



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE HIDROCIENCIAS

**EVALUACIÓN DEL MODELO EPIC
PARA ESTIMAR RENDIMIENTOS DE MAÍZ (*Zea mays*)
EN LA DEPRESIÓN CENTRAL DE CHIAPAS, MÉXICO**

OSIEL LÓPEZ VELASCO

**T E S I S
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO

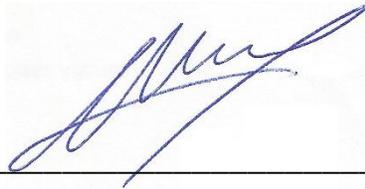
2014

La presente tesis titulada: **Evaluación del modelo EPIC para estimar rendimientos de maíz (*Zea mays*) en la Depresión Central de Chiapas, México**, realizada por el alumno: **Osiel López Velasco**, 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
HIDROCIENCIAS**

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO:



DR. DEMETRIO SALVADOR FERNÁNDEZ REYNOSO

ASESOR:



M.C. ERASMO RUBIO GRANADOS

ASESOR:



M.C. JOSÉ DONALDO RÍOS BERBER

AGRADECIMIENTOS

A dios por concederme la gracia de la vida, todo lo que tengo, sabiduría y entereza para dar un paso más en mi vida.

A los mexicanos, que a través del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología y el Colegio de Postgraduados, han financiado parte de mi formación académica.

Al cuerpo académico del Colegio de Postgraduados por los conocimientos transmitidos en mi formación académica y personal.

Al Posgrado de Hidrociencias por brindarme la oportunidad de realizar mis estudios de maestría y formar parte de sus generaciones.

Al mi consejero de tesis y asesores, Dr. Demetrio Salvador Fernández Reynoso, M.C. Erasmo Rubio Granados y M.C. José Donald Ríos Berber, por su desinteresado apoyo, acertada dirección, consejos y sugerencias para la culminación de éste trabajo.

A mi madre por darme la vida e inculcarme todos los valores y principios que me han formado humana y profesionalmente.

A la L.E. Adriana Ibáñez Juárez por la paciencia y apoyo incondicional brindado en los momentos difíciles.

A mi hermano Ing. Ángel Adín López Velasco por hacerme sentir como en casa y a mis amigos por su amistad y momentos compartidos académica y laboralmente, especialmente al Ing. Hilario Ramírez García e Ing. Sergio López Ramírez.

A todas las personas que directa o indirectamente contribuyeron en la culminación de éste trabajo.

DEDICATORIA

A mi madre, esposa, familia y amigos: quienes me han brindado amor, cariño, comprensión y apoyo incondicional en todo momento para poder alcanzar este logro...

EVALUACIÓN DEL MODELO EPIC PARA ESTIMAR RENDIMIENTOS DE MAÍZ (*Zea mays*) EN LA DEPRESIÓN CENTRAL DE CHIAPAS, MÉXICO

Osiel López Velasco, M.C.

Colegio de Postgraduados, 2014

Este trabajo se realizó en la Depresión Central de Chiapas (DCC), con el fin de calibrar y validar el modelo EPIC (Erosion/Productivity Impact Calculator) para estimar, en condiciones de secano, los rendimientos del maíz. En la calibración del modelo se utilizaron rendimientos de maíz de las parcelas bajo seguimiento técnico del PROMAF (Programa Estratégico de Apoyo a la Cadena Productiva de Productores de Maíz y Frijol). En la validación del modelo se utilizaron los rendimientos de maíz a nivel municipal reportados por el SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). Se consideraron parámetros de crecimiento del maíz, características del suelo, variables climáticas y factores de manejo del cultivo. En ambos casos los rendimientos de grano simulados se compararon con los observados. En la calibración se utilizaron 119 parcelas de seguimiento y se obtuvieron rendimientos de maíz que varían entre 3.5 a 7.7 t ha⁻¹, con un valor promedio de 5.8 t ha⁻¹, un coeficiente de determinación (R²) de 0.67, línea de la pendiente de la regresión de 0.99, y una diferencia absoluta máxima entre rendimientos simulados y observados de 0.8 t ha⁻¹. Antes del ajuste de parámetros, la suma de cuadrados del error (SEE) fue de 9.33 y después de la calibración se redujo a 0.19. En la validación se utilizaron los datos de rendimiento de maíz, a nivel municipal, reportados por el SIAP en el periodo de 2005 a 2011. Las diferencias absolutas entre los rendimientos de grano simulados y observados para el municipio de Acala variaron entre 0.1 y 3.5 t ha⁻¹, en Venustiano Carranza entre 0.0 y 1.8 t ha⁻¹, en Villacorzo entre 0.1 y 2.2 t ha⁻¹, y Villaflores entre 0.3 y 1.8 t ha⁻¹. Para los años sin altas diferencias absolutas Venustiano Carranza mostró el mejor coeficiente de determinación (R² de 0.80). Para una simulación de 50 años de rendimiento de maíz, Acala produciría entre 2.5 y 3.0 t ha⁻¹, Venustiano Carranza entre 2.5 y 4.0 t ha⁻¹, Villacorzo entre 4.5 y 5.0 t ha⁻¹ y Villaflores entre 3.5 y 5.0 t ha⁻¹; similar al rendimiento promedio de maíz reportado por SIAP (2.6, 3.6, 4.8 y 3.6 t ha⁻¹, respectivamente) a nivel municipal. El rendimiento del maíz mostró una relación directa con la profundidad del suelo y el estrés por humedad; se encontró que el rendimiento de maíz aumenta regionalmente 50.0 kg ha⁻¹ por cada día que el estrés hídrico se reduce. Los resultados muestran que el modelo EPIC es una herramienta confiable para simular el rendimiento del maíz, pero requiere de una extensa base de datos.

Palabras clave: Maíz, Rendimiento, Chiapas, Modelo EPIC, Calibración, Validación.

EVALUATION OF THE EPIC MODEL FOR CORN (*Zea mays*) YIELD ASSESSMENT IN CHIAPAS'S CENTRAL DEPRESSION, MEXICO

Osiel López Velasco, M.C.

Colegio de Postgraduados, 2014

This work was performed in the Central Depression of Chiapas (DCC), in order to calibrate and validate the model EPIC (Erosion/Productivity Impact Calculator) to estimate, under rainfed conditions, corn's yield. For model calibration were used maize yields from PROMAF's demonstration plots (Spanish acronym for a federal program to support maize and bean production in Mexico). For model validation were used municipal corn yields reported by the SIAP (Spanish acronym for a federal dependence responsible to produce the national agricultural statistics). In this work were considered the growth corn's parameters, soil characteristics, climatical variables, and the crop system. In both cases the simulated grain yields were compared with the observed ones. In the calibration, using 119 plots of monitoring, were obtained corn's yields between 3.5 to 7.7 t ha⁻¹, with an average value of 5.8 t ha⁻¹, a coefficient of determination (R²) of 0.67, regression's line slope of 0.99, and a maximum absolute difference between simulated and observed yields of 0.8 t ha⁻¹. Before adjustment of parameters, the error sum of squares (SEE) was 9.33 and after parameter calibration the SEE decreased to 0.19. For the validation process were used from SIAP data of corn yield, at municipal level, between 2005 and 2011. The absolute differences between simulated and observed grain yields for Acala's municipality varied between 0.1 and 3.5 t ha⁻¹, in Venustiano Carranza between 0.0 and 1.8 t ha⁻¹, in Villacorzo between 0.1 and 2.2 t ha⁻¹, and Villaflores between 0.3 and 1.8 t ha⁻¹. For the years with lower absolute differences Venustiano Carranza had the best coefficient of determination (R² of 0.80). For a simulation of 50 years of corn yield, Acala would produce between 2.5 and 3.0 t ha⁻¹, Venustiano Carranza from 2.5 to 4.0 t ha⁻¹, Villacorzo between 4.5 and 5.0 t ha⁻¹ and Villaflores from 3.5 to 5.0 t ha⁻¹; similar to the average corn yield reported by SIAP (2.6, 3.6, 4.8 y 3.6 t ha⁻¹, respectively) on municipality level. Corn's yield showed a direct relationship between soil depth and water stress; corn's yield regionally increases 50.0 kg ha⁻¹ for each day that water stress is reduced. The results showed that the EPIC model is a reliable tool to simulate corn's yield but the model requires an extensive database.

Keywords: *Corn, Yield, Chiapas, EPIC model, Calibration, Validation.*

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE CONTENIDO	i
ÍNDICE DE CUADROS	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	iv
CAPÍTULO 1. EVALUACIÓN DEL MODELO EPIC PARA ESTIMAR RENDIMIENTOS DE MAÍZ EN LA DEPRESIÓN CENTRAL DE CHIAPAS	1
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVO	2
Objetivo general	2
Objetivos particulares	2
HIPÓTESIS	2
SUPUESTOS	2
REVISIÓN DE LITERATURA	3
Modelos de simulación	3
Comparación de modelos de simulación	5
Métodos directos para determinar la erosión	6
Usos del modelo EPIC	7
Componentes del modelo EPIC	9
Hidrología	9
Clima	10
Erosión	11
Nutrimentos	12
Crecimiento de plantas	12
Temperatura del suelo	12
Manejo	12
Economía	13
Países productores de maíz en el mundo	13
Producción de maíz en México	14
Producción de maíz en Chiapas	15
MANEJO DE LA INFORMACIÓN PARA SU USO EN EPIC	17
Información meteorológica	17
Información edafológica	19
DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	20
Ubicación	20
Clima	21

Suelos	21
Uso del suelo y vegetación.....	21
LITERATURA CITADA	28
CAPÍTULO 2. EVALUACIÓN DE RENDIMIENTOS PARCELARIOS, DE MAÍZ EN CHIAPAS, USANDO EL MODELO EPIC	32
INTRODUCCIÓN.....	33
MATERIALES Y MÉTODOS.....	35
Área de estudio.....	35
Obtención de la información.....	35
Información del sistema de producción	35
Información meteorológica	36
Información edafológica	36
Información fisiotécnica.....	36
Ajuste de variables	37
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	37
CONCLUSIONES.....	42
LITERATURA CITADA	42
CAPÍTULO 3. APLICACIÓN DEL MODELO EPIC PARA LA EVALUACIÓN PRODUCTIVA MUNICIPAL DEL MAÍZ EN CHIAPAS	45
INTRODUCCIÓN.....	47
MATERIALES Y MÉTODOS.....	48
Área de estudio.....	48
Obtención de la información.....	48
Información del sistema de producción	49
Información meteorológica	49
Información edafológica	49
Información fisiotécnica.....	50
Simulación del modelo.....	50
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	50
CONCLUSIONES.....	58
LITERATURA CITADA	58
CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES TÉCNICAS PARA EL CULTIVO DE MAÍZ	61
LITERATURA CITADA	62
CAPÍTULO 5. ANEXOS.....	63

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. 1. Estaciones meteorológicas utilizadas para la calibración y validación de EPIC.	17
Cuadro 1. 2. Variables climatológicas y sus rangos para la base de datos del modelo EPIC.....	18
Cuadro 1. 3. Variables edafológicas para la base de datos del modelo EPIC.....	19
Cuadro 2. 1. Variables fisiotécnicas para la base de datos del modelo EPIC.....	37
Cuadro 3. 1. Variables fisiotécnicas para la alimentación del modelo EPIC.	50
Cuadro 3. 2. Rendimientos observados (SIAP) y rendimientos simulados (RO y RS) anuales. ..	51
Cuadro 5. 1. Parámetros estadísticos para la generación climática sintética de la estación meteorológica 07003.....	63
Cuadro 5. 2. Parámetros estadísticos para la generación climática sintética de la estación meteorológica 07034.....	63
Cuadro 5. 3. Parámetros estadísticos para la generación climática sintética de la estación meteorológica 07065.....	63
Cuadro 5. 4. Parámetros estadísticos para la generación climática sintética de la estación meteorológica 07132.....	64
Cuadro 5. 5. Parámetros estadísticos para la generación climática sintética de la estación meteorológica 07327.....	64
Cuadro 5. 6. Parámetros estadísticos para la generación climática sintética de la estación meteorológica 07329.....	64
Cuadro 5. 7. Parámetros estadísticos para la generación climática sintética de la estación meteorológica 07342.....	65
Cuadro 5. 8. Parámetros estadísticos para la generación climática sintética de la estación meteorológica 07349.....	65
Cuadro 5. 9. Parámetros estadísticos para la generación climática sintética de la estación meteorológica 07358.....	65
Cuadro 5. 10. Valores de variables de suelo para la base de datos del modelo EPIC en la calibración.	66
Cuadro 5. 11. Valores de variables de suelo para la base de datos del modelo EPIC en la validación.....	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2. 1. Rendimientos observados (RO) y rendimientos simulados (RS) antes de la calibración.	38
Figura 2. 2. Porcentaje de parcelas aceptadas y descartadas en la calibración para técnicos con más de una parcela a cargo.	39
Figura 2. 3. Rendimientos observados (RO) y rendimientos simulados (RS) después de la calibración.	39
Figura 2. 4. Efecto de la profundidad del suelo en los rendimientos simulados (RS).	40
Figura 2. 5. Efecto del estrés hídrico en los rendimientos simulados (RS).	41
Figura 2. 6. Efecto de la fertilización con nitrógeno en los rendimientos simulados (RS).	41
Figura 3. 1. Rendimientos observados (SIAP) y rendimientos simulados (RO y RS) para Acala a) y Venustiano Carranza b).	52
Figura 3. 2. Rendimientos observados (SIAP) y rendimientos simulados (RO y RS) para Villacorzo c) y Villaflores d).	52
Figura 3. 3. Rendimientos observados (SIAP) y rendimientos simulados (RO y RS) a través de medias municipales.	53
Figura 3. 4. Rendimientos promedios por tipo de suelo.	54
Figura 3. 5. Días de estrés hídrico, de temperatura y de nutrimentos, por tipo de suelo.	55
Figura 3. 6. Relación entre días de estrés por humedad y rendimientos a nivel regional.	55
Figura 3. 7. Relación entre días de estrés por nutrimentos y rendimientos a nivel regional.	56

CAPÍTULO 1. EVALUACIÓN DEL MODELO EPIC PARA ESTIMAR RENDIMIENTOS DE MAÍZ EN LA DEPRESIÓN CENTRAL DE CHIAPAS

INTRODUCCIÓN

El maíz (*Zea mays*), desde el punto de vista alimentario y social, es el cultivo más importante de México y en el Estado de Chiapas no es la excepción. A nivel nacional Chiapas ocupa el primer lugar en la superficie dedicada a la producción de maíz de temporal y el décimo lugar en rendimiento. Esta disparidad obedece al deterioro de las propiedades originales del suelo y a los sistemas de producción con paquetes tecnológicos inadecuados (López *et al.*, 2009), entre otros factores.

Tradicionalmente la estimación de rendimientos implica realizar estudios detallados del comportamiento del cultivo bajo diferentes condiciones agroecológicas y productivas, que la hacían una técnica costosa, laboriosa y con resultados a mediano y largo plazo. Ante esta situación, cobra importancia el aplicar modelos de simulación que permitan estimar los rendimientos en forma confiable y analizar cambios en el manejo sin necesidad de establecer parcelas experimentales para su monitoreo. Los modelos de simulación han probado su eficiencia como herramientas para la planeación del manejo de recursos naturales y para establecer esquemas de ordenamiento espacial a diferentes escalas (Hartkamp *et al.*, 1999). El modelo EPIC (Erosion/Productivity Impact Calculator) fue desarrollado para determinar la relación entre erosión y productividad agrícola, y ha permitido a los planificadores establecer metas de control de la erosión, en función de las técnicas de conservación de suelo y la productividad de los cultivos (Williams *et al.*, 1984).

En este trabajo se calibró y validó el modelo EPIC para estimar los rendimientos de maíz de temporal en la Depresión Central de Chiapas (DCC), México, donde las condiciones del medio físico son aptas para el desarrollo y producción del cultivo de maíz, pero que por problemas en el manejo no se refleja en los rendimientos alcanzados. Partiendo de la premisa de que EPIC fue diseñado para evaluar las características hidrológicas de parcelas, asumiendo homogeneidad en manejo y tipo de suelos, el modelo fue calibrado y validado satisfactoriamente para estimar rendimientos de maíz a nivel parcelario y municipal dentro del área de estudio. Los resultados

permiten recomendar su aplicación en estudios futuros de la región, como herramienta para establecer metas de producción de maíz, control de la erosión y de apoyo para realizar inventarios de producción.

OBJETIVO

Objetivo general

Calibrar y validar el modelo EPIC (Erosion/Productivity Impact Calculator) para estimar el rendimiento de maíz, en condiciones de temporal, en la Depresión Central de Chiapas, México.

Objetivos particulares

- Calibrar el modelo EPIC usando los rendimientos de maíz de las parcelas de seguimiento técnico del PROMAF y datos fisiotécnicos, edafológicos, climatológicos y manejo de cultivo en la DCC.
- Validar el modelo EPIC con información de rendimientos de maíz del SIAP para los municipios de Acala, Venustiano Carranza, Villacorzo y Villaflores.
- Evaluar la calidad de la información reportada por el PROMAF y el SIAP, comparando los rendimientos simulados y los observados.
- Generar un mapa de rendimientos medios anuales de maíz, representativo para la región, con 50 años de simulación.

HIPÓTESIS

El modelo EPIC simula satisfactoriamente los rendimientos de maíz de temporal para el Estado de Chiapas.

SUPUESTOS

- Los rendimientos reportados por el Programa Estratégico de Apoyo a la Cadena Productiva de Productores de Maíz y Frijol (PROMAF) y el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP) son confiables.
- La información de temperatura mínima, máxima y precipitación de las estaciones meteorológicas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) es confiable.

- Las características físicas y químicas de los suelos reportados por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) son confiables.
- Las variables fisiotécnicas del maíz reportadas en la literatura son estadísticamente consistentes.
- Las prácticas agrícolas del manejo de cultivo y fechas de realización son estadísticamente consistentes.
- Los sistemas de producción de maíz de temporal en el Estado de Chiapas no variaron significativamente durante el periodo de análisis.

REVISIÓN DE LITERATURA

Modelos de simulación

El uso de modelos de simulación constituye una herramienta útil para el manejo de recursos naturales y sirven para establecer esquemas de ordenamiento espacial en sistemas de labranza para la conservación del suelo a escala parcelaria, comunitaria o de microcuencas (Hartkamp *et al.*, 1999).

Los modelos de simulación hidrológica se componen de una serie de ecuaciones que calculan e interrelacionan, de manera computarizada, los diversos procesos relacionados con el escurrimiento. Determinan el balance hídrico del área mediante ecuaciones que resuelven a su vez los componentes del ciclo hidrológico, a través de funciones matemáticas que relacionan, generan o resuelven los términos de precipitación, evaporación, evapotranspiración, escurrimiento, infiltración, percolación, almacenamiento y flujo base. Los modelos de simulación de erosión, según los componentes de escurrimiento generados, calculan la producción de sedimentos de una cuenca. Varios modelos de este tipo generan información adicional a la erosión, como la productividad de cultivos, concentraciones de plaguicidas y nutrimentos en suelo, agua y sedimentos (Silva, 1995).

Los avances en la hidrología, junto con la tecnología informática, han permitido desarrollar y aplicar la tecnología de predicción de producción de sedimentos que combina modelos de erosión con procesos relacionados de crecimiento de plantas, humedad del suelo y cobertura de residuos

(Lane *et al.*, 1992). Villar (1996) menciona que de éstos modelos, los más conocidos son: el Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems (CREAMS), el Simulator of Water Resources in Rural Basins (SWRRB), el Erosion/Productivity Impact Calculator (EPIC) y el Water Erosion Prediction Project (WEPP).

Los componentes que integran el modelo CREAMS son el hidrológico, erosión, producción de sedimentos, nutrimentos y plaguicidas (Frere *et al.*, 1980). Este modelo fue diseñado para evaluar la contaminación de origen no puntual en unidades hidrológicas del tamaño de parcelas de cultivo y se aplica para simular la calidad del agua en superficies de 1 a 100 ha (Bingner, 1990).

El modelo SWRRB (Arnold *et al.*, 1990) fue desarrollado en base a procesos físicos para predecir el efecto del manejo de suelo y cultivo sobre la producción de agua y sedimentos en cuencas sin registros hidrométricos, es decir, en simulaciones que no requieren calibración (Arnold y Williams, 1987). Los componentes principales del SWRRB son clima, hidrología y sedimentación. Los procesos considerados son: escorrentía, flujo de retorno, percolación, evapotranspiración, pérdidas de transmisión, almacenamiento en lagunas de oxidación y presas, sedimentación y crecimiento del cultivo (Williams y Renard, 1985). Este modelo se obtuvo modificando el sub-modelo hidrológico de lluvia diaria de CREAMS para aplicarlo en cuencas rurales grandes y complejas, por lo que tiene restricciones por el tamaño de la cuenca. Los cambios principales fueron: a) se expandió el modelo para permitir cálculos simultáneos en varias subcuencas, b) se añadieron componentes para simular clima, flujo de retorno, almacenamiento en lagunas de oxidación y presas, crecimiento del cultivo, pérdidas de transmisión y movimiento de sedimentos a través de cuerpos de agua, cauces y valles fluviales (Arnold y Williams, 1987). Por otro lado, para el diseño de SWRRB se tomaron varios componentes del modelo EPIC, principalmente los relacionados al sub-modelo de crecimiento vegetal.

El EPIC fue desarrollado para determinar la relación entre erosión (hídrica y eólica) y productividad agrícola (Williams *et al.*, 1984). Este modelo permite a los planificadores establecer metas de control de la erosión, en función de las técnicas de conservación de suelo y la productividad de los cultivos. La relación entre costos de producción y productividad permiten orientar la selección de prácticas de conservación de suelo (Benson *et al.*, 1989). Los principales

componentes del modelo EPIC son hidrología, clima, erosión, movilidad de nutrientes, crecimiento vegetal, temperatura del suelo, sistema de labranza, factores económicos y manejo de cultivo. El modelo fue diseñado para evaluar las características hidrológicas en parcelas de una a cien hectáreas, asumiendo homogeneidad en manejo y tipo de suelos. Verticalmente, el modelo permite trabajar con las variaciones de las propiedades del suelo, ya que el perfil del mismo puede dividirse hasta en diez horizontes.

El modelo WEPP, a diferencia de los modelos anteriores, se basa en procesos físicos para predecir escurrimientos superficiales y erosión hídrica en laderas y cuencas (Lane y Nearing, 1989; Eliot *et al.*, 1989). Para estimar de la escorrentía superficial considera la infiltración, el encostramiento superficial, hidráulica de surco, crecimiento de la planta, descomposición de residuos, percolación, transpiración, deshielo y el efecto de las heladas sobre la infiltración. Para simular la distribución espacial y temporal de la pérdida de suelo, en una ladera completa o en cada punto de ella, considera la erosión de surco y entresurcos, el depósito y transporte de sedimentos, la erosionabilidad del suelo, el tipo de labranza y el desborde de camellones.

Comparación de modelos de simulación

Los modelos de simulación más importantes (EPIC, SWRRB y CREAMS) utilizan modificaciones de la USLE (Universal Soil Loss Equation) como componente de sedimentación y del método de la Curva Numérica (CN) para calcular la escorrentía. El WEPP y su derivación para cuencas, Kineros (Kinematic runoff and erosion model), se desarrollaron sobre una base independiente de la USLE y de la Curva Numérica, con una formulación física de procesos. No obstante, parte importante de sus algoritmos se obtuvieron a través de modificaciones de componentes de otros modelos o de regresiones. De estos modelos el EPIC es el modelo hidrológico de erosión más avanzado en la simulación de los procesos del cultivo (nutrientes, crecimiento y productividad), ya que la mayoría de los modelos se basan en dicho componente. En cuanto a erosión eólica, EPIC es el único modelo de simulación hidrológica que la toma como proceso (Silva, 1995).

Al comparar resultados de la producción de agua y sedimentos estimada por varios modelos (EPIC, CREAMS, SWRRB) con valores aforados, Bingner *et al.* (1989) encontraron que todos los modelos presentan deficiencias en la estimación de alguno de los componentes; el CREAMS y

SWRRB producen resultados similares a los valores medidos más frecuentemente que el EPIC. El EPIC muestra mejor ajuste para estimar la producción de agua, pero simuló no así para la erosión. Este comportamiento se atribuyó a que el EPIC calcula el factor C (cobertura y manejo) de la USLE, en vez de recibirlo como dato de entrada.

Métodos directos para determinar la erosión

Los métodos directos comprenden experimentos agronómicos con pérdida de suelo natural o artificial; los más conocidos son: lotes de escurrimiento y la remoción artificial.

- **Lotes de escurrimiento a largo plazo.** Son experimentos a largo plazo para evaluar el rendimiento del cultivo bajo manejo estándar y donde la erosión de la parcela se cuantifica y registra adecuadamente.

Lal (1981) utilizó este procedimiento para monitorear la erosión en lotes de escurrimiento en diferentes sistemas de manejo entre 1971 y 1975 en un alfisol en Nigeria. Encontró que los rendimientos de maíz y chícharo de vaca (*Vigna unguiculata*) disminuyen exponencialmente con el aumento acumulado de pérdida de suelo. Las disminuciones drásticas del rendimiento de cultivos, causadas por erosión del suelo, se atribuyeron a la disminución del porcentaje de arcilla, materia orgánica, reducción de la profundidad del suelo y del desarrollo de raíces, así como de la capacidad del suelo para almacenar agua y bajas tasas de infiltración.

Para las condiciones tropicales de México, López (1993) utilizó esta técnica para evaluar el impacto de la erosión del suelo sobre la productividad del maíz de laderas en el ciclo 1986 a 1991. Los resultados indican que la pérdida acumulada de suelo en ese periodo fue de 250 t y el rendimiento de maíz se redujo en un 70%, al pasar de 5.55 a 1.85 t ha⁻¹ (pérdida promedio anual de 0.6 t ha⁻¹). La pérdida de la productividad se atribuyó a la disminución de la erosionabilidad del suelo (K), del contenido de materia orgánica, conductividad hidráulica y al aumento de la densidad aparente.

- **Remoción artificial de suelo.** Es una técnica experimental que consiste en remover artificialmente capas superficiales del suelo a diferentes profundidades, con siembra

posterior de cultivos bajo manejo uniforme. Esta técnica es rápida, simple y relativamente barata, pero no es natural.

En México Osuna (1991) aplicó esta técnica para evaluar el impacto de la erosión del suelo en la productividad del maíz y frijol en la región Norte y Centro del país. Removió artificialmente capas de 5, 10 y 15 cm de suelo, que para perderse, dadas las características de la región, tendrían que transcurrir 10, 20 y 30 años, respectivamente. Encontró que la remoción de suelo elimina grandes cantidades de nutrientes y materia orgánica, lo que provoca una reducción del rendimiento del maíz del orden de 44 y 66% para una remoción de 10 y 15 cm, respectivamente. Con 5 cm de remoción, la pérdida del rendimiento no fue significativa.

En el trópico de México, Villar (1992) encontró que para lograr las pérdidas de suelo simuladas por remoción artificial (removió capas de 5, 10 y 15 cm) tendrían que transcurrir, por las características del sitio experimental, 15, 30 y 45 años, respectivamente. Con estos tratamientos se tuvo una reducción del rendimiento de 0.723 kg ha^{-1} en un periodo estimado de 45 años. Esta pérdida de la productividad se correlacionó con una reducción significativa del contenido de nutrientes del suelo y del contenido de materia orgánica.

Usos del modelo EPIC

El modelo EPIC ha tenido una amplia gama de aplicaciones, entre otras, la evaluación del impacto del cambio climático sobre el rendimiento de diversos cultivos (Easterling *et al.*, 1992); la relación entre la pérdida de suelo por erosión (eólica e hídrica) con los rendimientos de maíz (Lee *et al.*, 1996) y el impacto de las prácticas de conservación de suelo sobre los rendimientos (Easterling *et al.*, 1997).

El EPIC es un modelo matemático compuesto de sub-modelos donde interactúa suelo-clima-planta-manejo, que estima la relación entre la erosión y la productividad del suelo (Sharpley y Williams, 1990); para lograr este objetivo se desarrolló para:

- Una fase física con datos de entrada fácilmente disponibles.
- Simular cientos de años, ya que los procesos erosivos ocurren relativamente lentos.

- Ser aplicable a un amplio rango de suelos, clima y cultivos.
- Ser eficiente, fácil de usar y capaz de evaluar su efecto en cambio de manejo sobre la erosión y la productividad.

Williams y Renard (1985) reportan que el EPIC fue probado en sus componentes en 150 sitios en la parte continental de Estados Unidos y en 13 sitios de Hawái. Las comparaciones entre el rendimiento de cultivo observado y simulado indicaron un buen nivel predictivo de EPIC.

Martin *et al.* (1993) aplicaron el EPIC para estimar y comparar rendimientos de soya en Georgia, en un periodo de dos años en 24 granjas. El modelo predijo correctamente diferencias relativas de rendimiento entre clases de erosión y años; pero tendió a subestimar los rendimientos altos y sobreestimar rendimientos bajos. Dentro de los tratamientos, las varianzas fueron más altas para los datos medidos que para los predichos, lo que indica que el modelo no representa la variabilidad natural presente en los datos. El modelo mostró insensibilidad a ciertas variables de suelo, las cuales previamente mostraron correlación con el rendimiento usando el mismo grupo de datos, sugiriendo un posible camino para mejorar las estimaciones del rendimiento.

El modelo EPIC fue utilizado en los Estados Unidos con en el propósito de proyectar para los próximos 100 años, alternativas de manejo de suelo y analizar el impacto de los sistemas de conservación sobre la productividad. También se utilizó para evaluar económicamente sistemas de rotación de cultivos, analizar prácticas de labranza de conservación y estudiar diversas prácticas mecánicas contra la erosión. Así mismo, se utilizó para estimar la productividad, las tasas de erosión y evaluar el impacto de la erosión en la productividad de los cultivos (Putman *et al.*, 1988). Las estimaciones realizadas con el modelo mostraron que si los patrones de cultivo y las combinaciones de manejo, labranza y prácticas de conservación consideradas continúan durante los próximos 100 años, la erosión hídrica y eólica excederán la erosión tolerable en 51.4 y en 25.9 millones de hectáreas, respectivamente. Estas tasas de erosión reducirán la productividad, en el año 100 en un 2.3%, equivalente a dejar de cultivar 2.9 millones de hectáreas.

Para las condiciones de México, ésta tecnología desarrollada para evaluar el impacto de la erosión sobre la productividad de los suelos, es poco conocida y por ello no se utiliza. En el ámbito nacional

es necesario buscar nuevas alternativas de manejo que contribuyan, de manera efectiva, a resolver la amplia problemática de la erosión del suelo presente en el medio rural. Sin embargo, para poder aprovechar las bondades que dicha tecnología ofrece, es necesario validar bajo las condiciones de nuestro ambiente, para después de hacer los ajustes o adaptaciones necesarias y aplicarse de manera extensiva (Villar, 1996).

Guevara (1994) evaluó en el Valle de México los componentes hidrológico y erosión del modelo EPIC, con información generada en una cuenca pequeña, en la que se realizaron mediciones de erosión y escurrimiento por evento. Los resultados indicaron que la sensibilidad de ajuste del modelo, con respecto de los datos observados, muestran una variación anual (sobre el valor total) de 10, 12 y 9% de sobrestimación para precipitación, escurrimiento y erosión, respectivamente; por lo que concluyó que el modelo EPIC es una herramienta adecuada, para las condiciones de estudio, para predecir pérdidas de suelo y escurrimiento.

En México, Tiscareño *et al.* (2003) emplearon el modelo EPIC para evaluar el impacto del cambio climático sobre la producción de maíz (*Zea mays L.*), frijol (*Phaseolus vulgaris L.*) y trigo (*Triticum aestivum L.*), mientras que Villar *et al.* (1998) lo aplicaron para estudiar el efecto de la erosión sobre la productividad del maíz.

Componentes del modelo EPIC

El modelo EPIC está compuesto de elementos que simulan la erosión y crecimiento de plantas, e incluye el componente económico para evaluar los costos de la erosión y determinar estrategias óptimas de manejo. Su diseño consiste de ocho sub-modelos que son: hidrología, clima, erosión, nutrientes, crecimiento de plantas, temperatura de suelo, labranza y economía (Williams *et al.*, 1983; Putman *et al.*, 1988).

Hidrología

El sub-modelo hidrológico simula el volumen de escurrimiento superficial y su gasto pico, dada una cantidad de lluvia diaria. El escurrimiento superficial se predice con la lluvia diaria usando la ecuación de curvas numéricas del Soil Conservation Service (SCS).

$$Q = \frac{(R-0.2s)^2}{R+0.8s}, R > 0.2s \quad (1.1)$$

$$Q = 0, R \leq 0.2s \quad (1.2)$$

Donde Q es el escurrimiento diario y s es el parámetro de retención, que varía entre cuencas por el tipo y uso del suelo, la pendiente y por los cambios temporales en el contenido de humedad del suelo. Por su parte, las estimaciones del gasto pico de escurrimiento se basan en la fórmula racional modificada.

$$q_p = \frac{(p)(r)(A)}{360} \quad (1.3)$$

Donde q_p es el gasto pico del escurrimiento (m^3), p es el coeficiente de escurrimiento que expresa las características de infiltración de la cuenca, r es la intensidad de la lluvia para el tiempo de concentración de la cuenca ($mm\ hr^{-1}$) y A es el área de drenaje de la parcela (ha).

Clima

El componente climático es capaz de generar precipitación, temperatura y radiación diaria para largas series de tiempo (100 años, por ejemplo), lo que es necesario ya que muchas veces el efecto que la erosión causa sobre la productividad del suelo es un proceso lento.

El sub-modelo climático simula la lluvia diaria por un modelo de cadena de Markov de primer orden, que usa probabilidades mensuales para predecir precipitaciones diarias dado el estado húmedo-seco del día previo. Cuando el día es húmedo, la cantidad de lluvia se genera a partir de una distribución normal asimétrica de la precipitación diaria. La temperatura máxima, mínima y radiación solar, se generan de una distribución normal multivariante. La velocidad del viento promedio diaria se genera de una distribución gamma, de dos parámetros, específica para cada región.

Erosión

La erosión es estimada en EPIC con una de tres ecuaciones (Sharpley y Williams, 1990): la ecuación modificada de la USLE (MUSLE), Williams (1975); la ecuación modificada de la USLE por Onstad y Foster (1975) y la misma USLE de Wischmeier y Smith (1978).

$$E = R (K) (CE) (PE) (LS) (ROKF) \quad (1.4)$$

Donde:

$R = EI_{30}$ para USLE

$R = 11.8 (Q^* q_p)^{0.56}$ para MUSLE

$R = 0.646 EI + 0.45 (Q q_p^*)^{0.33}$ para Onstad-Foster

Donde E es la producción de sedimentos ($t\ ha^{-1}$), K es el factor erosionabilidad del suelo, CE es el factor manejo del cultivo, PE es el factor prácticas de control, LS es el factor longitud y grado de la pendiente, $ROKF$ es el factor de pedregosidad, EI_{30} es el factor erosividad de la lluvia, Q^* es el volumen escurrido (m^3), q_p es el gasto pico del escurrimiento ($m^3\ s^{-1}$), Q es el volumen escurrido (mm), y q_p^* es el gasto pico del escurrimiento ($mm\ hr^{-1}$). El factor erosionabilidad del suelo K , se evalúa para la capa superficial al inicio de cada año de simulación con la ecuación:

$$K = \left[0.2 + 0.3 \exp \left[-0.256 SAN \left(\frac{1-SIL}{100} \right) \right] \right] \left(\frac{SIL}{CLA+SIL} \right)^{0.3} \left(1 - \frac{0.25c}{c + \exp(3.73 - 2.95c)} \right) \left(1 - \frac{0.7SN1}{SN1 + \exp(-5.51 + 22.9SN1)} \right) \quad (1.5)$$

Donde SAN , SIL , CLA y C son los contenidos de arena, limo, arcilla y carbón orgánico del suelo (%) y $SN1 = 1 - SAN/100$. Esta ecuación permite variar K entre 0.1 y 0.5 ($t\ ha^{-1}\ año^{-1}$ por unidad de R). La profundidad del suelo removida por erosión se resta del perfil del suelo, suponiendo que no ocurre selección de partícula y que la remoción de nutrientes es proporcional a la profundidad del suelo erosionado.

Considera un área de drenaje correspondiente a un terreno de cultivo o parcela, entre una y cien hectáreas, ya que debe asumirse homogeneidad espacial en manejo del suelo, cultivo y tipo de suelos. Verticalmente, el modelo es capaz de trabajar con variaciones de las propiedades del suelo, para ello el perfil del mismo puede ser dividido hasta en diez horizontes (Silva, 1995).

Nutrientes

El modelo de EPIC monitorea dos nutrientes (Nitrógeno y Fósforo) y la cal como mejorador del suelo. Para nitrógeno simula los procesos de: fertilización, fijación, fijación de lluvia, mineralización, desnitrificación, inmovilización, lixiviación de nitratos, movimiento ascendente de nitratos con el agua de evaporación; aprovechamiento por el cultivo, nitrógeno orgánico transportado por el sedimento y nitrato en el escurrimiento. Los procesos simulados para fósforo incluyen: mineralización, inmovilización, adsorción-desorción, aprovechamiento por el cultivo, fertilización, escurrimiento de fosfato soluble y transporte de fósforo orgánico y mineral en el sedimento. Además, EPIC simula el uso de cal para neutralizar el nivel tóxico de aluminio en suelos altamente intemperizados y para mantener un pH deseado en suelos moderadamente intemperizados.

Crecimiento de plantas

Un sub-modelo general de crecimiento de plantas simula, para cultivos anuales y perennes, el aprovechamiento de agua y nutrientes, la interpretación de energía y su conversión a raíces, biomasa aérea, producción de grano y fibras. Este componente ajusta el crecimiento potencial con las restricciones al crecimiento por estrés de humedad, nutrientes y temperatura. Se basa en la estimación de la biomasa producida según la intercepción de energía radiante (unidades de calor) y en ajustes según los impedimentos o presiones a que el cultivo sea sometido.

Temperatura del suelo

Este sub-modelo predice la temperatura del suelo al centro de cada capa de suelo, como una función de las temperaturas del suelo y del aire, del día previo y de la radiación solar del día actual. Se simula para servir como entrada a los componentes ciclo de nutrientes y de crecimiento de raíces.

Manejo

El sub-modelo manejo de EPIC simula altura de surco, rugosidad superficial, cambio en densidad aparente, transición de residuos en pie a residuos tendidos, mezcla de capas de suelo, nutrientes y residuos por cualquier operación de labranza. Silva (1995) menciona que fue diseñado para mezclar nutrientes y restos de cultivo dentro de la profundidad de arado, simulando los cambios

en densidad aparente y convirtiendo los residuos en pie en residuos caídos. El componente de manejo incluye drenaje, riego, fertilización, encalado y uso de plaguicidas.

Economía

El componente económico de EPIC usa un balance (ingresos menos costos) para calcular los costos de producción del cultivo. El ingreso económico se determina a partir de los rendimientos simulados con el modelo para cultivos. Los beneficios netos (ingreso menos costos) están sujetos a cambios cuando el suelo se erosiona y se simulan mediante la diferencia entre el ingreso bruto y el costo total. El costo variable se calcula por la sumatoria del precio de los insumos por la cantidad utilizada por hectárea. El costo fijo incluye depreciación, intereses, seguro e impuestos (Silva, 1995).

Países productores de maíz en el mundo

El maíz es el más importante cereal del mundo, aunque actualmente existe una tendencia progresiva en la diversificación en el uso del maíz; ya que se puede utilizar para consumo humano y pecuario. En la industria se utiliza para la producción de almidón, glucosa, dextrosa, fructosa, aceites, etanol, entre otros, así como para la elaboración de algunas bebidas alcohólicas y otros productos utilizados como materia prima en las industrias minera, textil, electrónica, farmacéutica y alimentaria (FIRA, 1998).

El maíz es uno de los cuatro principales cultivos en el mundo con 695 millones de toneladas producidas en 2007. El mayor productor es Estados Unidos, con 282 millones de toneladas anuales (40% de la producción mundial), en orden de importancia le siguen China, Brasil, México y Argentina. Estados Unidos también es el principal productor de elote mientras que México en este rubro pasó a ser el segundo productor en el sexenio de 2000-2006 (INE *et al.*, 2008).

Estados Unidos de América contribuye aproximadamente con el 40% de la producción total mundial, seguido de lejos por China con el 19%, Brasil con el 6% y México con 3%. Esto coloca a México en el cuarto productor de maíz en el mundo, pero también es un importante consumidor del mismo. Aunque se cubre prácticamente la totalidad de la demanda del maíz blanco con la producción nacional, el país es deficitario de maíz amarillo, que tiene diversos usos,

principalmente pecuario, por lo cual se tiene requerimientos de importación superiores a los 5 millones de toneladas (SIAP, 2007).

Producción de maíz en México

En México, el maíz no es sólo un bien comercial sino que constituye una expresión de relaciones sociales y culturales que han permitido a las comunidades y los pueblos rurales de México su subsistencia. Durante más de 300 generaciones, las comunidades rurales e indígenas han sido guardianes de los nichos ecológicos y centros de origen de múltiples razas de este cereal. Este hecho es trascendental en la historia y la cultura de los mexicanos y un legado para la humanidad (Castañeda, 2007). Este grano se produce tanto en primavera-verano como en otoño-invierno, bajo las más diversas condiciones agroclimáticas, de humedad, temporal y riego (SIAP, 2007).

México es un país orientado a la producción de maíz blanco para consumo humano e importador neto de maíz amarillo para abastecimiento de la industria. En el país, el cultivo de maíz ocupa 8.07 millones de hectáreas que equivalen al 50.3% de la superficie agrícola sembrada. El INE *et al.* (2008) mencionan que la SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación) en 2007 reportó que del total de los productores de maíz, aproximadamente 90% tienen parcelas menores de cinco hectáreas y más de 80% utilizan semilla propia, adaptada a una enorme diversidad de situaciones geo-climáticas.

La Cámara Nacional de Maíz Industrializado (CNMI), en el 2005 estimó que la demanda de grano de maíz para la elaboración de tortilla fue de 9.4 millones de toneladas. De este total, la industria harinera procesó el 34%; el 32% se destinó a la industria de la masa y la tortilla a través de establecimientos formales conocidos como tortillerías; el 34% corresponde al que la población rural para autoconsumo familiar, pasando a ser un componente del ingreso del hogar. La demanda de grano de maíz por el sector pecuario representa el 51%, equivalente a 12.7 millones de toneladas del total ofertado (24.9 millones de toneladas). De la demanda total del sector pecuario, el 15% corresponde a maíz blanco (1.9 millones de toneladas) y al 85% a maíz amarillo (10.8 millones de toneladas), el cual en su mayor parte es importado). Por otra parte, la industria de alimentos procesados se dedica solamente a la producción de alimento balanceado para su venta a otras industrias (SIAP, 2007).

El INE *et al.* (2008) indican que en el año 2007 la SAGARPA reportó que durante el ciclo 2006-2007 la producción fue de 6,477,813 toneladas, de las cuales 4,717,683 las aportó Sinaloa (73%), Tamaulipas con 470,973 toneladas (7%); Veracruz con 386,290 (6%); Chiapas con 166,462 (3%) y 682,405 (11%) otros estados.

Producción de maíz en Chiapas

Galdámez *et al.* (2008) señalan que Chiapas tiene una extensión de 7,421,100 hectáreas que corresponde a 3.8% del territorio mexicano. De esta superficie, 1 millón 400 mil hectáreas son aptas para la agricultura (18.86% de la entidad), en las que anualmente son afectadas 50,000 ha de suelos por procesos erosivos. Esta problemática está asociada a una disminución de la productividad de la tierra, provocada por la degradación de la misma. En 2005, la población total era de 4,293,459 habitantes, siendo el 36% (1,545,645.2 habitantes) la población económicamente activa; de ésta, 98% (1,514,732.2 habitantes) está ocupada, de los cuales 42% se encuentran en el sector primario. En el Estado existen 300 mil maiceros en 18 mil comunidades; en total se estima que 4.0 millones de chiapanecos consumen maíz diariamente. 92% de los productores son de autoconsumo, principalmente indígenas que poseen 2.5 ha y producen 1.2 t ha⁻¹. En Chiapas el sistema de producción generalizado es monocultivo de maíz, el cual representa la única fuente de ingreso económico para los productores durante todo el año (INEGI, 1991).

En Chiapas, de 1994 a 2002 se produjeron en promedio 1.6 millones de toneladas de maíz cada año, de los cuales 0.67 millones se usaron para consumo directo y 0.93 millones para el mercado (GCMA, 2003). De los 1.82 millones de toneladas de grano de maíz producidos en la entidad en 2002, el 97% se obtuvo en condiciones de temporal estricto (SIAP, 2002).

De acuerdo al plan rector del sistema producto maíz (SAGARPA, 2005), Chiapas ocupa el cuarto lugar en México en la producción de maíz, con un promedio anual de 1.7 millones de toneladas en 905 mil hectáreas. Sin embargo, su rendimiento promedio de 1.87 t ha⁻¹ está por abajo de la media nacional. Las principales causas de esta baja producción son: a) siembras en zonas sin potencial, y con alto deterioro de recursos naturales y b) baja producción en zonas con potencial por la aplicación de paquetes tecnológicos inadecuados (López *et al.*, 2009).

Respecto a los estados con mayor superficie programada de siembra de cultivo de maíz, Chiapas ocupa el primer lugar con 686,597 hectáreas, seguido por Jalisco, Estado de México y Puebla con 609,676.0, 577,815.0 y 531,240.0 hectáreas, respectivamente, que en conjunto representan el 34% de la superficie nacional programada para la siembra de maíz para el ciclo Otoño-Invierno 2006-2007 (INE *et al.*, 2008).

Por régimen hídrico, Chiapas y Sonora son las entidades que ocupan el primer lugar en este rubro, el primero bajo la modalidad de temporal con 885.5 mil ha y el segundo con 323 mil ha promedio anual en el régimen de riego (SIAP, 2007).

Los rendimientos de maíz varían en las diferentes zonas maiceras de Chiapas. En las regiones de Soconusco y la Frailesca los rendimientos fluctúan de 2.7 a 3.5 t ha⁻¹, mientras que en las regiones Norte y Sierra son de 1.6 a 1.8 t ha⁻¹. La Frailesca tiene gran importancia en la producción de maíz ocupando el 15% de la superficie estatal reportada. En esta región existen aproximadamente 78,000 hectáreas de terrenos de terraza intermedia, ubicados entre los terrenos de vega y pies de monte y que comprenden desde suelos planos hasta suelos con 5 a 15% de pendiente (Camas *et al.*, 2007).

El bajo rendimiento del maíz en la Frailesca es causado principalmente por la erosión hídrica que afecta adversamente las propiedades originales del suelo, al modificar su capacidad productiva y elevar los costos de producción. Por ejemplo, en provincias agronómicas de muy buen y buen potencial de producción de maíz se han reportado tasas de erosión de más de 50 t ha⁻¹ año⁻¹ (López, 1993).

López *et al.* (2009) mencionan que en Chiapas existen 318,047.23 hectáreas con muy buen potencial para la producción de maíz, debido a que tienen una duración de la estación de crecimiento de 115 a 145 días y suelos con profundidad mayor a un metro, que permiten obtener los requerimientos de humedad del cultivo de maíz. Los Distritos de Desarrollo Rural (DDR) con las mayores superficies con muy buen potencial son Tuxtla Gutiérrez, Villaflores, Comitán, Tapachula y Pichucalco con 27.31, 26.44, 14.49, 9.02 y 8.36% (26,588.74 hectáreas) del total de esta clase. Estos autores, identifican 108 municipios con potencial para el cultivo de maíz, sin

embargo, el 80% de la superficie se concentra en sólo 25 municipios. Resaltan en orden de importancia los municipios de Venustiano Carranza, Villacorzo, La Concordia, La Trinitaria, Chiapa de Corzo, Acala, Suchiate y Villaflores, quienes en conjunto representan el 62% del total de la superficie con esta característica. Existen municipios como Venustiano Carranza, Villacorzo, Acala, Suchiate y Villaflores donde el 100% de la superficie se ubica en la categoría de muy buen potencial. Caso contrario, es el Municipio de Tapachula que en el análisis global aparece en el primer lugar y sin embargo casi la totalidad de la superficie se ubica en la categoría de potencial bueno.

En el Estado de Chiapas, el cultivo de maíz ha sido considerado el de mayor importancia, ya que actualmente se cosechan en promedio 1 millón 343 mil toneladas en 590 mil hectáreas, con un rendimiento de 2.28 t ha⁻¹. En el 2013 Chiapas ocupó, a nivel nacional, el primer lugar en la superficie dedicada a la producción de maíz de temporal, el tercer lugar en producción y el décimo lugar en rendimiento (SIAP, 2013).

MANEJO DE LA INFORMACIÓN PARA SU USO EN EPIC

Información meteorológica

Para realizar la calibración y validación del modelo EPIC se recopilaron y generaron parámetros estadísticos necesarios para reproducir las condiciones climáticas de las parcelas estudiadas. Se recopilaron y generaron datos de precipitación, temperaturas máximas y mínimas diarias de nueve estaciones meteorológicas del SMN que se encuentran dentro y en las inmediaciones al área de trabajo, con periodos de registro que varían entre 1940 a 2011 (Cuadro 1.1). Se realizaron polígonos de Thiessen para determinar el área de influencia de cada estación y definir la estación más cercana a la parcela de interés para la calibración y a las Unidades de Repuesta Hidrológica (URH) para la validación del modelo.

Cuadro 1. 1. Estaciones meteorológicas utilizadas para la calibración y validación de EPIC.

Clave	Nombre	Longitud (grados decimal)	Latitud (grados decimal)	Altitud (msnm)	Periodo de registro	
					Inicial	Final
07003	Acala	-92.804	16.553	420	1963	2011
07034	Villa de Chiapilla	-92.715	16.578	550	1945	2011
07065	Finca Ocotlán	-93.477	16.369	650	1961	2011
07132	Portaceli	-93.125	16.449	780	1962	2011

Clave	Nombre	Longitud (grados decimal)	Latitud (grados decimal)	Altitud (msnm)	Periodo de registro	
					Inicial	Final
07327	Úrsulo Galván	-93.419	16.279	700	1981	2011
07329	Cascajal	-92.486	16.309	650	1981	2011
07342	Benito Juárez	-92.841	16.083	580	1981	2011
07349	Monterrey	-93.369	16.059	700	1981	2011
07358	Flores Magón	-92.696	16.393	570	1983	2011

Para cada una de las estaciones meteorológicas se seleccionaron, del registro histórico, los años con información completa. Se realizó la primera corrida con el programa WXPARM del modelo EPIC, con el objetivo de obtener los parámetros estadísticos para la generación climática sintética conocida como “semilla”. En los años con registro incompleto se llenaron los datos faltantes con la clave 999.00 y con la “semilla” previamente obtenida se ejecutó el componente WXGEN del modelo para estimar los valores de lluvia y temperatura (máxima y mínima) de los años incompletos. Una vez estimados los datos faltantes, se realizó una segunda corrida con WXPARM para calcular la “semilla” mensual definitiva de cada una de las estaciones meteorológicas que se indican en el Cuadro 1.1.

La base de datos, con los generadores climáticos del modelo EPIC, requiere de un total de 13 variables climatológicas a nivel mensual (Cuadro 1.2). Las variables climatológicas de cada estación meteorológica a nivel mensual, para alimentar al modelo EPIC en la calibración y validación, se obtuvieron de las semillas generadas (Anexo 1).

Cuadro 1. 2. Variables climatológicas y sus rangos para la base de datos del modelo EPIC.

Descripción	Variable	Valor mínimo	Valor máximo
Temperatura máxima promedio mensual (°C)	OBMX	-10.00	42.00
Temperatura mínima promedio mensual (°C)	OBMN	-30.00	30.00
Desviación estándar de temperatura máxima mensual (°C)	SDTMX	1.00	15.00
Desviación estándar de temperatura mínima mensual (°C)	SDTMN	1.00	15.00
Precipitación promedio mensual (mm)	RMO	0.00	500.00
Desviación estándar de precipitación mensual (mm)	RST2	0.00	50.00
Coefficiente de nieve mensual para precipitación diaria	RST3	0.00	7.00
Probabilidad mensual de un día húmedo después de un día seco	PRW1	0.00	0.95
Probabilidad mensual de un día húmedo después de un día húmedo	PRW2	0.00	0.95
Número de días de lluvia promedio mensual (día)	DAYP	0.00	31.00
Precipitación máxima mensual de 0.5h (mm)	WI	0.00	125.00
Radiación solar promedio mensual (MJ/m ²)	OBSL	0.00	750.00
Humedad relativa promedio mensual (°C)	RH	0.00	1.00

Información edafológica

La información fisicoquímica de los perfiles de suelo tipo, para cada de las unidades de suelo presentes en el área de estudio, se obtuvo del conjunto de datos vectoriales de información nacional sobre perfiles de suelo reportados por el INEGI (2003). Los datos de los perfiles se complementaron con los resultados de laboratorio de las muestras de suelo, a diferentes horizontes pedológicos, tomadas en campo. Para estas muestras de suelo se determinó en laboratorio: conductividad eléctrica, pH, capacidad de intercambio catiónico y textura del suelo.

La profundidad de los perfiles de suelo se determinó en función de la fase física reportada en la carta de edafología, escala 1:250,000 de INEGI (2007) con base en las profundidades promedio que asume INEGI (2003) para cada fase y lo observado en campo. Se utilizó el programa SPAW¹ (Soil-Plant-Air-Water) del USDA (United States Department of Agriculture) para determinar el punto de marchitamiento, capacidad de campo y densidad aparente; considerando los porcentajes de arena y arcilla. El porcentaje de pedregosidad se determinó con lo observado en campo.

Las variables de suelo que requiere el modelo EPIC y sus respectivos rangos de variación se muestran en el Cuadro 1.3. La base de datos de suelos que sirvió para correr el modelo EPIC, en la etapa de calibración y validación, se presenta en el Anexo 2.

Cuadro 1.3. Variables edafológicas para la base de datos del modelo EPIC.

Descripción	Variable	Valor mínimo	Valor máximo
Profundidad del piso al fondo de la capa de suelo (m)	Z	0.01	3.00
Densidad aparente de la capa de suelo (t/m ³)	BD	0.25	2.30
Punto de marchitamiento (m/m)	U	0.01	0.65
Capacidad de campo (m/m)	FC	0.05	0.80
Contenido de arena (%)	SAN	0.00	100.00
Contenido limo (%)	SIL	0.00	100.00
pH del suelo	PH	4.00	9.00
Suma de bases (cmol/kg)	SMB	0.00	150.00
Carbono orgánico (%)	CBN	0.05	5.00
Capacidad de intercambio catiónico (cmol/kg)	CEC	0.00	150.00
Contenido de piedra (%)	ROK	0.00	30.00
Concentración de P lábil (g/m ³)	AP	0.00	50.00
Densidad aparente (t/m ³)	BDD	0.00	2.50

¹ <http://hydrolab.arsusda.gov/SPAW/Index.htm>

DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

Ubicación

El área de estudio se localiza dentro de la región fisiográfica o región natural de la DCC, regiones socioeconómicas IV De Los Llanos (Acala y Venustiano Carranza) y VI Frailesca (Villacorzo y Villaflores), aproximadamente entre los 16° 01' y 16°47' de latitud Norte y los 92°23' y 93°32' de longitud Oeste. Cuenta con una superficie de 3,983 km², que representa el 5.4% de la superficie del Estado, y comprende los municipios de Acala, Venustiano Carranza, Villacorzo y Villaflores, donde el cultivo de maíz es la principal actividad del sector agrícola (Mapa 1).

De acuerdo a la clasificación de Mullerried (1957) y en función del complejo relieve, la DCC es una de las siete regiones fisiográficas del Estado de Chiapas. La región es una extensa zona semiplana de 250 km de largo y un ancho de 40 km, bordeada por la Sierra Madre de Chiapas, la Altiplanicie Central y las Montañas del Norte. Dentro de la depresión se definen distintos valles. El terreno está constituido principalmente por rocas sedimentarias (predominantemente calizas) y por depósitos aluviales. En la depresión es evidente el fenómeno de la canícula, que es una disminución en el volumen de lluvias entre los meses de Julio y Agosto. Los suelos son fértiles en general, ya que la mayoría son de origen aluvial y profundos, aunque en las zonas de lomeríos los suelos son delgados y pedregosos, constituidos por rocas sedimentarias de las cuales predominan las calizas. La vegetación original es de selva baja caducifolia, pudiendo apreciarse selva mediana en altitudes superiores a los 800 metros sobre el nivel del mar (msnm) y bosques de encinos por arriba de los 1,500 msnm.

La DCC está constituida por 17 municipios de Chiapas, iniciando desde Cintalapa y concluyendo en La Trinitaria. Dentro de esta región destaca el sistema hidrológico del Grijalva, uno de los ríos más caudalosos de México. En este sistema se encuentran dos de las principales presas hidroeléctricas de Chiapas que son la Dr. Belisario Domínguez (La Angostura) y la Ingeniero Manuel Moreno Torres (Chicoasén), dicho sistema está integrado por los ríos La Venta, Suchiapa, Reyes de Santo Domingo, Pando, Ningunillo, Dorado, Cuxtepeques, Jaltenango, Cuilco, San Gregorio, Blanco y principalmente Grijalva. Además de esto se encuentra la reserva de la biósfera de El Ocote, El Canelar, Mactumactzá y Laguna Bélgica.

Clima

Los diferentes tipos de climas, de acuerdo a la clasificación de Köppen modificada por García, considerando las características de temperatura y precipitación, son Cálidos subhúmedos (84.05%) Aw1, Aw2 y Awo, Semicálidos subhúmedos (15.39%) del grupo C (A)C(w1) y (A)C(w2) y Semiárido cálido (0.56%) BS1(h²)w (CONABIO, 1998) (Mapa 2). Predominantemente la temperatura media anual es mayor de 22 °C y la temperatura del mes más frío mayor a 18 °C. La precipitación del mes más seco es menor de 60 mm, lluvias de verano con índice P/T² entre 43.2 y 55.3 y porcentaje de lluvia invernal del 5 al 10.2% del total anual. Los rangos de temperatura media anual son de 20 a 26 °C (CONABIO, 1998) y de precipitación media anual de 600 a 2,000 mm (UNAM, 1990) (Mapa 3 y 4). El ciclo de lluvias incluye dos temporadas anuales principales, la temporada de lluvias (Mayo-Octubre) y la temporada seca (Noviembre-Abril).

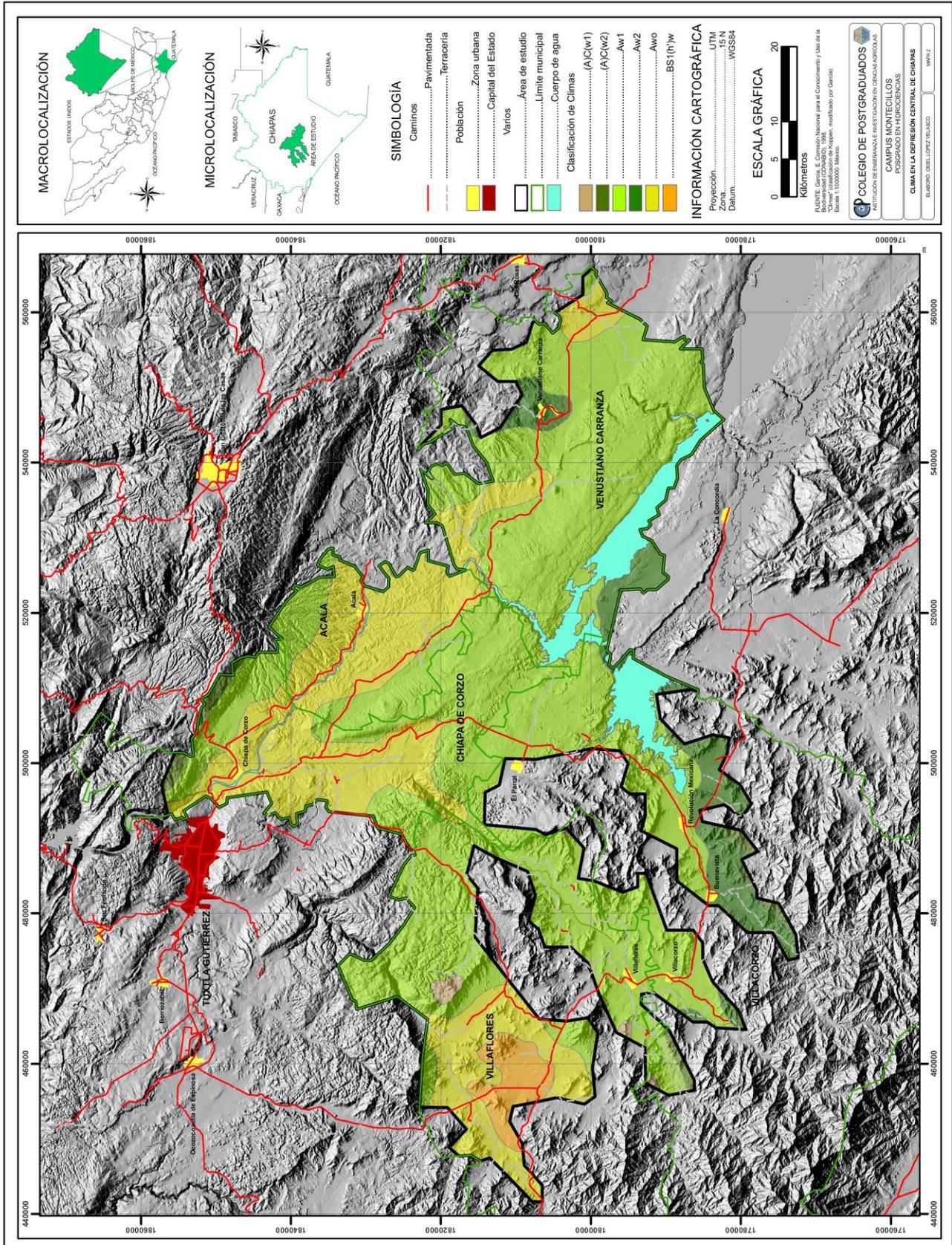
Suelos

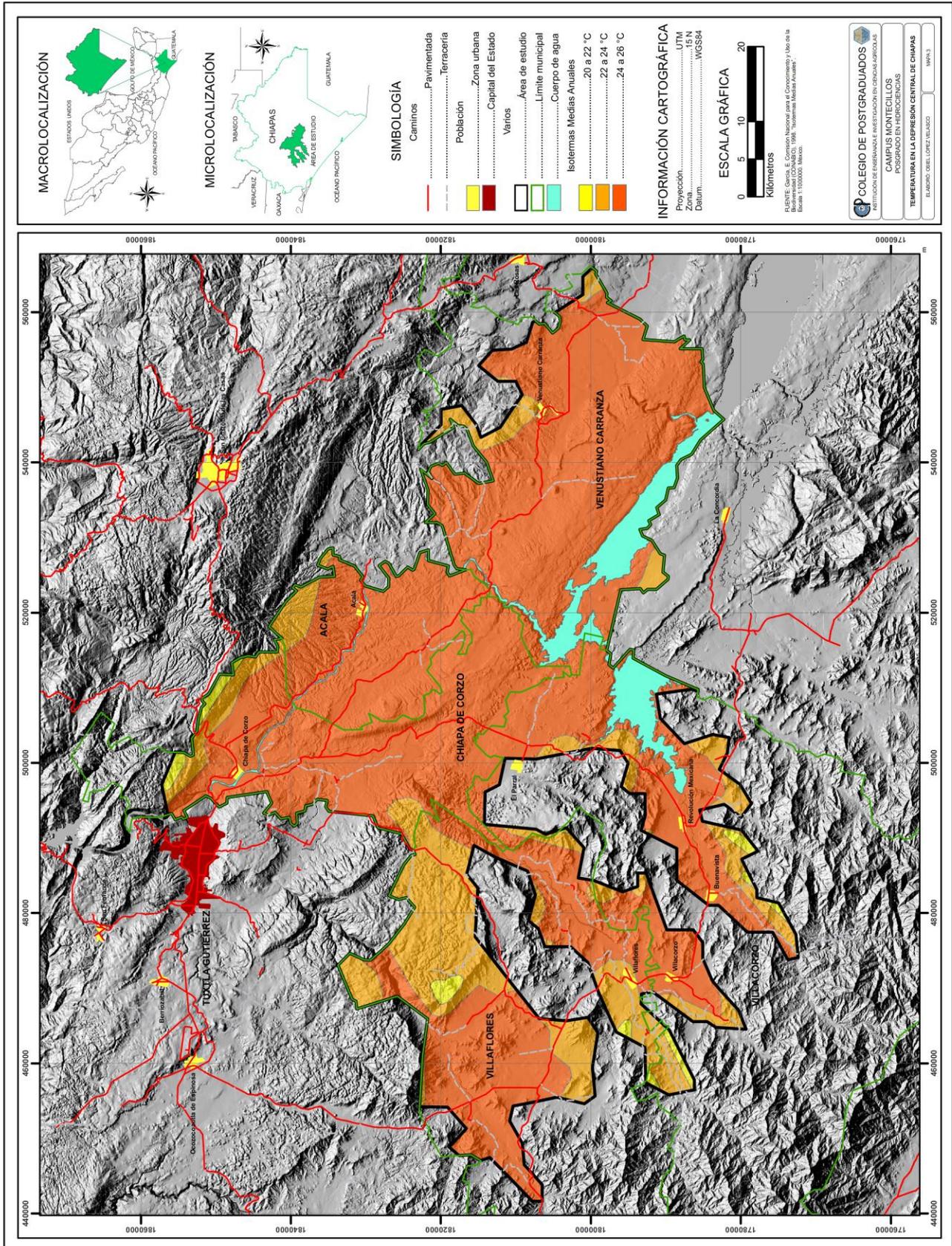
Los suelos dominantes son Leptosoles (36.12%) y Regosoles (32.26%), ambos tipos son suelos someros y poco desarrollados; lo cual dificulta su aprovechamiento agrícola y alto contenido de piedra. Los suelos con mayor fertilidad por un alto contenido de arcillas son Vertisoles (6.61%), Phaeozem (7.09%) y Luvisoles (13.16%), Cambisoles (2.86%), Fluvisoles (1.26%), Acrisoles (0.40%) y Planosoles (0.25%) (CONABIO, 1995) (Mapa 5).

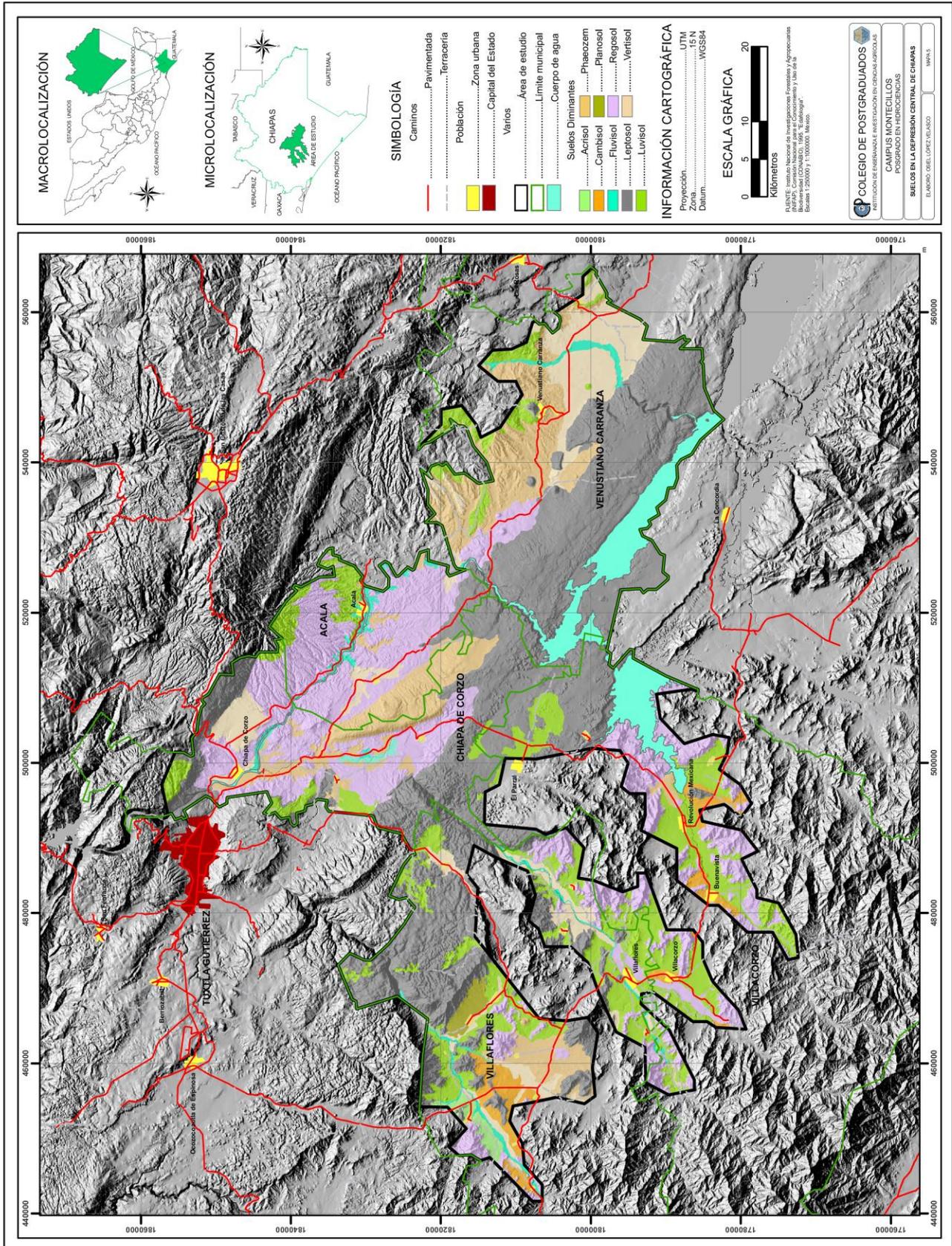
Uso del suelo y vegetación

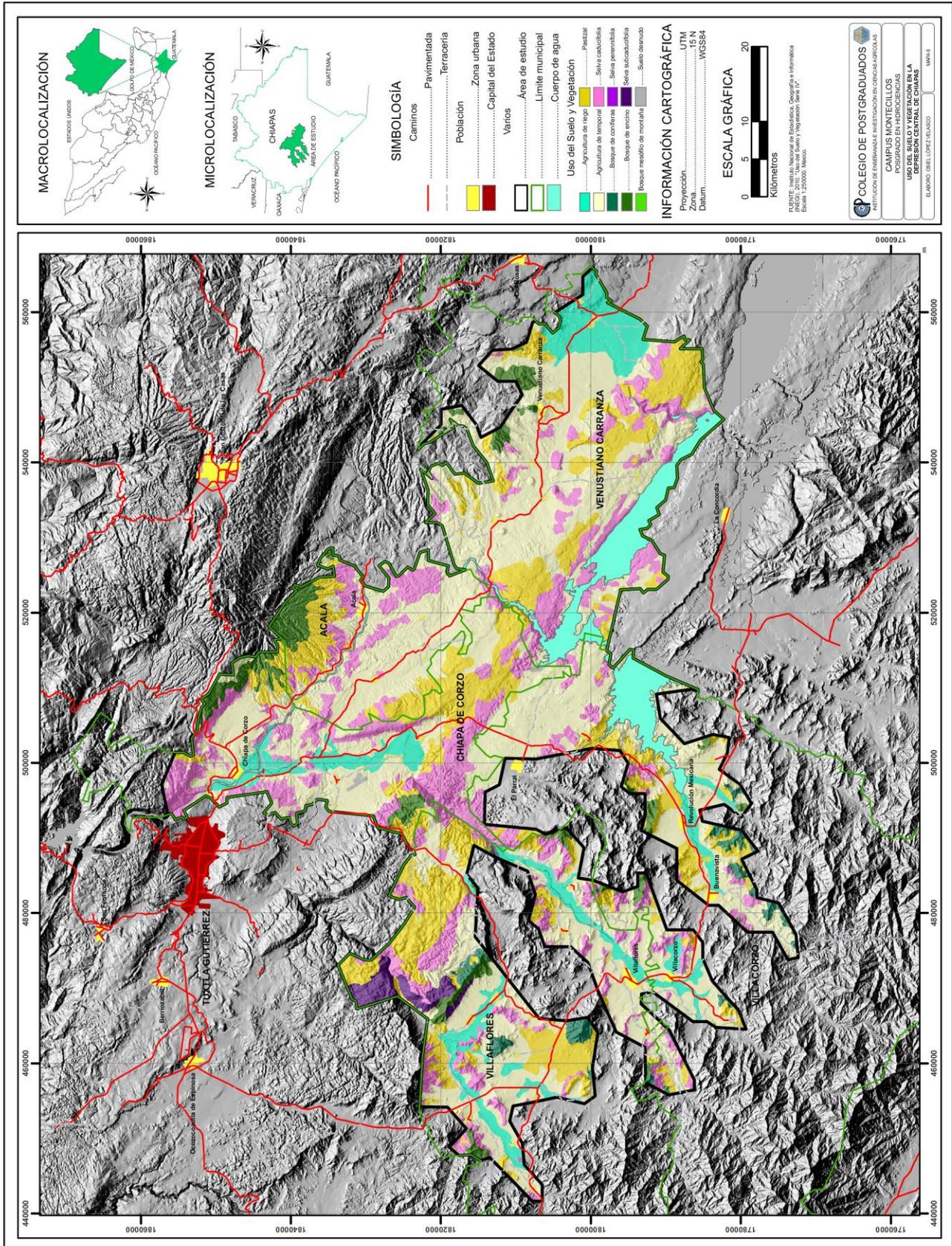
Las condiciones ambientales y socioculturales presentes, han dado origen al siguiente uso del suelo: agricultura de temporal (46.76%), agricultura de riego (8.06%) y zona urbana (1.05%); vegetación de pastizal (19.29%), selva caducifolia (18.29%), bosque de encino (3.84%), bosque de coníferas (1.42%) y selva subcaducifolia (1.16%) (INEGI, 2010) (Mapa 6).

² El P/T o índice de Lang es un estimador de eficiencia de la precipitación en relación con la temperatura. Éste se calcula como el cociente entre la precipitación total anual y la temperatura media anual del lugar.









LITERATURA CITADA

- Arnold, J. and J. Williams. 1987. Validation of SWRRB-Simulator for water resources in rural basins. J. Water resources planning and management. 113(2):243-256.
- Arnold, J. G., Williams A. D., Nicks and N. B. Sammons. 1990. SWRRB: A basin scale simulation model for soil and water resources management. Texas A and M Univ. Press. 155 p.
- Benson, V., O. Rice, P. Dyke, J. Williams and C. Jones. 1989. Conservation impact on crop productivity for the life of a soil. Soil and water conservation. 44(6):600-604.
- Bingner R. 1990. Comparison of the components used in several sediment yield model. Trans. ASAE. 33(4):1229-1238.
- Bingner, R., C. Murphree and C. Mutchler. 1989. Comparison of sediment yield models on watersheds in Mississippi. Trans. ASAE. 32(2):529-534.
- Camas, G. R., Turrent F. A., Cadena I. P., Villar S. B., Quiroga M. R. R. y López H. J. C. 2007. Uso intensivo y sostenible de suelos de terraza intermedia con especies en relevo a maíz en regiones de muy buena y buena productividad. Campo experimental centro de Chiapas. INIFAP. Ocozocoautla, Chiapas. Folleto técnico. Núm. 7. 28 p.
- Castañeda Z. Y. 2007. Una visión sobre la importancia de la diversidad del maíz en México. Christus, LXXII, No. 762. p. 20-22.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). 1995. Carta de edafología, escala 1:250,000 y 1:1,000,000.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). 1998. Carta de Climas clasificación de Koppen, modificado por García, escala 1:1,000,000.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). 1998. Carta Isotermas medias anuales, escala 1:1,000,000.
- Easterling, W. E., C. J. Hays, E. M. McKenney and J. R. Brandle. 1997. Modelling the effect of shelterbelts on maize productivity under climate change: an application of the EPIC Model. Agric. Ecosystems Environ. 61:163-176.
- Easterling, W. E., N. J. Rosenberg, K. M. Lemon and E. M. McKenney. 1992. Simulation of crop responses to climate change: effects with present technology and currently available adjustments (the 'smart farmer' scenario). Agric. For. Meteorol. 59:75-102.
- Elliot, W. J., A. M. Liebenov, J. M. Laflen and K. D. Kohl. 1989. A compendium of soil erodibility data from WEPP cropland soil field erodibility experiments 1987 and 1988. NSRL Report No. 3. The Ohio State Univ. and USDA-Agricultural research service. pp. a2-a25.
- Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura (FIRA). 1998. Oportunidades de desarrollo del Maíz mexicano. Banco de México, Boletín informativo No. 309, Vol. XXX.

- Frere, M., J. Ross and L. Lane. 1980. The nutrient sub-model. In: CREAMS, a field scale model for chemicals, runoff and erosion from agricultural management systems. Knisel W. Ed. USDA/Conservation research report No. 26. pp. 65-87.
- Galdámez, G. J., C. E. Aguilar J., A. Gutiérrez M., S. Mendoza P. y F. B. Martínez A. 2008. Evolución y perspectivas de la producción de maíz en el Estado de Chiapas, México. II Seminario de cooperación y desarrollo en espacios rurales iberoamericanos sostenibilidad e indicadores, Almería. 10 p.
- Grupo Consultor de Mercados Agrícolas (GCMA). 2003. Tercer foro de expectativas del sector agroalimentario y pesquero. México, D. F.
- Guevara G. R. D. 1994. Validación de los componentes hidrológico y erosión del modelo matemático EPIC (Erosion/productivity impact calculator) en parcelas agrícolas de temporal. Tesis de M.C. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Méx. 67 p.
- Hartkamp, A. D., K. de Beurs, A. Stein and J. W. White. 1999. Interpolation techniques for climate variables. NRG-GIS Series 99-01. Centro internacional de mejoramiento de maíz y trigo. México, D.F.
- Instituto Nacional de Ecología (INE), Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) y Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). 2008. Agrobiodiversidad en México: el caso del maíz. México. 64 p.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 1991. La agricultura en Chiapas. VII censo agropecuario 1991. Aguascalientes, México. p. 35-38.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2003. Información nacional sobre perfiles de suelo versión 1.2, escala 1:250,000.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2007. Carta de edafología, escala 1:250,000.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2010. Carta de uso del suelo y vegetación, escala 1:250,000.
- Lal R. 1981. Soil erosion problems on alfisols in Western Nigeria. VI. Effects of erosion on experimental plots. *Geoderma*. 25:215-230.
- Lal R. 1989. Conservation tillage for sustainable agriculture: Tropics versus temperate environments. *Adv. Agron.* 42:85-187.
- Lane, L. J. and M. A. Nearing. 1989. USDA-water erosion prediction project: Hillslope profile model documentation. National soil research laboratory report No. 2. USDA-ARS: Lafayette.
- Lane, L. J., K. G. Renard, G. R. Foster and J. M. Laflen. 1992. Development and application of modern soil erosion prediction technology – The USDA experience. *Aust. J. Soil Res.* 30:893-912.

- Lee, J. L., D. L. Phillips and R. F. Dodson. 1996. Sensitivity of the US corn belt to climate change and elevated CO₂. Part II: Soil erosion and organic carbon. *Agric. Systems*. 52:503-521.
- López M. J. 1993. Conservación y productividad de suelos en ladera de la Fraylesca, Chiapas. Tesis de M.C. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Méx. 177 p.
- López, B. W., López L. A. Coutiño E. B., Camas G. R., Villar S. B., López M. J., Serrano A. V., Cadena I. P., Zamarripa M. A. y Sandoval M. C. 2009. Zonas potenciales y recomendaciones técnicas para producir maíz en Chiapas, México. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Chiapas, México. 10 p.
- Martin, S. M., M. A. Nearing and R. R. Bruce. 1993. An evaluation of the EPIC model for soybean grown in Southern Piedmont soils. *Transactions of the ASAE*. 36(5):1327-1331.
- Mullerried F. K. G. 1957. La geología de Chiapas. Gobierno constitucional del Estado de Chiapas. 180 p.
- Onstad, C. A. and G. R. Foster. 1975. Erosion modeling on a watershed. *Transactions of the ASAE*. 18(2):288-292.
- Osuna C. E. 1991. Efecto de la erosión sobre la productividad y producción de los cultivos. Seminario de conservación del suelo y agua. Santa Cruz, Tlaxcala, México. 15 p.
- Putman J., J. Williams and D. Sawyer. 1988. Using the erosion-productivity impact calculator (EPIC) model to estimate the impact of soil erosion for the 1985 RCA appraisal. *J. Soil and water conservation*. 321-326.
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). 2005. Plan rector del sistema producto maíz del Estado de Chiapas. Delegación estatal de la SAGARPA. Subprograma fortalecimiento de cadenas productivas. Programa alianza contigo. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México. 64 p.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). 2002. Sistema de Información Agropecuaria de Consulta (SIACON), Chiapas, 2002.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). 2007. Situación actual y perspectivas del maíz en México (1996-2012). Méx. 208 p.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). 2013. Sistema de Información Agropecuaria de Consulta (SIACON), Chiapas, 2013.
- Sharpley, A. N. and J. R. Williams. 1990. EPIC-Erosion/Productivity Impact Calculator: 1. Model documentation. Technical bulletin 1768. US Department of Agriculture. Washington, DC, USA.
- Silva E. O. 1995. Descripción general de algunos modelos de simulación de erosión. FONAIAP-CIAE. Estado Anzoátegui. Venesuelos. Vol. 3. No.1. 37 p.
- Tiscareño, L. M., C. Izaurralde, N. J. Rosenberg, A. D. Báez G. y J. Salinas G. 2003. Modeling El Niño southern oscillation climate impact on mexican agriculture. *Geofísica Internacional*. 42:331-339.

- Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). 1990. Carta de precipitación media anual, escala 1:400,000. Instituto de Geografía.
- Villar S. B. 1992. Efecto de la erosión sobre la productividad del suelo y la producción del maíz y frijol en Chiapas. Informe anual 1991. Red de conservación de suelos. INIFAP-CIFAP-CECECH. Ocozocoautla, Chiapas, México. 7 p.
- Villar S. B. 1996. Erosionabilidad de suelos y su impacto en la productividad del maíz en el trópico mexicano. Tesis de Dr.C. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Méx. 215 p.
- Villar, S. B., Figueroa S. B., Oropeza M. J. L., Landois P. L. y Volke H. V. 1998. Erosionabilidad de suelos y su impacto en la productividad del maíz en el trópico mexicano. *Agrociencia* 32:199-207.
- Williams J. R. 1975. Sediment-Yield prediction with universal equation using runoff energy factor. In: Present and prospective technology for predicting sediment yields and sources. USDA-ARS: Washington, D.C. pp. 118-125.
- Williams, J. R., C. A. Jones and P. T. Dyke. 1984. A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. *Trans. ASAE* 27(1):129-144.
- Williams, J. R., K. G. Renard and P. T. Dyke. 1983. EPIC – A new method for assessment erosion's effect on soil productivity. *J. Soil and water conservation*. 38(5):381-383.
- Williams, R. J. and K. G. Renard. 1985. Assessment of soil erosion and crop productivity with process models (EPIC). In: Follet, R. F. and B. A. Stewart (eds.). *Soil erosion and crop productivity*. American Society of Agronomy-Crop Science Society of America-Soil Science Society of America. Madison, WI. pp. 67-103.
- Wischmeier, W. H. and D. D. Smith. 1978. *Predicting rainfall losses: A guide to conservation planning*. USDA Agricultural Handbook No. 537. U.S. Dept. Agr. Washington, D. C. 58 p.

CAPÍTULO 2. EVALUACIÓN DE RENDIMIENTOS PARCELARIOS, DE MAÍZ EN CHIAPAS, USANDO EL MODELO EPIC

Evaluation of Corn's Yield Plots in Chiapas Using the EPIC Model

RESUMEN

El trabajo se realizó en la Depresión Central de Chiapas (DCC), con el fin de calibrar el modelo EPIC (Erosión/ Productividad Impact Calculator) para simular, en condiciones de secano, el rendimiento de maíz. Para este estudio se utilizaron datos de 178 parcelas de maíz con seguimiento técnico del PROMAF (Programa Estratégico de Apoyo a la Cadena Productiva de Productores de Maíz y Frijol) de la SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación) entre 2009 y 2011 en los municipios de Acala, Venustiano Carranza, Villacorzo y Villaflores. Como parte del proceso de calibración, entre los rendimientos simulados y los observados, se consideraron los parámetros de crecimiento del maíz, el suelo y el clima. Comparando los datos de 178 parcelas y técnicos con más de una parcela bajo su responsabilidad, se encontró que seis técnicos, de 37, tenía por encima de 50% de las parcelas descartadas, 22 técnicos por debajo de 50% de las parcelas desechados, mientras que nueve técnicos tenían todas sus parcelas útiles para la calibración. La comparación muestra que el rendimiento del maíz varía entre 3.5 a 7.7 t ha⁻¹, con un valor promedio de 5.8 t ha⁻¹. El análisis de regresión mostró un coeficiente de determinación (R²) de 0.67, pendiente de la línea de regresión de 0.99, y una diferencia absoluta máxima de 0.8 t ha⁻¹. Antes del ajuste de variables, la suma de cuadrados del error (SEE) fue de 9.33 y después del ajuste de parámetros SEE disminuyó a 0.19. Rendimiento del maíz mostró una relación directa con la profundidad del suelo. Para los suelos por encima de 0.8 m de profundidad el rendimiento de grano varió desde 5.5 hasta 6.1 t ha⁻¹, para los de poca profundidad (por debajo de 0.65 m) el rendimiento varió entre 4.6 y 5.5 t ha⁻¹. En la investigación se concluye que el modelo de simulación EPIC es una herramienta útil para simular el rendimiento del maíz y para evaluar el desempeño de los técnicos y los paquetes tecnológicos en parcelas demostrativas; sin embargo, el modelo requiere datos confiables como entrada.

Palabras clave: Maíz, Rendimiento, Chiapas, Modelo EPIC, Calibración.

SUMMARY

This work was performed in the Central Depression of Chiapas, in order to calibrate the EPIC model (Erosion/Productivity Impact Calculator) to simulate, under rainfed conditions, corn's yield. For this study were used data from 178 demonstrative corn plots implemented by the PROMAF (Spanish acronym for a federal program to support maize and bean production in Mexico) between 2009 and 2011 for the municipalities of Acala, Venustiano Carranza, Villacorzo and Villaflores. As part of the calibration process, between simulated and observed yields, were considered parameters of maize growth, soil, and climate. Comparing the data of 178 plots and technicians with more than one plot under their responsibility, was found that six technicians, out of 37, had above 50% of discarded plots, 22 technicians below 50% of rejected plots, while nine technicians had all their plots reliable for calibration. The comparison shows that corn's yield varies between 3.5 to 7.7 t ha⁻¹ with an average value of 5.8 t ha⁻¹. The regression analysis shows a coefficient of determination (R²) of 0.67, regression's line slope of 0.99, and maximum absolute difference of 0.8 t ha⁻¹. Before adjustment of variables, the error sum of squares (SEE) was 9.33 and after parameters adjustment SEE decreased to 0.19. Corn's yield showed a direct relationship with soil depth. For soils above 0.8 m depth grain yield ranged from 5.5 to 6.1 t ha⁻¹ for shallow ones (below 0.65 m) it varied between 4.6 to 5.5 t ha⁻¹. The investigation concluded that the EPIC simulation model is a useful tool to simulate corn's yield and assess the performance of technicians and technological packages in demonstrative plots; however the model requires reliable data for input.

Keywords: *Corn, Yield, Chiapas, EPIC model, Calibration.*

INTRODUCCIÓN

El Estado de Chiapas con una producción de 1 millón 343 mil toneladas se encuentra en el tercer lugar de producción de maíz de temporal en México. Con una superficie cosechada de 590 mil hectáreas se ubica en el primer lugar a nivel nacional. Estos valores de producción y superficie lo ubican en el décimo lugar nacional con un rendimiento unitario de 2.28 t ha⁻¹, por debajo de la media nacional (2.30 t ha⁻¹) (SIAP, 2013). Este rendimiento unitario, por debajo de la media nacional, es un reflejo del alto deterioro de sus suelos agrícolas y a los sistemas de producción insuficientes para abastecer los requerimientos de la planta.

Para explicar los bajos rendimientos es necesario realizar estudios detallados, bajo diferentes condiciones agrícolas, convirtiéndola en una técnica costosa, laboriosa y tardada. En contexto, la aplicación de modelos permite simular rendimientos en forma precisa y analizar escenarios de manejo, sin necesidad de tener parcelas de monitoreo. Esta característica de modelado lo hace una herramienta útil para pronosticar de forma rápida la producción de maíz a nivel regional. Entre los modelos de simulación empleados para predecir rendimientos en parcelas de maíz destaca EPIC (Erosion/Productivity Impact Calculator), el cual fue diseñado para determinar la relación entre erosión y productividad agrícola (Williams *et al.*, 1984).

El modelo EPIC tiene amplia aplicación, Licona *et al.* (2006) mencionan que se ha utilizado en la evaluación del impacto del cambio climático sobre el rendimiento de diversos cultivos, en estudios de rendimientos de maíz para determinar su relación con la pérdida de suelo por erosión (Lee *et al.*, 1996) y con el impacto de prácticas de conservación de suelo (Easterling *et al.*, 1997). Williams y Renard (1985) reportaron que las comparaciones entre el rendimiento de cultivo observado y modelado indicaron un buen nivel predictivo de EPIC. También se ha utilizado para estimar la relación entre costos y productividad a fin de orientar a las inversiones en preservación de los suelos (Benson *et al.*, 1989).

Para las condiciones de México, ésta tecnología se ha utilizado para determinar el impacto de sistemas de labranza de conservación del suelo y sistema de labranza tradicional en diferentes escenarios de producción de maíz (Villar *et al.*, 2003). Flores *et al.* (2011) usaron EPIC para estimar el impacto ambiental de la aplicación de fertilizantes en maíz y estimar las pérdidas de estos insumos hacia aguas subterráneas y aguas superficiales. Tiscareño *et al.* (2003) emplearon el modelo EPIC para evaluar el impacto del cambio climático sobre la producción de maíz, frijol y trigo, y Villar *et al.* (1998) lo aplicaron para estudiar la erosionabilidad de suelos y su impacto en la productividad del maíz. Licona *et al.* (2006) calibraron y validaron el modelo EPIC para maíz usando variables fisiotécnicas del cultivo.

Bajo la hipótesis de que el modelo simula satisfactoriamente los rendimientos de maíz, el objetivo de este trabajo fue calibrar EPIC para estimar rendimientos de maíz de temporal en la Depresión Central de Chiapas (DCC). Para este propósito, se utilizaron los rendimientos parcelarios

reportados por el PROMAF para el Estado de Chiapas durante los ciclos agrícolas 2009-2011. Para la calibración de EPIC también se consideraron variables fisiotécnicas (relación biomasa-energía, índice de cosecha, índice de área foliar y profundidad de raíz), de suelo (profundidad y pedregosidad) y los datos reportados del sistema de producción de cada parcela.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La investigación se realizó con la información de 178 parcelas demostrativas monitoreadas por el PROMAF de la SAGARPA, para el sistema de producción de maíz de temporal. Estas parcelas se ubicaron en la región fisiográfica de la DCC, entre los 16° 01' y 16°47' de latitud Norte y los 92°23' y 93°32' de longitud Oeste, que comprende los municipios Chiapanecos de Acala, Venustiano Carranza, Villacorzo y Villaflores.

Obtención de la información

La obtención de datos se basó en lo descrito por Sharpley y Williams (1990) y Williams *et al.* (1990), que indican que la información requerida por el modelo EPIC son: datos generales (dimensiones del área, ubicación geográfica, elevación, entre otras), clima (temperatura máxima y mínima, precipitación, humedad relativa, evaporación y radiación), suelo (características generales y descripción fisicoquímica de cada capa del suelo), manejo del cultivo (fechas y prácticas agrícolas aplicadas al cultivo) y variables fisiotécnicas de la planta (altura, índice de área foliar, relación biomasa-energía, índice de cosecha, entre otras).

Información del sistema de producción

Para la calibración del modelo EPIC fue necesario contar con datos medidos de rendimientos de maíz, con el propósito de compararlos con los datos simulados y así poder realizar una calibración que se ajuste a la mayor parte de las parcelas monitoreadas y de este modo obtener una mayor precisión del modelo para predecir a nivel regional los rendimientos de maíz. La información para la calibración se obtuvo de la base de datos del programa PROMAF para los años 2009 y 2011, al igual que las prácticas de manejo de cultivo y fechas de realización.

Información meteorológica

Se recopilaron y generaron datos de precipitación, temperaturas máximas y mínimas diarias de nueve estaciones meteorológicas que se encuentran dentro y en las inmediaciones al área de trabajo, con periodos de registro que varían entre 1940 a 2011. Se realizaron polígonos de Thiessen para determinar el área de influencia de cada estación y definir la estación más cercana a la parcela de interés.

Para cada una de las estaciones meteorológicas se obtuvieron los parámetros estadísticos para la generación climática sintética conocida como “semilla” con los programas climáticos WXPARM y WXGEN del modelo. Las variables climatológicas de cada estación meteorológica a nivel mensual, para alimentar al modelo EPIC, se obtuvieron de las semillas generadas.

Información edafológica

La información fisicoquímica de los perfiles de suelo tipo, para las unidades de suelo, se obtuvo de muestreos de suelo en campo y del conjunto de datos vectoriales de información nacional sobre perfiles de suelo compilado por el INEGI (2003). La profundidad de los perfiles de suelo se determinó en función de la fase física de la carta de edafología, escala 1:250,000 de INEGI (2007). El punto de marchitamiento, capacidad de campo y densidad aparente se determinó con el programa SPAW³ (Soil-Plant-Air-Water) del USDA (United States Department of Agriculture). El porcentaje de pedregosidad se determinó con lo observado en campo, variando esta del 0 al 30%.

Información fisiotécnica

Los valores de las variables fisiotécnicas del cultivo se determinaron de acuerdo al estudio reportado por Licona *et al.* (2006), el valor máximo y mínimo aceptado por el modelo (Cuadro 2.1).

³ <http://hydrolab.arsusda.gov/SPAW/Index.htm>

Cuadro 2. 1. Variables fisiotécnicas para la base de datos del modelo EPIC.

Descripción	Variable	Valor mínimo	Valor máximo	Valor utilizado
Reacción Biomasa/Energía	WA	10.00	50.00	29.00
Índice de cosecha	HI	0.01	0.95	0.28
Índice de área foliar potencial máximo	DMLA	0.50	10.00	2.80
Profundidad de raíz máxima (m)	RDMX	0.50	3.00	1.00

Ajuste de variables

La calibración del modelo EPIC se realizó con el ajuste de las variables: relación biomasa-energía (WA), índice de cosecha (HI), índice de área foliar (DMLA), profundidad de raíz (RDMX), profundidad de suelo (Z) y pedregosidad (ROK). Este procedimiento consistió en modificar el valor inicial de la variable y realizar la corrida del modelo, buscando siempre la menor diferencia absoluta entre los rendimientos simulados (RS) y observados (RO), hasta que ésta ya no presentaba sensibilidad para poder iniciar el ajuste del parámetro siguiente. Se buscó que durante el ajuste el coeficiente de determinación (R^2) entre RS y RO fuera mayor de 0.50, una pendiente de la recta cercana a uno y se calculó la suma de cuadrados del error (SEE), a fin de tener una correlación y grado de ajuste satisfactorio.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para las 178 parcelas demostrativas monitoreadas por el PROMAF, entre 2009 y 2011 en la DCC, se encontró que los rendimientos observados variaron de 3.3 a 7.6 t ha⁻¹, con un rendimiento promedio de 5.7 t ha⁻¹. Antes del ajuste de variables los RS fluctuaron de 3.5 a 11.9 t ha⁻¹, con un valor promedio de 8.5 t ha⁻¹, un coeficiente de determinación (R^2) de -0.15, pendiente de la recta de 0.66 y una SEE de 9.33 (Figura 2.1).

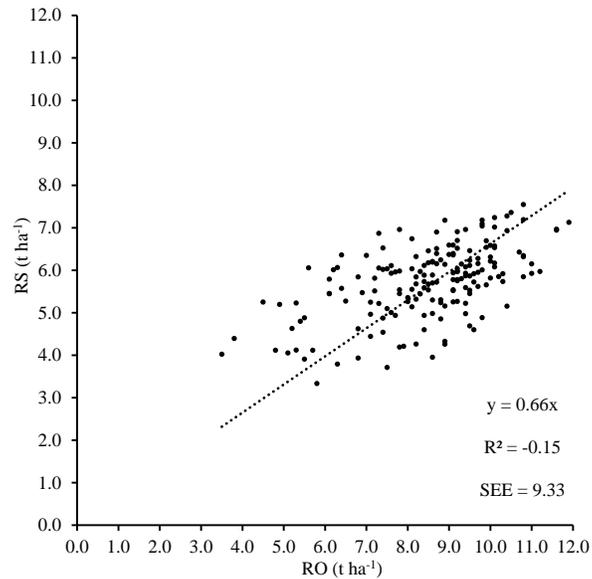


Figura 2. 1. Rendimientos observados (RO) y rendimientos simulados (RS) antes de la calibración.

La diferencia entre rendimientos simulados de maíz y los rendimientos reportados por los técnicos del PROMAF (RO) muestran algunas imprecisiones por no saber la calidad y el cuidado en la recopilación de datos de manejo y rendimientos. En este programa el apoyo para el establecimiento del paquete tecnológico no siempre es oportuno, el productor frecuentemente no reporta las labores que en realidad realiza y algunos técnicos tienden a reportar rendimientos superiores a los observados para justificar el servicio de asesoría técnica y de gestión para el ciclo siguiente.

De este modo, si comparamos la información de las 178 parcelas, para técnicos con más de una parcela a cargo, seis técnicos tuvieron más del 50% de parcelas descartadas para la calibración y 22 técnicos tuvieron el 50% o menos de parcelas descartadas, mientras que nueve técnicos tuvieron el 100% de parcelas aceptadas (Figura 2.2).

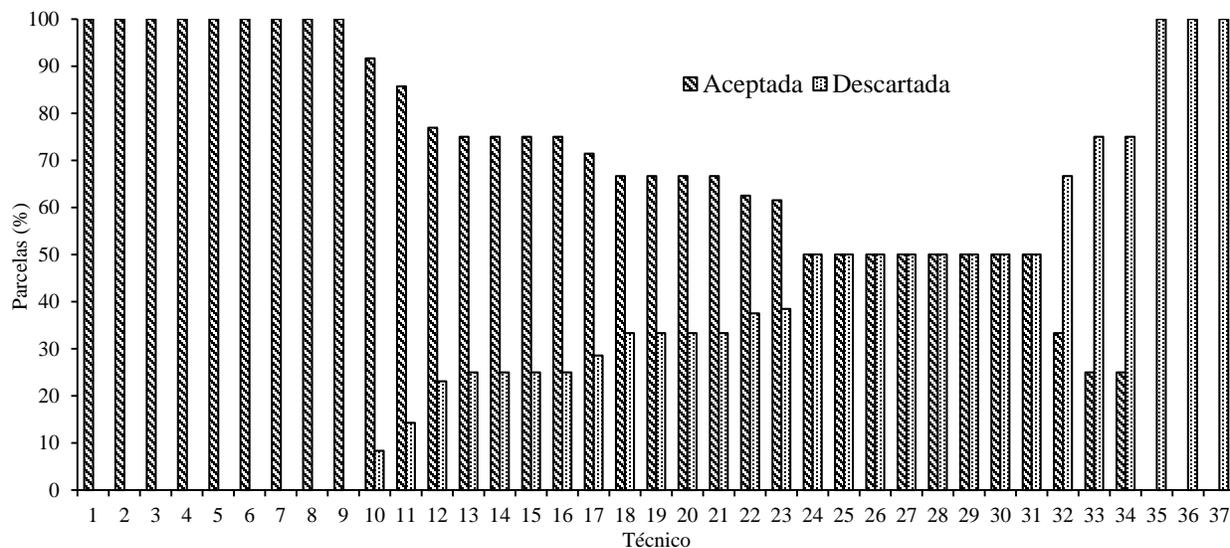


Figura 2. 2. Porcentaje de parcelas aceptadas y descartadas en la calibración para técnicos con más de una parcela a cargo.

Una vez analizada la calidad de la información se asumió una distribución normal de las diferencias de rendimientos y se eliminó un 33% de la información con las mayores diferencias absolutas entre RO y RS, ya que de acuerdo con Davis (2000) los datos entre la media (μ) – una desviación estándar (σ) y $\mu + \sigma$ es aproximadamente el 67% de la información en una distribución normal, quedando para el análisis 119 parcelas. De esta forma, se observó que los RS oscilaron entre 3.5 a 7.7 t ha⁻¹, con un valor promedio de 5.8 t ha⁻¹, un coeficiente de determinación (R^2) de 0.67, pendiente de la recta de 0.99, una SEE de 0.19 y una diferencia absoluta máxima de 0.8 t ha⁻¹ entre RS y RO (Figura 2.3).

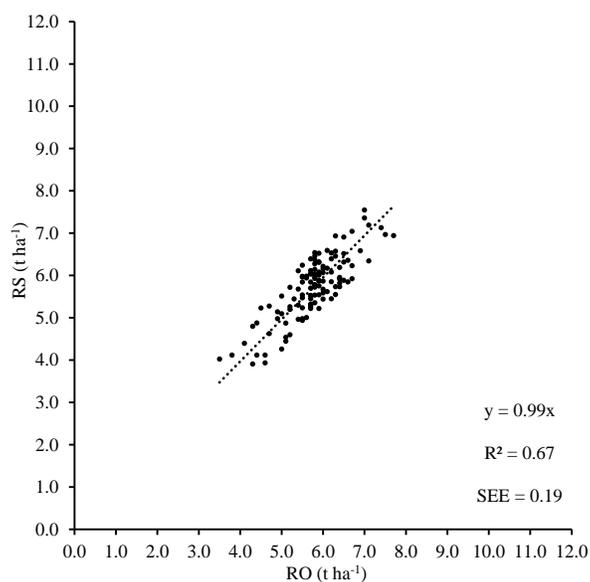


Figura 2. 3. Rendimientos observados (RO) y rendimientos simulados (RS) después de la calibración.

Los rendimientos presentaron una relación directa con la profundidad de los suelos (Z), para suelos profundos los RS variaron de 5.5 a 6.1 t ha⁻¹ y para someros variaron de 4.6 a 5.5 t ha⁻¹ (Figura 2.4). Esta relación con la profundidad se encuentra relacionada con la capacidad del suelo para almacenar y disponer de humedad en etapas críticas del desarrollo del maíz. Lo anterior concuerda con lo observado por Osuna (1991) y Pérez (1998), quienes removieron capas de suelo y encontraron que los rendimientos de maíz disminuyeron al reducir la profundidad de éste.

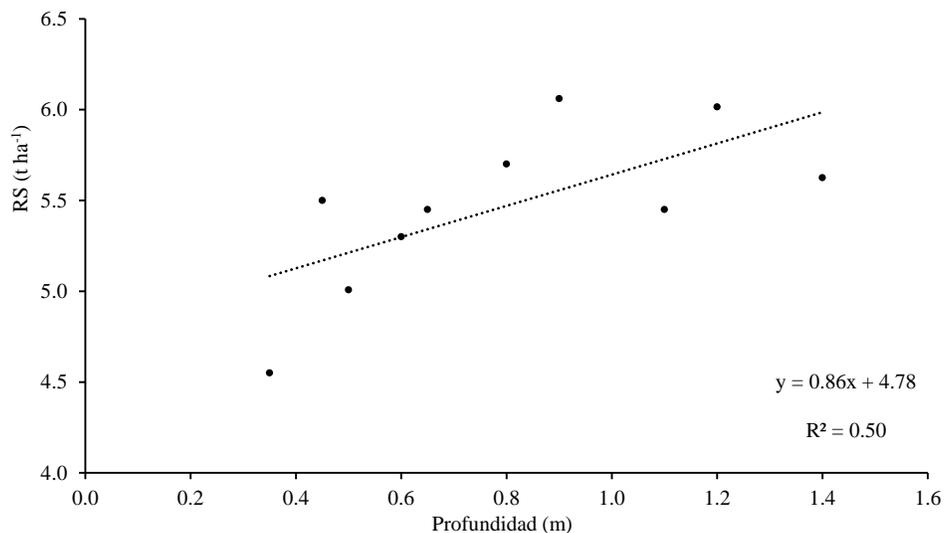


Figura 2. 4. Efecto de la profundidad del suelo en los rendimientos simulados (RS).

Los días de estrés hídrico, influyen en la capacidad de almacenamiento de humedad de los suelos, tuvieron una relación inversa con los rendimientos simulados (Figura 2.5); para los mayores días de estrés hídrico los rendimientos disminuyeron y para los menores aumentaron. Al respecto Sharpley y Williams (1990) indican que el estrés por agua se considera en la determinación de biomasa acumulada, crecimiento de raíz y rendimiento de grano.

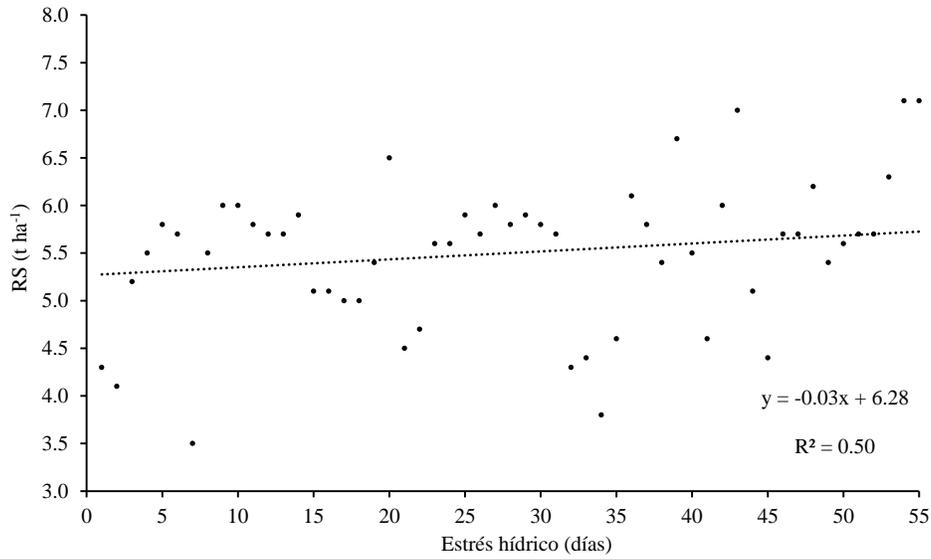


Figura 2. 5. Efecto del estrés hídrico en los rendimientos simulados (RS).

En general, se advierte que los productores con parcelas con los rendimientos más bajos obedece a un sistema de producción con paquetes tecnológicos inadecuados, lo que corresponde a lo indicado por López *et al.* (2009). Por otra parte, los productores cuyas parcelas tienen rendimientos altos se relaciona con paquetes tecnológicos con mayores dosis de fertilización y de mayor costo de producción (Figura 2.6).

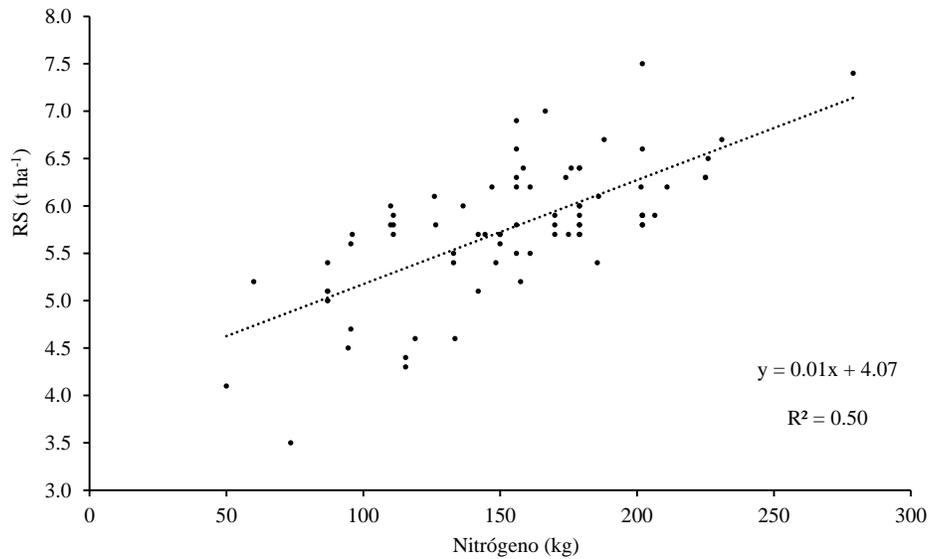


Figura 2. 6. Efecto de la fertilización con nitrógeno en los rendimientos simulados (RS).

CONCLUSIONES

El modelo EPIC requiere de una base de datos confiable, pero con la información disponible fue calibrado satisfactoriamente. Lo cual permite su uso para la toma de decisiones que analicen las condiciones ambientales y de manejo que condicionan la producción de maíz en la DCC.

Las variables ajustadas para la calibración: relación biomasa-energía, índice de cosecha, índice de área foliar, profundidad de raíz, profundidad de suelo y pedregosidad, son confiables, por lo que deberían registrarse en campo de forma primordial para mejorar la información del modelo.

Los rendimientos y sistemas de producción de maíz, utilizados en la calibración del modelo de simulación, reportados por el PROMAF, generaron en su mayoría un bajo ajuste entre los rendimientos estimados y simulados ($R^2 = 0.67$), debido a la calidad de información reportada por los técnicos, la variabilidad genética y la heterogeneidad de los sistemas de producción.

El modelo EPIC permite valorar el desempeño de los técnicos en programas gubernamentales de extensionismo, a fin de administrar satisfactoriamente los recursos erogados para el establecimiento de parcelas demostrativas.

LITERATURA CITADA

- Benson, V., O. Rice, P. Dyke, J. Williams and C. Jones. 1989. Conservation impact on crop productivity for the life of a soil. *Soil and water conservation*. 44(6):600-604.
- Davis B. 2000. *Introduction to agricultural statistics*. Delmar Cengage Learning. 4:55-58.
- Easterling, W. E., C. J. Hays, E. M. McKenney and J. R. Brandle. 1997. Modelling the effect of shelterbelts on maize productivity under climate change: an application of the EPIC Model. *Agric. Ecosystems Environ*. 61:163-176.
- Flores, L. H. E., de la Mora O. C., Ireta M. J., Castañeda C. A. A. y Velasco N. R. 2011. Uso del modelo PEIC para estimar el impacto ambiental de la aplicación de fertilizantes en maíz de la barca, Jalisco, México. Campo experimental centro altos de Jalisco-INIFAP. VI Reunión Nacional de Innovación Agrícola, León, Guanajuato, 2011. Memoria.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2003. Información nacional sobre perfiles de suelo versión 1.2, escala 1:250,000.

- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2007. Carta de edafología, escala 1:250,000.
- Lee, J. L., D. L. Phillips and R. F. Dodson. 1996. Sensitivity of the US corn belt to climate change and elevated CO₂. Part II: Soil erosion and organic carbon. *Agric. Systems*. 52:503-521.
- Licona, S. J., Martínez M. M. R., Mendoza O. L. E., Figueroa S. B. y Fernández R. D. S. 2006. Uso del modelo EPIC para estimar rendimientos de maíz con base en variables fisiotécnicas en el oriente del Estado de México. *TERRA Latinoamericana*, Vol. 24, Núm. 2, abril-junio, 2006, pp. 283-291. Universidad Autónoma Chapingo. México.
- López, B. W., López L. A. Coutiño E. B., Camas G. R., Villar S. B., López M. J., Serrano A. V., Cadena I. P., Zamarripa M. A. y Sandoval M. C. 2009. Zonas potenciales y recomendaciones técnicas para producir maíz en Chiapas, México. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Chiapas, México.
- Osuna C. E. 1991. Efecto de la erosión sobre la productividad y producción de los cultivos. Seminario de conservación del suelo y agua. Santa Cruz, Tlaxcala, México. 15 p.
- Pérez, N. J., V. V. Haller, M. M. Menes y N. E. Chulín. 1998. Erosión, productividad y rentabilidad de dos suelos del Estado de Oaxaca. *Agrociencia*. 32:113-118.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). 2013. Sistema de Información Agropecuaria de Consulta (SIACON), Chiapas, 2013.
- Sharpley, A. N. and J. R. Williams. 1990. EPIC-Erosion/Productivity Impact Calculator: 1. Model documentation. Technical bulletin 1768. US Department of Agriculture. Washington, DC, USA.
- Tiscareño, L. M., C. Izaurralde, N. J. Rosenberg, A. D. Báez G. y J. Salinas G. 2003. Modeling El Niño southern oscillation climate impact on mexican agriculture. *Geofísica Internacional*. 42:331-339.
- Villar, S. B., Figueroa S. B., Oropeza M. J. L., Landois P. L. y Volke H. V. 1998. Erosionabilidad de suelos y su impacto en la productividad del maíz en el trópico mexicano. *Agrociencia* 32:199-207.
- Villar, S. B., López M. J., Pérez N. J. y Camas G. R. 2003. Aplicación del modelo de simulación EPIC en la predicción del efecto de sistemas de labranza del suelo. *TERRA Latinoamericana*, Vol. 21, Núm. 3, julio-septiembre, 2003, pp. 381-388. Universidad Autónoma Chapingo. México.

- Williams, J. R., C. A. Jones and P. T. Dyke. 1984. A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. *Trans. ASAE* 27(1):129-144.
- Williams, J. R., P. T. Dyke, W. W. Fuchs, V. W. Benson, O. W. Rice and E. D. Taylor. 1990. EPIC-Erosion/Productivity Impact Calculator: 2. User manual. Technical bulletin 1768. US Department of Agriculture. Washington, DC, USA.
- Williams, R. J. and K. G. Renard. 1985. Assessment of soil erosion and crop productivity with process models (EPIC). pp. 67-103. In: Follet, R. F. and B. A. Stewart (eds.). *Soil erosion and crop productivity*. American Society of Agronomy-Crop Science Society of America-Soil Science Society of America. Madison, WI.

CAPÍTULO 3. APLICACIÓN DEL MODELO EPIC PARA LA EVALUACIÓN PRODUCTIVA MUNICIPAL DEL MAÍZ EN CHIAPAS

Application of the EPIC Model to Evaluate Corn's Municipal Productivity in Chiapas Mexico

RESUMEN

Este trabajo se realizó en la Depresión Central de Chiapas (DCC), con el objetivo de evaluar, en condiciones de temporal, el rendimiento de maíz a nivel municipal, con el modelo EPIC (Erosión/Productividad Impact Calculator), con los valores reportados por el SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera) entre 2005 y 2011 para los municipios de Acala, Venustiano Carranza, Villacorzo y Villaflores. Con el propósito de estimar el rendimiento de grano se consideraron parámetros de crecimiento del maíz, las características del suelo, variables climáticas, y el sistema de cultivo. Para evaluar el modelo se generaron 78 Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU) en las que se simuló el rendimiento de maíz. Rendimiento simulado del maíz en cada HRU fue ponderada a nivel municipal y este valor se comparó con los rendimientos anuales reportados por el SIAP. Los resultados de la evaluación indicaron que el municipio de Acala tuvo las diferencias absolutas, entre el rendimiento observado y simulado, de 0.1 y 3.5 t ha⁻¹, Venustiano Carranza entre 0.0 y 1.8 t ha⁻¹, Villacorzo entre 0.1 y 2.2 t ha⁻¹, y Villaflores entre 0.3 y 1.8 t ha⁻¹; siendo 2005, 2007, 2008, 2010 y 2011 los años con las más bajas diferencias y 2006 y 2009 con las mayores. Excluyendo los años con las mayores diferencias absolutas, Acala tuvo una diferencia absoluta máxima de 0.6 t ha⁻¹ y un coeficiente de determinación (R²) de 0.65, Venustiano Carranza una diferencia absoluta máxima de 0.5 t ha⁻¹ y un coeficiente de determinación (R²) de 0.80, mientras que Villaflores y Villacorzo tuvieron una diferencia de 1.1 t ha⁻¹ y un coeficiente de determinación (R²) menor a 0.50. Para un horizonte de simulación de 50 años, el rendimiento medio, por el tipo de suelo, varió entre 1.9 y 5.0 t ha⁻¹ para fluvisol eútrico gravosa y feozem háplico sin fase, respectivamente. El estrés hídrico varió de 14 hasta 54 días para luvisol órtico sin fase y fluvisol eútrico pedregosa, respectivamente. Para suelos más profundos los días de estrés hídrico son menores en comparación con los suelos menos profundos. Se observó que el rendimiento del maíz, a nivel regional, aumenta 50.0 kg ha⁻¹ por cada día que el estrés hídrico se reduzca. La productividad media de maíz, en 50 años de simulación, corresponden a los valores medios comunicados por el SIAP (Acala 2.6 t ha⁻¹, Venustiano Carranza 3.6 t ha⁻¹,

Villacorzo 4.8 t ha⁻¹ y Villaflores 3.6 t ha⁻¹). En la investigación se llegó a la conclusión de que el modelo EPIC es una herramienta útil para evaluar la certeza de las estadísticas gubernamentales sobre la producción de maíz a nivel municipal. Además, se concluyó que es necesario identificar estrategias regionales de manejo de cultivo que ayuden a reducir el estrés hídrico para aumentar el rendimiento de grano.

Palabras clave: *Maíz, Rendimiento, Chiapas, Modelo EPIC, Evaluación.*

SUMMARY

This work was performed in the Central Depression of Chiapas (DCC), with the objective of evaluating, under rainfed conditions, the annual corn's yield, simulated with the EPIC (Erosion/Productivity Impact Calculator) model with values reported by SIAP (Spanish acronym for a federal dependence responsible to produce the national agricultural statistics) between 2005 and 2011 for the municipalities of Acala, Venustiano Carranza, Villacorzo, and Villaflores. In order to estimate grain yield it was considered corn's growth parameters, soil's characteristics, climatical variables, and the crop system. To evaluate the model were generated 78 Hydrological Response Units (HRU) to simulate maize yield on special basis. The maize's simulated yield on each HRU was weighted at municipal level and this value was compared with the annual yields reported by SIAP. The evaluation results indicated that Acala's municipality had absolute differences, between observed and simulated yield, from 0.1 to 3.5 t ha⁻¹, Venustiano Carranza between 0.0 and 1.8 t ha⁻¹, Villacorzo between 0.1 and 2.2 t ha⁻¹, and Villaflores between 0.3 and 1.8 t ha⁻¹; being 2005, 2007, 2008, 2010 and 2011 the years with lower differences and 2006 and 2009 with higher ones. Excluding the years with higher absolute differences, Acala had a maximum absolute difference of 0.6 t ha⁻¹ and a coefficient of determination (R²) of 0.65, Venustiano Carranza a maximum absolute difference of 0.5 t ha⁻¹ and a coefficient of determination (R²) of 0.80, while Villaflores and Villacorzo a difference of 1.1 t ha⁻¹ and a coefficient of determination (R²) below 0.50. For a horizon of 50 years simulation, average yields, by soil type, varies from 1.9 to 5.0 t ha⁻¹ for eutric fluvisol burdensome and haplic phaeozems without phase, respectively. Water stress varies from 14 to 54 days for luvisol orthic without phase and fluvisol stony eutric, respectively. For deeper soils the days of water stress decreases and it increases on the shallow ones. It was observed that corn's yield, at regional level, increases 50.0

kg ha⁻¹ for each day that water stress is reduced. The average maize productivity, on 50 years of simulation, corresponds to the mean values reported by SIAP (Acala 2.6 t ha⁻¹, Venustiano Carranza 3.6 t ha⁻¹, Villacorzo 4.8 t ha⁻¹, and Villaflores 3.6 t ha⁻¹). The investigation concluded that the EPIC model is a useful tool to assess the reliability of government statistics on corn's yield at the municipal level. Also, it was concluded that it is necessary to identify regional crop management strategies in order to reduce plant stress and increase grain yield.

Keywords: *Corn, Yield, Chiapas, EPIC model, Evaluation.*

INTRODUCCIÓN

La diversificación en los sistemas de producción de maíz en el Estado de Chiapas hacen que el seguimiento y monitoreo sea una técnica costosa, laboriosa y tardada. Por ello, la aplicación de modelos que permitan pronosticar rendimientos en forma precisa y analizar escenarios de manejo de manera rápida representa una opción práctica para la evaluación de la producción de maíz a nivel regional. El uso de modelos de simulación constituye una herramienta útil para conocer el impacto del manejo de recursos naturales, permitiendo organizar y establecer sistemas de producción con una orientación conservacionista del suelo (Hartkamp *et al.*, 1999). El modelo EPIC (Erosion/Productivity Impact Calculator) fue desarrollado en EUA por el ARS-USDA (Agricultural Research Service) con la finalidad de contar con una herramienta para la determinación de la influencia de las pérdidas de suelo en el rendimiento económico de las coberturas vegetales (Williams *et al.* 1984). EPIC es una herramienta muy útil para la planificación del uso de la tierra y manejo de cuencas, ya que trabaja a escala diaria y proporciona valores físicamente cuantificables (Rojas, 1999).

El modelo EPIC se ha aplicado para la evaluación del impacto del cambio climático sobre el rendimiento de cultivos (Easterling *et al.*, 1992; Tiscareño *et al.*, 2003), para conocer el impacto de las prácticas de conservación de suelo en el rendimiento de maíz (Easterling *et al.*, 1997), para evaluar el impacto de la erosión en la productividad del maíz (Lee *et al.*, 1996; Villar *et al.*, 1998; Villar *et al.*, 2003; Licona *et al.*, 2006), para estimar el impacto ambiental de la aplicación de fertilizantes en maíz (Flores *et al.*, 2011) y para estimar la relación entre costos y productividad del suelo (Benson *et al.*, 1989).

En el presente trabajo se comparan los rendimientos de maíz de temporal simulados por el modelo EPIC con los valores reportados por el SIAP, entre 2005 y 2011, para los municipios pertenecientes a la Depresión Central de Chiapas (DCC). Para la alimentación del modelo EPIC se consideraron variables fisiotécnicas (relación biomasa-energía, índice de cosecha, índice de área foliar y profundidad de raíz), de suelo (profundidad y pedregosidad), datos meteorológicos (temperatura y precipitación diaria) y el sistema de producción realizado por los productores para la región. Se partió de las hipótesis: 1) que una calibración previa del modelo EPIC, con parcelas de la región, permite una simulación satisfactoria de los rendimientos de cultivo a nivel regional. 2) Los resultados del modelo EPIC, asociados a URH y procesados a través de un sistema de información geográfico, pueden emplearse para predecir rendimientos municipales de maíz.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La presente investigación se realizó en los municipios de Acala, Venustiano Carranza, Villacorzo y Villaflores, que forman parte de la región fisiográfica de la DCC. El área de trabajo se localiza entre los 16° 01' y 16°47' de latitud Norte y los 92°23' y 93°32' de longitud Oeste. El área de cultivo con maíz se definió a partir de la carta de uso del suelo y vegetación, escala 1:250,000 de INEGI (2010). Estos polígonos reportados se ajustaron para aquellas pendientes menores al 15%, según el modelo digital del terreno escala 1:250,000 de INEGI (1998). El área agrícola resultante se subdividió en URH en función de los tipos de suelo que reporta el INEGI (2007) para la región.

Obtención de la información

La información requerida por el modelo se gestionó según lo descrito por Sharpley y Williams (1990) y Williams *et al.* (1990), los cuales indican que EPIC requiere datos generales (dimensiones del área, ubicación geográfica, elevación, entre otras), clima (temperatura máxima y mínima, precipitación, humedad relativa, evaporación y radiación), suelo (características generales y descripción fisicoquímica de cada capa del suelo), manejo del cultivo (fechas y prácticas agrícolas aplicadas al cultivo) y variables fisiotécnicas del cultivo (altura de planta, índice de área foliar, relación biomasa-energía, índice de cosecha, entre otras).

Información del sistema de producción

Para la comparación de los rendimientos municipales, generados con EPIC, fue necesario contar con datos anuales de rendimientos de maíz de temporal. La información municipal de rendimientos se obtuvo del SIAP para los años 2005 a 2011. Las prácticas de manejo del cultivo y sus respectivas fechas de ejecución se obtuvieron para la preparación del terreno, siembra, fertilización y cosecha en la DCC, para definir un manejo de cultivo de maíz de temporal generalizado para la región de estudio. La DGEA (1977) indica que la preparación del terreno incluye un paso de rastra inmediatamente antes de la siembra entre el 20 de mayo al 10 de junio, la siembra entre el 1 de junio al 20 de julio y la fertilización entre los 30 y 35 días después de la siembra. La dosis de fertilización de nitrógeno se determinó de acuerdo a López *et al.* (2009), quienes señalan que estas van de 40 a 60 kg ha⁻¹, mientras que la dosis de fósforo fue de 30 kg ha⁻¹ (Álvarez *et al.*, 2009); los cuales se consiguen con 100 kg de 46-00-00 y 65 kg de 18-46-00. La cosecha se realiza cuando el grano tiene entre un 14 y 16% de humedad, en los meses de noviembre a diciembre (INIFAP, 2007).

Información meteorológica

Se recopilaron y generaron datos de precipitación, temperaturas máximas y mínimas de las estaciones meteorológicas que cubren el área de trabajo: Acala (07003), Villa de Chiapilla (07034), Finca Ocotlán (07065), Portaceli (07132), Úrsulo Galván (07327), Cascajal (07329), Benito Juárez (07342), Monterrey (07349), Flores Magón (07358). Estas estaciones tienen un periodo de registro que varía entre 1940 a 2011. A través de polígonos de Thiessen se definió la estación meteorológica más cercana a cada URH.

Para cada una de las estaciones meteorológicas se obtuvieron los parámetros estadísticos para la generación climática sintética conocida como “semilla” con los programas climáticos WXPARM y WXGEN del modelo EPIC.

Información edafológica

La información fisicoquímica de los perfiles de suelo tipo, para las unidades de suelo: Acrisol (1%), Cambisol (4%), Fluvisol (4%), Vertisol (17%), Feozem (23), Rendzina (23%) y Luvisol (27%), se obtuvo de muestreos de suelo en campo y de los perfiles reportados en el conjunto de

datos vectoriales de información nacional sobre perfiles de suelo (INEGI, 2003). La profundidad de los perfiles de suelo se determinó en función de la fase física de la carta de edafología, escala 1:250,000 (INEGI, 2007). El punto de marchitamiento, capacidad de campo y densidad aparente se obtuvo con el programa SPAW⁴ (Soil-Plant-Air-Water) del USDA (United States Department of Agriculture). La pedregosidad del suelo se definió con base en lo observado en campo variando esta de 0 al 30%.

Información fisiotécnica

Los valores de las variables fisiotécnicas del cultivo (Cuadro 3.1) se determinaron de acuerdo al estudio reportado por Licona *et al.* (2006).

Cuadro 3. 1. Variables fisiotécnicas para la alimentación del modelo EPIC.

Descripción	Variable	Valor mínimo	Valor máximo	Valor utilizado
Reacción Biomasa/Energía	WA	10.00	50.00	29.00
Índice de cosecha	HI	0.01	0.95	0.28
Índice de área foliar potencial máximo	DMLA	0.50	10.00	2.80
Profundidad de raíz máxima (m)	RDMX	0.50	3.00	1.00

Simulación del modelo

Las simulaciones, para las 78 URH generadas, se realizaron para los años 2005 a 2011. El rendimiento simulado municipal, ponderado para cada uno de los años de simulación, se extrajo de las URH; usando como máscara los polígonos de cada municipio. Con esta información se realizó la comparación de rendimientos simulados (RS) y rendimientos observados (RO). Para evaluar la correlación y grado de ajuste de RS y RO, se obtuvo el coeficiente de determinación (R^2). Al final se corrió el modelo considerando un horizonte de predicción de 50 años y se generó un mapa de rendimientos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El modelo subestimó, comparado con los valores reportados por el SIAP, los rendimientos simulados. En el municipio de Acala los rendimientos simulados y observados tuvieron una diferencia absoluta de 0.1 t ha⁻¹ para 2005 y 3.5 t ha⁻¹ para 2009. En Venustiano Carranza la

⁴ <http://hydrolab.arsusda.gov/SPAW/Index.htm>

diferencia absoluta fue de 0.0 t ha⁻¹ para 2005 y 1.8 t ha⁻¹ para 2006. Para Villacorzo la diferencia absoluta fue de 0.1 t ha⁻¹ para 2011 y 2.2 t ha⁻¹ para 2009. En Villaflores la diferencia absoluta fue de 0.3 t ha⁻¹ para 2005 y 2008 y 1.8 t ha⁻¹ para 2009. Se observó que en los años 2005, 2007, 2008, 2010 y 2011 tuvieron las menores diferencias absolutas y en los años 2006 y 2009 se observaron las mayores (Cuadro 3.2).

Cuadro 3. 2. Rendimientos observados (SIAP) y rendimientos simulados (RO y RS) anuales.

Municipio	Año	2005		2006		2007		2008		2009		2010		2011	
		RS (t ha ⁻¹)	RO	RS	RO										
Acala		2.1	2.0	2.8	1.7	4.2	3.8	3.0	3.5	4.2	0.7	3.1	2.6	3.8	3.2
Venustiano Carranza		3.4	3.4	4.2	2.4	5.0	4.9	3.0	4.1	4.7	3.4	3.3	3.7	4.0	3.5
Villacorzo		4.1	3.0	4.6	3.1	5.4	4.5	3.9	4.8	5.4	3.2	3.9	5.0	5.1	5.0
Villaflores		3.8	3.5	4.2	3.1	5.4	3.9	3.8	4.1	4.9	3.2	3.3	3.7	5.3	4.2

Sin considerar los años con mayores diferencias entre RO y RS, se obtuvo que en Acala los rendimientos tuvieron una diferencia absoluta máxima de 0.6 t ha⁻¹, un coeficiente de determinación (R²) de 0.65 y pendiente de la recta de 1.06. En Venustiano Carranza la diferencia absoluta máxima fue de 0.5 t ha⁻¹, con un coeficiente de determinación (R²) de 0.80 y pendiente de la recta de 1.01. En Villacorzo se obtuvo una diferencia absoluta máxima de 1.1 t ha⁻¹, un coeficiente de determinación (R²) de -0.72 y pendiente de la recta de 1.04. En Villaflores la diferencia absoluta máxima fue de 1.1 t ha⁻¹, un coeficiente de determinación (R²) de 0.41 y pendiente de la recta de 1.04 (Figura 3.1 y Figura 3.2). De los resultados se infiere que los rendimientos reportados por el SIAP para Acala y Venustiano Carranza fueron tomados con una mejor metodología, ya que los municipios de Villacorzo y Villaflores tienen mayores diferencias absolutas y menores coeficientes de determinación. Estas diferencias pueden atribuirse a que los CADER⁵ de 12-Villacorzo y 11-Villaflores, han utilizado criterios de muestreo diferentes a los utilizados en los CADER 01-Tuxtla Gutiérrez (Acala) y 04-Venustiano Carranza.

⁵ El CADER (Centro de Apoyo al Desarrollo Rural) es el órgano la SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación) responsable de estimar los rendimientos de cultivos a nivel municipal en México.

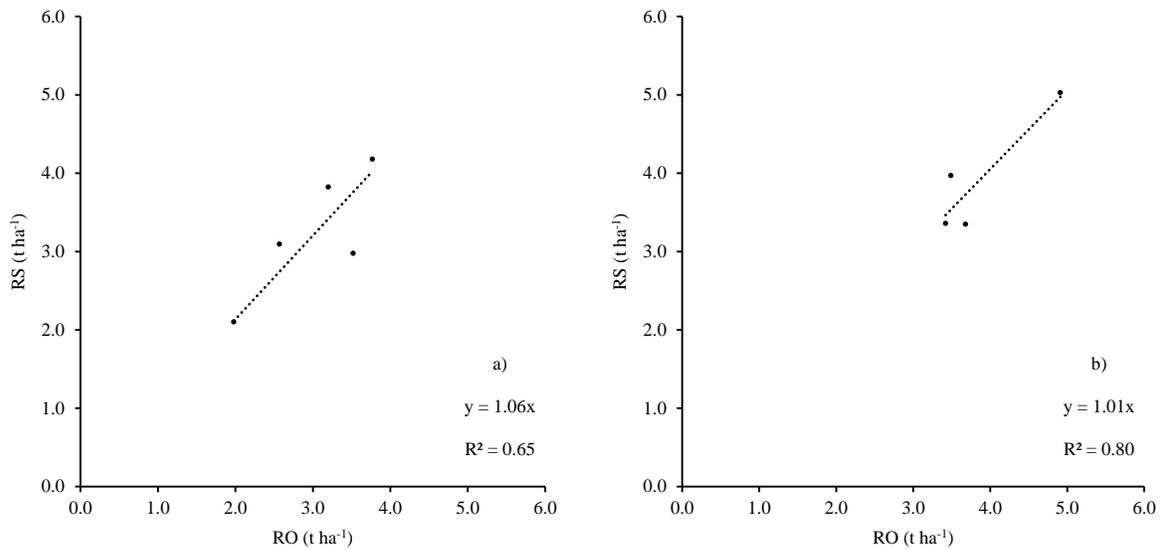


Figura 3. 1. Rendimientos observados (SIAP) y rendimientos simulados (RO y RS) para Acala a) y Venustiano Carranza b).

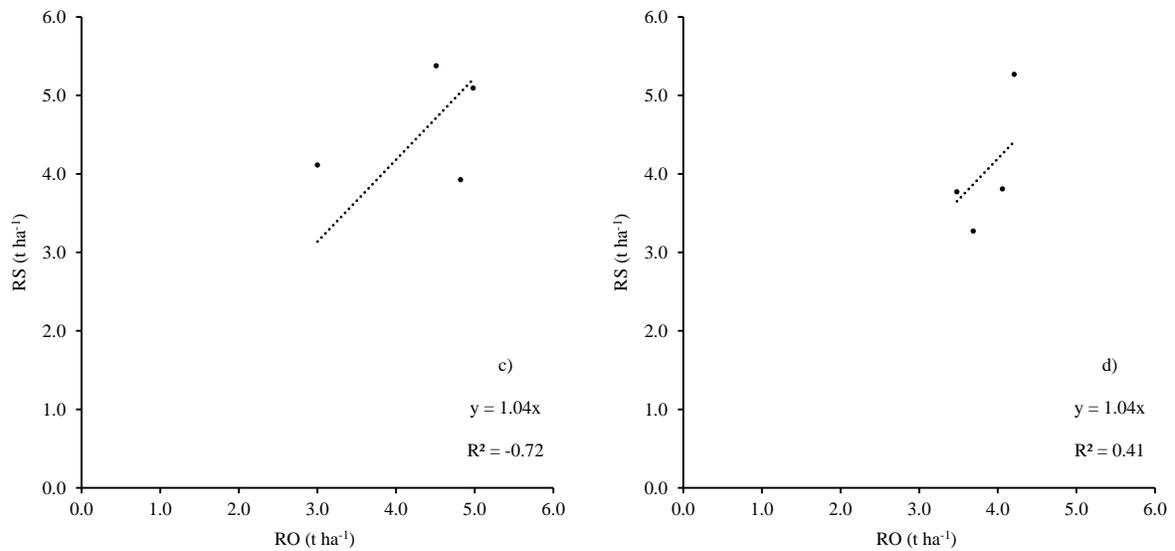


Figura 3. 2. Rendimientos observados (SIAP) y rendimientos simulados (RO y RS) para Villacorzo c) y Villaflores d).

La variación de RO y RS se atribuye a que, en la determinación de rendimientos municipales, ni el EPIC ni el SIAP pueden ponderar el manejo real del cultivo de maíz usado por los productores. Estas variaciones también pueden explicarse por la calidad de la información edafológica (escala 1:250,000) y meteorológica. Dada la variabilidad de la información se asumió una distribución normal de las diferencias de rendimientos y se eliminó el 33% de la información con las mayores diferencias absolutas, ya que de acuerdo con Davis (2000) los datos entre la media (μ) – una desviación estándar (σ) y $\mu + \sigma$ es aproximadamente el 67% de la información, se obtuvo que los

rendimientos observados y simulados, a nivel municipal, tuvieron una diferencia absoluta máxima de 1.1 t ha^{-1} , un coeficiente de determinación (R^2) de 0.49 y pendiente de la recta de 1.00 (Figura 3.3). Estos datos permiten observar, a nivel general, como simula el modelo a través de las medias municipales reportadas por el SIAP.

Es válido suponer que en los años con menores variaciones en rendimientos, la calidad y certeza de la información recabada por el SIAP fue confiable. También se puede considerar que una mejor resolución de la información edáfica y meteorológica podría mejorar los rendimientos de grano simulados por EPIC.

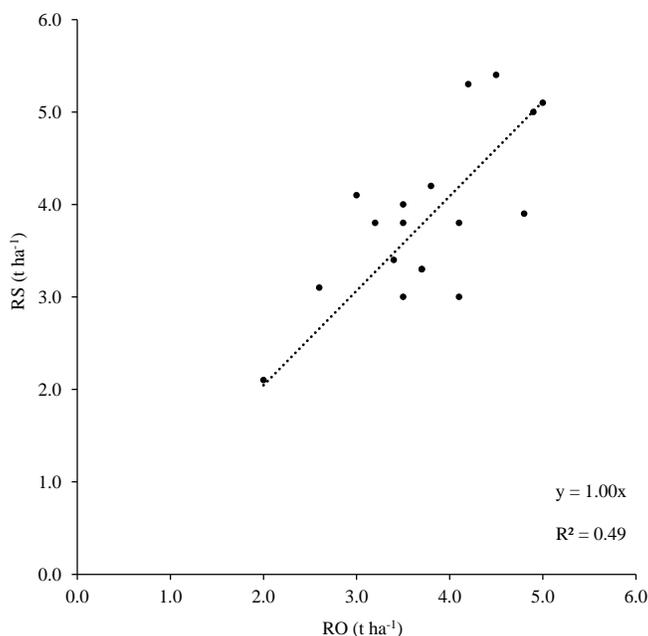


Figura 3. 3. Rendimientos observados (SIAP) y rendimientos simulados (RO y RS) a través de medias municipales.

Para una simulación de 50 años, considerando datos climáticos sintéticos, los rendimientos promedios por tipo de suelo variaron entre 1.9 t ha^{-1} y 5.0 t ha^{-1} , para fluvisol eútrico gravosa y feozem háplico sin fase, respectivamente (Figura 3.4). Se observó una relación inversamente proporcional entre rendimientos y profundidad de suelo. Donde los mayores rendimientos se encuentran en suelos sin fase y líticos profundos, mientras que los menores rendimientos en suelos pedregosos, gravosos y líticos; mostrando el efecto de la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo y el rendimiento del cultivo.

El estrés hídrico representa el efecto que produce la capacidad de almacenamiento de humedad de los suelos y los patrones de lluvia de la región sobre el rendimiento de grano (Sharpley y Williams, 1990). Los rendimientos se relacionaron inversamente con los días de estrés hídrico (Figura 3.6), para suelos profundos los días con estrés hídrico disminuyeron y para suelos someros aumentaron. A nivel regional los días con estrés hídrico variaron entre 14 y 54 días, para suelos tipo luvisol órtico sin fase y fluvisol eútrico pedregosa, respectivamente; mientras que los días de estrés por nitrógeno variaron entre 1 y 51 días, para vertisol crómico sin fase y vertisol pélico pedregosa, respectivamente (Figura 3.5). Los días de estrés hídrico, comparados con los días de estrés por temperatura y nutrición, tuvieron una mayor influencia en la simulación de rendimientos. Esta situación resalta la importancia que tienen las prácticas de conservación de la humedad y aumento de la densidad aparente del suelo para incrementar los rendimientos de cultivo.

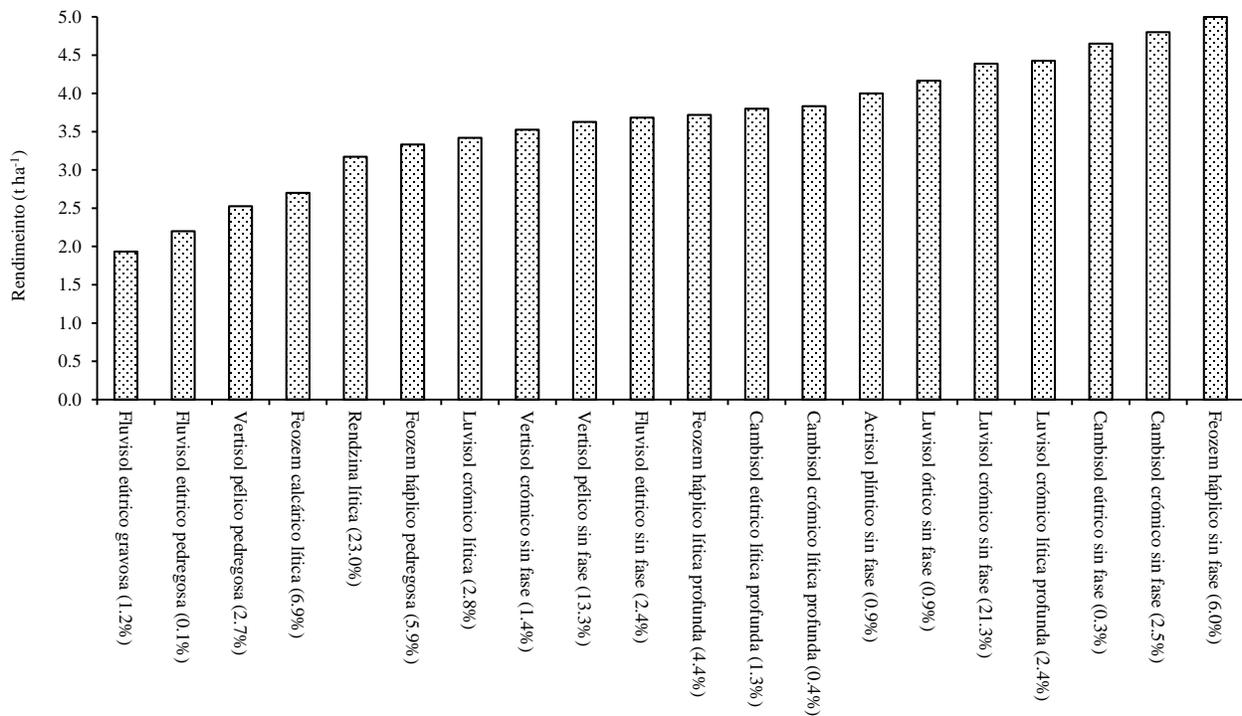


Figura 3. 4. Rendimientos promedios por tipo de suelo.

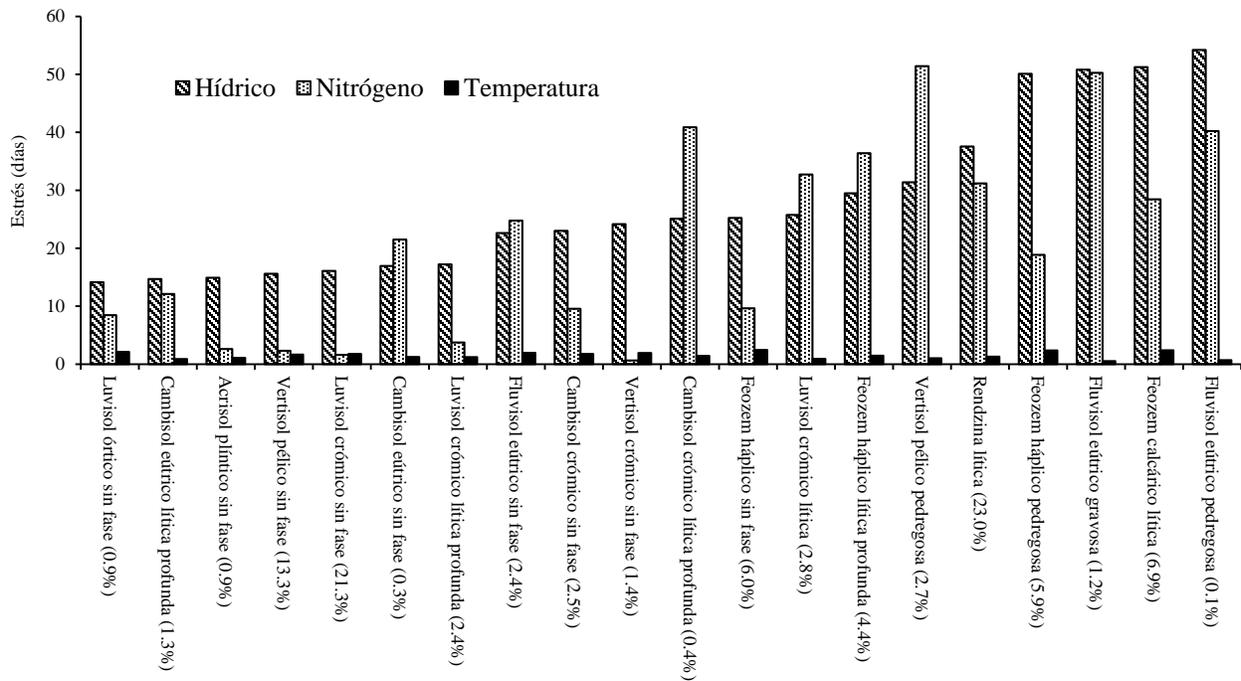


Figura 3. 5. Días de estrés hídrico, de temperatura y de nutrientes, por tipo de suelo.

De los resultados se infiere que las prácticas de manejo que reduzcan los días de estrés hídrico, como la labranza cero para mejorar la tasa de infiltración (Lal, 1989) o la incorporación de residuos de cosecha para mejorar la estructura del suelo (Mora, 2011), incrementarían los rendimientos regionales en 50.0 kg ha⁻¹ por cada día que se reduzca el estrés hídrico (Figura 3.6). Al considerar una mejora en la fertilidad, por cada día que se reduzca el estrés por nitrógeno el rendimiento de maíz se incrementa en 40.0 kg ha⁻¹ (Figura 3.7).

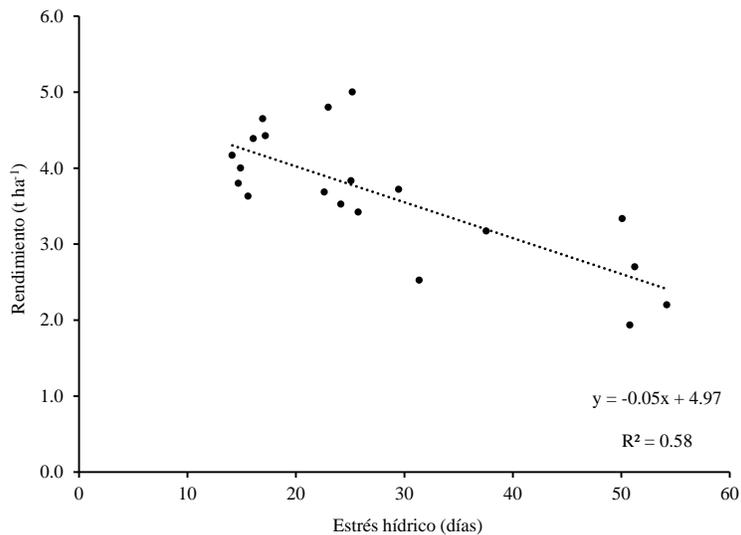


Figura 3. 6. Relación entre días de estrés por humedad y rendimientos a nivel regional.

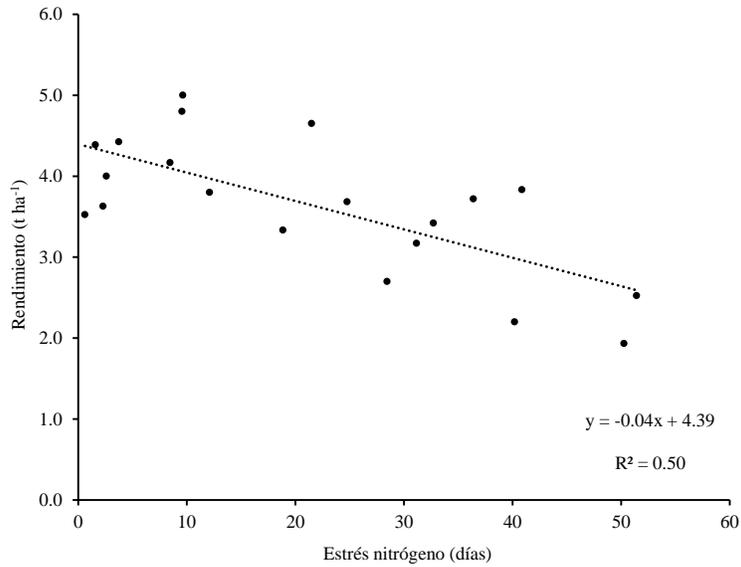
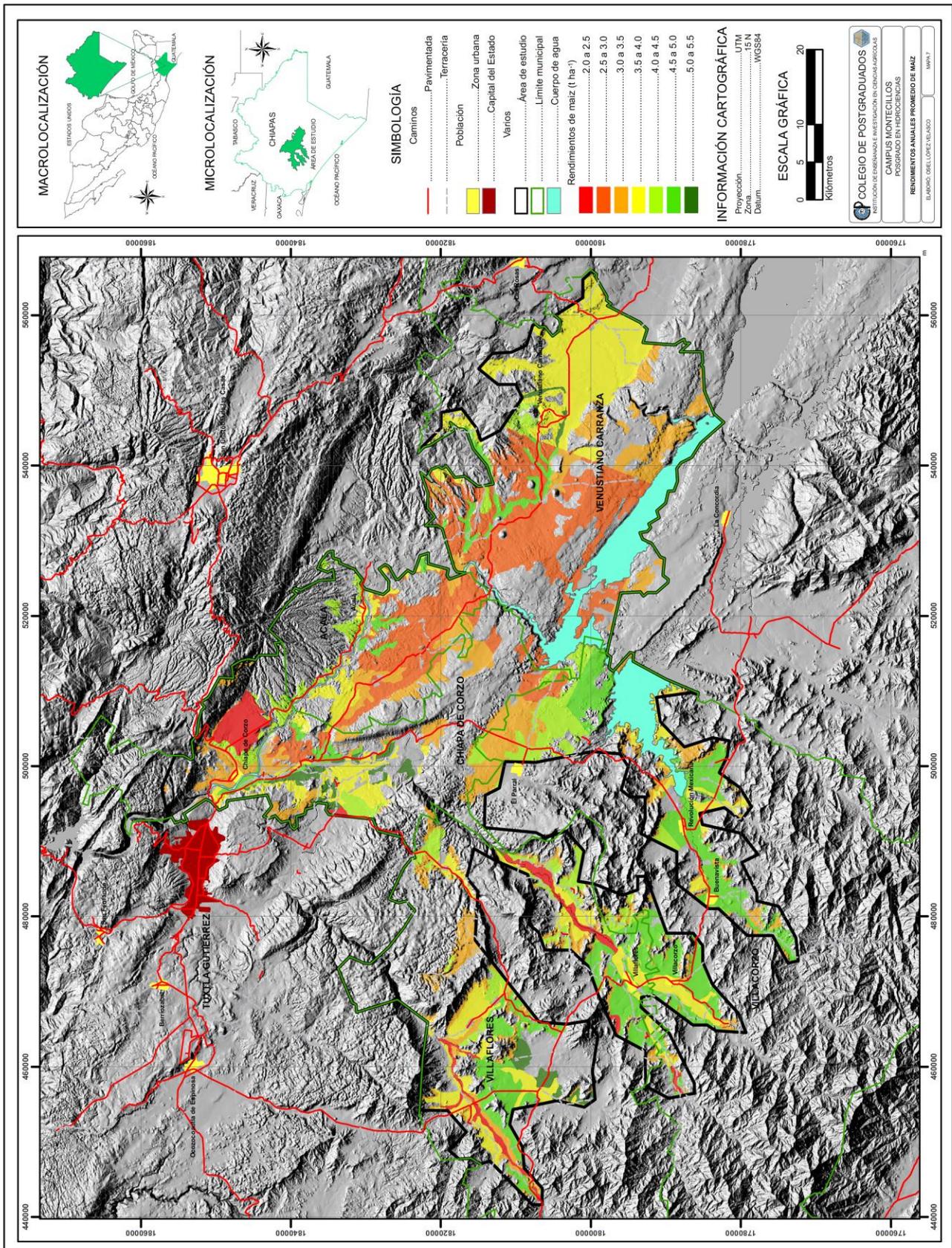


Figura 3. 7. Relación entre días de estrés por nutrimentos y rendimientos a nivel regional.

En el mapa de rendimientos a nivel municipal, los mayores rendimientos se encontraron en Villaflores y Villacorzo, mientras que los menores rendimientos en Acala y Venustiano Carranza, lo que concuerda con lo reportado por el SIAP (Mapa 7). Para Acala el rendimiento anual promedio simulado, para un periodo de 50 años, se situó entre 2.5 y 3.0 t ha⁻¹, mientras que el SIAP reporta un promedio anual de 2.6 t ha⁻¹. En Venustiano Carranza el rendimiento simulado fue entre 2.5 y 4.0 t ha⁻¹ y el reportado por el SIAP es de 3.6 t ha⁻¹. Para Villacorzo los valores simulados variaron entre 4.5 y 5.0 t ha⁻¹ mientras que el SIAP reporta una media de 4.8 t ha⁻¹. Por último, en Villaflores el rendimiento simulado en 50 años varió entre 3.5 y 5.0 t ha⁻¹ mientras que el SIAP reporta una media municipal de 3.6 t ha⁻¹. Como puede observarse los rangos de rendimiento, para un periodo de 50 años, concuerda con los valores promedio que reporta el SIAP para los años 2005 a 2011.



CONCLUSIONES

El modelo EPIC fue validado satisfactoriamente con los rendimientos municipales reportados por el SIAP, por lo que su aplicación en la toma de decisiones es ampliamente recomendable dentro de la región.

El modelo EPIC puede utilizarse como una herramienta útil para evaluar la certeza de los reportes estadísticos que reportan los CADER, a través de las delegaciones de la SAGARPA en los estados, al SIAP.

En la región se hacen necesarias prácticas de conservación de la humedad, por encima de las de fertilización, que reduzcan los riesgos por estrés hídrico, ya que por cada día que se reduzca el estrés hídrico se incrementa el rendimiento de grano en 50.0 kg ha⁻¹.

La labranza cero, la incorporación de residuos de cosecha, las barreras vivas con surcado al contorno, las terrazas de muro vivo, los cultivos de cobertura, subsoleos y el despedrado del terreno pueden ser acciones que ayuden a reducir los días de estrés hídrico en el maíz.

Una mejor resolución de la información edáfica y meteorológica puede mejorar la estimación de rendimientos de grano simulados por EPIC.

El uso del modelo de simulación EPIC es una herramienta que requiere de una base de datos amplia y confiable para poder simular los rendimientos de maíz.

LITERATURA CITADA

Álvarez, Solís J. D., Gómez V. D. A., León M. N. S. y Gutiérrez M. F. A. 2009. Manejo integrado de fertilizantes y abonos orgánicos en el cultivo de maíz. *Agrociencia* 44:575-586.

Benson, V., O. Rice, P. Dyke, J. Williams and C. Jones. 1989. Conservation impact on crop productivity for the life of a soil. *Soil and water conservation*. 44(6):600-604.

Davis B. 2000. *Introduction to agricultural statistics*. Delmar Cengage Learning. 4:55-58.

- Dirección General de Extensión Agrícola (DGEA). 1977. Recomendaciones técnicas para el cultivo de maíz de temporal en la zona denominada Depresión Central del Estado de Chiapas. Folleto 3920. México.
- Easterling, W. E., C. J. Hays, E. M. McKenney and J. R. Brandle. 1997. Modelling the effect of shelterbelts on maize productivity under climate change: an application of the EPIC Model. *Agric. Ecosystems Environ.* 61:163-176.
- Easterling, W. E., N. J. Rosenberg, K. M. Lemon and E. M. McKenney. 1992. Simulation of crop responses to climate change: effects with present technology and currently available adjustments (the 'smart farmer' scenario). *Agric. For. Meteorol.* 59:75-102.
- Flores, L. H. E., de la Mora O. C., Ireta M. J., Castañeda C. A. A. y Velasco N. R. 2011. Uso del modelo PEIC para estimar el impacto ambiental de la aplicación de fertilizantes en maíz de la barca, Jalisco, México. Campo experimental centro altos de Jalisco-INIFAP. VI Reunión Nacional de Innovación Agrícola, León, Guanajuato, 2011. Memoria.
- Hartkamp, A. D., K. de Beurs, A. Stein and J. W. White. 1999. Interpolation techniques for climate variables. NRG-GIS Series 99-01. Centro internacional de mejoramiento de maíz y trigo. México, D.F.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 1998. Modelo digital del terreno, escala 1:250,000.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2003. Información nacional sobre perfiles de suelo versión 1.2, escala 1:250,000.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2007. Carta de edafología, escala 1:250,000.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2010. Carta de uso del suelo y vegetación, escala 1:250,000.
- Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). 2007. Paquetes tecnológicos para maíz de temporal (Ciclo agrícola primavera-verano) para condiciones de alto, medio y bajo potencial productivo. México, D.F.
- Lal R. 1989. Conservation tillage for sustainable agriculture: Tropics versus temperate environments. *Adv. Agron.* 42:85-187.
- Lee, J. L., D. L. Phillips and R. F. Dodson. 1996. Sensitivity of the US corn belt to climate change and elevated CO₂. Part II: Soil erosion and organic carbon. *Agric. Systems.* 52:503-521.

- Licona, S. J., Martínez M. M. R., Mendoza O. L. E., Figueroa S. B. y Fernández R. D. S. 2006. Uso del modelo EPIC para estimar rendimientos de maíz con base en variables fisiotécnicas en el oriente del Estado de México. *TERRA Latinoamericana*, Vol. 24, Núm. 2, abril-junio, 2006, pp. 283-291. Universidad Autónoma Chapingo. México.
- López, B. W., López L. A. Coutiño E. B., Camas G. R., Villar S. B., López M. J., Serrano A. V., Cadena I. P., Zamarripa M. A. y Sandoval M. C. 2009. Zonas potenciales y recomendaciones técnicas para producir maíz en Chiapas, México. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Chiapas, México. 10 p.
- Mora G. M. 2011. Labranza de conservación evaluaciones en el Estado de Querétaro. Evaluaciones en el Estado de Querétaro. Artículo. INIFAP-Querétaro.
- Rojas R. 1999. Evaluación preliminar del modelo EPIC. Universidad de Los Andes. Facultad de ciencias forestales y ambientales, Centro de estudios forestales y ambientales de postgrado, Venezuela.
- Sharpley, A. N. and J. R. Williams. 1990. EPIC-Erosion/Productivity Impact Calculator: 1. Model documentation. Technical bulletin 1768. US Department of Agriculture. Washington, DC, USA.
- Tiscareño, L. M., C. Izaurrealde, N. J. Rosenberg, A. D. Báez G. y J. Salinas G. 2003. Modeling El Niño southern oscillation climate impact on mexican agriculture. *Geofísica Internacional*. 42:331-339.
- Villar, S. B., Figueroa S. B., Oropeza M. J. L., Landois P. L. y Volke H. V. 1998. Erosionabilidad de suelos y su impacto en la productividad del maíz en el trópico mexicano. *Agrociencia* 32:199-207.
- Villar, S. B., López M. J., Pérez N. J. y Camas G. R. 2003. Aplicación del modelo de simulación EPIC en la predicción del efecto de sistemas de labranza del suelo. *TERRA Latinoamericana*, Vol. 21, Núm. 3, julio-septiembre, 2003, pp. 381-388. Universidad Autónoma Chapingo. México.
- Williams, J. R., C. A. Jones and P. T. Dyke. 1984. A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. *Trans. ASAE* 27(1):129-144.
- Williams, J. R., P. T. Dyke, W. W. Fuchs, V. W. Benson, O. W. Rice and E. D. Taylor. 1990. EPIC-Erosion/Productivity Impact Calculator: 2. User manual. Technical bulletin 1768. US Department of Agriculture. Washington, DC, USA.

CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES TÉCNICAS PARA EL CULTIVO DE MAÍZ

Con base en los planeamientos analizados en los diferentes capítulos, es posible obtener las siguientes conclusiones y recomendaciones generales, acorde a las condiciones del terreno y necesidades del productor, con el objetivo de obtener un mayor rendimiento en la producción de maíz.

Los rendimientos guardan una relación directamente proporcional con la profundidad del suelo e inversamente a los días de estrés hídrico y pedregosidad. Analizando las relaciones se pueden recomendar acciones enfocadas al mejoramiento y conservación de los recursos naturales, que aumenten el contenido de humedad del suelo durante el ciclo de desarrollo del maíz y que disminuyan la pérdida de suelo para aumentar los rendimientos.

Se recomienda el sistema de labranza cero para lograr una productividad rentable y sostenible de maíz, ya que de acuerdo con Lal (1989) se reduce la erosión, mejora la estructura, aumenta la tasa de infiltración y contenido de materia orgánica del suelo, manteniendo rendimientos y retornos económicos altos. Una barrera viva con surcado al contorno reduce la pérdida de suelo y aumentan la productividad en maíz (Ramírez y Oropeza, 2001). Las terrazas de muro vivo también aumentan la productividad y mejoran la estabilidad del rendimiento del cultivo de maíz, además de controlar la erosión y los escurrimientos (Uribe *et al.*, 1998). Otra alternativa es modificar el sistema de producción del maíz (fechas de siembra y densidad de plantas) para disponer de humedad en etapas críticas de desarrollo (Rosenberg *et al.*, 1992). Dejar al menos el 30% de residuos de la cosecha anterior para conservar la humedad y reducir la pérdida de suelo, lo cual incrementa la capacidad productiva del suelo y reduce los costos de producción (Mora, 2011). Otra alternativa es incorporar cultivos de cobertura con base en leguminosas, para controlar la erosión hídrica y aumentar los rendimientos (Buckles *et al.*, 1992). Finalmente se recomienda un subsoleo o un simple despedrado del terreno para aumentar el contenido de humedad del suelo y reducir los días de estrés hídricos.

LITERATURA CITADA

- Buckles, D., I. Ponce, G. Sain y G. Medina. 1992. Tierra cobarde se vuelve valiente. Uso y difusión del frijol de abono (*Mucuna deeringianum*) en las laderas del litoral del Atlántico de Honduras. Centro internacional de mejoramiento de maíz y trigo. México, D.F.
- Lal R. 1989. Conservation tillage for sustainable agriculture: Tropics versus temperate environments. Adv. Agron. 42:85-187.
- Mora G. M. 2011. Labranza de conservación evaluaciones en el Estado de Querétaro. Evaluaciones en el Estado de Querétaro. Artículo. INIFAP-Querétaro.
- Ramírez, C. M. E. y J. L. Oropeza M. 2001. Eficiencia de dos prácticas productivo conservacionistas para controlar erosión en laderas en el trópico. Agrociencia 35:489-495.
- Rosenberg, N. J., E. M. McKenney, W. E. Easterling and K. M. Lemon. 1992. Validation of EPIC model simulations of crop responses to current climate and CO₂ conditions: comparisons with census, expert judgement and experimental plot data. Agric. For. Meteorol. 59:35-51.
- Uribe, G. S., A. Turrent F., N. Francisco N. y R. Camacho C. 1998. Productividad y estabilidad del rendimiento de maíz en terrazas de muro vivo en el trópico de México. Agrociencia 32:301-309.

CAPÍTULO 5. ANEXOS

Anexo 1. Generadores climáticos

Cuadro 5. 1. Parámetros estadísticos para la generación climática sintética de la estación meteorológica 07003.

Variable	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
OBMX	30.5	32.6	35.1	36.8	36.6	34.6	33.8	33.2	32.2	31.5	30.9	30.1
OBMN	13.8	14.8	16.6	19.0	20.6	20.7	20.2	20.3	20.4	19.3	17.1	15.0
SDTMX	3.1	3.3	3.6	3.3	3.2	3.3	3.5	3.1	2.8	2.5	2.8	3.0
SDTMN	2.5	3.1	2.7	2.4	1.7	1.4	1.3	1.3	1.3	2.1	2.3	2.5
RMO	0.2	2.6	5.6	13.3	97.2	241.8	147.7	171.7	184.7	89.4	21.5	4.2
RST2	2.6	13.5	12.0	78.2	24.5	20.5	19.0	15.7	14.7	13.0	19.4	5.8
RST3	0.00	2.09	2.18	2.28	4.36	2.09	2.68	2.19	1.90	2.17	4.93	2.24
PRW1	0.003	0.006	0.015	0.053	0.186	0.362	0.261	0.299	0.418	0.202	0.045	0.018
PRW2	0.000	0.333	0.286	0.195	0.310	0.589	0.447	0.555	0.594	0.445	0.300	0.294
DAYP	0.09	0.26	0.64	1.85	6.58	14.05	9.94	12.46	15.22	8.27	1.81	0.77
WI	4.0	19.6	18.0	15.1	31.0	34.9	29.7	27.2	23.5	20.7	22.4	10.1
OBSL	18	20	23	25	25	23	23	22	20	19	18	17
RH	0.54	0.50	0.47	0.50	0.56	0.64	0.65	0.67	0.71	0.70	0.64	0.60

Cuadro 5. 2. Parámetros estadísticos para la generación climática sintética de la estación meteorológica 07034.

Variable	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
OBMX	31.5	32.6	34.9	36.1	35.4	32.6	32.2	32.6	31.6	31.3	31.3	30.9
OBMN	15.4	16.3	18.0	20.2	20.9	20.4	19.9	19.8	19.8	18.8	17.1	15.8
SDTMX	3.1	3.5	3.1	2.7	2.9	3.1	2.5	2.7	2.8	2.8	2.8	2.8
SDTMN	2.4	2.5	2.8	2.1	2.2	1.9	1.7	1.8	1.9	2.2	2.6	2.9
RMO	2.8	2.2	3.7	14.8	62.8	176.6	137.4	166.2	204.8	78.4	16.5	6.0
RST2	7.6	11.5	10.0	9.1	12.6	15.4	15.3	17.0	16.9	13.4	11.9	10.1
RST3	1.16	2.43	2.63	82.28	2.08	2.29	2.56	2.34	2.59	2.86	2.06	1.85
PRW1	0.012	0.010	0.015	0.050	0.155	0.341	0.290	0.327	0.394	0.166	0.043	0.019
PRW2	0.000	0.000	0.063	0.151	0.351	0.568	0.479	0.508	0.619	0.525	0.291	0.217
DAYP	0.37	0.29	0.49	1.67	5.98	13.23	11.09	12.38	15.25	8.03	1.72	0.73
WI	14.7	15.1	15.6	18.6	21.8	26.3	24.2	26.4	25.9	18.8	18.5	15.6
OBSL	18	20	22	24	24	22	22	22	20	20	19	17
RH	0.56	0.55	0.53	0.57	0.62	0.70	0.69	0.68	0.71	0.69	0.63	0.60

Cuadro 5. 3. Parámetros estadísticos para la generación climática sintética de la estación meteorológica 07065.

Variable	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
OBMX	30.7	31.1	32.2	33.2	33.1	31.9	31.8	31.8	31.0	31.0	30.6	30.6
OBMN	16.3	15.8	17.0	18.1	19.1	19.0	18.5	18.7	18.7	18.5	17.6	16.8
SDTMX	2.9	3.4	3.2	3.4	2.5	2.3	2.1	2.0	2.2	2.8	2.9	3.1
SDTMN	2.6	3.0	2.7	2.1	1.9	1.9	2.2	2.1	2.2	2.3	2.4	2.7
RMO	1.6	3.2	0.4	13.2	107.6	222.5	258.3	207.4	205.0	85.8	22.7	11.5
RST2	18.3	7.9	2.4	10.7	12.8	14.4	15.4	17.2	19.2	13.8	17.5	11.4
RST3	0.00	0.81	0.00	1.09	1.10	1.22	1.69	1.86	1.83	1.52	1.93	1.66
PRW1	0.003	0.010	0.005	0.035	0.164	0.305	0.335	0.308	0.268	0.117	0.038	0.025
PRW2	0.000	0.143	0.000	0.192	0.366	0.591	0.550	0.466	0.500	0.492	0.179	0.238
DAYP	0.09	0.33	0.15	1.25	6.37	12.82	13.23	11.34	10.47	5.80	1.33	0.98
WI	33.5	18.7	5.2	21.6	34.3	34.5	38.7	36.3	38.2	28.9	33.1	22.6
OBSL	17	19	21	23	23	22	22	22	21	20	18	17
RH	0.62	0.59	0.59	0.60	0.64	0.67	0.66	0.67	0.69	0.69	0.67	0.64

Cuadro 5. 4. Parámetros estadísticos para la generación climática sintética de la estación meteorológica 07132.

Variable	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
OBMX	28.5	29.8	31.8	33.4	33.0	30.3	29.7	29.8	29.1	28.4	28.5	28.3
OBMN	12.7	13.4	15.0	17.7	19.1	19.1	18.7	18.8	18.9	17.9	15.2	13.4
SDTMX	3.0	3.2	3.3	3.0	2.7	2.3	1.9	1.7	1.9	2.1	2.4	2.8
SDTMN	2.6	2.7	2.6	2.4	2.4	2.1	1.7	1.4	1.4	1.9	2.7	2.8
RMO	2.1	0.2	2.3	26.9	114.4	281.7	219.1	236.5	261.5	72.8	9.7	1.9
RST2	17.7	0.7	6.2	15.0	15.3	18.8	15.0	16.3	16.9	11.9	13.6	4.8
RST3	2.58	0.00	1.80	3.21	1.85	1.48	1.85	2.13	1.66	1.67	2.62	2.88
PRW1	0.007	0.002	0.011	0.072	0.195	0.430	0.386	0.382	0.419	0.136	0.030	0.016
PRW2	0.143	0.000	0.091	0.143	0.381	0.576	0.547	0.566	0.622	0.457	0.133	0.063
DAYP	0.25	0.06	0.37	2.33	7.43	15.11	14.26	14.51	15.77	6.21	1.00	0.52
WI	16.0	6.8	12.7	24.4	32.2	37.0	30.1	32.0	32.1	22.4	18.5	7.0
OBSL	18	20	22	24	23	21	20	20	19	18	18	17
RH	0.57	0.55	0.53	0.57	0.64	0.73	0.73	0.73	0.75	0.75	0.66	0.60

Cuadro 5. 5. Parámetros estadísticos para la generación climática sintética de la estación meteorológica 07327.

Variable	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
OBMX	30.2	30.6	32.0	33.2	33.3	31.6	31.2	30.9	30.5	30.2	30.2	30.6
OBMN	15.8	16.0	16.8	18.2	18.4	18.2	18.1	18.2	18.0	17.9	17.3	16.5
SDTMX	3.0	2.8	2.7	2.6	2.3	2.3	1.9	1.8	2.2	2.4	2.7	2.5
SDTMN	3.2	2.8	2.5	2.2	2.4	2.7	2.4	2.3	2.5	2.2	2.4	2.5
RMO	1.7	12.1	4.6	15.0	137.0	339.5	338.8	318.4	289.3	179.8	33.1	11.2
RST2	6.9	12.1	12.3	9.4	13.2	15.9	14.8	15.3	11.4	28.2	9.9	7.8
RST3	2.76	3.30	1.35	1.36	0.95	1.40	1.59	1.36	0.76	10.54	0.84	1.25
PRW1	0.011	0.023	0.008	0.027	0.152	0.370	0.446	0.403	0.427	0.193	0.045	0.032
PRW2	0.222	0.435	0.167	0.407	0.519	0.680	0.653	0.645	0.624	0.583	0.447	0.412
DAYP	0.43	1.13	0.29	1.31	7.44	16.09	17.44	16.48	15.95	9.81	2.26	1.60
WI	7.6	20.8	31.3	23.5	37.8	42.0	38.4	37.9	35.3	35.5	28.4	13.7
OBSL	17	19	21	23	24	23	22	22	21	19	18	17
RH	0.62	0.61	0.59	0.60	0.60	0.66	0.67	0.68	0.69	0.69	0.67	0.63

Cuadro 5. 6. Parámetros estadísticos para la generación climática sintética de la estación meteorológica 07329.

Variable	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
OBMX	30.5	32.1	34.3	36.1	35.0	32.3	31.8	31.7	30.7	30.4	30.4	30.4
OBMN	13.2	13.8	15.8	17.9	19.3	19.9	19.3	19.1	19.2	18.0	15.5	13.7
SDTMX	2.5	2.5	2.6	2.0	2.4	2.1	1.7	1.6	1.6	1.9	2.3	2.3
SDTMN	2.6	2.3	2.5	2.3	1.8	1.3	1.3	1.4	1.5	2.1	2.4	2.5
RMO	0.8	5.1	9.5	43.0	128.3	240.7	141.7	191.1	233.9	96.7	24.5	6.8
RST2	1.7	10.1	7.7	9.6	16.5	16.0	11.4	17.2	13.7	12.6	8.6	6.2
RST3	1.05	2.92	2.00	2.02	3.90	2.00	2.42	3.35	2.03	3.18	1.85	2.55
PRW1	0.009	0.029	0.039	0.133	0.286	0.498	0.346	0.358	0.527	0.210	0.077	0.032
PRW2	0.167	0.063	0.214	0.281	0.488	0.640	0.586	0.645	0.700	0.588	0.400	0.379
DAYP	0.33	0.87	1.47	4.68	11.11	17.41	14.11	15.57	19.12	10.47	3.41	1.52
WI	4.6	11.6	13.3	19.5	24.0	27.4	19.7	24.0	23.5	17.6	13.7	8.5
OBSL	18	21	23	25	24	22	22	22	20	19	19	18
RH	0.52	0.48	0.47	0.48	0.57	0.69	0.69	0.68	0.72	0.69	0.60	0.54

Cuadro 5. 7. Parámetros estadísticos para la generación climática sintética de la estación meteorológica 07342.

Variable	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
OBMX	30.8	32.6	34.3	36.0	34.8	32.6	32.1	32.2	31.8	31.4	30.4	30.5
OBMN	11.7	12.3	14.0	16.5	18.2	18.5	17.9	17.9	18.1	17.3	14.6	12.9
SDTMX	2.6	2.4	2.4	2.5	2.4	2.4	1.7	1.3	1.7	2.0	2.7	2.4
SDTMN	2.5	2.3	2.7	2.2	1.8	1.3	1.3	1.3	1.2	1.8	2.5	2.4
RMO	1.7	1.1	2.8	27.2	126.4	312.7	245.7	265.2	310.4	136.2	24.5	4.2
RST2	4.5	2.2	14.2	12.7	18.0	20.3	16.8	15.5	15.6	18.0	10.4	7.2
RST3	0.37	0.37	2.18	1.64	3.76	1.87	2.24	1.58	1.84	3.06	1.24	2.69
PRW1	0.010	0.009	0.010	0.068	0.212	0.430	0.363	0.405	0.537	0.202	0.050	0.021
PRW2	0.000	0.000	0.000	0.167	0.417	0.633	0.594	0.614	0.654	0.552	0.389	0.231
DAYP	0.31	0.26	0.31	2.26	8.27	16.19	14.63	15.87	18.24	9.63	2.27	0.82
WI	10.6	8.4	18.6	25.3	31.5	38.2	32.9	32.8	33.2	27.3	20.5	9.7
OBSL	20	22	25	26	25	23	23	23	22	21	20	19
RH	0.45	0.41	0.41	0.44	0.54	0.63	0.63	0.63	0.65	0.63	0.57	0.50

Cuadro 5. 8. Parámetros estadísticos para la generación climática sintética de la estación meteorológica 07349.

Variable	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
OBMX	29.1	30.3	31.4	32.7	32.5	31.2	31.0	30.7	29.8	29.6	29.4	28.6
OBMN	12.3	13.0	14.5	16.3	17.6	18.0	17.7	17.6	17.8	16.5	14.6	12.6
SDTMX	4.4	4.3	3.7	4.0	4.0	3.4	2.8	2.8	2.9	3.2	3.5	3.5
SDTMN	3.0	2.7	2.5	2.3	1.9	1.6	1.5	1.6	1.6	2.2	3.0	3.1
RMO	0.4	0.0	17.5	22.5	134.2	291.5	275.6	279.5	283.8	82.5	17.1	3.9
RST2	0.8	0.0	30.5	10.9	16.5	15.9	14.6	13.7	15.5	12.3	12.6	3.3
RST3	0.00	0.00	1.51	1.48	2.06	2.04	2.52	2.40	1.81	3.63	3.58	-0.06
PRW1	0.008	0.000	0.019	0.050	0.196	0.410	0.490	0.519	0.444	0.156	0.060	0.019
PRW2	0.000	0.000	0.000	0.190	0.480	0.727	0.680	0.724	0.711	0.588	0.259	0.125
DAYP	0.25	0.00	0.58	1.74	8.49	18.01	18.75	20.24	18.17	8.51	2.25	0.66
WI	3.1	0.0	60.8	26.6	32.4	32.4	29.3	27.4	30.4	18.8	14.7	11.2
OBSL	18	20	22	24	24	22	22	22	21	20	19	18
RH	0.53	0.52	0.53	0.55	0.60	0.66	0.66	0.67	0.70	0.67	0.61	0.56

Cuadro 5. 9. Parámetros estadísticos para la generación climática sintética de la estación meteorológica 07358.

Variable	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Sep.	Oct.	Nov.	Dic.
OBMX	33.3	34.6	36.5	38.5	37.9	36.1	35.7	35.1	34.9	34.7	34.6	33.8
OBMN	14.7	15.2	17.1	19.2	19.7	19.9	19.6	19.8	19.9	19.1	17.0	15.1
SDTMX	2.9	3.0	2.7	2.5	2.6	2.7	2.2	2.1	2.2	2.4	2.3	2.0
SDTMN	2.6	2.7	2.6	2.1	1.8	1.6	1.4	1.2	1.2	1.6	2.6	2.6
RMO	0.0	4.4	2.8	27.9	129.0	292.7	234.1	307.2	268.0	108.9	21.0	0.3
RST2	0.0	9.1	7.1	17.0	14.5	18.9	20.0	20.9	20.2	19.8	18.6	0.0
RST3	0.00	-1.03	1.25	0.13	1.62	1.38	1.87	1.65	1.68	2.16	3.33	0.00
PRW1	0.000	0.009	0.008	0.041	0.208	0.330	0.289	0.343	0.277	0.124	0.035	0.003
PRW2	0.000	0.250	0.400	0.125	0.337	0.527	0.481	0.541	0.544	0.424	0.429	0.000
DAYP	0.00	0.34	0.41	1.34	7.40	12.33	11.09	13.26	11.34	5.49	1.73	0.09
WI	0.0	24.9	13.8	43.3	35.9	47.4	41.9	45.4	46.2	38.6	23.6	6.2
OBSL	19	21	24	26	26	25	25	24	23	22	21	19
RH	0.47	0.44	0.44	0.44	0.48	0.56	0.56	0.59	0.60	0.58	0.50	0.46

Anexo 2. Base de datos para suelos

Cuadro 5. 10. Valores de variables de suelo para la base de datos del modelo EPIC en la calibración.

Suelo	Fase física	Capa	Z	BD	U	FC	SAN	SIL	PH	SMB	CBN	CEC	ROK	AP	BDD
Acrisol plúntico	Sin fase	1	20.00	1.41	0.20	0.41	56.00	19.43	5.20	6.07	2.05	11.89	10.00	2.69	1.41
Acrisol plúntico	Sin fase	2	40.00	1.30	0.26	0.37	42.67	14.00	5.05	4.98	0.78	12.98	10.00	1.62	1.30
Acrisol plúntico	Sin fase	3	60.00	1.27	0.28	0.38	37.33	14.00	4.95	3.87	0.39	13.65	10.00	0.30	1.27
Acrisol plúntico	Sin fase	4	80.00	1.28	0.26	0.36	39.00	15.00	4.88	3.43	0.24	13.38	10.00	0.00	1.28
Acrisol plúntico	Sin fase	5	120.00	1.25	0.28	0.39	30.80	18.80	4.98	3.44	0.16	17.56	10.00	0.00	1.25
Cambisol crómico	Lítica profunda	1	20.00	1.57	0.12	0.31	70.67	19.33	5.67	5.30	1.59	11.43	15.00	28.30	1.57
Cambisol crómico	Lítica profunda	2	40.00	1.54	0.10	0.27	68.00	20.67	5.70	4.80	0.66	9.77	15.00	26.63	1.54
Cambisol crómico	Lítica profunda	3	60.00	1.47	0.11	0.24	46.67	9.33	5.73	5.73	0.47	9.87	15.00	23.80	1.47
Cambisol crómico	Lítica profunda	4	100.00	1.70	0.05	0.17	88.00	8.00	5.30	3.60	0.17	6.30	15.00	0.00	1.70
Cambisol crómico	Sin fase	1	20.00	1.41	0.21	0.43	54.25	22.50	6.31	14.70	2.35	17.98	10.00	7.71	1.41
Cambisol crómico	Sin fase	2	60.00	1.37	0.20	0.37	51.82	17.27	6.05	11.67	0.86	13.42	10.00	5.14	1.37
Cambisol crómico	Sin fase	3	80.00	1.40	0.17	0.34	55.00	20.00	6.05	7.93	0.61	10.33	10.00	0.00	1.40
Cambisol crómico	Sin fase	4	120.00	1.35	0.21	0.36	50.00	15.50	6.13	10.78	0.29	13.55	10.00	0.00	1.35
Cambisol eútrico	Lítica profunda	1	10.00	1.38	0.24	0.41	48.00	26.00	5.30	12.20	3.08	23.00	20.00	4.50	1.38
Cambisol eútrico	Lítica profunda	2	40.00	1.30	0.26	0.37	40.00	18.00	5.70	11.60	0.87	21.30	20.00	1.70	1.30
Cambisol eútrico	Lítica profunda	3	90.00	1.29	0.26	0.38	36.00	22.00	5.40	13.30	0.87	23.80	20.00	0.00	1.29
Cambisol eútrico	Sin fase	1	20.00	1.53	0.13	0.39	50.57	39.43	6.04	9.97	1.92	11.90	10.00	13.16	1.53
Cambisol eútrico	Sin fase	2	40.00	1.46	0.12	0.27	44.00	41.43	6.26	10.96	0.96	13.19	10.00	6.86	1.46
Cambisol eútrico	Sin fase	3	60.00	1.43	0.12	0.26	40.00	43.33	6.68	11.37	0.42	14.07	10.00	3.68	1.43
Cambisol eútrico	Sin fase	4	80.00	1.48	0.11	0.23	49.60	36.40	6.86	11.30	0.37	10.98	10.00	0.00	1.48
Cambisol eútrico	Sin fase	5	100.00	1.50	0.10	0.29	54.40	32.80	6.88	12.70	0.22	12.40	10.00	0.00	1.50
Cambisol eútrico	Sin fase	6	120.00	1.50	0.08	0.22	38.00	26.50	5.28	11.15	0.07	9.08	10.00	0.00	1.50
Feozem calcárico	Lítica	1	50.00	1.40	0.21	0.43	51.54	23.23	7.82	24.65	2.13	22.54	20.00	5.79	1.40
Feozem háplico	Lítica profunda	1	15.00	1.48	0.17	0.40	60.00	24.00	5.60	14.60	2.33	19.50	20.00	8.90	1.48
Feozem háplico	Lítica profunda	2	35.00	1.45	0.15	0.35	56.00	26.00	5.90	19.50	1.16	21.00	20.00	5.70	1.45
Feozem háplico	Lítica profunda	3	60.00	1.45	0.16	0.38	52.00	30.00	6.10	17.70	1.57	22.00	20.00	4.00	1.45
Feozem háplico	Sin fase	1	20.00	1.45	0.24	0.48	45.00	39.00	6.68	17.25	5.03	18.15	10.00	10.88	1.45
Feozem háplico	Sin fase	2	60.00	1.42	0.16	0.34	56.67	20.00	5.77	8.60	0.76	13.60	10.00	8.93	1.42
Feozem háplico	Sin fase	3	110.00	1.44	0.12	0.31	51.00	31.00	6.50	4.95	0.20	7.40	10.00	0.35	1.44
Feozem háplico	Pedregosa	1	20.00	1.54	0.15	0.42	56.00	34.00	6.40	7.20	2.79	14.50	30.00	91.80	1.54

Suelo	Fase física	Capa	Z	BD	U	FC	SAN	SIL	PH	SMB	CBN	CEC	ROK	AP	BDD
Feozem háplico	Pedregosa	2	65.00	1.63	0.11	0.34	66.00	28.00	6.50	7.50	1.98	13.00	30.00	55.10	1.63
Fluvisol eútrico	Gravosa	1	50.00	1.62	0.07	0.21	76.15	16.15	7.78	12.50	0.22	7.07	30.00	9.17	1.62
Fluvisol eútrico	Pedregosa	1	50.00	1.56	0.09	0.24	69.76	17.56	7.17	13.25	0.30	12.24	20.00	10.79	1.56
Fluvisol eútrico	Sin fase	1	20.00	1.53	0.10	0.28	64.00	24.00	6.44	13.21	0.52	12.24	15.00	14.40	1.53
Fluvisol eútrico	Sin fase	2	60.00	1.53	0.10	0.24	70.00	17.00	6.86	15.03	0.23	13.68	15.00	2.36	1.53
Fluvisol eútrico	Sin fase	3	90.00	1.53	0.10	0.25	68.86	18.29	7.31	12.33	0.23	13.14	15.00	0.00	1.53
Fluvisol eútrico	Sin fase	4	140.00	1.52	0.09	0.27	59.50	16.25	6.46	12.21	0.19	11.01	15.00	0.00	1.52
Luvisol crómico	Lítica	1	15.00	1.34	0.34	0.54	48.00	16.67	6.60	29.17	4.96	39.00	15.00	3.80	1.34
Luvisol crómico	Lítica	2	30.00	1.23	0.34	0.49	20.67	26.00	7.10	27.57	1.63	38.00	15.00	1.73	1.23
Luvisol crómico	Lítica	3	45.00	1.29	0.23	0.35	30.00	30.00	6.60	11.30	0.12	21.70	15.00	1.70	1.29
Luvisol crómico	Lítica profunda	1	20.00	1.27	0.34	0.51	33.00	20.50	6.68	21.50	2.95	27.33	20.00	2.58	1.27
Luvisol crómico	Lítica profunda	2	50.00	1.24	0.34	0.47	29.75	14.00	6.58	18.30	1.35	29.03	20.00	2.28	1.24
Luvisol crómico	Lítica profunda	3	80.00	1.22	0.35	0.45	26.50	12.50	6.58	17.93	0.60	30.13	20.00	2.53	1.22
Luvisol crómico	Sin fase	1	20.00	1.37	0.25	0.42	46.50	26.00	6.18	13.85	3.04	19.78	10.00	3.43	1.37
Luvisol crómico	Sin fase	2	40.00	1.26	0.30	0.43	31.50	20.00	6.13	15.28	1.28	22.70	10.00	1.78	1.26
Luvisol crómico	Sin fase	3	80.00	1.25	0.30	0.42	28.00	20.50	6.00	14.73	0.64	22.95	10.00	0.00	1.25
Luvisol crómico	Sin fase	4	120.00	1.25	0.29	0.40	28.50	20.50	5.75	11.58	0.39	23.10	10.00	0.00	1.25
Luvisol órtico	Sin fase	1	20.00	1.29	0.29	0.47	30.50	29.50	5.80	16.35	2.51	30.65	10.00	2.68	1.29
Luvisol órtico	Sin fase	2	40.00	1.28	0.25	0.38	28.00	30.00	6.33	16.43	0.52	27.67	10.00	8.07	1.28
Luvisol órtico	Sin fase	3	80.00	1.24	0.28	0.40	24.00	27.00	6.70	16.05	0.29	21.00	10.00	0.00	1.24
Luvisol órtico	Sin fase	4	100.00	1.23	0.31	0.41	27.33	17.33	6.53	17.17	0.10	31.43	10.00	0.00	1.23
Rendzina	Lítica	1	50.00	1.32	0.32	0.51	39.60	24.00	7.22	32.49	3.99	39.67	15.00	3.92	1.32
Vertisol crómico	Sin fase	1	30.00	1.33	0.21	0.36	34.00	34.00	7.70	27.00	1.05	20.00	10.00	1.30	1.33
Vertisol crómico	Sin fase	2	60.00	1.34	0.20	0.35	36.00	34.00	7.90	27.10	1.05	18.30	10.00	0.90	1.34
Vertisol crómico	Sin fase	3	90.00	1.32	0.21	0.35	32.00	36.00	7.90	28.30	0.76	19.50	10.00	0.00	1.32
Vertisol pélico	Sin fase	1	40.00	1.30	0.27	0.40	41.67	17.00	7.07	27.33	1.52	36.68	10.00	2.82	1.30
Vertisol pélico	Sin fase	2	80.00	1.33	0.22	0.32	44.50	19.50	6.60	29.70	0.44	30.83	10.00	0.80	1.33
Vertisol pélico	Sin fase	3	120.00	1.30	0.23	0.34	37.60	22.80	7.40	30.20	0.34	31.46	10.00	0.00	1.30
Vertisol pélico	Pedregosa	1	35.00	1.26	0.30	0.43	32.12	19.53	6.49	31.28	1.15	36.62	30.00	2.95	1.26

Cuadro 5. 11. Valores de variables de suelo para la base de datos del modelo EPIC en la validación.

Suelo	Fase física	Capa	Z	BD	U	FC	SAN	SIL	PH	SMB	CBN	CEC	ROK	AP	BDD
Acrisol plúntico	Sin fase	1	20.00	1.41	0.20	0.41	56.00	19.43	5.20	6.07	2.05	11.89	10.00	2.69	1.41
Acrisol plúntico	Sin fase	2	40.00	1.30	0.26	0.37	42.67	14.00	5.05	4.98	0.78	12.98	10.00	1.62	1.30
Acrisol plúntico	Sin fase	3	60.00	1.27	0.28	0.38	37.33	14.00	4.95	3.87	0.39	13.65	10.00	0.30	1.27
Acrisol plúntico	Sin fase	4	80.00	1.28	0.26	0.36	39.00	15.00	4.88	3.43	0.24	13.38	10.00	0.00	1.28
Acrisol plúntico	Sin fase	5	100.00	1.25	0.28	0.39	30.80	18.80	4.98	3.44	0.16	17.56	10.00	0.00	1.25
Cambisol crómico	Lítica profunda	1	20.00	1.57	0.12	0.31	70.67	19.33	5.67	5.30	1.59	11.43	15.00	28.30	1.57
Cambisol crómico	Lítica profunda	2	40.00	1.54	0.10	0.27	68.00	20.67	5.70	4.80	0.66	9.77	15.00	26.63	1.54
Cambisol crómico	Lítica profunda	3	60.00	1.47	0.11	0.24	46.67	9.33	5.73	5.73	0.47	9.87	15.00	23.80	1.47
Cambisol crómico	Lítica profunda	4	80.00	1.70	0.05	0.17	88.00	8.00	5.30	3.60	0.17	6.30	15.00	0.00	1.70
Cambisol crómico	Sin fase	1	20.00	1.41	0.21	0.43	54.25	22.50	6.31	14.70	2.35	17.98	10.00	7.71	1.41
Cambisol crómico	Sin fase	2	60.00	1.37	0.20	0.37	51.82	17.27	6.05	11.67	0.86	13.42	10.00	5.14	1.37
Cambisol crómico	Sin fase	3	80.00	1.40	0.17	0.34	55.00	20.00	6.05	7.93	0.61	10.33	10.00	0.00	1.40
Cambisol crómico	Sin fase	4	100.00	1.35	0.21	0.36	50.00	15.50	6.13	10.78	0.29	13.55	10.00	0.00	1.35
Cambisol eútrico	Lítica profunda	1	10.00	1.38	0.24	0.41	48.00	26.00	5.30	12.20	3.08	23.00	20.00	4.50	1.38
Cambisol eútrico	Lítica profunda	2	40.00	1.30	0.26	0.37	40.00	18.00	5.70	11.60	0.87	21.30	20.00	1.70	1.30
Cambisol eútrico	Lítica profunda	3	70.00	1.29	0.26	0.38	36.00	22.00	5.40	13.30	0.87	23.80	20.00	0.00	1.29
Cambisol eútrico	Sin fase	1	20.00	1.53	0.13	0.39	50.57	39.43	6.04	9.97	1.92	11.90	10.00	13.16	1.53
Cambisol eútrico	Sin fase	2	40.00	1.46	0.12	0.27	44.00	41.43	6.26	10.96	0.96	13.19	10.00	6.86	1.46
Cambisol eútrico	Sin fase	3	60.00	1.43	0.12	0.26	40.00	43.33	6.68	11.37	0.42	14.07	10.00	3.68	1.43
Cambisol eútrico	Sin fase	4	80.00	1.48	0.11	0.23	49.60	36.40	6.86	11.30	0.37	10.98	10.00	0.00	1.48
Cambisol eútrico	Sin fase	5	90.00	1.50	0.10	0.29	54.40	32.80	6.88	12.70	0.22	12.40	10.00	0.00	1.50
Cambisol eútrico	Sin fase	6	100.00	1.50	0.08	0.22	38.00	26.50	5.28	11.15	0.07	9.08	10.00	0.00	1.50
Feozem calcárico	Lítica	1	30.00	1.40	0.21	0.43	51.54	23.23	7.82	24.65	2.13	22.54	20.00	5.79	1.40
Feozem háplico	Lítica profunda	1	15.00	1.48	0.17	0.40	60.00	24.00	5.60	14.60	2.33	19.50	20.00	8.90	1.48
Feozem háplico	Lítica profunda	2	35.00	1.45	0.15	0.35	56.00	26.00	5.90	19.50	1.16	21.00	20.00	5.70	1.45
Feozem háplico	Lítica profunda	3	60.00	1.45	0.16	0.38	52.00	30.00	6.10	17.70	1.57	22.00	20.00	4.00	1.45
Feozem háplico	Sin fase	1	20.00	1.45	0.24	0.48	45.00	39.00	6.68	17.25	5.03	18.15	10.00	10.88	1.45
Feozem háplico	Sin fase	2	60.00	1.42	0.16	0.34	56.67	20.00	5.77	8.60	0.76	13.60	10.00	8.93	1.42
Feozem háplico	Sin fase	3	100.00	1.44	0.12	0.31	51.00	31.00	6.50	4.95	0.20	7.40	10.00	0.35	1.44
Feozem háplico	Pedregosa	1	20.00	1.54	0.15	0.42	56.00	34.00	6.40	7.20	2.79	14.50	30.00	91.80	1.54
Feozem háplico	Pedregosa	2	35.00	1.63	0.11	0.34	66.00	28.00	6.50	7.50	1.98	13.00	30.00	55.10	1.63
Fluvisol eútrico	Gravosa	1	30.00	1.62	0.07	0.21	76.15	16.15	7.78	12.50	0.22	7.07	30.00	9.17	1.62

Suelo	Fase física	Capa	Z	BD	U	FC	SAN	SIL	PH	SMB	CBN	CEC	ROK	AP	BDD
Fluvisol eútrico	Pedregosa	1	30.00	1.56	0.09	0.24	69.76	17.56	7.17	13.25	0.30	12.24	20.00	10.79	1.56
Fluvisol eútrico	Sin fase	1	20.00	1.53	0.10	0.28	64.00	24.00	6.44	13.21	0.52	12.24	15.00	14.40	1.53
Fluvisol eútrico	Sin fase	2	60.00	1.53	0.10	0.24	70.00	17.00	6.86	15.03	0.23	13.68	15.00	2.36	1.53
Fluvisol eútrico	Sin fase	3	90.00	1.53	0.10	0.25	68.86	18.29	7.31	12.33	0.23	13.14	15.00	0.00	1.53
Fluvisol eútrico	Sin fase	4	120.00	1.52	0.09	0.27	59.50	16.25	6.46	12.21	0.19	11.01	15.00	0.00	1.52
Luvisol crómico	Lítica	1	15.00	1.34	0.34	0.54	48.00	16.67	6.60	29.17	4.96	39.00	15.00	3.80	1.34
Luvisol crómico	Lítica	2	30.00	1.23	0.34	0.49	20.67	26.00	7.10	27.57	1.63	38.00	15.00	1.73	1.23
Luvisol crómico	Lítica	3	35.00	1.29	0.23	0.35	30.00	30.00	6.60	11.30	0.12	21.70	15.00	1.70	1.29
Luvisol crómico	Lítica profunda	1	20.00	1.27	0.34	0.51	33.00	20.50	6.68	21.50	2.95	27.33	20.00	2.58	1.27
Luvisol crómico	Lítica profunda	2	50.00	1.24	0.34	0.47	29.75	14.00	6.58	18.30	1.35	29.03	20.00	2.28	1.24
Luvisol crómico	Lítica profunda	3	70.00	1.22	0.35	0.45	26.50	12.50	6.58	17.93	0.60	30.13	20.00	2.53	1.22
Luvisol crómico	Sin fase	1	20.00	1.37	0.25	0.42	46.50	26.00	6.18	13.85	3.04	19.78	10.00	3.43	1.37
Luvisol crómico	Sin fase	2	40.00	1.26	0.30	0.43	31.50	20.00	6.13	15.28	1.28	22.70	10.00	1.78	1.26
Luvisol crómico	Sin fase	3	80.00	1.25	0.30	0.42	28.00	20.50	6.00	14.73	0.64	22.95	10.00	0.00	1.25
Luvisol crómico	Sin fase	4	100.00	1.25	0.29	0.40	28.50	20.50	5.75	11.58	0.39	23.10	10.00	0.00	1.25
Luvisol órtico	Sin fase	1	20.00	1.29	0.29	0.47	30.50	29.50	5.80	16.35	2.51	30.65	10.00	2.68	1.29
Luvisol órtico	Sin fase	2	40.00	1.28	0.25	0.38	28.00	30.00	6.33	16.43	0.52	27.67	10.00	8.07	1.28
Luvisol órtico	Sin fase	3	80.00	1.24	0.28	0.40	24.00	27.00	6.70	16.05	0.29	21.00	10.00	0.00	1.24
Luvisol órtico	Sin fase	4	90.00	1.23	0.31	0.41	27.33	17.33	6.53	17.17	0.10	31.43	10.00	0.00	1.23
Rendzina	Lítica	1	30.00	1.32	0.32	0.51	39.60	24.00	7.22	32.49	3.99	39.67	15.00	3.92	1.32
Vertisol crómico	Sin fase	1	30.00	1.33	0.21	0.36	34.00	34.00	7.70	27.00	1.05	20.00	10.00	1.30	1.33
Vertisol crómico	Sin fase	2	60.00	1.34	0.20	0.35	36.00	34.00	7.90	27.10	1.05	18.30	10.00	0.90	1.34
Vertisol crómico	Sin fase	3	80.00	1.32	0.21	0.35	32.00	36.00	7.90	28.30	0.76	19.50	10.00	0.00	1.32
Vertisol pélico	Sin fase	1	40.00	1.30	0.27	0.40	41.67	17.00	7.07	27.33	1.52	36.68	10.00	2.82	1.30
Vertisol pélico	Sin fase	2	80.00	1.33	0.22	0.32	44.50	19.50	6.60	29.70	0.44	30.83	10.00	0.80	1.33
Vertisol pélico	Sin fase	3	100.00	1.30	0.23	0.34	37.60	22.80	7.40	30.20	0.34	31.46	10.00	0.00	1.30
Vertisol pélico	Pedregosa	1	30.00	1.26	0.30	0.43	32.12	19.53	6.49	31.28	1.15	36.62	30.00	2.95	1.26