



COLEGIO DE POSTGRADUADOS
INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS VERACRUZ

POSTGRADO EN AGROECOSISTEMAS TROPICALES

**ZONIFICACIÓN DEL POTENCIAL PRODUCTIVO DE BIOMASA PARA ETANOL DE
SEGUNDA GENERACIÓN EN AGROECOSISTEMAS CON PASTO *Pennisetum
purpureum* EN EL ESTADO DE VERACRUZ**

ROBERTO DE JESÚS LÓPEZ ESCUDERO

TESIS

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN CIENCIAS

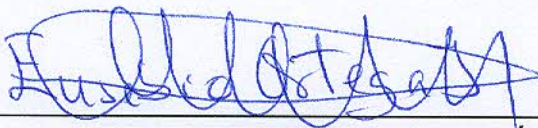
TEPETATES MUNICIPIO DE MANLIO FABIO ALTAMIRANO, VERACRUZ, MÉXICO

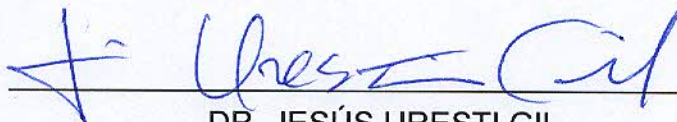
2014


La presente tesis, titulada: **Zonificación del potencial productivo de biomasa para etanol de segunda generación en agroecosistemas con pasto *Pennisetum purpureum* en el estado de Veracruz**, realizada por el alumno: **Roberto de Jesús López Escudero**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:


MAESTRO EN CIENCIAS
AGROECOSISTEMAS TROPICALES

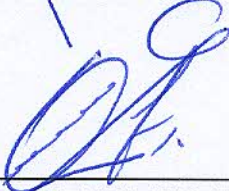
CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO: 
DR. EUSEBIO ORTEGA JIMÉNEZ

ASESOR: 
DR. JESÚS URESTI GIL

ASESOR: 
DR. ELISEO GARCÍA PÉREZ

ASESOR: 
DR. JUAN PABLO MARTÍNEZ DÁVILA

ASESOR: 
DR. ALFONSO HERNANDEZ GARAY

Tepetates, Veracruz, México, 02 de Enero del 2014

ZONIFICACIÓN DEL POTENCIAL PRODUCTIVO DE BIOMASA PARA ETANOL DE SEGUNDA GENERACIÓN EN AGROECOSISTEMAS CON PASTO *Pennisetum purpureum* EN EL ESTADO DE VERACRUZ.

Roberto de Jesús López Escudero, M.C.

Colegio de Postgraduados, 2013

El etanol lignocelulósico generado a partir de la biomasa seca de especies como *Pennisetum purpureum* puede ser la solución a problemáticas actuales como la crisis energética, la ineficiencia de los biocombustibles de primera generación, el desplazamiento de tierras destinadas al sustento humano y el cambio en el uso de los suelos. Sin embargo, con la finalidad de aumentar la eficiencia energética de esta especie, es necesario identificar áreas con condiciones agroecológicas óptimas que no compitan con la producción de alimentos. Por lo anterior el objetivo de este trabajo fue cartografiar y generar un índice de productividad de *Pennisetum purpureum* con base a las condiciones agroecológicas del estado de Veracruz. Se utilizó el modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT) para calcular el rendimiento de biomasa seca de *Pennisetum purpureum*. La superficie del estado se dividió en unidades de respuesta hidrológica (URH) generadas a partir de un modelo de elevación digital (DEM), un mapa de suelos y uso de suelos con escala 1:250000. Se utilizaron 95 estaciones climáticas y los parámetros del cultivo se obtuvieron de la literatura. El rendimiento simulado de biomasa de *Pennisetum purpureum* de las URH se dividió en 5 rangos variando de 0.066 a 44.05 t MS ha⁻¹. Se identificaron 5, 090, 000 has con rendimientos superiores a 28.261 t MS ha⁻¹ lo que concuerda con el nivel alto dentro del índice de productividad generado con base a los resultados arrojados por el modelo.

Palabras clave: Etanol, *Pennisetum purpureum*, modelos de simulación, SWAT, URH.

**POTENTIAL PRODUCTIVE ZONING OF BIOMASS TO SECOND GENERATION
ETHANOL IN AGROECOSYSTEMS WITH *Pennisetum purpureum* GRASSES IN
THE STATE OF VERACRUZ.**

Roberto de Jesús López Escudero, M.C.

Colegio de Postgraduados, 2013

Lignocelulosic Ethanol generated from dry biomass of species as *Pennisetum purpureum* it could be the solution to current problems like the energy crisis, the inefficiency of the first-generation biofuel, displacing land used for human sustenance and turnover of the use of soils. However, in order to increase energy efficiency of this species, it is necessary to identify areas with optimal ecological conditions that do not compete with food production. Therefore the aim of this study was to map and generate a productivity index of *Pennisetum purpureum* based on agro-ecological conditions of the state of Veracruz. Soil and Water Assessment Tool Model (SWAT) was used to estimate the dry biomass yield of *Pennisetum purpureum*. The surface of the state was divided into hydrologic response units (HRU) generated from a digital elevation model (DEM), a soil and land use map with 1:250000 scale. 95 weather stations were used and culture parameters were obtained from the literature. The biomass yield simulated from *Pennisetum purpureum* of all URH was divided into 5 ranks ranging from 0,066 to 44,050 t DM ha⁻¹. 5,090,000 ha were identified with yields exceeding 28.261 t DM ha⁻¹ which is consistent with the high level of productivity index generated on based to the results produced by the model.

Keywords: Ethanol, *Pennisetum purpureum*, simulation models, SWAT, URH.

AGRADECIMIENTOS

A **Dios** por ser el guía que ha dirigido e iluminado los pasos y decisiones que he tomado en la vida.

A mi padre, **Roberto López Zendejas** por haberme dado la vida, haberme entrenado para vivir con valentía, coraje y haberme enseñado a jamás claudicar ante nada.

A mi madre, **Rosario Escudero Chargoy** por haberme dado la vida y haberme criado y dirigido siempre por el camino correcto con honor y dignidad.

A mi nana, **Francisca de la Cruz Cortés** por haberme cuidado desde la infancia y ser mi segunda madre.

A mi hermana **Eyra Millot López Escudero** por haber estado a mi lado siempre y compartir bellos momentos familiares.

A mis sobrinos: **Jorge Emilio Ontiveros López y Jimena Ontiveros López** por haber llegado a este mundo y llenar de felicidad mi hogar y el de mi hermana.

A mis tíos **Martha Patricia Casarín Breton y Carlos López Zendejas** por haberme apoyado en todo momento con su hogar, sus bienes y su cariño.

A mi primo **Carlos Alán López Casarín** por ser mi gran compañero, confidente y un gran amigo con el cual he vivido y compartido muchos momentos de felicidad y esparcimiento.

A **Héctor Daniel Inurreta Aguirre** por ser como un hermano con el cual he vivido grandes momentos y grandes aventuras a lo largo de estos últimos años.

A **Jesús Uresti Gil** por ser un gran amigo el cual creyó en mí y el cual inculcó mi gusto y amor por la ciencia.

A **Eusebio Ortega Jiménez** y todos los maestros del CP por haberme instruido y haberme apoyado en el transcurso de mi formación y proceso de titulación.

Al **INIFAP** por haberme brindando las facilidades para llevar a cabo este trabajo.

Al proyecto **FOMIX** con clave: VER-2009-C03-128049 titulado —Identificación de especies e insumos vegetales, tecnologías de procesos industriales y diseño de planta para producir en Veracruz biocombustibles en forma tecnológica, económica y sustentablemente viables, por las facilidades de financiamiento otorgadas.

Dedicada a la MEMORIA de **Rosemire López Escudero, Irene Escudero Chargoy y Jesús Escudero Cuevas** por ser los ángeles que cuidan de mí desde el cielo. Siempre los recordaré con amor y por ustedes trataré de ser una persona de bien.

CONTENIDO

	Página
1. INTRODUCCIÓN	1
2. PROBLEMÁTICA	3
3. HIPÓTESIS	5
3.1. General	5
3.2. Específicas	5
4. OBJETIVOS	6
4.1. General	6
4.2. Específicos	6
5. ANTECEDENTES GENERALES	7
5.1. Factores que promueven la producción y la utilización de biocombustibles líquidos. 7	
5.2. Estadísticas de producción de Biocombustibles.....	12
5.3. El cultivo de <i>Pennisetum purpureum</i>	24
5.4. Sistemas de información geográfica	29
5.5. Modelos de simulación.....	32
6. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL DEL AGROECOSISTEMA	44
6.1. Proceso de desarrollo agrícola.....	44
6.2. El enfoque y concepto de agroecosistema.....	45
6.3. Modelos teóricos básicos sobre agroecosistemas y desarrollo agrícola	49
6.4. La planificación.....	53
6.5. Diagnósis	56

6.6. Estrategia	59
6.7. Evaluación.....	60
6.8. Sostenibilidad e intensificación agroecológica	61
6.9. Zonificación agroecológica como medio de planeación del desarrollo agrícola	62
7. MATERIALES Y MÉTODOS	67
7.1. Descripción del área de estudio	67
7.2. Generación de archivos requeridos para correr el modelo Arc SWAT.....	73
7.3. Mapas	75
7.4. Base de datos y catálogos	75
7.5. Catálogos de bases de datos introducidas al modelo	81
7.6. Generación de las subcuencas en el proceso de simulación.....	81
7.7. Análisis de resultados	84
8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	89
8.1. Análisis de relación entre factores edafoclimáticos y el rendimiento de <i>Pennisetum purpureum</i>	96
8.2. Índice de productividad generado con SWAT para <i>Pennisetum purpureum</i> con base a interacciones fisicoquímicas del suelo del estado de Veracruz	105
8.3. Índice de productividad generado con SWAT para <i>Pennisetum purpureum</i> con base a interacciones fisicoquímicas del suelo y el clima del estado de Veracruz..	111
9. CONCLUSIONES	119
10. RECOMENDACIONES	120
11. REFERENCIAS.....	121

LISTA DE CUADROS

		Página
Cuadro 1.	Géneros de pastos estudiados, rendimiento de materia seca y composición química.....	28
Cuadro 2.	Rendimiento simulado preliminar de etanol.....	29
Cuadro 3.	Condiciones climáticas y orográficas bajo las cuales se encuentran los tipos de suelos del estado de Veracruz.....	70
Cuadro 4.	Metodología y fuentes utilizadas para calcular los datos de suelo faltantes.....	76
Cuadro 5.	Características del perfil típico del suelo Feozem Haplico.....	76
Cuadro 6.	Parámetros fisiológicos de <i>Pennisetum purpureum</i> . Utilizados por SWAT para simular el rendimiento de biomasa seca.....	77
Cuadro 7.	Ejemplo de datos estadísticos de la estación meteorológica Ver30153.....	79
Cuadro 8.	Catálogos elaborados para relacionar la información introducida al modelo.....	81
Cuadro 9.	Manejo de <i>Pennisetum purpureum</i> . Introducido en el modelo SWAT para el proceso de simulación.....	82
Cuadro 10.	Clasificación de suelos por textura, profundidad y MO.....	85
Cuadro 11.	Clasificación de los factores físicos del suelo correspondiente a las URH's.....	87
Cuadro 12.	Datos estadísticos básicos de la clasificación de (URH) por profundidad de suelo.....	97
Cuadro 13.	Datos estadísticos básicos de la clasificación de (URH) por textura de suelo.....	98
Cuadro 14.	Datos estadísticos básicos de la clasificación de (URH) por	100

	contenido de materia orgánica.....	
Cuadro 15.	Datos estadísticos básicos de la clasificación de (URH) por temperatura.....	101
Cuadro 16.	Datos estadísticos básicos de la clasificación de (URH) por precipitación total anual.....	104
Cuadro 17.	Datos estadísticos básicos de la clasificación de (URH) por radiación total anual.....	104
Cuadro 18.	Rendimiento promedio de biomasa seca de <i>Pennisetum purpureum</i> en la relación profundidad- textura bajo las condiciones del estado de Veracruz.....	105
Cuadro 19.	Índice de productividad de <i>Pennisetum purpureum</i> y sus atributos conforme a la relación profundidad-textura.....	105
Cuadro 20.	Rendimiento de biomasa seca de <i>Pennisetum purpureum</i> correspondiente a la interacción profundidad-textura conjugado con el nivel de contenido de materia orgánica de los suelos del estado de Veracruz.....	106
Cuadro 21.	Índice de productividad de <i>Pennisetum purpureum</i> y sus atributos conforme a la relación profundidad-textura y contenido de materia orgánica.....	106
Cuadro 22.	Rendimiento de biomasa seca de <i>Pennisetum purpureum</i> correspondiente a la interacción profundidad-textura-materia orgánica conjugado con la rapidez del drenaje interno de los suelos del estado de Veracruz.....	107
Cuadro 23.	Índice de productividad de <i>Pennisetum purpureum</i> y sus atributos conforme a la relación profundidad-textura-contenido de materia orgánica y drenaje.....	107
Cuadro 24.	Rendimiento de biomasa seca de <i>Pennisetum purpureum</i> correspondiente a la interacción entre los factores profundidad-textura-materia orgánica-drenaje y pendientes, de los suelos del estado de Veracruz.....	108

Cuadro 25.	Índice de productividad de <i>Pennisetum purpureum</i> y sus atributos conforme a la interacción entre los factores profundidad-textura-contenido de materia orgánica-drenaje y pendiente.....	108
Cuadro 26.	Índice de productividad final de <i>Pennisetum purpureum</i> dentro de la superficie total del estado de Veracruz.....	109
Cuadro 27.	Rendimiento de biomasa seca de <i>Pennisetum purpureum</i> correspondiente a la relación entre las interacciones fisicoquímicas del suelo y la temperatura del estado de Veracruz.....	111
Cuadro 28.	Índice de productividad de <i>Pennisetum purpureum</i> y sus atributos conforme a la interacción de las propiedades fisicoquímicas del suelo y la temperatura.....	112
Cuadro 29.	Rendimiento de biomasa seca de <i>Pennisetum purpureum</i> correspondiente a la relación entre las interacciones fisicoquímicas del suelo, la temperatura y la cantidad promedio de precipitación del estado de Veracruz.....	114
Cuadro 30.	Índice de productividad de <i>Pennisetum purpureum</i> y sus atributos conforme a la interacción entre las propiedades fisicoquímicas del suelo, la temperatura y precipitación promedio.....	115
Cuadro 31.	Índice de productividad final de <i>Pennisetum purpureum</i> dentro de la superficie total del estado de Veracruz.....	116

LISTA DE FIGURAS

		Página
Figura 1.	Evolución de la producción mundial y por regiones de biocombustibles líquidos durante el período de 2005-2009.....	13
Figura 2.	Evolución de la producción anual de BCL en México.....	14
Figura 3.	Distribución por región de la producción total de biocombustibles líquidos (etanol + biodiesel) en el año 2009.....	14
Figura 4.	Distribución por región de la producción total de etanol (77.03 billones de litros año ⁻¹) en el año 2009.....	15
Figura 5.	Distribución por región de la producción total de biodiesel (17.89 billones de litros año ⁻¹) en el año 2009.....	16
Figura 6.	Categorías, procesos y relaciones generales con la producción.....	50
Figura 7.	Modelo de concepto agrario.....	51
Figura 8.	Modelo explícito de los componentes y procesos de agroecosistema.....	52
Figura 9.	Localización del estado de Veracruz.....	67
Figura 10.	Climas del estado de Veracruz.....	68
Figura 11.	Topografía y pendiente del terreno en el estado de Veracruz.....	71
Figura 12.	Suelos del estado de Veracruz. Mapa CONABIO.....	72
Figura 13.	Uso del suelo en el estado de Veracruz.....	74
Figura 14.	Ubicación de las 95 estaciones climáticas usadas por SWAT.....	80
Figura 15.	Distribución de las categorías de precipitación, radiación y temperatura.....	88
Figura 16.	Estado de Veracruz dividido en las 224 subcuencas generadas por SWAT.....	90

Figura 17.	Estado de Veracruz dividido en las 4053 URH generadas por SWAT.....	91
Figura 18.	Rendimiento de biomasa seca de <i>Pennisetum purpureum</i> simulado por SWAT en el estado de Veracruz, México.....	92
Figura 19.	Potencial productivo de <i>Pennisetum purpureum</i> en la región Sur-sureste de México.....	94
Figura 20.	Comparación entre la aptitud del potencial productivo (Díaz et al., 2011) y el rendimiento simulado de <i>Pennisetum purpureum</i> en el estado de Veracruz.....	95
Figura 21.	Relación entre la profundidad del suelo de las (URH) y su rendimiento.....	96
Figura 22.	Relación entre la textura del suelo de las (URH) y su rendimiento.....	98
Figura 23.	Relación entre el porcentaje de materia orgánica en la primera capa de suelo de las URH y su rendimiento.....	99
Figura 24.	Relación entre la temperatura considerada por las URH y su rendimiento.....	101
Figura 25.	Relación entre la precipitación total anual considerada por las URH y su rendimiento.....	102
Figura 26.	Relación entre la radiación total anual considerada por las URH y su rendimiento.....	104
Figura 27.	Distribución espacial del índice de productividad de <i>Pennisetum purpureum</i> con base a interacciones fisicoquímicas del suelo.....	110
Figura 28.	Distribución espacial del índice de productividad de <i>Pennisetum purpureum</i> con base a la interacción entre factores fisicoquímicos del suelo y temperatura.....	113
Figura 29.	Distribución espacial del índice de productividad de <i>Pennisetum purpureum</i> con base a la interacción entre los factores fisicoquímicos del suelo, temperatura y precipitación.....	117

Figura 30. A) Índice de productividad con base a factores fisicoquímicos del suelo; B) Índice de productividad con base a factores fisicoquímicos y temperatura; C) Índice de productividad con base a factores fisicoquímicos, temperatura y precipitación.....

118

1. INTRODUCCIÓN

La demanda actual de energía en el nivel global crece rápidamente. El reporte total de la energía comercial demandada en el 2004 se aproximó a los 467 EJ y cerca del 88 % de esta, correspondió a combustibles fósiles; se espera que la demanda energética se duplique o triplique durante el periodo 2000-2100 (IEA, 2006). El petróleo participa en numerosas actividades que sustentan la forma de vida de la sociedad moderna, ya sea como fuente de energía o como materia prima (Duch, 2005; Bullon, 2006; Mastrangelo, 2008). Sin embargo, al ser un hidrocarburo formado por restos fósiles durante millones de años, es un recurso finito y su agotamiento podría significar un serio problema para mantener el acelerado ritmo de vida en el mundo. Al mismo tiempo, las concentraciones de gases invernadero en la atmósfera crecen rápidamente, con derivados provenientes de la generación, transformación y consumo de combustibles fósiles, siendo el CO₂ el más importante de todos.

Por lo anterior, la utilización de fuentes alternativas de energía como los biocombustibles a partir de biomasa puede jugar un papel importante en esta situación. La energía producida de manera sustentable a través de la biomasa puede reducir drásticamente las emisiones de gases de efecto invernadero en comparación a los combustibles fósiles (IEA, 2007); Además, según la IEA (2010) los biocombustibles pueden atender de forma sustentable la demanda energética mundial.

Existen biocombustibles de primera y segunda generación, sin embargo en la actualidad los biocombustibles de primera generación han recibido fuertes críticas por su bajo nivel de sustentabilidad al momento de ser aprovechados por la sociedad,

debido al uso de suelos destinados a cultivos de sustento humano, su mal manejo y algunos problemas en el aprovechamiento de los residuos en su procesamiento (IEA, 2010).

Debido a esta circunstancia los biocombustibles de segunda generación son en la actualidad la mejor alternativa para buscar solución a dichas problemáticas y aprovechar recursos marginales para cultivar especies con elevados niveles de producción de biomasa (IEA, 2010). Los biocombustibles de segunda generación se producen a través de la fermentación y utilización de la celulosa, hemicelulosa y azúcares. Los pastos tropicales, son plantas con metabolismo C₄ con alta capacidad de generar biomasa por medio de celulosa, hemicelulosa, ligninas y azúcares a partir de procesos fotosintéticos (Da silva, 2004; FAO, 2008a). Las regiones costeras que limitan con el Golfo de México incluyendo el estado de Veracruz, presentan condiciones ambientales favorables para producir ciertas especie de pastos (Radulovich, 2000; Da silva y Carvalho, 2005). Dentro de estas especies el género *Pennisetum* de acuerdo con Uresti *et al.*, (2009) es apto para producir etanol de segunda generación por su alto potencial para producir biomasa.

Con base en lo anterior, el objetivo del presente trabajo fue cartografiar y generar un índice de productividad para el estado de Veracruz con base en el potencial productivo para generar biomasa seca de *Pennisetum purpureum* mediante el uso de sistemas de información geográfica y modelos de simulación agrícolas, con el fin de ayudar a los tomadores de decisiones en la planificación del desarrollo rural y el establecimiento de refinerías de etanol.

2. PROBLEMÁTICA

Debido a la preocupación mundial por la crisis energética, la eficiencia energética de fuentes alternas, así como el uso eficiente de los recursos naturales y el desarrollo rural; se han implementado programas para generar tecnologías que coadyuven a resolver estos tópicos de una manera sostenible. Dentro de las nuevas tecnologías y los programas generados se ha promovido la generación e implementación de biocombustibles líquidos de primera generación, sin embargo este tipo de combustibles han generado preocupación en la comunidad científica debido a que los cultivos bioenergéticos necesarios como fuente primaria para su obtención compiten y muchas veces desplazan cultivos de interés básico para la alimentación humana, poniendo en riesgo con esto la seguridad alimentaria.

Una alternativa para evitar la problemática descrita en el párrafo anterior es la generación de biocombustibles de segunda generación a partir de la obtención de etanol en función de la producción de materia prima con altos contenidos de ligninas. Dentro de las especies más reconocidas por sus cualidades para ser implementadas como materia prima para la obtención de ligninas se encuentra la especie forrajera *Pennisetum purpureum*.

En la actualidad existe interés en producir *Pennisetum purpureum* como materia prima para generar biocombustibles en el estado de Veracruz, sin embargo se desconoce el potencial de la especie con relación a su adaptación y rendimiento en función de la interacción con los factores edafoclimáticos del estado. El conocimiento e identificación de áreas que presenten las mejores características y los mejores rendimientos sin representar una amenaza para la seguridad alimentaria dentro del uso de suelos del

estado de Veracruz, ayudaría a tomar las mejores decisiones y generar programas y proyectos sostenibles con relación a la implementación del cultivo en la entidad.

Con base en lo anterior, el presente trabajo planteó la siguiente pregunta de investigación: ¿Cuál es el potencial e índice de productividad de *Pennisetum purpureum* en función de las distintas condiciones edafoclimáticas que inciden sobre la fisiología del cultivo, en el estado de Veracruz?

3. HIPÓTESIS

3.1. General

La distribución geográfica y potencial productivo de biomasa y etanol de agroecosistemas con pasto *Pennisetum purpureum* es función de las interacciones entre los parámetros fisiológicos, manejo de cultivo y condiciones edafoclimáticas del estado de Veracruz.

3.2. Específicas

Los rangos de producción simulados de biomasa y etanol de *Pennisetum purpureum* se distribuyen en diferentes áreas dentro del estado de Veracruz.

La distribución geográfica de los diferentes rangos de potencial productivo de biomasa y etanol de *Pennisetum purpureum* se relaciona con la localización de las diferentes condiciones edafoclimáticas en el estado de Veracruz.

El índice de productividad de *Pennisetum purpureum* es función de las condiciones climáticas y edafológicas del estado de Veracruz.

4. OBJETIVOS

4.1. General

Zonificar el potencial productivo de biomasa y etanol de agroecosistemas con pasto *Pennisetum purpureum* en función a la relación entre parámetros fisiológicos, manejo del cultivo y condiciones edafoclimáticas en el estado de Veracruz.

4.2. Específicos

Simular y mapear el potencial productivo de biomasa y etanol de *Pennisetum purpureum* en el estado de Veracruz.

Analizar las variables edafoclimáticas del estado de Veracruz con relación al potencial para producir biomasa y etanol de *Pennisetum purpureum*.

Generar un índice de productividad de *Pennisetum purpureum* con base a la relación existente entre las condiciones climáticas y edafológicas del estado de Veracruz.

5. ANTECEDENTES GENERALES

5.1. Factores que promueven la producción y la utilización de biocombustibles líquidos

De acuerdo al IICA (2007); FAO (2008a) y SAGARPA (2008) al principio de las década de los 70's con la primera crisis energética y después del año 2002 cuando ésta y los subsecuentes problemas de calentamiento global y altas concentraciones de gases de efecto invernadero que ésta trae se agudizaron; a nivel global y en México se comenzó a promover, producir e implementar los biocombustibles como posible solución a dichos problemas.

5.1.1. Crisis energética

En la actualidad nadie puede negar la importancia del petróleo en diversos sectores, desde la generación de energía para los hogares a través de su combustión, su uso en industrias de diversa índole, el uso de este de forma casi exclusiva por los medios de transporte, la fabricación de plásticos y diversos derivados o la producción de fertilizantes con las implicaciones agrícolas y alimentarias subsecuentes, por lo que no es aventurado decir que el petróleo es vital para mantener el estilo de vida que lleva la sociedad (Duch, 2005; Bullón, 2006; Mastrangelo, 2008).

Según un estudio publicado por la PFC energy de Washington, EUA, en los últimos 20 años las principales firmas petroleras han estado extrayendo cuatro veces más petróleo del que se descubre (Bullon, 2006).

De acuerdo a la curva de Hubbert (1956) desarrollada por el geólogo M. King Hubbert la cual consta de una serie de ecuaciones que muestran cómo se comporta cualquier pozo o reserva de crudo: La producción aumenta rápidamente después de la perforación inicial y luego pierde fuerza conforme la extracción, alcanza su clímax o pico, el cual se alcanza casi siempre cuando se ha extraído la mitad del monto total de petróleo de dicha fuente, posteriormente la producción cae de una manera pronunciada, pudiendo ser mas estrepitosa si el pico se mantiene y se transforma en una meseta. En la actualidad existen diversas opiniones por parte de los expertos acerca de donde se encuentra ese pico o clímax, algunos de ellos como La IEA (2008) reportan reservas de combustibles fósiles solamente para los próximos 60 años, mientras que otros más optimistas lo sitúan a mediados del presente siglo. Sin embargo, si cualquiera de estas predicciones resulta ser correcta, las existencias globales de crudo nunca podrán subir lo suficiente como para satisfacer los elevados niveles de consumo proyectados para el 2025 y más allá.

Ante este escenario la FAO (2008a) indica que en el planeta se dispone de aproximadamente 500 millones de hectáreas para producir biocombustibles (BCL) sin entrar en competencia con la producción de alimentos y que una parte significativa de esta superficie se localiza en América Latina. Lo anterior significa una aportación aproximada de 24 % (12 % de BCL de primera generación y 12 % de BCL de segunda generación) a la matriz energética mundial. Doornbosch y Steenblik (2007) indican que en 2050 los biocombustibles podrían participar con el 23 % de las necesidades de combustible líquido. Con base en lo anterior se puede decir que los BCL pueden

contribuir hasta con una cuarta parte de las necesidades actuales de combustibles, por lo que es necesario desarrollar paralelamente otras fuentes de energía renovable.

5.1.2. Seguridad alimentaria

De acuerdo con FAO (2008a) y Brathwaite (2009) las condiciones que crean seguridad alimentaria son: La disponibilidad física de alimentos en cantidades y calidad suficientes a través de la producción nacional o de las importaciones (incluida la ayuda alimentaria); el acceso de todas las personas a los alimentos por medio de la disponibilidad de recursos económicos y de otra índole para adquirir alimentos nutritivos, inocuos y en la cantidad apropiada; el logro de un nivel de bienestar nutricional en el que se satisfagan todas las necesidades fisiológicas, gracias a una alimentación adecuada, disponibilidad y acceso a agua potable, sanidad y atención médica (importancia de los insumos no alimentarios) y la estabilidad del acceso a alimentos adecuados en todo momento, sin riesgo de quedarse sin alimentos como consecuencia de crisis políticas, económicas o climáticas repentinas ni de acontecimientos cíclicos (inseguridad alimentaria estacional). En la literatura se encuentra mucha información acerca de los conflictos que la producción de biocombustibles puede generar con la seguridad alimentaria, pero desafortunadamente este asunto se viene analizando de forma unilateral. Desde el punto de vista de la competencia por la tierra, cualquier actividad agrícola que no tenga como objetivo directo la generación de alimento atentaría contra la seguridad alimentaria (Ascher *et al.*, 2009).

Doornbosch y Steenblik (2007) y FAO (2008b) indican que el incremento en la producción de biocombustibles y su rápido crecimiento en el mercado impactan negativamente en la seguridad alimentaria y ha generado un incremento de los precios de los alimentos. Generalmente este incremento de precios beneficia a los productores agropecuarios, pero perjudica a los consumidores, principalmente a las fracciones más pobres de las poblaciones, además de no haber cambio en las políticas actuales en la relación que juega la producción de alimentos-producción de BCL, se pondrá en alto riesgo la seguridad alimentaria mundial.

La FAO ha visualizado que el debate actual sobre biocombustibles y alimentos se circunscribe principalmente a los biocombustibles líquidos de primera generación derivados de cereales, principalmente el maíz, los cuales compiten de forma directa con la alimentación humana y son destinados sobre todo al sector del transporte (FAO, 2008c). De acuerdo con Ganduglia y el Equipo de Proyectos de Biocombustibles (2009), los aspectos que podrían afectar la disponibilidad y acceso a los alimentos estarán en función de las materias primas utilizadas y las generaciones de tecnología para la obtención de biocombustibles.

5.1.3. Cambio climático y calentamiento global

Evidencia científica sugiere que durante el siglo pasado los humanos han tenido una fuerte influencia en el calentamiento global de la tierra (IPCC, 1996; IPCC, 1998). Desde el principio de la era industrial, las concentraciones de CO₂ en la atmósfera se han incrementado de 280 a 350 partes por millón (Bazzaz y Fajer, 1992). El incremento de CO₂ en la atmosfera ha sido más rápido en años recientes. Se ha proyectado a

partir de los datos históricos y modelos de simulación que el nivel de CO₂ en la atmósfera llegarán a 600 ppm en la segunda mitad de este siglo (Strain, 1987).

De acuerdo con la IPCC (2007b) el calentamiento global de la tierra por causas antropogénicas es un hecho. Esto debido al incremento en la emisión de gases de efecto invernadero “GEI” (bióxido de carbono CO₂; metano CH₄ y óxido nitroso N₂O) generados en gran parte por los incrementos de la población, la quema de combustibles fósiles, la deforestación y el cambio del uso de suelo para la producción de alimentos, productos forestales y la urbanización (Houghton *et al.*, 1990; Solomon *et al.*, 2007).

El incremento de (GEI) en la atmósfera provoca un desequilibrio en cuanto a todo el contexto que conforma el agroecosistema, esto por medio del incremento global de la temperatura de la tierra y sus consecuentes implicaciones en los procesos biológicos (Jodha, 1989). El incremento de CO₂ y otros gases como el Metano, Oxido nitroso, Clorofluorocarbonos (CFCs) pueden causar un incremento en la temperatura global cerca de los 4.2°C y generar con ello un cambio drástico en los patrones y cantidades de precipitación en algunas regiones (Kimball *et al.*, 1993).

Por su parte Meehl *et al.* (2007) reporta que para los períodos 2011-2030, 2046-2065 y 2080-2099 la temperatura global promedio se incrementará en 1-2 °C, 3-4 °C y 4-7 °C, respectivamente. El calentamiento global impactará negativamente, entre otros sectores, a la productividad de los sectores agropecuario y forestal, poniendo en riesgo la seguridad alimentaria (Parry *et al.*, 2007; Easterling *et al.*, 2007).

Actualmente uno de los impulsores de carácter ambiental que apoyan la implementación de biocombustibles se vincula fundamentalmente con la necesidad de disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), con los consecuentes impactos favorables, tanto en el plano global como en el medio ambiente local, especialmente en las grandes ciudades. Así por ejemplo la sustitución de los combustibles fósiles por biocombustibles en el transporte va en línea con los compromisos asumidos en el marco del protocolo de Kioto, en la medida en que contribuyan con la reducción de las emisiones GEI.

Según FAO (2008c) recientemente algunas políticas han asumido que el remplazar los combustibles fósiles con los generados por medio de la biomasa tendrá un significativo y positivo efecto en el proceso de cambio climático con base a la reducción en la generación de GEI que generan el calentamiento global. De acuerdo con la FAO (2008c) los cultivos bioenergéticos pueden reducir o compensar las emisiones de gases de efecto invernadero eliminando directamente el dióxido de carbono del aire, incorporándolo en la biomasa del cultivo o en el suelo. Además de la obtención de biocombustible, muchos de estos cultivos pueden generar co-productos como la proteína utilizada para la alimentación animal, ahorrando de esta manera energía que sería necesaria para producirla por otros medios.

5.2. Estadísticas de producción de Biocombustibles

Según la FAO (2008a) actualmente la matriz energética mundial corresponde a 11,400 megatoneladas equivalentes de petróleo; de las cuales el 81 % se deriva de energía fósil y el 19 % de energías renovables. Del 19 % de la energía renovable existente, el 10 % proviene de biocombustibles (8.1 % biocombustibles sólido

s; 1.9 % correspondiente a biocombustibles líquidos: etanol y biodiesel); Del 1.9% de biocombustibles líquidos, el 1 % se utiliza en el sector transporte y 0.9 % restante en otros sectores. De acuerdo a la FAO se espera un incremento en la utilización de biocombustibles líquidos en el sector de transporte en un 4 %.

Con base lo mencionado por la SA-DOE (2010) en el último periodo (2005-2009) la producción mundial de biocombustibles ha sufrido un incremento del 147 % de los cuales 127 % corresponden a etanol y 229 % a biodiesel, con una tasa de incremento anual de 11.3 millardos de litros (8.62 millardos de litros para etanol y 2.68 millardos para biodiesel) (Figura 1). Dentro de este periodo (2005-2009), México solo presentó un aumento significativo en su producción del año 2007 al 2009 con una tasa anual de 1.99 millones de litros (0.06 millones de litros de etanol y 1.93 millones de litros de biodiesel) (Figura 2).

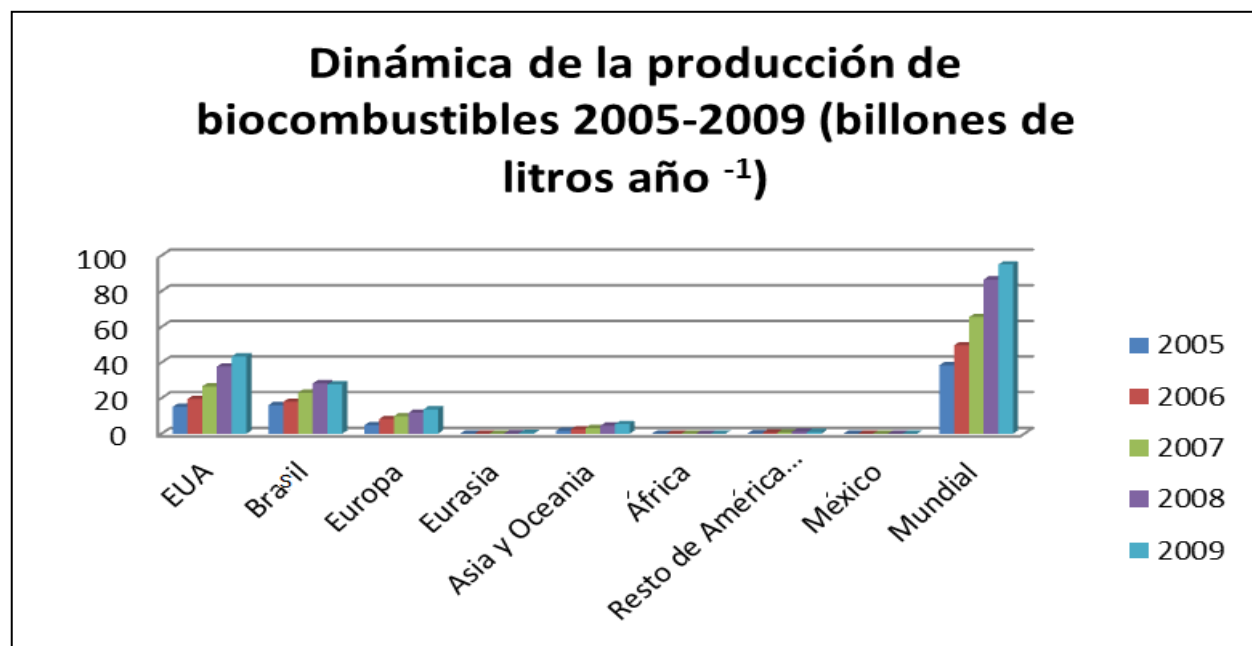


Figura 1. Evolución de la producción mundial y por regiones de biocombustibles líquidos durante el periodo de 2005-2009.

Fuente: (USA-DOE, 2010).

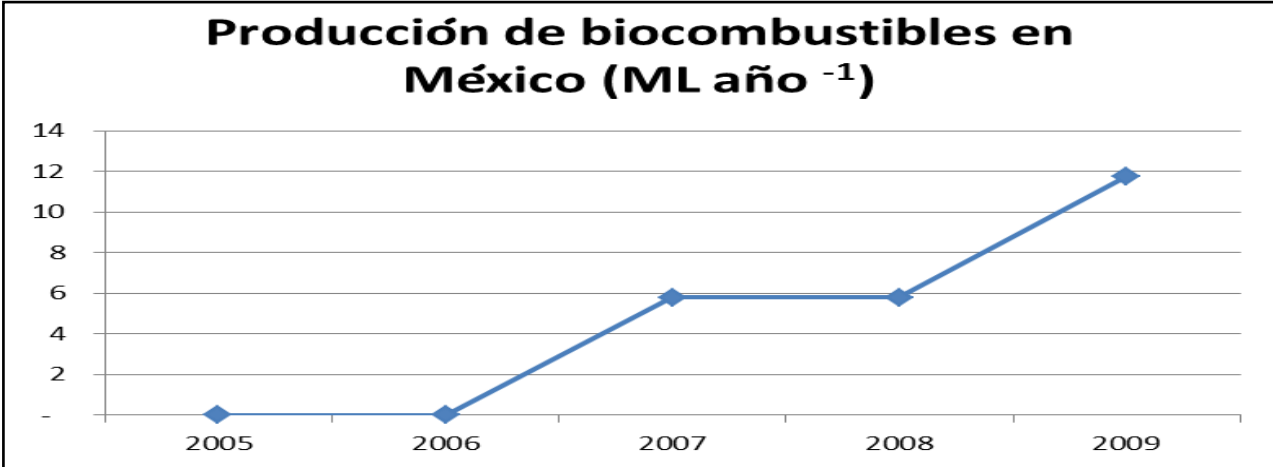


Figura 2. Evolución de la producción anual de BCL en México.
Fuente:(USA-DOE, 2010).

En el 2009 de acuerdo con USA-DOE (2010) se produjeron a nivel mundial, alrededor de 93 billardos de litros de biocombustible de los cuales 77.03 billardos corresponden a etanol y 17.89 billardos a biodiesel. En la Figura 3, se muestra la distribución de la producción mundial de biocombustibles en el 2009, donde EUA, Brasil, la Unión Europea, Asia y Oceanía fueron los principales productores y en el resto del mundo, incluyendo México la producción fue insignificante.



Figura 3. Distribución por región de la producción total de biocombustibles líquidos (etanol + biodiesel) en el año 2009. Fuente: (USA-DOE, 2010).

En la Figura 4 y Figura 5 se muestra la distribución de la producción mundial de etanol (77.03 millardos de litros) y biodiesel (17.89 millardos de litros). Como se observa en la Figura 4 y 5 los países que tuvieron una mayor producción de etanol fueron: EUA (42.36 millardos de litros), Brasil (26.96 millardos de litros), Europa (3.85 millardos de litros), Asia y Oceanía (3.08 millardos de litros), mientras que a nivel mundial los países que destacaron en la producción de biodiesel fueron: Europa (11.09 millardos de litros), Brasil (1.78 millardos de litros), EUA (2.14 millardos de litros), Asia y Europa (2.50 millardos de litros). En ambos casos, tanto en la producción de etanol como en la de biodiesel, el resto del mundo aportó cantidades insignificantes.

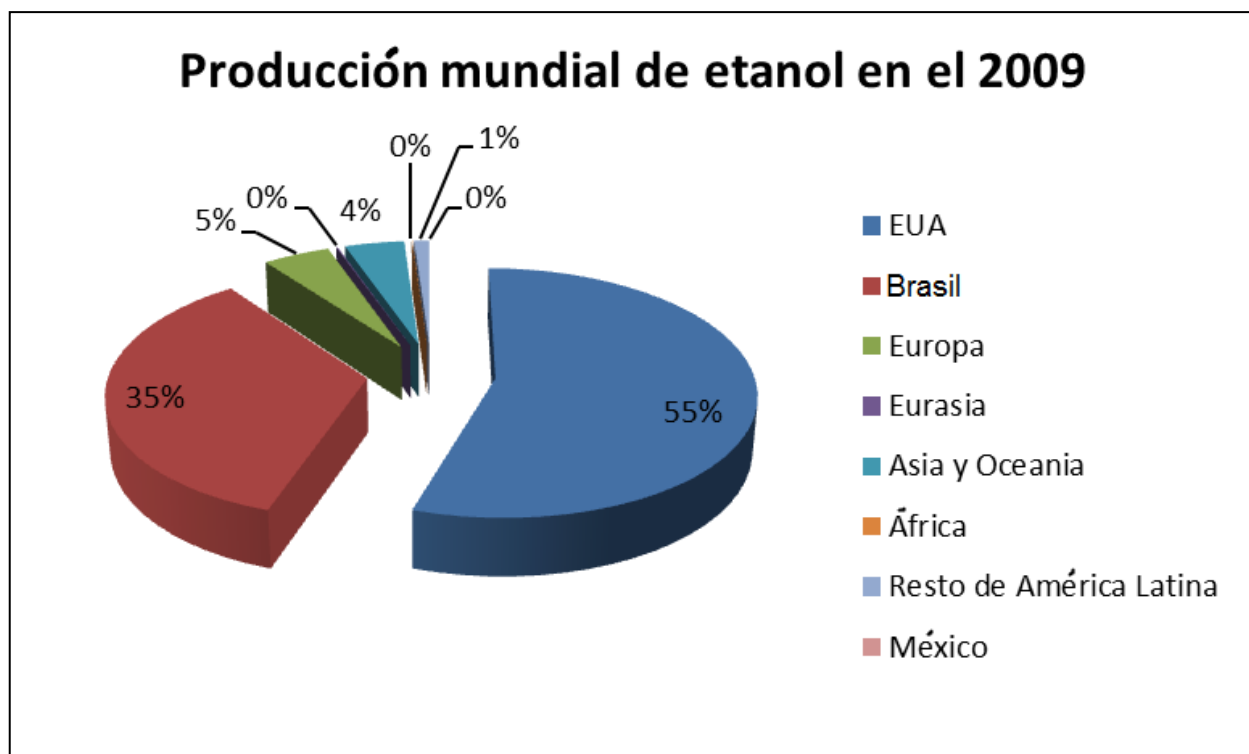


Figura 4. Distribución por región de la producción total de etanol (77.03 billones de litros año⁻¹) en el año 2009. Fuente: (USA-DOE, 2010).

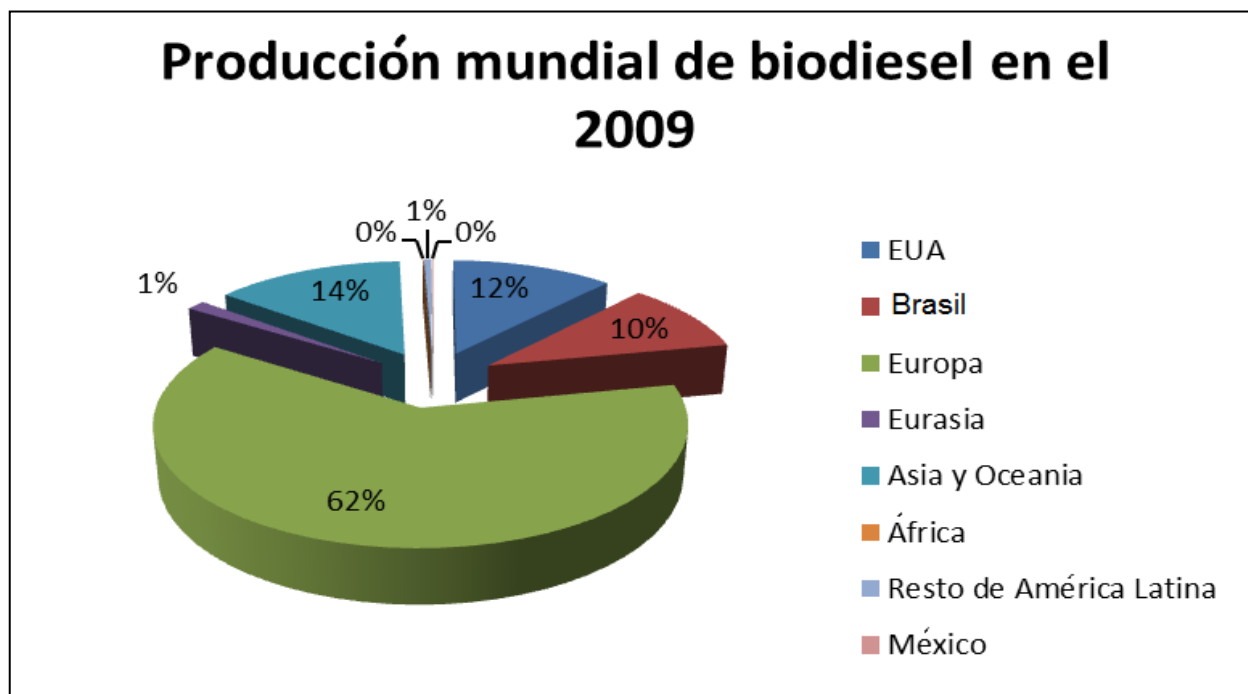


Figura 5. Distribución por región de la producción total de biodiesel (17.89 billones de litros año⁻¹) en el año 2009. Fuente: (USA-DOE, 2010).

5.2.1. Tipos de biocombustibles líquidos

Biomasa se define como cualquier materia orgánica que está disponible sobre una base renovable o recurrente. Esta incluye todas las plantas y materiales derivados de plantas, incluyendo cultivos agrícolas, árboles, madera, residuos de madera, hierbas, plantas acuáticas, estiércol, residuos municipales y otros materiales orgánicos. Las plantas (en tierra o en agua) usan la energía de la luz solar para convertir agua y dióxido de carbono a carbohidratos, grasas, proteínas, junto con pequeñas cantidades de minerales. El componente de carbohidratos incluye la celulosa y hemi-celulosa, las fibras que dan estructura a la planta y la lignina que une las fibras entre sí. Algunas plantas almacenan almidones y grasas (aceites) en las semillas o las raíces y los

azúcares simples se encuentran en los tejidos de las plantas (FAO, 2004; FAO, 2008a; USA-DOE, 2010).

Los biocombustibles son cualquier tipo que se produce a partir de biomasa, por lo que se puede considerar un recurso renovable (García y García, 2006; Aper, 2010). Existen biocombustibles de primera y segunda generación, clasificados de acuerdo con el tipo de recurso utilizado. Ellos pueden ser sólidos, líquidos o gaseosos (FAO, 2008a). Los biocombustibles de primera generación son producidos de partes de cultivos agrícolas con alta densidad de energía o aceites como semillas o frutas; almidones o azúcares como materia prima. Los representativos típicos de biocombustibles de primera generación son: el biodiesel, bio- etanol, aceites vegetales y el biogás. Los biocombustibles de segunda generación se elaboran a partir de la lignocelulosa contenida en la biomasa vegetal (IEA, 2010).

Según (FAO, 2008a; IICA, 2010) el biodiesel se produce por la combinación de aceites vegetales o grasas animales con alcohol y un catalizador a través de un proceso químico conocido como transesterificación química como la describe Rojas *et al.* (2009) e Ibarra (2011). La producción de aceite de biodiesel puede ser a partir de casi cualquier cultivo que contenga semillas con aceite; a nivel global el recurso más popular es la semilla de colza en Europa y soya en Brasil y los Estados Unidos de América. En las zonas tropicales y subtropicales, el biodiesel se obtiene de la palma de aceite, coco, aceites de la semilla de *Jatropha* (FAO, 2008a; IICA, 2010).

Según el IICA (2010) en la actualidad, la producción mundial de biodiésel se concentra en pocos países. Por ejemplo, del total durante el 2006, alrededor del 75 % se produjo

en Europa, donde Alemania contribuyó con el 55 %, y la mayor parte del 25 % restante fue producido por Estados Unidos de América. Estas cifras son muy dinámicas entre los países de América que reportan la producción de biodiésel a cierta escala comercial (como Canadá, Brasil y Argentina), mientras que la mayoría de los demás países informan una producción incipiente o en una escala de prueba.

Cualquier materia prima que contenga cantidades significativas de azúcar, o componentes que se pueden convertir en el azúcar como el almidón, o la celulosa, pueden ser utilizados para producir etanol (FAO, 2008a). El etanol se produce principalmente a partir de fuentes de materia prima que se encuentran fácilmente en cultivos del sector agrícola (IICA, 2007) Brasil y la Unión Europea son los principales productores de etanol a partir de los azúcares fermentables (sacarosa, glucosa y fructuosa) contenidos en cultivos como la caña de azúcar, remolacha azucarera y sorgo dulce, de acuerdo al IICA (2007).

Los azúcares (glucosa) contenidos en el almidón de una amplia gama de cultivos cereales como maíz, sorgo, trigo arroz, tubérculos como la yuca y otros como el sorgo dulce principalmente; son también fuentes primarias de los cuales se puede obtener etanol. Estados Unidos de Norteamérica (USA) es el principal productor de etanol a partir del almidón del maíz (Tollefson, 2008). La tecnología para producir etanol a partir de los azúcares (glucosa, galactosa, manosa, xilosa y arabinosa) contenidos en la celulosa y hemicelulosa de la biomasa vegetal aún no está comercialmente desarrollada; USA, Canadá y la Unión Europea son los países más avanzados en la producción de este tipo de etanol y cuentan con varias plantas piloto. Sánchez y

Cardona (2005) presentan una descripción detallada de los procesos para producir cada uno de los tres tipos de etanol descritos.

5.2.2. Biocombustibles de segunda generación

En general, existe un consenso general acerca de la necesidad de reducir las emisiones a la atmósfera en el ramo del transporte. Las tecnologías de biocombustibles deben ser más eficientes en términos de su ciclo de vida, reducción de gases de efecto invernadero, además de ser social y ambientalmente sostenibles. Se reconoce cada vez más que los biocombustibles de primera generación, con la excepción del etanol de caña de azúcar, probablemente tendrá un papel limitado en la mezcla de combustible para el transporte en el futuro. El incremento de las críticas a algunos de los biocombustibles de primera generación ha llamado la atención en el potencial de los biocombustibles de segunda generación (IEA, 2010).

Los biocombustibles de segunda generación pueden ser obtenidos a partir de procesos químicos que involucran la degradación y conversión de celulosa, hemicelulosa y ligninas de especies de plantas y sus tipos de células; el peso seco típico de la pared celular de las plantas consiste cerca del 35 al 50 % de celulosa, 20 a 35 % de hemicelulosa y 10 a 25 % de ligninas (Saha, 2004).

Dependiendo de la materia prima y las técnicas de cultivo utilizadas, la producción de biocombustibles de segunda generación tiene el potencial para proveer beneficios como el consumo de residuos de cosecha y el uso de suelos abandonados. De esta manera, este tipo de biocombustibles pueden ofertar un potencial considerable para promover el desarrollo rural y mejorar las condiciones económicas de regiones en vías de desarrollo o ya desarrolladas (IEA, 2010).

5.2.3. Etanol lignocelulósico o de segunda generación

El etanol lignocelulósico se obtiene a partir del material contenido en la lignina, celulosa y hemicelulosa. Los tipos representativos de biocombustibles de segunda generación son el etanol a partir de lignocelulosa, biomasa a líquido (BtL) y gas biosintético natural (IEA, 2010).

La celulosa es el biomaterial más abundante sobre la tierra, esta se encuentra en una gran variedad de recursos de biomasa, incluyendo pastos de crecimiento rápido o árboles, cultivos o residuos de especies forestales e incluso en el papel de basura (USA-DOE, 2006; Ragauskas *et al.*, 2006; OECD, 2007). Cada molécula de celulosa es un polímero lineal de residuos de glucosa unida por enlaces glucosídicos β -1,4 que se estructuran en largas cadenas lineales (microfibrillas) unidas por puentes de hidrógeno y fuerzas de van der Waals intramoleculares, formando una estructura cristalina resistente a la hidrólisis y regiones amorfas susceptibles a la degradación enzimática (Béguin y Aubert, 1994; Ovando y Waliszewski, 2005; USA-DOE, 2006). La celulosa existe junto con una matriz de otros polímeros, principalmente hemicelulosa y ligninas. La hemicelulosa es un polímero complejo de heteropolisacáridos formado por pentosas (D-xilosa y L-arabinosa) y hexosas (D-glucosa, D-manosa y D-galactosa) que forman cadenas ramificadas y los ácidos 4- O-metilglucurónico, D-galacturónico y D-glucurónico, los azúcares están unidos por enlaces β -1,4 y ocasionalmente por enlaces β -1,3 (Pérez *et al.*, 2002). La lignina es un heteropolímero amorfo, tridimensional y ramificado formado por alcoholes aromáticos que da soporte estructural, rigidez, impermeabilidad y protección a los polisacáridos estructurales (celulosa y hemicelulosa) y es altamente resistente a la degradación química y biológica, por lo

cual, estas tres fuentes son un reto para ser utilizadas en la producción de biocombustibles de segunda generación (Aro *et al.*, 2005; OECD, 2007).

5.2.4. Contexto del etanol lignocelulósico

El material lignocelulósico es atractivo por su bajo costo y alta disponibilidad en diversos climas y localidades, sin embargo, el principal impedimento para su utilización es la falta de una tecnología de bajo costo para degradar la fracción recalcitrante de la biomasa. Aunque existen métodos fisicoquímicos que permiten utilizar la biomasa en la producción de biocombustibles, una alternativa prometedora son los métodos biológicos que utilizan organismos celulolíticos para obtener azúcares fermentables (Lynd *et al.*, 2002).

Una importante ventaja de las plantas con alta concentración de celulosa es que pueden crecer en zonas de producción marginal o suelos no dispuestos para la producción de cultivos alimenticios y sus residuos no aptos para la alimentación humana pueden ser utilizados. Por estas características la elaboración de etanol lignocelulósico puede llevarse a cabo a gran escala, sin embargo el gran reto en la actualidad es mejorar los procesos bioquímicos para su transformación en etanol abaratando sus costos de producción (IEA, 2006).

En contraste, con la producción tradicional de bio-etanol proveniente de azúcares y almidón, la producción basada en material lignocelulósico requiere una serie de pasos adicionales. La razón es que la celulosa, hemicelulosa y lignina no son accesibles a los microorganismos tradicionales utilizados para producir bio-etanol (IEA, 2010).

En cuanto al desarrollo rural y regional y la generación de empleos, los biocombustibles de segunda generación de acuerdo a la (IEA, 2010) jugarán un papel importante a

futuro como impulsores económicos y de desarrollo de los países que los implementen; el potencial para la generación de empleos alrededor de la cadena de producción varía dependiendo de la elección de la materia prima. Los biocombustibles de segunda generación tienen la capacidad de generar empleos desde el cultivo de la materia prima así como toda la cadena productiva.

Conforme al tema de los beneficios ambientales, focalizándose principalmente en la reducción de las emisiones de gases invernadero, el impacto de los biocombustibles de segunda generación varía considerablemente dependiendo de la ruta de conversión de la materia prima así como las condiciones específicas de su obtención (clima, suelo, tipo de cultivo, manejo, etc.). Actualmente se reporta un alto potencial para la mitigación de gases de efecto invernadero por parte de los biocombustibles de segunda generación (60-120 %), similar al 70-110 % de niveles de mitigación del etanol a partir de la caña de azúcar y mejor que los biocombustibles actuales (IEA, 2008^a).

5.2.5. Proyecciones a futuro de la producción etanol de segunda generación

Los biocombustibles de segunda generación no son aún comercialmente producidos, pero un considerable número de plantas piloto y demostración han sido enunciadas o establecidas en años recientes con recursos activos, ubicadas en Norte América, Europa y un pequeño grupo de países (Brasil, China, India y Tailandia). De acuerdo a las proyecciones actuales de la IEA, se observa un rápido incremento en la demanda de biocombustibles, en particular por los de segunda generación, dentro de un sector energético que apunta a la estabilización de las concentraciones de CO₂ atmosférico a 450 partes por millón (IEA, 2010).

El World Energy Outlook 450 Scenario (IEA, 2009a) proyecta que para el año 2030 los biocombustibles proveerán el 9 % (11.7 EJ) del total de la demanda de combustible para el transporte (126 EJ). En el Blue map scenario of energy technology perspectives 2008 (IEA, 2008^b) se proyecta que para el año 2050 los biocombustibles proveerán el 26 % (29 EJ) del total de combustible para el transporte (112 EJ), donde el 90 % de estos corresponderá a biocombustibles de segunda generación.

5.2.6. Los pastos como fuentes de etanol lignocelulósico

La conversión de la biomasa de las plantas en azúcares fermentables y su subsecuente conversión a alcohol y biocombustible se basa en metabolitos de carbono (Farquhar *et al.*, 2001). Uno de estos metabolitos es la celulosa que se encuentra, dentro de otras especies, en los pastos tropicales.

Un gran número de especies han sido consideradas como cultivos energéticos (Lewandowski *et al.*, 2003b; Walsh *et al.*, 2003; Angelini *et al.*, 2005), ya sean especies herbáceas perennes o anuales, cultivos y árboles. Los pastos perennes presentan varias ventajas sobre cultivos anuales como costos bajos de establecimiento, reducción en la erosión del suelo, bajo impacto en la calidad del agua y poco daño a los hábitats silvestres (McLaughlin *et al.*, 2002; Roth *et al.*, 2005).

De acuerdo a Heaton *et al.* (2008) las plantas monocotiledóneas C₄ de clima tropical son excelentes candidatos como cultivos bioenergéticos, debido a que son algunas de las plantas más eficientes sobre la tierra para utilizar la energía solar para producir biomasa a partir de la fotosíntesis. Además éstas se adaptan a una gran variedad de distribuciones geográficas y tiene un favorable potencial de rendimiento (Cherney & Cherney, 2003; Redfearn & Nelson, 2003).

Aunado a esto según Deinum *et al.* (1968) los pastos tropicales tiene un alto contenido de ligninas debido a las temperaturas, radiación y condiciones ambientales predominantes. Dentro de las especies de pastos tropicales el género *Pennisetum* de acuerdo a Uresti *et al.* (2009) es apto para producir etanol de segunda generación, por su alto contenido de celulosa, hemicelulosa y sus azúcares relacionados que resultan en alto rendimiento teórico de etanol de segunda generación.

5.3. El cultivo de *Pennisetum purpureum*

Pennisetum purpureum o pasto elefante es nativo del trópico húmedo del África continental y la isla de Bioko, entre 10 ° Latitud Norte y 20 ° Latitud Sur, fue descubierta en 1905 por el coronel Napier (Burkill, 1994; Rodríguez *et al.*, 2001). Es una especie de pastos que crece de forma silvestre en el territorio de Florida, Texas, California, Hawái, Guam, Samoa Americana, Puerto Rico y las Islas Virginius de los EUA. Este ha sido plantado como forraje y ha sido naturalizado en algunas áreas tropicales de Asia, América y Oceanía (Natural Resource Conservation Service, 2002; Pacific Island Ecosystems at Risk, 2002). La fecha de su descripción se origina de 1827 pero esta ha cambiado con el tiempo. En la actualidad, la especie pertenece a la subfamilia: Panicoideae, tribu: Paniceae, género: L. *Pennisetum* de las especies *P. purpureum* Schumacher (Tcacenco y Botrel, 1997).

Pennisetum purpureum es también conocido como pasto elefante, pasto marcador, hierba de Uganda, hierba elefante, fauces de caña de azúcar y una multitud de nombres nativos africanos (Holm *et al.*, 1977; Burkill, 1994). La especie es un pasto robusto con tallos perennes, la planta produce raíces en la base de 10-25 cm de

longitud con finas raíces en los nudos y en las cañas las cuales llegan a medir de 2 a 5 m de altura (Enríquez *et al.*, 1999) con un diámetro de hasta 2.5 cm en la base del tallo, el cual cuenta con un centro sólido. Las raíces pueden penetrar hasta los 4 m (Enríquez *et al.*, 1999; Tropical Forages, 2011). Sus hojas van de 50 a 90 cm de largo y 1 a 3 cm de ancho, son plantas con un nervio central blanco. Las hojas de los tallos más vigorosos y nuevos son anchas y robustas; los tallos más viejos tienen hojas más finas y estrechas. Las orillas de las hojas son ásperas con finos denticulos, la inflorescencia es compacta, erecta, con pelillos erizados leonados y una punta púrpura con una longitud de 8 a 30 cm y un grosor de 3 cm. Las espiguillas están dispuestas alrededor de un eje cabelludo, y éstas caen en la madurez (Nascimento junior, 1981; Alcantara y Bugarha, 1983; Derez, 1999). El número de cromosomas es $2n = 27, 28$ o 56 (Long y Lakela, 1971; Holm *et al.*, 1977; Skerman y Riveros, 1990; Burkill, 1994).

5.3.1. Requerimientos edafoclimáticos

Pennisetum purpureum se adapta a una gran variedad de suelos que van desde suelos arcillosos con un drenaje pobre hasta suelos arenosos con buen drenaje. La planta se desarrolla en óptimas condiciones en suelos de textura media, ricos en materia orgánica y con un buen drenaje, con un pH de 4.5 a 8 (Moss, 1964; Alcantara y Bugarha, 1983; Rodriguez, *et al.*, 1987; Jackes, 1994; Center for New Crops y Plant Products, 2002). Las lluvias deben ser de más de 1500 mm por año y las temperaturas para el crecimiento óptimo deberán oscilar entre los 25 a 40 °C (Skerman y Riveros, 1990). Se presenta distribuido en las zonas tropicales y subtropicales y bosques de hoja ancha, puede sobrevivir en lugares sombreados pero nunca bajo la copa de árboles cerrados. Por otro lado, este suprimirá otras especies de pastos, hierbas y

malezas de árboles. Una helada destruirá las zonas aéreas de la planta pero para eliminar la zona radical, el suelo tendría que ser congelado (Center for New Crops y Plant Products, 2002).

En cuanto al rango de altimetría en el cual el cultivo se desarrolla; el pasto elefante soporta un rango de altitud de hasta 2000 msnm (Boonman, 1993). Es eficiente en el aprovechamiento de la radiación solar por ser una planta tipo C₄ y se adapta a pendientes de hasta 25 % (Moss, 1964; Alcantara y Bufarha, 1983; Rodríguez *et al.*, 1987; Jackes, 1994).

5.3.2. Variedades de *Penissetum purpureum*

Existen varios grupos de *Pennisetum purpureum* los cuales se diferencian con base en el tiempo de floración, maduración de la plantación, diámetro del tallo, forma de la cepa, ancho de la hoja, número y tipo de cañas o tallos (Carvalho *et al.*, 1972; Bogdan, 1977; Pereira, 1993). Pereira (1993) realizó una clasificación de *Pennisetum purpureum* con base a las características mencionadas, la constitución genética y la importancia agronómica. De acuerdo a Pereira (1993) las variedades se clasifican en los siguientes grupos:

1).- Grupo enano: a este grupo pertenecen las variedades mejor adaptadas al pastoreo debido a la longitud de los entrenudos inferiores. Las plantas de este grupo muestran una estatura baja (1-5 m).

2).- Grupo cameroon: las plantas tienen tallos erectos, gruesos, predominio de hijos basales, hojas anchas, floración tardía (de mayo a julio), mateado denso.

3).- Grupo Mercker: se caracteriza por presentar menor porte, tallos delgados, hojas finas y más numerosas y una floración de marzo a abril.

4).- Grupo Napier: los cultivares de este grupo de variedades presentan plantas con tallos gruesos, porte alto, hojas anchas y su etapa de floración es intermedia (de abril a mayo).

La elección de las especies forrajeras es un factor muy importante que determina la productividad y longevidad del cultivo así como el manejo a adaptarse (Alcantara y Bufarah, 1983).

5.3.3. Potencial de *Pennisetum purpureum* para generar biocombustibles

El pasto elefante (*Pennisetum purpureum*) ha sido utilizado a través de los años como pasto forrajero con la finalidad de alimentar ganado de explotación por su gran capacidad para generar biomasa y sus altos niveles de proteína, sin embargo ha demostrado ser una buena alternativa para la generación de bioenergía debido en parte a su capacidad de generar biomasa y a la calidad de los parámetros que la componen, es decir, a los altos niveles de fibra y lignina , así como los bajos niveles de agua, nitrógeno y cenizas (Lemus *et al.*,2002; McKendry, 2002). Otra de las ventajas del género *Pennisetum* para fines de bioenergía es su capacidad de adaptarse y crecer en suelos pobres en nutrientes ya que de acuerdo a Quesada (2005) en un estudio que se realizó para determinar el potencial de producción del pasto elefante, se encontró que la generación de biomasa, lignina y fibra eran muy aceptables en comparación con un cultivar bajo un sistema de fertilización. Según Quesada (2005) La única diferencia radicó en que la calidad de la proteína era mejor en el sistema con fertilización.

La calidad de los parámetros necesarios para la generación de bioenergía, así como la capacidad de *Pennisetum purpureum* para ser cosechado dos veces por año, hacen de la especie un cultivo idóneo para la producción de etanol de segunda generación (Samson *et al.*, 2005).

Con base en Uresti *et al.* (2009) en el Cuadro 1 se muestra la composición de los parámetros químicos simulados por medio de un modelo de la USDA que hacen de *Pennisetum* un cultivo apto para generar biocombustible de segunda generación. En el Cuadro 2, el mismo autor muestra los valores de rendimiento simulados para generar biocombustible con base al rendimiento de materia seca, donde se muestra que los géneros *Vetiveria* y *Pennisetum* ofrecen el mayor rendimiento de etanol, debido a la mayor producción de materia seca y mayor contenido de hemicelulosa (xilosa) y celulosa (glucosa), respectivamente.

Cuadro 1. Géneros de pastos estudiados, rendimiento de materia seca y composición química.

Géneros	Rendimiento materia seca t ha ⁻¹	Componentes celulares (%) de materia seca			Azúcares (%) de materia seca				
		Celulosa	Hemicelulosa	Lignina	6 carbonos			5 carbonos	
					Glucosa	Galactosa	Manosa	Xilosa	Arabinosa
<i>Vetiveria</i>	50	30	38	10	30.16	0.93	0.31	31.24	4.25
<i>Pennisetum</i>	35	38	26	13	38.21	1.17	0.39	21.34	2.91
<i>Panicum</i>	25	33	27	18	33.18	1.02	0.34	22.20	3.02
<i>Brachiaria</i>	20	33	24	20	33.46	1.06	0.32	19.27	2.97
<i>Cynodon</i>	12	28	38	20	30.64	1.61	1.68	20.16	4.45

Fuente: (Uresti *et al.*, 2009)

Cuadro 2. Rendimiento simulado preliminar de etanol.

Géneros	Rendimiento de materia seca t ha ⁻¹	Rendimiento unitario de Etanol			Rendimiento de Etanol L ha ⁻¹	
		L t ⁻¹ de materia seca			Simulado	Industrial
		6-C	5-C	Total		
<i>Vetiveria</i>	50	206	238	444	22,200	16,490
<i>Pennisetum</i>	35	260	163	423	14,770	11,443
<i>Panicum</i>	25	226	169	395	9,875	7,549
<i>Brachiaria</i>	20	228	149	377	7,540	5,813
<i>Cynodon</i>	12	222	165	387	4,632	3,551

Fuente: (Uresti *et al.*, 2009)

5.4. Sistemas de información geográfica

Un SIG se puede definir como aquel método o técnica de procesamiento de información geográfica que permite combinar eficazmente información básica para generar información derivada; para ello, contaremos tanto con las fuentes de información como con un conjunto de herramientas informáticas (*hardware y software*) que facilitarán esta tarea; todo ello enmarcado dentro de un proyecto que habrá sido definido por un conjunto de personas, y controlado, así mismo, por los técnicos responsables de su implantación y desarrollo. En definitiva, un SIG es una herramienta capaz de combinar información gráfica (mapas) y alfanumérica (estadísticas) para obtener una información derivada sobre el espacio (Domínguez, 2000). Por su parte, NCGIA (1990) citado por Gutiérrez y Gould (1994); Ventura y Kim (1993); Tsihrintzis *et al.* (1996); Simms A (2002) un SIG es un sistema de hardware, software y procedimientos diseñado para realizar la captura, almacenamiento, manipulación,

análisis, modelización y presentación de datos referenciados o no espacialmente para la resolución de problemas complejos de planificación y gestión.

De acuerdo con Domínguez (2000) existen al menos cinco argumentos básicos para la utilización de un SIG que hacen de él, una herramienta más imprescindible para todas aquellas personas que utilizan información geográfica.

Estos argumentos son:

- 1) Un SIG nos permite realizar *análisis vicariantes*, es decir, nos permite realizar comparaciones entre escalas y perspectivas emulando una cierta capacidad de representación de diferentes lugares al mismo tiempo.
- 2) Un SIG nos permite diferenciar entre cambios cualitativos y cuantitativos; aportándonos una gran capacidad de cálculo.
- 3) Un SIG nos permite gestionar un gran volumen de información a diferentes escalas y proyecciones.
- 4) Un SIG integra espacialmente datos tabulares y geográficos junto a cálculos sobre variables (topología).
- 5) Un SIG admite multiplicidad de aplicaciones y desarrollos; poniendo a nuestra disposición herramientas informáticas estandarizadas que pueden ir desde simples *cajas de herramientas* hasta diversas extensiones para realizar análisis multivariados.

Para Berry (1993) un SIG debe ser capaz de (1) crear una abstracción digital del mundo real (2) manejar efectivamente esa información (3) proporcionar nuevos conocimientos sobre las relaciones de, o entre las variables espaciales (4) para crear resúmenes de estas relaciones.

Habitualmente la información en un SIG se estructura de dos formas. Mediante el uso de vectores que representan los diferentes objetos geográficos de forma individualizada y mediante el uso de matrices que tratan el territorio como un todo contínuo en un sistema cartesiano. En el primer caso hablamos de SIG vectorial y en el segundo de SIG matricial o ráster. Aunque existen otras formas más complejas, las más extendidas son éstas (Domínguez, 2000).

Un sistema vectorial es aquel en el que el territorio se representa a partir de vectores, éstos se localizan en el espacio mediante pares de coordenadas coincidentes con su origen y destino (en el caso de los puntos es el mismo). Las características del objeto representado por el vector van asociadas al mismo en forma de atributos. La representación de objetos lineales (carreteras, ríos, etc.) se realiza definiendo igualmente su origen y su destino, y describiendo la sinuosidad de la línea mediante vértices (pares de x, y). La combinación de varios vectores con un origen y un destino común se utiliza para describir superficies o áreas (Domínguez, 2000).

Se puede definir un SIG *ráster* como aquel que realiza sus cálculos a través de una estructura matricial, en la que cada celda o *píxel* tiene un valor y una localización determinadas. De esta forma, todo el territorio descrito tendrá un valor. Estas matrices pueden tener un valor binario que reflejaría la existencia o ausencia de un objeto geográfico determinado (por ejemplo para representar una línea eléctrica mediante un sistema ráster podríamos dar a los píxeles el valor 1 en el caso de que exista red y 0 para el caso de que no exista). También pueden tener un valor decimal cuando se quiera representar variables continuas (por ejemplo la altura, la distancia a una red,

etc.). Los valores enteros pueden ser utilizados para representar superficies temáticas (Domínguez, 2000). La estructura ráster son usadas para análisis prescriptivos, análisis espaciales y modelaje en particular en aquellos trabajos relacionados con recursos naturales (Berry, 1993; Vine *et al.*, 1997; Afzal y Sibasaki, 2000).

Los SIG pueden generar una visión de la calidad del entorno biológico, así como la sostenibilidad del mismo (Simms, 2002). Para el análisis de los agroecosistemas los SIG son útiles, debido a la capacidad de los mismos para interpretar de manera espacial aspectos de análisis tales como los hidrológicos y biológicos, además de localizar patrones que controlan el funcionamiento sistémico de un área (Afzal y Sibasaki, 2000).

Existe numerosos softwares de SIG desarrollados por Universidades (IDRISI, Clark University), Instituciones públicas (IRIS, INEGI) o empresas privadas (ArcGIS, ESRI) con distintas características y aplicaciones pero estructura y función similar.

5.5. Modelos de simulación

De acuerdo con Galagovsky y Aduriz-Bravo (2011) un modelo es una abstracción de la realidad el cual trata de representarla mediante la predicción de los fenómenos que conlleve en su sistema de entendimiento.

Con el desarrollo de la teoría general de sistemas y del procesado electrónico de los datos ayudado por la potencia de cálculo de las computadoras, la modelización de sistemas complejos ha encontrado puerta abierta a su materialización alcanzando un progreso rápido durante los últimos 30 años y desarrollando un buen número de

modelos, algunos de los cuales integran varios procesos y predicen efectos de crecimiento de cultivo y rendimiento al introducir características biológicas y fisiológicas del cultivo, condiciones edafoclimáticas y prácticas de manejo. Algunos de estos modelos presentan salidas en sistemas de información geográfica lo cual permite realizar una zonificación para cierto cultivo de interés (Fernández-Rodríguez y López-Bellido, 1993; Priya y Shibasaki, 2001; Price *et al.*, 2002; Liu *et al.*, 2007; Liu, 2009; Laux *et al.*, 2010; Evans *et al.*, 2010; Carvalho-Lopes y Steidle-Neto, 2011).

En los últimos años se han desarrollado modelos de simulación que generan predicciones que permiten orientar la toma de decisiones y reducir costos de investigación (Mattehws y Stephen, 2002). La modelación puede entenderse como la aplicación de métodos predictivos para analizar problemas complejos del mundo real; estos ayudan a la comprensión de las interacciones fisiológicas y ambientales, permitiendo realizar planeaciones estratégicas en el establecimiento o manejo de un cultivo con base a su potencial productivo, eficiencia energética o impactos en su sistema mayor (Bowen *et al.*, 1993). Por lo tanto la modelación de acuerdo a Sudduth *et al.* (1998) puede contribuir en gran parte al correcto manejo de la agricultura con base en las condiciones ambientales y las cualidades y manejo técnico del cultivo.

El uso de modelos de producción de cultivos generalmente requiere la integración de métodos numéricos y el uso de ordenadores, por lo que el nivel de certidumbre de los resultados se basa únicamente en los métodos numéricos del modelo y el nivel fidedigno de la información.

Los modelos de simulación para el crecimiento de cultivos son herramientas de investigación usualmente aplicadas en la evaluación de la relación entre la productividad del cultivo y los factores ambientales. Estos modelos han mostrado ser eficientes en cuanto a determinar la respuesta de los cultivos con base a cambios en el clima y cuestiones edáficas. Ejemplos de tales modelos incluyen al: EPIC (Williams *et al.*, 1989), CERES (Ritchie *et al.*, 1989), GAPS (Butler y Riha, 1989), SOYGRO (Jones *et al.*, 1989), IBSNAT (IBSNAT, 1989), SWAT (Arnold *et al.*, 1998) y APSIM. En la mayoría de los casos los modelos para simular el desarrollo de cultivos han sido desarrollados en particulares localidades y no son siempre aplicables en otras regiones sin ser modificados. Por lo tanto cuando se implementan tales modelos para evaluar cultivos dentro de nuevas regiones, su aplicabilidad necesita ser evaluada.

De acuerdo con Leiva (2008) conforme a modelos utilizados para el análisis de ciclos de cultivos, los modelos de simulación en esta área de estudio son herramientas de gran utilidad al momento de tratar de comprender y analizar escenarios sobre las interacciones fisiológicas y ambientales, permitiendo realizar la planeación del ciclo del cultivo en cuantos a sus labores para el logro de los rendimientos esperados, así como en algunos es posible evaluar impactos ambientales y estrategias para minimizarlos. Algunos modelos están formados por la integración de varios modelos sumando sus capacidades y logrando simular varios cultivos o realizar evaluaciones que van más allá del rendimiento del cultivo (Neitsch, 2005; Carvalho-Lopes y Steidle-Neto, 2011).

Con base en lo anterior Bowen *et al.* (1993) hace mención de los modelos de crecimiento y producción de cultivos como herramientas de relevante importancia en la

planeación y generación de manejos sostenibles. Por su parte Carvalho-López y Steidle-Neto (2011) consideran los modelos de simulación agrícola como herramientas útiles con base a su capacidad para evaluar y mejorar las prácticas de manejo, pronosticar impactos tales como el calentamiento global y en general asistir en los procesos de toma de decisiones. Algunos modelos están formados por la integración de varios modelos sumando sus capacidades y logrando simular varios cultivos o realizar evaluaciones que van más allá del rendimiento del cultivo (Neitsch, 2005; Carvalho-Lopes y Steidle-Neto, 2011). Otros han integrado SIG para hacerlos espacialmente explícitos logrando realizar zonificaciones de acuerdo al potencial productivo (Priya y Shibasaki, 2001; Price *et al.*, 2002; Liu *et al.*, 2007; Liu, 2009; Laux *et al.*, 2010; Evans *et al.*, 2010; Carvalho-Lopes y Steidle-Neto, 2011).

Krishna (2003) divide los modelos de simulación en: Modelos estadísticos (Expresan la relación entre el rendimiento y parámetros climáticos); Modelos mecánicos (Explican los mecanismos de acción entre clima y rendimiento); Modelos determinísticos (Tienen coeficientes definidos); Modelos estocásticos (Incluyen elementos de probabilidad); Modelos dinámicos (Incluyen el tiempo como variable); Modelos estáticos (No incluyen el tiempo como variable); Modelos basados en procesos (Representaciones matemáticas del mundo real, estiman la producción como función del suelo, clima y manejo); Modelos descriptivos (Consiste en ecuaciones que ayuda a determinar el rendimiento con base a una descripción cuantitativa de mecanismos y procesos cuantificadas por separado, integrándolos y teniendo como resultado el crecimiento de cultivo).

5.5.1. Uso de modelos de simulación

Se han utilizado modelos de simulación para calcular, pronosticar, aseverar manejo de recursos, evaluar aspectos de impacto ambiental, entre otras cosas. En el ramo agrícola es cada vez más común encontrar sistemas tradicionales de apoyo a las decisiones basadas en modelos de simulación de cultivo, normalmente específicos del sitio incluyendo los efectos de la variabilidad espacial de las condiciones del suelo y las variables meteorológicas (Ahmed y Shibasaki, 2000; Sargent *et al.*, 2007). Nielsen (2002) utilizó el modelo CROPGRO y RZWQM para evaluar el efecto del estrés hídrico en el cultivo de la soya. Putto (2009) lo usó para simular el rendimiento de cacahuate en zonas de Tailandia con distintos regímenes de lluvia. Cabelguenne *et al.* (1990) simuló el rendimiento de maíz, sorgo, girasol y soya en el sureste de Francia utilizando el modelo EPIC.

Ng *et al.* (2010). Usaron el modelo SWAT para estimar el efecto potencial en la carga de nitratos fluviales como resultado de sustituir los cultivos convencionales por *Miscanthus giganteus*. Narasimhan *et al.* (2005) evaluaron la humedad del suelo a largo periodo en seis cuencas de Texas utilizando el modelo SWAT. Sadras *et al.* (2003) realizaron una comparación física de la cantidad de agua del suelo, con la medida en el cultivo de canola utilizando el modelo APSIM; Chauhan (2010) evaluó el potencial productivo y requerimientos hídricos con base a una rotación de cultivos maíz-cacahuate en condiciones semiáridas bajo el clima tropical de Australia. Ko *et al.* (2009) utilizó el EPIC como un soporte para la toma de decisiones en irrigación de algodón en el sur de Texas EUA, evaluando la relación entre el rendimiento y el uso de agua; de igual forma Rinalidi (2001) lo usó para calendarizar las fechas de riego en girasol en el

sur de Italia. Putnam *et al.* (1988) realizaron una evaluación de los impactos de la erosión en 135 regiones de suelo de los Estados Unidos de América (U.S) utilizando el modelo EPIC. Con el mismo modelo, Phillips *et al.* (1993) y King *et al.* (1996) realizaron una evaluación de los sedimentos y pérdida de nutrientes en función de diferentes sistemas de labranza, rotación de cultivos y rangos de fertilización; Edwards *et al.* (1994) y Pierson *et al.* (2001) evaluaron la pérdida de nutrientes en la aplicación de estiércol; Chung *et al.* (2001) y Chung *et al.* (2002) evaluaron la pérdida de nitratos-nitrógeno (NO₃-N) a través del drenaje del subsuelo; Caveró *et al.* (1999) y Bernardos *et al.* (2001) evaluaron el ciclo de nutrientes en función de un sistema de producción, mientras que Potter *et al.* (1998) y Bernardos *et al.* (2001) analizaron el efecto del viento en la erosión de los suelos.

Conforme al uso de modelos de simulación agronómica para la evaluación de prácticas de manejo, Mediante el modelo APEX. Harman *et al.* (2004) evaluaron alternativas de control con base al uso de atrazina en cultivos de maíz y sorgo en una cuenca que cubría 66,000 has en el centro de Texas. A su vez, Saleh *et al.* (2004) aplicó el APEX para evaluar el efecto de prácticas de manejo silvícolas con relación a la pérdida de flujo, acumulación de sedimentos y pérdida de nutrientes en nueve pequeñas cuencas.

En relación a la utilización de modelos para el análisis de impacto ambiental con relación a la agricultura y fenómenos naturales que se viven actualmente como el cambio climático. Favis-Mortlock *et al.* (1991) y Brown y Rosenberg (1999) mediante el EPIC evaluaron los impactos del cambio climático en el rendimiento de cultivos o la erosión del suelo; Williams *et al.* (1992) y Sabbagh *et al.* (1992) analizaron las pérdidas en campo por la aplicación de pesticidas. Lee *et al.* (1993) y Apezteguía *et al.* (2002)

evaluaron el nivel de secuestro de carbono del suelo con base al cultivo su sistema de manejo; Lee *et al.* (1993) y Phillips y Dodson (1996) de igual forma, realizaron un estudio de secuestro de carbono en la faja maicera de EUA.

Brown y Rosenberg (1999) midieron el impacto del cambio climático generado por tres diferentes gases de efecto invernadero sobre cultivos de trigo y maíz en EUA. Por su parte Izaurre *et al.* (2003) analizó el impacto del cambio climático generado por un solo gas de efecto invernadero sobre cuatro cereales durante el periodo 2030-2090 en 204 granjas.

5.5.2. El modelo SWAT

SWAT es el acrónimo de “Soil and Water Assessment Tool” un modelo para trabajar a escala de Cuenca o cuerpo de agua, desarrollado por el Dr. Jeff Arnolds para la USDA. SWAT fue desarrollado para predecir el impacto de las prácticas de manejo de suelo y agua en procesos como la generación de sedimentos (Williams y Berndt, 1977) erosión y la obtención de rendimientos agrícolas en un largo complejo de cuencas, con una variedad de suelos, uso de suelos y condiciones de manejo a través de largo periodo de tiempo (Neitsch *et al.*, 2005; Gassman *et al.*, 2007).

SWAT es un modelo que trabaja físicamente a escala de cuenca en tiempo continuo distribuyendo sobre ella parámetros hidrológicos, de suelo y uso de suelo, un modelo de elevación digital (DEM) y datos climáticos para simular de forma diaria. Los componentes principales del modelo incluyen el clima, la hidrología, la temperatura del suelo, crecimiento de las plantas, nutrientes, plaguicidas y manejo de la tierra (Narasimhan *et al.*, 2005).

Para la parametrización espacialmente explícita, el modelo subdivide la cuenca en subcuencas, basándose en la topografía. Una vez creadas las subcuencas, estas se subdividen en unidades de respuesta hidrológica (HRU) las cuales se basan en un único tipo y uso de suelo (Guzmán *et al.*, 2004; Narasimhan *et al.*, 2005; Du *et al.*, 2006; Akhavan *et al.*, 2010; Garg *et al.*, 2011).

El modelo SWAT para la simulación de cultivos es una simplificación del modelo EPIC (Williams *et al.*, 1992) el cual es usado para simular cultivos anuales y perennes, para ello cuenta con una base de datos en la cual se introducen los parámetros fisiológicos del cultivo (Luo *et al.*, 2008). El modelo considera tres factores de estrés: a) temperatura, b) nutrientes (nitrógeno y fósforo) y c) agua, los cuales reducen el rendimiento potencial (Luo *et al.*, 2008; Garg *et al.*, 2011)

El modelo puede estimar el rendimiento o la generación de biomasa de una amplia gama de cultivos tales como cultivos de rotación, pastos o pastizales y árboles. La plantación, la cosecha, las operaciones de manejo, la aplicación de nutrientes y pesticidas pueden ser simulados por cada sistema de cultivo con fechas específicas o en base a la generación de unidades calor. Residuos y mezcla química en el suelo son simulados con base a las operaciones de manejo. La aplicación de nitrógeno y fósforo pueden ser simulados e introducidos al modelo ya sea en datos con fórmulas inorgánicas o compostas, los pesticidas pueden ser introducidos de igual forma y el modelo es capaz de analizar los impactos de estos en relación con el suelo y el agua. El modelo puede ingresar al proceso de simulación prácticas como riego o fertilización mediante una opción automática que se basa en estrés hídrico y de nitrógeno (Gassman *et al.*, 2007).

El crecimiento fenológico del cultivo se basa en la acumulación diaria de las unidades calor sobre una temperatura base específica y la acumulación de biomasa es acumulada cada día basándose en la intercepción de la radiación solar (RUE) hasta la cosecha. La altura de la planta, el índice de área foliar (LAE) y el desarrollo de las raíces son simuladas como función de las unidades calor y la biomasa del cultivo (Narasimhan *et al.*, 2005).

La calibración y validación del SWAT se ha realizado comparando los resultados simulados contra los medidos en las bases de datos históricos y reales de las cuencas (Du *et al.*, 2006; Luo *et al.*, 2008; Akhavan *et al.*, 2010; Garg *et al.*, 2011) con el fin de mejorar los procesos de calibración del modelo para trabajos a gran escala Eckhardt y Arnold (2001) y Van Griensven y Bauwens (2001) añadieron una rutina de autocalibración al modelo.

Entre los modelos hidrológicos desarrollados en las décadas pasadas, el modelo SWAT desarrollado por Arnolds *et al.* (1998), ha sido usado extensivamente por los investigadores. Esto debido a que SWAT 1) introduce fácilmente entradas de datos climáticos, de suelo, de tierra y topografía. 2) permite modelar a escala de cuenca de forma espacialmente explícita. 3) es capaz de simular el crecimiento de cultivos y distintos escenarios de manejo del suelo (Narasimhan *et al.*, 2005).

Otra de las ventajas del SWAT es que es susceptible a ciertas modificaciones para adecuarlo a las condiciones de la zona en estudio. Por ejemplo, Du *et al.* (2006), evaluaron una versión modificada del SWAT (SWAT-M), específico para zonas con depresiones superficiales, simulando satisfactoriamente la dinámica de nitratos,

nitrógenos y atrazina, así como la producción de maíz y soya dentro de la cuenca Walnut Creek EUA.

De acuerdo con Gassman *et al.* (2007) hasta ese años se reportaron 250 artículos en los cuales se menciona el SWAT ya sea como herramienta principal o por alguno de sus componentes en el análisis, generación o simulación de datos.

Según Shepherd *et al.* (1999); Borah y Bera (2003); Borah y Bera (2004) y Arnold y Fohrer (2005) han reportado revisiones sobre las aplicaciones y componentes del modelo en conjunto con una comparación con otros modelos, lo cual habla de su fiabilidad a la hora de simular.

Con base al párrafo anterior, Betrie *et al.* (2010) con SWAT modelaron el manejo de los sedimentos en la cuenca “Blue Nilo” con diferentes escenarios de manejo y encontraron un 83 % de eficiencia en los datos simulados contra los medidos, lo cual habla de un desempeño satisfactorio del modelo. Srinivasan *et al.* (2010) realizaron predicciones en procesos hidrológicos y rendimiento de cultivos en una cuenca del río Mississippi utilizando el modelo en el cual compararon versiones de SWAT calibrado con datos medidos de la cuenca y una versión no calibrada; en el estudio encontraron que la versión no calibrada arrojaba datos similares a las versiones calibradas, lo cual habla bien de la estructura y complejidad del programa a la hora de generar datos faltantes o no existentes en ciertos días o años.

Por su parte, Santhi *et al.* (2005) por medio del SWAT, evaluaron a nivel granja y cuenca el impacto de buenas prácticas de manejo para evitar erosión y pérdida de nutrientes en el suelo en la cuenca del Rio Trinita en Texas. EUA. Garg *et al.* (2011) utilizaron el SWAT para medir la producción de agua en zonas agrícolas en Upper

Bhima Catchment India y obtuvieron resultados que sugieren que suplementando la irrigación y mejorando las prácticas de manejo pueden mejorar la producción de agua. A su vez Luo *et al.* (2008), ajustaron los parámetros de trigo y maíz a las variedades locales, sin embargo la comparación de resultados simulados con los observados mostraron resultados deficientes índice de área foliar, debido a una simplificación del modelaje, en predicciones de rendimiento por índice de cosecha inadecuado y en estimaciones de disponibilidad de agua en el suelo. Esto debido a cálculos erróneos en la evapotranspiración. Esto habla de la importancia de contar con datos puntuales o calidad en la información a la hora de introducirla al modelo, lo cual a veces se dificulta por la falta de información con la que se cuenta en la realidad. Sin embargo existen alternativas y generadores como el WXGEN del EPIC (Sharpley y Williams, 1990) entre otros que ayudan a generar datos faltantes para ser introducidos al modelo.

5.5.3. Sistemas de información geográfica (GIS) y SWAT

Varios trabajos se han realizado con el modelo SWAT, una de las ventajas de este modelo es la capacidad del mismo para trabajar como interfaz con sistemas de información geográfica como el ArcGIS (Neitsch *et al.*, 2002ab).

Debido a la gran cantidad de datos que se requieren introducir al modelo (división de drenaje, uso de suelo, distribución de ríos, mapa de tipos de suelos, etc.) varios sistemas de información geográfica para introducir y extraer la información del modelo se han venido desarrollando. Por ejemplo, Srinivasan y Arnold (1994) desarrollaron una interfaz en GRASS platform, la cual fue la fuente de procesador que escribió las entradas del modelo. Bian *et al.* (1996) desarrollo una interfaz que trabajaba en la plataforma Arc/INFO (ESRI, Redlands, California) y corría en el sistema UNIX. Di Luzio

et al. (1998) desarrolló una amigable interfaz Arc View 3.x (ESRI, Redlands, California) para trabajar con SWAT la cual tomó ventaja del sistema de Bian debido a que a diferencia del sistema Arc/INFO, esta trabajaba con el sistema operativo Windows. Di Luzio *et al.* (2000) y Di Luzio *et al.* (2002) además agregó a su interface la capacidad de agregar un modelo de elevación digital (DEM) para el análisis del terreno.

En la actualidad de acuerdo a Olivera *et al.* (2006) la plataforma o interfaz más utilizada y avanzada es el ArcGIS-SWAT la cual fue desarrollada por ArcGIS. Con esta plataforma se pueden almacenar datos geográficos, numéricos, de texto y resultados, utilizando bases de datos geográficas espacialmente explícitas y temporales (MacDonald, 1999).

Una de las ventajas de esta moderna interfaz es la relativa facilidad para manejar la información en otros programas de Windows como Excell o Access, así como la capacidad para mapear las unidades de respuesta hidrológica (HRU) (Olivera *et al.*, 2006).

6. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL DEL AGROECOSISTEMA

6.1. Proceso de desarrollo agrícola

Existe interés en el desarrollo agrícola por que la agricultura produce prácticamente todo el alimento del cual depende la vida humana, además de ser la industria más grande en casi todos los países y por que el poder adquisitivo de la gente rural es una gran parte del mercado de las industrias no agrícolas que a cada país le gustaría desarrollar. Además, una considerable cantidad de recursos y poder adquisitivo de los países dependen de la prosperidad del sector agrícola (Mosher, 1964).

Cuando se habla del desarrollo agrícola, de acuerdo con Laird (1991) se refiere a una serie de cambios que han venido ocurriendo en la agricultura a través de los años, bajo la tendencia de hacerla más eficiente y productiva en las especies y variedades sembradas, en las prácticas usadas en la explotación de la tierra, en las tecnologías para eficientar las prácticas agrícolas y tomar decisiones, en la producción de cosechas y en el procesamiento y mercadeo de estas. Además, Laird (1991) menciona la importancia de cambios en las poblaciones rurales mismas, con tendencia de hacerlas más capaces de tomar e instrumentar las decisiones de acuerdo a sus propios intereses y las exigencias de la sociedad global.

Aunado a esto Weitz (1971) menciona que el desarrollo agrícola es fundamentalmente un proceso de cambio que abarca a todo el país: su estructura económica, social, política y física, de igual manera, el sistema de valores y la forma de vida del pueblo. Algunas de las decisiones y acciones en un marco de planeación elaborado por parte de los agentes de cambio, según Weitz (1971) constituyen una condición previa para el

proceso de desarrollo, mientras que otros lo acompañan o lo siguen, esto es similar a la acción del girar de una rueda en el que cada segmento empuja al que está delante de sí y a su vez es empujado por el segmento que le sigue, sin que esté muy claro cuál de los segmentos debe ser manipulado a efectos de poner en movimiento la rueda.

Con base al párrafo anterior, Martínez (2001) considera al agroecosistema como unidad óptima para el estudio de la agricultura y para su propia transformación (desarrollo); integrándolo en un sistema agrícola y rural regional a través de cadenas producción-consumo, con interferencias de políticas y cultura, así como de instituciones públicas y privadas y construido a partir de la modificación social de un sistema natural, para contribuir a: 1) La producción de alimentos, materias primas y servicios ambientales que la sociedad en su conjunto demanda; 2) al bienestar de la población rural, y 3) a su propia sostenibilidad ecológica. Bajo la lógica de lo propuesto por Martínez (2001) el agroecosistema posee procesos dinámicos de retroalimentación y control, regulados y autorregulados, como respuesta a variaciones internas y de su entorno. La dimensión espacial, biodiversidad y objetivos del Agroecosistema dependen del tipo de controlador que lo regula, de los recursos que éste maneja y de su interrelación con el entorno complejo.

6.2. El enfoque y concepto de agroecosistemas

La producción agrícola ha establecido una relación sociedad naturaleza que ha permitido la transformación de las formas de vida de la población. Para entender la agricultura, bajo el enfoque de agroecosistemas, se deben considerar tanto la importancia de los aspectos físico-biológicos relacionados con la ecología como el

fuerte contenido social que presentan, pues para lograr la producción de alimentos, bienes y servicios que demanda la sociedad, se deben de establecer y desarrollar ciertos procesos sociales, económicos, culturales y políticos que permitan tal fin. En este sentido, el hombre juega un papel importante en el equilibrio de la sociedad-naturaleza; ya que este, como controlador del ecosistema que modifica, toma decisiones diarias sobre el mismo, pero estas no se determinan de manera aislada debido al contexto social que lo rodea (Vilaboa-Arroniz, 2011).

De acuerdo con Vilaboa-Arroniz (2011) en su investigación sobre la evolución del concepto de agroecosistemas; tiene sus bases en el holismo y la teoría general de sistemas propuesta por Bertalanffy (1976) en la cual, dicho enfoque considera una visión de las ciencias agrícolas interrelacionada por varios saberes disciplinarios, a través de una forma de pensamiento basada en la totalidad y sus componentes para entender la realidad en el sector agrícola.

Se puede pensar que una visión de sistema es antagónica a un enfoque reduccionista-mecanicista; sin embargo estas se complementan ya que para conocer “el todo” es preciso conocer las partes que lo conforman así como el funcionamiento e interrelación de fenómenos concretos (Vilaboa-Arroniz, 2011). La idea central del enfoque de acuerdo con Chiavenato (1997) es que en estos no hay unidades aisladas sino que todas sus partes actúan con una misma orientación y finalidad común, siendo necesario el correcto funcionamiento de los elementos que lo integran para el eficaz desempeño del sistema en su conjunto. La diferencia entre un ecosistema y el agroecosistema según Maass y Martínez Yrizar (1990) y Gliessman (2002) radica en la

intervención del hombre; Este último, es el que transforma el ecosistema natural compuesto por componentes bióticos y abióticos con fines para la producción de alimentos.

La primera conceptualización de agroecosistemas lo realizó Harper en 1974. Posteriormente, Hernández (1977) definió al agroecosistema como un ecosistema modificado en menor o mayor grado por la mano del hombre, para que mediante el aprovechamiento de los recursos naturales, la calidad y cantidad de energía y los medios de información disponible, fuese posible la obtención de productos agrícolas. Por su parte Montaldo (1982) citado por Vilaboa (2011) señala que el hombre es quien origina el agroecosistema por su acción en el ecosistema natural, teniendo como objetivo la utilización del medio en forma sostenida para obtener productos agropecuarios.

Odum (1985) menciona que el agroecosistema se refiere a una domesticación de los ecosistemas por parte del hombre con el fin de obtener productos y servicios. Con relación a lo que menciona Odum; Hart (1985) lo establece como un sistema formado por un grupo de especies características de un ecosistema determinado y el medio ambiente con el que interactúa, con entradas y salidas de energía. Conway (1987) citado por Vilaboa (2011) conceptualiza al agroecosistema de una forma similar a Hernández definiéndolo como un ecosistema modificado por el hombre para la obtención de productos. Marten y Rambo (1988) lo definen como un complejo de recursos ambientales y otros factores, los cuales mediante la intervención del hombre, han sido modificados para la generación de productos agropecuarios. De acuerdo con

Conway y Mc Craken (1990) el agroecosistema se refiere a un sistema ecológico modificado por el hombre para la producción de alimentos, fibras y otros productos agrícolas. Mientras que Mariaca (1993) lo define como un área de estudio con ciertas propiedades o características que lo diferencian de otras, por encima de lo que puede ser un ecosistema natural. A su vez, Ruíz (1995) lo define como una unidad de estudio en la cual existe una interacción entre diversos factores tecnológicos, socioeconómicos y ecológicos que tiene como fin satisfacer las demandas alimenticias del hombre por un tiempo determinado.

Conforme a la importancia y rol que ocupa el hombre dentro del agroecosistema, Altieri (1995) menciona que es el hombre, ya sea en forma singular o en familia, quien controla y define la producción convirtiéndose en el agente que regula y decide la finalidad del sistema. En relación a esto, Martínez (1999) considera al agroecosistema como un modelo conceptual que prioriza el rol que desempeña el controlador en la toma de decisiones.

Vilaboa *et al.* (2006) considera que el agroecosistema es un sistema ecológico modificado por el hombre para la utilización de los recursos naturales en los procesos de producción agropecuarios, además de ser la unidad de análisis y su entorno donde participan la totalidad de los factores que lo integran. A su vez, Vilaboa *et al.* (2009) menciona que el enfoque y concepto de agroecosistema es un modelo abstracto y de investigación, que permite representar la unidad de estudio para interpretar la realidad agrícola. Por su parte Bustillos *et al.* (2009) considera el agroecosistema como unidades autopoieticas donde existe un enlace estructural entre el hombre y el

ambiente. Sandoval y Villanueva (2009) consideran al agroecosistema como la unidad de estudio de los sistemas de producción agrícola en los que se ejerce el control humano en la interacción con los recursos naturales para la producción de alimentos y materias primas que demandan la sociedad; por tanto, aborda la producción agropecuaria, forestal, pesquera, mantenimiento del ecosistema, servicios ambientales, entre otros tópicos relacionados.

6.3. Modelos teóricos básicos sobre agroecosistemas y desarrollo agrícola

La agricultura es un fenómeno complejo, ligado a otro aún más complejo, que es la realidad misma, en la que ocurren las diferentes transformaciones de la materia y la energía. En los procesos de producción agrícola se encuentran interrelacionados los procesos físicos, biológicos y sociales, mostrándose que en ésta, como en otras actividades humanas, la realidad es una totalidad y como tal debe abordarse (Parra *et al.*, 1984). Un enfoque útil para abordar la agricultura desde la perspectiva de la totalidad es la filosofía dialéctica, que ante todo permite entender que cada fenómeno del mundo real puede ser comprendido como elemento del todo (Kosic, 1967): citado por Parra *et al.* (1984). Kosic (1967) determina que el principio metodológico de la investigación dialéctica de la realidad social es el punto de vista de la realidad concreta, que ante todo significa que cada fenómeno puede ser comprendido como elemento del todo.

Con base a la Figura 6 tomando las categorías de la teoría principal derivada de la filosofía dialéctica, es decir: el proceso ecológico, proceso de trabajo, el de producción

inmediata, de producción global y de reproducción social, en la Figura 7 se definen unidades de estudio que se relacionan con la propuesta simplificada de Mazoyer (1997) por Trebuil y Kam (2000) en su modelo de concepto del sistema agrario.

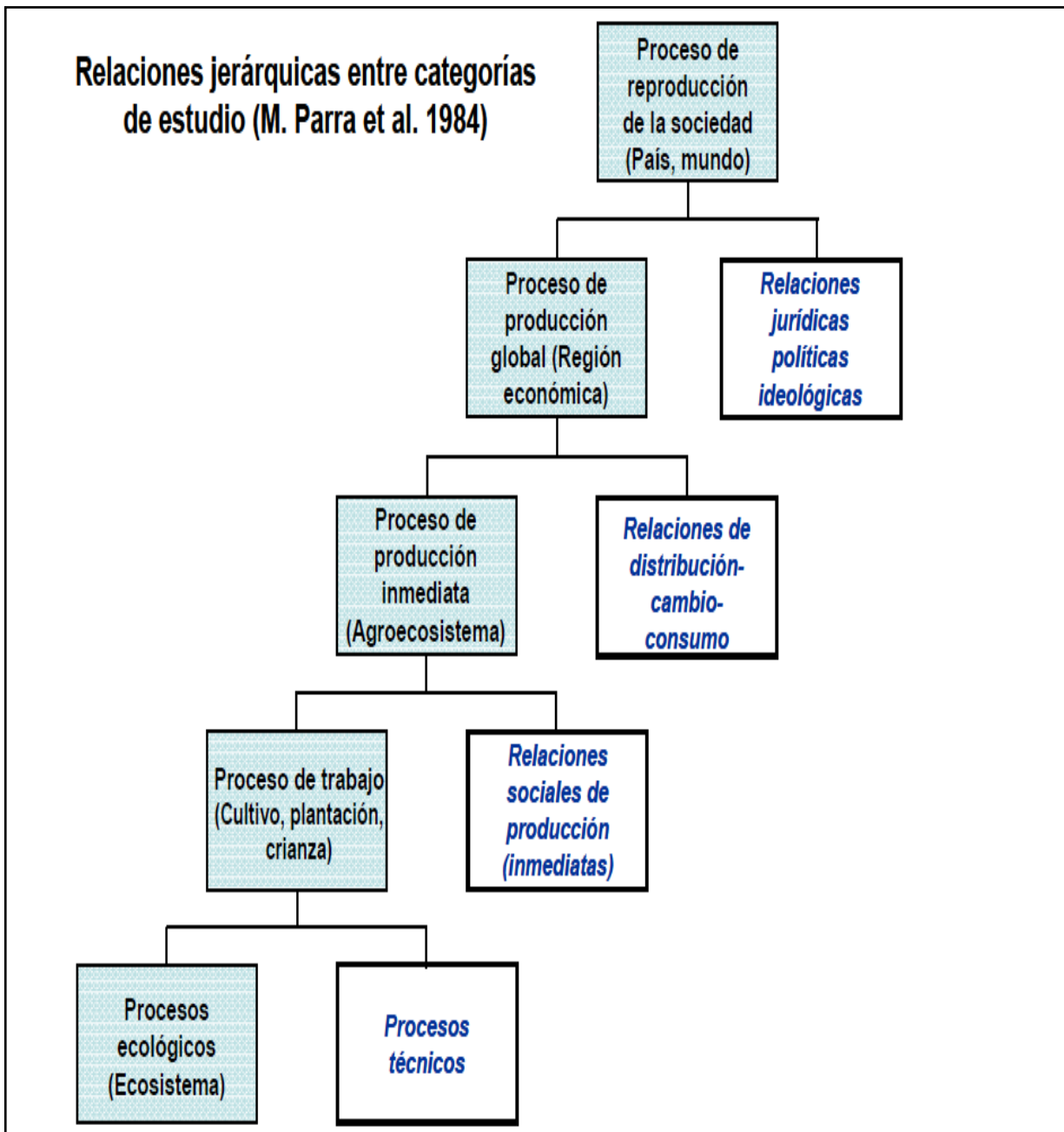


Figura 6. Categorías, procesos y relaciones generales con la producción.
Fuente: (Parra et al., 1984).

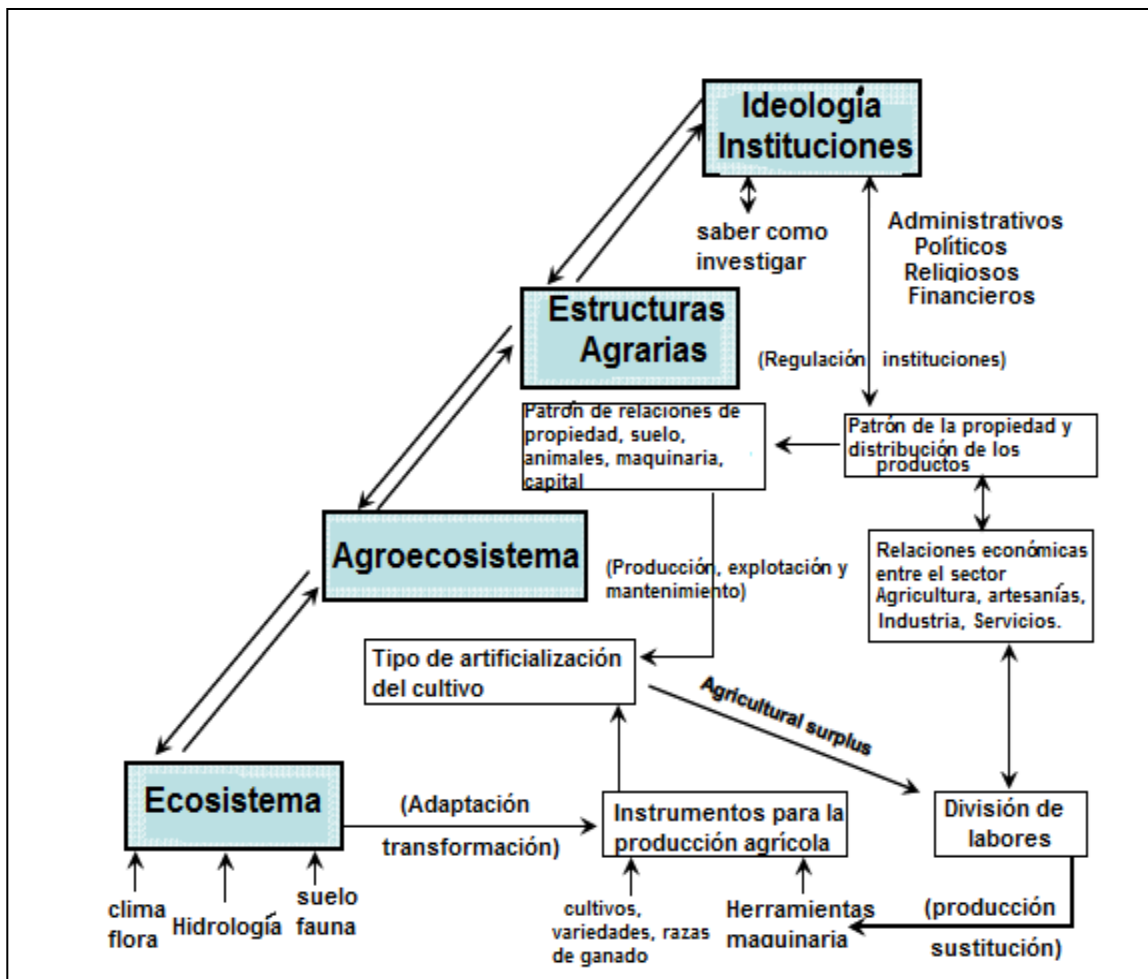


Figura 7. Modelo de concepto agrario.

Fuente: Simplificado de Mazoyer (1997) por Trebuil y Kam (2000).

Es en el modelo de Trebuil con el que se forma el ensamble dialéctico funcionalista, dialéctico por que usa el criterio de categorías y relaciones sociales de la producción al que se le ha insertado fundamentalmente un elemento funcionalista estructural: el Agroecosistema y al ecosistema, aún cuando éste último de innegable importancia se ve en cierta forma reducido en su interpretación. La estructura teórico metodológica propuesta por Parra *et al.* (1984) y Trebuil (2000) permite estudiar una gama de problemas, ubicándolos como parte de una totalidad. Por su importancia para el

desarrollo social en general, y de la agricultura en particular, se enumera en forma no exhaustiva a un conjunto de fenómenos que, aunque en lo teórico han sido estudiados como un todo, empíricamente han sido estudiados como problemas independientes a nivel macrosocial, es decir, no se han realizado investigaciones integrales de las regiones concretas, o al menos hay muy pocas.

Martínez (2010) hace alusión del uso de los modelos anteriores fusionándolos de manera acoplada para crear un modelo práctico y explícito de los procesos que se correlacionan con el agroecosistema a impulsar (desarrollar) y el contexto general que lo rodea según las teorías propias del autor. Véase la Figura 8.

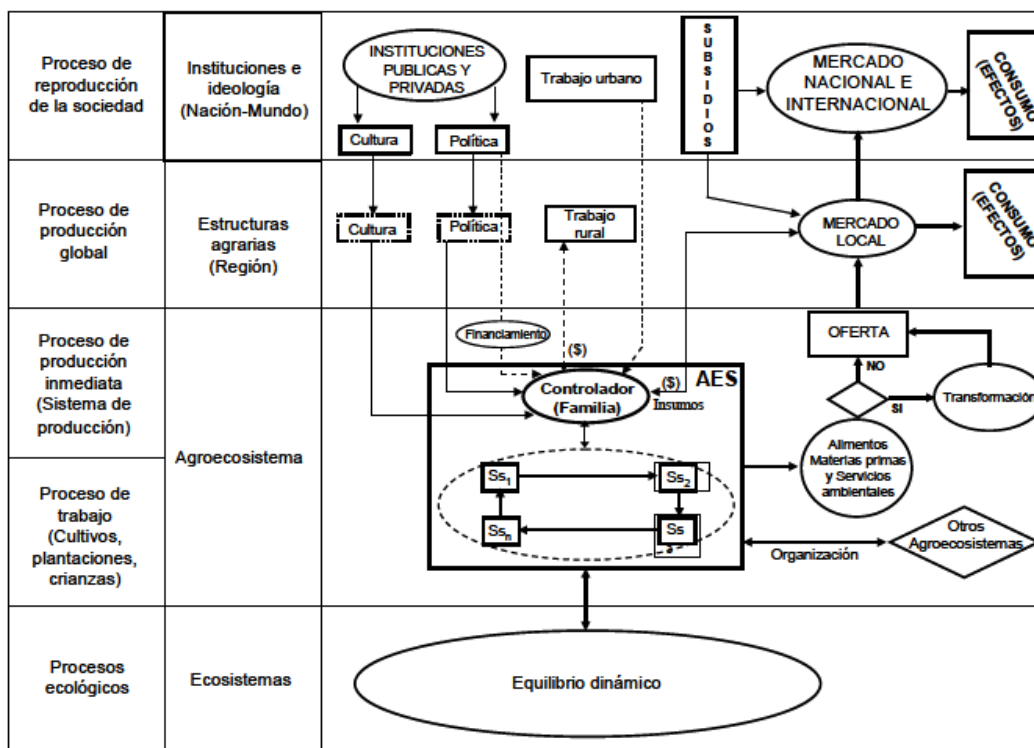


Figura 8. Modelo explícito de los componentes y procesos de agroecosistema. Fuente: (Martínez, 2010).

6.4. La planificación

La planificación agropecuaria es una desagregación de la planificación nacional. El día de hoy ya nadie discute la necesidad de planificar, pero subsisten legítimas diferencias acerca de sus modalidades. En un sentido amplio, puede decirse que actualmente casi todas las naciones realizan algunas actividades vinculadas a la planificación, esto es, fijan objetivos y establecen estrategias e instrumentos para alcanzarlos, de modo que esto permita facilitar el adecuado diseño y ejecución de reformas estructurales (González *et al.*, 1986).

Aunque la planificación solo se ha generalizado en los últimos 15 o 20 años, se pueden citar numerosas definiciones que se refieren al carácter y a los propósitos que ha tenido o ha pretendido tener o simplemente a los atributos que integran el concepto. En sentido lato, por acción planificadora puede entenderse toda actividad humana sistemáticamente destinada a seleccionar objetivos, así como las maneras más apropiadas para alcanzarlos (González *et al.*, 1986).

Por otra parte Mattos (1986) menciona que es hasta fines de la década de los 50's cuando la planificación, como procedimiento idóneo para racionalizar el proceso de decisiones y acciones requeridas para la ejecución de un determinado proyecto político, no había logrado mayor aceptación a nivel oficial de buena parte de los países y Latinoamérica.

Para Matus (1993) la idea de la planificación se incorpora al instrumental teórico, en América Latina, alrededor de los años 40's y aparece como el producto de un proceso

intelectual que, en su origen, se proponía explorar el futuro mediante una metodología en proyecciones.

Por su parte, Dror (1963) define la planificación como el proceso destinado a preparar un conjunto de decisiones para acciones en el futuro, dirigido hacia el logro de ciertas metas por el uso de medios óptimos y Waterson (1965) sugiere que la planificación es, en esencia, un intento organizado, consiente y continuo de elegir las mejores alternativas disponibles para alcanzar las metas específicas

Según González *et al.* (1986) la planificación agrícola, considerada como una subdivisión de la planificación del desarrollo nacional, podría ser definida como la actividad deliberada y permanente de los gobiernos que, realizada de una manera sistémica, tiene el propósito de preparar, facilitar, racionalizar las decisiones que se adoptan a nivel estatal y controlar y evaluar su posterior ejecución, con el fin de acelerar el desarrollo agropecuario en el contexto del desarrollo nacional y lograr que el sistema agropecuario alcance los objetivos que le son asignados. De acuerdo a González *et al.* (1986) la definición adopta presenta tres notas esenciales:

a) Es una actividad realizada con nivel estatal de la cual es responsable el gobierno en representación de la comunidad. Esto no excluye que para asegurar su éxito será necesaria la mayor participación de todas las fuerzas sociales.

b) No es una actividad ocasional como podría serlo la preparación de planes y proyectos aislados- sino que debe tener suficiente continuidad administrativa como para poder ser considerada una actividad más de los organismos públicos agrícolas.

c) La realidad agropecuaria tiene una estrecha relación con factores físicos, socioeconómicos, administrativos y políticos de gran inestabilidad. En consecuencia, la planificación agrícola debe ser realizada en forma sumamente metódica aprovechando el avance de las ciencias agrícolas y sociales y una serie de disciplinas que han surgido en los últimos veinticinco años, como la investigación operativa, la informática, la teoría de las decisiones y en particular, diversos elementos del enfoque y la teoría de sistemas.

Finalmente, la política planificada del desarrollo agrícola es un conjunto de normas, elaboradas por el sistema de planificación y aprobadas por las autoridades competentes, que tienen por finalidad conducir y regular durante un periodo dado, la acción de los agentes públicos y privados que participan en el proceso de desarrollo agrícola. Esa política estará contenida, en diversos mecanismos. Estos pueden ser, según las circunstancias, planes de largo y mediano plazo; estrategia; políticas específicas a una actividad; un sistema producto o cadena productiva; programas y proyectos; reformas de la estructura empresarial; financiamiento; planes anuales y regionales (municipales), etc. (González *et al.*, 1986).

El sistema de planificación según González *et al.* (1986) se compone de ciertas actividades tales como: diagnóstico, formulación, control de la ejecución, evaluación y reformulación. El cumplimiento de los objetivos del sistema de planificación dependerá de la forma en que se lleve a cabo estas diferentes actividades.

Para Martínez (2010) Los procesos básicos de planificación son tres: Diagnóstico, Estrategias y Evaluación. El primero está compuesto de estudios en los que se busca

encontrar los principales problemas en la producción y su jerarquización, el otro estudio posible es la búsqueda de potencialidades no aprovechadas, que pueden adicionarse a la producción e incluso dejarla para dedicarse al aprovechamiento de potenciales. Un último y básico problema es la atención de las demandas de los pobladores y la lucha por lograr la satisfacción de tales necesidades.

6.5. Diagnósis

La diagnósis es la actividad que permite disponer de un conocimiento acabado de la estructura y el funcionamiento del sistema agropecuario. Normalmente está referido un periodo en el pasado en el cual se desea conocer, medir, interpretar y evaluar los resultados del sistema, explicarse las estructuras vigentes y las tendencias de sus transformaciones (González *et al.*, 1986).

Una parte fundamental de las actividades de la diagnósis consiste en prever cuales serían las condiciones y los resultados de las actividades agropecuarias en el futuro, en el caso de mantenerse la política vigente. La prognósis permite estar en mejores condiciones para determinar un cambio de política y para señalar específicamente cuales deben ser las modificaciones, basándose en la diferencia existente entre los resultados previsibles y los que el gobierno considera necesario y posible alcanzar. La prognósis debe prever los resultados, lo cual da origen a un análisis menos acucioso y normalmente más difícil y arriesgado (González *et al.*, 1986).

La diferente perspectiva temporal que caracteriza a la prognósis puede producir cambios en algunas de las conclusiones del análisis del funcionamiento pasado; nuevos acontecimientos, o la madurez de ciertas políticas y programas en ejecución,

de igual manera pueden hacer cambiar algunas de las tendencias observadas. El otorgar al análisis una perspectiva de futuro, ayuda a determinar las nuevas modalidades estratégicas de desarrollo, y también el tipo de mecanismos necesarios para alcanzarlos. Tanto la estrategia como las políticas y otros mecanismos instrumentales según González *et al.* (1986) serán formulados teniendo en cuenta la separación entre las tendencias pronosticadas y los objetivos del gobierno, y no la que exista entre los últimos y la situación actual.

El análisis de acuerdo a González *et al.* (1986) debe hacerse dentro del marco del desarrollo agropecuario jerarquizando las causas externas al sistema agropecuario o al país y la interpretación del desarrollo agropecuario que proporcione la diagnosis deberá estar asentada en un examen detallado de los problemas nacionales y regionales , pero su elaboración requerirá siempre de una concepción o teoría que explique el cambio económico, social y político que brinde hipótesis explicativas acerca de los hechos agropecuarios más relevantes y la integración de estos a los ocurridos en el país. la diagnosis a diferencia de la investigación académica está orientada por las intenciones que animan a los gobernantes.

El diagnóstico entendido por González *et al.* (1986) constituye una investigación científica, por lo que debe ser encuadrada en las debidas normas. Los métodos estrictos tienen mayor utilidad, pues al sistematizar y ordenar el análisis permiten alcanzar los mejores resultados dentro del escaso tiempo disponible. De acuerdo al autor, Podrían distinguirse seis etapas principales dentro del diagnóstico:

1- Definición de la hipótesis preliminar

2- Recopilación inicial y elaboración preliminar de la información

3-Análisis inicial apoyado en la información reunida y reformulación de las hipótesis preliminares

4- Recopilación de nueva información, incluyendo trabajo en el terreno.

5- Análisis definitivo e interpretación del desarrollo histórico

6- Prognosis y determinación de los elementos estratégicos.

Las hipótesis preliminares son explicaciones tentativas del funcionamiento y tendencias del sistema. En segundo lugar, corresponde a la recopilación de información necesaria para el tipo de diagnóstico que se ocupe. Esta información estará referida a los aspectos más generales del desarrollo, tomando en cuenta las variables, productos, fuerzas sociales, periodos, regiones y las formas de producción a que las hipótesis hayan otorgado prioridad; considerando de igual forma precisa una serie de elementos metodológicos: el periodo o los periodos que abarcará el estudio; el tipo de precios que se utilizará; cuándo se considerarán los volúmenes y cuándo los valores; el año o periodo base para hacer comparaciones y elaborar índices y tasas de crecimiento; los indicadores de producción y productividad de los cultivos y de las producciones pecuarias, etc. (González *et al.*,1986).

Finalmente de acuerdo con González *et al.* (1986) para que se lleve a cabo un diagnóstico de calidad será necesario incorporar a profesionales provenientes de institutos o departamentos ministeriales de investigación agropecuaria, asistencia

técnica, recursos naturales, comercialización, crédito, reforma agraria, estadística, etc. y consultar a empresarios y técnicos que actúen en la actividad privada.

6.6. Estrategia

De acuerdo con Matus (1993), el procedimiento normativo define acciones para lograr objetivos prefijados, frecuentemente sin usar el conocimiento de los factores que explican y determinan la conducta del fenómeno sujeto de esas acciones; las acciones propuestas no surgen del funcionamiento real, sino se sobrepone a éste a través de una trayectoria que busca eficiencia, no real; es decir, no surge dialécticamente de la realidad. Por otra parte según el autor, El procedimiento estratégico, supone una respuesta del sistema ante alteraciones deliberadas, buscando lograr objetivos conscientemente elegidos. Este procedimiento, lejos de superponerse a la realidad, emerge de ella, es la misma realidad y a la vez se distingue de ésta, por que busca un medio de modificarla basándose en un conocimiento preciso de su funcionamiento:

Eficiencia de la estrategia = f (Acceso a información).

Bajo el entendimiento de Matus (1993) desde el punto de vista económico, el procedimiento estratégico en sus modelos técnicos, cabe ensayar múltiples procedimientos de perturbación del comportamiento socio-económico-político, para decidir las relaciones entre acciones y reacciones, objetivos y metas. Sin embargo de acuerdo al autor y una síntesis entre el modelo normativo y estratégico podría conformar un plan de acción integrado (económico, social y político). Esta concepción de estrategia supone la posibilidad de experimentar o ensayar las acciones y reacciones sociales, Con base en la posibilidad de introducir perturbaciones, puede

deducirse hipotéticamente una política viable, capaz de aproximarse a los objetivos perseguidos, ya que de un proceso de acceso a información sistemática, la estrategia podría converger en los procesos dinámicos de la realidad, aunque debe considerarse siempre que una estrategia es un ensayo de futuro, con cierta dosis de incertidumbre.

Finalmente según Matus (1993) para formular una estrategia, se necesita un análisis riguroso de viabilidad, que se auto-construye en el tiempo y la definición de una estrategia deberá basarse en la estructura inicial (diagnóstico), en las posibilidades de evolución (trayectoria) dirigidos en etapas hacia la imagen objetivo deseada.

Según Matus (1993) en las estrategias la viabilidad se construye dependiendo de las condiciones de cada momento histórico. Una estrategia para el desarrollo, cualquiera que éste sea, por limitadas que sean sus posibilidades de acción material, coloca a la planificación en el centro de los problemas trascendentales de la sociedad.

6.7. Evaluación

De acuerdo con González *et al.* (1986) una vez formulados o diseñados los diversos mecanismos a través de los cuales se da a conocer y se maneja la política planificada de desarrollo; así como posterior a su aplicación; se hace necesario seguir un proceso de evaluación y reformulación para realizar un análisis de los resultados finales, para un periodo más corto, utilizando la política planificada adoptada como elemento de referencia o patrón de comparación.

Según González *et al.* (1986) el objeto de esta etapa es conocer las causas que explican la divergencia entre lo ocurrido y lo planeado y determinar las

responsabilidades que correspondan a fallas en la formulación y en la ejecución. De igual manera, menciona que por exhaustivos y precisos que fueran los resultados de la diagnosis que sirvió para la formulación de la política, el grado de previsibilidad de comportamientos como los señalados es normalmente bajo y va variando a medida que transcurre el periodo abarcado por el mecanismo o el conjunto de mecanismos que se están ejecutando. Comprende fundamentalmente determinar en la evaluación las causas de estas variaciones y corregir los juicios de probabilidad sobre los comportamientos esperados de los agentes involucrados en el proceso de desarrollo agrícola.

En resumen, de acuerdo con González *et al.* (1986) podría decirse que la evaluación permite apreciar las debilidades de la diagnosis, poniendo en evidencia aquellos aspectos que deben ser objeto de corrección o de un estudio mayor. La evaluación y reformulación dejan en evidencia las modificaciones experimentadas por el sistema agropecuario o la sociedad en su conjunto, recogen enseñanzas más definitivas de la ejecución de la política e incorporan los ajustes que el gobierno y los agentes más importantes del sistema agropecuario han hecho a los esquemas o modelos normativos que inspiran el proceso de desarrollo agropecuario.

6.8. Sostenibilidad e intensificación agroecológica

La sostenibilidad puede definirse en términos elementales como:

$$V (O_{t+1}) \geq V (O_t)$$

Donde V es la función de evaluación de salidas o productos representada por O y t es el tiempo. Con base a esto, se puede decir que un sistema llega a ser sostenible cuando el valor total del producto obtenido como resultado de los procesos del sistema no disminuye en el tiempo. A veces lo que interesa es la sostenibilidad del sistema en sí como lo que se observa en un ecosistema, sin embargo en otros, lo importante es mantener las salidas al final de los procesos del sistema sin importar las modificaciones que se tengan que realizar en forma directa y consiente como ocurre en los agroecosistemas (Gallopín, 2003)

Con base en el párrafo anterior, para el logro de la sostenibilidad de los agroecosistemas sin la necesidad de excederse en los insumos de entrada a la hora de esperar obtener salidas; la intensificación agroecológica puede jugar un papel importante al tener bajo su contexto la premisa de buscar cultivos que produzcan conscientemente cerca de su potencial de alto rendimiento bajo condiciones de riego y seco, bajo manejos que garanticen el cuidado a las condiciones ambientales y los recursos naturales (Cassman, 2007). Bajo este contexto los modelos de simulación de cultivos o hidrológicos bien validados pueden proveer de una herramienta muy útil para la estimación de los rendimientos potenciales irrigados y limitados por agua (Yang, 2006).

6.9. Zonificación agroecológica como medio de planeación del desarrollo agrícola

La capacidad de los recursos naturales en el mundo para la producción es una cuestión fundamental para la comunidad. La población continúa creciendo, y los recursos

naturales esenciales, tales como tierra y agua, están disminuyendo en superficie y calidad, los principales factores son la competitividad, las demandas de las industrias y las grandes ciudades, la degradación y la contaminación. El manejo sostenible de los recursos de tierra requiere de políticas concretas y una planificación basada en el conocimiento de estos recursos (FAO, 1997).

El concepto de zonificación agroecológica según García (1979), es la selección de las mejores alternativas de uso de la tierra desde el punto de vista agroecológico y económico dentro de un proceso de planificación agrícola. Para la Comisión de Desarrollo y Medio Ambiente (1991) la zonificación agroecológica es un proceso ordenado de ocupación del espacio agrícola como manera de aprovechar racionalmente los recursos naturales existentes para alcanzar un desarrollo sostenible. Para los procesos de planeación sobre la zonificación de los territorios se han desarrollado herramientas tecnológicas y diversas metodologías que permitan manejar de manera eficiente la información necesaria para llevarla a cabo.

Las principales ventajas de llevar a cabo una zonificación como medio de planeación son el definir el potencial productivo de regiones determinadas para el establecimiento de diversos cultivos (Seeman *et al.*, 1979; Romo, 1985; Pérez-Portilla y Geissert-Kientz, 2006). Esto con la finalidad de poder programar el uso de suelo y mejorar con esto la eficiencia en los suelos ya utilizados y aquellos por utilizar (Sánchez-Carrillo, 1999). Una ventaja más que ofrece el zonificar, es el definir épocas de siembra así como el de otras labores de campos con relación al conocimiento que ofrece el conocer a mayor detalle las condiciones de las regiones zonificadas (Da Silva y Azevedo, 2000).

El propósito de zonificar, es separar áreas con similares potencialidades y limitaciones para el desarrollo delineando zonas agroecológicas que se definen como aquellas que tienen combinaciones similares de clima y características de suelo, y el mismo potencial biofísico para la producción agrícola (FAO, 1997).

De acuerdo a Promault citado por Martínez (1984), existen dos métodos de zonificación; el agroclimático y el agroecológico. En el primero se reconocen los parámetros meteorológicos básicos y su relación con los cultivos, mientras que en el segundo se consideran factores climáticos y edáficos de un territorio específico. En ambos casos, con los factores considerados se determina el grado de aptitud para la producción de especies o variedades. es decir la zonificación puede ser cualitativa o cuantitativa, la cualitativa es la que se realiza más comúnmente reconociendo únicamente los parámetros meteorológicos (temperatura, precipitación, etc.), orográficos (pendiente y altura sobre el nivel del mar) y edáficos (textura, pH, profundidad, capacidad de intercambio catiónico, etc.) básicos y consiste en determinar los parámetros climáticos óptimos para el crecimiento de un cultivo para posteriormente mediante la sobre posición de mapas del área con tales características definir qué áreas son aptas para el desarrollo de un cultivo, comúnmente expresado en categorías (Domínguez-Castillo *et al.*, 1999; Tinoco *et al.*, 2002; Hernández-Cruz *et al.*, 2006 Ramalho-Filho, 2008; Hewson *et al.*, 2009; Wu *et al.*, 2010). En algunas de estas zonificaciones se incluye el uso actual del suelo (Ramalho-Filho, 2008); o la latitud como factores limitantes (Hewson *et al.*, 2009).

Dentro del tipo de zonificación cualitativa en México se han realizado varios trabajos de zonificación agroecológica para determinar el uso potencial y marginal del suelo. Aceves *et al.* (2008) realizaron un estudio agroecológico para determinar zonas potenciales para el cultivo de sorgo en el estado de Tabasco. Mientras que Tinoco *et al.* (2002) aplicaron la metodología para identificar áreas potenciales para el cultivo de maíz en el estado de Veracruz y Tabasco. Ruiz y Silva (1999) zonificaron los valles de Oaxaca para identificar áreas potenciales para el cultivo de maíz bajo condiciones de temporal y poder determinar así las prácticas de producción adecuadas.

La zonificación cuantitativa en cambio se lleva a cabo bajo la implementación de modelos de simulación, los cuales hacen uso de información puntual y mediante ecuaciones y procesos matemáticos estadísticos estáticos generan la información deseada para llevarla a cabo (Price *et al.*, 2002; Evans *et al.*, 2010; Gómez, *et al.*, 2010; Trabucco *et al.*, 2010) o dinámicos (Priya y Shibasaki, 2001; Tan y Shibasaki, 2003; Liu *et al.*, 2007; Liu, 2009; Laux *et al.*, 2010; Hughes *et al.*, 2010; Srinivasan *et al.*, 2010; Faramarzi *et al.*, 2010).

Dentro de este tipo de zonificaciones implementando modelos dinámicos se han realizado algunas utilizando el modelo EPIC complementado con SIG's Priya y Shibasaki (2001) desarrollaron el Spatial-EPIC con el cual simularon el rendimiento de maíz, trigo y arroz en India. Posteriormente Tan y Shibasaki (2003) usaron el mismo modelo modificado para simular arroz, maíz, trigo y soya a una escala global tanto con datos climáticos del 2000 como con datos pronosticados por el IPCC para los años 2010, 2020, 2030, 2040, 2050. Liu *et al.* (2007) realizaron otra versión a la que llamaron GEPIC y con esta simularon el rendimiento mundial de trigo para el año 2000.

Posteriormente con el mismo modelo Liu (2009) estimó la productividad de agua mundial para tres cultivos: maíz arroz y trigo. El propio SWAT ha sido utilizado con la finalidad de realizar zonificaciones, Srinivastavan *et al.* (2010) estimaron el rendimiento de *Panicum virgatum* L.” para la cuenca superior de río Mississippi EUA, comparando los resultados simulados con los medidos. Faramarzi *et al.* (2010) zonificaron de acuerdo a la productividad de trigo su capacidad en la producción de agua para este mismo cultivo.

Con base a lo anterior se puede decir que la zonificación con métodos cuantitativos, permite realizar una explotación racional, de acuerdo con la capacidad productiva de los recursos naturales procurando el equilibrio y la conservación de ecosistemas y agroecosistemas (Rojas, 1985).

7. MATERIALES Y MÉTODOS

7.1. Descripción del área de estudio

El área de estudio comprendió la superficie total del estado de Veracruz (7.18 millones de hectáreas). El estado de Veracruz se localiza en la parte central de la vertiente del Golfo de México, limitando con siete Estados Mexicanos (Tamaulipas, San Luis Potosí, Hidalgo, Puebla, Oaxaca, Chiapas y Tabasco). Cuenta con 212 municipios distribuidos en una superficie de 78 815 Km² y representa el 3.7 % de la superficie del país. Sus coordenadas geográficas extremas son: al norte 22° 28´, al sur 17° 09´ de latitud Norte, al Este 93° 36´, al Oeste 98° 39´ de longitud Oeste. El litoral veracruzano es de 745 km de longitud con una altitud de 0 a 5, 610 msnm. La Figura 9 muestra la localización del estado de Veracruz, mientras que en las Figuras 10, 11, 12 y 13 se muestran la distribución geográfica de los climas, topografía, suelos, y uso del suelo, respectivamente de acuerdo a mapas digitales escala 1:250,000 obtenidos del INEGI (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática).



Figura 9. Localización del estado de Veracruz.

De acuerdo con la Figura 10 en el 86 % de la superficie del estado dentro de las 7.18 millones de hectáreas predominan los climas tropicales cálidos húmedos (Am y Af) y cálidos subhúmedos (Aw_0 , Aw_1 y Aw_2). Mientras que en el 14 % restante de la superficie predominan los climas Semi-cálido húmedo y subhúmedo (7 %), Templado húmedo y sub-húmedo (6 %) y clima árido y semiárido (1 %).

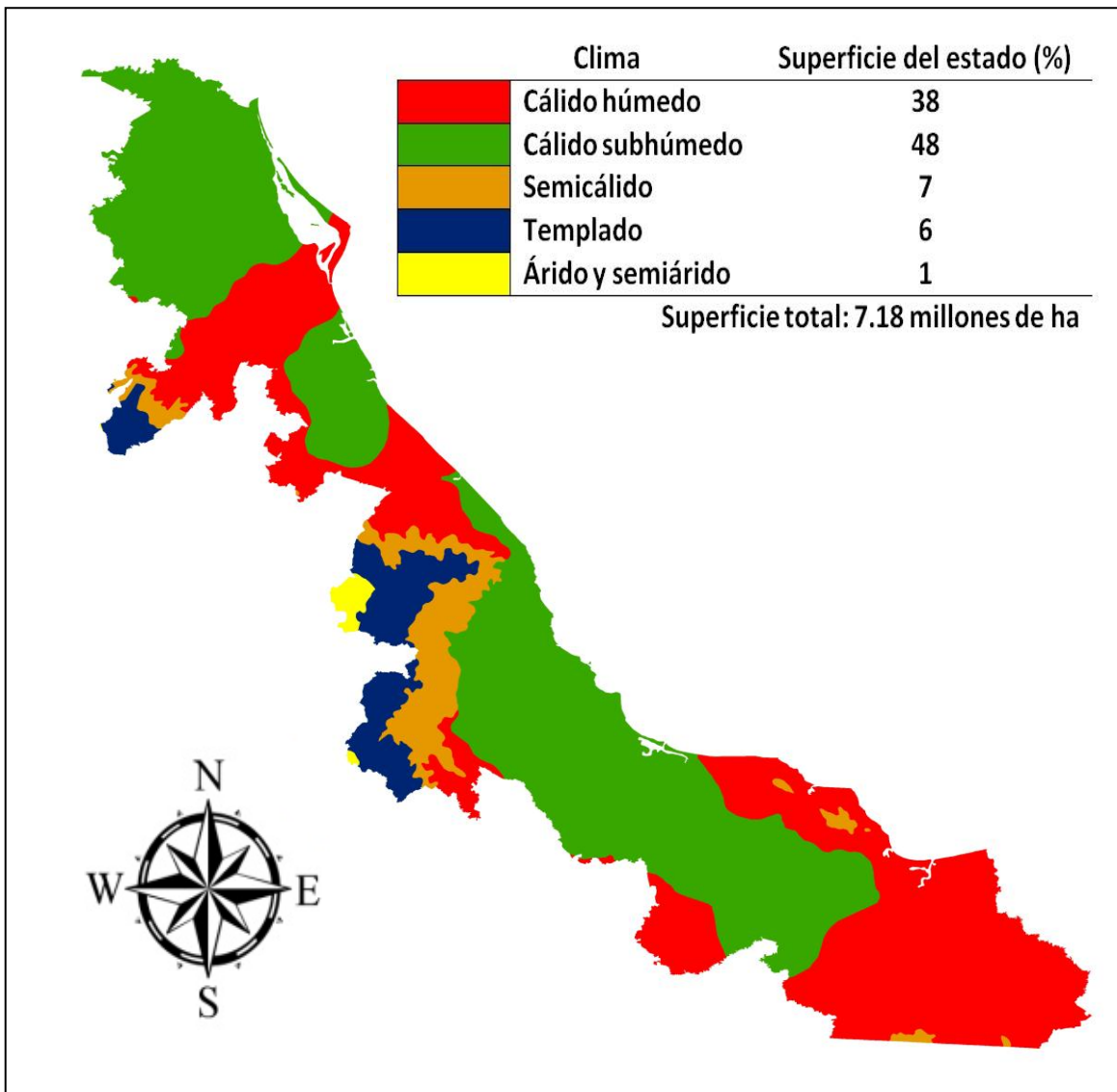


Figura 10. Climas del estado de Veracruz.
Fuente: Agrupación de tipos de clima mapa de CONABIO.

Orográficamente el 78 % de la superficie del estado de Veracruz de acuerdo a la Figura 11 se presenta en su mayoría plana con pendientes que van desde 0 % hasta 8 %. Un 16 % de la misma se encuentra con una distribución de pendientes con valores entre 8 y 30 %; el resto de la superficie del estado (6 %) presenta pendientes mayores a 30 % en las serranías y zonas montañosas.

Al correlacionar la orografía con el clima se puede encontrar que en las zonas del estado con pendientes menores a 8 %, los climas predominantes son: cálidos húmedos y subhúmedos, mientras que en las zonas con valores entre 8 y 30 % se puede encontrar climas semicálidos húmedos y subhúmedos, mientras que en las zonas con pendientes mayores al 30 % predominan los climas templados húmedos y subhúmedos (Figura 10).

Por otra parte, existe una alta correlación entre el clima y la orografía conforme a los tipos de suelos presentes en la superficie del estado como se muestra en la Figura 10, Figura 11 y Figura 12.

Con base a lo mencionado, en el Cuadro 3 se muestran las condiciones climáticas y orográficas bajo las cuales se encuentran los tipos de suelos del estado de Veracruz.

Cuadro 3. Condiciones climáticas y orográficas bajo las cuales se encuentran los tipos de suelos del estado de Veracruz.

Tipo de suelo	Ejemplos de suelos representativos	clima	Ubicación	Pendiente
Arcillosos pesados	Vertisoles y Gleysoles	Climas cálido subhúmedo principalmente	Norte y centro-sur del estado	Zonas planas menores a 8 %
Suelos Francos	Feozems, Luvisoles, Castañozems,	Climas cálidos húmedos y subhúmedos	Norte, centro y sur del estado	Zonas planas con pendientes menores de 15 %
Suelos Ácidos	Acrisoles y Andosoles	Clima húmedo y semicálido húmedo	Zona compacta en el centro-norte y dispersos en el sur del estado	En Zonas planas y de montaña
Suelos Arenosos	Arenosoles	Clima cálido subhúmedo	se localizan en dos grandes áreas compactas en las zonas norte y sur del estado y a lo largo de la costa	En su mayoría en Zonas planas a excepción de algunas zonas de montaña en el norte del estado
Suelos someros	litosol	Semicálido templado	y Centro y Norte del estado	Zonas montañosas

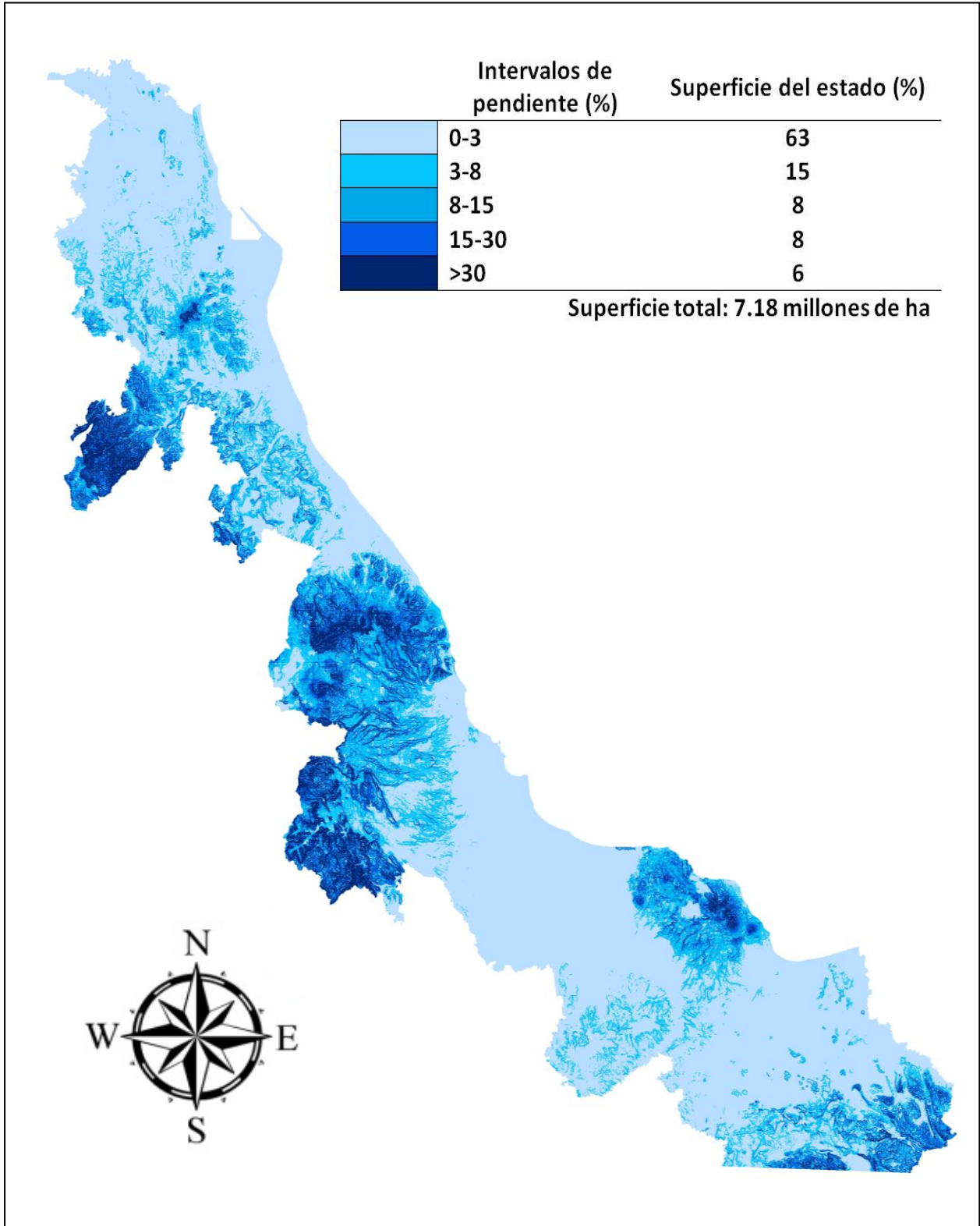


Figura 11. Topografía y pendiente del terreno en el estado de Veracruz. Fuente: DEM de 90 m.

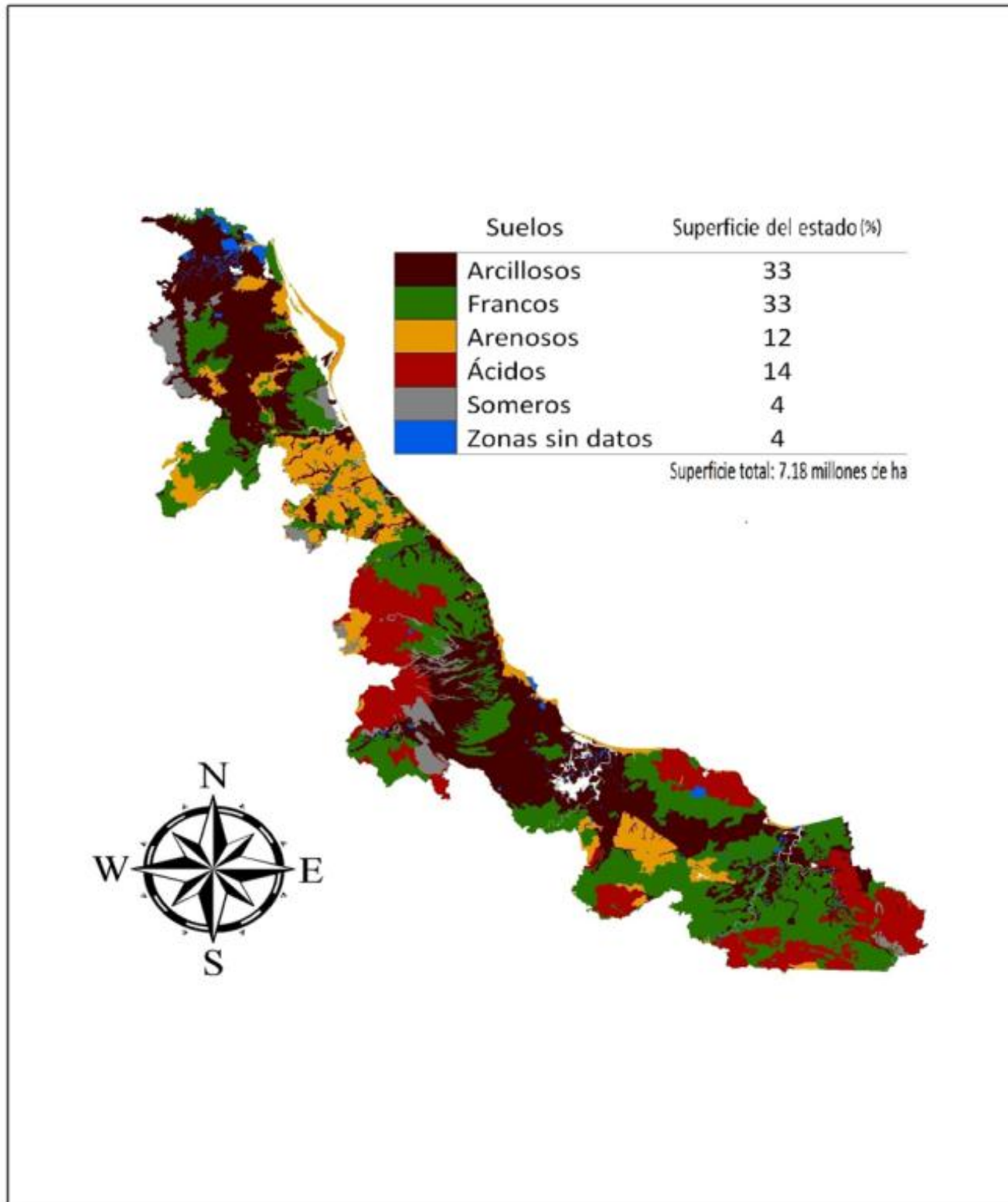


Figura 12. Suelos del estado de Veracruz. Mapa CONABIO.

De acuerdo con el análisis de la Figura 10, Figura 11 y Figura 12, las zonas forestales con selvas y bosques que ocupan el 18 % de la superficie, se distribuyen principalmente en áreas montañosas con pendientes mayores al 15 % bajo climas cálidos húmedos y semicálidos húmedos y sub-húmedos en suelos ácidos y francos de buena fertilidad. En la Figura 13 se muestra el mapa de la distribución del uso de suelo en la superficie del estado de Veracruz (Forestal, Agrícola, Pecuario y zonas urbanas y cuerpos de agua). Los pastizales con un 53 % de la superficie se localizan a lo largo y ancho del estado, siendo los extremos norte y sur las áreas donde más superficie ocupa esta clase de uso de suelo, principalmente en suelos arcillosos y francos. Los pastizales se localizan casi en su totalidad en los climas cálidos húmedos y subhúmedos.

Las áreas agrícolas en Veracruz ocupan el 25 % de la superficie total localizándose principalmente sobre suelos arcillosos, francos y arenosos. Los cultivos anuales se localizan en las zonas más planas, principalmente con pendientes menores de 15 %, mientras que los cultivos perennes como el café y los cítricos se localizan en terrenos con pendientes entre 8 y 30 % aproximadamente.

7.2. Generación de archivos requeridos para correr el modelo Arc SWAT

Para la simulación del rendimiento potencial de biomasa de *Pennisetum purpureum* utilizando el SWAT fueron necesarios tres diferentes tipos de archivos: 1) Mapas que permiten conocer la ubicación espacial de cada categoría dentro de los factores que son analizados por el modelo; 2) Bases de datos que contienen la información referente

a cada categoría y factor 3) Catálogos de archivos de texto que funcionan de enlace entre el modelo y las bases de datos que este utiliza.

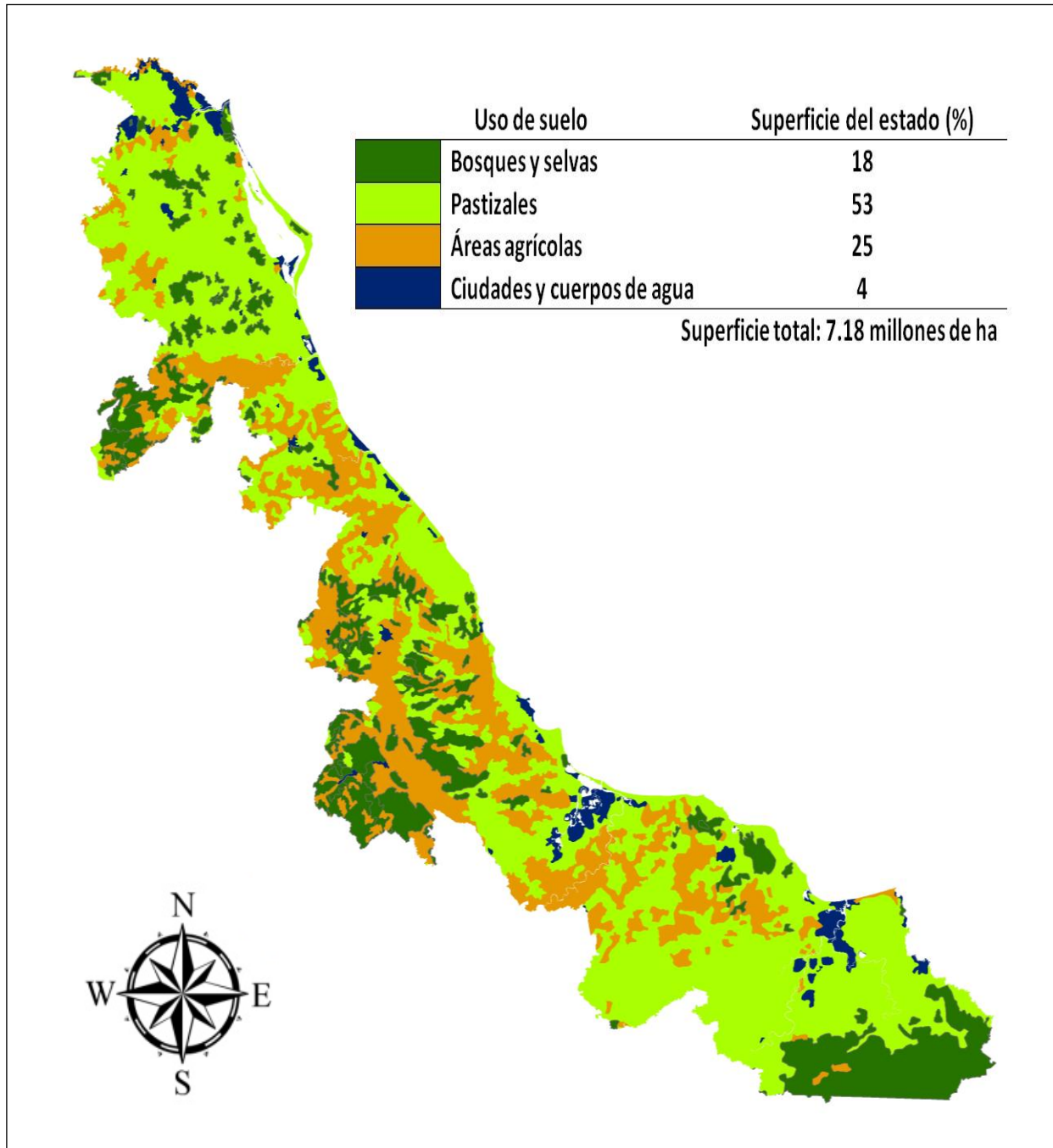


Figura 13. Uso del suelo en el estado de Veracruz.
Fuente: Agrupación de usos de suelo mapa CONABIO

7.3. Mapas

Para el proceso de simulación con el modelo SWAT se utilizaron cuatro mapas: 1) el DEM (Modelo de elevación digital) elaborado a partir de curvas de nivel de INEGI de la zona sur-sureste de México; 2) el mapa de edafología elaborado a partir de cartas digitales de edafología de INEGI escala 1:250000 serie 3, en el cual fueron separados en nuevas categorías los suelos que presentaron fase lítica; 3) el mapa de ríos de INEGI y 4) un mapa de uso de suelos el cual se elaboró considerando el total del área del estado de Veracruz como objeto para simular el potencial de producción de biomasa de *Pennisetum purpureum*. Los mapas utilizados en el proceso de simulación se usaron en formato "grid" por motivos de requerimiento del software con tamaño de celda de 90 m correspondiente a la escala del DEM con una proyección Universal Transversa de Mercator (UTM) en zona 14 de hemisferio norte, con base en el elipsoide WGS84, eligiendo esta proyección por ajustarse a la superficie del estado.

7.4. Base de datos y catálogos

El modelo cuenta con un archivo que contiene las bases de datos necesarias para llevar a cabo las simulaciones y cálculos que este realiza. Dentro de las bases de datos del programa, se accedió a la de edafología, parámetros fisiológicos del cultivo, clima, manejo y fertilizantes, para incluir la información local del estado de Veracruz y otras categorías que no venían en el modelo.

7.4.1. Base de datos edafológica

De acuerdo con la descripción de las sub unidades de suelo FAO y a datos analíticos de 829 perfiles de suelo presentados por INEGI en cartas edafológicas para los 7

estados (Veracruz, Tabasco, Campeche, Yucatán, Quintana Roo, Chiapas y Oaxaca) de la zona tropical del sureste de México se elaboró un perfil típico para 58 clases de suelo compuestas por 46 sub unidades FAO + 13 nuevas clases creadas por presentar fase lítica. Los datos no presentados en las cartas edafológicas de INEGI y requeridos por el modelo fueron estimados de diferentes maneras y fuentes (Cuadro 4). En el Cuadro 5 se presenta un ejemplo de los datos ingresados al programa para el perfil típico del suelo feozem Háplico.

Cuadro 4. Metodología y fuentes utilizadas para calcular los datos de suelo faltantes.

Parámetro	Método usado para su obtención
Profundidad	Reportado en cartas edafológicas ¹
Textura	Reportado en cartas edafológicas ¹
Materia orgánica	Reportado en cartas edafológicas ¹
Conductividad eléctrica	Reportado en cartas edafológicas ¹
Conductividad hidráulica saturada	A partir de textura del suelo ²
Densidad aparente	A partir de textura del suelo ²
Capacidad de agua disponible	A partir de textura del suelo ²
Carbono orgánico	Carbono orgánico=0.95*(Materia orgánica) ³
USLE_K	$K_{usle} = \frac{0.00021 * M^{1.14} * (12 - MO) + 3.25 * (C_{soilstr} - 2) + 2.5(C_{perm} - 3)}{100}$
Albedo	Estimado a partir de materia orgánica ⁴

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

Cuadro 5. Características del perfil típico del suelo Feozem Haplico

Horizonte	Prof.	Text.	D.A.	H. D.	C.O.	C.H.S.	C.R.	Albedo	USLE K	C.E
A	282	16-28-56	1.47	0.11	1.99	12.1	0	0.09	0.2	1
B1	912	18-24-58	1.45	0.11	0.71	0.11	0	0.17	0.28	1

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

7.4.2. Parámetros fisiológicos de *Pennisetum purpureum* introducidos al SWAT

En el Cuadro 6 se muestran los parámetros fisiológicos de *Pennisetum purpureum*. Introducidos en el modelo. La mayoría de los parámetros fueron obtenidos por default del cultivo “Alamo swichtgrass” que ya viene incluido en la base de datos de cultivos del modelo, considerando que es una gramínea perenne similar a *Pennisetum purpureum*. Los parámetros de mayor sensibilidad en el modelo (Eficiencia en el uso de la radiación, índice de área foliar, índice de cosecha, temperatura base, temperatura óptima, máxima altura de la planta, máxima profundidad de raíces, coeficiente de extinción de la luz) fueron obtenidos de diversas fuentes de literatura.

Cuadro 6. Parámetros fisiológicos de *Pennisetum purpureum*. Utilizados por SWAT para simular el rendimiento de biomasa seca.

Parámetro fisiológico	Unidad	Valor
Eficiencia en el uso de la radiación (RUE) ¹	Kg ha ⁻¹ (MJm ⁻²) ⁻¹	40
Índice de cosecha para óptimas condiciones de crecimiento (HI) ¹	Kg ha ⁻¹ (Kg ha ⁻¹) ⁻¹	0.95
índice máximo de área foliar potencial (BLAI) ^{1,2}	m ² m ⁻²	8
Fracción del crecimiento correspondiente al primer punto de la curva de desarrollo óptimo de área foliar (FRGRW1) ¹	Fracción	0.1
Fracción del área foliar máxima correspondiente al primer punto de la curva de desarrollo óptimo de área foliar (LAIMX1) ¹	Fracción	0.2
Altura máxima del dosel ^{1,3}	M	4
Profundidad máxima de las raíces ^{1,3}	M	2.5
Fracción del total unidades calor correspondientes al primer punto de la curva de desarrollo óptimo de área foliar (FRGW2) ¹	Fracción	0.2
Fracción del área foliar máxima correspondiente al primer punto de la curva de desarrollo óptimo de área foliar (LAIMX2) ¹	Fracción	0.2
Fracción del crecimiento donde el área foliar comienza a declinar (DLAI) ¹	(unidades calor)(unidades calor) ⁻¹	0.7
Temperatura óptima (To) ^{1,4}	°C	37
Temperatura base (Tb) ^{1,3,5,6}	°C	10
Fracción de nitrógeno en la cosecha (CNYLD) ¹	Kg N/Kg rendimiento	0.016
Fracción de fósforo en la cosecha (CPYLD) ¹	Kg N/Kg rendimiento	0.0022

Continuación del Cuadro 6.

Parámetro fisiológico	Unidad	Valor
Fracción de nitrógeno en la emergencia (BN1) ¹	Kg N/Kg de biomasa	0.035
Fracción de nitrógeno a la mitad del ciclo (BN2) ¹	Kg N/Kg de biomasa	0.015
Fracción de nitrógeno en la madurez (BN3) ¹	Kg N/Kg de biomasa	0.0038
Fracción de fósforo en la emergencia (BP1) ¹	Kg P/Kg de biomasa	0.0014
Fracción de fósforo a la mitad del ciclo (BP2) ¹	Kg P/Kg de biomasa	0.001
Fracción de fósforo a la madurez (BP3) ¹	Kg P/Kg de biomasa	0.0007
Límite menor de índice de cosecha (WSYF) ¹	Kg ha ⁻¹ (Kg ha ⁻¹) ⁻¹	0.9
Valor mínimo para el factor de erosión hídrica de la cobertura del suelo (USLE_C) ¹	A dimensional	0.003
Conductancia estomatal máxima a alta radiación solar y bajo déficit de presión de vapor (GSI) ¹	m s ⁻¹	0.005
Déficit de presión de vapor correspondiente al segundo punto de la curva de conductancia estomatal (VPDFR) ¹	kPa	4
Fracción de la máxima conductancia estomatal correspondiente al segundo punto de la curva de conductancia estomatal (FRGMAX) ¹	Fracción	0.75
Tasa de disminución en la eficiencia de la eficiencia en el uso de la radiación por unidad incrementada en el déficit de presión de vapor (WAVP) ¹	Porcentaje	8.5
Concentración elevada de CO ₂ atmosférico correspondiente al segundo punto en la curva de eficiencia en el uso de la radiación (CO ₂ HI) ¹	uL L ⁻¹	660
Eficiencia en el uso de la radiación correspondiente al segundo punto en la curva de eficiencia en el uso de la radiación (BIOEHI) ¹	Proporción	46
Coeficiente de descomposición de los residuos del cultivo (RSDCO) ¹	Fracción	0.05
índice de área foliar mínimo para la planta durante el periodo de dormancia (ALAI_MIN) ¹	m ² m ⁻²	0
Fracción de la biomasa de acumulada del árbol que se trasforma en residuo durante la dormancia (BIO_LEAF) ¹	Fracción	0
Número de años requeridos para que la especie alcance su máxima madurez (MAT_YRS) ¹	Años	0
Máxima biomasa para un bosque (BMX_TREES) ¹	ton ha ⁻¹	0
Coeficiente de extinción de la luz (EXT_COEF) ¹	A dimensional	0.65
Fracción de mortandad de la biomasa (BM_DIEOFF) ¹	A dimensional	0.1

Fuente: 1: (Kiniry, 1995; Kiniry, 1996); 2: (Carvalho, 2005); 3: (Enríquez *et al.*, 1999); 4: (Skerman y Riveros, 1990); 5: (Barus y Fisher, 1991); 6: (Pezo, 1997).

7.4.3. Base de datos de estaciones y datos climáticos

Para analizar el factor climático, dentro del modelo se introdujeron 137 estaciones climáticas con una base de datos diarios de precipitación pluvial, temperatura máxima y mínima de al menos 20 años dentro del periodo 1960-2000. Con dicha información, mediante el generador climático EPIC (Sharply y Williams, 1990) se generaron los datos diarios faltantes (temperatura máxima, temperatura mínima, precipitación pluvial,

radiación solar, humedad relativa) para el periodo 1960-2010, así como las estadísticas necesarias requeridas por la base de datos climática del modelo SWAT (Cuadro 7).

7.4.4. Implementación de estaciones climáticas en el SWAT

El modelo de simulación SWAT utiliza los datos de las estaciones climáticas introducidas en su base de datos climáticos. Una vez creada, las subcuencas en el proceso de simulación, este calcula el centroide de cada subcuenca y por proximidad a este, trasloca los datos climáticos de la estación más cercana al centroide de cada subcuenca. De esta manera, el modelo introdujo 95 estaciones climáticas distribuidas en el total de la superficie del estado de Veracruz (Figura 14).

Cuadro 7. Ejemplo de datos estadísticos de la estación meteorológica Ver30153.

Parámetros	Meses											
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Tmax	24.7	27.8	30.1	32.5	32.50	32.00	32.80	32.30	29.80	28.30	25.80	24.70
Tmin	14.5	14.9	17.8	20.0	22.60	22.80	22.00	22.00	21.90	20.30	18.10	16.40
DETmax	5.90	5.30	4.90	4.00	3.00	2.80	2.60	2.90	3.60	4.00	4.80	5.20
DETmin	3.50	3.00	3.10	2.70	2.50	1.30	1.00	1.00	1.70	2.30	3.20	2.90
PPM	69.6	96.2	81.8	52.2	76.20	137.6	125.8	118.3	214.9	205.9	146.7	113.5
DEPPM	11.3	16.9	15.4	16.6	25.35	17.95	19.25	18.65	36.89	25.36	26.49	16.18
CAPPM	2.68	2.88	3.71	2.51	2.16	2.78	4.66	2.20	3.40	1.94	2.48	2.95
PDHDS	0.22	0.21	0.16	0.08	0.10	0.17	0.20	0.19	0.18	0.22	0.19	0.25
PDHDH	0.37	0.40	0.48	0.42	0.25	0.52	0.38	0.43	0.49	0.47	0.35	0.41
PDPM	8.00	7.30	7.40	3.70	3.60	8.00	7.60	7.60	7.80	9.10	6.70	9.30
PMMH	15.1	20.6	23.0	25.0	35.20	36.70	28.80	35.30	55.00	44.00	43.00	20.60
RS	12.0	14.0	16.0	19.0	19.00	20.00	20.00	21.00	19.00	17.00	15.00	13.00

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

7.4.5. Manejo de *Pennisetum purpureum* introducido al SWAT

El manejo de *Pennisetum purpureum* Fue diseñado para la obtención de alto rendimiento de biomasa en condiciones de secano de acuerdo con Enríquez *et al.* (1999). En el Cuadro 9, se presenta el manejo anual del cultivo introducido al modelo para la época de temporal, con dos cosechas correspondientes. Algunas fórmulas de fertilización fueron introducidas a la base de datos de fertilizantes del modelo, esto en cuestión de cantidades de nitrógeno y fósforo, ya que el potasio no es considerado por el modelo.

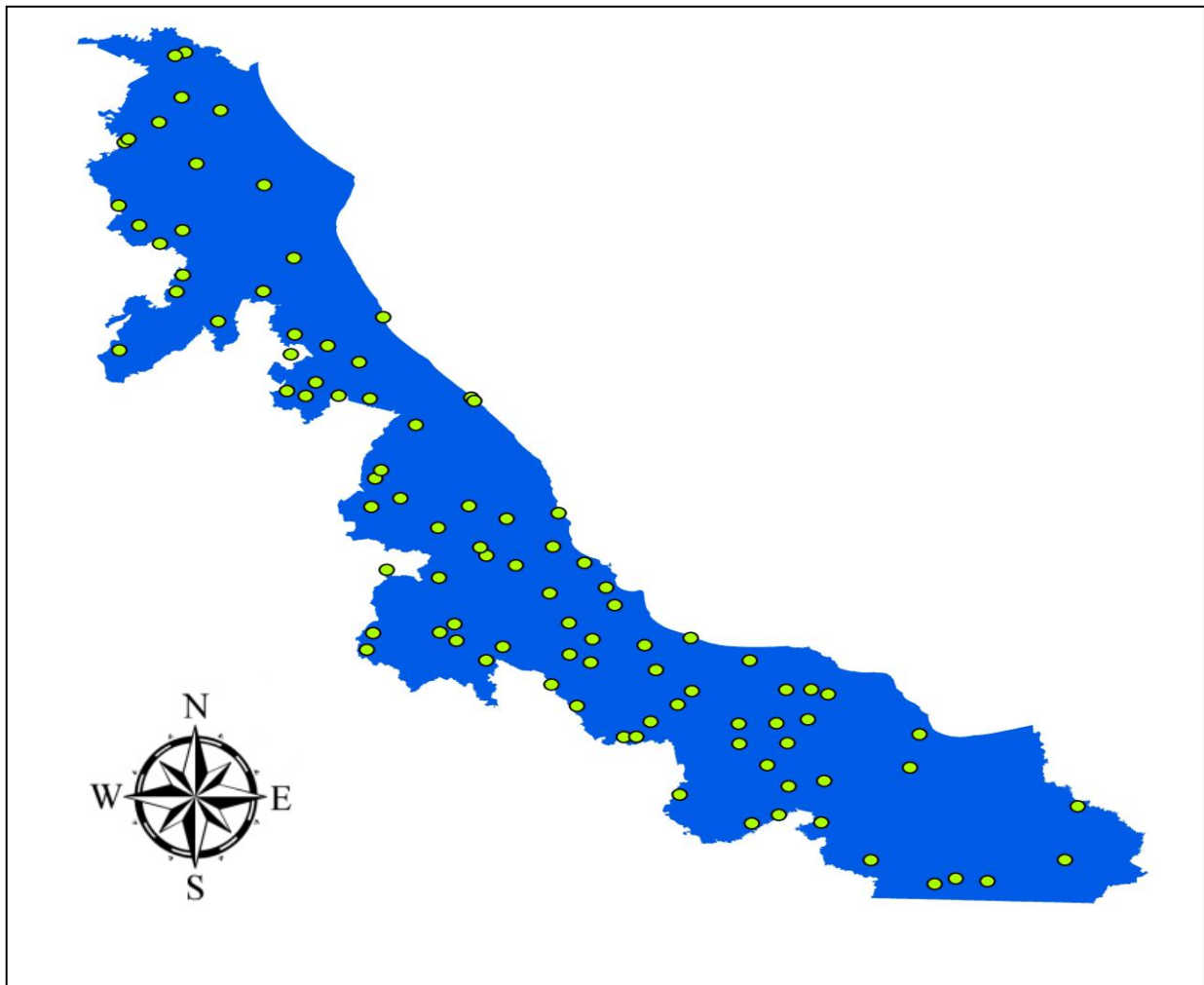


Figura 14. Ubicación de las 95 estaciones climáticas usadas por SWAT.

7.5. Catálogos de bases de datos introducidos al modelo

Se elaboraron cuatro catálogos para relacionar cuatro diferentes tipos de información introducidas al modelo como se muestra en el Cuadro 8.

Cuadro 8. Catálogos elaborados para relacionar la información introducida al modelo.

Catálogo	Información a relacionar con el modelo
Catálogo de suelos	Relaciona el mapa de suelos con las características de cada clase.
Catálogo de estaciones climáticas	Introduce las estadísticas climáticas así como las coordenadas geográficas de 137 estaciones introducidas al modelo.
Catálogo de datos diarios de temperatura	Introduce los datos diarios de temperatura máxima y mínima de las estaciones climáticas introducidas al modelo, así como las coordenadas geográficas correspondientes.
Catálogo de datos diarios de precipitación	Introduce los datos diarios de temperatura máxima y mínima de las estaciones climáticas introducidas al modelo, así como las coordenadas geográficas correspondientes.

7.6. Generación de las subcuencas en el proceso de simulación

El modelo dentro del proceso de simulación delimitó la cuenca y las subcuencas con base al modelo de elevación digital (DEM) y el mapa de ríos del estado de Veracruz para indicar al modelo las corrientes fluviales aumentando con esto la precisión en la generación de las subcuencas. Para el cálculo y generación de subcuencas, el modelo calcula la dirección y acumulación de flujo generando una serie de puntos dentro de una red de drenaje los cuales indican las desembocaduras o salidas de una corriente

de flujo a otra. En este paso, se escogieron todas las salidas y desembocaduras con lo cual se generaron al final un total de (224) subcuencas.

7.6.1. Generación de las unidades de respuesta hidrológica (HRU) en el proceso de simulación

Las HRU son áreas dentro de la distribución geográfica del área de estudio, que comparten un mismo uso de suelo, tipo de suelo, misma subcuenca y rango de pendiente. Con base a esto durante el proceso de simulación, después de haber creado las subcuencas, se introdujo al modelo el mapa de uso de suelo del estado, edafología y mediante el DEM se seleccionaron 5 rangos de pendientes [(1) 0-3 %, (2) 3-8 %, (3) 8-15 %, (4) 15-30 % y (5) mayor de 30 %]. Al final de este proceso se crearon (4053) URH.

Cuadro 9. Manejo de *Pennisetum purpureum* introducido en el modelo SWAT para el proceso de simulación.

Año 1 - Cosecha 1						
Labor	Fecha	Actividad	Mano de obra	Cantidad	Insumo	Cantidad de insumo
Preparación del suelo	02/05	Chapeo	Servicio	1	Tractor	-----
	15/05	Subsoleo	Servicio	1	Tractor	-----
	25/05	Barbecho	Servicio	1	Tractor	-----
	29/05	Rastreo	Servicio	2	Tractor	-----
	30/05	Rastreo cruzado	Servicio	1	Tractor	-----
	31/05	Rayado	Servicio	1	Tractor	-----
Siembra	01/06	Siembra	Jornales	10	Material vegetativo <i>Pennisetum</i>	2.5 ton
Control de malezas	-----	-----	-----	-	-----	-----
Fertilización	30/06	Fertilización	Jornales	2	46-00-00	100 Kg
	30/06	Fertilización	Jornales	2	18-46-00	50 Kg
	30/06	Fertilización	Jornales	2	20-10-10	100 Kg
Manejo de plagas y enfermedades	-----	-----	-----	-----	-----	-----
Cosecha 1	31/08	Cosecha	servicio	1	Tractor	-----

Continuación del Cuadro 9.

Año 1 - Cosecha 2						
Control de malezas						
Fertilización	15/09	Fertilización	Jornales	2	46-00-00	100 Kg
	15/09	Fertilización	Jornales	2	18-46-00	50 Kg
	15/09	Fertilización	Jornales	2	20-10-10	100 Kg
Manejo de plagas y enfermedades						
Cosecha	31/12	Cosecha	servicio	1	Tractor	

Fuente: (Enríquez *et al.*, 1999)

7.6.2. Incorporación de los datos climáticos para el proceso de simulación

Dentro del proceso de simulación, para el análisis de los factores climáticos por parte del modelo se introdujeron datos diarios de temperatura y precipitación de 137 estaciones climáticas mediante los catálogos generados, de las cuales el modelo por proximidad a los centroides de las subcuencas tomó 95 estaciones.

7.6.3. Incorporación del manejo *Pennisetum purpureum* al modelo

Una vez generadas las subcuencas, las unidades de respuesta hidrológica y haber introducido los datos diarios climáticos de 95 estaciones dentro del estado con base a que el trabajo de investigación se realizó bajo el concepto de condiciones de temporal, se procedió a introducir en el programa el manejo anual de *Pennisetum purpureum* de acuerdo a Enríquez *et al.* (1999) para todas las URH (4053) generadas dentro de la superficie total de Veracruz.

7.6.4. Periodo de simulación

Una vez cargado el manejo y habiendo realizado los pasos necesarios dentro del proceso de simulación, se procedió a simular el periodo 2000-2010 obteniendo al final de la simulación un archivo de salida el cual dentro de los aspectos numéricos que muestra, incluye el rendimiento promedio de biomasa por URH. Ya obtenido este valor se procedió a cartografiar el rendimiento de cada una de las (4053) URH del estado de Veracruz estableciendo diferentes intervalos de rendimiento.

7.7. Análisis de resultados

Se realizó un análisis de correlación entre los factores climáticos y edáficos en contraste con el rendimiento potencial obtenido en el mapa. Para este análisis se llevó a cabo la categorización de tres variables de suelo y clima, las cuales son las de mayor peso a la hora de determinar el rendimiento potencial.

Las variables utilizadas para el suelo fueron: Profundidad, contenido de materia orgánica (MO) y textura general del perfil y sus capas; esta última estaba ordenada por horizontes de suelo, existiendo en algunos casos hasta cuatro diferentes proporciones de tamaño de partículas, por lo cual se recurrió a unificar una textura general con base a dicha proporción, la profundidad del perfil y la densidad aparente de cada horizonte.

La categorización de suelo utilizada al final de dicho proceso se muestra en el Cuadro 10.

Cuadro 10. Clasificación de suelos por textura, profundidad y MO

Textura		Suelo
Arcillo arenoso		Gp
Arcilloso		Ah, Ao, Ap, Gv, La, Lc, Lc(L), Lf, Lg, Lo, Lo(L), Lp, Lv, Nd, Vc, Vp, Vp(L)
Arena franca		Bd, Hh, Rc, Rd (L), Re, Re (L), Th, Zo
Franco		Be, Bg, Bk, Gm, Hc, I, Jc, Je, To, To (L)
Franco arcillo arenoso		Bc, Bf, Ge, Hc (L), Hh (L), Jg, Qc, Rc (L), We
Franco arcilloso		Bh (L), Bk(L), Bv, E, Hl, Kh, Kk, Kl, Rd, Zg
Franco arenoso		Tm

Profundidad (cm)	Intervalo	Suelo
Delgados	< 30	I, E,
Someros	30-70	Vp(L), Hc(L), Hh(L), Lc(L), Lo(L), Bk(L), Bh(L), Re(L), Rd(L), Rc(L), To(L), Tm, Kh, We, Zo, Zg
Profundos	70-123	Rd, Vc, Bc, Gm, Bd, Hh, Th, Bg, Qc, Bk, Bf, Lc, To, Ao, Hc, Je, Be, Lg, Re, Rc, Hl, Gv, Gp, Lp, Ah, Bv,
Muy profundos	>123	Ap, Lf, La, Lo, Ge, Jg, Kl, Kk, Lv, Jc, Vp, Nd

O (%)	Intervalo	Suelo
Bajo	< 3	We, Re, Vp(L), Re(L), Bf, Hc(L), Bg, Rd(L), Vc, Kl, Kk, Gp, Hl, Ao, Gv, Qc, Hh(L), Rc, Lv, Vp, Hh, Hc, Bk(L), Ap, Rd, Lg, Ge, Jg, Zg, Jc, Be, Je, Bv, Rc(L), Gm, To(L), To, Lo, Bh(L), La, Nd
Adecuado	> 3	Lf, Bk, Lc, Bc, Lp, Bd, Ah, Tm, Lc(L), Lo(L), Zo, E, Th, Kh, I

Conforme a las variables climáticas utilizadas, con base a que el clima de cada URH es determinado por la estación más cercana al centroide de la subcuenca a la que pertenece, éstas (4053 URH) se agruparon en tres variables utilizadas para el análisis de correlaciones: a) temperatura media anual, la cual se obtuvo de promediar la suma de la temperatura máxima y la temperatura mínima dividida entre dos para los doce meses, b) precipitación promedio anual, que fue la suma de las precipitaciones mensuales y c) radiación promedio anual, que se obtuvo al sumar el producto del promedio diario de cada mes por el número total de días de ese mes. Las categorías y su distribución en el estado de Veracruz se muestran en la Figura 15.

Las variables edáficas y climáticas antes mencionadas fueron analizadas de manera individual con base a su relación-impacto en el rendimiento potencial de *Pennisetum purpureum*.

Para la generación del índice de productividad de *Pennisetum purpureum* se tomaron en cuenta los factores físicos del suelo y elementos climáticos del estado de Veracruz. Dentro de los factos físicos del suelo se consideraron: La profundidad, la textura, contenido de materia orgánica, drenaje y pendiente del suelo. Para el análisis de los elementos climáticos únicamente se consideraron la precipitación y la temperatura.

Primero, mediante los rendimientos arrojados por el modelo acorde a cada una de las 4053 unidades de respuesta hidrológica (URH) simulados con el modelo SWAT dentro del total de la superficie del estado de Veracruz descartando únicamente áreas correspondientes a ciudades y cuerpos de agua y áreas excedentes a los 2000 msnm; se procedió a realizar un ordenamiento de las URH's en cinco grupos de factores físicos del suelo mencionados en el párrafo anterior con base a las características de cada tipo de suelo y porcentaje de pendiente de las mismas. Para los factores climáticos se realizó la misma operación.

La caracterización y clasificación de las URH por medio del tipo de suelo correspondiente, se basó en los atributos de las diferentes unidades de suelo descritas con base a la clasificación FAO y la opinión de edafólogos expertos.

La clasificación de los factores físicos del suelo, así como su categorización se muestran en el Cuadro 11.

Cuadro 11. Clasificación de los factores físicos del suelo correspondiente a las URH's.

Variable	Division	Soils (FAO classification)
1.- Profundidad	1. Someros (<30 cm.)	I, E,
	2. Medios (30-70 cm.)	Vp(L), Hc(L), Hh(L), Lc(L), Lo(L), Bk(L), Bh(L), Re(L), Rd(L), Rc(L), To(L), Tm, Kh, We, Zo, Zg
	3. Profundos (>70 cm.)	Rd, Vc, Bc, Gm, Bd, Hh, Th, Bg, Qc, Bk, Bf, Lc, To, Ao, Hc, Je, Be, Lg, Re, Rc, Hl, Gv, Gp, Lp, Ah, Bv, Ap, Lf, La, Lo, Ge, Jg, Kl, Kk, Lv, Jc, Vp, Nd
2.- Textura	1. Gruesa	Bd, Hh, Rc, Rd(L), Re, Re(L), Th, Tm, Zo
	2. Media	Be, Bg, Bk, Gm, Hc, I, Jc, Je, To
	3. Fina	Ah, Ao, Ap, Bc, Bf, Bh(L), Bk(L), Bv, E, Ge, Gp, Gv, Hc(L), Hh(L), Hl, Jg, Kh, Kk, Kl, La, Lc, Lc(L), Lf, Lg, Lo, Lo(L), Lp, Lv, Nd, Qc, Rc(L), Rd, Vc, Vp, Vp(L), We, Zg.
3.- Contenido de materia Organica	1. bajo	Ao, Ap, Be, Bf, Bg, Bk(L), Bv, Ge, Gp, Gv, Hc, Hc(L), Hh, Hh(L), Hl, Jc, Je, Jg, Kk, Kl, Lg, Lv, Qc, Rc, Rd, Rd(L), Re, Re(L), Vc, Vp, Vp(L), We, Zg.
	2. Medio	Ah, Bc, Bd, Bh (L), Bk, Gm, La, Lc, Lc(L), Lf, Lo, Lo (L), Lp, Nd, Rc(L), Tm, To, Zo.
	3. Alto	E, I, Kh, Th.
4.- Drenaje interno	1. Rapido	E, I, Qc, Rc, Rc(L), Rd, Rd(L), Re, Re(L), Th, Tm, To.
	2. Medio	Ah, Ao, Ap, Bc, Bd, Be, Bf, Bh(L), Bk, Bk(L), Hc, Hc(L), Hh, Hh(L), Jc, Je, Kh, Kk, La, Lc, Lc(L), Lf, Lo, Lo(L), Lp, Nd, We, Zo.
	3. Lento	Bg, Bv, Ge, Gm, Gp, Gv, Hl, Jg, Kl, Lg, Lv, Vc, Vp, Vp(L), Zg.
5.- Pendiente	1. 0-8 %	
	2. 8-15 %	
	3. >15 %	

La clasificación de las URH's con base a las variables climáticas (temperatura, precipitación) antes mencionadas se llevó a cabo conforme a las categorías que se muestran en la Figura 15.

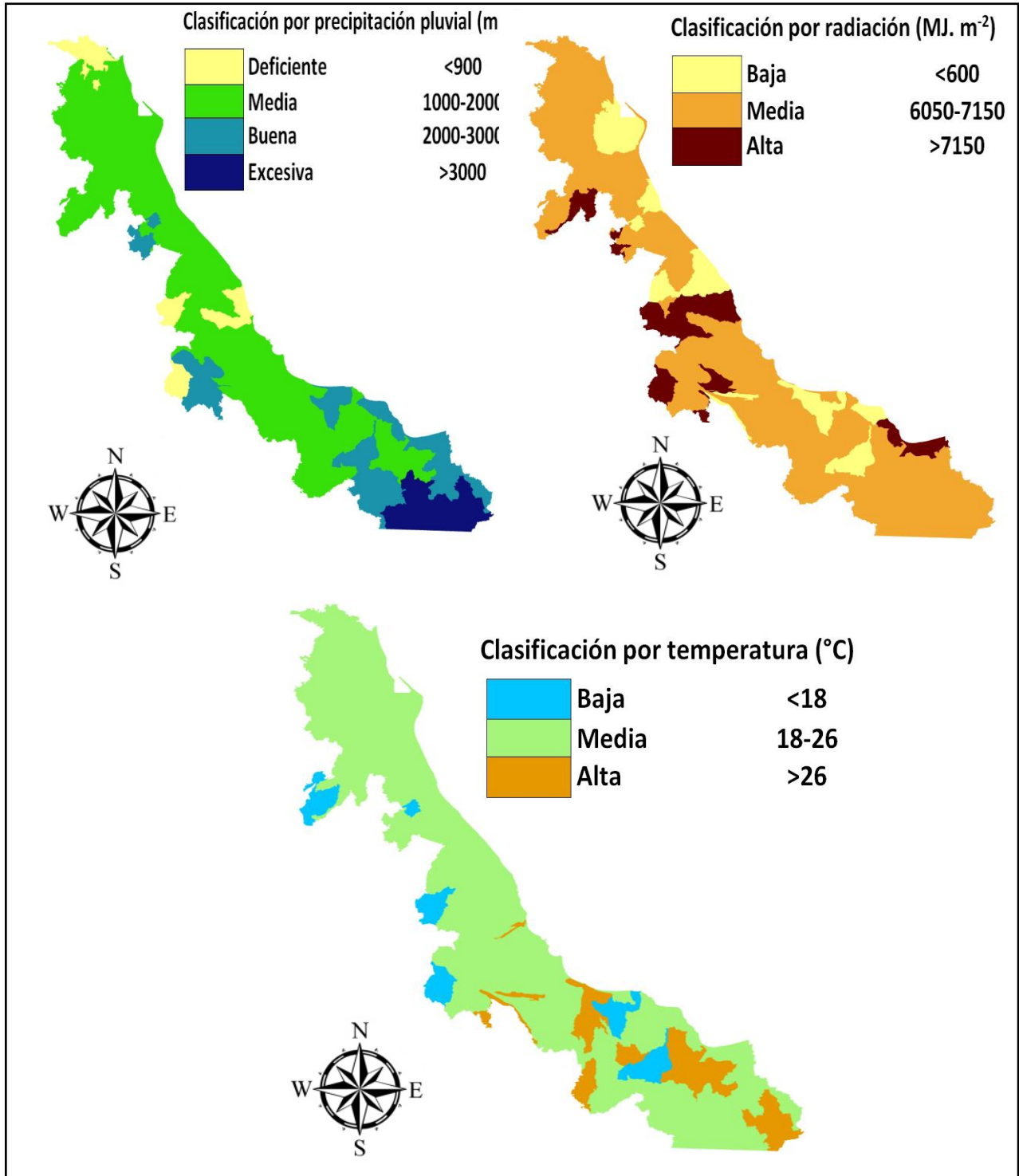


Figura 15. Distribución de las categorías de precipitación, radiación y temperatura. Fuente: Asignación de climas para cada URH de acuerdo a las 95 estaciones meteorológicas usadas.

8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Mediante la introducción de los datos necesarios para llevar a cabo el proceso de simulación por el modelo, este generó un total de 4053 (URH) distribuidas a lo largo del estado de Veracruz el cual a su vez se dividió en 224 subcuencas. Véase la Figura 16 y Figura 17.

Con base a la ubicación espacial de las (URH) dentro de las subcuencas, a la interacción con los factores edafoclimáticos del estado y los parámetros fisiológicos de *Pennisetum purpureum*, el modelo simuló el potencial productivo del cultivo sobre la superficie del estado de Veracruz como se muestra en la figura 18 generando 5 rangos de rendimiento de materia seca (0.06-11.77; 11.77–21.42; 21.42-28.26; 28.26-32.73; 32.73-44.05 t ha⁻¹) con base al método estadístico de Natural Breaks (Jenks, 1967).

El máximo rendimiento (44.05 t ha⁻¹) de materia seca obtenida con el proceso de simulación de *Pennisetum purpureum* concuerda con los reportados por Purseglove, (1972); Skerman y Riveros, (1990); Machado *et al.* (1996); Botrel *et al.* (2000); Andrade *et al.* (2005).

Los factores que más influyeron en la distribución del rendimiento de *Pennisetum purpureum* simulado por SWAT con base al grado de influencia en su desarrollo fisiológico fueron de orden climática y edáfica como lo mencionan Ayala *et al.* (1989); Pollock (1990); Baruch y Fisher (1991); Antolin y Sanchez-Dias (1993); Nelson y Moser (1994); Losch (1995).

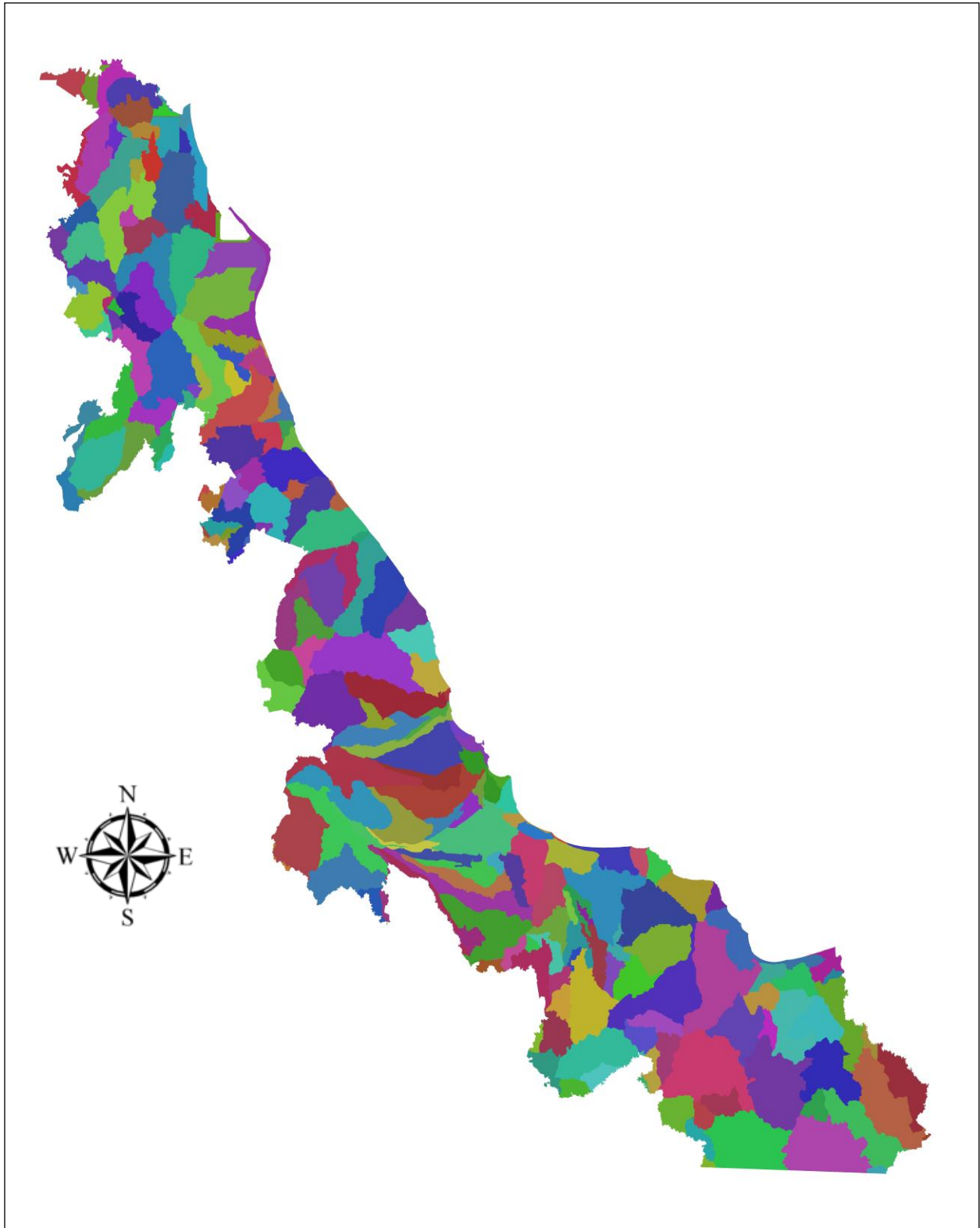


Figura 16. Estado de Veracruz dividido en las 224 subcuencas generadas por SWAT.

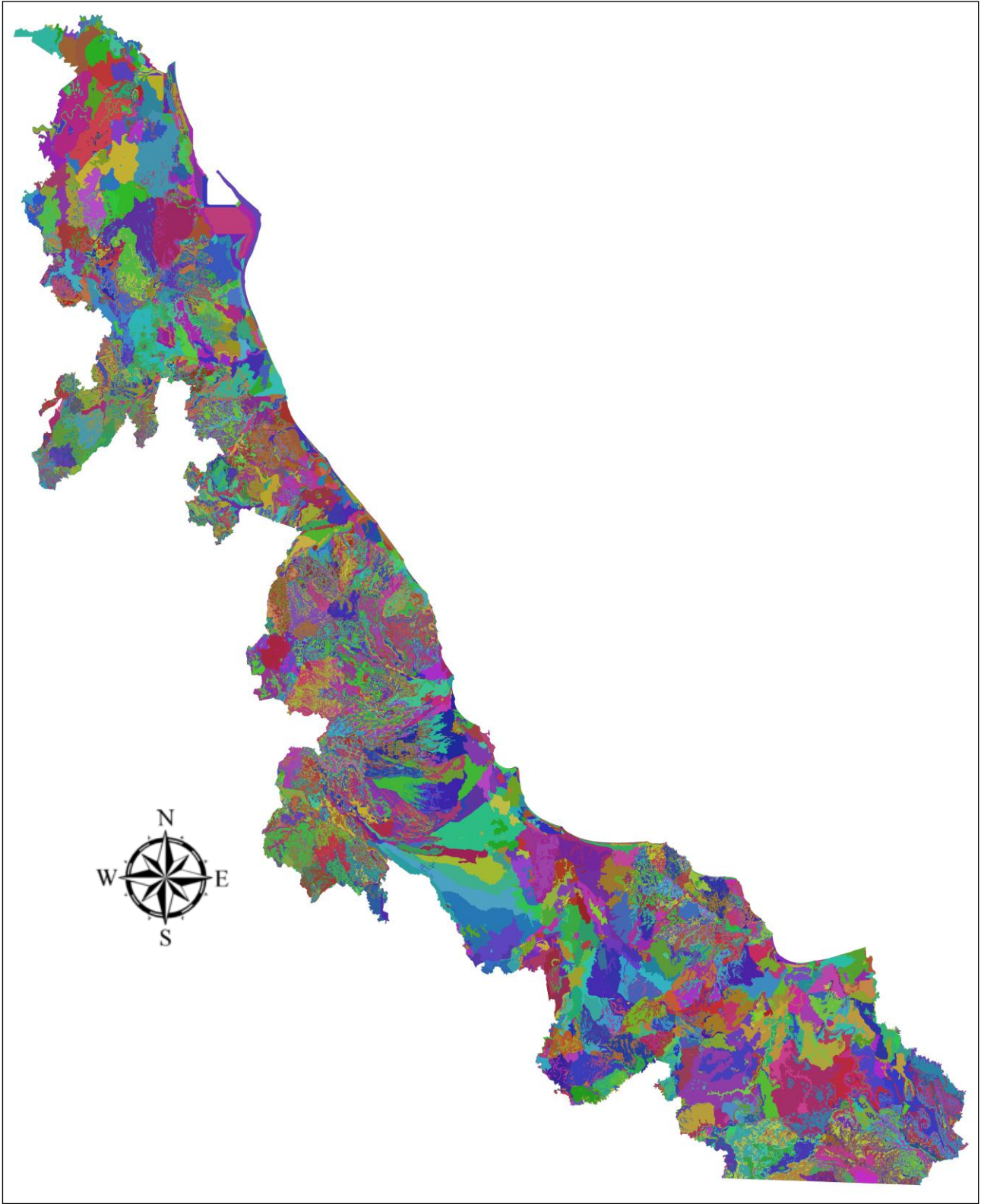


Figura 17. Estado de Veracruz dividido en las 4053 URH generadas por SWAT.

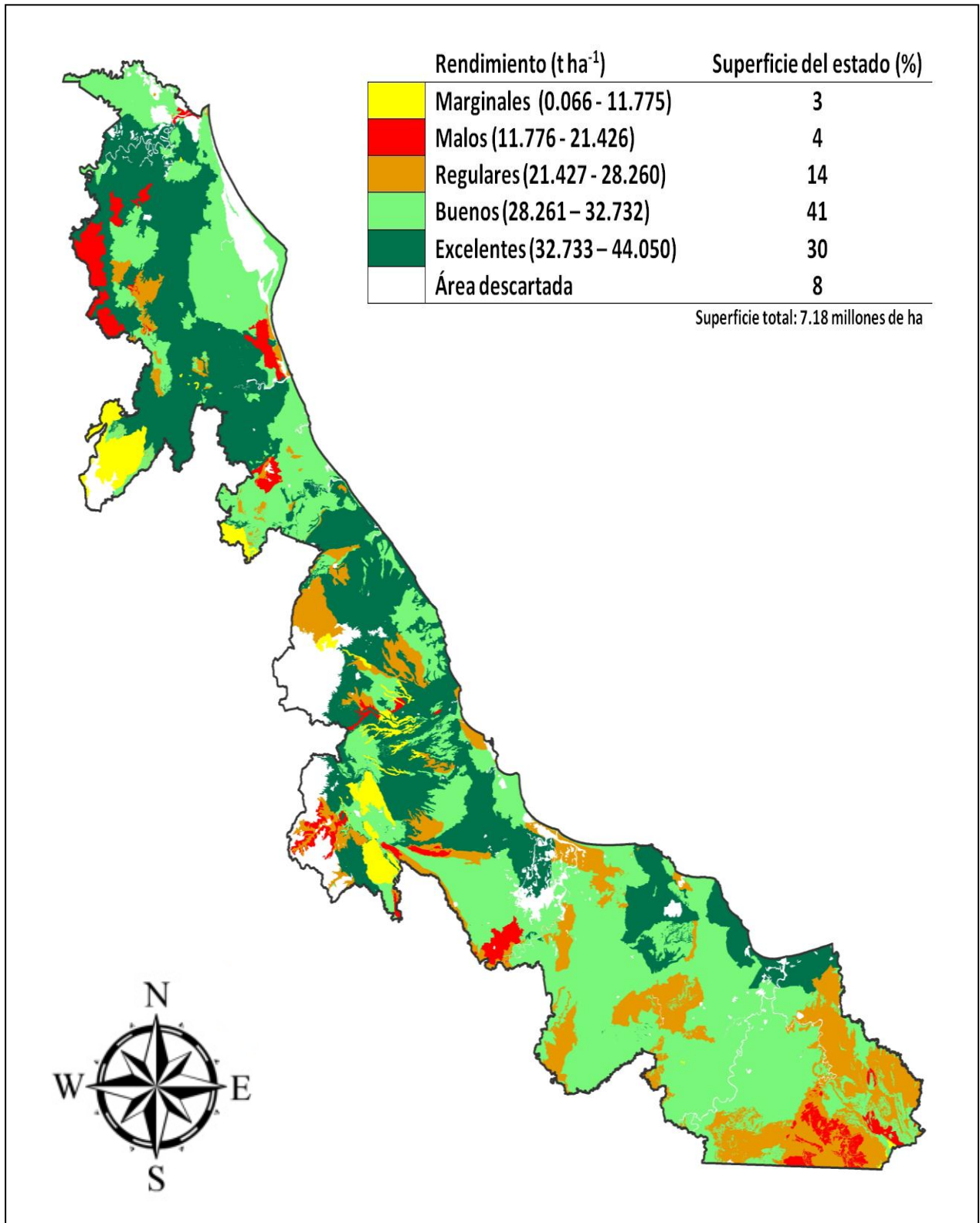


Figura 18. Rendimiento de biomasa seca de *Pennisetum purpureum* simulado por SWAT en el estado de Veracruz, México.

De acuerdo con la Figura 18 el 30 % de la superficie total del estado de Veracruz cuenta con una aptitud muy buena para la producción de *Pennisetum purpureum* con base en los intervalos de rendimiento (32.77-44.050 t ha⁻¹) arrojados por el modelo. El 41 % presenta una aptitud buena (28.261-32.732 t ha⁻¹), mientras que el 14 % presenta rendimientos regulares (21.427-28.260 t ha⁻¹). Los rendimientos más bajos correspondientes a los rangos malos (11.776-21.426 t ha⁻¹) y marginales (0.066-11.775 t ha⁻¹) cuentan únicamente con el 4 % y 3 % del total de la superficie de Veracruz.

Las zonas de mayor rendimiento simuladas por el modelo SWAT se encuentran distribuidas a lo largo del territorio del estado debido a la aptitud de *Pennisetum purpureum* para adaptarse a la mayoría de las condiciones edafoclimáticas imperantes. Por otra parte, las zonas detectadas por el modelo con menor aptitud para la producción del cultivo se encuentran en su mayoría en las zonas bajas con exceso de precipitación en el sur del estado así como en suelos someros en el norte del territorio de la entidad y en zonas montañosas con un exceso de pendiente y clima templado en el norte y parte del centro del territorio del estado. El 8 % restante de la superficie del estado fue descartada por exceder los 2000 msnm ya que de acuerdo a Booman (1993).

Díaz *et al.* (2011) y el equipo de trabajo del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP llevaron a cabo la determinación del potencial productivo de *Pennisetum purpureum* para el total de la superficie del Sureste de la república mexicana en aras de estimar su capacidad para ser fuente primaria para la generación de biocombustibles; esto basado en la metodología de Zonificación Agroecológica la cual mediante la discriminación de áreas por medio de un

algébra de mapas con base a interacciones de variables climáticas y edáficas determinan rangos cualitativos de aptitud para los cultivos analizados. De acuerdo al mapa en la Figura 19 generado por Díaz *et al.* (2011) las zonas de mayor aptitud para la producción de *Pennisetum purpureum* dentro del estado de Veracruz se ubican en zonas distribuidas en el centro, centro sur y norte del estado de Veracruz. La naturaleza de los resultados arrojados por Díaz *et al.* (2011) son de origen cualitativo, sin embargo al ser comparado con la posición geográfica de los resultados obtenidos en el presente trabajo por medio del modelo SWAT para el total del área del estado de Veracruz, se observa una correlación entre los intervalos de rendimiento arrojados por el modelo y los resultados obtenidos en el trabajo de Díaz *et al.* (2011).

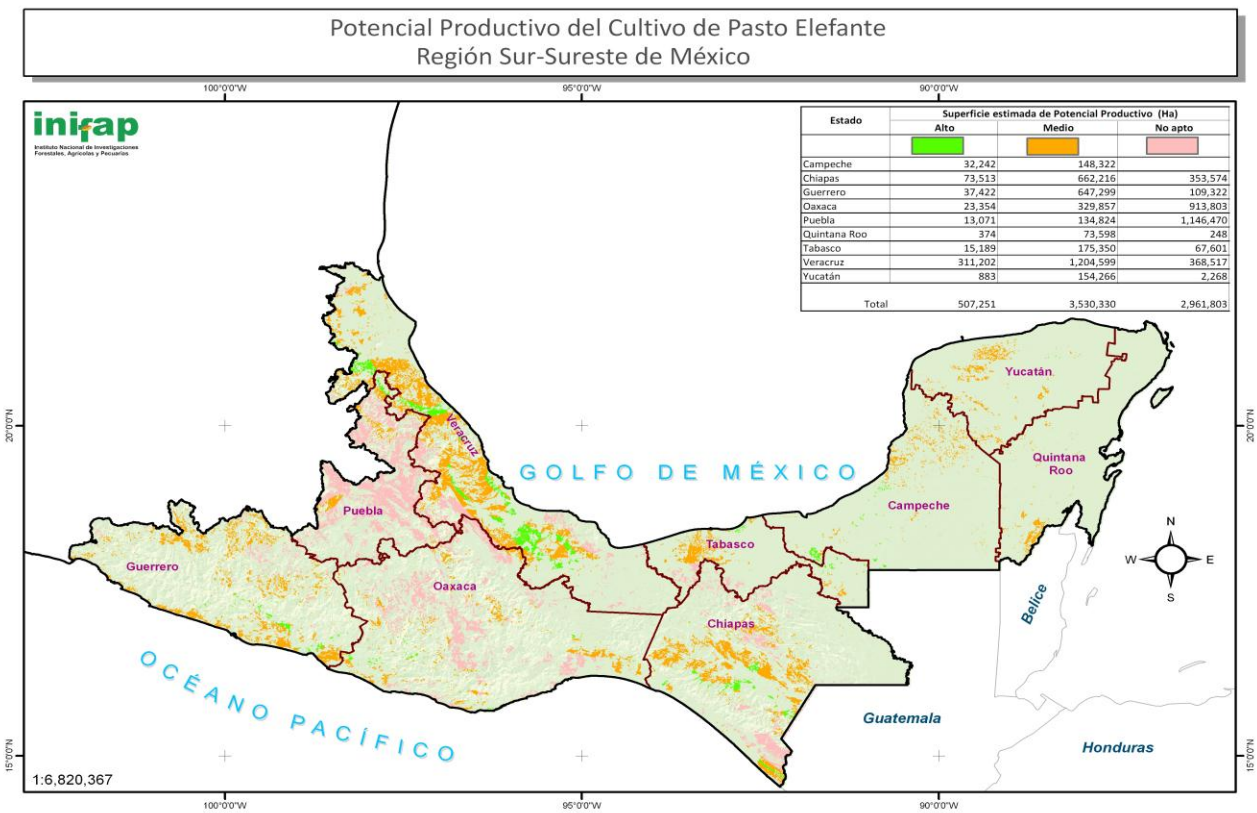


Figura 19. Potencial productivo de *Pennisetum purpureum* en la región Sur-sureste de México.

En la Figura 20 se muestra la semejanza entre los datos encontrados en la metodología utilizada por Díaz *et al.* (2011) y los resultados arrojados por el modelo en este trabajo de investigación. Como se muestra en la Figura 20 los rangos de producción Buenos y Excelentes concuerdan con las categorías de potencial productivo Alto y Medio, así mismo las zonas sin aptitud encontradas por la metodología aplicada de Díaz *et al.* (2011) concuerdan con los rangos de rendimiento malos y marginales simulados.

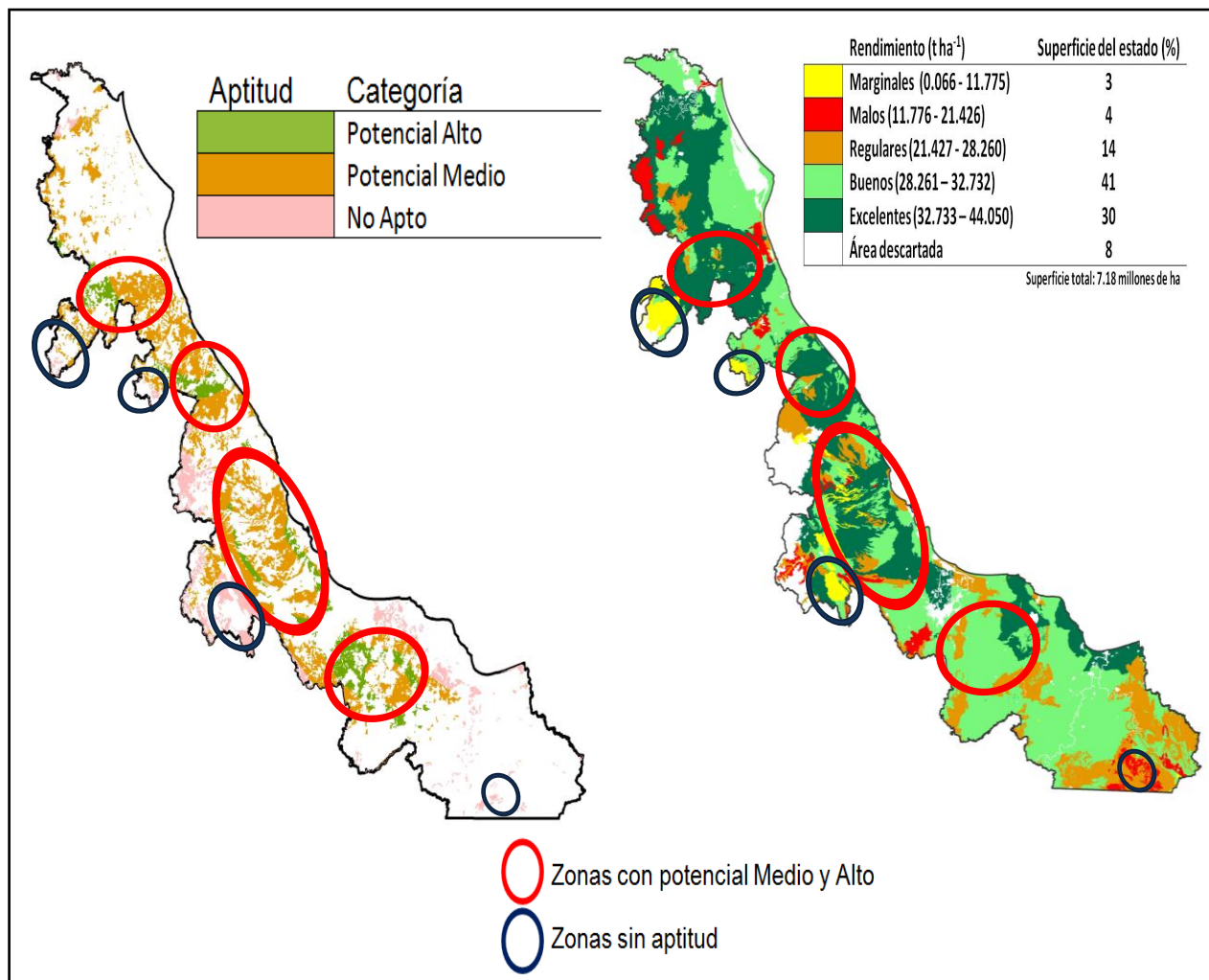


Figura 20. Comparación entre la aptitud del potencial productivo (Díaz *et al.*, 2011) y el rendimiento simulado de *Pennisetum purpureum* en el estado de Veracruz.

8.1. Análisis de relación entre factores edafoclimáticos y el rendimiento de *Pennisetum purpureum*.

8.1.1 Profundidad

Los promedios de rendimiento de biomasa de *Pennisetum purpureum* arrojados por el modelo con relación a la profundidad del suelo muestra el mejor rendimiento en suelos profundos y muy profundos con profundidades mayores a 70 cm (Figura 21). En el Cuadro 12, se muestran datos estadísticos de los promedios de rendimiento para las distintas clases de profundidad con relación al potencial para producir biomasa seca de *Pennisetum purpureum*. La obtención de los mejores rendimientos en suelos con una profundidad mayor a los 70 cm puede deberse a la capacidad de la planta para extraer nutrientes y penetrar en el suelo hasta 4 metros de profundidad de acuerdo a lo reportado por Enríquez *et al.* (1999) y Tropical Forages (2011).

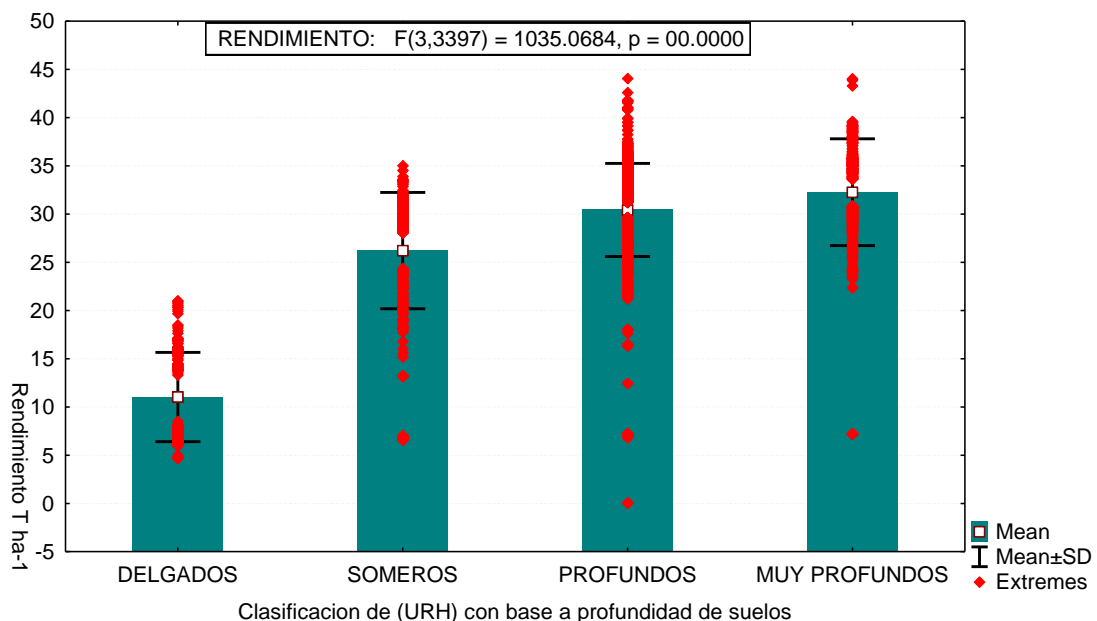


Figura 21. Relación entre la profundidad del suelo de las (URH) y su rendimiento.

Cuadro 12. Datos estadísticos básicos de la clasificación de (URH) por profundidad de suelo.

	Número de URH	Intervalo de rendimientos de materia seca (t ha ⁻¹)	Media	Desviación estándar	Error estándar
Delgados	208	4.68-21.01	11.03	4.62	0.32
Someros	524	6.57-35.01	26.21	6.02	0.26
Profundos	1891	0.06-44.05	30.43	4.82	0.11
Muy profundos	778	7.22-44.04	32.27	5.53	0.19
TOTAL	3401	0.06-44.05	29.01	7.16	0.12

8.1.2 Textura

El factor edáfico correspondiente a textura no influyó de manera directa en los promedios de rendimiento de biomasa seca de *Pennisetum purpureum* arrojados por el modelo como se muestra en la Figura 22, ya que no existe ningún patrón que indique un incremento en la producción de biomasa con relación a alguna de las clases de textura de suelo analizadas. Los datos estadísticos que se observan en el Cuadro 13 muestran que *Pennisetum purpureum* tiene la capacidad de producir altos niveles de biomasa (24.41 – 30.20 t ha⁻¹) adaptándose a una gran variedad de texturas que van de suelos arcillosos con textura fina, hasta suelos arenosos con textura gruesa. Esto corresponde a lo reportado por Moss (1964); Rodríguez *et al.* (1975); Alcantara y Bufarha (1983); Jackes (1994); CNCPP (2002).

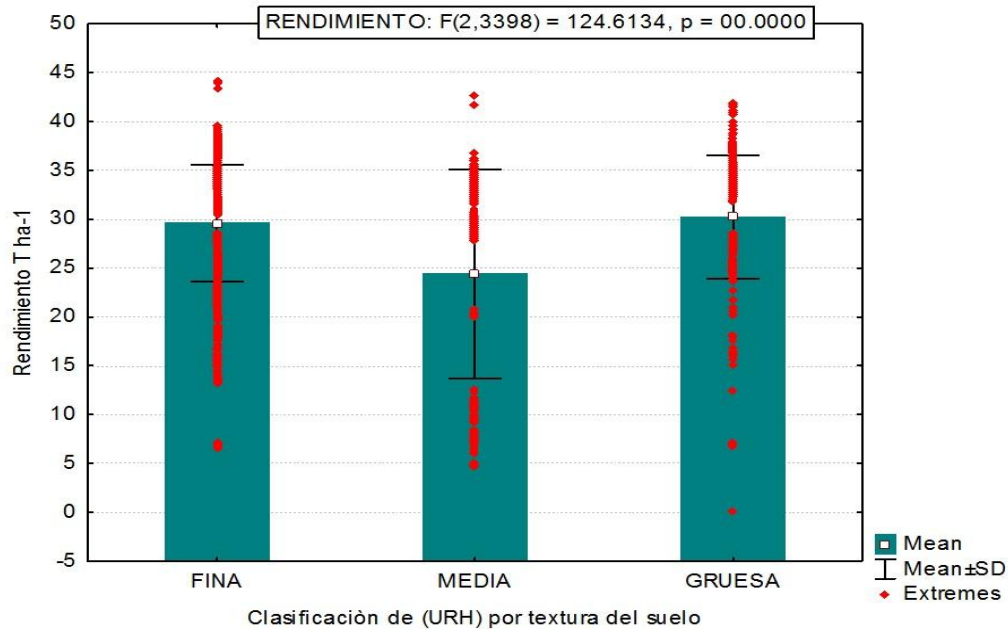


Figura 22. Relación entre la textura del suelo de las (URH) y su rendimiento.

Cuadro 13. Datos estadísticos básicos de la clasificación de (URH) por textura de suelo.

	Número de URH	Intervalo de rendimientos de materia seca (t ha ⁻¹)	Media	Desviación estándar	Error estándar
Fina	2137	6.57-44.05	29.57	5.98	0.12
Media	481	4.68-42.61	24.41	10.69	0.48
Gruesa	783	0.06-41.84	30.20	6.32	0.22
TOTAL	3401	0.06-44.05	29.01	7.16	0.12

8.1.3 Materia orgánica

De acuerdo a la Figura 23 la relación entre el contenido de materia orgánica en el suelo y los rendimientos arrojados por el modelo muestran un mayor promedio de generación de biomasa de *Pennisetum purpureum* en la clase de contenido de materia orgánica baja. Esto se contradice con lo que mencionan Moss (1964); Rodríguez *et al.* (1975); Alcantara y Bufarha (1983); Jackes (1994) ya que de acuerdo a los autores, *Pennisetum purpureum* se desarrolla en óptimas condiciones en suelos ricos en

materia orgánica. La diferencia entre los promedios de rendimiento en suelos con materia orgánica baja y alta es de 6 t ha⁻¹ (Cuadro 13). Sin embargo, con base a las estadísticas del Cuadro 14, una cuestión importante es que las (URH) correspondiente a suelos con materia orgánica alta son únicamente 768 de las 3401 (URH) del total de la superficie del estado; las cuales corresponden en su mayoría a litosoles, rendsinas y suelos delgados menores a 30 cm. por lo cual, como resultado el rendimiento de biomasa de *Pennisetum purpureum* se ve demeritado en dichas unidades.

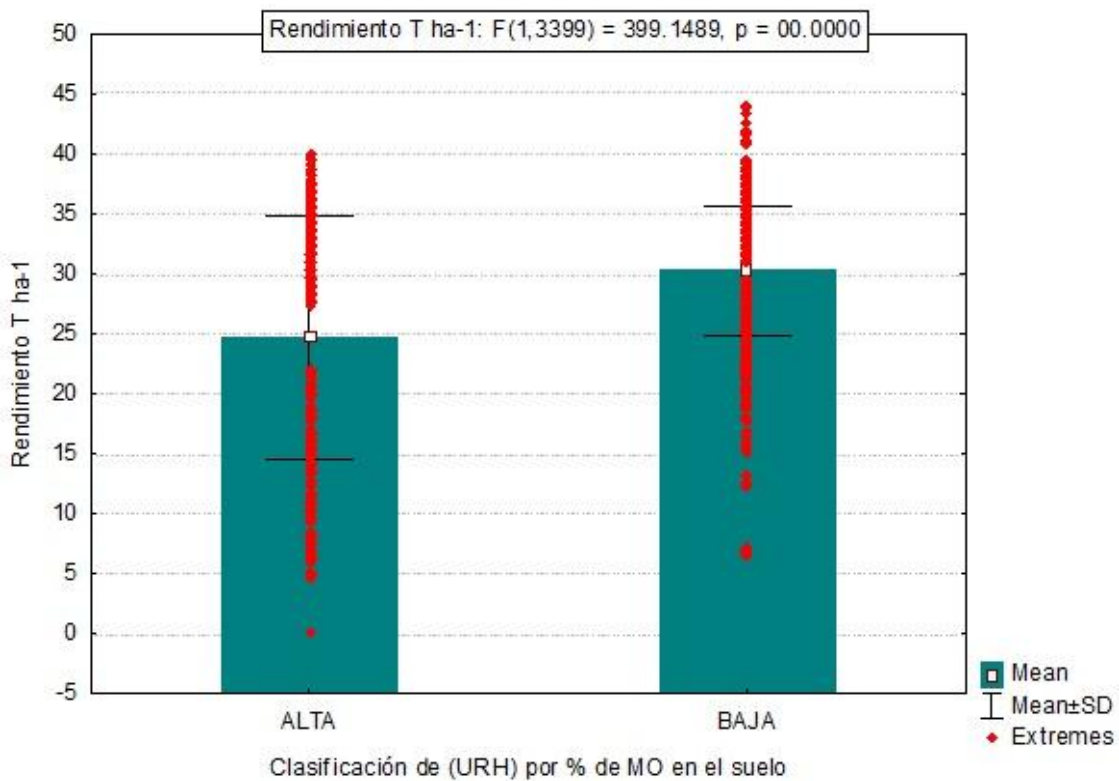


Figura 23. Relación entre el porcentaje de materia orgánica en la primera capa de suelo de las (URH) y su rendimiento.

Cuadro 14. Datos estadísticos básicos de la clasificación de (URH) por contenido de materia orgánica.

	Número de URH	Intervalo de rendimientos de materia seca (t ha ⁻¹)	Media	Desviación estándar	Error estándar
Alta	768	0.06-39.95	24.71	10.15	0.36
Baja	2633	6.57-44.05	30.27	5.41	0.10
TOTAL	3401	0.06-44.05	29.01	7.16	0.12

8.1.4 Temperatura

Para el caso del elemento climático referente a temperatura, de acuerdo con los datos arrojados por el modelo se observó una relación directa en cuanto al rendimiento obtenido de biomasa de *Pennisetum purpureum* y el nivel de temperatura analizado. Los mayores promedios de rendimiento así como los extremos máximos de producción correspondieron a las (URH) influenciadas bajo el intervalo de temperatura entre 18 y 26°C (media) y >26°C (alta), mientras que el intervalo de temperatura <18°C (baja) demeritó la producción de biomasa como se observa en la Figura 24. En el Cuadro 15 se muestran algunos datos estadísticos donde se aprecia de forma numérica la influencia de la temperatura en el rendimiento de biomasa. Los datos de rendimiento obtenidos por el modelo se relacionan con lo reportado por Skerman y Riveros (1990) quienes mencionan que *Pennisetum purpureum* se desarrolla de manera óptima en temperaturas medias y mayores a los 26°C.

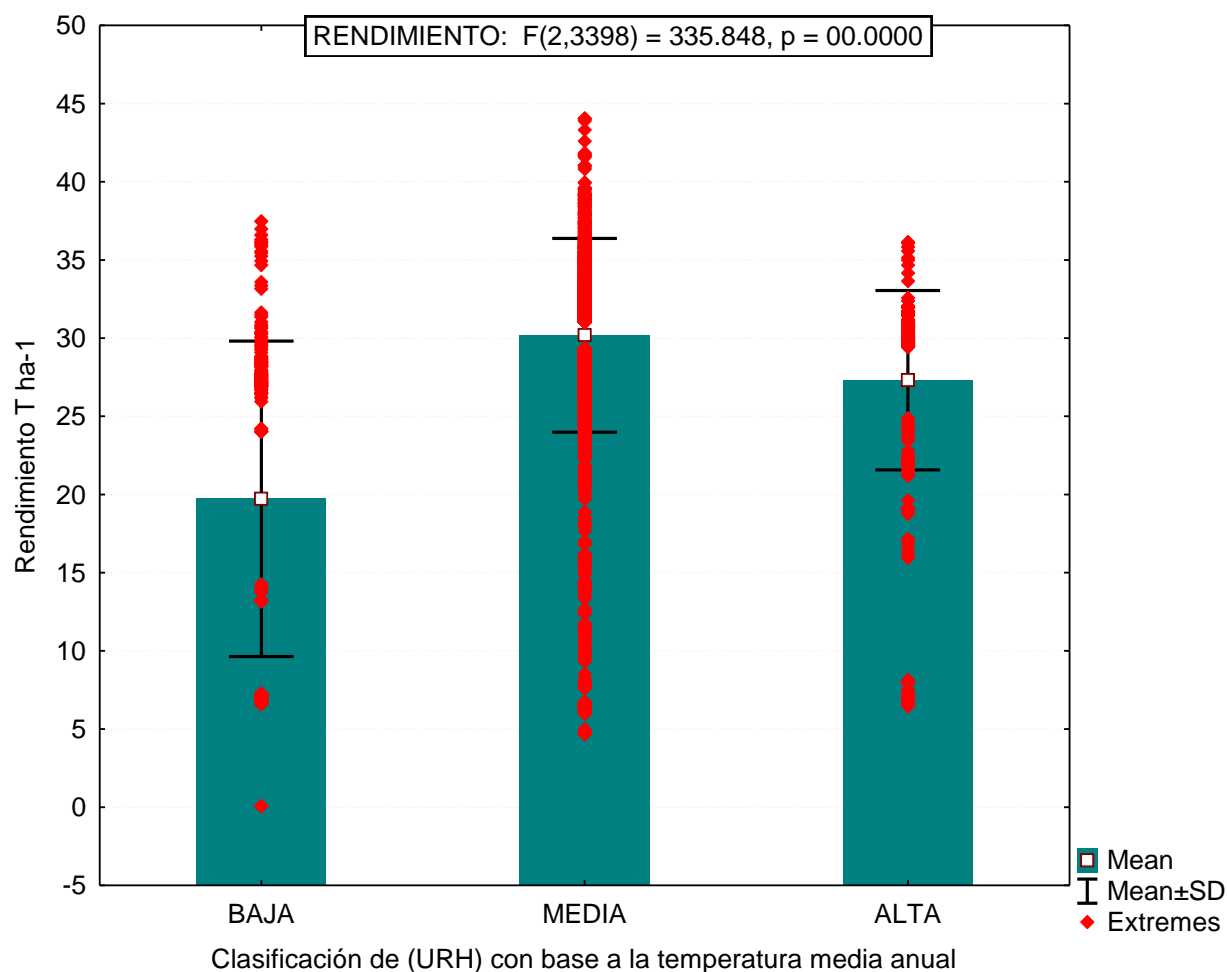


Figura 24. Relación entre la temperatura considerada por las (URH) y su rendimiento.

Cuadro 15. Datos estadísticos básicos de la clasificación de (URH) por temperatura.

	Número de URH	Intervalo de rendimientos de materia seca ($t\ ha^{-1}$)	Media	Desviación estándar	Error estándar
Baja	278	0.06-37.48	19.72	10.08	0.60
Media	2756	4.68-44.05	30.18	6.19	0.11
Alta	367	6.46-36.14	27.31	5.73	0.29
TOTAL	3401	0.06-44.05	29.01	7.16	0.12

8.1.5 Precipitación

En la Figura 25 se muestra la influencia de la precipitación en los rendimientos de biomasa de *Pennisetum purpureum* bajo diversos rangos de análisis, donde, en todas las clases se observa un promedio de rendimiento similar, que va desde 27.21 t ha⁻¹ con precipitación deficiente (<900 mm), hasta 25.63 t ha⁻¹ bajo precipitación excesiva (>3000 mm). Los mejores rendimientos así como los valores extremos más altos de producción de biomasa se observan en las clases de precipitación media y buena (1000-1500 mm). En el Cuadro 16, se muestran las estadísticas básicas en las que se corrobora el nivel de influencia de la precipitación con relación a la generación de biomasa. Los datos arrojados por el modelo concuerdan con lo mencionado por Skerman y Riveros (1990) quienes recomiendan lluvias arriba de 1500 mm año⁻¹ para el correcto desarrollo de *Pennisetum purpureum*.

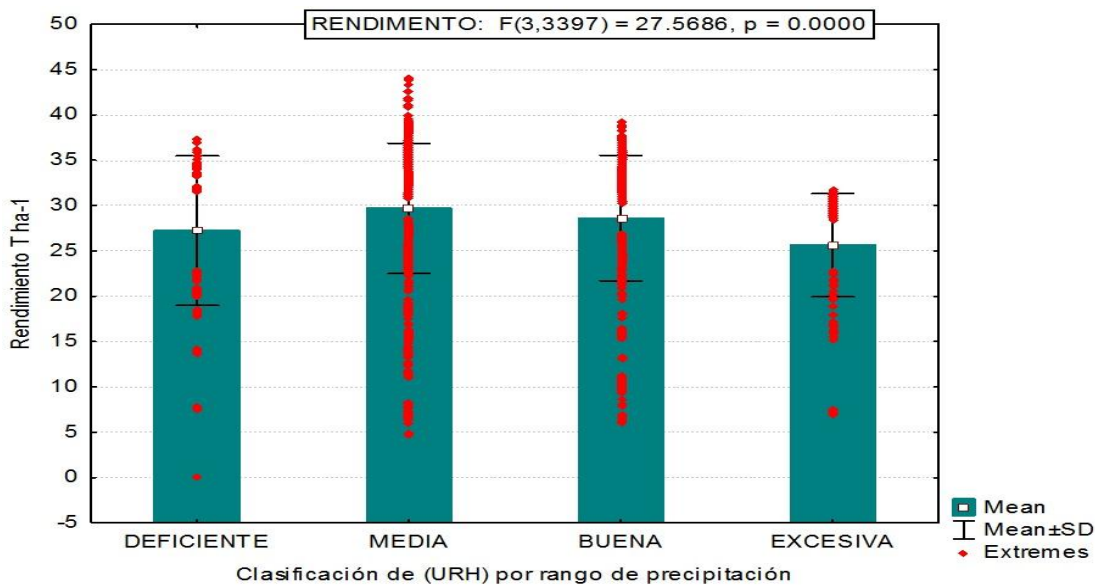


Figura 25. Relación entre la precipitación total anual considerada por las (URH) y su rendimiento.

Cuadro 16. Datos estadísticos básicos de la clasificación de (URH) por precipitación total anual.

	Número de URH	Intervalo de rendimientos de materia seca (t ha ⁻¹)	Media	Desviación estándar	Error estándar
Deficiente	179	0.06-37.32	27.21	8.25	0.61
Media	2138	4.68-44.05	29.68	7.17	0.15
Buena	868	6.01-39.15	28.59	6.92	0.23
Excesiva	216	6.91-31.76	25.63	5.70	0.38
TOTAL	3401	0.06-44.05	29.01	7.16	0.12

8.1.6 Radiación solar

El efecto de la radiación en el rendimiento de biomasa de *Pennisetum purpureum* no mostró mucha influencia en cuanto al promedio de rendimientos, sin embargo los extremos máximos de producción como se observa en la Figura 26 se encuentran dentro del rango de radiación media (6050-7150 MJ.m²). En el Cuadro 17, se muestran estadísticas básicas sobre la influencia de la radiación en la producción de biomasa. Los datos arrojados por el modelo conforme a la relación entre este elemento y la producción de biomasa, muestran una influencia mínima en los promedios de rendimiento, siendo estos altos y variando muy poco de acuerdo a cada rango de radiación analizada. Esto puede deberse a la capacidad de la planta tipo C₄ para aprovechar de la forma más eficiente la radiación captada como lo reporta Moss (1964); Rodríguez *et al.* (1975); Alcantara y Bufarha (1983); Jackes (1994).

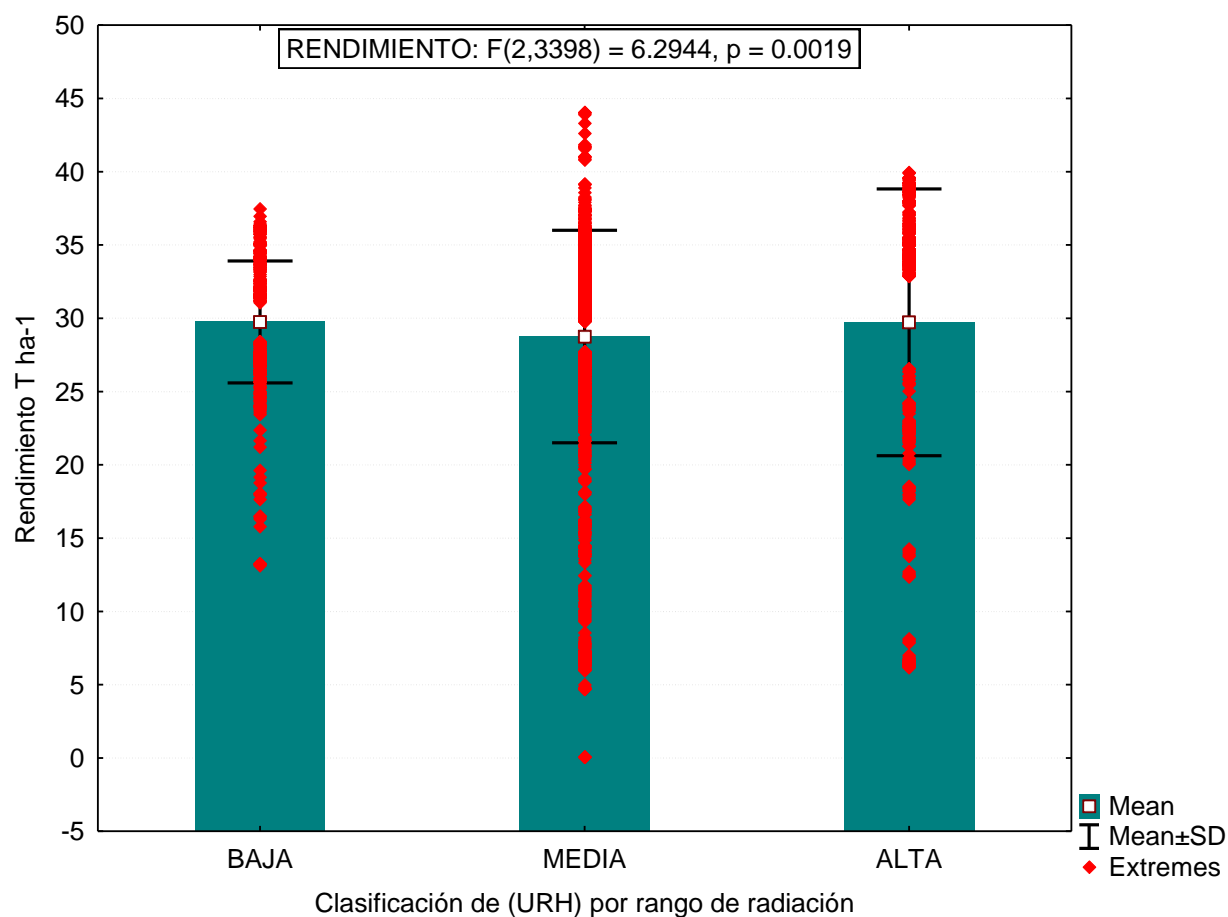


Figura 26. Relación entre la radiación total anual considerada por las (URH) y su rendimiento.

Cuadro 17. Datos estadísticos básicos de la clasificación de (URH) por radiación total anual.

	Número de URH	Intervalo de rendimientos de materia seca (t ha ⁻¹)	Media	Desviación estándar	Error estándar
Baja	489	13.13-37.48	29.75	4.16	0.18
Media	2490	0.06-44.05	28.75	7.24	0.14
Alta	422	6.17-39.95	29.72	9.09	0.44
TOTAL	3401	0.06-44.05	29.01	7.16	0.12

8.2. Índice de productividad generado con SWAT para *Pennisetum purpureum* con base a interacciones fisicoquímicas del suelo del estado de Veracruz

8.2.1 Profundidad-Textura

Los promedios de rendimiento de biomasa seca de *Pennisetum purpureum* y la categorización obtenida en el proceso de determinación de los índices de productividad para la relación profundidad-textura se muestra en el Cuadro 18.

Cuadro 18.- Rendimiento promedio de biomasa seca de *Pennisetum purpureum* en la relación profundidad-textura bajo las condiciones del estado de Veracruz.

	Profundidad 0-30cm.	Profundidad 30-70cm.	Profundidad > 70 cm.
Textura Gruesa	x	23.28 t ha ⁻¹	30.89 t ha ⁻¹
Textura media	7.70 t ha ⁻¹	20.34 t ha ⁻¹	30.70 t ha ⁻¹
Textura fina	16.03 t ha ⁻¹	26.74 t ha ⁻¹	31.06 t ha ⁻¹
		Medio	Alto
	Bajo	Medio	Alto
	Bajo	Medio	Alto

En el Cuadro 19 se muestran las características predominantes de cada categoría generada bajo el proceso de determinación del índice de productividad para la relación profundidad-textura.

Cuadro 19. Índice de productividad de *Pennisetum purpureum* y sus atributos conforme a la relación profundidad-textura

Categoría	Atributos	Promedio de rendimiento t ha ⁻¹
Alta	- Suelos mayores a 70 cm de profundidad.	30.88 t ha ⁻¹
Medio	- Cualquier textura.	23.45 t ha ⁻¹
	- Suelos entre 30-70 cm de profundidad.	
Bajo	- Cualquier textura.	11.86 t ha ⁻¹
	- Suelos menores a 30 cm de profundidad.	
	- Cualquier textura.	

8.2.2 Profundidad-Textura (Materia orgánica)

Los promedios de rendimientos obtenidos de la interacción entre las categorías de la relación profundidad-textura combinadas con niveles bajos, medios y altos de materia orgánica se muestran en el Cuadro 20.

Cuadro 20. Rendimiento de biomasa seca de *Pennisetum purpureum* correspondiente a la interacción profundidad-textura conjugado con el nivel de contenido de materia orgánica de los suelos del estado de Veracruz.

	Profundidad-textura Bajo	Profundidad-textura Medio	Profundidad-textura Alto
Materia Orgánica Bajo	x	26.85 t ha ⁻¹ Medio	31.13 t ha ⁻¹ Alto
Materia Orgánica Medio	x	24.55 t ha ⁻¹ Medio	30.13 t ha ⁻¹ Alto
Materia Orgánica Alto	11.03 t ha ⁻¹ Bajo	30.40 t ha ⁻¹ Alto	33.00 t ha ⁻¹ Alto

Las características predominantes de las categorías generadas conforme a la interacción entre el factor profundidad-textura y el contenido de materia orgánica se muestran en el Cuadro 21.

Cuadro 21. Índice de productividad de *Pennisetum purpureum* y sus atributos conforme a la relación profundidad-textura y contenido de materia orgánica.

Categoría	Atributos	Promedio de rendimiento t ha ⁻¹
Alta	- Suelos mayores a 70 cm de profundidad; Cualquier textura; Alto contenido de materia orgánica - Suelos con profundidad entre 30-70 cm; Cualquier textura; alto contenido de MO.	31.16 t ha ⁻¹
Medio	- Suelos entre 30-70 cm de profundidad; Cualquier textura; Bajo y medio contenido de materia orgánica	25.7 t ha ⁻¹
Bajo	- Suelos menores a 30 cm de profundidad; Cualquier textura; alto contenido de materia orgánica.	11.03 t ha ⁻¹

8.2.3 Profundidad-Textura-Materia orgánica (Drenaje)

Los promedios de rendimiento de biomasa seca de *Pennisetum purpureum* generados con base en la interacción entre los factores profundidad-textura-materia orgánica y drenaje se muestran en el Cuadro 22.

Cuadro 22. Rendimiento de biomasa seca de *Pennisetum purpureum* correspondiente a la interacción profundidad-textura-materia orgánica conjugado con la rapidez del drenaje interno de los suelos del estado de Veracruz.

	Profundidad-textura- materia orgánica Bajo	Profundidad-textura- materia orgánica Medio	Profundidad-textura- materia orgánica Alto
Drenaje Lento	X	29.06 t ha ⁻¹ Medio	33.00 t ha ⁻¹ Alto
Drenaje Medio	X	25.50 t ha ⁻¹ Medio	30.19 t ha ⁻¹ Alto
Drenaje Rápido	11.03 t ha ⁻¹ Bajo	25.65 t ha ⁻¹ Medio	30.74 t ha ⁻¹ Alto

En el Cuadro 23 Se muestran las características predominantes de cada categoría generada bajo el proceso de determinación del índice de productividad para la relación profundidad-textura-materia orgánica y drenaje.

Cuadro 23. Índice de productividad de *Pennisetum purpureum* y sus atributos conforme a la relación profundidad-textura-contenido de materia orgánica y drenaje.

Categoría	Atributos	Promedio de rendimiento t ha ⁻¹
Alta	- Suelos mayores a 70 cm de profundidad; Cualquier textura; Alto contenido de materia orgánica; Drenaje lento.	31.33 t ha ⁻¹
Medio	- Suelos entre 30-70 cm de profundidad; Cualquier textura; Bajo y medio contenido de materia orgánica; Drenaje lento, medio y rápido.	27.07 t ha ⁻¹
Bajo	- Suelos menores a 30 cm de profundidad; Cualquier textura; alto contenido de materia orgánica; Drenaje rápido	11.03 t ha ⁻¹

8.2.4 Profundidad-Textura-Materia orgánica-Drenaje (Pendiente)

En el Cuadro 24 Se muestran los promedios de rendimientos de biomasa seca de *Pennisetum purpureum* obtenidos con base a la interacción entre los factores profundidad-textura-materia orgánica-drenaje y pendiente.

Cuadro 24. Rendimiento de biomasa seca de *Pennisetum purpureum* correspondiente a la interacción entre los factores profundidad-textura-materia orgánica-drenaje y pendientes, de los suelos del estado de Veracruz.

	Profundidad-textura-materia orgánica-drenaje Bajo	Profundidad-textura-materia orgánica-drenaje Medio	Profundidad-textura-materia orgánica-drenaje Alto
Pendiente 0-8 %	11.27 t ha ⁻¹ bajo	25.92 t ha ⁻¹ Medio	30.73 t ha ⁻¹ Alto
Pendiente 8-15 %	10.58 t ha ⁻¹ Bajo	26.40 t ha ⁻¹ Medio	31.05 t ha ⁻¹ Alto
Pendiente >15 %	10.96 t ha ⁻¹ Bajo	26.35 t ha ⁻¹ Medio	31.00 t ha ⁻¹ Alto

Las características predominantes de las categorías generadas bajo el proceso de determinación del índice de productividad para la relación profundidad-textura-materia orgánica-drenaje y pendiente, se muestran en el Cuadro 25.

Cuadro 25. Índice de productividad de *Pennisetum purpureum* y sus atributos conforme a la interacción entre los factores profundidad-textura-contenido de materia orgánica-drenaje y pendiente.

Categoría	Atributos	Promedio de rendimiento t ha ⁻¹
Alto	- Suelos mayores a 70 cm de profundidad; Cualquier textura; Alto contenido de materia orgánica; Drenaje lento; Cualquier pendiente.	30.92 t ha ⁻¹
Medio	- Suelos entre 30-70 cm de profundidad; Cualquier textura; Bajo y medio contenido de materia orgánica; Drenaje lento, medio y rápido; cualquier pendiente	26.22 t ha ⁻¹
Bajo	- Suelos menores a 30 cm de profundidad; Cualquier textura; alto contenido de materia orgánica; Drenaje rápido; cualquier pendiente.	10.93 t ha ⁻¹

8.2.5 Índice productividad final generado con SWAT en función de variables fisicoquímicas del suelo

En el Cuadro 26, se muestra la distribución de la superficie del estado de Veracruz, dividida en tres categorías correspondientes al índice de productividad final de *Pennisetum purpureum*, generado por SWAT con base a las relación de las interacciones fisicoquímicas (profundidad-textura-materia orgánica-drenaje y pendiente) del suelo.

Cuadro 26. Índice de productividad final de *Pennisetum purpureum* dentro de la superficie total del estado de Veracruz.

Categoría	Rendimiento promedio t ha ⁻¹	Superficie del estado (%)	Superficie dentro del estado de Veracruz Millones de ha.
Alta	30.92 t ha ⁻¹	78.64	5.647
Medio	26.22 t ha ⁻¹	9.52	0.684
Bajo	10.93 t ha ⁻¹	3.67	0.264

En la Figura 27 Se muestra la distribución espacial del índice de productividad de *Pennisetum purpureum* en el Estado de Veracruz, con base a las relaciones fisicoquímicas del suelo.

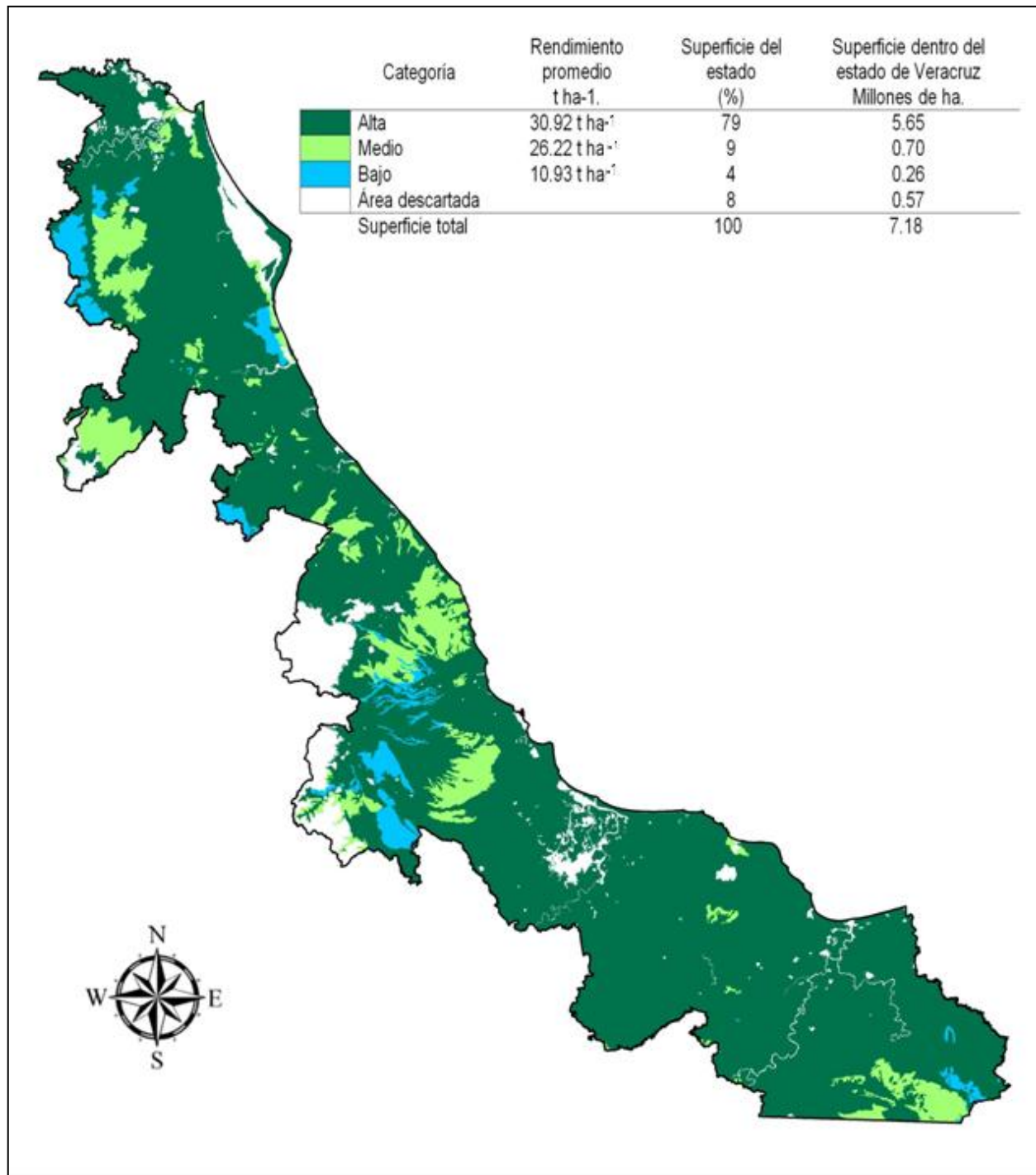


Figura 27. Distribución espacial del índice de productividad de *Pennisetum purpureum* con base a interacciones fisicoquímicas del suelo.

8.3. Índice de productividad generado con SWAT para *Pennisetum purpureum* con base a las interacciones fisicoquímicas del suelo y el clima del estado de Veracruz

8.3.1 Profundidad-Textura-Materia orgánica-drenaje-pendiente (Temperatura)

Con base a la categorización obtenida (Alta, Medio, Bajo) mediante la generación del índice de productividad de las interacciones fisicoquímicas de los suelos del estado de Veracruz (profundidad-textura-materia orgánica- drenaje y pendiente); se generó una nueva categorización en función a la interacción con el factor de temperatura del estado. En el Cuadro 27 se muestran los resultados.

Cuadro 27. Rendimiento de biomasa seca de *Pennisetum purpureum* correspondiente a la relación entre las interacciones fisicoquímicas del suelo y la temperatura del estado de Veracruz.

	Profundidad-textura- materia orgánica- drenaje-pendiente Bajo	Profundidad-textura- materia orgánica- drenaje-pendiente Medio	Profundidad-textura- materia orgánica- drenaje-pendiente Alto
Temperatura < 18 °C	14.01 t ha ⁻¹ B	11.97 t ha ⁻¹ B	21.58 t ha ⁻¹ M
Temperatura 18 ° - 26 °C	11.04 t ha ⁻¹ B	27.00 t ha ⁻¹ M	32.24 t ha ⁻¹ A
Temperatura > 26 °C	10.44 t ha ⁻¹ B	24.19 t ha ⁻¹ M	30.00 t ha ⁻¹ A

Las características predominantes de las categorías generadas bajo el proceso de determinación del índice de productividad con base a la relación entre las interacciones fisicoquímicas y la temperatura del estado de Veracruz se muestran en el Cuadro 28.

Cuadro 28. Índice de productividad de *Pennisetum purpureum* y sus atributos conforme a la interacción de las propiedades fisicoquímicas del suelo y la temperatura.

Categoría	Atributos	Promedio de rendimiento t ha ⁻¹
Alto	- Suelos mayores a 70 cm de profundidad; Cualquier textura; Alto contenido de materia orgánica; Drenaje lento; Cualquier pendiente; rangos de temperatura (18°C -26°C, > 26°C).	31.12 t ha ⁻¹
Medio	- Suelos entre 30-70 cm de profundidad; Cualquier textura; Bajo y medio contenido de materia orgánica; Drenaje lento, medio y rápido; cualquier pendiente; rangos de temperatura (18°C -26°C, > 26°C). - Suelos mayores a 70 cm de profundidad; Cualquier textura; Alto contenido de materia orgánica; Drenaje lento; Cualquier pendiente; temperaturas menores a 18°C.	24.25 t ha ⁻¹
Bajo	- Suelos menores a 30 cm y entre 30 y 70 cm de profundidad; Cualquier textura; alto, bajo y medio contenido de materia orgánica; Drenaje lento, medio y rápido; cualquier pendiente; rangos de temperatura (< 18 °C, 18°C- 26°C, > 26°C). - Suelos entre 30-70 cm de profundidad; Cualquier textura; Bajo y medio contenido de materia orgánica; Drenaje lento, medio y rápido; cualquier pendiente; temperaturas menores a 18°C.	11.86 t ha ⁻¹

La distribución espacial del índice de productividad de *Pennisetum purpureum* en el Estado de Veracruz, con base a las relaciones fisicoquímicas del suelo y la temperatura promedio del estado se muestran en la Figura 28.

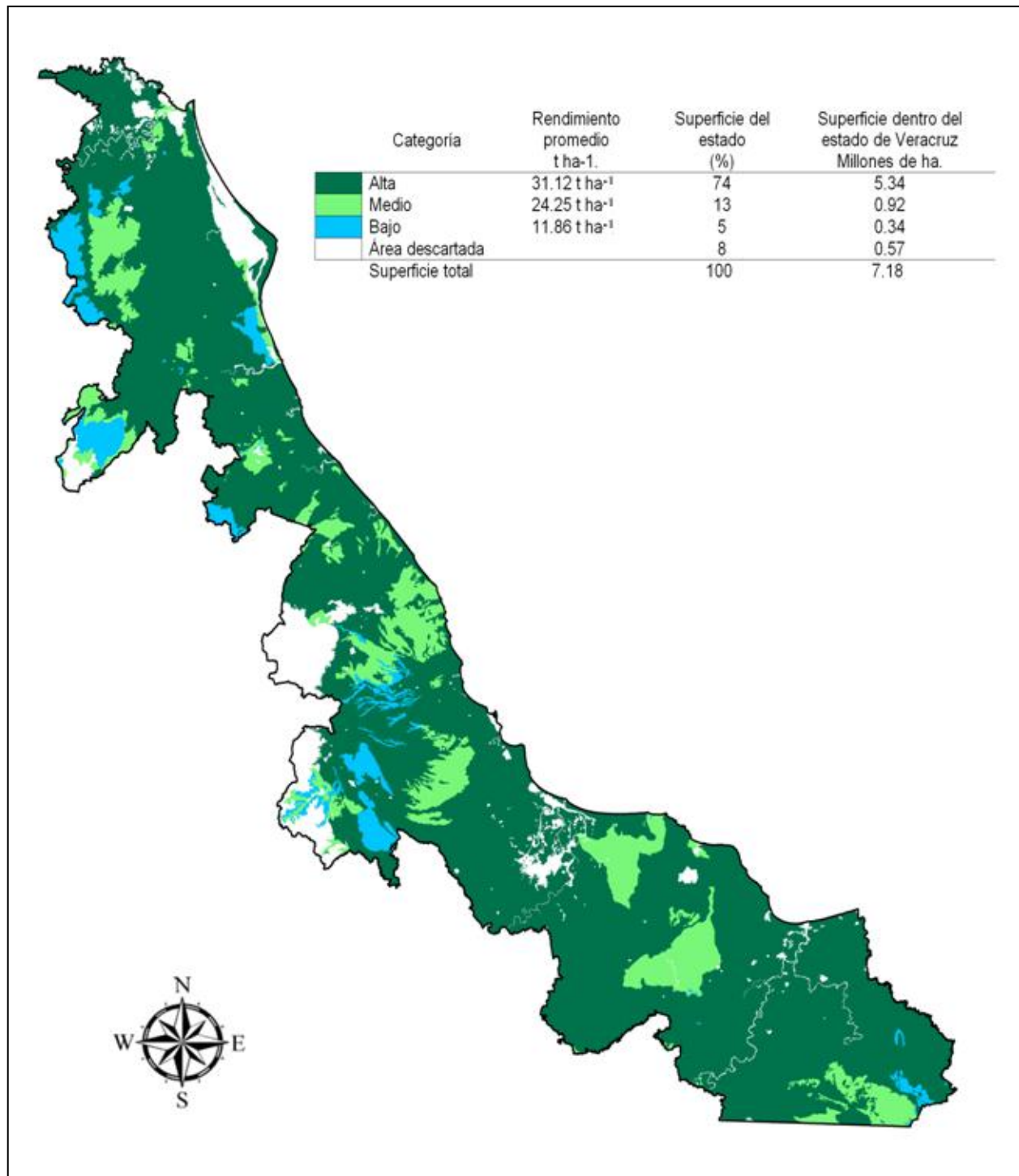


Figura 28. Distribución espacial del índice de productividad de *Pennisetum purpureum* con base a la interacción entre factores fisicoquímicos del suelo y temperatura.

8.3.2 Profundidad-Textura-Materia orgánica-Drenaje-Pendiente-Temperatura (Precipitación)

Los promedios de rendimiento de biomasa seca de *Pennisetum purpureum* generados con base a la interacción entre los factores fisicoquímicos del suelo, los rangos de temperatura y la cantidad promedio de precipitación del estado de Veracruz, se muestran en el Cuadro 29.

Cuadro 29. Rendimiento de biomasa seca de *Pennisetum purpureum* correspondiente a la relación entre las interacciones fisicoquímicas del suelo, la temperatura y la cantidad promedio de precipitación del estado de Veracruz.

	Profundidad-textura- materia orgánica- drenaje-pendiente- temperatura Bajo	Profundidad-textura- materia orgánica- drenaje-pendiente- temperatura Medio	Profundidad-textura- materia orgánica- drenaje-pendiente- temperatura Alto
Precipitación Deficiente	16.20 t ha ⁻¹ Bajo	23.70 t ha ⁻¹ Medio	30.00 t ha ⁻¹ Alto
Precipitación Media	10.53 t ha ⁻¹ Bajo	25.53 t ha ⁻¹ Medio	32.00 t ha ⁻¹ Alto
Precipitación Buena	10.62 t ha ⁻¹ Bajo	27.42 t ha ⁻¹ Medio	32.00 t ha ⁻¹ Alto
Precipitación Excesiva	11.86 t ha ⁻¹ Bajo	23.04 t ha ⁻¹ Medio	27.00 t ha ⁻¹ Medio

Las características predominantes de las categorías generadas bajo el proceso de determinación del índice de productividad con base a la relación entre las interacciones fisicoquímicas, la temperatura y el promedio de precipitación del estado de Veracruz se muestran en el Cuadro 30.

Cuadro 30. Índice de productividad de *Pennisetum purpureum* y sus atributos conforme a la interacción entre las propiedades fisicoquímicas del suelo, la temperatura y precipitación promedio.

Categoría	Atributos	Promedio de rendimiento t ha ⁻¹
Alta	- Suelos mayores a 70 cm de profundidad; Cualquier textura; Alto contenido de materia orgánica; Drenaje lento; Cualquier pendiente; rangos de temperatura (18°C -26°C, > 26°C); precipitación deficiente, media y buena.	31.33 t ha ⁻¹
Medio	- Suelos entre 30-70 cm de profundidad; Cualquier textura; Bajo y medio contenido de materia orgánica; Drenaje lento, medio y rápido; cualquier pendiente; rangos de temperatura (18°C -26°C, > 26°C); precipitación deficiente, media, buena y excesiva. - Suelos mayores a 70 cm de profundidad; Cualquier textura; Alto contenido de materia orgánica; Drenaje lento; Cualquier pendiente; temperaturas menores a 18°C; precipitación deficiente, media, buena y excesiva.	25.33 t ha ⁻¹
Bajo	- Suelos mayores a 70 cm de profundidad; Cualquier textura; Alto contenido de materia orgánica; Drenaje lento; Cualquier pendiente; rangos de temperatura (18°C -26°C, > 26°C); precipitación excesiva. - Suelos menores a 30 cm y entre 30 y 70 cm de profundidad; Cualquier textura; alto, bajo y medio contenido de materia orgánica; Drenaje lento, medio y rápido; cualquier pendiente; rangos de temperatura (< 18°C, 18°C- 26°C, > 26°C); precipitación deficiente, media, buena y excesiva. - Suelos entre 30-70 cm de profundidad; Cualquier textura; Bajo y medio contenido de materia orgánica; Drenaje lento, medio y rápido; cualquier pendiente; temperaturas menores a 18°C; precipitación deficiente, media, buena y excesiva.	12.30 t ha ⁻¹

8.3.3 Índice de productividad final generado con SWAT

En el Cuadro 31 se muestra la distribución de la superficie del estado de Veracruz, dividida en tres categorías correspondientes al índice de productividad final de *Pennisetum purpureum*, generado por SWAT con base a la relación de las interacciones fisicoquímicas (profundidad-textura-materia orgánica-drenaje y pendiente)

del suelo y las condiciones climáticas(temperatura; precipitación) del estado de Veracruz.

Cuadro 31. Índice de productividad final de *Pennisetum purpureum* dentro de la superficie total del estado de Veracruz.

Categoría	Rendimiento promedio t ha ⁻¹	Superficie del estado (%)	Superficie dentro del estado de Veracruz Millones de ha
Alta	31.33 t ha ⁻¹	68.00	4.88
Medio	25.33 t ha ⁻¹	19.00	1.40
Bajo	12.30 t ha ⁻¹	5.00	0.33

En la Figura 29 se muestra la distribución espacial del índice de productividad de *Pennisetum purpureum* con base a las relaciones fisicoquímicas del suelo, la temperatura promedio y el promedio de precipitación del Estado de Veracruz. Mientras que en la Figura 30 muestra la evolución en la conformación del índice de productividad de *Penisetum purpureum* considerando la interacción entre los factores edafoclimáticos (profundidad-textura-materia orgánica-drenaje y pendiente), la temperatura y precipitación promedio del estado de Veracruz.

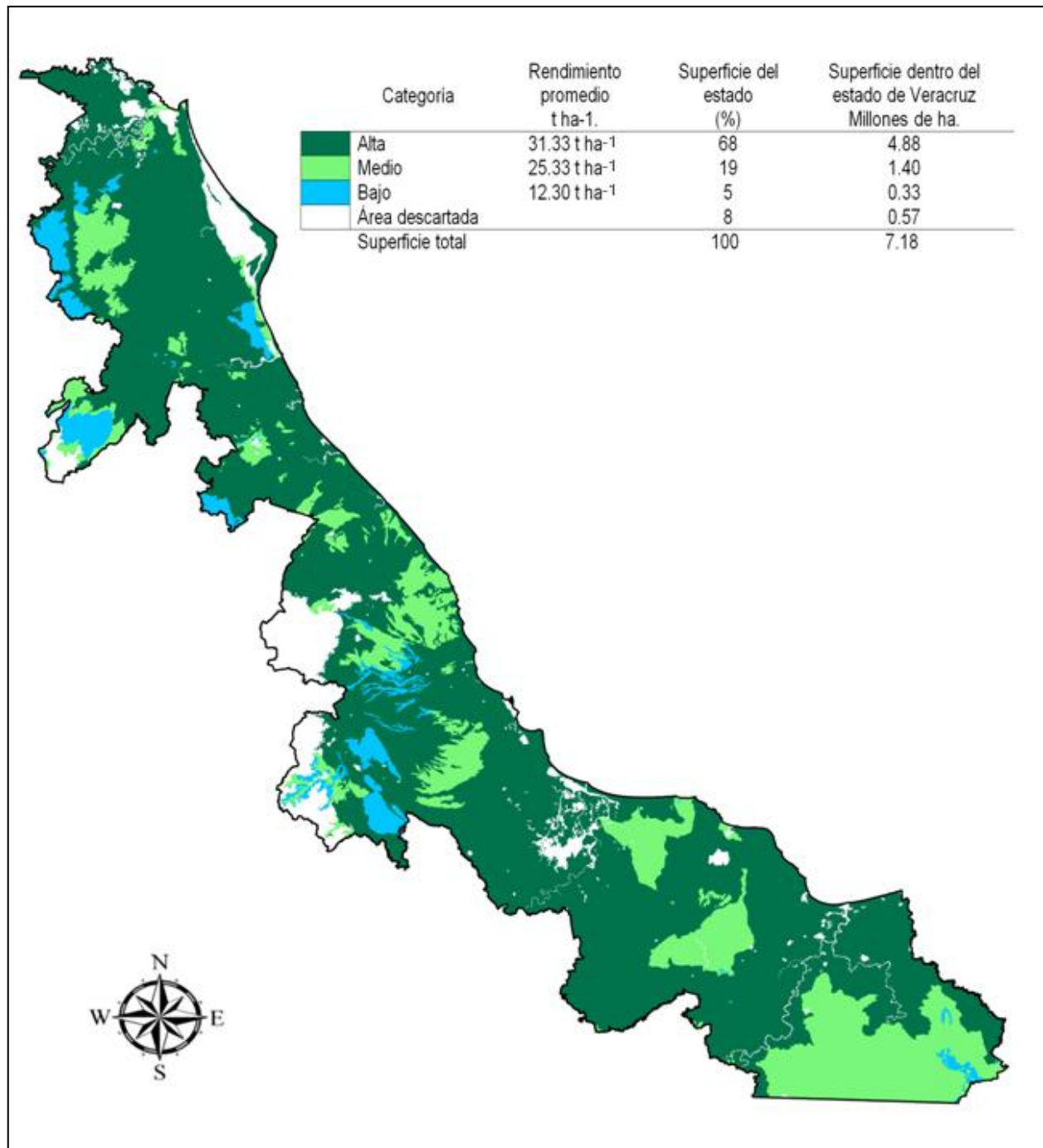


Figura 29. Distribución espacial del índice de productividad de *Pennisetum purpureum* con base a la interacción entre los factores fisicoquímicos del suelo, temperatura y precipitación.

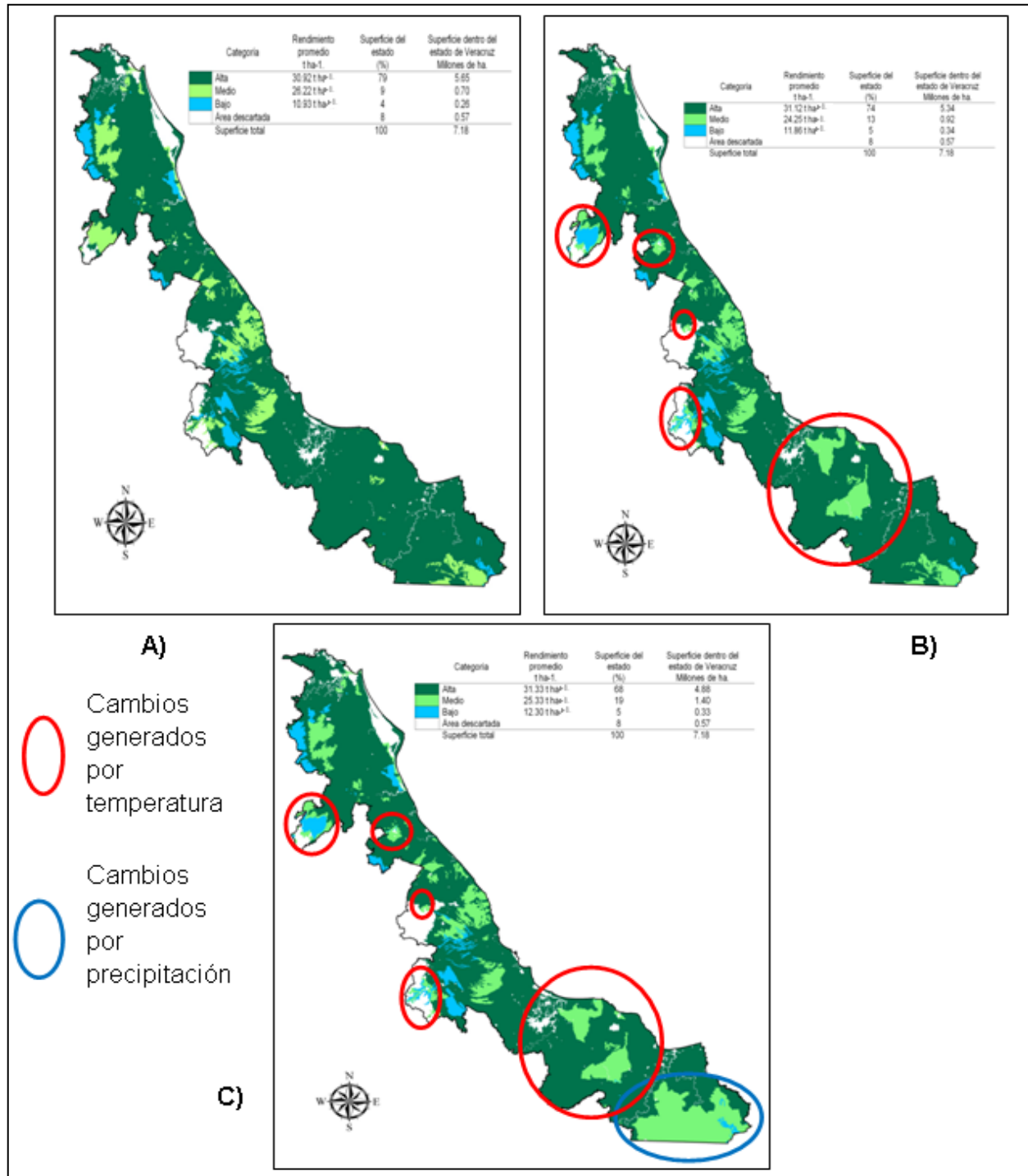


Figura 30. A) Índice de productividad con base a factores fisicoquímicos del suelo; B) Índice de productividad con base a factores fisicoquímicos y temperatura; C) Índice de productividad con base a factores fisicoquímicos, temperatura y precipitación.

9. CONCLUSIONES

- El rendimiento simulado de *Pennisetum purpureum* por SWAT en el estado de Veracruz varió de 0.066 a 44.050 t ha⁻¹ de materia seca en función de las características edafoclimáticas presentes. Esto permite aceptar la hipótesis 1.
- Se obtuvieron distintos intervalos de rendimiento a lo largo de la superficie del estado de Veracruz de acuerdo a las características edafoclimáticas imperantes, donde los factores que más influyeron sobre el rendimiento simulado de materia seca de *Pennisetum purpureum* fueron: a) profundidad de suelo, b) temperatura, c) precipitación pluvial. Con esto se acepta la hipótesis 2.
- El índice de productividad generado a partir de los datos de rendimiento arrojados por el modelo SWAT varió de acuerdo al análisis de doble entrada de las categorías de clasificación de variables climáticas y variables fisicoquímicas de los suelos del estado. Con base a lo anterior se puede aceptar la hipótesis 3.
- El modelo SWAT simuló el rendimiento de materia seca de *Pennisetum purpureum* con razonable precisión, por lo que se considera que la información generada puede ser utilizada en forma confiable por los tomadores de decisiones.
- Mediante la aplicación del proceso metodológico aquí descrito para la implementación del modelo de simulación SWAT, es posible realizar estudios a futuro para determinar el potencial productivo de otras especies de interés económico y social en México.

10. RECOMENDACIONES

- Se recomienda medir *in situ* los parámetros fisiológicos de *Pennisetum purpureum* requeridos por el modelo SWAT, con la finalidad de aumentar la precisión con relación al rendimiento simulado.
- Validar en condiciones de campo los resultados que se obtuvieron con el modelo de simulación.
- Elaborar mapas edafológicos *in situ* o a una menor escala y aumentar el número de estaciones meteorológicas para futuros trabajos de esta naturaleza.

11. REFERENCIAS

- Aceves, L. A., J. F. Juárez, D. J. Palma L, R. López, B. Rivera, J. Rincón A, R. Morales, R. Hernández, y A. Martínez. 2008. Estudio para determinar zonas de alta potencialidad del cultivo de sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) en el estado de Tabasco. SAGARPA, tomo XVI. Tabasco. 43 p.
- Afzal A., and R. Shibasaki. 2000. Climate change and agricultural food production of Bangladesh: an impact assessment using GIS-based biophysical crop simulation model. In: Proceedings of 21st Asian Conference on Remote Sensing. December 4-8. Taipei, Taiwan. 4 p.
- Ahmed, A., And R. Shibasaki. 2000. Climate change and agricultural food production of Bangladesh: An impact assessment using gis-based biophysical crop simulation model. Center for spatial information science. University of Tokio. Japan. 4 p.
- Akhavan S., L. Abedi-Koupai., S. Mousavi F., M. Afyuni., S. Eslamianand S., and K. Abbaspour C. 2010. Applications of SWAT model to investigate nitrate leaching in Hamadan-Bahar Watershed, Iran. Ecosystems and Environment Journal. 139: 675-688.
- Alcantara, P. B., and G. Bufarha 1983. Plantas forrageiras: gramíneas e leguminosas. São Paulo, Editora Nobel, 2da. ed. 150 p.
- Altieri, M. A. 1995. El agroecosistema: Determinantes, Recursos, Procesos y Sustentabilidad. *In*: Agroecología: Bases Científicas para una agricultura sustentable. 2da. ed. Editorial CLADES. Santiago de Chile. pp. 22-31.
- Andrade A., C., M. Fonseca D., H. Pereira D., y T. Reis S. 2005. Análise de crescimento do capimelefante 'napier' adubado e irrigado. Revista Ciência Agrotécnica. 29: 415-423.
- Angelini L., G., L. Ceccarini, and E. Bonari. 2005. Biomass yield and energy balance of giant reed (*Arundo donax* L.) cropped in central Italy as related to different management practices. Eur. J. Agron. 22:375–389.
- Antolín M., C., and M. Sánchez-Díaz. 1993. Effects of temporary droughts on photosynthesis of alfalfa plants. J. Exp. Bot. 44:1341–1349.
- Aper. (2010). Biocombustibles: energía sin límites para un desarrollo sustentable.
- Apezteguía H., P., C. Izaurre R., and R. Sereno. 2002. "Simulation of Soil Organic Matter Dynamics as Affected by Land Use and Agricultural Practices in Semiarid Córdoba, Argentina." *Agronomy Abstracts*. CD-ROM.

- Arnold J. G., and N. Fohrer. 2005. SWAT2000: Current capabilities and research opportunities in applied watershed modeling. *Hydrol. Process.* 19(3): 563-572.
- Arnold J., G., R. Sirinivasan., S. Muttiah R., and R. Williams J. 1998. Large area hydrologic modeling and assessment -Part 1.-Model development. *Journal of the American Water Resources Association* 34: 73-89.
- Aro N., T. Pakula., and M. Penttila. 2005. Transcriptional regulation of plant cell wall degradation by filamentous fungi. *Journal of FEMS Microbiol.* 29: 719–739.
- Ascher, M., F. Gandulgia, V. Orlando, A. Frederique, y M. Jamil. 2009. Mapeo político-institucional y análisis de competencia entre producción de alimentos y bioenergía. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA) (ed). Costa Rica. 96 p.
- Ayala J., R., M. Sistachs., y S. Herrera R. 1989. Methodology to determine planting time in king grass (*Pennisetum* sp.) using historical climate indices. *Proceedings XVI International Grassland Congress.* Nice, France.
- Baruch Z., y T. Fisher M. 1991. Factores climáticos y de competencia que afectan el desarrollo de la planta en el establecimiento de pasturas. En: Lascano, C.E. y Spain, J.M. (eds.). *Establecimiento y renovación de pasturas: conceptos, experiencias y enfoque de investigación.* 6ta. Reunión Comité Asesor RIEPT-CIAT. Cali, Colombia. 103 p.
- Bazzaz F., A., D. Fajer E. 1992. Plant life in a CO₂-rich world. *Scient. Am.* 1992: 1821.
- Béguin P., and P. Aubert J. 1994. The biological degradation of cellulose. *Journal FEMS Microbiol. Rev.* 13: 25-58.
- Bernardos J., N., F. Viglizzo E., V. Jouvét., A. Lértora F., H. Pordomingo A., and D. Cid F. 2001. "The Use of EPIC Model to Study the Agroecological Change during 93 Years of Farming Transformation in the Argentine Pampas." *Agric. Syst.* 69: 215-34.
- Berry, J. K. 1993. *Beyond mapping –Concepts, algorithms and issues in GIS.* J. Wiley, Fort Collins, U.S.A. 246 p.
- Bertalanffy, L. V. 1976. *Teoría General de los Sistemas.* Fondo de Cultura Económica. México, D.F. pp: 1-24.
- Betrie, G. D., A. Y. Mohamed, A. V. Griensven, and R. Srinivasan. 2010. Sediment management modeling in the blue Nile Basin using SWAT model. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 15, 807-818. Texas, USA. 12 p.
- Bian L., H. Sun., C. Blodgett., S. Egbert., L. WeiPing., R. LiMei., and A. Koussis. 1996. An Integrated Interface System to Couple the SWAT Model and ARC/INFO. In:

Proceedings of the 3rd International Conference on Integrating GIS and Environmental Modeling. U.S. National Center for Geographic Information and Analysis, Santa Fe, New Mexico, CD-ROM.

- Bogdan, A. V. 1977. Tropical pasture and fodder crops. Longman, New York. 475 p.
- Boonman, J. G. 1993 .East Africa's Grasses and Fodders, Their Ecology and Husbandry. Published by Kluwer Academic Publisher P.O. Box 17, 3300 AA Dordrecht, The Netherlands. 341 p.
- Borah, D. K., and M. Bera. 2003. Watershed-scale hydrologic and nonpoint-source pollution models: Review of mathematical bases. *Trans. ASAE* 46(6): pp: 1553-1566.
- Borah D. K., and M. Bera. 2004. Watershed-scale hydrologic and nonpoint-source pollution models: Review of applications. *Trans. ASAE* 47(3):789-803.
- Botrel M., A., V. Pereira A., P. Freitas V., F. Xavier D. 2000. Potencial forrageiro de novos clones de capim-elefante. *Revista Brasileira de Zootecnia* 29:334-340.
- Bowen W., T., J. Jones W., P. Torton K.. 1993. Crop simulation as a potencial tool for evaluating sustentainable land magement. Proceedings of the Eight International Soil Management Workshop: Utilization of soil survey information for sustainable land use. Soil Conservation Service, USDA. Oregon, California y Nevada E.U.A. Edited by Kimble, J.M. 15-21p.
- Brathwaite, Ch. 2009. La seguridad alimentaria en las Américas: la exigencia de un nuevo modelo de desarrollo para el siglo XXI. Posición Institucional. En COMUNIICA. 10 p.
- Brown R., A., and J. Rosenberg N. 1999. "Climate Change Impacts on the Potential Productivity of Corn and Winter Wheat in their Primary United States Growing Regions. *Climatic Change* 41(1): 73-107.
- Bullón M., F. 2006. El mundo ante el cenit del petróleo. Asociación para el estudio de los recursos energéticos (AEREN). España. 16 P.
- Burkill, H.M. 1994. The useful plants of West Tropical Africa. Royal Botanic Gardens. Kew, UK. 636 p.
- Bustillos L., J. P. Martínez D., F. Osorio A., S. Salazar., I. Gonzáles., F. Gallardo L. 2009. Grado de sustentabilidad del desarrollo rural en productores de subsistencia, transcisionales y empresariales, bajo un enfoque autopoiético. *Revista Científica FCV-LUZ* 19 (6): 650- 658.

- Butler, I. W., and S. J. Riha. 1989. *GAPS: A general Purpose Formulation Model of the Soil – Plant – Atmosphere System Version 1.1 User's Manual*, Department of Agronomy Cornell University, Ithaca New York.
- Cabelguenne M., A. Jones C., R. Marty J., T. Dyke P., and R. Williams J. 1990. "Calibration and Validation of EPIC for Crop Rotations in Southern France." *Agric. Syst.* 33(2):153-71.
- Carvalho M., M., L. Mozzer O., L. Enrich E., P.M. Contijo V. 1972. Competição de variedades de híbridos de Capim elefante (*Pennisetum purpureum*) em um solo Hidromórfico de Sete Lagoas, Minas Gerais. *Pesq. Agrop. Bras* 7:39 – 45.
- Carvalho-Lopes D., and J. Steidle-Neto A.. 2011. Simulation models applied to crops with potential for biodiesel production. *Computers and Electronics in Agriculture* 75: 1-9.
- Cassman, K. G. 2007. Biocombustibles, seguridad alimentaria e intensificación ecológica de los sistemas agrícolas. International Plant Nutrition Institute. 8 p.
- Cavero J., E. Plant R., C. Shennan, B. Friedman D., R. Williams J., R. Kiniry J., and W. Benson V. 1999. "Modeling Nitrogen Cycling in Tomato-Safflower and Tomato-Wheat Rotations." *Agric. Syst.* 60: 123- 35.
- Center for New Crops and Plant Products. 2002. *Pennisetum purpureum* K. Schumach. Perdue University. http://hort.purdue.edu/newcrop/duke_energy/Pennisetum_purpurium.html. 4 p. Consultado el 21 de Noviembre del 2012.
- Chauhan Y. S. 2010. Potential productivity and water requirements of maize–peanut rotations in Australian semi-arid tropical environments — crop simulations study. *Agricultural Water Management* 97: 457–464.
- Cherney, J. H., and D.J.R. Cherney. 2003. Assessing silage quality. In *Silage Science and Technology*. Buxton DR, Muck R, Harrison J (ed). pp: 141 198.
- Chiavenato, I. 1997. Teoría de sistemas In: *Introducción a la Teoría General de la Administración*. 4^{ta} ed. McGraw-Hill. pp: 725-761.
- Chung S., W., W. Gassman P., R. Huggins D., and W. Randall G. 2001. "Evaluation of EPIC for Tile Flow and Tile Nitrate Losses from Three Minnesota Cropping Systems." *J. Environ. Qual.* 30(3): 822-30.
- Chung S., W., W. Gassman P., R. Gu., and S. Kanwar R. 2002. "Evaluation of EPIC for Assessing Tile Flow and Nitrogen Losses for Alternative Agricultural Management Systems." *Trans. ASAE* 45(4): 1135-46.
- Conway G. 1987. The properties of agroecosystems. *Agric. Systems.* 24: 95-117.

- Conway, G., y A. McCracken. 1990. Rapad rural apraisal and agroecosystem analysis. *In: Altieri, M.A. and Hecht, S.B. (Ed.). Agroecology and small farms development.* CRC Press. Boston, USA. pp 221-234.
- Comisión de Desarrollo y Medio Ambiente de América Latina y el Caribe. 1991. Nuestra propia agenda sobre desarrollo y medio ambiente. Banco Interamericano de desarrollo, programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo y Fondo de Cultura Económica. México D.F., México. 72 p.
- Da Silva G., B., and V. Azevedo P. 2000. Potencial edafoclimático da “Chapada Diamantina” no estado da Bahía para cultivo de Cítrus. *Revista Brasileira de Agrometeorología* 8: 133-139.
- Da Silva, S. C. 2004. Understanding the dynamics of herbage accumulation in tropical grass species: The basis for planning efficient grazing management practices. II Symposium on grasslands ecophysiology and grazing ecology. Curitiba, Brasil. 46 p.
- Da Silva, S. C., y F. Carvalho. 2005. Foraging behavior and herbage intake in the favourable tropics/sub-tropics. XX International Grassland Congress-Grasslands a Global Resource. University College. Dublin, Ireland. pp: 81-95.
- Deinum B., J.H. Van Es A., and J. Van Soest P. 1968. Climate, nitrogen and grass: II. The influence of light intensity, temperature and nitrogen on *in vivo* digestibility of grass and the prediction of these effects from some chemical procedures. *Netherlands J. Agr. Sci.* 16:217.
- Dereszd, F. 1999. Utilização do capim-elefante sob pastejo rotativo para produção de leite e carne. Juiz de Fora, Embrapa-CNPGL, 29 p.
- Di Luzio M., R., R. Srinivasan., and G. Arnold J. 1998. Watershed Oriented Non-point Pollution Assessment Tool. *In: Proceedings of the 7th International Conference on computers in Agriculture.* American Society of Agricultural Engineers. St. Joseph, Michigan, pp: 233-241.
- Di luzio, M., R. Srinivasan, J. G. Arnold, and S. L. Neitsch. 2000. Soil and Water Assessment Tool- Arc View GIS Interface Manual- Version 2000. Grassland, Soil and Water Research Laboratory, Agricultural Research Serviceand Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station, Temple, Texas.
- Di luzio M., R. Srinivasan., and G. Arnold J. 2002. Integration of Watershed Tools and SWAT Model Into BASINS. *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)* 38(4): 1127-1141.
- Domínguez, C. E., J. I. López, R. Castillo, y P. Ruiz. 1999. EL COCOTERO *cocos nucifera* L. Manual para la producción en México. INIFAP. CIRGOC. Campo Experimental Huimanguillo. Libro Técnico Núm. 6. Tabasco, México.132 p.

- Domínguez, J. 2000. Breve Introducción a la Cartografía y a los Sistemas de Información Geográfica. Informes técnicos CIEMAT, No. 943. Madrid, España. 33 p.
- Doornbosch, R., and R. Steenblik. 2007. Biofuels: is the cure worse than the disease? Round Table on Sustainable Development. OECD paper SG/SD/RT. 11-12 September 2007. Paris, France. 57 p.
- Dror, Y. 1963. The planning process: a facet design, international review of administrative sciences. pp: 46-58.
- Du B., A. Saleh., B. Jaynes D., and G. Arnold J. 2006. Evaluation of SWAT in Simulating Nitrate Nitrogen and Atrazine Fates in a Watershed with Tiles and Potholes. American Society of Agricultural and Biological Engineers 49: 949-959.
- Duch G. 2005. Enganchados al petróleo. Periódico de Catalunya.
- Easterling, W. E., P. K. Aggarwal, P. Batima, K. M. Brander, L. Erda, S. M. Howden, A. Kirilenko, J. Morton, J. F. Soussana, J. Schmidhuber, and F. N. Tubiell. 2007. Food, fiber and forest products. Climate Change 2007. Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Parry, M. L., O.F. Canziani, J. P. Plutikof, P.J. van der Linden and C. E. Hanson. (eds). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom. pp: 273-313.
- Eckhardt K., and G. Arnold J. 2001. Automatic calibration of a distributed catchment model. *J. Hydrology* 251(1-2): 103-109.
- Edwards D., R., W. Benson V., R. Williams J., C. Daniel T., J. Lemunyon, and G. Gilbert R.. 1994. "Use of the EPIC Model to Predict Runoff Transport of Surface-Applied Inorganic Fertilizer and Poultry Manure Constituents." *Trans. ASAE* 37(2): 403-9.
- Enríquez, Q. J. F., F. N. Meléndez, y E. D. Bolaños A. 1999. Tecnología Para La Producción Y Manejo De Forrajes Tropicales En México INIFAP (ed). CIRGOC. Campo Experimental Papaloapan. Libro Técnico Núm. 7 División Pecuaria Veracruz, México. 262 p.
- Evans J., M., J. Fletcher., and J. Alavalapati. 2010. Using species distribution models to identify suitable areas for biofuel feedstock production. *GCB Bioenergy* 2: 63-78.
- FAO. 1997. Zonificación agroecológica, Guía general. Boletín de suelos de la FAO 73. Servicio de Recursos, Manejo y Conservación de Suelos Dirección de Fomento de Tierras y Aguas, FAO. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. Roma, Italia. 96 p.

- FAO. 2004. UBET – Unified Bioenergy Terminology. Rome, Italy. 58p.
- FAO. 2008a. The State of Food and Agriculture: Biofuels: prospects, risks and opportunities. Rome, Italy. 129p.
- FAO. 2008b. Assessment of the world food security and nutrition situation. Committee on world food security. Thirty-fourth session. October 14-17, 2008. Rome, Italy. 18 p.
- FAO. 2008c. Panorama del hambre en América Latina y el Caribe. Iniciativa América Latina sin Hambre. 68 p.
- Faramarzi M., M. Yang., R. Schulin., and C. Abbaspour K. 2010. Modeling wheat yield and crop water productivity in Iran - Implications of agricultural water management for wheat production. *Journal Agricultural Water Management* 97:1861-1975.
- Favis-Mortlock D., and J. Boardman. 1995. "Nonlinear Responses of Soil Erosion to Climate Change: A Modelling Study on the UK South Downs." *Catena* 25: 365-87.
- Farquhar G., D., S. von Caemmerer., A. Berry J. 2001. Models of photosynthesis. *Plant Physiology Journal*, 125, 42–45.
- Fernández-Rodríguez, E. J., y L. López-Bellido. 1993. Modelos de simulación de cultivos herbáceos. Ministerio de agricultura pesca y alimentación. 265 p.
- García, B. J. 1979. Estructura metodológica para la caracterización agroecológica de áreas por procedimientos cuantitativos de análisis y posterior zonificación. Tesis doctoral. Colegio de Postgraduados, Texcoco, Edo. de México, México. 451 p.
- García Camus, J. M., y J.A. García Laborda. 2006. Biocarburantes líquidos: biodiesel y bioetanol. Informe de vigilancia tecnológica. Circulo de innovación en tecnologías medioambientales y energía. Madrid, España. 33 p.
- Garg K., K., L. Bharati, A. Gaur, B. George, S. Acharya, K. Jella, and B. Narasimhan. 2011. Spatial mapping of agricultural water productivity using the SWAT model in Upper Bhima Catchment, India. *Irrigation and Drainage*. Publicado en línea en Wiley On line Library.
- Gallopín, G. 2003. A system approach to sustainability and sustainable development. CEPAL medio ambiente y desarrollo serie 64. Santiago, Chile. 42 p.
- Galagovsky L., and A. Aduriz-Bravo. 2001. Modelos y analogías en la enseñanza de las ciencias naturales el concepto de modelo didáctico analógico. *Enseñanza de las Ciencias* 19: 231-242.

- Ganduglia, F., Equipo de Proyectos de Biocombustibles de ARPEL. 2009. Manual de biocombustibles. UY, ARPEL, IICA.
- Gassman, P. W., M. R. Reyes, C. H. Green, and J.G. Arnolds. 2007. The Soil and Water Assessment Tool: Historical Development, Applications, and Future Research Directions. Soil and Water Division of ASABE. American Society of Agricultural and Biological Engineers ISSN 0001-2351. EUA. 40 p.
- Gliessman, S. 2002. El concepto de agroecosistemas. In: Introducción a la Agroecología. McGraw Hill (ed). pp: 17-28.
- Gómez A., M. Rodríguez., C. Montañés., C. Dopazo., and N. Fueyo. 2010. The potential for electricity generation from crop and forestry residues in Spain. Biomass and Bioenergy Journal 34: 703-719.
- González, J., A. Pérez, F. León, J. Olivares, H. Calderón, D. Astori, S. Figueroa, T. Lee. 1986. La planificación del desarrollo agropecuario. Siglo XXI (ed). México. pp: 81-187.
- Gutiérrez Puebla J., M. Gould. 1994. *SIG: sistema de información geográfica*. Editorial Síntesis, S.A. Madrid. p. 251. ISBN: 84-7738-246-8.
- Guzman E., J. Bonini., D. Matamoros. 2004. Aplicación del modelo hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool) para la predicción de caudales y sedimentos en una cuenca hidrográfica Caso de estudio: Cuenca del Rio Chaguana. Revista Tecnológica 17: 152-161.
- Harman W., L., E. Wang., and R. Williams J.. 2004. "Reducing Atrazine Losses: Water Quality Implications of Alternative Runoff Control Practices." *J. Environ. Qual.* 33: 7-12.
- Harper, L. 1974. Population biology of plants. Academic Press. London. 18 p.
- Hart, D. 1985. Conceptos básicos sobre agroecosistemas. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Turrialba, Costa Rica. 156 p.
- Heaton EA., G. Dohleman F., P. Long S. 2008. Meeting US biofuel goals with less land: the potential of Miscanthus. *Global Change Biology*, 14: 2000–2014.
- Hernández, X., E. (edit). 1977. Agroecosistemas de México. CP-ENA. 42 p.
- Hernández, C. J. M., A. Olivera, A. Palacios, A. Sandoval, M. Grajales, J. D. Estrada, E. Domínguez, M. Alonso, E. Ortiz, L. N. Ávila, A. Alejo, M. A. Coutiño, y V. W. Gonzales. 2006. Tecnología para la producción de palma de aceite *Elaeis guineensis* Jacq. En México. 2° ed. INIFAP. Libro Técnico Núm. 14. México.149 p.

- Hewson, J., E. Ashkenazi, M. Steininger, and C. Dragisic. 2009. Using geospatial technology to map potential biofeedstock crop cultivation zones and identify potential conflict with areas of high biodiversity or ecosystem service value. Conservation International. US Department of Energy. 26 p.
- Holm, L.G., D. L. Plucknett, J. V. Pancho, and J. P. Herberger. 1977. The World's worst weeds. East-West Center. Honolulu, HI. 609 p.
- Houghton, J. T., G. J. Jenkins, and J. J. Ephrauma. 1990. Climate Change, The IPCC Scientific Assessment, Cambridge University Press, Cambridge, UK. 365 p.
- Hubert, M. 1956. Nuclear Energy and the Fossil Fuels. Spring Meeting of the Southern District Division of Production, American Petroleum Institute. San Antonio, Texas, EUA. 57 p.
- Hughes J., K., J. Lloyd A., C. Huntingford., W. Finch., and J. Harding. 2010. The impact of extensive planting of *Miscanthus* as an energy crop on future CO₂ atmospheric concentrations. *GCB Bioenergy* 2:79-88.
- Ibarra-Gómez, A. X. 2011. Diseño de una planta productora de biodiésel a partir de *Jatropha curcas* L. Mediante una catálisis enzimática. Tesis de licenciatura. Instituto Tecnológico de Veracruz, Veracruz, Ver., México. 172 p.
- IEA. 2006. Energy Technology perspectives – Scenario's and strategies to 2050. OECD/IEA. Paris, France. 227.
- IEA. 2007. Potential contribution of Bioenergy to the World's Future Energy Demand. New Zealand. 2p.
- IEA. 2008. World Energy Outlook. Executive Summary. 5 p.
- IEA. 2008^a. *From 1st- to second-generation Biofuel Technologies: An Overview of Current Industry and RD&D activities*, OECD/IEA, Paris. http://www.iea.org/textbase/papers/2008/2nd_Biofuel_Gen.pdf. Consultado el 15 de Noviembre del 2012.
- IEA. 2008^b. *Energy Technology Perspectives 2008: Scenarios and Strategies to 2050*, OECD/IEA, Paris.
- IEA. 2009^a. *World Energy Outlook 2009*, OECD/IEA, Paris.
- IEA. 2010. Sustainable Production of Second- Generation Biofuels. Paris France. 9p.
- International Benchmark Sites Network for Agrotechnology Transfer (IBSNAT) Project. 1989. *Decision Support System for Agro technology Transfer Version 2.1* Department of Agronomy and Soil Science, College of Tropical Agriculture and Human Resources, University of Hawaii, Honolulu HI.

- Instituto de Investigaciones Legislativas del Senado de la República. 2004. Nuevas energías renovables: una alternativa energética sustentable para México. México. 183p.
- Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). 2007. Atlas de la Bioenergía y los Biocombustibles en las Américas. I. Etanol. IICA, San José, Costa Rica. 181p.
- Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). 2010. América Latina y el Caribe: Mapeo político-institucional y análisis de la competencia entre producción de alimentos y bioenergía. San José, Costa Rica. 96 p.
- IPCC. 1996. R.T. Watson, M.C. Zinyowera, R.H. Moss. (Eds.) Climate Change 1995: Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analyses. Contribution of Working Group II to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, Cambridge.
- IPCC. 1998. R.T. Watson, M.C. Zinyowera, R.H. Moss. (Eds.) The regional impacts of climate change: an assessment of vulnerability. A Special Report of IPCC Working Group II, Cambridge University Press, Cambridge.
- IPCC. 2007b. Summary for Policymakers. In: Climate Change 2007. Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. B. Metz, O. R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L. A. Meyer (eds). Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. P2-23.
- Izaurrealde R., C., J. Rosenberg N., A. Brown R., and M. Thomson A. 2003. "Integrated Assessment of Hadley Center (HaDCM2) Climate-Change Impacts on Agricultural Productivity and Irrigation Water Supply in the Conterminous United States," pt. 2, "Regional Agricultural Production in 2030 and 2095." *Agric. Forest Meteorol.* 117(1-2): 97-122.
- Jacques, A.V. 1994. Caracteres morfo-fisiológicos e suas aplicações como manejo. In: CARVALHO, M.M., ALVIM, M.J., XAVIER, D.F. et al. (Eds.) Capimelefante: produção e utilização. Coronel Pacheco: Embrapa-Gado de Leite. pp: 31-47.
- Jenks, G. F. 1967. The Data Model Concept in statistical Mapping. *International Yearbook of Cartography* 7 pp: 186-190.
- Jodha N., S. 1989. Potential strategies for adapting to green house warming: Perspective from the developing world, in: Green House warming: Abatement and Adaptation, Rosenberg N.L., Earlerling III W.E., Crosson P.R., and Darmstadter J. (eds), RFF Proceedings, Climate Resources Division, pp.147-158.

- Jones, J. W., K. J. Boote, G. Hoogenboom, S. S. Jagtar, G.G. Wilkerson. 1989. *SOYGRO V 5.42: Soybean Crop Growth Simulation Model: User's Guide*; Department of Agricultural Engineering and Department of Agronomy, University of Florida Gainesville.
- Klare M. 2005. El colapso energético que se avecina. Jornada UNAM. (On line). <http://www.jornada.unam.mx/2005/03/31/022a1eco.php>. Consultado el 10 de Noviembre del 2012.
- Kimball B., A., R. Mauney J., S. Nakayama F., and B. Idso S.. 1983, Effects of Increasing Atmospheric CO₂ on Vegetation. *Journal Vegetation* 104/105:65-70 p.
- Krishna-Murthy, V. R. 2003. Crop growth modeling and its applications in agricultural. In: Sivakumar M. V. K., H. Donald. (eds). *Satellite Remote Sensing and GIS Applications in Agricultural Meteorology*. World Meteorological Organization. pp: 235-261.
- Ko J., G. Piccinni, and E. Steglich. 2009. Using EPIC model to manage irrigated cotton and maize. *Journal Agricultural Water Management* 96: 1323–1331.
- King K., W., W. Richardson C., and R. Williams J. 1996. "Simulation of Sediment and Nitrate Loss on a Vertisol with Conservation Tillage Practices." *Trans. ASAE* 39(6): 2139-45.
- Kiniry J., R., C. Major R., R. Izaurre J., W. Williams P., M. Gassman., R. Morrison., P. Zenther R. 1995. EPIC model parameters for cereal, oilseed, and forage crops in the northern great plains region. *Can. J. Plant Sci.* 75:679-688.
- Kiniry J., R., A. Sanderson M., R. Williams J., R. Tischler C., A. Hussey M., R. Ocumpaugh W., C. Read J., V. Esbroeck G., L. Reed R. 1996. Simulating Alamo switchgrass with the Almanac model. *Agron. J.* 88:6002-606.
- Lair, R. 1991. El desarrollo agrícola en México. Conferencia en el curso de estrategias para el desarrollo agrícola regional. Colegio de postgraduados. México. 1 p.
- Liu J. 2009. A GIS-based tool for modeling large-scale crop-water relations. *Environmental Modeling & Software* 24: 411-422.
- Liu J., R. Williams J., J. B. Zehnder A., and H. Yang. 2007. GEPIIC-modeling wheat and crop water productivity with high resolution on a global scale. *Agricultural Systems* 94: 478-493.
- Laux P., G. Jackel., R. Munang-Tigem., and H. Kunstmann. 2010. Impact of climate change on agricultural productivity under rainfed conditions in Cameroon- A method to improve attainable crop yields by planting date adaptations. *Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 150: 1258-1271.

- Lynd L., P. Weimer., W. van Zyl., and I. Pretorius. 2002. Microbial Cellulose Utilization: Fundamentals and Biotechnology. *Microbiol. Mol. Biol. Rev.* 3: 506–577.
- Lewandowski I., M.O. Scurlock J., E. Lindvall., and M. Christou. 2003b. The development and current status of perennial rhizomatous grasses as energy crops in the US and Europe. *Biomass and Bioenergy* 25:335–361.
- Long, R. W., and O. Lakela. 1971. A flora of Tropical Florida. University of Miami Press, Coral Gables, Florida. 962 p.
- Lemus R., C. Brummer E., J. Moore K., E. Molstad N., L. Burras C., F. Barker M.. 2002. Biomass yield and quality of 20 switchgrass populations in southern Iowa, USA. *Biomass and Bioenergy* 23:433-442.
- Leiva, F. R., J. Y. Buitrago, J. Rodríguez, and L. Guerrero. 2008. Aproximación a la agricultura de precisión (AP) en el cultivo de maíz (*Zea mays* L.) en Colombia. En: Leiva F.R. (ed). Agricultura de precisión en cultivos transitorios. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. pp: 43-71.
- Lee J., J., L. Phillips D., and R. Liu. 1993. “The Effect of Trends in Tillage Practices on Erosion and Carbon Content of Soils in the U.S. Corn Belt.” *Water Air Soil Poll.* 70: 389-401.
- Luo Y., C. He, M. Sophocleous, Z. Yin, R. Hongrui, and Z. Ouyang. 2008. Assessment of crop growth and soil water modules in SWAT2000 using extensive field experiment data in an irrigation district of the Yellow River Basin. *Journal of Hydrology* 352: 139-156.
- Losch, R. 1995. Plant water relations. En: Physiology. Progress in Botany (ed). Vol. 56 Springer Verlag Berlin. pp: 55- 96.
- Leiva, F. R., J. Y. Buitrago, J. Rodríguez, and L. Guerrero. 2008. Aproximación a la agricultura de precisión (AP) en el cultivo de maíz (*Zea mays* L.) en Colombia. En: Leiva F.R. (ed). Agricultura de precisión en cultivos transitorios. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia. pp: 43-71.
- Maass, J. M., y A. Martínez-Yrizar. 1990. *Los ecosistemas:definición, origen e importancia del concepto*, Ciencias (núm. 4 especial), pp. 10-19.
- MacDonald, A. 1999. Building a Geodatabase. ESRI pres, Red-lands, California.
- Machado A., N., L. Siewerdt., P. Silveira Junior., F. Siewerdt. 1996. Efeito do espaçamento de plantio na produção e qualidade de forragem capimelefante cv. Três Rios. *Rev. Bras. de Agrocência* 2:57-62.

- Mariaca M. 1993. Agroecosistemas, concepto central de la ecología: Búsqueda del desarrollo de un modelo aplicativo. In: Seminario Internacional de Agroecología. Universidad Autónoma Chapingo. México. 11 p.
- Marten G., T. Rambo. 1988. Guidelines for writing comparative case studies on Southeast Asian rural ecosystems. In K. Rerkasem and A. Terry Rambo (eds.), Agroecosystem Research for Rural Development Multiple Cropping Centre, Chiangmai University, Thailand. pp: 263-285.
- Martinez, F. J. L. 1984. Zonificación agroecológica para los cultivos del naranjo (*Citrus sinensis* (L.) Osbeck) y limón mexicano (*Aurantifolia christm Swingle*) en el estado de Oaxaca, México. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Texcoco, Edo. de México, México. 890 p.
- Martínez D., J., P. 1999. Modelo conceptual de agroecosistema para el desarrollo agrícola sustentable basado en el hombre. IV Reunión Nacional sobre Agricultura Sustentable. Jalisco, México. 8 p.
- Martínez D., J., P. 2010. Planificación en los agroecosistemas. Colegio de postgraduados campus Veracruz, en el marco de la XXIII reunión científica-tecnológica forestal y agropecuaria Veracruz y II del trópico mexicano. México. Pag. 55-66.
- Mastrangelo S. 2008. Conceptos de Generación Termoeléctrica: Combustibles Utilizados e Impactos Ambientales. Boletín energético 11.
- Matos, C. 1986. Pensamiento iberoamericano. Revista de economía política. Instituto de cooperación iberoamericana. España. pp: 13-37.
- Matus, C. 1993. Estrategia y plan. Siglo XXI editores. ILPEZ Y CEPAL. pp: 101-187.
- Matthews, R., W. Stephens. 2002. Crop simulation models. Application in developing countries. CABI. UK. pp: 31-109.
- Mazoyer, M., and L. Roudart. 1997. Histoire des agricultures du monde. Le Seuil, Paris, France.
- McLaughlin S., B., G. De La Torre Ugarte D., T. Garten-Jr C., R. Lynd L., A. Sanderson M., R. Tolbert V., and D. Wolf D. 2002. Highvalue renewable energy from prairie grasses. Environ. Sci. Technol. 36:2122–2129.
- Mckendry P. 2002. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. Bioresource Technology 83: 37-46.
- Meehl, G. A., T. F. Stocker, W. D. Collins, P. Friedlingstein, A. T. Gaye, J. M. Gregory, A. Kitoh, R. Kanutti, J. M. Murphy, A. Noda, S. C. B. Raper, I. G. Watterson, A. J. Weaver, and A. C. Zhao. 2007. Global Climate Projections. In: Solomon S., D.

- Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller (eds). Climate Change 2007. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom. pp: 747-845.
- Montaldo, P. 1982. Agroecología del Trópico Americano. IICA, San Jose, Costa Rica. p.11
- Mosher, A. 1964. De la investigación en el desarrollo agrícola. Los requisitos para el desarrollo agrícola. México. 7 p.
- Moss D., N. 1964. Some aspects of microclimatology important in forage plant physiology. In: Forage plant physiology an soil relationships. ASA Special publications Madison-Winsconsin.
- Narasimhan B., R. Srinivasan., G. Arnold J., and M. Di Luzio. 2005. Estimation of long-term soil moisture using a distributed parameter hydrologic model and verification using remotely sensed data. *Trans. ASABE* 48: 1101-1113.
- Nascimento-junior, D. 1981. Informações sobre plantas forrageiras. Viçosa, MG, UFVImprensa Universitária,. 56 p.
- Natural Resources Conservation Service. 2002. Plants profile: *Pennisetum purpureum* Schumacher. Washington, DC. http://plants.usda.gov/cgi_bin/plant_profile.cgi?symbol=PEP U2. 3 p. Consultado el día 10 de agosto del 2012.
- Neitsch, S. L., J. G. Arnold, J. R. Kiniry, J. R. Williams, K. W. King. 2002^a. Soil and water assessment tool – Theoretical documentation – version 2000. Grassland, soil and water research laboratory, Agricultural research service and blackland research center, texas agricultural experimete station, temple, texas.
- Neitsch, S. L., J. G. Arnold, J. R. Kiniry, and J. R. Williams. 2005. Soil and Water Assessment Tool. Theoretical Documentation. Backland Research Center. Texas, U.S.A. 494 p.
- Nelson, C. J., and L. E. Moser. 1994. Plant factors affecting forage quality. En: Forage quality, evaluation and utilization. Fahey, G. C. (ed.). American Society of Agronomy, Inc. Madison, Wisconsin, USA.
- Nielsen D., C., M. Liwang., R. Lajpat., and G. Hoogenboom. 2002. Simulation Soybean Water Stress Effects with RZWQM and CROPGRO Models. *Agron. J.* 94:1234-1243. 10p.

- Ng T., L., W. Eheart J., X. Cai, F. Miguez. 2010. Modeling Miscanthus in soil and water Assessment Tool (SWAT) to Simulate Its Water Quality Effects As a Bioenergy Crop. *Environ. Sci. Technol.* 44: 7138-7144.
- Odum, P. 1985. *Fundamentos de ecología*. Nueva Editorial Interamericana. México. 422 p.
- OECD. 2007. *Subsidy Reform and Sustainable Development - Political Economy Aspects*, OECD Sustainable Development Studies, OECD Publications, Paris, France.
- Olivera F., M. Valenzuela., R. Srinivasan., J. Choi., H. Cho., S. Koka., A. Agrawal. 2006. ArcGIS-SWAT: A GEODATA MODEL AND GIS INTERFACE FOR SWAT. *Journal of the American Water Resources Association*. American Water Resources Association. Texas, EUA. 15 p.
- Ovando-Chacón S., L., and N. Waliszewski K. 2005. Preparativos de celulasas comerciales y aplicaciones en procesos extractivos. *Universidad y Ciencia*, 21: 111-120.
- Pacific Island Ecosystems at Risk. 2002. Invasive plant species: *Pennisetum purpureum* Schumacher, Poaceae. <http://www.hear.org/pier3/pepur.htm>. 2 p. Consultado en línea el 10 de agosto del 2011.
- Parra, M., M. Perales, F. Inzunza, C. Solano, E. Hernández, O. Santos. 1984. La regionalización socioeconómica en La Revista de Geografía Agrícola, Nos. 5-6 Julio de 1983 y Enero de 1984. Universidad Autónoma Chapingo (UACH) Chapingo, estado de México.
- Parry, M. L., O. F. Canziani, and J. P. Plutikof. 2007. Technical Summary. *Climate Change 2007*. In: Parry, M. L., O. F. Canziani, J. P. Plutikof, P.J. van der Linden and C. E. Hanson, (eds). *Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom. pp: 23-78.
- Pereira, A. V. 1993. Escolha de variedades de capim-elefante. In: PEIXOTO, A.M., MOURA, J.C., FARIA, V.P. (Eds.) *Simpósio sobre Manejo da Pastagem*, 10, Piracicaba, 1993. *Anais...* Piracicaba: FEAL. pp: 47-62.
- Pérez J., A. Muñoz-Dorado., T. De la Rubia., y E. Martínez. 2002. Biodegradation and biological treatments of cellulose, hemicellulose and lignin: an overview. *Int. Microbiol.* 5: 53–63.
- Pezo, D. 1997. Producción y utilización de pastos tropicales para la producción de leche. En Clavero, T. (ed.). *Estrategias de alimentación para la ganadería*

- tropical. Centro de Transferencia de Tecnología en Pastos y Forrajes, Univ. del Zulia. Maracaibo, Venezuela. p. 53.
- Phillips D., L., D. Hardin P., W. Benson V., and V. Baglio J. 1993. "Nonpoint Source Pollution Impacts of Alternative Agricultural Management Practices in Illinois: A Simulation Study." *J. Soil Water Cons.* 48: 449-57.
- Phillips D., L., J. Lee J., and F. Dodson R. 1996. "Sensitivity of the US Corn Belt to Climate Change and Elevated CO₂: I. Corn and Soybean Yields." *Agric. Syst.* 52: 481-502.
- Pierson S., T., L. Cabrera M., K. Evanylo G., D. Schroeder P., E. Radcliffe D., A. Kuykendall H., W. Benson V., R. Williams J., S. Hoveland C., and A. McCann M. 2001. "Phosphorus Losses from Grasslands Fertilized with Broiler Litter: EPIC Simulations." *J. Environ. Qual.* 30: 1790-95.
- Pollock C., J. 1990. The response of plant to temperature change, *Journal of Agricultural Science* 115: 1- 5.
- Portilla-Pérez E., y D. Geissert-Kientz. 2006. Zonificación agroecológica de sistemas agroforestales: el caso café (*Coffea arabica* L.)- palma camedor (*Chamaedorea elegans* Mart.). *Interciencia* 31: 556-562.
- Potter K., N., R. Williams J., J. Larney F., and S. Bullock M. 1998. "Evaluation of EPIC's Wind Erosion Submodel using Data from Southern Alberta." *Can. J. Soil Sci.* 78: 485-92.
- Price L., M. Billard., H. Lyons., S. Anthony., and P. Nixon. 2002. Identifying the yield potential of *Miscanthus giganteus*: an assessment of spatial and temporal variability of M. x giganteus biomass productivity across England and Wales. *Biomass and Bioenergy* 26: 3-13.
- Priya S., R. Shibasaki. 2001. National spatial crop yields simulation using GIS-based crop production model. *Ecological Modelling Journal* 135: 113-129.
- Putnam J., J. Williams., and D. Sawyer. 1988. "Using the Erosion-Productivity Impact Calculator (EPIC) to Estimate the Impact of Soil Erosion for the 1985 RCA Appraisal." *J. Soil Water Cons.* 43(4): 321-26.
- Purseglove, J.W. 1972. *Tropical crops Monocotyledons* (Harlow, UK:ELBS/Longman).
- Putto C., A. Patanothai., S. Jogloy., K. Pannangpetch., J. Boote K., and G. Hoogenboom. 2009. Determination of efficient test sites for evaluation of peanut breeding lines using the CSM-CROPGRO-peanut model. *Field Crops Research Journal* 110: 272-281.

- Quesada D.M. 2005. Parâmetros quantitativos e qualitativos da biomassa de genótipos de capim-elefante (*Pennisetum purpureum* Schum.) com potencial para uso energético, na forma de carvão vegetal. Tese (Doutorado) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica 86 p.
- Radulovich R. 2000. Sequential cropping as a function of water in a seasonal tropical region. *Agron Journal* 92: 860-867p.
- Ragauskas A., J., K. Williams C., H. Davison B., G. Britovsek., J. Cairney., A. Eckert C., J. Frederick-Jr W., P. Hallett J., J. Leak D., L. Liotta C., R. Mielenz J., R. Murphy., R. Templer., y T. Tschaplinski . 2006. The path forward for biofuels and biomaterials. *Science*. 311: 484-489.
- Ramalho-Filho, A. 2008. Agro-ecological zoning for oil palm in deforested areas of Brazilian Amazon. Bioenergy and Biodiversity Joint International Workshop on High Nature Value Criteria and potential sustainable use of degraded lands. Paris France. 38 p.
- Redfearn, D. D., C. J. Nelson. 2003. Forages: An Introduction to Grassland Agriculture: Grasses for Southern Areas, 7, 6th edn) pp. 153–154. The Iowa State University Press, Ames, IA.
- Rinaldi M. 2001. Application of EPIC model for irrigation scheduling of sunflower in Southern Italy. *Agricultural Water Management* 49: 185–196.
- Ritchie, J. T., U. Singh, D. Godwin, and L. Hunt. 1989. *A User's Guide to CERES – Maize V. 2.10*; International Fertilizer Development Center; Muscle Shoals.
- Rodrigues, L. R., T. J. D. Rodrigues. 1987. Ecofisiologia de plantas forrageiras. In: CASTRO, P. R. C., FERREIRA, S. O., YAMANDA, T. (Ed.) Ecofisiologia da produção agrícola. Piracicaba: POTAFÓS. pp: 203-230.
- Rodrigues, L. R. A., F. A. Monteiro, T. J. D. Rodrigues. 2001. Capim elefante. In: PEIXOTO, A.M., PEDREIRA, C.G.S., MOURA, J.V., FARIA, V.P. (Eds.) Simpósio sobre manejo da pastagem, 17, Piracicaba, 2001. 2ª edição. Anais... Piracicaba:FEALQ. pp: 203-224.
- Rojas, E. O. 1985. Esquema metodológico para la zonificación agroecológica de cultivos de IICA. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. Memoria Curso Internacional sobre la Agroclimatología. San Salvador, El Salvador. pp: 64-73.
- Rojas G., A., F., E. Girón-Gallegos., y G. Torres-Castañeda H. 2009. Variables de operación en el proceso de transesterificación de aceites vegetales: una revisión - catálisis química. *Ingeniería e Investigación* 29:17-22.

- Romo, J. R. 1985. Zonas con potencial agroclimático para la producción de cinco oleaginosas bajo temporal en la República Mexicana. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Texcoco, Edo. de México, México. 181 p.
- Roth A., M., W. Sample D., A. Ribic C., L. Paine., J. Underlander D., and A. Bartelt G. 2005. Grassland bird response to harvesting switchgrass as a biomass energy crop. *Biomass Bioenergy* 28: 490–498.
- Ruiz, R. O. 1995. Agroecosistema. Término, concepto y su definición bajo el enfoque agroecológico y sistémico. In: Seminario Internacional de Agroecología. UACH. Estado de México. pp. 29-31.
- Ruiz, J., y M. E. Silva.1999. "Zonificación agroecológica del maíz de temporal en los Valles Centrales de Oaxaca II. Determinación de las prácticas de producción adecuadas". *Terra Latinoamericana* 004.
- Sabbagh G., J., E. Norris P., S. Geleta., J. Bernado D., L. Elliott R., P. Mapp H., and F. Stone J. 1992. "Environmental and Economic Impacts of Pesticide and Irrigation Practices: EPIC-PST Simulation." *J. Prod. Agric.* 5: 312-17.
- Sadras V., J. Baldock., D. Roget., and D. Rodriguez. 2003. Measuring and modeling yield and water budget components of wheat crops coarse-textured soils with chemicals constraints. *Field Crops Research* 84: 241–260.
- Saha, B. C. 2004. "Lignocellulose Biodegradation and Applications in Biotechnology" in *Lignocellulose Biodegradation*, American Chemical Society, Washington, D.C. pp: 2–34
- Saleh A., R. Williams J., C. Wood J., M. Hauck L., and H. Blackburn W. 2004. "Application of APEX for forestry." *Trans. ASAE* 47: 751-65.
- Samson R., S. Mani., R. Boddey., S. Sokhansanj., D. Quesada., S. Urquiaga., V. Reis., C. Ho Lem. 2005. The potential of C4 perennial grasses for developing a global BIOHEAT industry. *Critical Reviews in Plant Sciences* 24: 461-495.
- Sánchez-Carrillo, J. 1999. Agroclimatología .Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico. Universidad Central de Venezuela. Caracas Innovación Tecnológica, Caracas Venezuela. 147 p.
- Sanchez O., J., A. Cardona C. 2005. Producción biotecnológica de alcohol carburante: obtención a partir de diferentes materias primas. *Interciencia* 30: 671-678.
- Sandoval C., y J. Villanueva. 2009. Scope, Sections, Policies and language issues in TSA. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 10 (2009): i - ii Editorial.
- Santhi C., R. Srinivasan, G. Arnold J., R. Williams J. 2005. A modeling approach to evaluate the impacts of water quality management plans implemented in a

- watershed in texas. Environmental modeling y software 21 (2006) 1141-1157. USA. 17p.
- Sargent R., G. 2007. Verification and validation of simulation models. Proceedings of the 2007 Winter Simulation Conference. Department of electrical engineering and computer science. Syracuse University. New York, EUA. 14p.
- Saxton K., E., J. Rawls W., S. Romberger J., and I. Papendick R. 1986. Estimating generalized soil-water characteristics from texture. Soil Science Society of America Journal 50: 1031-1036.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). 2008. Estrategia Intersecretarial y Programas de Producción Sustentable de Insumos e introducción de Bioenergéticos en México. Resumen Ejecutivo. Gobierno Federal, México. 9 p.
- SEDECO. 2011. Características del estado de Veracruz. ONLINE. México.
- Seeman, J., Y. I. Chirkov, J. Lomas, and B. Primault. 1979. Agrometeorology. Quarterly Journal of Royal Meteorological Society. Springer-Verlag, Berlin, Germany. 324 p.
- Sharpley, A. N., and J. R. Williams. 1990. EPIC-Erosion/Productivity Impact Calculator. USDA. Agricultural Research Service, Technical Bulletin No. 1768, Washington, D.C. E.U.A. 235 p.
- Shepherd B., D. Harper., and A. Millington. 1999. Modelling catchment- scale nutrient transport to watercourses in the U.K. *Hydrobiologia* 395-396: 227-237.
- Simms A. 2002. GIS and aquaculture: Assessment of soft-shell clam sites. Journal of Coastal Conservation 8: 35-47.
- Skerman, P. J., and F. Riveros. 1990. Tropical grasses. FAO Plant Production and Protection Series 23. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome. 832 p.
- Solomon, S., D. Qin, M. Mannering, R. B. Alley, T. Berntsen, N. L. Bindoff, Z. Chen, A. Chidthaisong, J. M. Gregory, G. C. Hegerl, M. Heimann, B. Hewitson, B. J. Hoskins, F. Joos, J. Jouzel, V. Kattsov, U. Lohmann, T. Matsuno, M. Molina, N. Nicholls, J. Overpeck, G. Raga, V. Ramaswamy, J. Ren, M. Rusticucci, R. Somerville, T. F. Stocker, P. Whetton, R. A. Wood and D. Wratt. 2007. Technical Summary. In: Solomon S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller (eds). Climate Change 2007. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom. pp: 19-91.

- Srinivasan R., and G. Arnold J. 1994. Integration of a Basin-Scale Water Quality Model with GIS. *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)* 30: 453-462.
- Srinivansan R., X. Zhang., and J. Arnold. 2010. SWAT ungauged: Hydrological budget and crop yield predictions in the upper Mississippi river basin. *American Society of Agricultural and Biological Engineers* 53: 1533-1546.
- Strain B., R. 1987. Direct effects of increasing atmospheric CO₂ on plants and ecosystems. *Trends in Ecology and Evolution*, 2: 18–21p.
- Sudduth K., A., W. Fraisse. C., T. Drummont S., and R. Kitchen N. 1998. Integrating spatial data collection, modeling and analysis for precision agriculture. First international conference on geospatial information in agriculture and foresting, Lake Buena Vista, Florida. E.U.A. pp: 29-36.
- Tan G., and R. Shibasaki. 2003. Global estimation crop productivity and the impacts of global warming by GIS and EPIC integration. *Ecological Modeling* 168: 357-370.
- Tcacenco, F. A., M. A. BOTREL. 1997. Identificação e avaliação de acessos e cultivares de capim-elefante. In: CARVALHO, M.M., ALVIN, M.J., XAVIER, D.F., et al. (Eds) *Capim elefante: produção e utilização*. 2^a ed., revisada. Brasília:Embrapa-SPI e Juiz de Fora:Embrapa-Gado de Leite, pp: 1- 30.
- Tinoco, A. C., F. A. Rodríguez, J. A. Sandoval, S. Barrón, A. Palafox, V. A. Esqueda. 2002. Manual de producción de maíz para los estados de Veracruz y Tabasco. Libro Técnico No. 9. SAGARPA. INIFAP. CIRGOC. Campo Experimental Papaloapan. Veracruz, México. 113 p.
- Tollefson J. 2008. Not your father's Biofuels. *Nature* 451: 880-883.
- Trabucco A., M. J. Achten W., C. Bowe., R. Aerts., J. Van-Orshoven., L. Norgroves., B. Muys. 2010. Global mapping of *Jatropha curcas* yield based on response of fitness to present and future climate. *GCB Bioenergy* 2: 139-151.
- Trebuil G., y P. Kam S. 2000. From cropping and farming System Research to ecoregional Approaches for Integrated Natural Resources Management: Developing the Agricultural System Concept. Proceedings of the First Thailand National Agricultural seminar. Bangkok. 257-276 p.
- Tropical Forages. 2011. http://www.tropicalforages.info/key/Forages/Media/Html/Pennisetum_purpureum.htm. Consultado en línea el 28 de noviembre del 2011.
- Tsihrintzis A., V., R. Hamid., and R. Fuentes H. 1996. Use of geographic information system (GIS) in water resources. *Water Resources Management* 10: 251-277.

- Uresti, J. G., Q. F. Enríquez, G. I. López, y H. V. Hernández. 2009. Patos tropicales, mina renovable de biocombustibles: Estimación preliminar del rendimiento teórico de etanol. CIRGOC-INIFAP. México. 2 p.
- United States of America-Department of Energy U.S DOE. 2006. *Breaking the Biological Barriers to Cellulosic Ethanol: A Joint Research Agenda*, DOE/SC-0095, U.S. Department of Energy Office of Science and Office of Energy Efficiency and Renewable Energy (genomicsgtl.energy.gov/biofuels/).
- United States of America-Department of Energy (USA-DOE). 2010. Biomass Energy Data Book. 3ª. United States of America-Department of Energy. Energy Efficiency and Renewable Energy. Oak Ridge National Laboratory, E.U.A. 230 p.
- Van Griensven A., and W. Bauwens. 2001. Integral water quality modelling of catchments. *Water Sci. and Tech.* 43(7): 321-328.
- Ventura S., J., K. Kim. 1993. Modeling urban nonpoint source pollution with a geographic information system. *Water Resources Bulletin* 29: 189-198.
- Vilaboa J., P. Díaz., E. Ortega., M. Rodríguez. 2006. Productividad y autonomía en dos sistemas de producción ovina: dos propiedades emergentes de los agroecosistemas. *Interciencia* 31: 37-44.
- Vilaboa J., P. Díaz., R. Ruíz., D. Platas., M. Gonzáles., F. Juárez. 2009. Caracterización socioeconómica y tecnológica de los agroecosistemas con bovinos de doble propósito de la región del Papaloapan, Veracruz, México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 10: 53-62.
- Vilaboa J. 2011. Agroecosistemas: Una forma de entender la relación sociedad-naturaleza. *Agroentorno* 131: 27-30.
- Vine M., F., D. Degnan., and C. Hanchette. 1997. Geographic Information Systems: Their Use in Environmental Epidemiologic Research. *Environmental Health Perspective* 105: 598-605.
- Walsh M.E., D.G. De La Torre Ugarte, H. Shapouri, and S.P. Slinsky. 2003. Bioenergy crop production in the United States. *Environ. Resour. Econ.* 24:313–333.
- Waterson, A. 1965. *Development planning- lessons of experience*. Baltimore.
- Weitz, R. 1971. *Regional Planning for Rural Development in Developing Countries, Rural Development in a Changing World*. London, England. 587 p.
- Williams J., R., A. Jones C., R. Kiniry J., and A. Spaniel D. 1989. 'The EPIC Growth Model' *Trans. American Soc. Agric. Eng.* 32: 479-511.

- Williams J., R., W. Richardson C., and H. Griggs R. 1992. "The Weather Factor: Incorporating Weather Variance into Computer Simulation." *Weed Technol.* 6: 731-35.
- Williams E., E., J. Rosenberg N., S. McKenney M., A. Jones C., T. Dyke P., and R. Williams J. 1992. Preparing the erosion productivity impact calculator (EPIC) model to simulate crop response to climate change and the direct effects of CO₂. *Agricultural and Forest Meteorology* 59: 17-34.
- Williams J., R., and D. Berndt H. 1977. Sediment yield prediction based on watershed hydrology. *Trans. ASAE* 20: 1100-4.
- Wu W., G., K. Huang J., and Z. Deng X. 2010. Potential land for plantation of *Jatropha curcas* as feedstock for biodiesel in China. *Science China Earth Science* 53: 120-127.
- Yang, H. S., A. Dobermann, K. Cassman, and D. Walters. 2006. Developing Crop Simulation Model to Suit Diverse Users: Example of Hybrid-Maize Software. In: Fourcaud T., and X. Zhang. (eds). *Proceedings of Plant growth modeling and applications*. pp: 175-180.