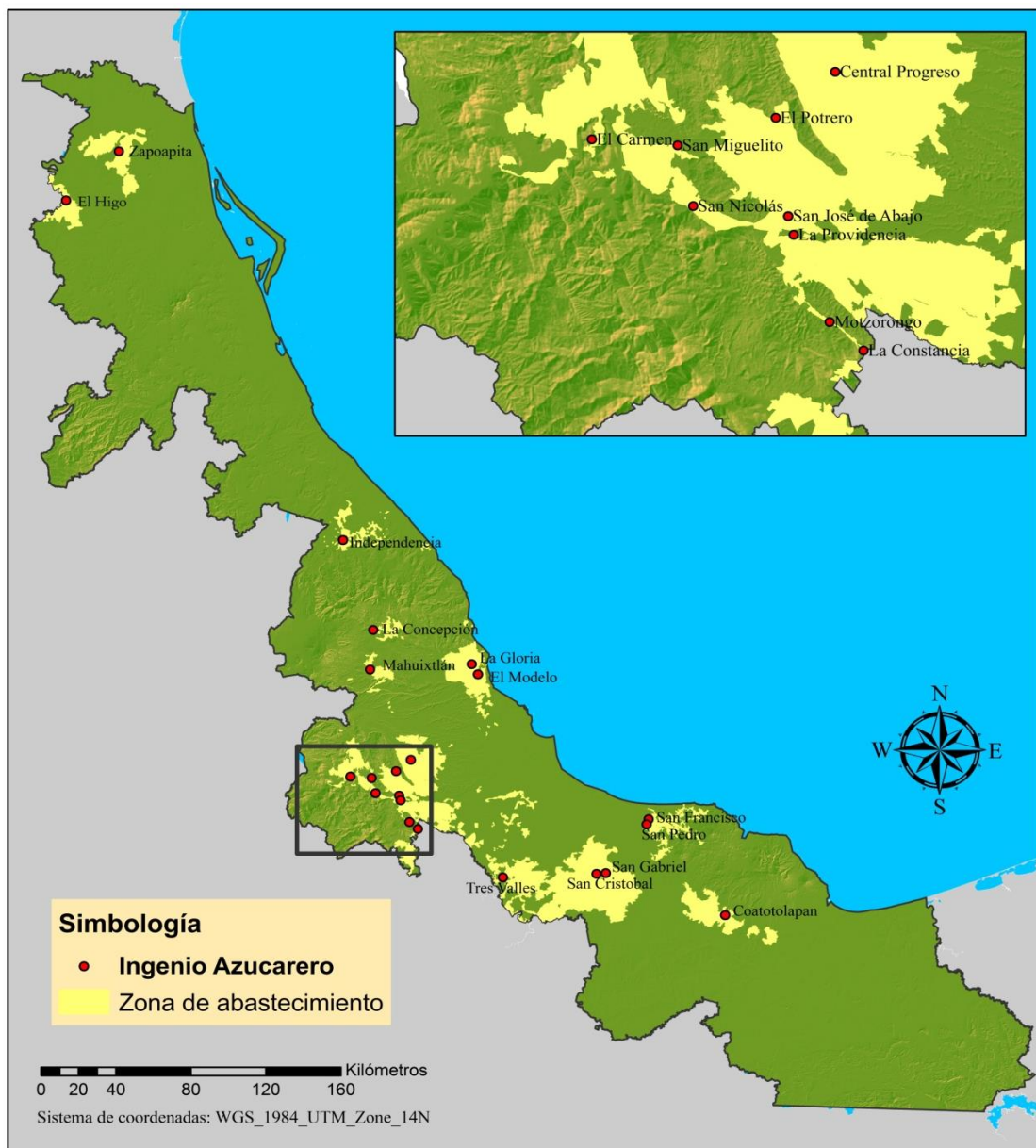
El rendimiento de bioetanol a partir de remolacha azucarera varió de los 0 a los 9 900  $\text{L ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$  de acuerdo con los rendimientos obtenidos del cultivo. Para las URH con rendimientos mayores a  $75 \text{ t ha}^{-1}$ , el rendimiento promedio fue de  $83 \text{ t ha}^{-1}$  con un rendimiento potencial promedio de bioetanol de  $8\,300 \text{ L ha}^{-1}$ .



**Figura 12.** Rendimiento promedio de remolacha azucarera simulado por el modelo SWAT durante el periodo 2000-2010 y estimación del rendimiento teórico de bioetanol en el estado de Veracruz.

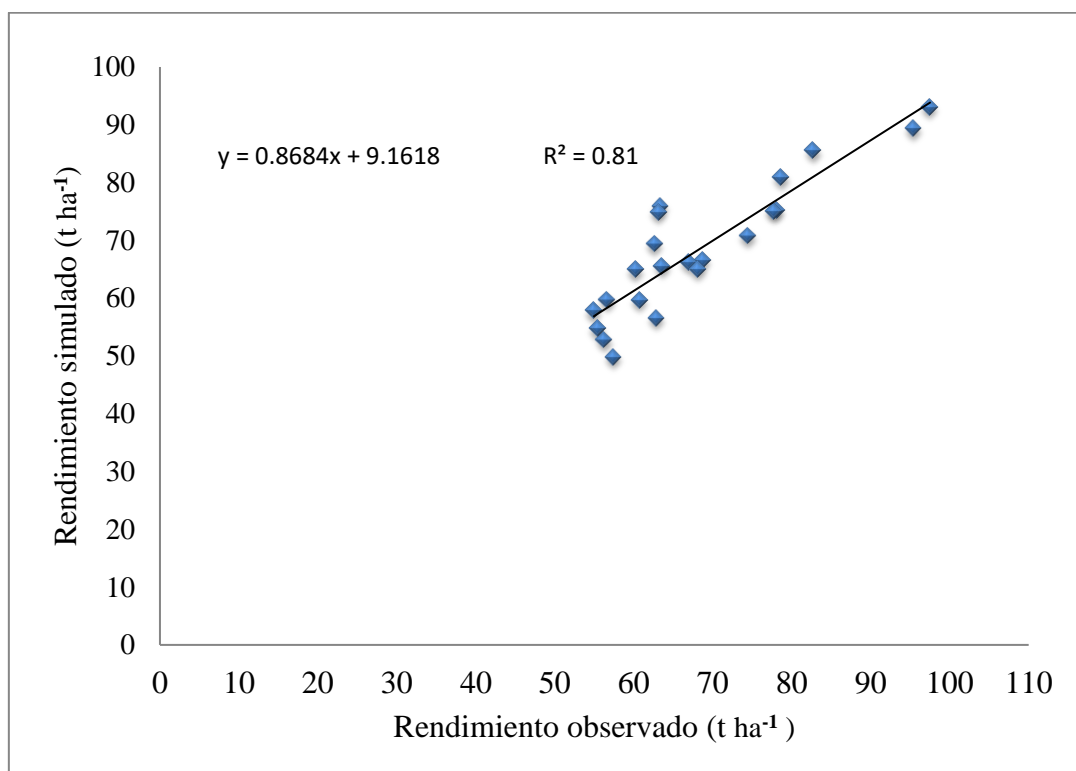
## 8.2 Validación

Los 22 ingenios azucareros ubicados en el estado de Veracruz se muestran en la Figura 13, mientras que la Figura 14 presenta la comparación entre los rendimientos promedio simulados por el modelo SWAT para caña de azúcar en las zonas de abastecimiento de los ingenios azucareros durante el periodo 2000 - 2010 y los rendimientos promedio observados para la misma zona y periodo.



**Figura 13.** Ubicación de los Ingenios Azucareros del estado de Veracruz

Se encontró una  $R^2$  de 0.81, lo que demuestra un desempeño aceptable del modelo, las variaciones registradas en los rendimiento observados y simulados pudieron deberse a las diferencias en el manejo agronómico del cultivo en cada ingenio, principalmente en las fechas de las actividades y en los fertilizante usados, la primera debido a que se relaciona con la información climática y la segunda con los nutrientes, ambas repercutiendo en el desarrollo del cultivo, por otra parte, una escala menor de los mapas daría mayor precisión en los resultados.



**Figura 14. Comparación del rendimiento promedio de caña de azúcar observado y simulado con el modelo SWAT en las zonas de abastecimiento de los ingenios azucareros.**

### 8.3 Relación del Rendimiento potencial y el Uso actual del suelo

De acuerdo con el análisis de sobreposición entre la superficie con rendimiento y el uso actual del suelo, para la caña de azúcar y el sorgo dulce el 20.9 % de la superficie total del estado correspondió a la superficie simulada en zonas agrícolas, el 13.8 % en bosques y selvas y el 49.6 % en pastizales.

El Cuadro 10 muestra el resultado de la sobreposición en hectáreas, así como el porcentaje correspondiente a la superficie total del estado, se puede apreciar que el intervalo con los rendimientos mayores de caña de azúcar (86 - 106 t ha<sup>-1</sup>) ocuparon el 4.5 % del estado y de ésta sólo el 1.6% corresponde a zonas de pastizal, además se mostró que en los tres usos de suelo los rendimientos de 55 a 66 t ha<sup>-1</sup> ocuparon la mayor superficie del estado, abarcando el 11.0 % del territorio en zonas agrícolas, el 7.0 % en bosque y selvas y un 34.2 % en los pastizales.

Con respecto al sorgo dulce, los rendimientos más altos (65 - 79 t ha<sup>-1</sup>) ocuparon la mayor superficie del estado con un 27.3 %, de éstos el 62 % se localiza en zonas de pastizales, lo que corresponde al 17% del estado. Así mismo el intervalo de rendimiento que ocupó mayor área en las zonas agrícolas fue el de 65 a 79 t ha<sup>-1</sup> con un 7.3 % del territorio estatal, en el caso de las zonas de bosques y selvas los rendimientos de 45 a 57 t ha<sup>-1</sup> presentaron la mayor superficie (4.5 %) y para las zonas de pastizales fue el intervalo de 57 a 65 t ha<sup>-1</sup> con 17.4 % (Cuadro 11).

**Cuadro 10. Superficie ocupada por cada categoría de potencial de rendimiento de caña de azúcar, distribuida entre los diferentes usos actuales del suelo (agrícola, pastizal y forestal) del estado de Veracruz.**

Rendimiento t ha <sup>-1</sup>	Superficie total simulada		Superficie ocupada en el estado					
	(x 1000 ha)	%	Agrícola		Bosques y selvas		Pastizales	
			(x 1000 ha)	%	(x 1000 ha)	%	(x 1000 ha)	%
< 31	162.5	2.3	56.1	0.8	75.5	1.1	30.9	0.4
31 - 55	1141.1	15.9	241.8	3.4	207.2	2.9	692.1	9.6
55 - 66	3752.8	52.3	791.5	11.0	503.8	7.0	2457.5	34.2
66 - 86	673.8	9.4	258.4	3.6	146.2	2.0	269.3	3.8
86 - 106	323.0	4.5	151.8	2.1	56.4	0.8	114.8	1.6
<b>Total</b>	<b>6053.2</b>	<b>84.3</b>	<b>1499.6</b>	<b>20.9</b>	<b>989.1</b>	<b>13.8</b>	<b>3564.6</b>	<b>49.6</b>

Área descartada (ciudades, cuerpos de agua y superficie superior a los 1200 msnm): 1126.8 ha (15.7%)

**Cuadro 11. Superficie ocupada por cada categoría de potencial de rendimiento de sorgo dulce, distribuida entre los diferentes usos actuales del suelo (agrícola, pastizal y forestal) del estado de Veracruz.**

Rendimiento t ha <sup>-1</sup>	Superficie total		Superficie ocupada en el estado					
	simulada		Agrícola		Bosques y selvas		Pastizales	
	(x 1000 ha)	%	(x 1000 ha)	%	(x 1000 ha)	%	(x 1000 ha)	%
< 23	169.0	2.4	66.0	0.9	80.7	1.1	22.4	0.3
23 - 45	457.4	6.4	156.9	2.2	132.4	1.8	168.1	2.3
45 - 57	1567.0	21.8	338.1	4.7	321.9	4.5	907.0	12.6
57 - 65	1897.8	26.4	416.4	5.8	232.6	3.2	1248.8	17.4
65 - 79	1962.1	27.3	522.2	7.3	221.6	3.1	1218.3	17.0
Total	6053.2	84.3	1499.6	20.9	989.1	13.8	3564.6	49.6

Área descartada (ciudades, cuerpos de agua y superficie superior a los 1200 msnm): 1126.8 ha (15.7%)

Para remolacha azucarera, el área simulada en zonas agrícolas corresponden al 22% del territorio estatal, el 15.4 % a bosques y selvas y el 50.2 % a pastizales, el intervalo con los rendimientos mas altos (75 - 99 t ha<sup>-1</sup>) solo constituyeron el 5.8% del estado, y de ésta el 37 % se encuentra en pastizales, lo que corresponde al 2.2 % del territorio estatal. El intervalo con los rendimientos de 53 a 62 t ha<sup>-1</sup> fue el que ocupó mayor superficie en el estado con 37.5 %, de la misma forma obtuvo la mayor superficie para los tres usos de suelo con 8.5, 4.6 y 24.5 % en zonas agrícolas, bosques y selvas y pastizales respectivamente como se observa en el Cuadro 12.

**Cuadro 12. Superficie ocupada por cada categoría de potencial de rendimiento de remolacha azucarera, distribuida entre los diferentes usos actuales del suelo (agrícola, pastizal y forestal) del estado de Veracruz.**

Rendimiento t ha <sup>-1</sup>	Superficie total		Superficie ocupada en el estado					
	simulada		Agrícola		Bosques y selvas		Pastizales	
	(x 1000 ha)	%	(x 1000 ha)	%	(x 1000 ha)	%	(x 1000 ha)	%
< 31	344.7	4.8	97.4	1.4	128.8	1.8	118.4	1.6
31 - 53	1389.4	19.4	281.5	3.9	288.4	4.0	819.5	11.4
53 - 62	2689.7	37.5	606.8	8.5	326.8	4.6	1756.2	24.5
62 - 75	1451.5	20.2	430.8	6.0	266.0	3.7	754.7	10.5
75 - 99	416.0	5.8	163.2	2.3	97.4	1.4	155.4	2.2
Total	6291.4	87.6	1579.7	22.0	1107.4	15.4	3604.3	50.2

Área descartada (ciudades, cuerpos de agua y superficie superior a los 1200 msnm): 888.6 ha (12.4%)

#### 8.4 Identificación de áreas recomendadas para producir biomasa

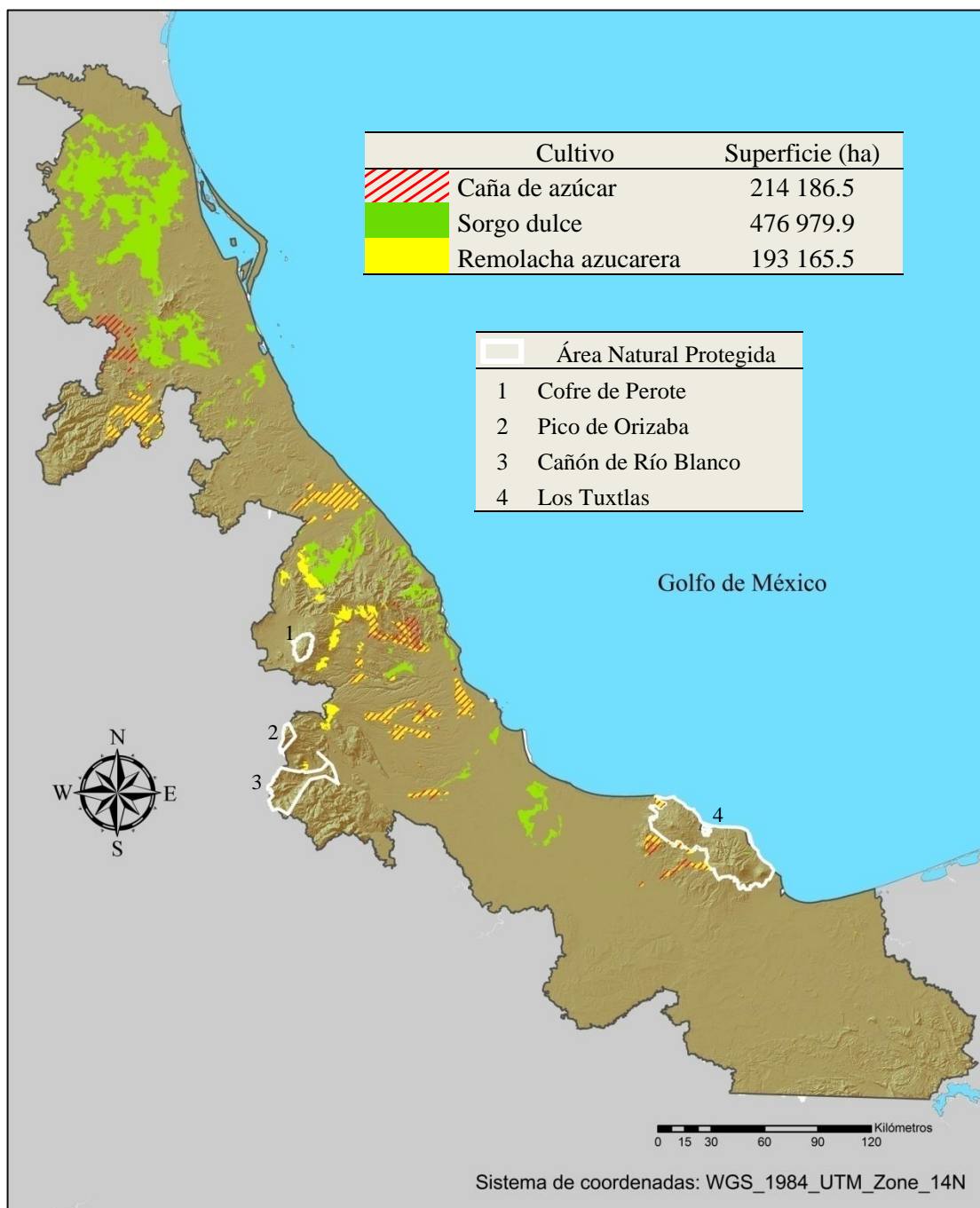
El cuadro x muestra las áreas aptas para los cultivos, identificadas por ser áreas que registraron rendimientos promedios mayores a  $70 \text{ t ha}^{-1}$  para los tres cultivos en zonas de pastizales. Se encontró mayor aptitud del territorio para el cultivo de sorgo dulce con poco mas del doble del área apta para caña de azúcar.

**Cuadro 13. Áreas considerada como aptas para los cultivos**

Cultivo	Área de pastizales con rendimientos $> 70 \text{ t ha}^{-1}$	
	x 1000 ha	% de pastizal
Caña de azúcar	214.2	6
Sorgo dulce	477.0	13.4
Remolacha azucarera	193.2	5.4

Total de pastizal: 3.56 millones de ha

La figura 15 muestra las zonas aptas por cultivo, el territorio apto para sorgo dulce, no presentó traslape con otro cultivo, debido a la tolerancia que presenta a la sequía y a suelos pobres lo que le permite prosperar en diferentes lugares, no así para la caña de azúcar y remolacha azucarera en donde del total del territorio apto para caña de azúcar, el 22.7 % fue apto únicamente para dicho cultivo y el resto del territorio (77.3 %) compartió aptitud con la remolacha azucarera, área que representó el 85.8 % del área total apta para el tubérculo, quedando únicamente para dicho cultivo el 14.2 % de su territorio apto.

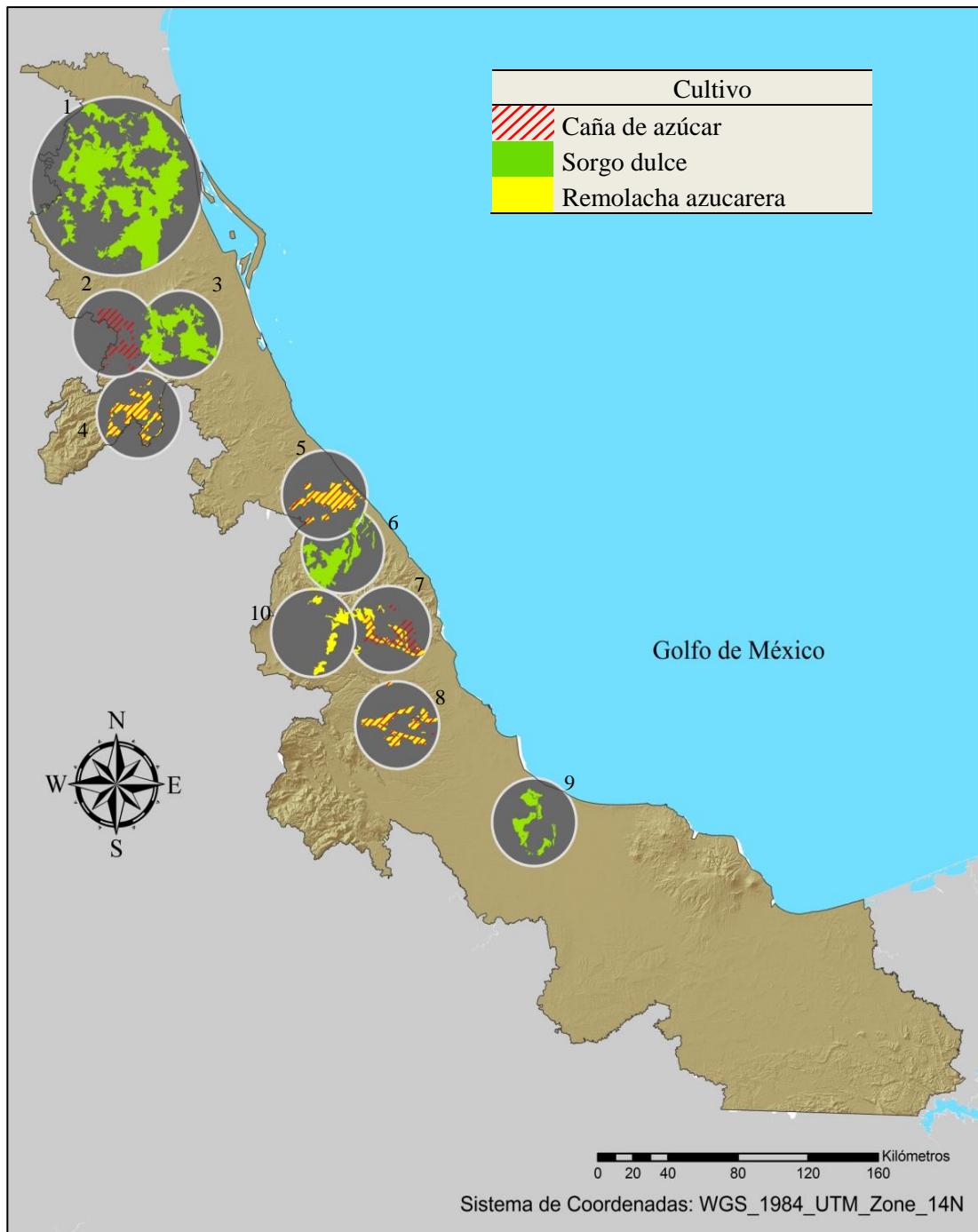


**Figura 15. Zona de pastizal con rendimientos promedios superior a  $70 \text{ t ha}^{-1}$  de caña de azúcar, sorgo dulce y remolacha azucarera, simulados por el modelo SWAT para el estado de Veracruz.**

A partir de la delimitación del territorio con mayor aptitud por cultivo en círculos de 25 km de radio, se identificaron diez zonas para el abastecimiento de materia prima para plantas productoras de bioetanol, de las cuales, cuatro fueron zonas aptas para el



cultivo de sorgo dulce, una para caña de azúcar, una para remolacha azucarera y cuatro tanto para caña de azúcar como remolacha azucarera como se muestra en la Figura 16.



**Figura 16. Áreas propuestas para establecer biorefinerías de bioetanol**

A su vez en el Cuadro 13 se observa la producción teórica de bioetanol por zona de abastecimiento, en donde a pesar de que el sorgo dulce tiene la menor tasa de conversión a bioetanol ( $55 \text{ L ha}^{-1}$ ), presentó la mayor aptitud del territorio al abarcar una mayor área en tres de las cuatro zonas para este cultivo (Zona No. 1, 3 y 6), lo que le permitió alcanzar una producción de bioetanol de 0.09 GL en la zona con menor área (zona 9) hasta 2.21 GL en la zona de mayor área (zona 1), sin presentar traslape con la aptitud del territorio para otro cultivo.

La caña de azúcar presentó ligeramente mayor aptitud del territorio y producción potencial del cultivo que la remolacha azucarera en tres de las cuatro zonas donde ambos cultivos coinciden en territorio (Zona: 4, 5 y 8) excepto la zona 7 en la que la remolacha azucarera presenta mayor aptitud que la caña de azúcar e igual producción potencial de cultivo. A pesar de este escenario la producción potencial de bioetanol a partir de caña de azúcar en las zonas 4, 5 y 8 fue inferior a la de la remolacha azucarera debido a la menor tasa de conversión a bioetanol.

**Cuadro 14. Zonas de abastecimiento de 25 km para plantas productoras de bioetanol**

Zona No.	Cultivo	Área (ha)	Producción potencial de:	
			Cultivo (Mt)	Bioetanol (GL)
1	sorgo	567 610.346	40.12	2.21
2	caña	32 562.513	2.47	0.17
3	sorgo	114 005.114	8.05	0.44
4	caña/remolacha	30 968.8 / 29 229.7	3.19 / 2.42	0.22 / 0.24
5	caña/remolacha	42 289.0 / 41 961.8	4.22 / 3.55	0.30 / 0.35
6	sorgo	61 934.883	4.53	0.25
7	caña/remolacha	34 132.9 / 35 650.2	3.01 / 3.01	0.21 / 0.30
8	caña/remolacha	36 062.8 / 36 523.9	3.32 / 2.97	0.23 / 0.30
9	sorgo	21 772.715	3.32	0.09
10	remolacha	40 452.274	3.32	0.34

## 9 CONCLUSIONES

Después de realizar la investigación y análisis de los resultados se concluye lo siguiente:

- Los rendimientos potenciales de los tres cultivos simulados por el modelo SWAT en el estado de Veracruz presentaron gran variabilidad en función de las características edafoclimáticas: caña azúcar de 0 a 106 t ha<sup>-1</sup>, sorgo dulce de 0 a 79 t ha<sup>-1</sup> y remolacha azucarera de 0 a 99 t ha<sup>-1</sup>.
- Los rendimientos de bioetanol estimados a partir de los rendimientos potenciales de cultivo y la tasa de conversión a bioetanol fueron para caña de azúcar de 0 - 7 420 L ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, sorgo dulce de 0 - 4 345 L ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> y remolacha azucarera 0 - 9 900 L ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>.
- El modelo SWAT simuló el rendimiento de caña de azúcar de manera aceptable ( $R^2 = 0.81$ ), por lo que la información generada puede ser usada en posteriores tomas de decisiones.
- El cultivo con mayor aptitud para el territorio de Veracruz en zonas de pastizal y con rendimiento superiores a 70 t ha<sup>-1</sup> fue el sorgo dulce con 13.4 % del territorio de pastizales, seguida por la caña de azúcar con 6 % de los pastizales y por último la remolacha azucarera con 5.4 %, por lo que la segunda hipótesis es rechazada.
- Se identificaron diez zonas homogéneas y compactas a lo largo del territorio con aptitud para por lo menos uno de los tres cultivos estudiados con rendimientos mayores a 70 t ha<sup>-1</sup> y en zonas de pastizales: 4 para sorgo dulce, 1 para caña de azúcar, 1 para remolacha y 4 tanto para caña de azúcar como remolacha azucarera.

- 
- El bioetanol estimado a partir de las zonas homogéneas y compactas fluctúa desde los 0.09 GL (zona 9) hasta los 2.21 GL (zona 1), en ambos casos obtenidos de sorgo dulce.
  - La zonificación agroecológica permitió identificar áreas estratégicas y las no recomendadas para la expansión del cultivo, mediante el empleo adecuado de los recursos, combinando los requerimientos climáticos y edafológicos de los cultivos, definiendo zonas homogéneas con características óptimas para su desarrollo, con mayor producción por unidad de superficie, generando información sobre posibles polos de desarrollo regional con nuevas alternativas para la producción agrícola, donde no se compita con los alimentos y se contribuya a una transición ordenada en busca de insumos energéticos que tengan el menor impacto en el ambiente.
  - La resolución de los mapas (1:250 000) fue suficiente para identificar patrones generales de aptitud, sin embargo, los mapas de baja resolución no reflejan circunstancias locales y por lo tanto los mapas usados en este estudio no pueden usarse para planear proyectos específicos.

## 10 RECOMENDACIONES

Con base al estudio realizado se presentan las siguientes recomendaciones:

- Se recomienda medir los parámetros fisiológicos de los tres cultivos requeridos por el modelo SWAT con el objetivo de aumentar la precisión en el rendimiento simulado.
- Así mismo sería conveniente la realización de estudios más específicos con mapas de mayor resolución y actualizados.
- Es importante que se realice estudios con la información de campo de los suelos de las zonas de abastecimiento de los ingenios azucareros para comparar con mayor certidumbre los rendimientos de campo con los simulados.
- Realizar un estudio complementario en las zonas homogéneas y compactas propuestas que permita conocer la factibilidad de los cultivos en el ámbito social, cultural y analizarse las consecuencias en la expansión de las fronteras agrícolas, el desplazamiento de algunos sistemas productivos, así como también la formulación de un ordenamiento territorial.

## 11 LITERATURA CITADA

AFG-INTERREG IIIB-FEDER (2007). ECAS: Cultivos Energéticos en el Espacio Atlántico. Asociación Forestal de Galicia. Santiago de Compostela, España. 23 p.

Aguilar R. N., Galindo M. G., Fontanelli M. J. y Contreras S. C. (2010) Evaluación multicriterio y aptitud agroclimática del cultivo de caña de azúcar en la región de Huasteca (México). *Revista Corpoica - Ciencia y Tecnología Agropecuaria*. 11(2): 144-154.

Aguilar-Rivera N. (2007) Bioetanol de la caña de azúcar. *Avances en Investigación Agropecuaria*. 11(3). 25-39

Almodares A. y Hadi M.R. (2009). Production of bioethanol from sweet sorghum: A review. *African Journal of Agricultural Research*. 4(9):772-780.

Almodares A., Hadi M. R. y Akhavan Kharazian Z. (2011). Sweet Sorghum: Salt Tolerance and High Biomass Sugar Crop. *Biomass - Detection, Production and Usage*, Dr. Darko Matovic (Ed.), ISBN: 978-953-307-492-4, En: <http://www.intechopen.com/books/biomass-detection-production-and-usage/sweet-sorghum-salt-tolerance-and-high-biomass-sugar-crop>. Consultado el 2 mayo de 2012.

Álvarez M. C. (2009). Biocombustibles: desarrollo histórico-tecnológico, mercados actuales y comercio internacional. *Economía Informa*. No. 359 pp. 62-89

Antenucci J. C., Brown, K., Croswell P. L. y Kevany M. J. (1991). *Geographic Information Systems: A Guide to the Technology*. In: *Sistemas de Información Medioambiental*. Taboada G. J. y Cotos Y. J. Netbiblo, S. L. España. pp 61-91.

ArcGIS 9.2 Desktop Help. Natural breaks (Jenks). En: [http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/index.cfm?topicname=natural\\_breaks\\_\(jenks\)](http://webhelp.esri.com/arcgisdesktop/9.2/index.cfm?topicname=natural_breaks_(jenks))  
Ultima modificación: 15 de marzo de 2007. Consultado el: 9 de febrero de 2012.

Armuelles B. R. (1969). Zonificación agrícola de Panamá. Tesis de Maestría en Ciencias. Escuela para Graduados, Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la OEA. Turrialba, Costa Rica. 229 p.

ARPEL-ICA (2009). Manual de Biocombustibles Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA) San José, Costa Rica. 197 p.

Ascher M., Ganduglia F., Vega O., Abreu F. y Macedo J. (2010). América Latina y el Caribe. Mapeo político-institucional y análisis de la competencia entre producción de alimentos y bioenergía. IICA. San José, Costa Rica. 98 p.

Becerra P. L. (2009). La industria del etanol en México. ECONOMIA UNAM. Vol 6 No 016.

BNDES y CGEE (Banco Nacional de Desarrollo Económico y Social - Centro de Gestión y Estudios Estratégicos. (2008). Bioetanol de caña de azúcar: energía para el desarrollo sostenible. Primera Edición. Rio de Janeiro, Brasil. 314 p.

California Environmental Protection Agency. (2002). Eter Metil Terbutílico (MTBE) Hoja de datos. Air Resources Board En: [http://www.arb.ca.gov/ch/spanish\\_docs/MTBE\\_0602\\_Spanish.pdf](http://www.arb.ca.gov/ch/spanish_docs/MTBE_0602_Spanish.pdf). Consultado el 10 de noviembre de 2011.

Castro P., Coello J. y Castillo L. (2007). Opciones para la producción y uso del biodiesel en el Perú. Primera Edición. Soluciones Prácticas-ITDG. Lima, Perú. 176 p.

Diario Oficial de la Federación (DOF) (2008). Ley de Promoción y Desarrollo de los Biocombustibles. Publicada el 1° de febrero de 2008

Domínguez B. J. (2000). Breve introducción a la cartografía y a los sistemas de información geográfica (SIG). Informes Técnicos Ciemat. (Centro de investigaciones energéticas, medioambientales y tecnológicas) N° 943. Madrid, España. 38 p.

Du B., Saleh A., Jaynes D. B. y Arnold J. G. (2006) Evaluation of SWAT in simulation nitrate nitrogen and atrazine fates in a watershed with tiles and potholes. American Society of Agricultural and Biological Engineers Vol. 49(4): 949-959

Fadil A., Rhinane H., Kaoukaya A., Kharchaf Y. y Bachir O. A. (2011) Hydrologic Modeling of the Bouregreg Watershed (Morocco) Using GIS and SWAT model. Journal of Geographic Information System. 3:279-289

FAO (1997). Zonificación agro-ecológica. Guía general. Boletín de suelos de la FAO 73. Roma. 96 p.

FAO (1999). Sistemas de Información Geográfica para un Desarrollo Sostenible. Departamento de Desarrollo Sostenible (SD) En: <http://www.fao.org/sd/spdirect/gis/EIgis000.htm> Consultado el 9 de enero de 2011

FAO (2008). El estado mundial de la agricultura y la alimentación. Biocombustibles: perspectivas, riesgos y oportunidades. Roma, Italia. 146 p.

FAOSTAT Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2010) En: <http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx> Consultado el 20 de diciembre de 2011.

Fazaeli H., Golmohammadi H. A., Al-Modares A., Mosharraf S., y Shaei A. A. (2006). Comparing the performance of sorghum silage with maize silage in feedlot calves. Pakistan Journal Biological Science. 9(13): 2450-2455

Felicísimo A. (1994). Modelos digitales del terreno. Introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales. Pentalfa. 222 p



García C. J. M. y García L. J. A. (2006). Biocombustibles líquidos: biodiesel y bioetanol. Informe de vigilancia tecnológica. CEIM. 125 p.

Garg K., Bharati L., Gaur A., George B., Acharya S., Jella K. y Narasimhan B. (2011) Spatial mapping of agricultural water productivity using the SWAT model in Upper Bhima Catchment, India. *Irrigation and Drainage* 61: 60-79

Gazzoni D. L. (2009). Biocombustibles y alimentos en América Latina y el Caribe. Serie Crisis Global y Seguridad Alimentaria. IICA. San José, Costa Rica. 118 p.

Hills F. J., Lewellen T. y Skoyen, I.O. (1990). Sweet sorghum cultivars for alcohol production. *California Agriculture*. 44: 14-16.

IDEA (Instituto para la Diversificación y ahorro de la Energía) (2007) Manuales de energía renovables. Energía de la biomasa. Madrid, España. 8 p

IICA (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura). (2007). Preguntas y respuestas más frecuentes sobre biocombustibles. San José, Costa Rica. 24 p.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (2011). Anuario Estadístico. Veracruz de Ignacio de la Llave. En: <http://www.inegi.org.mx/sistemas/productos/?e=30> Consultado el: 30 de noviembre de 2011.

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (2005) Conjunto de datos vectoriales. Serie III, Escala 1 : 250 000.

Jiménez C. A., Vargas T. V., Salinas C. E., Aguirre B. M. y Rodríguez C. D. (2004) Aptitud agroecológica para el cultivo de la caña de azúcar en el sur de Tamaulipas,

México. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM. Núm. 53: 58-74.

Mena H. U. (2007). Aplicación de los sistemas de información geográfica en la ingeniería civil. Instituto de Investigaciones Eléctricas Boletín IIE. pp 59-65

Montes G. N., Salinas G. J., González J. A., Loredó P. R., Díaz P. G. (2010) Guía Técnica de producción de sorgo dulce [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] en Tamaulipas. Folleto Técnico Núm. 49 INIFAP Centro de Investigación Regional del Noreste Campo Experimental Río Bravo. Tamaulipas, Mexico. 36 p.

Morales P. J. (1995). Cultivo de remolacha. Fundación de desarrollo agropecuario, Inc, Boletín Técnico No. 22. Santo Domingo, República Dominicana. 25 p.

Neitsch S. L., Arnold J. G., Kiniry J. R. y Williams J. R. (2011) Soil and Water Assessment Tool. Theoretical Documentation Version 2009. Texas Water Resources Institute Technical Report No. 406. 618 p.

Paiboonsak S., Chanket U., Yommaraka B. y Mongkolsawat C. (2004) Land suitability evaluation for sugarcane: GIS application. Proceedings of the Asian Conference on Remote Sensing. Chiang Mai, Thailand. 951-956.

Pérez-Portilla y Geissert-Kientz (2006) Zonificación agroecológica de sistemas agroforestales: el caso Café (*Coffea arabica* L.) - Palma Camedor (*Chamaedorea Elegans* Mart.) Interciencia. Caracas, Venezuela. Vol. 31(8): 556-562

Pistonesi H., Nadal G., Bravo V. y Boule D. (2008). Aporte de los biocombustibles a la sustentabilidad del desarrollo en América Latina y el Caribe: Elementos de formulación de políticas públicas. CEPAL. Santiago de Chile. 89 p.

Ramírez M. A. (2008). Cultivos para la producción sostenible de biocombustibles: Una alternativa para la generación de empleos e ingresos. Modulo V. Caña de azúcar. Servicio Holandés de Cooperación al Desarrollo SNV. Honduras. 16 p.

Riengelhaupt E., Cecotti L. y Coralli F. (2010). Bioenergía, Biocombustibles y Sostenibilidad de la Agricultura en México. Documento Técnico. Red Mexicana de Bioenergía A.C. Morelia, México. 26 p.

Rojas O. E. y Eldin M. (1983). Zonificación agroecológica para el cultivo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) en Costa Rica. IICA. LAICA. San José, Costa Rica. 112 p.

Román P. H., Ortega R. L., Hernández A. L., Díaz A. E., Espinoza G. A., Nuñez H. G., Vera A. R., Medina C. M. y Ruíz L. F. (2009). Producción de leche de bovino en el sistema de doble propósito. Libro Técnico Núm. 22. INIFAP. Centro de Investigación Regional Golfo Centro. Veracruz, México. 355 p.

Ruíz C. A. (2007). La seguridad energética de América Latina y el Caribe en el contexto mundial. CEPAL - Serie Recursos naturales e infraestructura N° 128. Santiago de Chile. 128 p.

Rutz D. y Janssen R. (2007). Biofuel Technology Handbook. WIP Renewable Energies, Germany. 149 p.

SAGARPA (2009) Programa de producción sustentable de insumos para bioenergéticos y de desarrollo científico y tecnológico. 2009-2012. 9 p.

SAGARPA (2011) Bioetanol En: <http://www.bioenergeticos.gob.mx/index.php/bioetanol.html> Última actualización: junio 2011. Consultado el 25 de noviembre de 2011.

Saxton K. E., Rawls W. J., Romberger J. S. y Papendick R. I. (1986). Estimating generalized soil-water characteristics from texture. *Soil Science Society of America Journal*. Vol. 50(4): 1031-1036

SENER / BID / GTZ (2006) Potencial y Viabilidad del Uso de Bioetanol y Biodiesel para el Transporte en México. México D.F. 600 p.

SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera) (2010) Monografías En: [http://www.siap.gob.mx/index.php?option=com\\_content&view=article&id=15&Itemid=19](http://www.siap.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=15&Itemid=19) Consultado el 16 de enero de 2012

Srinivasan R., Zhang X., Arnold J. (2010) SWAT Ungauged: Hydrological Budget and Crop Yield Predictions in the Upper Mississippi River Basin. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*. Vol. 53 (5): 1533-1546

Subirós R. F. (2000). El cultivo de la caña de azúcar. EUNED. Primera Edición. San José, Costa Rica pp 55-57

United States of America-Department of Energy (USA-DOE) (2010) Biomass Energy Data Book. Edition 3. United State of America-Department of Energy. Energy Efficiency and Renewable Energy. Oak Ridge National Laboratory. E.U.A. 230 p.

Winchell M., Srinivasan R. y Di Luzio M. y Arnold J. (2010). ArcSwat Interface for SWAT 2009. User's Guide. Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station, Grassland, Soil and Water Research Laboratory, USDA Agricultural Research Service. Temple, Texas, E.U.A. 484 p.

Zavala-García F., Piñera-Chávez F. y Gómez-González H. (2010) Especies vegetales con potencial para la producción de biocombustibles *In: De la lechuguilla a las*

biopelículas vegetales. Las plantas útiles de Nuevo León. Alvarado V. M. A., Rocha E. A. y Moreno L. S. Universidad de Autónoma de Nuevo León. México. 657 p.

12 ANEXOS

ANEXO 1. Clases de suelo

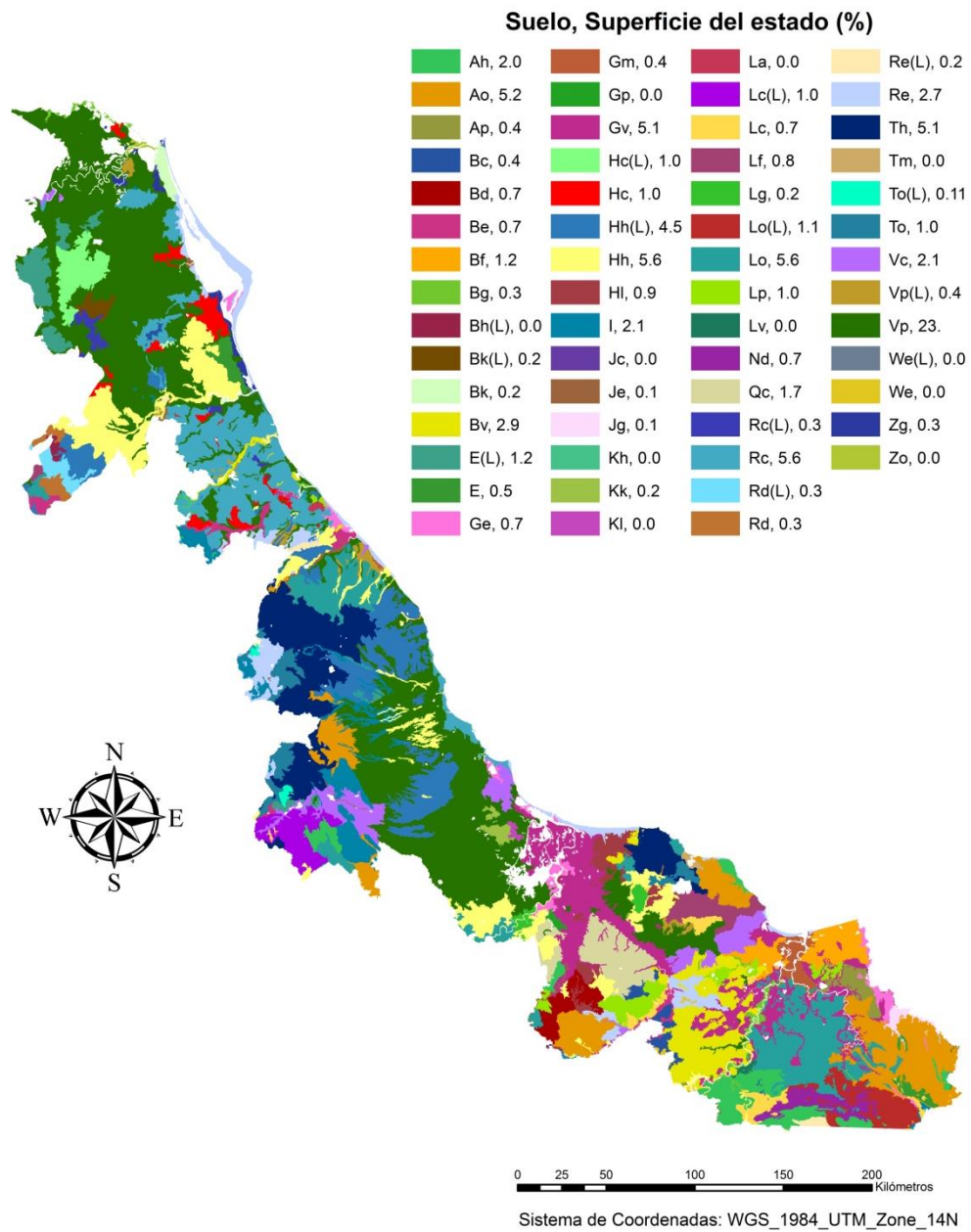


Figura 17. Clases de suelo y superficie ocupada en el estado de Veracruz

**ANEXO 2.** Parámetros fisiológicos de caña de azúcar, sorgo dulce y remolacha azucarera requeridos por el modelo SWAT.

**Cuadro 15. Parámetros fisiológicos de los cultivos requeridos por el modelo SWAT**

Parámetro fisiológico	Caña de azúcar	Sorgo dulce	Remolacha azucarera
Eficiencia en el uso de radiación ( $\text{Kg ha}^{-1}$ ) / ( $\text{MJ m}^{-2}$ ) <sup>-1</sup> *	35	35	30
Índice de cosecha para condiciones de crecimiento óptimo [( $\text{Kg ha}^{-1}$ ) / ( $\text{Kg ha}^{-1}$ ) <sup>-1</sup> ] *	0.7	0.75	0.75
Índice máximo de área foliar potencial ( $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$ ) *	8	6	5
Altura máxima del dosel (m) *	3	3	1.2
Profundidad máxima de las raíces (m) *	2	2	2
Fracción del crecimiento correspondiente al primer punto de la curva de desarrollo óptimo de área foliar (Fracción) *	0.15	0.15	0.05
Fracción del área foliar máxima correspondiente al primer punto de la curva de desarrollo óptimo de área foliar (Fracción) *	0.01	0.05	0.05
Fracción del crecimiento correspondientes al segundo punto de la curva de desarrollo óptimo de área foliar (Fracción)*	0.5	0.5	0.5
Fracción del área foliar máxima correspondiente al segundo punto de la curva de desarrollo óptimo de área foliar (Fracción)*	0.95	0.95	0.95
Fracción del crecimiento donde el área foliar comienza a declinar [(unidades calor)(unidades calor) <sup>-1</sup> ] *	0.75	0.64	0.6
Temperatura óptima para el crecimiento del cultivo (°C)	35 <sup>2</sup>	30 <sup>3</sup>	18 <sup>1,3</sup>
Temperatura base para el crecimiento del cultivo (°C)	18 <sup>2,3</sup>	12 <sup>3</sup>	4 <sup>3</sup>
Fracción de nitrógeno en la cosecha [ Kg N(Kg rendimiento) <sup>-1</sup> ] *	0	0.0199	0.013
Fracción de fósforo en la cosecha [Kg P(Kg rendimiento) <sup>-1</sup> ]*	0	0.0032	0.002
Fracción de nitrógeno en la emergencia [ Kg N(Kg rendimiento) <sup>-1</sup> ] *	0.01	0.044	0.055
Fracción de fósforo en la emergencia [Kg P(Kg rendimiento) <sup>-1</sup> ] *	0.0075	0.006	0.006
Fracción de nitrógeno a mitad del ciclo [ Kg N(Kg rendimiento) <sup>-1</sup> ] *	0.004	0.164	0.02
Fracción de fósforo a mitad del ciclo [Kg P(Kg rendimiento) <sup>-1</sup> ] *	0.003	0.0022	0.0025
Fracción de nitrógeno en la madurez [Kg N(Kg rendimiento) <sup>-1</sup> ] *	0.0025	0.128	0.012
Fracción de fósforo a la madurez [Kg P(Kg rendimiento) <sup>-1</sup> ]*	0.0019	0.0018	0.0019
Límite menor de índice de cosecha [ $\text{Kg ha}^{-1}(\text{Kg ha}^{-1})^{-1}$ ] *	0.5	0.25	1.1
Valor mínimo para el factor de erosión hídrica de la cobertura del suelo (Adimensional) *	0.001	0.2	0.2

Cuadro 14. Continúa

Parámetro fisiológico	Caña de azúcar	Sorgo dulce	Remolacha azucarera
Conductancia estomatal máxima ( $m s^{-1}$ ) *	0.005	0.005	0.007
Déficit de presión de vapor correspondiente al segundo punto de la curva de conductancia estomatal (KPa) *	4	4	4
Fracción de la máxima conductancia estomatal correspondiente al segundo punto de la curva de conductancia estomatal (Fracción) *	0.75	0.75	0.75
Tasa de disminución en la eficiencia de uso de la radiación por unidad incrementada en el déficit de presión de vapor (Porcentaje) *	10	8.5	10
Concentración elevada de CO <sub>2</sub> atmosférico correspondiente al segundo punto en la curva de eficiencia en el uso de la radiación (ppmv) *	660	660	660
Eficiencia en el uso de la radiación correspondiente al segundo punto en la curva de eficiencia en el uso de la radiación (Proporción) *	43	43	35
Coefficiente de descomposición de los residuos del cultivo (Fracción) *	0.05	0.5	0.05
Índice de área foliar mínimo para la planta durante el periodo de dormancia ( $m^2 m^{-2}$ ) *	0	0	0
Fracción de la biomasa de árbol acumulada por año que se transforma en residuos durante la dormancia (Fracción) *	0	0	0
Número de años requeridos para que la especie alcance su máxima madurez (Años) *	0	0	0
Máxima biomasa en árboles ( $t ha^{-1}$ ) *	0	0	0
Coefficiente de extinción de la luz (A dimensional) *	0.65	0.65	0.65
Fracción de mortandad de la biomasa (Fracción) *	0.1	0.1	0.1

\* .Base de datos SWAT; 1.Morales 1995; 2.Subirós, 2000; 3.SAGARPA, 2011



**ANEXO 3. Manejos agronómicos para caña de azúcar, sorgo dulce y remolacha azucarera.**

**Cuadro 16. Manejo agronómico de Caña de azúcar**

Actividades	Fecha de Aplicación	Mano de obra		Insumo	
		Tipo	Cantidad	Producto comercial	Tasa de aplicación (kg ha <sup>-1</sup> )
<b>PREPARACIÓN DEL TERRENO</b>					
Chapeo	10-abr	Servicio	1		
<b>PREPARACIÓN DEL SUELO</b>					
Subsuelo	20-abr	Servicio	1		
Barbecho	01-may	Servicio	1		
Barbecho cruzado	15-may	Servicio	1		
Rastreo	25-may	Servicio	1		
Rastreo cruzado	30-may	Servicio	1		
Surcado	31-may	Servicio	1		
<b>ESTABLECIMIENTO DEL CULTIVO</b>					
Siembra	01-jun	jornales	24	Caña de 0.60m de longitud y 4-5 brotes	12000
<b>FERTILIZACIÓN</b>				230-65-180	952
<i>1ra Fertilización</i>	30-jun	jornales	3	130-65-90	519
Nitrógeno fuente 1				18-46-00	
Nitrógeno fuente 2				Urea	228
Fósforo fuente 1				18-46-00	141
Potasio fuente 1				KCl	150
<i>2da Fertilización</i>	31-ago	jornales	3	130-00-90	433
Nitrógeno fuente 1				Urea	283
Potasio fuente 1				KCl	150
<b>CONTROL DE MALEZAS</b>					
Químico Preemergente	05-jun	jornales	2	Gesapax combi	4
Químico postemergente 1	31-jul	jornales	2	Gesapax H375	5
Cultivo	01-jul	servicio	1		
Aporque	01-sep	Servicio	1		
Químico postemergente 1	30-oct	jornales	2	Gesapax H375	5
<b>CONTROL DE PLAGAS</b>					
1er Ctrol plagas suelo	01-jun	jornales	2	Furadan 350-L	5
1er Ctrol plagas follaje	18-sep	jornales	2	Lucadrin	3
2do Ctrol plagas follaje	27-nov	jornales	2	Furadan 350-L	3

3er Ctrol plagas follaje	27-ene	jornales	2	Lucadrin	3
COSECHA					
Despunte	25-may	jornales	4		
Cosecha	30-may	jornales	40		

Cuadro 17. Manejo agronómico de Sorgo dulce

Actividades	Fecha de aplicación	Mano de obra		Insumo	
		Tipo	Cantidad	Producto Comercial	Tasa de aplicación (kg ha <sup>-1</sup> )
PREPARACIÓN DEL TERRENO					
Chapeo	14-may	Servicio	1		
PREPARACIÓN DEL SUELO					
Barbecho	24-may	Servicio	1		
Rastro	29-may	Servicio	1		
Rastro cruzado 1	30-may	Servicio	1		
Surcado	31-may	Servicio	1		
ESTABLECIMIENTO DEL CULTIVO					
Siembra	01-jun	Servicio	1	Semilla	6
FERTILIZACIÓN				138-46-00	
1ra Fertilización	01-jun	Servicio	1	69-46-00	
Nitrógeno fuente 1				Urea	150
Fósforo fuente 1				SPT	100
2da Fertilización	05-jul	jornales	3	69-00-00	
Nitrógeno fuente 1				Urea	150
CONTROL DE MALEZAS					
Químico Preemergente	04-jun	Jornales	2	Gesaprim 500FW	3
Cultivo 1	26-jun	Servicio	1		
Cultivo 2	06-jul	Servicio	1		
CONTROL DE PLAGAS					
1er Ctrol Plagas	25-jun	jornales	2	Malation 1000E	1
1er Ctrol plagas	30-jul	jornales	2	Malation 1000E	1
COSECHA					
Despunte	12-sep	jornales	4		
Cosecha	18-sep	jornales	40		

Cuadro 18. Manejo agronómico de Remolacha azucarera

Actividades	Fecha de Aplicación	Mano de obra		Insumo	
		Tipo	Cantidad	Producto comercial	Tasa de aplicación (kg ha <sup>-1</sup> )
<b>PREPARACIÓN DEL TERRENO</b>					
Chapeo	01-may	servicio	1		
<b>PREPARACIÓN DEL SUELO</b>					
Subsoleo	11-may	Servicio	1		
Control químico de malezas gramíneas	15-may	Jornales	2	Sanson	1
Arado	21-may	Servicio	1		
Rastra	28-may	Servicio	1		
Cruce de rastra	29-may	Servicio	1		
<b>ESTABLECIMIENTO DEL CULTIVO</b>					
Siembra	01-jun	Jornales	10	Semillas	120000 Planta ha <sup>-1</sup>
<b>FERTILIZACIÓN</b>					
1ra Fertilización	30-jun	jornales	4	180-100-250	
Nitrógeno fuente 1				90-100-250	
Fósforo fuente 1				Urea	111
Potasio fuente 1				18-46-00	217
2da Fertilización	30-jul	jornales	4	KLC	417
Nitrógeno fuente 1				90-00-00	
				Urea	197
<b>CONTROL DE MALEZAS</b>					
Químico Preemergente	02-jun	Jornales	2	Sanson	1
Químico postemergente 1	05-jun	jornales	2	Fusilade	1.5
1er Cultivo	25-jun	servicio	1		
Químico postemergente 2	15-jul	jornales	2	Fusilade	1.5
<b>CONTROL DE PLAGAS</b>					
Ctrol de plagas del suelo	20-may	jornales	1	Sevin 5%G	30
1er Ctrol plagas follaje	25-jun	Jornal	2	Sevin 80% PH	1
2do Ctrol plagas follaje	21-jul	Jornales	2	Arriva 200 CE	0.5
<b>CONTROL DE ENFERMEDADES</b>					
1er Ctrol Aplicación de fungicida	30-jun	jornales	2	Manzate	2
2do Ctrol Aplicación de fungicida	30-jul	Jornales	2	Manzate	2
3er Ctrol Aplicación de fungicida	29-ago	Jornales	2	Manzate	2
4to Ctrol Aplicación de fungicida	15-oct	Jornales	2	Manzate	
<b>PRE-COSECHA</b>					
Defoliación	28-nov	servicio	1		
Cosecha					
Desentierro mecánico con ganchos	29-nov	servicio	1		
Levante-acarreo	30-nov	jornales	40		

**ANEXO 4.** Rendimientos promedios de caña de azúcar observados y simulados con el modelo SWAT en las zonas de abastecimiento de los ingenios azucareros.

No	Ingenio	Rendimiento promedio*	
		Simulado	Observado
1	Central Progreso	63.1	56.5
2	Central Motzorongo	63.6	65.5
3	Constancia	60.8	59.7
4	Cuatotolapan	56.3	52.8
5	El Carmen	78.1	75.2
6	El Higo	63.4	76.0
7	El Modelo	97.5	93.0
8	El Potrero	74.5	70.8
9	Independencia	57.5	49.8
10	La Concepción	81.7	75.1
11	La Gloria	95.4	89.4
12	San Pedro	62.7	69.4
13	Tres Valles	56.7	59.7
14	Mahuixtlan	82.7	85.5
15	San Jose de Abajo	68.8	66.6
16	San Nicolás	67.0	66.3
17	La Providencia	68.2	65.1
18	San Miguelito	78.7	80.9
19	San Gabriel	55.5	54.8
20	San Francisco	56.1	65.0
21	San Cristobal	53.8	57.8
22	Zapoapita	63.2	74.8

\* Rendimiento promedio 2000-2010