

VALIDACION DEL MODELO EPIC, PARA SIMULAR
EL INDICE DE AREA FOLIAR, ACUMULACION DE
MATERIA SECA Y NITROGENO Y RENDIMIENTO
DE GRANO EN EL CULTIVO DE MAIZ (*Zea mays* L.)
BAJO DIFERENTES CONDICIONES DE HUMEDAD
EN EL SUELO

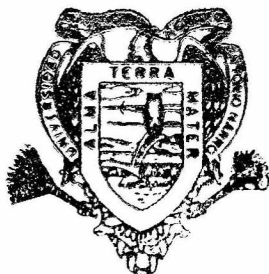
ORLANDO SEGUNDO TELLEZ OBREGON

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN CIENCIAS
EN RIEGO Y DRENAJE



BIBLIOTECA
EGIDIO G. REBONATO
BANCO DE TESIS
U.A.A.A.N.



**Universidad Autónoma Agraria
Antonio Narro**

PROGRAMA DE GRADUADOS

Buenavista, Saltillo, Coah.

JUNIO DE 1999

UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA
ANTONIO NARRO

SUBDIRECCION DE POSTGRADO

VALIDACION DEL MODELO EPIC, PARA SIMULAR EL INDICE DE
AREA FOLIAR, ACUMULACION DE MATERIA SECA Y NITROGENO Y
RENDIMIENTO DE GRANO EN EL CULTIVO DE MAIZ (Zea mays L.) BAJO
DIFERENTES CONDICIONES DE HUMEDAD EN EL SUELO

TESIS

POR

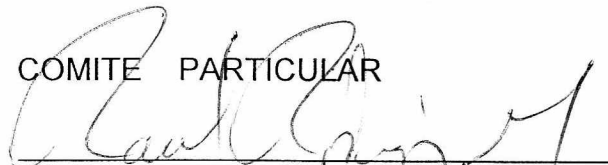
ORLANDO SEGUNDO TELLEZ OBREGON

Elaborada bajo la supervisión del Comité Particular de Asesoría y
aprobada como requisito parcial, para optar al grado de:


MAESTRO EN CIENCIAS
EN RIEGO Y DRENAJE

COMITE PARTICULAR

Asesor principal:


Dr. Raúl Rodríguez García.

Asesor:


Dra. Diana Jasso Cantú

Asesor:


Dr. Edmundo Peña Cervantes


Dr. Ramiro López Trujillo
Subdirector de Postgrado

Buenavista, Saltillo, Coahuila, Junio 1998

AGRADECIMIENTOS

Al Instituto Nicaragüense de Tecnología Agropecuaria (INTA), el cual contribuyó a la realización de mis estudios de maestría.

A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, por su nobleza como institución forjadora de recursos humanos y por todo lo bueno que me brindó durante mi estancia.

Al Dr. Raúl Rodríguez García por la orientación, dirección y revisión de la presente investigación.

A la Dra. Diana Jasso Cantú por su asesoría y aportaciones al escrito.

Al Dr. Edmundo Peña por su asesoría y observaciones para el complemento de este trabajo.

Al M.C José Luis Quemé de León por su apoyo incondicional en mi superación profesional.

DEDICATORIA

Con profundo agradecimiento, respeto y admiración a mis padres:

Daniel Téllez Lorío

Isabel Obregón Galeano

Cual me siento orgulloso de ser su fotocopia como persona, por nacer
bajo su humildad y sinceridad

y

A mis hijos que son mi motivación y alegría

COMPENDIO

Validación del Modelo EPIC, para simular el índice de Area Foliar, Acumulación de Materia Seca, y Nitrógeno y Rendimiento de grano en el cultivo de Maíz (Zea mays L.) Bajo Diferentes Condiciones de Humedad en el Suelo

POR

Orlando Segundo Téllez Obregón

MAESTRIA

RIEGO Y DRENAJE

UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
BUENAVISTA, SALTILLO, COAHUILA, MEXICO. JUNIO, 1999

Dr. Raúl Rodríguez García - Asesor -

Palabras Clave: Simulación, maíz, riego, niveles de humedad, materia seca, rendimiento de grano, nitrógeno en la planta.

Este estudio se realizó con el objetivo de evaluar la capacidad del modelo de simulación EPIC propuesto por Williams *et al.*, (1984), para predecir

índice de área foliar, la acumulación de materia seca y nitrógeno, el rendimiento de grano en el cultivo de maíz bajo tres condiciones de humedad de suelo o tratamientos.

La siembra se efectuó el 22 de mayo de 1998, el material genético fue el híbrido AN-447, cada tratamiento estuvo representado en una parcela de 120 m², la dosis de fertilizante empleada fue 180-104-170 (N-P-R-), la densidad de población fue de 70,200 p/ha.

Los resultados de simulación indicaron que el modelo simuló adecuadamente el índice de área foliar y la acumulación de materia seca, las desviaciones entre valores observados y simulados en su mayoría se encontraron dentro de un rango ± 15 por ciento. En el caso de la acumulación de nitrógeno, el 50 por ciento de las observaciones tuvieron desviaciones fuera del rango ± 20 por ciento. El modelo subestimó el rendimiento de grano en un rango del 35 al 50 por ciento.

ABSTRACT

Epic Model Validation to Simulate Leaf Area Index, Dry matter and nitrogen accumulation and grain yield of maize (Zea mays L.) under different soil water conditions.

By

Orlando Segundo Téllez Obregón

MASTER OF SCIENCE

IRRIGATION AND DRAINAGE

UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA ANTONIO NARRO

BUENAVISTA, SALTILLO, COAHUILA, MEXICO. JUNE, 1999

Ph. D. Raúl Rodríguez García - Adviser -

Key Words: Simulation, maize, irrigation, moisture levels, dry matter, grain yield and plant nitrogen.

This study was carry out with the objective to evaluate the prediction capacity of the Epic Model Simulation Proposed by Williams et al (1984) in order

to predict the leaf area index, dry matter and nitrogen accumulation and grain yield of maize crop under three soil water conditions.

The seed time was at may 22, 1998, the genetic material was the hybrid AN-447 each treatment was represented in one plot of 120 m². This dosis was applied at a rate of 180-104-70 (N-P-K), the planting density was 70,200 plants ha⁻¹.

The simulation results indicated that the model simulated correctly the leaf area index, and the dry matter accumulation demations among the observed and simulated values were founded in a range of ± 15 percent. In regard of the nitrogen accumulation and grain yield the demations were out of the rang ± 15 percent for nitrogen and for grain yield the model subestimated the yield in a range between 35 to 50 percent.

INDICE DE CONTENIDO

	Pág.
INDICE DE CUADROS	xi
INDICE DE FIGURAS.....	xii
INTRODUCCION	1
REVISION DE LITERATURA.....	4
Conceptos Generales de los Modelos de Simulación.....	4
Concepto del modelo Epic.....	19
El modelo EPIC está formado de diez submodelos.....	19
Materia Seca.....	24
Balance de agua.....	29
Indice de Area Foliar.....	30
Descripción Matemática del Modelo	32
Modelo de crecimiento del cultivo.....	32
Crecimiento potencial.....	33
Uso de agua.....	39
Absorción de Nutrientes.....	42
Obstáculos para el crecimiento.....	46
Biomasa.....	47
Estrés hídrico.....	47
Estrés de nutrientes.....	48
Crecimiento de raíces.....	49
Uso de agua.....	52
Rendimiento del cultivo.....	53
MATERIALES Y METODOS.....	55
Experimento de Campo.....	55
Localización.....	55
Clima.....	55

	Pág.
Suelo.....	56
Tratamientos Evaluados.....	57
Establecimiento del Experimento.....	59
Manejo del Cultivo.....	59
Medición de la Humedad.....	60
Control de riesgos.....	62
Información Climática.....	63
Ajuste de Datos Observados.....	64
Variables para validar el modelo	64
Entradas de datos al modelo.....	65
RESULTADOS Y DISCUSION.....	71
Dinámica de la Humedad del Suelo.....	71
Índice de área foliar.....	74
Acumulación de Materia Seca	77
Acumulación de Nitrógeno.....	79
Rendimiento de grano.....	80
Simulación.....	82
Índice de Area Foliar Simulado.....	82
Simulación de Nitrógeno.....	85
Materia seca simulada.....	87
Rendimiento de grano observado y simulado.....	89
CONCLUSIONES.....	91
RESUMEN.....	94
LITERATURA CITADA.....	97
APENDICE	104

INDICE DE CUADROS

Cuadro N°		Pág.
3.1.	Calendario de riegos de auxilio aplicado a los tratamientos de humedad del suelo evaluados.	58
3.2.	Entrada de datos de suelo al modelo.	67
3.3.	Entrada de datos del Cultivo para el modelo.....	68
4.1.	Tasas promedios de incremento de índice de área foliar en las tres condiciones de humedad de suelo, dado en superficie de hoja por día.....	76
4.2.	Comparación de las medias de rendimiento de grano mediante la prueba de la Diferencia mínima Significativa (DMS).	80

INDICE DE FIGURAS

Figura N°	Pág.
2.1. Parámetros que considera el modelo EPIC para el balance de nitrógeno y de agua del suelo. La evapotranspiración y la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo tienen mayor efecto en las áreas sombreadas.....	21
4.2. Comportamiento de la humedad del suelo y riegos (R) en el tratamiento 2, durante el desarrollo del cultivo.....	72
4.3. Comportamiento de la humedad del suelo y riegos (R) en la parcela 3 durante el desarrollo del cultivo.	73
4.4. Valores de índice de área foliar observados y ajustados para las tres condiciones de humedad de suelo, durante el ciclo del cultivo.....	76
4.5. Acumulación de materia seca total durante el ciclo del cultivo del maíz, en las tres condiciones de humedad del suelo evaluado.	78
4.6. Datos observados y ajustados de acumulación de nitrógeno en la parte aérea de la planta, en las tres condiciones de humedad de suelo, ETM-REF, T2 y T3, durante el desarrollo del cultivo.	79
4.7. Índice de área foliar observados y simulados, en las tres condiciones de humedad de suelo, ETM-RE (A), T2 (B) Y T3 (C), durante el desarrollo del cultivo.	84
4.8. Capacidad de predicción del modelo en la variable índice de área foliar, en las tres condiciones de humedad evaluada, durante el desarrollo del cultivo.	85

Figura N°	Pág.
4.9 Acumulación de nitrógeno en la planta, simuladas y observadas en las tres condiciones de humedad de suelo, ETM-RE (A), T2 (B) y T3 (C), durante el desarrollo del cultivo .	86
4.10 Predicción del modelo en la variable acumulación de nitrógeno, en las tres condiciones de humedad de suelo, ETM-RE (A), T2 (B) y T3 (C), durante el desarrollo del cultivo.	87
4.11 Acumulación de materia seca observada y simulada en las tres condiciones de humedad de suelo, ETM-RE (A), T2 (B) y T3 (C), durante el desarrollo del cultivo	88
4.12 Capacidad de predicción del modelo en las tres condiciones de humedad de suelo evaluada, ETM-REF (A), T2 (B) y T3 (C), durante el desarrollo del cultivo.	89

INTRODUCCION

El maíz pertenece a la familia de las gramíneas. Su nombre científico es Zea mays. Debido a que el maíz se ha cultivado en casi todas partes del mundo, es posible encontrar plantas de este cereal con algunas características diferentes (Parsons, 1988).

El maíz es un cultivo importante dado que constituye la base de la dieta para gran parte de la población humana la cual lo consume en forma directa. En forma indirecta los productos y subproductos del maíz son utilizados por la población urbana y rural, para el consumo humano, animal, transformación industrial y otros.

Desde el punto de vista industrial el maíz se usa como materia prima de muchas industrias, con el se fabrican medicamentos, miel, alcohol, aceites, grasa para los zapatos, explosivos, productos para soldar, alimento balanceado para el ganado, recubrimiento para madera y otros. Se conoce que el maíz participa en la elaboración de más de 2,400 productos industriales.

En los países en vía de desarrollo, en donde existe gran urgencia por aumentar la capacidad de producción del cultivo de maíz en forma sustentable, y en donde a la vez suelen haber recursos limitantes para la persecución de la

investigación agrícola, existe un gran potencial para el uso beneficioso de las tecnologías de simulación agrícola. Dado que existen simuladores para este cultivo, y que la adaptación del modelo usado requiere tan sólo un microcomputador y unas cuantas temporadas de crecimiento para recolectar datos y calibrarlo al ambiente correspondiente.

Los modelos de simulación de crecimiento y rendimiento de las plantas, cobraron importancia a partir del momento en que surgió la computadora como un instrumento, con el cual se lograron realizar y controlar a gran velocidad cálculos y procesos complicados que requieren una toma rápida de decisiones. Con estos modelos se ha simplificado la tarea de los investigadores agrícolas, ya que con un grupo de variables se pueden hacer predicciones para diferentes cultivos y tiempos, y con una serie de combinaciones de las mismas se pueden llegar a establecer las condiciones necesarias para que cada cultivo se desarrolle con todo su potencial en una región determinada.

Generalmente los modelos de simulación se dividen en icónicos, empíricos o correlativos, analógicos y mecanistas o exploratorio; los primeros son una representación física a escala, los segundos describen las relaciones entre cultivo y ambiente sin referirse a un seguimiento biológico o físico que existe entre las variables gobernantes del crecimiento y desarrollo del cultivo, para este modelo la herramienta es la estadística, el tercero se basa en la analogía entre los sistemas, en tanto que los mecanistas se basan en conocimientos detallados del funcionamiento del sistema (Whisler *et al.*, 1986).

El modelo utilizado en el presente estudio es de tipo mecanista.

La validación del modelo de simulación utilizado en esta investigación constituye una herramienta en la implementación de metodología necesaria y apropiada para el agricultor, ya que este puede simular las repuestas del medio ambiente (clima y suelo) y el manejo (variedad del cultivo, fecha de siembra, población de planta, distancia entre surcos, riego, fertilizantes nitrogenados y fosforados, residuo del cultivo, biomasa).

Objetivos

El objetivo general del presente estudio es:

Evaluar la capacidad del modelo EPIC para simular razonablemente el índice de área foliar, la acumulación de materia seca y nitrógeno y rendimiento de grano en el cultivo de maíz, bajo diferentes condiciones de humedad en el suelo.

Los objetivos específicos de la presente investigación son:

- * Conocer la dinámica del índice de área foliar, acumulación de materia seca y nitrógeno en la planta, durante el ciclo de crecimiento del cultivo.

- * Comparar la dinámica del índice de área foliar, acumulación de materia seca y nitrógeno observado con lo simulado, para determinar la capacidad de predicción del modelo.

REVISION DE LITERATURA

Conceptos generales de los modelos de simulación

La simulación es la técnica que permite reproducir la esencia de un sistema, sin reproducir el sistema en si, pero aclaran que el significado más común de este término en los últimos años implica el uso de un modelo, el cual es formulado utilizando las relaciones aritméticas y algebraicas, así como los procesos lógicos (Hall y Dracup. 1974).

Por otra parte Naylor *et al.*, (1986), conceptualizan la simulación como una técnica numérica para ensayar alternativas en una computadora digital, los cuales requieren ciertos tipos de modelos lógicos y matemáticos, que describen el comportamiento de un sistema. El fundamento racional para usar la simulación en cualquier disciplina, es la búsqueda constante del hombre para adquirir conocimientos relativos a la predicción del futuro.

Cazanga (1991) Agrega que la simulación tiene las ventajas siguientes:

- Permite estudiar los efectos de determinados cambios ambientales, de información y de organización en la operación de un sistema;

- Puede orientar a los investigadores en relación a las variables que son más relevantes y a la forma como se relacionan;
- Puede servir para experimentar con nuevas situaciones acerca de las cuales hay poca información o no existe.

Cazanga (1991) conceptualiza que un modelo es un medio para el estudio de fenómenos complejos y se justifica su utilización si mejora nuestra comprensión de las características del comportamiento del mismo, de una manera más efectiva que si se observara el sistema real. Es importante mencionar que un modelo comparado con el sistema que representa puede proporcionar información a un costo menor y permitir el conocimiento anticipado de las condiciones que no se observan en la vida real.

Whisler *et al.*, (1986), establece que mediante el uso de los modelos es posible predecir el comportamiento de un cultivo, es una herramienta importante de la investigación, es decir, mediante la simulación es posible conocer en forma aproximada qué puede esperarse que ocurra en el sistema, cuando se efectúa un cambio en alguno de sus componentes, de tal manera que es factible hacer más corto el proceso de investigación, esto lógicamente no quiere decir que los modelos de simulación sustituyan a los experimentos de campo.

De ahí que los modelos de simulación hayan sido desarrollados básicamente para cubrir tres aspectos. Primero, para ayudar a entender

fenómenos dentro de un sistema agrícola; segundo, como herramienta de investigación y tercero, aquellos modelos desarrollados para monitorear el crecimiento y desarrollo de los cultivos a nivel comercial.

Generalmente los modelos se clasifican en empírico o correlativos, que describen las relaciones entre cultivo y ambiente, sin referirse a un seguimiento biológico o físico que existen las variables que gobiernan el crecimiento y desarrollo del cultivo, estos reducen la posibilidad de entender dichas relaciones, y los mecanistas o exploratorios, intentan explicar en forma casual la relación entre las variables; en un modelo mecanista las funciones matemáticas representan el mecanismo hipotético que describe el comportamiento observado, por esta razón la modelación mecanista es factible convertirla en un mayor entendimiento de las causas con lo que aumentan las soluciones.

Toure *et al.*, (1995) Afirman que los modelos de simulación se han usado para integrar los múltiples factores que afectan la producción del cultivo y para predecir el efecto del cambio climático. Se han usado varios modelos para examinar los posibles efectos del clima en las praderas Sin embargo, las predicciones hechas por los modelos, dependen de las asunciones hechas sobre las relaciones de clima-cultivo-suelo, al momento de crear el modelo. El análisis de sensibilidad de los modelos del cultivo con series de datos climáticos comunes, puede ayudar al conocimiento del funcionamiento de los modelos

bajo condiciones de cambio global, lo que a su vez nos permitiría seleccionar el modelo para los estudios del cambio climático.

Un ingeniero químico no diseñaría una planta, ni sus procesos de control, sin tener primero como base para su diseño a un modelo del proceso químico por realizarse en tal planta. Sin embargo el ingeniero agrícola cuyo quehacer es el diseño de los sistemas ambientales para la fábrica química más grande del mundo (la transformación de la energía de la luz y otros químicos en alimento), no cuenta con un modelo adecuado del sistema con el cual trabaja (Curry, 1971)

Posteriormente el fisiólogo de cultivos Passioura (1973) agregó que la mayoría de las conclusiones publicadas hasta esa fecha por los modeladores de sistemas agrícolas eran obvias, y que para obtener las mismas no se necesitaban complejos simulacros computarizados. Tales críticas procedían del hecho que se intentaban producir modelos del desarrollo de los cultivos cuando no se contaba aún con un conocimiento adecuado de varios procesos claves reguladores de las funciones y el desarrollo vegetal. Ya que la elaboración de un modelo sin tales conocimientos claves obligaba a los modeladores a que supusieran ciertos procesos en forma muy general, entonces sus simulacros parecían ser frívolos y faltos de rigor científico, ya que las recomendaciones en base a sus simulaciones resultaban ser poco distintas de lo que bien pudiera resultar de alguna sencilla opinión bien fundamentada.

Un sistema de producción agrícola se constituye de una serie de componentes o procesos, llamados subsistemas, los cuales destacan su propia conducta, y los cuales reaccionan en sus formas particulares a los varios estímulos de su medio ambiente. Tales subsistemas pueden interactuar el uno con el otro de tal forma que no sea sencillo poder predecir el comportamiento del sistema entero dadas ciertas condiciones iniciales. Es decir que estos son sistemas complejos por definición. El número de factores que influyen sobre el funcionamiento de tales sistemas (ya sean: el clima, el medio ambiente en el campo o en la ganadería, las características y adaptaciones particulares de los organismos unitarios en producción, sea planta o animal), aun cuando a la conjunción de sus varias combinaciones posibles resulta en un verdadero desafío a la captación y comprensión humana. Por otra parte, el modelado de un sistema implica que se le comprende a fondo, y no es lo mismo reclamar lo tal cuando se trata de un sistema creado por el ser humano mismo (en el caso de una fábrica, por ejemplo), que cuando se trata de un sistema cuyas características deberán descubrirse lentamente por el humano a través de una larga serie de estudios y experimentos minuciosos. Por este motivo se ha considerado generalmente, que la producción agrícola es una actividad manejada en forma subjetiva, o sea no fríamente racional o científica, por gerentes quienes integran amplios conocimientos intangibles en forma intuitiva, o sea particular al individuo, y por demás de manera irreproducible. Es decir, dadas las mismas condiciones no siempre decidiría obrar de la misma forma un productor determinado. Sin embargo, ha habido ciertos avances de tipo conceptual, como en técnicas experimentales y de cómputo, como para permitir

que este campo se haya desarrollado en forma productiva y que haya aportado varias contribuciones importantes a la ciencia agrícola (Monteith, 1981).

Hesketh y Jones (1976) y Whisler *et al.*, (1986) mencionan que un buen modelo debe auxiliar al investigador proveyéndole pistas inesperadas y perspectivas novedosas, por medio de la unificación del conocimiento y la explicación de los fenómenos, y no debido sencillamente al mero recapitulamiento o descripción de los comportamientos biológicos ya bien conocidos. Con frecuencia, un buen proyecto de investigación se frustra cuando es difícil distinguir algún patrón en el cuerpo de datos derivado por medio de la experimentación. El historial de los grandes simuladores de cultivos que para estas fechas ya se han utilizado durante periodos extendidos nos demuestra que estos modelos son valiosos no tan sólo como integradores de los datos experimentales disponibles, sino también como herramientas que enfocan la atención del investigador sobre aquellos aspectos críticos de la investigación que se conocen imperfectamente, y que por lo tanto requieren seguimiento más profundo.

De tal forma, los esfuerzos experimentales y de simulación del equipo de investigación son interactivos por cuanto el modelo sirve como bosquejo para estructurar las observaciones y apoyar al investigador en el esclarecimiento de las preguntas más relevantes por perseguir. Esto conduce a su vez al siguiente paso de investigación, y así sucesivamente, hasta refinar los resultados y conclusiones del proyecto. El apoyo de la computadora para distinguir en forma

fríamente imparcial y lógica las consecuencias y ramificaciones del comportamiento postulado de los componentes de un sistema puede ser de mucho valor en la síntesis de las teorías comprensiva. Es precisamente debido a que la computadora por sí misma no cuenta con la capacidad para intuir ni para sintetizar conocimiento alguno aparte del que se le provee, que el diseño de un modelo constituye la elaboración de una teoría respecto al sistema que se presenta. A tal modelo se le pueden proveer datos externos (historiales meteorológicos. factores de manejo, características de alguna variedad de cultivo) y validársele al compararse las predicciones del modelo con el comportamiento observado de los organismos simulado (su tasa de crecimiento, rendimiento, la calidad de algún producto). Como resultado, el investigador podría distinguir la imprescindibilidad de algún nuevo tipo de datos, y esto es lo que genera la experimentación adicional (Horton y Bicak,1987).

Curry y Chen (1971), afirman que el tipo de modelo computarizado es una síntesis, elaborada y utilizada de acuerdo con la fórmula idealizada para la conducta de la investigación científica: El teórico resume su comprensión de los datos disponibles, postula un concepto unificante, desarrolla una teoría y enseguida pone a prueba su teoría por medio de la comparación de las predicciones de su teoría con el comportamiento observado del sujeto bajo estudio.

Para superar las deficiencias de los primeros intentos en modelado agronómico, fue necesario primero un gran esfuerzo para generar los varios

tipos de datos necesarios para el diseño y alimentación de los modelos. Esto impulso vigorosamente el desarrollo y uso intensivo de las llamadas cámaras de crecimiento o "Fitotrones" los cuales permiten el control independiente de varios factores importantes sobre el crecimiento vegetal, tales como el flujo de radiación fotosintéticamente activa, los niveles de nutrimentos minerales y de agua, y la temperatura y humedad relativa del medio ambiente (Loomis *et al.*, 1979; Meyer *et al.*, 1984).

Edelstein-Keshet (1988), comenta que en el campo de la biología se ha reconocido durante tiempo que la mayoría de los procesos biológicos se pueden describir en forma dinámica, es decir que suceden en asociación o en función de otros procesos. Por ejemplo, la tasa de proliferación de una colonia de bacterias sucede en función del nutrimento disponible. Conforme va menguando la fuente de sus energéticos. Disminuye en proporción el crecimiento de la colonia, o, dados nutrimentos suficientes, el crecimiento de la colonia ocurre en función del tiempo transcurrido. Tales relaciones dinámicas pueden expresarse convenientemente en forma matemática por medio de las ecuaciones diferenciales.

Jager (1986), menciona que cuando se depende sobre la comprensión de los procesos biológicos en términos estrictamente matemáticos esto conlleva que los simulacros padezcan la debilidad de que la metodología bien pueda describir, mas no explicar, las funciones de los organismos.

Sin el objetivo es sencillamente predecir, bien pudieran bastar un conjunto de datos lo suficientemente amplio y alguna técnica estadística como lo sería la regresión o la correlación. Sin embargo, son bien conocidas las siguientes deficiencias de estas metodologías estadísticas:

- * Los análisis de regresión pueden reflejar relaciones equivocadas de causa y efecto entre las variables estudiadas.

- * Los modelos de regresión pueden ser muy subjetivos productos de las variables que el modelador escoja para incluir en su modelo.

- * Las predicciones basadas sobre los análisis de regresión son válidas tan sólo dentro de la gama de condiciones temporales, físicas y de manejo bajo las cuales se hayan reunido los datos originales.

El modelador pionero Cornelius (1982), ha observado que la cantidad de variables relevantes para simular "al organismo viviente o al ecosistema grande". Esto se debe a que las técnicas de regresión múltiple son de valor limitado cuando se tienen cantidades grandes de variables interactuando en forma complejas.

Monteith (1981) ha encontrado que los modelos estadísticos o empíricos, son útiles cuando lo que se busca es la predicción de alguna condición sencilla como resultado de ciertas condiciones iniciales, sin tomar en cuenta los mecanismos o causa intervinientes por lo que ha sugerido que a tales procedimientos se les conoce como "análisis" y no como "modelos". Aunque

los análisis estadísticos pueden reforzarse basándolos sobre conjuntos voluminosos de datos, todo lo que son capaces de esclarecer es la respuesta a la pregunta. Basándose en ciertos eventos pasados, que lo que puede suceder dadas las mismas circunstancias.

Baker y Horrocks (1973), observaron que los modelos de cultivos que involucran a la estadística han evolucionado casi hasta su límite de capacidad. Debierase considerar algún modelo de simulación que comenzase al sembrarse la semilla de maíz, y que sumase todo los procesos vegetales durante la temporada de crecimiento. El producto final de tal modelo sería el rendimiento biológico o económico total. Tal procedimiento reduciría nuestra dependencia actual sobre las técnicas estadísticas. Un modelo de Simulación de este tipo aproximaría fielmente la respuesta de alguna planta sin obstar el ambiente al cual se le sometiera, de tal manera permitiendo predicciones correctas en cualquier situación determinada. La filosofía que expresa que la simulación óptima de algún proceso general depende de la comprensión completa, y simulación correcta, de los mecanismos que componen al fenómeno general se conoce como mecanicismo y ha sido sin duda la técnica de simulación mas practicada y más productiva en el modelado agrícola. En el ámbito agronómico se les conoce también a los modelos mecanicistas con el nombre de modelo fisiológicos o explicativos.

Loomis *et al.*, (1979), Mencionan que los modelos intentan predecir el comportamiento de la planta por medio de la simulación y suma de los procesos

que componen la fisiología de las plantas verdaderas, o sea la interacción entre los varios órganos vegetales a través del tiempo y en respuesta a su medio ambiente. Por ejemplo, se consideraría como modelo fisiológico del maíz mismo que simulara en función del transcurso del tiempo a ciertos procesos básicos, intrínsecos al crecimiento y desarrollo de una planta de maíz verdadera. Ejemplo de un conjunto mínimo de tales procesos incluiría a la fotosíntesis la respiración y la transpiración.

La simulación procede conforme la planta de maíz "fotosintetiza, respira, transpira y por lo tanto crece diariamente, Por lo anterior el resultado de tal simulacro no se puede conocer hasta que estos procesos interactivos se desenvuelvan dentro del marco de algún plazo de tiempo, en forma "mecanicista." Los varios modelos fisiológicos difieren en cuanto al número de subprocesos que incluyen explícitamente, y en cuanto a su grado de sensibilidad a los factores externos que afectan el crecimiento vegetal, como lo podrían ser el clima y las plagas (Curry, 1971).

Penning de Vries, (1982), menciona que es importante recalcar que existe un límite práctico en cuanto al grado de mecanicismo con el cual se puede cargar a un modelo. Un límite obvio lo constituye el grado de conocimiento con que se cuente tocante a los varios subprocesos necesarios. Por ejemplo, la mayoría de los modelos de cultivos cuentan con rutinas buenas para la simulación de la fotosíntesis y la respiración, dos procesos que se han investigado extensamente, pero hay una gran deficiencia de información

respecto a otros procesos, por ejemplo acerca de los mecanismos de transporte de fotosintatos de una parte de la planta hacia otra. Consecuentemente, existen pocos modelos equipados para tratar estos aspectos del desarrollo de un cultivo. Tales faltas de conocimiento se tratan implícitamente (suponiéndose que el mecanismo dado no limita al proceso general por simularse y por lo tanto es justificable su omisión), o con una descripción sencilla, por ejemplo por medio de alguna técnica de regresión, aunque en tal caso el modelo no explicaría la función dada, sino que sencillamente la mimetizaría.

Otra limitante sobre el grado de mecanicismo factible en las simulaciones fisiológicas puede considerarse a la misma vez como una de las características mas potentes de los modelos fisiológicos o explicativos, y tiene que ver con su estructuramiento. Para comprender el comportamiento de los cultivos,

Edwards (1982) resumió la organización de los sistemas biológicos dentro de cinco niveles jerárquicos.

- Comunidad (o población) vegetal
- Planta individual
- Organo
- Tejido
- Célula

Un modelo de cultivo pudiera ser estrictamente ecológico, explicando la competencia que existe entre plantas individuales por la luz y el bióxido de carbono, en base a la arquitectura foliar y la mecánica del flujo de aire turbulento y el intercambio energético con el medio ambiente, o bien pudiera incluirse simulaciones explícitas de los procesos a nivel de los órganos, tales como el desarrollo de las hojas y los frutos o bien pudiera contar con la capacidad de simular eventos al nivel celular o bioquímico, como lo serían la actividad de alguna enzima o la síntesis de alguna proteína. Cada nivel adicional de profundidad en un modelo fisiológico aumenta el poder explicativo del modelo visto desde sus niveles más elevados. Esto se debe a que los factores ambientales en tales modelos afectan a los subprocesos, como suceden en las plantas verdaderas, y a los fenómenos de alto nivel no se les simula directamente. Por ejemplo una de las mejores simulaciones de la fotosíntesis pudiera ser producto de una buena comprensión y modelado de ciertos eventos celulares (la mecánica de las células guardas de los estomas, mismas que regulan el flujo gaseoso de las hojas), de ciertos eventos bioquímicos (las reacciones del carbono y el nitrógeno dentro de la célula), y de ciertos eventos físicos (el excitamiento de los electrones de la clorofila). Tal modelo se conocería como uno con estructura jerárquica. El poder explicativo del modelo estructurado jerárquicamente es muy grande, pero la razón por la cual este estructuramiento pudierase considerar a la vez como una gran limitante es que cada nivel sucesivo de la jerarquía desde el nivel de la población hasta el molecular requiere una cantidad mayor de información, y un

paso-tiempo menor (este es el intervalo de tiempo necesario para que todas las variables principales del modelo se actualicen).

Whisler *et al.*, (1986), menciona que conforme disminuye el paso-tiempo de un modelo, el tiempo de ejecución que se requiere para el mismo aumenta. Pocos de los modelos mas conocidos en la actualidad funcionan con una profundidad mayor al nivel de los órganos, y la mayoría funcionan con un paso- tiempo de un día. Las razones son dos y están relacionadas: 1) se sabe menos acerca de los procesos celulares y bioquímicos de los que se sabe acerca de los organos y las poblaciones, y 2) hay pocos conjuntos de datos meteorológicos que incluyan observaciones con frecuencia mayor a las dos veces diarias. Sería incongruente el modelado de un proceso fotosintético que ocurre en cuestión de picosegundos al nivel biofísico, cuando el único dato disponible en cuanto al flujo de radiación consistiera de la radiación total diaria. Sin embargo, debido a que la capacidad de los modelos mecanicista para simular a los eventos celulares está mejorando, hay ahora un énfasis mayor sobre la recolección de conjuntos de datos meteorológicos con observaciones tomadas cada hora a lo largo de la temporada de crecimiento. Esta función también es apoyada por la disponibilidad en la actualidad de microcomputadores y amplios sistemas de almacenaje de bajos costos, lo cual es un ejemplo de la forma en la cual los avances en la tecnología del cómputo han posibilitado ciertos de los avances en el campo de la simulación biológica.

Por último es, propicio recalcar que la técnica y los beneficios del modelado agronómico están al alcance de todo investigador agrícola, ya que no es necesario ser un programador de computadora para ser buen modelador. Dado que un modelo es conceptual, y consiste de un resumen e integración de los procesos importantes que explican el crecimiento y comportamiento de algún cultivo u organismo, hay que recordar que existe una separación clara entre lo que constituye a un modelo y lo que es paquete de computadora que lo encarna. Es muchas veces más importante para establecer la calidad y confiabilidad de cualquier modelo que sus bases teóricas y fisiológicas sean correctas y aceptada por la comunidad de biólogos y demás especialistas incumbentes al tema (Garzía y Garzía 1987).

Heer (1988), conceptualiza que la validación es la que nos muestra el alcance predictivo entre el desempeño de un sistema real y el comportamiento del modelo

Descripción del Modelo Epic

El modelo EPIC (Erosion-Productivity-Impact-Calculator) fue desarrollado, por un grupo de investigadores de USDA-ARS, (Williams *et al.*, 1984) con el propósito de simular la erosión causada por ciertas prácticas de

manejo del suelo, y las consecuencias económicas y técnicas de la erosión. Esta fue consecuentemente implementado a lo largo de Estados Unidos (Charpentreau *et al.*, 1986).

Williams (1984), propone que para realizar esos complejos requisitos, se formaron cuatro objetivos en el modelo.

- a).- El modelo puede basarse físicamente y ser capaz de simular los procesos simultáneamente, y disponiendo variables de entrada reales.
- b).- Capaz de simular por ciento de años, debido a que la erosión es relativa a un proceso lento.
- c).- Aplicable aun amplio rango de suelos, climas y cultivos, encontrados en los Estados Unidos.
- d).- Eficiente y capaz de estimar los efectos de manejos en los cambios en la erosión y la productividad del suelo.

Epic se compone físicamente de los componentes para realizar la simulación de la erosión, crecimiento de plantas y otros procesos relativos.

El modelo EPIC esta formado de diez submodelos:

Clima: Si se requiere simular el clima, el submodelo es capaz de calcular las condiciones climáticas diarias utilizando un modelo marcoviano.

Hidrología: Simulan los aspectos hidrológicos del suelo, es decir los movimientos del agua ligados a las condiciones de suelo y clima y al proceso de

Hidrología: Simulan los aspectos hidrológicos del suelo, es decir los movimientos del agua ligados a las condiciones de suelo y clima y al proceso de evapotranspiración del cultivo, calculo de escurrimiento de drenaje, de circulación subterránea y lateral (Figura 2.1).

Erosión: Simula la erosión del suelo causada por el viento y la lluvia, los riegos, el escurrimiento y el drenaje.

El ciclo de los nutrimentos: El modelo simula la dinámica del nitrógeno y fósforo en el suelo considerando la influencia del clima, suelo, cultivo y operaciones de manejo, como se observa en la Figura 2.1 para el caso del nitrógeno.

Destino del Pesticida: El modelo simula el movimiento del pesticida con agua y el sedimento así como la degradación en follaje y en suelo.

Temperatura Del Suelo: La temperatura del suelo depende del clima, del contenido del agua del suelo, y de la densidad aparente. Se computan diariamente en cada capa del suelo.

Labranza: El equipo de labranza afecta las propiedades del suelo y el ciclo de los nutrientes. El modelo simula las variaciones en las propiedades físicas del suelo.

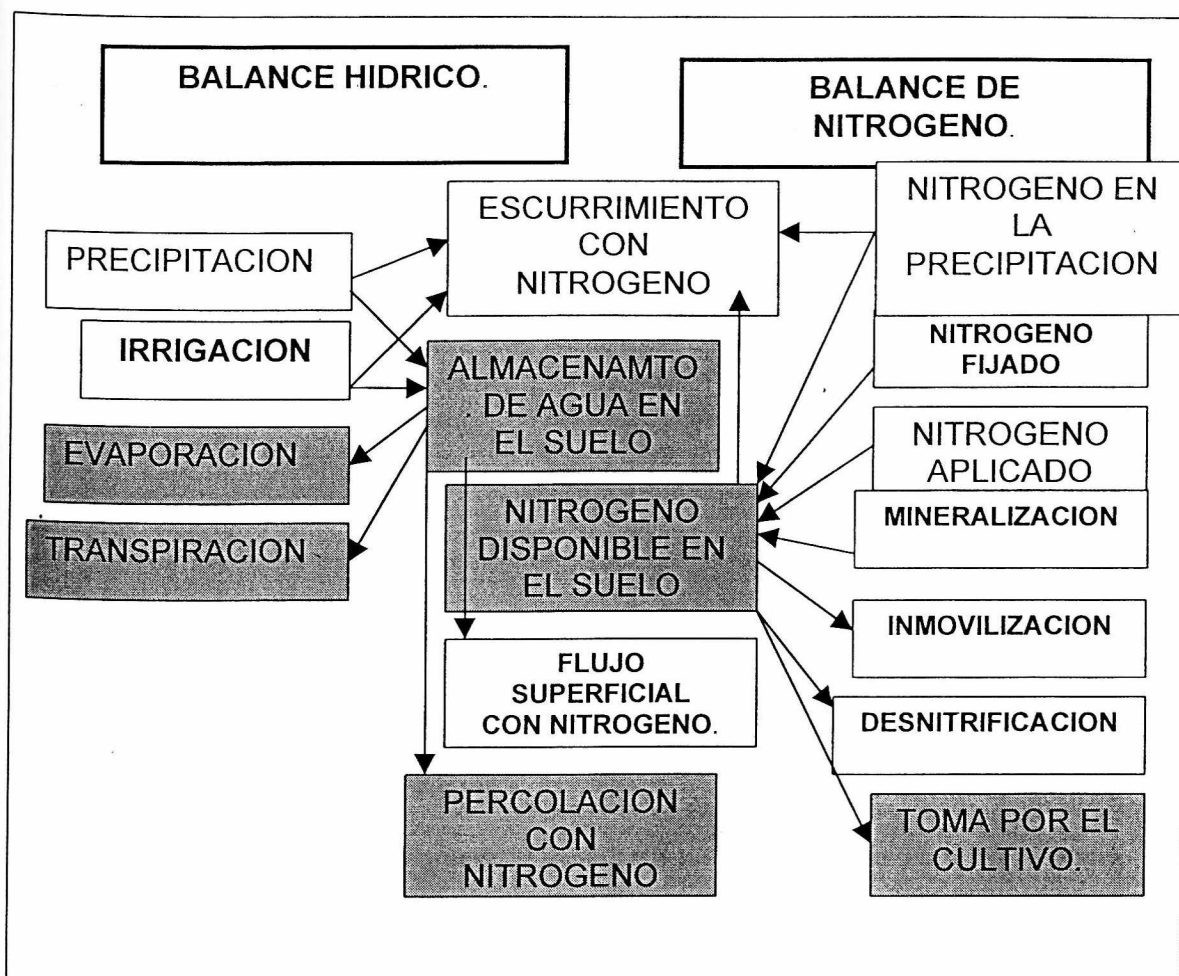


Figura 2.1. Parámetros que considera el modelo EPIC para el balance de nitrógeno y de agua del suelo. La evapotranspiración potencial y la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo tienen mayor efecto en las áreas sombreadas.

Desarrollo del cultivo: EPIC es capaz de simular el desarrollo de, cultivos, pastos, y árboles agronómicos importantes. Los parámetros cultivo-específicos están disponibles para la mayoría de los cultivos. El usuario puede ajustar o crear nuevos conjuntos de parámetros según sea necesario. El modelo puede

también simular los cultivos en desarrollo, en rotaciones complejas y en ciertos casos, algunos casos en asociaciones.

Manejo del cultivo y el suelo: El modelo EPIC es capaz de simular una gran cantidad de variables del cultivo, de prácticas de manejo y de procesos naturalmente que ocurren. Éstos incluyen diversas características del cultivo, poblaciones de plantas, fechas de siembra y de la cosecha, la fertilización, la irrigación, sistema de drenaje artificial, control de la salida con los diques del surco y otros métodos, abonar con cal, y control de parásitos. El modelo puede también calibrar los efectos de tales prácticas de manejo variadas, como si el cultivo está cosechado para el grano o el forraje o si se pasta o se quema.

Economía: Un conjunto de estadísticas simple se incluye para calcular los costos de entradas de información.

La evapotranspiración es calculada de acuerdo a las ecuaciones de Ritchie (1972). El modelo calcula separadamente la evapotranspiración del suelo y pérdida de agua de la planta. El cálculo de este término más tarde podría ser descrito en la sección de crecimiento de planta. La absorción de agua por planta es entonces distribuida dentro del perfil de acuerdo a los patrones de enraizamiento de cada cultivo.

El submodelo desarrollado del cultivo es del tipo que puede ser calificado como fotosintético, que es energía provista por el ambiente y convertida a materia seca dentro de lo anotado en la fenología de la planta. Más precisamente, cada día el crecimiento de la planta es calculado en cinco etapas:

- Primero, la producción potencial de materia seca es calculada como una función del índice de área foliar sobre los días previos y de variables climáticas; siguiente, los recursos de medio ambiente (agua, N, P) necesarios en orden para lograr este crecimiento son calculados; Para cada recurso, la fracción (un número entre 0 y 1) el cual el medio ambiente es capaz de proveer es calculado; el mínimo de estas fracciones es considerado el factor más limitante y viene a ser el "estrés" por este día, esto es usado como un factor multiplicativo para determinar el crecimiento diario actual; y finalmente, la absorción actual de planta (agua, nutrimentos) es evaluado y sustraído de recursos ambientales de acuerdo a algoritmos los cuales son específicos para cada cantidad.

Estos cálculos diarios son acompañados por cálculos de crecimiento de raíz y aumento de área foliar los cuales tienen sus propias dinámicas y afectan el funcionamiento del resto del sistema.

Es importante enfatizar que estos cálculos son en principio, estrictamente idénticos para todos los cultivos. Solo los valores de los parámetros difieren entre cultivos.

Materia Seca

La materia seca es la resultante final del proceso fotosintético y la respiración en la cual, parte de los carbohidratos producidos en este proceso, son utilizados como material de construcción para la estructura de la planta (Tanaka y Yamaguchi 1984).

La tasa de acumulación de materia seca en algunas especies, es limitada por la disponibilidad de carbono, agua, nitrógeno, etc., pero en otras especies la tasa está influenciada muy poco por estos factores, a no ser que estén suministrados en menor cantidad o por debajo de los valores normales. Para las especies superiores, si algún factor es limitante, la expansión foliar, de peciolos y tallo internodal son inhibidos, pero las hojas nuevas continúan apareciendo a una tasa exclusivamente en función de la temperatura (Mayaki *et al.*, 1976).

Frey (1982), menciona que el rendimiento del grano en maíz es la integración de la materia seca en el tiempo. La tasa y duración del llenado del grano, ha sido sugerido por Frey como el factor el cual debe ser mejorado a través de la selección y resulta en el mejoramiento del rendimiento. Este autor investigó el desarrollo del grano de maíz sobre la mazorca cuando fueron impuestos tratamientos que alteraron el abastecimiento de asimilatos a la mazorca. La perturbación del abastecimiento de asimilatos fue conseguida disminuyendo en un 50 por ciento el índice de área foliar y removiendo en la

misma proporción el área de las hojas cuando el 50 por ciento del cultivo se encontraba en la etapa de jilote. Los tratamientos los cuales afectaron el abastecimiento de asimilatos influyen en el número de granos y tamaño en la sección de desarrollo extrema de la mazorca. Las tasas de acumulación de materia seca en el grano son similares para los granos en la región basal y media de las mazorcas a pesar del abastecimiento de asimilatos. Los grano de la extremidad pueden haberse llenado a tasas mas bajas que las de las otras dos regiones. La alteración de duración de la fase lineal de la acumulación de materia seca debido a los tratamientos que afectan el abastecimiento de asimilatos, fue sugerido como una causa de variación en el peso del grano sobre una mazorca y entre las mazorcas de un mismo híbrido. Este autor incluye que la etapa crítica en el desarrollo del maíz que es altamente dependiente del abastecimiento de asimilatos es el período de dos a tres semanas después del 50 por ciento del jiloteo, que es cuando el número de grano final es determinado.

Eck (1986), realizó un experimento en maíz para evaluar la influencia sobre el rendimiento del grano y sus componentes del déficit hídrico en dos etapas fenológicas, sus componentes y la influencia en el uso del agua. En unos tratamientos el déficit fue impuesto de dos a cuatro semanas en la etapa vegetativa y en otros en la etapa de llenado de grano. El déficit de agua impuestos durante 41 días después de la siembra, redujo el rendimiento de materia seca de la hoja, tallo y mazorca. El déficit de agua durante el

crecimiento vegetativo redujo el número de granos pero tuvo un pequeño efecto sobre su peso. El déficit durante el llenado del grano no afecta el rendimiento de materia seca en la hoja y tallo pero sí el de mazorcas. El número de granos no fue afectado por el déficit hídrico en el llenado del grano, a menos que el déficit haya sido impuesto en períodos tempranos, de este modo las disminuciones en el rendimiento del grano son proporcionales en las reducciones de peso del grano. Eck concluye que no obstante que algunas veces la eficiencia en el uso del agua aumentó ligeramente cuando las plantas fueron sujetas a déficit hídrico, los resultados de esta investigación indican que el riego limitado en el maíz es factible en el sudeste de las altas planicies de USA.

Harder *et al.*, (1982), mencionan que la sensibilidad del desarrollo del grano de maíz a la ocurrencia del estrés hídrico está relacionado a la etapa fisiológica cuando éste ocurra y es importante en la determinación final del rendimiento de grano. Por lo cual el período en que ocurra la precipitación o el riego llega a ser un factor económico importante para la producción del maíz.

Reed *et al.*, (1988), estudiaron en el cultivo del maíz el efecto del sombreado sobre la partición de materia seca, el contenido de nitrógeno, el número y rendimiento de grano. Las plantas de maíz que crecían en el campo fueron sombreadas durante la etapa vegetativa. Las plantas control no fueron sombreadas. Cuando las plantas fueron sombreadas durante la floración,

disminuyó la fotosíntesis y se incrementó el aborto de flores en relación al tratamiento control, sin embargo, la concentración de nitrógeno fue más alta en los granos restantes. Durante la reducción en el abastecimiento de nitrógeno hacia el jilote, debido al sombreado no fue un factor limitante para determinar el número de granos. Durante el llenado de grano, la removilización de nitrógeno y de materia seca desde las fuentes, corresponde a un 46.5 y 4.7 por ciento del que se encuentra en el grano a la madurez respectivamente.

Karlen *et al.*, (1987). Realizaron un estudio para determinar las tasas de acumulación de materia seca, nitrógeno, fósforo y potasio en maíz, para lo cual se muestrearon las partes aéreas totales de plantas, colectándose seis muestreos en 1980 y 1981 y ocho muestreos en 1982 del experimento de campo, en el cual se evaluaron dos programas de riego, dos densidades de población, dos espaciamientos entre surcos y dos tratamientos de fertilización. Lo más importante encontrado en esta investigación fue la observación de dos períodos máximos diferentes de acumulación de materia seca y nutrientes. El primero ocurrió durante la etapa vegetativa, cuando el número potencial de granos está siendo establecido y el segundo durante el desarrollo reproductivo cuando el rendimiento potencial se ha establecido. Esto enfatiza que para obtener altos rendimientos deberá someterse a un mínimo estrés el ambiente de precipitación durante todas las etapas de desarrollo. Las tasas máximas de acumulación de materia seca, nitrógeno, fósforo y potasio fueron de 650, 10, 1.6 y 28 kg ha⁻¹ d⁻¹ en este estudio.

Es frecuentemente observado que la ganancia de peso seco del cultivo es aproximadamente proporcional a la intercepción de luz de la cubierta vegetal. Estas relaciones son usadas en algunos modelos para predecir la ganancia de peso seco, pero el problema de su uso es que el valor de los parámetros varían de un año a otro (Van Keulen, 1986).

La planta de maíz tiene una alta eficiencia en el uso del agua en cuanto a la producción de materia seca, y entre los cereales es potencialmente el cultivo de grano de mayor rendimiento (Doorenbos y Kassam, 1979). Sin embargo la planta evapora agua como cualquier otro sistema físico, además de las necesidades hídricas que requiere para las demandas metabólicas, debe cubrir las demandas evaporativas a través de la epidermis en la transpiración. En condiciones normales una planta de maíz absorbe durante su ciclo de vida alrededor de 300 kilogramos de agua, de los que utiliza en procesos metabólicos aproximadamente un dos por ciento y transpira el resto (Rojas, 1972).

Papadakis (1977), indica que la importancia del nitrógeno en la planta queda suficientemente probada, puesto que sabemos participa en la composición de las más importantes sustancias orgánicas; tales como clorofila, aminoácidos, proteínas, ácidos nucleicos, etc. Como estas sustancias sirven de base para la mayoría de los procesos que rigen el desarrollo, crecimiento y multiplicación de las plantas; resulta evidente la importancia del nitrógeno en las

funciones más características de la vida vegetal. Agrega que un suministro adecuado de nitrógeno a la planta produce un rápido crecimiento, un color verde intenso de las hojas, mejora la cantidad y aumenta el contenido de proteínas del producto.

Balance de agua

Muchas personas han elegido el uso del Estimador de Impacto de Erosión sobre Productividad (EPIC) para la modelación de calidad de agua; la elección de este estimador es debido a su flexibilidad en cuanto a manejo y requerimientos de datos de entrada, además de las opciones disponibles con las que cuenta para estimar evapotranspiración potencial y capacidad de almacenamiento de agua en el suelo.

La simulación de las pérdidas de nutrimentos y pesticidas en los flujos superficial y subsuperficial en un sitio dado, varía de acuerdo al método utilizado en la estimación de evapotranspiración potencial y capacidad de almacenamiento de agua en el suelo.

Los usuarios del modelo EPIC y los organismos normativos, deben considerar la sensibilidad que tienen los parámetros de calidad de agua hacia los submodelos y suposiciones usados para estimar el movimiento de nutrientes y pesticidas. El conocimiento de la magnitud y la naturaleza de las diferencias potenciales en tales estimaciones, puede permitir que los

organismos normativos desarrollen mejores estrategias, que reconozcan el riesgo que representan las diferencias en las estimaciones y conduzcan al desarrollo de mejores reglas de decisión.

Indice de Area Foliar

Crofts *et al.*, (1971) conciben el índice de área foliar como una medida de frondosidad de la planta mediante la cual se puede conocer la proporción de superficie foliar expuesta a la luz, en la cual podrá ocurrir la fotosíntesis.

Tanaka y Yamaguchi (1981) en su trabajo de producción de materia seca y componentes de rendimiento en maíz, encontraron que elevados valores de IAF generalmente ocasionan disminución en el número de granos por unidad de área foliar, teniendo como consecuencia reducción en el rendimiento.

Gerakis y Papacosta (1979) al trabajar con maíz y analizar los parámetros de crecimiento en función de la densidad de población, observaron que por unidad de área el peso seco y el IAF se incrementaron a medida que aumenta la densidad, y bajo estas condiciones se obtuvo la máxima tasa de crecimiento de cultivo.

Fisher *et al.*, (1981) indican que la resistencia a la sequía de algunos híbridos de maíz estuvo relacionada con la menor acumulación de área foliar y

un intervalo más corto entre la antesis media y aparición promedio de los estigmas.

El área foliar es uno de los parámetros más importantes en la evaluación del crecimiento de las plantas, de ahí que la determinación adecuada del mismo sea fundamental para la correcta interpretación de los procesos de desarrollo de un cultivo. Existen diferentes métodos para estimar el área foliar, sin embargo, la mayoría de éstos se aplican a las hojas frescas (González, 1990).

En 1984, Wayne estimó mediante mediciones longitudinales hechas desde la base del peciolo hasta el ápice de las hojas; paralelamente el área foliar de la hoja fue medida con un medidor automático y encontró que las mediciones lineales a través de la vena principal de la hoja se correlacionó significativamente con el valor determinado por el medidor del área foliar.

Determinó González *et al.*, (1990), la correlación del método de cuadrícula y fotoeléctrico, para determinar el área foliar en papa, obteniendo una alta significancia entre los dos métodos. Asimismo señalan que cualquiera de los resultados obtenidos por éstos métodos serán igual de confiables.

Descripción Matemática del modelo

Modelo de crecimiento del cultivo.

Un solo modelo es usado en EPIC para la simulación de todos los cultivos considerados (maíz, sorgo de grano, trigo, cebada, avena, girasol, frijol soya, alfalfa, algodón, cacahuates, papas, trigo duro, chícharos de invierno, frijol ancho, colza, caña de azúcar, heno, pasto de pradera, arroz, casava, lenteja y árboles de pino).

Cada cultivo tuvo valores únicos para los parámetros del modelo. El modelo EPIC es capaz de simular el crecimiento de cultivos tanto anuales, como perennes. El crecimiento de los cultivos anuales se cuenta desde la fecha de plantación hasta la fecha de cosecha, o hasta que las unidades calor acumuladas igualen a las unidades calor potenciales para tales cultivos. Por otro lado, los cultivos perennes mantienen sus sistemas radiculares durante todo el año, aunque pueden llegar a permanecer en dormancia después de las heladas; ellos comienzan a crecer cuando la temperatura promedio diario del aire excede su temperatura base.

El desarrollo fenológico del cultivo está basado en la acumulación de unidades calor diario. Esto se puede calcular usando la siguiente ecuación:

$$HU_k = \left[\frac{T_{mx,k} + T_{mn,k}}{2} \right] - T_{b,j} \quad HU_k \geq 0 \quad [2.1]$$

Donde: UH, T max, y T son los valores de unidades calor, temperatura mínima (°C) en un día K, y T b es la temperatura base para un cultivo específico j (°C)(no ocurre crecimiento a T b o debajo de T b).

Un índice de unidades calor (HUI) que tiene un rango de 0 en plantación y hasta de 1.0 en maduración fisiológica, puede ser calculado como sigue:

$$HUI_k = \frac{\left[\sum_{k=1}^i \right]}{PHU_j} HU_k \quad [2.2]$$

donde: HUI es el índice de unidades calor para un día i y PHU son las unidades calor potencial para la maduración de un cultivo j. El valor de PHU puede ser calculado ó introducido por el modelo, considerando el período desde la fecha normal de plantación hasta la fecha normal de cosecha. La fecha de cosecha, el área foliar y senescencia, las concentraciones óptimas de nutrientes en la planta y la división de materia seca entre raíces, tallos y rendimiento económico; todos ellos son afectados por el HUI.

Crecimiento potencial

La interceptión de la radiación solar es estimada con la ecuación de la Ley de Beer (Monsi y Saeki, 1953).

$$PAR_i = 0.5(RA)_i [1 - \exp(-0.65LAI)] \quad [2.3]$$

donde: PAR es la radiación fotosintéticamente activa (MJ/m^2), RA es la radiación solar (MJ/m^2), LAI es el índice de área foliar, y el subíndice i es el día del año.

Usando el enfoque de Monteith (1977), el incremento potencial en biomasa para un día, puede estimarse con la ecuación:

$$\Delta B_{p,i} = 0.001(BE)_i (PAR)_i (1 + \Delta HRLT_i)^3 \quad [2.4]$$

donde: ΔB_p es el incremento potencial diario en biomasa (t/ha), BE es el parámetro del cultivo para convertir la energía a biomasa (kg/MJ), HRLT es la duración del día (h), y $\Delta HRLT$ es el cambio en la duración del día (h/d). La función para duración del día de la ecuación 2.1, incrementa el crecimiento potencial durante la primavera, y lo disminuye en otoño (Baker *et al.*, 1980).

La duración del día está en función de la fecha del año y la latitud, tal como se expresa en la siguiente ecuación:

$$HRLT_i = 7.64 \cos^{-1} \left[-\tan \left(\frac{2\pi}{365} LAT \right) \tan(SD)_i \right] \quad [2.5]$$

donde: LAT es la latitud de la cuenca (grados) y SD es el ángulo de la inclinación solar, que es definido por la ecuación:

$$SD_i = 0.4102 \sin \left[\frac{2\pi}{365} (i - 80.25) \right] \quad [2.6]$$

En la mayoría de los cultivos, el índice de área foliar (LAI) tiene un valor de cero ó un valor muy pequeño al inicio. Este valor se incrementa exponencialmente durante el principio del crecimiento vegetativo, cuando las tasas de desarrollo de los primordios foliares, la aparición del ápice de la hoja y la expansión del limbo están sujetos a una relación linear con la acumulación de unidades calor (Tollenaar *et al.*, 1979; Watts, 1972). En los cultivos vegetativos, como la caña de azúcar y algunos forrajes el LAI alcanza un plano en un momento, en el cual las tasas de senescencia y crecimiento de área foliar son aproximadamente iguales. En muchos cultivos, el LAI disminuye después de haber alcanzado un máximo, y se aproxima a cero en la madurez fisiológica. Además, la expansión foliar, el LAI final, y la duración de la hoja, son disminuidas por el efecto de diferentes tipos de estrés (Avevedo *et al.*, 1971 y Eik y Hanway, 1965).

El LAI es simulado en función de las unidades calor, el estrés del cultivo y las etapas de desarrollo del cultivo. Desde la emergencia hasta el inicio de la declinación foliar, el LAI es estimado con las ecuaciones:

$$LAI_i = LAI_{i-1} + \Delta LAI \quad [2.7]$$

$$\Delta LAI = (\Delta HUF)(LAI_{mx}) \{1 - \exp[5.0(LAI_{i-1} - LAI_{mx})]\} \sqrt{REG_i} \quad [2.8]$$

donde: LAI es el índice de área foliar, HUF es el factor de unidades calor, y REG es el valor del factor de mínimo estrés del cultivo. El subíndice mx es el máximo valor y Δ es el cambio diario.

El factor de unidades calor es calculado con la siguiente ecuación:

$$HUF_i = \frac{HUF_i}{HUI_i + \exp[ah_{j,1} - (ah_{j,2})(HUI_i)]} \quad [2.9]$$

donde: $ah_{j,1}$ y $ah_{j,2}$ son parámetros del cultivo j , y HUI es el índice de unidades calor.

Desde el inicio de la declinación foliar hasta el final de la estación de crecimiento, el LAI es estimado con la ecuación:

$$LAI_i = LAI_0 \left(\frac{1 - HUI_i}{1 - HUI_0} \right) ad_j \quad [2.10]$$

donde: ad es un parámetro que determina la tasa de declinación de LAI para un cultivo j , y el subíndice 0 es el día del año en que el LAI empieza a declinar.

La altura del cultivo es estimada con la relación:

$$CHT_i = HMX_j \sqrt{HUF_i} \quad [2.11]$$

donde: CHT es la altura del cultivo (m) y HMX es la altura máxima correspondiente al cultivo j .

La fracción de biomasa total distribuida hacia el sistema radicular normalmente decrece de 0.3 a 0.5 en la etapa de plántula, hasta de 0.05 a 0.20 en la maduración (Jones, 1983a). El modelo simula esta distribución linealmente desde 0.4 en emergencia hasta 0.2 en madurez. De esta manera, el cambio potencial diario en el peso de la raíz, se puede calcular con la ecuación:

$$\Delta RWT_i = \Delta B_{p,i}(0.4 - 0.2HUI_i) \quad [2.13]$$

donde: ΔRWT es el cambio en peso de la raíz (t/ha) en un día i .

El cambio potencial en el peso de la raíz a través de la zona radicular, es simulado en función del uso de agua de la planta en cada capa de suelo con la ecuación:

$$\Delta RW_{i,\ell} = (\Delta RWT_i) \left\langle \sum_{\ell=1}^M u_{i,\ell} \right\rangle \quad [2.14]$$

donde: RW es el peso de la raíz en la capa del suelo l (t/ha), M es el número total de capas de suelo, y u es la tasa de uso de agua diaria en la capa de suelo (L) (mm/d).

La profundidad de enraizamiento, normalmente se incrementa muy rápido desde la profundidad de plantación hasta una p . máxima para un cultivo en específico. En muchos cultivos, la profundidad máxima normalmente se logra antes de la madurez fisiológica (Borg y Grimes, 1986). La profundidad de enraizamiento es simulada en función de las unidades calor y de la profundidad potencial de la zona radicular:

$$\Delta RD_i = 2.5(RDMX_j)(\Delta HUF_i), \quad RD_i \leq RZ_j \quad [2.15]$$

donde: RD es la profundidad de la raíz (m), $RDMX$ es la profundidad máxima de raíz (m) para un cultivo j en un suelo ideal, y RZ es la profundidad del perfil del suelo (m).

El rendimiento económico de la mayoría de los cultivos de granos, de tubérculos y de legumbres es constituido por un órgano reproductivo. Los cultivos tienen una variedad de mecanismos que aseguran que su producción no sea tan grande, para que se pueda soportar por los componentes vegetativos; ni tan pequeña, para asegurar la sobrevivencia de las especies. Como resultado, el índice de cosecha (rendimiento económico/biomasa aérea) constituye frecuentemente un valor relativamente estable a través de un amplio rango de condiciones ambientales.

En EPIC, el rendimiento del cultivo es estimado con el uso del índice de cosecha:

$$YLD_i = (HI_j)(B_{AG}) \quad [2.16]$$

donde: YLD es la cantidad de cultivo removido del campo (t/ha), HI es el índice de cosecha, y B_{AG} es la biomasa correspondiente a la parte aérea del cultivo j(t/ha).

El índice de cosecha se incrementa en forma no lineal desde un valor de 0 en la plantación, hasta de 1.0 en madurez, de acuerdo con la ecuación:

$$HIA_i = HI_j \left[\sum_{k=1}^i \Delta HUFH_k \right] \quad [2.17]$$

donde: HIA es el índice de cosecha en el día i, y HUFH es el factor de unidades calor que afecta al índice de cosecha.

El índice de cosecha con unidades calor es calculado con la ecuación:

$$HUFH_i = \frac{HUI_i}{HUI_i + \exp(6.50 - 10.0HUI_i)} \quad [2.18]$$

las constantes en la ecuación (3.21) son establecidas para permitir que $HUFH_i$ se incremente desde 0.1 a un $HUI_i = 0.5$, hasta 0.92 a un $HUI_i = 0.9$. Esto coincide con el desarrollo de los rendimientos económicos de los cultivos de granos, que producen los mayores rendimientos económicos en la segunda mitad de la estación de crecimiento.

Uso de agua.

El uso potencial de agua, E_p , es estimado como una fracción de la evaporación potencial, con el uso de la relación índice-de-área-foliar desarrollada por Ritchie (1972).

$$E_{Pi} = E_{oi} \left(\frac{LAI_i}{3} \right), \quad E_{Pi} \leq E_{oi} \quad [2.19]$$

donde: E_o es la evaporación potencial y LAI es el índice de área foliar, en un día i .

El uso potencial de agua desde la superficie del suelo hasta cualquier nivel de profundidad de raíz, es estimado con la función:

$$U_{Pi} = \frac{E_{Pi}}{1 - \exp(-\lambda)} \left\{ 1 - \exp \left[-\lambda \left(\frac{Z}{RZ} \right) \right] \right\} \quad [2.20]$$

donde: U_p es la tasa total de uso de agua (mm/d) a una profundidad Z (m) y en un día i , RZ es la profundidad de la zona radicular (m), y Λ es el parámetro de la distribución del uso de agua.

La cantidad utilizada en una capa en particular, puede ser calculada considerando la diferencia entre los valores de U_{pi} en los límites de la capa:

$$U_{p\ell} = \frac{E_{pi}}{1 - \exp(-\Lambda)} \left\langle \left\{ 1 - \exp \left[-\Lambda \left(\frac{Z_\ell}{RZ} \right) \right] \right\} - \left\{ 1 - \exp \left[-\Lambda \left(\frac{Z_{\ell-1}}{RZ} \right) \right] \right\} \right\rangle \quad [2.21]$$

donde: u_{pi} es la tasa potencial de uso del agua de la capa l (mm/d). La ecuación (2.21) se aplica a un suelo que proporcione condiciones pobres para el desarrollo radicular cuando Λ se establece a un valor alto como 10.0. El alto valor de Λ proporciona un elevado uso de agua a un nivel cercano a la superficie y un uso de agua inferior en la mitad más baja de la zona radicular.

Puesto que no existe una reserva para la compensación de déficits de agua en ninguna capa, se pueden llegar a indicar de manera incorrecta stressees considerables de agua, cuando se usa la ecuación (2.21). Para superar este problema, la ecuación (2.21) fue modificada para permitir que las plantas compensen la deficiencia de agua en una capa, con el uso de mayor cantidad de agua de otras capas. La compensación total puede ser complementada considerando la diferencia entre U_{pi} en la parte superior de la capa y la suma de uso de agua sobre la capa:

$$U_{P\ell} = \frac{E_{Pi}}{1. - \exp(-\wedge)} \left\{ 1. - \exp \left[-\wedge \left(\frac{Z_{\ell}}{RZ} \right) \right] \right\} - \sum_{k=1}^{\ell-1} U_k \quad [2.22]$$

donde: u_k es la tasa actual de uso de agua (mm/d) para todas las capas presentes sobre la capa l.

De esta manera, cualquier déficit puede superarse si la capa donde es encontrado tiene un almacenamiento adecuado de agua. Ni la ecuación 2.21 (no compensación), ni la ecuación 2.22 (compensación total), son satisfactorias para simular un amplio rango de condiciones de suelo. Sin embargo, una combinación de las dos ecuaciones, proporciona una función muy general del uso de agua:

$$U_{P\ell} = \frac{E_{Pi}}{1. - \exp(-\wedge)} \left\{ 1. - \exp \left[-\wedge \left(\frac{Z_{\ell}}{RZ} \right) \right] - (1. - UC) \left| 1. - \exp \left[-\wedge \left(\frac{Z_{\ell-1}}{RZ} \right) \right] \right| \right\} - UC \sum_{k=1}^{\ell-1} U_k$$

.....[2.23]

donde: UC varía en un rango de 0 a 1.0 y es el factor de compensación del déficit de agua. En suelos con un buen ambiente de enraizamiento UC= 1.0, lo que proporciona una compensación total. Por otro lado, en suelos con pobres condiciones, no se logra la compensación (UC=0). El procedimiento para la estimación de UC, es descrito en la sección de Obstáculos de Crecimiento de este capítulo.

El uso potencial de agua calculado con la ecuación 2.26 en cada capa, es reducido cuando el almacenamiento de agua en el suelo es menor del 25 por ciento del agua de suelo total disponible para la planta (Jones y Kiniry, 1986), con el uso de las ecuaciones:

$$u_{\ell} = u_{P_{\ell}} \exp \left\{ 5 \cdot \left[\frac{4 \cdot (SW_{\ell} - WP_{\ell})}{(FC_{\ell} - WP_{\ell})} - 1 \right] \right\}, \quad SW_{\ell} < \frac{FC_{\ell} - WP_{\ell}}{4} + WP_{\ell} \quad [2.24]$$

$$u_{\ell} = u_{P_{\ell}}, \quad SW_{\ell} \geq \frac{FC_{\ell} - WP_{\ell}}{4} + WP_{\ell} \quad [2.25]$$

donde: SW es el contenido de agua en la capa l del suelo en un día i (mm), y FC y WP son los contenidos de agua del suelo a capacidad de campo y a punto de marchitez permanente para una capa l.

Absorción de Nutrientes

Nitrógeno

Suministro y demanda. El uso de N por el cultivo es estimado con el uso de un enfoque de suministro y demanda. La demanda diaria de N por el cultivo, es la diferencia entre el contenido de N en el cultivo y el contenido ideal de N para dicho día. La demanda es estimada con la ecuación:

$$UND_i = (C_{NB})_i (B)_i - \sum_{k=1}^{i-1} UN_k \quad [2.26]$$

donde: UND es la tasa de demanda de N por el cultivo (kg/ha/d), c_{NB} es la concentración óptima de N en el cultivo (kg/t) para un día i , y UN es la tasa actual de absorción de N (kg/ha/d).

La concentración óptima de N en el cultivo, declina conforme se desarrolla el cultivo (Jones, 1983a), y es calculada en función de la etapa del cultivo con el uso de la ecuación:

$$c_{NB_i} = bn_1 + bn_2 \exp(-bn_3 HUI_i) \quad [2.27]$$

donde: bn_1 , bn_2 , y bn_3 son parámetros que expresan la concentración de N, y HUI (índice de unidades calor) es la fracción de la estación de crecimiento.

Se asume que el suministro de N por el suelo es limitado por el flujo de masa de NO_3-N hacia las raíces.

$$UN_{\ell,i} = u_{\ell,i} \left[\frac{WN_{O_3\ell}}{SW_{\ell}} \right]_i \quad [2.28]$$

donde: UN es la tasa de N suministrada por el suelo (kg/ha/d), WNO_3 es la cantidad de NO_3-N (kg/ha), SW es el contenido de agua en el suelo (mm), u es la tasa de uso de agua (mm/d), y el subíndice ℓ se refiere a las capas de suelo. La demanda total de flujo de masa es estimada con la suma de las demandas en las capas:

$$UNS_i = \sum_{\ell=1}^M UN_{\ell,i} \quad [2.29]$$

donde: UNS es la tasa de suministro de N del suelo hacia las plantas (kg/ha/d).

Puesto que la absorción del flujo de masa puede producir resultados cuestionables cuando las concentraciones de N son extremadamente altas o bajas, los valores de UN obtenidos de la ecuación (2.26) son ajustados por:

$$UNa_{\ell,i} = UN_{\ell,i} \left(\frac{UND_i}{UNS_i} \right), \quad UNa_{\ell,i} \leq WN03_{\ell,i} \quad [2.30]$$

La ecuación 2.28 asegura que la absorción actual de N, no pueda exceder la demanda de la planta cuando las estimaciones de flujo de masa son muy grandes. Esto también se mantiene para un suministro extendido de N cuando las estimaciones de flujo de masa son muy bajas a pesar de la disponibilidad de NO_3 .

Fijación. La fijación diaria de N es estimada como una fracción de la absorción diaria de este elemento, para las leguminosas:

$$WFX_i = FXR_i \cdot UN_i, \quad WFX \leq 6.0 \quad [2.31]$$

donde: WFX es la cantidad de N fijado (kg/ha) y FXR es la fracción de la absorción para un día i.

La fracción, FXR, es estimada en función de los contenidos de NO_3 y de agua en el suelo, y en función de la etapa de crecimiento:

$$FXr = \min(1.0, FXW, FXN) \cdot FXG \quad [2.32]$$

donde: FXG es el factor de etapa de crecimiento, FXW es el factor de contenido de agua en el suelo, y FXN es el factor de contenido de NO₃ en el suelo.

El factor de etapa de crecimiento es calculado con las ecuaciones:

$$FXG_i = 0.0, \quad HUI_i \leq 0.15, \quad HUI_i \geq 0.75 \quad [2.33]$$

$$FXG_i = 6.67HUI_i - 1.0 \quad 0.15 < HUI_i \leq 0.3 \quad [2.34]$$

$$FXG_i = 1 \quad 0.3 < HUI_i < 0.55 \quad [2.35]$$

$$FXG_i = 3.75 - 5.0HUI_i \quad 0.55 < HUI_i < 0.75 \quad [2.36]$$

donde: HUI es el índice de unidades calor para un día i.

El factor de contenido de agua en el suelo reduce la fijación cuando el contenido de agua en los primeros 0.3m es menor del 85 por ciento de la capacidad de campo, de acuerdo con la ecuación:

$$FXW_i = \frac{SW3_i - WP3}{0.85(FC3 - WP3)}, \quad SW3 < 0.85(FC3 - WP3) + WP3 \quad [2.37]$$

donde: SW3, WP3, y FC3 son los contenidos de agua en los primeros 0.3m del suelo en un día i, a punto de marchitez permanente, y a capacidad de campo.

La cantidad de NO₃ en la zona radicular determina el factor de NO₃ del suelo, FXN:

$$FXN = 0., \quad WN03 > 300.\text{kg/ha/m} \quad [2.38]$$

$$FXN = 1.5 - 0.005 \frac{WN03}{RD}, \quad 100 < WN03 \leq 300. \quad [2.39]$$

$$FXN = 1.0 \quad WN03 \leq 100.\text{kg/ha/m} \quad [2.40]$$

donde: WNO_3 es el peso de NO_3 en la zona radicular (kg/ha) y RD es la profundidad radicular (m).

Obstáculos Para el Crecimiento

El crecimiento y rendimiento potencial de un cultivo generalmente no se logra, y esto es debido a varios obstáculos impuestos por el ambiente que rodea a la planta.

El modelo estima la severidad de los estreses causados por agua, nutrientes, temperatura, aireación, y radiación. Las estimaciones (factores de estrés) están en un rango de 0.0 (las más severas) hasta 1.0, y los estreses afectan las plantas por varias vías. En EPIC, los estreses son considerados en la estimación de los obstáculos en la acumulación de biomasa, en el crecimiento de raíz, y en el rendimiento. El obstáculo en la acumulación de biomasa es calculado con el uso del valor más bajo de entre los factores de estrés estimados para agua, nutrientes (N y P), temperatura y aireación. El obstáculo para el crecimiento de la raíz es el mínimo de los estreses de temperatura de suelo, resistencia del suelo y toxicidad de aluminio.

A continuación se da una descripción de los factores de estrés involucrados en la determinación de cada obstáculo.

Biomasa.

La biomasa potencial predicha con la ecuación (2.4) es ajustada diariamente con la siguiente ecuación, considerando que cualquiera de los cinco factores de estrés de la planta sea menor de 1.0.

$$\Delta B = (\Delta B_p)(REG) \quad [2.41]$$

donde: REG es el factor de regulación de crecimiento del cultivo (el menor valor de entre los estimados para los factores de estrés).

Estrés hídrico

El factor de estrés hídrico es calculado de acuerdo al suministro y la demanda en la ecuación:

$$WS_i = \frac{\sum_{\ell=1}^M u_{i,\ell}}{E_{p_i}} \quad [2.42]$$

donde: WS es el factor de estrés hídrico, u es el uso de agua en la capa l, y E_p es la tasa de evaporación potencial del agua por la planta en el día i.

Esto coincide con el concepto de que el estrés por sequía limita la producción de biomasa en proporción a la reducción en la transpiración (Hanks, 1983).

Estrés de nutrientes

Los factores de estrés de N y P están basados en el ratio del N y P acumulados en la planta con relación a los valores óptimos. Los factores de estrés varían en forma no lineal desde 1.0 - a niveles óptimos de N y P - hasta 0 - cuando N ó P están a la mitad de su nivel óptimo (Jones, 1983). Para N, la ecuación ajustada es:

$$SN_{S,i} = 2 \left\{ \frac{\sum_{K=1}^i u_K}{(C_{NB})_i (B)_i} \right\} \quad [2.43]$$

donde: SN_S es un factor de ajuste para el factor de estrés de N, UN es la tasa de absorción de N por el cultivo (kg/ha/d), C_{NB} es la concentración óptima de N para el cultivo en un día i , y B es la biomasa acumulada (t/ha).

El factor de estrés de N es calculado con la ecuación:

$$SN_i = 1 - \frac{SN_{S,i}}{SN_{S,i} + \exp(3.39 - 10.93SN_{S,i})} \quad [2.44]$$

donde: SN es el factor de estrés de N para un día i .

Crecimiento de raíces

Como se describió en la ecuación (2.18), el crecimiento radicular es proporcional al uso del agua. El uso de agua de una capa de suelo es estimado en función de la profundidad de suelo, contenido de agua, y un factor de compensación de acuerdo a las ecuaciones (2.26) y (2.27). Los factores de estrés de resistencia del suelo, temperatura y toxicidad por aluminio son calculados de las propiedades del suelo. El menor de estos tres factores de estrés, después llega a constituir el factor de estrés de crecimiento radicular, obstaculiza el crecimiento radicular por su dominación sobre el factor de compensación de uso de agua.

Las temperaturas frías del suelo pueden limitar el crecimiento radicular, especialmente cuando las capas del subsuelo se calientan lentamente en la primavera (Taylor, 1983). El estrés de temperatura para cada capa del suelo es calculado con la sustitución de la temperatura de suelo presente en el centro de la capa, por la temperatura de la superficie del suelo, en la ecuación (2.45).

$$PAR_i = 0.5(RA)_i [1 - \exp(-0.65LAI)] \quad [2.45]$$

Numerosos estudios han mostrado que el crecimiento radicular es afectado por la resistencia del suelo. Las tres variables determinantes de la

tensión son: densidad aparente, textura y contenido de agua (Eavis, 1972; Monteith y Bonath, 1965).

Las tres variables son consideradas en la estimación del factor de estrés de resistencia en EPIC, con el uso de las siguientes ecuaciones:

$$AS_{\ell} = 0.1 - \frac{0.9BD_{\ell}}{BD_{\ell} + \exp(bt_1 + bt_2(BD_{\ell}))}, \quad [2.46]$$

donde: SS es el factor de resistencia del suelo en la capa I, BD es la densidad aparente del suelo (t/m^3) ajustada para contenido de agua y, bt_1 y bt_2 son parámetros dependientes de la textura de suelo. Los valores de bt_1 y bt_2 son obtenidos de soluciones simultáneas de la ecuación (2.50) con la sustitución de las condiciones frontera para estrés.

El límite inferior, donde esencialmente no ocurre estrés, es dado con la ecuación (Jones 1983b):

$$BDL = 1.15 + 0.00445SAN \quad [2.47]$$

Donde BDL es la densidad aparente cerca del límite inferior ($SS=1$) para un porcentaje particular de arena, SAN.

El límite superior es calculado de la ecuación(Jones 1983b):

$$BDU = 1.5 + 0.005SAN \quad [2.48]$$

donde: BDU es la densidad aparente cercana al límite superior ($SS \cong 0.2$) para un particular porcentaje de arena, SAN. Las ecuaciones para estimar bt_1 y bt_2 son:

$$bt_2 = \frac{\ln(0.112BDL) - \ln(8.BDU)}{BDL - BDU} \quad [2.49]$$

$$bt_1 = \ln(0.0112BDL) - (bt_2)(BDL) \quad [2.50]$$

Las ecuaciones anteriores aseguran que la ecuación (2.53) proporcione valores para SS de 1.0 a 2.0 para $BD=BDL$ y $BD=BDU$.

La densidad aparente ajustada para el contenido de agua es estimada con la ecuación de Grossman (Grossman *et al.*, 1985)

$$BD_{\ell,i} = BD3 + (BDD - BD3) \left\{ \frac{FC_{\ell} - SW_{\ell,i}}{FC_{\ell} - WP_{\ell} (4.083 - 3.33BDD^{1/3})} \right\} \quad [2.51]$$

donde: BD es la densidad aparente ajustada para el contenido de agua en el día i, BD3 es la densidad aparente a 33kPa de contenido de agua, BDD es la densidad aparente del suelo secado en la estufa, FC es la capacidad de campo, WP es el punto de marchitez permanente, y SW es el contenido de agua en el suelo para una capa (L) en un día (i).

Uso de agua.

El uso de agua por la planta, se rige por el factor de estrés de crecimiento radicular y por el factor de compensación de déficit de agua, de la ecuación 2.23. Considerando que el factor de compensación de déficit de agua, UC, permite una compensación total si el valor es de 1.0 y no permite compensación si es de 0.0; el valor de UC para cualquier capa es estimado como el producto de los factores de estrés de crecimiento para una capa y para todas las capas encima de ella, de acuerdo a:

$$UC_{\ell} = \prod_{k=1}^{\ell} RGF_k \quad [2.52]$$

de esta manera, un bajo valor de RGF_k reduce de gran manera la compensación de agua para una capa k y para todas las capas presentes debajo de k.

Las estimaciones finales de uso de agua para cada capa, son obtenidos por la multiplicación de los valores de u_{ℓ} en las ecuaciones (2.24) y (2.25) por RGF:

$$u_{\ell} = (u_{\ell})(RGF)_{\ell} \quad [2.53]$$

Rendimiento del cultivo.

El rendimiento del cultivo puede disminuir a través de reducciones inducidas por estrés hídrico en el índice de cosecha. La mayoría de los granos son particularmente sensibles al estrés hídrico desde un poco antes hasta un poco después de la antesis, cuando se determinan la mayoría de los componentes de rendimiento (Doorenbos y Kassam, 1979). Las condiciones óptimas para el crecimiento pueden reducir ligeramente el índice de cosecha si la acumulación de materia seca es grande y el rendimiento económico es limitado por el tamaño del producto.

RG= AB X HIA

HIA= Índice de Area Foliar

RG= Rendimiento de Grano

AB= Biomasa

El índice de cosecha es afectado por el estrés hídrico de acuerdo a la ecuación:

$$HIA_i = HIA_{i-1} - HI_j \left[1 - \frac{1}{1 + (WSYF_j)(FHU_i)(0.9 - WS_i)} \right] \quad [2.54]$$

Donde HIA es el índice de cosecha ajustado, WSYF es un parámetro del cultivo que expresa la sensibilidad a sequía, FHU es un función de la etapa del cultivo, y WS es el factor de estrés hídrico para un día i. Se puede notar que el índice de cosecha puede incrementarse ligeramente en días con valores de WS mayores a 0.9.

El factor FHU es estimado con la ecuación:

$$FHU_i = \text{sen} \left\{ \frac{\pi}{2} \left(\frac{HUI_i - 0.3}{0.3} \right) \right\}, \quad 0.3 \leq HUI_i \leq 0.9 \quad [2.55]$$

$$FHU_i = 0., \quad HUI_i < 0.3 \quad \text{O} \quad HUI_i > 0.9$$

De este modo, el estrés hídrico solamente afecta al índice de cosecha con valores entre 0.3 y 0.9 de madurez, ocurriendo su mayor efecto a un valor de 0.6.

$$RCT = MST \times HIA$$

$$HR = HT_k + (HT_{k-1} - HT_k) \exp(-PD_k / PD_{k-1}), \quad HT_k < HT_{k-1} \quad [2.66]$$

$$HR = HT_k, \quad HT_k \geq HT_{k-1} \quad [2.67]$$

MATERIALES Y MÉTODOS

Experimento de Campo

Localización

Esta investigación se llevó acabo en terrenos de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, ubicada en Buenavista, municipio de Saltillo, Coahuila y cuyas coordenadas geográficas son 25° 21'20" de Latitud Norte y 101° 01'30" de Longitud Oeste y a una altitud media sobre el nivel del mar de 1743 m.

Clima

En esta localidad el clima predominante, de acuerdo a la clasificación de Köppen modificada por E. García (1973), es el de tipo BW h° (x') (e) que equivale a un clima muy seco, semicálido, con invierno fresco, extremoso y verano cálido, lluvias intermedio entre verano e invierno, con una precipitación media anual de alrededor de 443 mm y evaporación promedio anual de 2167 mm.

Suelo

El suelo es de origen aluvial, pertenece a la unidad taxonómica faeozem calcárea de acuerdo a CETENAL (1976), La pendiente del terreno es de 0.68 por ciento, la textura es migajón arcilloso con un contenido de materia orgánica del 2.43 por ciento, medianamente ricos en nitrógeno y fósforo, y rico en potasio; el pH es ligeramente ácido(6.33) y la densidad aparente es de alrededor de 1.17 g cm^{-3} . Las constantes específicas del suelo de capacidad de campo y punto de marchitez permanente promedio del perfil fueron de 26.59 y fue:

$\%V_r = 1.94 + 0.86 * (\%V_{dis})$, con un coeficiente de determinación (r^2) de dicha ecuación fue de 0.9

Donde:

$\%V_r$ = Es el porcentaje de humedad del suelo real (%)

$\%V_{asp}$ = Es el porcentaje de humedad medido por el aspensor de neutrones (%)

Po el híbrido AN-447, cuyas características agronómicas principales son: altura de planta 2.8 m, altura de mazorca 1.3 m, la floración masculina de 75 a 80 días, de 140 a 150 días a madurez fisiológica, el color de la hoja es verde claro, forma de la mazorca cilíndrica y el tipo de grano es blanco, semidentado.

Tratamientos evaluados

El estudio consistió en evaluar tres condiciones de humedad de suelo con la finalidad de someter a la planta a diferentes grados de estrés hídrico durante su ciclo vegetativo, para así evaluar el índice de área foliar, la acumulación de materia seca y nitrógeno en la parte aérea de la planta y rendimiento de grano. Estos tratamientos fueron:

Tratamiento 1. Tratamientos ETM-REF(Evapotranspiración Máxima del Cultivo-Referencia), en el cual el cultivo se desarrolló bajo condición de menor déficit hídrico en el suelo, con la finalidad de satisfacer las necesidades máximas de consumo de agua por la planta, para lo cual se aplicaron 9 riegos durante el desarrollo del cultivo, en el Cuadro 3.1., se presenta la distribución de los riegos durante el ciclo del cultivo y la cantidad de agua aplicada al momento del riego.

Tratamiento 2. Se aplicaron 6 riegos durante el desarrollo del cultivo, la distribución de riegos durante el ciclo del cultivo y la cantidad aplicada se presentan en el Cuadro 3.1.

Tratamiento 3. Se aplicaron 4 riegos durante el ciclo del cultivo, la distribución de riegos y cantidad de agua aportada se presenta en el Cuadro 3.1

A los tres tratamientos se le aplicó un riego con lámina igual de 13 cm antes de la siembra.

Cuadro 3.1. Calendario de riegos de auxilio aplicado a los tratamientos de evaluados.

Nº Riegos	Tratamiento 1		
	DDS	Etapas (Nomenclatura)	Lámina de riego (mm)
1	17	V5	30.00
2	20	V6	30.00
3	39	V10	32.00
4	58	V14	72.00
5	70	V15	84.50
6	79	VT	43.10
7	91	R1	41.00
8	104	R1	32.00
9	110	R2	20.00
Tratamiento 2			
1	16	V5	20.00
2	20	V6	20
3	46	V12	23
4	59	V14	52.00
5	65	V15	96.7.0
6	77	VT	34.50
Tratamiento 3			
1	16	V5	20
2	35	V8	20.00
3	59	V14	70.00
4	72	V15	80.50

Establecimiento del Experimento

El experimento se estableció en una superficie de 420 m² (35 x 12 m). La labor de barbecho se efectuó el 8 de mayo. El riego de presiembra se realizó el 15 de mayo, aplicándose una lámina de 13 cm.

La siembra se realizó el 22 de mayo de 1998, previamente se rastreó el suelo, se sembraron 10 plantas por metro lineal a una separación de 0.85 m, para posteriormente aclarar. Al momento de la siembra se fertilizó con la dosis 80-104-30, siendo la fuente el sulfato de amonio (20.5-0-0), MAP (11-55-0) y sulfato de potasio (0-0-50).

Cada tratamiento estuvo representado en una parcela de 120 m² (12 x 10), constando de 14 surcos de 10 m de largo, las parcelas estuvieron separadas por una franja de 2.5 m.

Manejo del cultivo

El día 16 de Junio se efectuó el aclareo de plantas, dejando 6 plantas por metro lineal para una población de 70, 200 pl/ha.

La labor de porque se efectuó el día 3 de Julio, cuando el cultivo se encontraba en la etapa de once hojas (V11), previo a la labor se realizó la

segunda incorporación de fertilizante con la dosis 100-0-40, como fuente el sulfato de amonio (20.5-0-0) y el sulfato de potasio (0-0-50).

Medición de la humedad

Se determinaron las constantes de humedad del suelo capacidad de campo y punto de marchitez permanente por estrato mediante el método de las ollas de presión (Cuadro A.1)

Para la medición del contenido de humedad del suelo, se utilizó el método del aspersor de neutrones (Troxler-4300).

Anteriormente se realizó la calibración del aparato, para esto se instalaron dos tubos de aluminio, enterrándose a una profundidad de 120 cm, en una superficie de un metro cuadrado por tubo, uno de los tubos se encontraba en condiciones de capacidad de campo (punto húmedo), el otro tubo se encontraba en punto de marchitez permanente (punto seco), Se tomaron medidas de humedad con el aspersor de neutrones y con el método gravimétrico en estrato de 20 en 20 cm hasta llegar a los 120 cm, con estos puntos se realizó una regresión lineal para calibrar el aparato, de tal manera que permitió detectar las constantes de capacidad de campo y punto de marchitez permanente para el suelo del área experimental. Se obtuvieron dos ecuaciones, una donde representa al primer estrato (0 - 20 cm) y la otra

ecuación representa a los demás estratos (20-40, 40-60, 60-80, 80-100, 100-120 cm). La ecuación para el primer estrato fue:

$$\%Vr = 9.35 + 0.76 * (\%Vdis), \text{ con un coeficiente de determinación } (r^2)$$

de dicha ecuación fue de 1

La ecuación para los demás estratos fue:

$$\%Vr = 1.94 + 0.86 * (\%Vdis), \text{ con un coeficiente de determinación } (r^2)$$

de dicha ecuación fue de 0.9

Donde:

$\%Vr$ = Es el porcentaje de humedad del suelo real (%)

$\%Vasp$ = Es el porcentaje de humedad medido por el aspersor de neutrones (%)

Posterior a esto se instalaron 3 tubos de acceso de aluminio de dos pulgadas de diámetro (uno por tratamiento), se instalaron a una profundidad de 120 cm, la parte superior del tubo se cubrió con una tapadera de plástico para evitar la entrada de agua de lluvias o cualquier objeto que perturbe el funcionamiento del aspersor de neutrones, durante el ciclo del cultivo se realizaron mediciones de humedad en 34 días a intervalos de 4 a 5 días, los

valores de contenido de humedad base volumen se presentan en los cuadros A.5, A.6 y A7.

Control de Riegos

Los riegos se aplicaron una vez que se presentaron las condiciones de humedad permitidas para los tratamientos, los estratos de 0-20cm hasta llegar a 120 cm se utilizaron como indicador de riego. Para determinar la lámina de riego a aplicar se utilizó la siguiente ecuación:

$$LR = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (CC_i - HR_i) P_i}{100}$$

donde:

Lr = Es la lámina de riego por aplicar (cm)

i = número de estratos (6 de 0 a 120 cm)

CC_i = Contenido de humedad en el por ciento volumen a capacidad de campo en el estrato i

Hr_i = Contenido de humedad en por ciento volumen en el momento de muestreo en el estrato i

P_i = Profundidad del estrato i (20 cm)

Los riegos se efectuaron por aspersion cada parcela contaba con 4 aspersores colocados en las esquinas de la parcela, y regaban sectorialmente en un ángulo de 90°, el alcance de cada aspersor era de 10 m. Se colocaron pluviómetros en el interior de la parcela para llevar un mejor control de la cantidad de agua aportada por los aspersores.

Información Climática

Fue proporcionada por la estación del Servicio Meteorológico Nacional ubicado en terrenos de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, considerando el período en que se desarrolló el experimento de campo (Mayo a Octubre de 1998), se consideraron las siguientes lecturas:

- Humedad Relativa.
- Temperatura máxima, mínima y media.
- Velocidad del viento a dos metros de altura.
- Insolación (cantidad de horas que alumbra el sol).
- Precipitación pluvial.
- Evaporación libre del agua (tanque evaporímetro tipo A).

Durante el desarrollo del ciclo del cultivo se presentaron tres granizadas en la fechas 29 de junio 28 de julio y 23 de agosto.

Ajuste de datos observados

Para el caso de la acumulación de materia seca total, índice de área foliar y acumulación de nitrógeno se utilizó un polinomio de tercer grado para ajustar los datos observados, siendo de la forma: $Y = \beta_0 + \beta_1X + \beta_2X^2 + \beta_3X^3$

Donde:

$\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ = Coeficientes parciales de regresión.

X = Días después de la siembra.

VARIABLES PARA VALIDAR EL MODELO

Las variables del cultivo para validar el modelo fueron índice de área foliar, acumulación de materia seca, y nitrógeno en la parte aérea y rendimiento de grano, el procedimiento para determinar cada una de las variables es el siguiente: Del día 21 DDS hasta el día 158 se realizaron 12 muestreos de plantas a un intervalo promedio de 11 días. En cada muestreo se colectaron 6 plantas por tratamiento y se identificó la etapa de desarrollo, del cultivo (número de hojas y aparición de otros órganos).

Las plantas fueron llevadas al laboratorio donde se separaron las hojas, se midió el área de cada hoja en un integrador automático marca Denko modelo AAM-7. Una vez conocida el área foliar por planta, se sumó el de las 6

plantas y se dividió entre 0.85m², que es el área ocupada por ellas en el campo, el resultado representa el Índice de Área foliar (IAF) del cultivo.

$$\text{IAF} = \frac{\text{Área foliar de la planta}}{\text{Área de suelo que ocupa la planta}}$$

Posteriormente a la medición del área foliar las plantas completas se introdujeron a la estufa con una temperatura de 60 °C durante 48 horas, para luego pesarlas y obtener el peso seco o contenido de materia seca por planta

Una vez que se obtuvo la materia seca, se molieron las muestras y se procedió a determinar el contenido de nitrógeno en por ciento por el método de Kjeldhal.

Para evaluar el rendimiento de grano, de las parcelas se recolectaron separadamente las mazorcas en una superficie de 2 m², representando cada área una repetición de (5), Posteriormente se desgranó la mazorca, se pesó el grano, se le determinó el contenido de humedad y se corrigió el peso a un contenido de humedad en el grano de 14 por ciento.

Entradas de Datos al modelo

EPIC simula una gran cantidad de números de diferentes fenómenos, pero como un resultado requiere un gran número de entradas de datos. Los cuadros

3.2 y 3.3 presentan parte de los requerimientos de datos, es decir aquellos requeridos en orden para caracterizar el suelo y los cultivos.

El problema concerniente a los parámetros del cultivo es diferente.

El gran número de parámetros (de diferentes cultivos), los cuales son disponibles hacen esto posible para el usuario para llevar a cabo su simulación. Así mismo, la extensión de los parámetros usados para caracterizar un cultivo hace esto posible para distinguir entre diferentes variedades de un cultivo, o para simular diferentes condiciones de crecimiento tales como densidad bajo condiciones irrigadas y no irrigadas.

Cuadro 3.2. Entrada de datos de suelo al modelo.

	Definiciones	Unidades	Rango típico	Valor utilizado
SALB	Albedo de suelo	---	0.05-0.20	
ZMX	Máxima profundidad de suelo	m	0-100	
Z	Profundidad de la superficie al fondo de la capa del suelo	m	0.01-3	
80	Densidad aparente de la capa del suelo (33 kPa)	t m ⁻³	0.25-2.3	
U ¹	Punto de marchitez permanente (1500 kPa para algunos suelos)	m m ⁻¹	0.01-0.65	
FC ¹	Capacidad de campo k (EE kPa para algunos suelos)	m m ⁻¹	0.05-0.8	
SAM	Contenido de arena	%	0-100	51
SIL	Contenido de limo	%	0-100	16
WW ¹	Concentración de materia orgánica	g t ⁻¹	20-5000	
PH	pH del suelo	---	4-9	6.8
SMB ¹	Bases de sol	c ^{mol} kg ⁻¹	0-150	
CBNM	Carbón orgánico	%	0.05-5.0	
CAC	Carbonato de calcio	%	0-100	62
CAC ¹	Capacidad de intercambio cationico	c ^{mol} kg ⁻¹	0-150	
FOK ¹	Contenido de fragmentos gruesos	%	0-30	
WMO3 ¹		g t ⁻¹	0-30	
AP ¹	concentración de P asimilable	g t ⁻¹	0-50	
RSD ¹	Residuos de cultivos	t ha ⁻¹	0-15	
800 ¹	Densidad aparente (horno seco)	t m ⁻³	0-2.5	1.24
PSP ¹	Relación de absorción de P	---	0-0.75	
SC ¹	Conductividad saturada	mm h ⁻¹	0-2.5	
RT ¹	Tiempo de viaje de flujo a la subsuperficie	d	0-1000	
WP ¹	Concentración de P orgánico.	G t ⁻¹	10-2000	

Cuadro 3.3. Entrada de datos del cultivo para el modelo.

Var	Definiciones	Unidades	Rango típico	Valor utilizado
PMMC	Nombre del cultivo (4 características empezando en columnas 5)	---	---	
WA	Relación energía-biomasa	Kgha-1Mj-1	10-50	45
HI	Índice de cosecha	Kg kg-1	0.01-0.95	0.5
TB	Temperatura opcional para crecimiento de planta	°C	10-30	25
TG	Temperatura mínima para crecimiento de planta	°C	0-12	8
DMLA	Índice máximo de área foliar	---	0.5-10	5.5
DLAI	Fracción de estación de crecimiento cuando el área foliar empieza a declinar	---	0.4-0.99	0.80
DLAP (1,2)	Dos puntos sobre el desarrollo del área foliar de optima curva desarrollada. Números. Decimales son porcentos de estación de crecimiento Números después. Decimales son fracciones de índice máximo de área foliar.	%	0-100	15.05 50.90
RLAD	El índice de área foliar declina es un parámetro de relación.	---	0-10	1.0
RGMD	La declinación de rotación de energía-biomasa es un parámetro de relación.	---	0-10	1.0
ALT	El índice de tolerancia de Aluminio(1-sensible;5 tolerante)	---	1-5	3.0
CPF	La concentración critica de P asimilable más bajos reduce la absorción de P:	G t-1	15-25	
CAF	Factor de aireación critico	---	0.75-1.0	0.85
SDW	Relación de plantula	Kg ha-1	3-100	20.0
MMX	Máxima altura del cultivo	M	0.1-3	3.0
RDMX	Máxima profundidad de raíz	M	0.5-3	2.0
PHU ¹	Potencial de unidades calor	°C	500-3000	
CVM	Máximo valor de factor C para erosión de agua	---	0.001-0.5	0.20
CNY	Fracción de N en producción	Kg ha-1	0.015-0.65	0.0175

Continuación.....

HE	Eficiencia de cosecha	---	0.5-0.98	
CPY	Fracción de fósforo en producción	Kg ha-1	0.002-0.0095	0.0025
PST	Plagas (insectos, malezas etc.)	---	0.05-1.0	0.60
COS	Costo de semilla	\$ ha-1	0.1-100	2.510
D				
PRY	Precio por producción	\$ ha-1	0.01-1.5	
WCY	Fracción de agua en producción	---	0.05-0.80	0.15
BN ₁	Parámetro de absorción de nitrógeno(fracción de N en planta en emergencia)	---	0.04-0.06	0.044
BN ₂	Parámetro de absorción de nitrógeno (fracción de N en planta en 0.5 de madurez)	---	0.015-0.03	0.0164
BN ₃	Parámetro de absorción de nitrógeno (fracción de N en planta en madurez)	---	0.01-0.27	0.0128
BP ₁	Parámetro de absorción de P (P fracción en planta en emergencia)	---	0.006-0.009	0.0062
BP ₂	Parámetro de absorción de P (P fracción en planta en 0.5 de madurez)	---	0.002-0.005	0.0023
BP ₃	Parámetro de absorción de P (P fracción en planta en madurez)	---	0.0015-0.0035	0.0018
BW ₁	Factor de erosión de viento para condición de vida	---	0.4-3.5	0.433
BW ₂	Factor de erosión de viento para condición de muerte	---	0.4-3.5	0.433
BW ₃	Factor de erosión de viento para residuo	---	0.2-3.5	0.213
IOC	Nombre de categoría de cultivo (1- vara estación anual Lenguaje: 2- estación anual fría: 3- perinial Lenguaje: 4- vara estación anual: 5- estación fría Anual; 6- perinial; 7- arboles; (Si IOC-7, proceder Los digitos indican los años entre plantado y cosecha))	---	1-1007	
FRST	Dos puntos sobre el daño de helada (1,2) curva. Nombres antes de °C		-30-0	5.010 15.95
	Decimal es temperatura mínima diaria			
	Números después de decimal son fracciones de producción	---	0-1	
	perdida para dar temperatura mínima			

RESULTADOS Y DISCUSION

Para la presentación y discusión de los resultados obtenidos mediante la presente investigación, el orden a considerar será el análisis de la humedad del suelo, índice de área foliar, acumulación de materia seca total, acumulación de nitrógeno en la planta y, rendimiento de grano, simulación del índice de área foliar, acumulación de materia seca y acumulación de nitrógeno mediante el modelo propuesto y su capacidad de predicción.

Dinámica de la Humedad del Suelo.

Los contenidos de humedad durante el ciclo de cultivo para los tres tratamientos se presentan a continuación.

Al tratamiento ETM-REF, se le aplicaron un total de 9 riegos de auxilio, iniciándose a los 17 días después de la siembra y concluyendo a los 105 días, la lámina total fue de 384.6 mm, la distribución fue: seis riegos durante el periodo de siembra a floración (VT), uno de floración a estado lechoso (R1) y dos riegos del estado lechoso a madurez fisiológica (R6) como se muestra en la Figura 4.1.

Es evidente que para este tratamiento los niveles de déficit hídrico en los diferentes estratos fueron bajos de acuerdo a la tendencia presentada manteniendo al cultivo en condiciones favorables de humedad de suelo, para satisfacer las necesidades máximas de consumo de agua. Como se observa en Figura 4.1 la humedad del suelo siempre se mantuvo arriba del 50 por ciento de la humedad aprovechable, lo que significa que el cultivo estuvo sin condición de déficit hídrico.

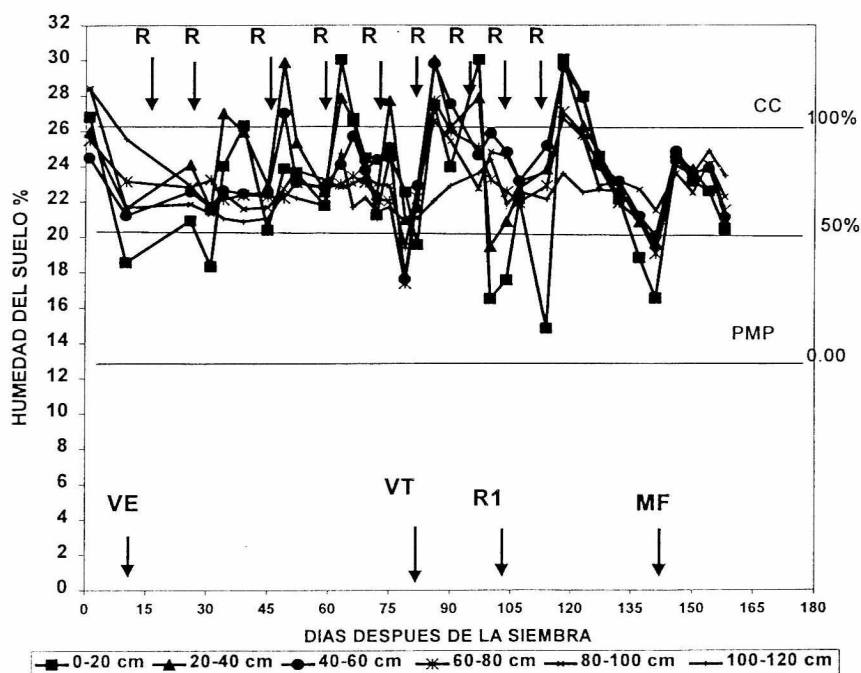


Figura 4.1. Comportamiento de la humedad del suelo y riegos (R) en el tratamiento ETM-REF, durante el desarrollo del cultivo.

Para el tratamiento dos fue necesario aplicar cinco riegos de auxilio, iniciándose a los 17 días y aplicando el último a los 77 días después de la siembra, con una lámina total de 246.2 mm, distribuidos cinco de siembra a floración masculina (VT) y uno de floración a estado lechoso (R1), durante el periodo de estado lechoso a madurez fisiológica no se aplicaron riegos, debido a que se sometió al cultivo estrés hídrico en las etapas finales a partir de los 115 DDS, donde se observa que la humedad del suelo se mantuvo por debajo del 50 por ciento de la humedad aprovechable (Fig. 4.2), por otra parte se observa que déficit en el contenido de humedad de suelo fue mayor en los estratos superiores, causado principalmente por la evaporación directa del suelo, pero a partir de los 40 cm hacia abajo, el déficit tiende a ser más menor debido a que las pérdidas en los estratos más profundos son ocasionado por la extracción radical, este comportamiento coincide con el publicado por Maciel (1992).

Figura 4.2. Comportamiento de la humedad del suelo y riegos (R) en el tratamiento 2, durante el desarrollo del cultivo.

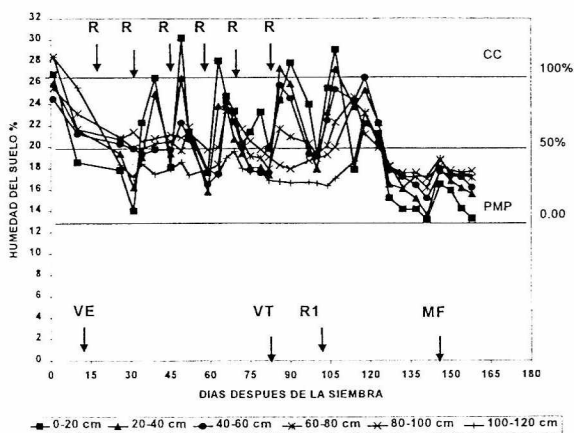
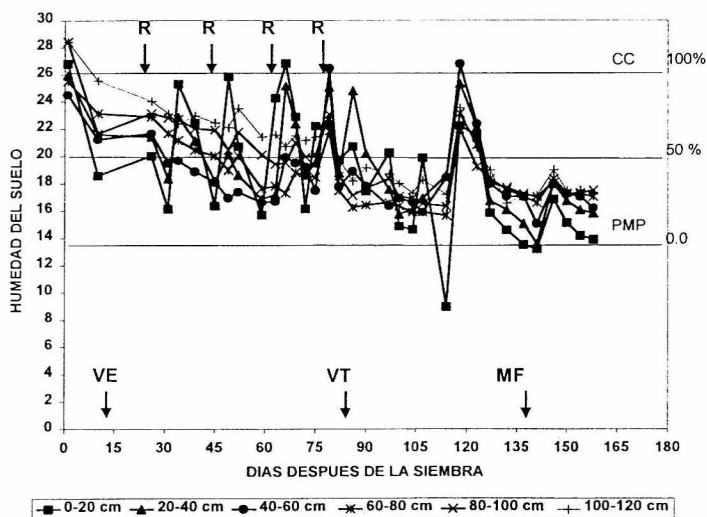


Figura 4.3. Comportamiento de la humedad del suelo y riegos (R) en la parcela 3 durante el desarrollo del cultivo.



La gráfica también muestra que después de los 120 DDS, el déficit hídrico se acentúa en los dos primeros estratos, el contenido de humedad descende hasta PMP, y todo el perfil tiene un contenido inferior al 50 por ciento de la humedad disponible.

En la parcela 3 el cultivo estuvo sometido a mayor déficit hídrico (Fig. 4.3), es decir donde únicamente se le aplicaron cuatro riegos en la etapa vegetativa, con una lámina total de 190.5 mm como se observa en el Cuadro 3.1 En la mayor parte del ciclo el contenido de humedad en los primeros tres estratos fue inferior al 50 por ciento de la humedad disponible se denotan dos periodos donde el déficit hídrico en el suelo se acentuó, en el periodo comprendido del día 80 al 110 DDS y del 125 al 150 DDS, el contenido de

humedad de todo el perfil fue inferior al 50 por ciento de la humedad disponible, los primeros estratos descendieron hasta "PMP".

El contenido de humedad de las diferentes parcelas muestra en forma general evidencias que de acuerdo a los criterios establecidos para evaluar los distintos grados de estrés hídrico, las plantas fueron sometidas a diferentes condiciones de humedad del suelo, se presentaron periodos de sequía crítica en la etapa de llenado de grano y la madurez fisiológica como se observa en la Fig. 4.3, en estas etapas pueden existir reducciones considerables en la repuesta de la planta en función de la intensidad y de la etapa fenológica en que se presente (Palacio, 1980; Frey, 1982 y Rodríguez, 1985). Es importante señalar que durante el desarrollo del experimento la aportación de las lluvias fue de 437.2 mm (Cuadros A.2 y A.3) principalmente en los meses de julio y septiembre que coincidieron con los periodos del 38 al 69 DDS y del 99 al 129 DDS, la lluvia tuvo un efecto favorable por que amortiguó el déficit hídrico provocado por la supresión de riegos en los tratamientos 2 y 3.

Indice de área foliar

La evolución de esta variable se presenta la Figura 4.4, en función de los días transcurridos después de la siembra, para las tres condiciones de humedad. Observando el comportamiento de los tratamientos hasta los 21 (DDS) el valor de IAF es de 0.13 para el ETM-REF, 0.32 para el tratamiento 2 y 0.16 para el tratamiento 3., estos valores indican que las plantas de los

tratamientos han tenido lento crecimiento durante este periodo, y las tasas de IAF son de 0.006, 0.015 y 0.007m² m⁻² sup. de hoja día⁻¹, respectivamente como se observa en el Cuadro 4.1.

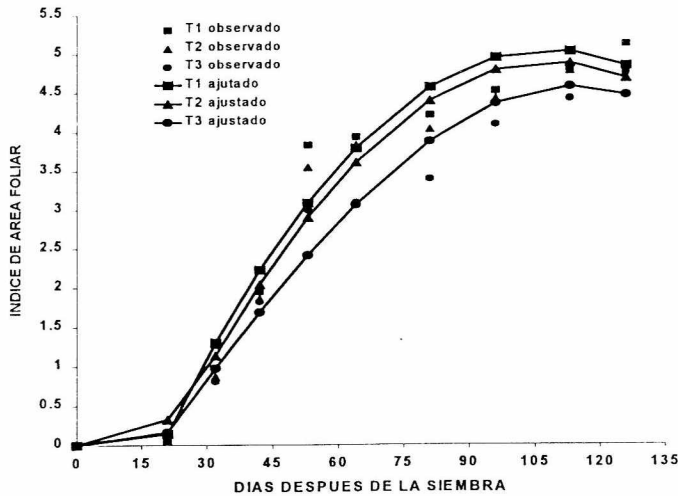


Figura 4.4. Valores de índice de área foliar observados y ajustado para las tres condiciones de humedad de suelo, durante el ciclo del cultivo.

Cuadro 4.1 Tasas promedio de incremento de índice de área foliar en las tres condiciones de humedad de suelo, dado en superficie de hoja por día.

DDS	Tasa promedio de incremento de IAF (m ² / m ² sup/día)		
	ETM-REF	T2	T3
0 – 21	0.0061	0.015	0.0076
21 – 81	0.076	0.073	0.0645

T1= Tratamiento ETM-REF

T2 =Tratamiento en el que se aplicó riegos de auxilio en las etapas vegetativas y floración

T3 = Tratamiento en el que aplicó riegos de auxilio en la etapa vegetativa

Posterior a esta fecha se denota acelerado crecimiento en ambos tratamientos, el IAF se incrementa fuertemente debido a la generación progresiva de nueva hojas y la expansión de las células en estos órganos. A los 81 DDS el IAF alcanzan un valor de 4.56 para el ETM-REF, 4.39 para el tratamiento 2 y 3.87 para el tratamiento 3, la tasa promedio de IAF es de 0.076, 0.073 y 0.064 m² hoja m⁻² sup día⁻¹, esto demuestra que el tratamiento ETM-REF supera en incremento de superficie foliar al resto de los tratamientos. Siendo 12 veces mayor que el periodo anterior (los primeros 21 días).

Es necesario señalar que un elevado IAF es necesario para que el cultivo durante el periodo reproductivo tenga una mayor fotosíntesis y por lo tanto haya mayor producción de fotosintatos que son los que formaran nuevas estructuras (hojas, tallos) y en la etapa de formación de fruto emigran hacia el grano para incrementar su peso. En esta condición de humedad de suelo el valor más alto de índice de área foliar lo obtiene la parcela ETM-REF de 5.02 seguido del tratamiento 2 con 4.87 y por último el tratamiento 3 con 4.57 ambos fueron alcanzados a los 113 DDS.

Acumulación de Materia Seca

Durante el ciclo del cultivo se realizaron un total de 12 muestreos para determinar el peso seco en kilogramo por hectárea, en los tres tratamientos.

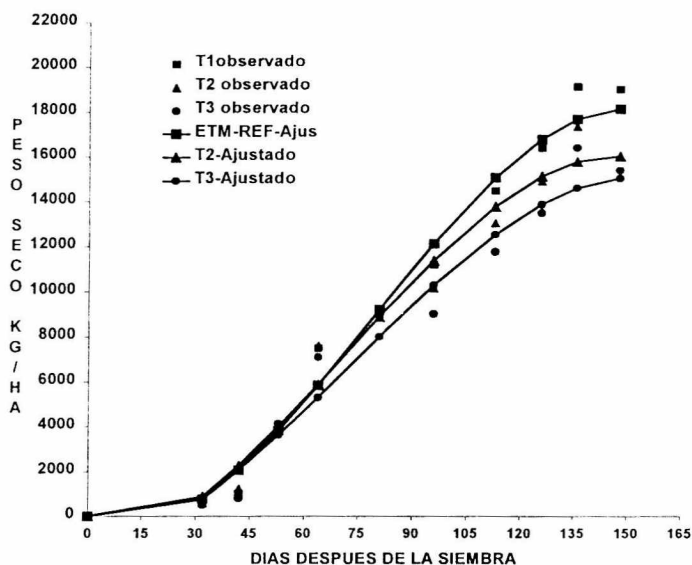


Figura 4.5. Acumulación de materia seca total durante el ciclo del cultivo del Maíz, en las tres condiciones de humedad del suelo evaluado.

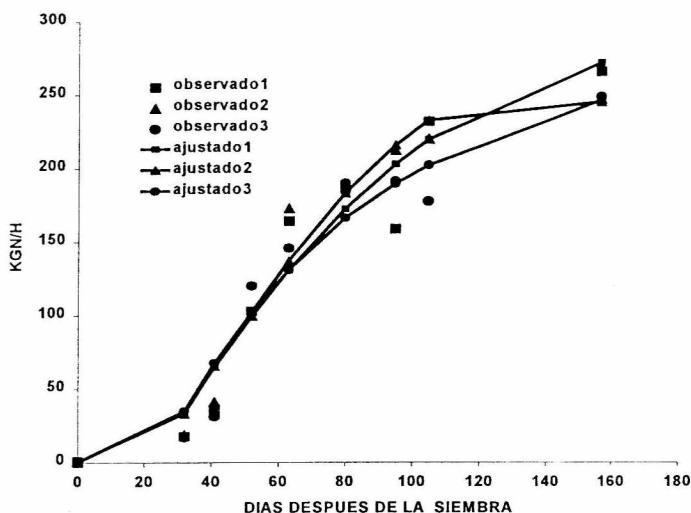
El peso seco total de la planta en kg ha⁻¹ es presentado en la Figura 4.5., en la cual se muestran tanto las líneas ajustadas por tratamiento así como los valores observados, en la que es evidente que el tratamiento ETM-REF fue el que acumuló mayor peso seco con un máximo de 19,004.26 kg/ha, seguido por el tratamiento 2, la cual se le aplicó riegos de auxilio en dos etapas (Vegetativa y inicio de floración), con 17,356.20 kg/ha y por último le siguió el tratamiento 3, que obtuvo 16,405.24 kg/ha.

Estas diferencias son debidas a que el T2 a partir de los 80 días estuvo sometido a mayor déficit hídrico que el T1 y en el T3 el déficit fue más acentuado que ambos tratamiento (T1 y T2), como se citó anteriormente.

Acumulación de nitrógeno

En la Figura 4.6 se muestra la acumulación de nitrógeno en la parte aérea de la planta. Hasta el día 41 DDS la acumulación fue de 36.5, 41.37 y 31.3 kg/ha para los tratamientos 1,2 y 3 respectivamente con tasas de 1.1, 1.25 y 0.94 kg/ha/día. Posterior a esta fecha se denota un fuerte incremento en la acumulación de nitrógeno, a los 63 DDS la acumulación es de 164.25 172.9 y 146.0 kg/ha con tasas de 5.80; 5.97 y 5.21 kg/ha/día para los tres tratamientos (1,2 y 3). Después se denota que la tasa de incremento disminuye, a los 105 DDS el contenido es de 232.30, 220.4 y 172 kg/ha con una tasa en el periodo 1.43, 1.13 y 0.75 kg/ha/día. Detectándose el efecto de los tratamientos sobre la acumulación de nitrógeno, hasta el día 105 el tratamiento 3 sometido a condiciones de mayor déficit hídrico, acumula menor cantidad de nitrógeno.

Figura. 4.6 Datos observados y ajustados de acumulación de nitrógeno en la parte aérea de la planta, en las tres condiciones de humedad de suelo, ETM-REF, T2 y T3, durante el desarrollo del cultivo.



Rendimiento de grano

En base a las diferentes condiciones de humedad del suelo para cada tratamiento la resultante integradora es el rendimiento económico. Se establece que de acuerdo a la prueba de la diferencia mínima significativa (DMS) en el Cuadro 4.2, se detectaron diferencias estadísticas entre los tratamientos ETM-REF con el tratamiento 3, pero ambos fueron similares con el tratamiento 2.

Cuadro 4.2. Comparación de las medias de rendimiento de grano mediante la prueba de la diferencia mínima significativa (DMS).

Tratamientos	Medias kg ha ⁻¹	Orden
ETM-REF	10554.00	A
T2	9612.00	AB
T3	8740.00	BC

Valor del DMS = 1501

Significancia al 0.05 de Probabilidad

Coefficiente de variación = 16.98%

Las medias obtenidas para la variable antes mencionada se muestran en el Cuadro 4.2, en el cual se puede observar lo siguiente: el tratamiento sobre saliente fue aquel cuyo nivel de humedad fue optima (ETM-REF) con un promedio de 10,554 kg por hectárea, indicando con ello que las plantas desarrolladas bajo estas condiciones translocaron mayor cantidad de fotosintatos hacia la mazorca que el resto de los tratamientos, en tanto que en los tratamientos 2 y 3 el rendimiento fue de 9612 y 8740 kg ha⁻¹ respectivamente. El peso seco total de la planta presentó la misma tendencia con el régimen de humedad del suelo, es decir 19,123.12, 17,356.20, y 16,405.24 kg/ha para los tratamientos ETM-REF, T2 y T3, los cuales muestran que el estrés hídrico al que fueron sometidos los tratamientos 2 y 3 en las etapas de floración y formación de grano influyeron en el rendimiento de materia seca y de grano, siendo el efecto del estrés hídrico más acentuado en el tratamiento 3 que estuvo bajo condiciones mas criticas de déficit de agua en el suelo.

Simulación

Una vez que el modelo fue alimentado con las variables de entrada y con la ayuda del programa computacional realizado para mecanizar el modelo EPIC, se procedió a correr dicho programa para las tres condiciones de humedad de suelo evaluada en campo, mediante el uso de la información mostrada en los Cuadro A.2.

Aquí únicamente serán presentadas y discutidas las variables de índice de área foliar, acumulación de materia seca y acumulación de nitrógeno en la planta y rendimiento de grano y la capacidad de predicción del modelo.

Índice de área foliar simulado.

En cuanto al índice de área foliar para las tres condiciones la tendencia de los valores simulados y observados se presentan en la Figura 4.7. la cual muestra que el modelo sobre estima el IAF. En la Figura 4.8 la magnitud de las desviaciones superiores a 20 por ciento son para valores menores de IAF que corresponden al inicio del cultivo, para valores mayores de IAF las desviaciones se encuentran dentro de un rango de ± 15 por ciento, y en su mayoría no sobrepasan el 20 por ciento, a los 126 DDS, las desviaciones entre el IAF simulado y observado fue de un ± 10.74 por ciento para el tratamiento 1, de un ± 14.93 por ciento y ± 3.44 por ciento para los tratamientos 2 y 3 respectivamente

Cabelguenne *et al.*, (1986) citan que una desviación de ± 15 por ciento es el límite de la variabilidad corriente en experimentación agrícola y que este rango de desviación debe ser considerado como un límite confiable de simulación.

Es importante señalar que durante el desarrollo del experimento se presentaron tres granizadas, que afectaron a las plantas, provocando el rasgamiento de las hojas y por lo tanto afectó el crecimiento de las plantas y dificultó la medición del área foliar en las hojas rasgadas. La primera granizada ocurrió a los 28 DDS, esta podría ser una de las causas que motivaron que al inicio del cultivo se presentaran las mayores desviaciones en por ciento, aunque en valor absoluto no sea muy representativas por el tamaño de la planta. Tomando en cuenta lo anterior se puede considerar que el modelo simuló convenientemente el IAF, hasta el día 130 DDS.

En la Figura 4.7 también muestra que en los valores observados de IAF la duración de la superficie foliar fue mayor, por que hasta los 130 DDS se denota que el cultivo mantiene un nivel alto de índice de área foliar, mientras que para los valores simulados, el decremento del IAF comienza alrededor de los 100 DDS. El inicio del decremento del IAF en el modelo, esta determinado por un parámetro denominado DLAI (Cuadro 3.3) que en el caso de la simulación subestima el inicio de cuando el cultivo comienza a declinar el índice de área foliar. Lo anterior nos indica que para trabajos futuros se considere

obtener los valores para esta variedad de los parámetros que definen la tasa de variación de IAF durante el desarrollo del cultivo, como es el caso del DLAI, DLAP y RLAD (Cuadro 3.3) que en este trabajo no se efectuaron debido a que el área foliar del cultivo fue afectada por las granizadas.

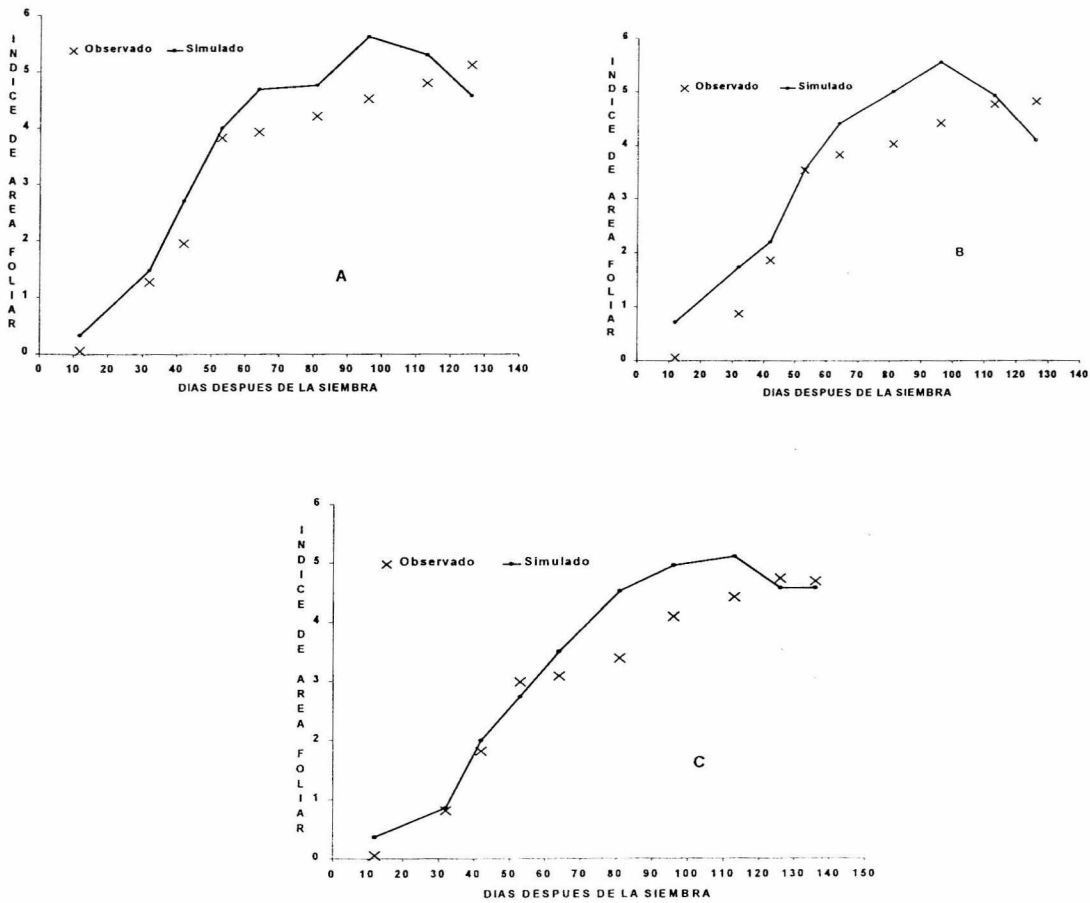


Figura 4.7 Índice de área foliar observados y simulados, en las tres condiciones de humedad de suelo, ETM-RE (A), T2 (B) y T3 (C), durante el desarrollo del cultivo.

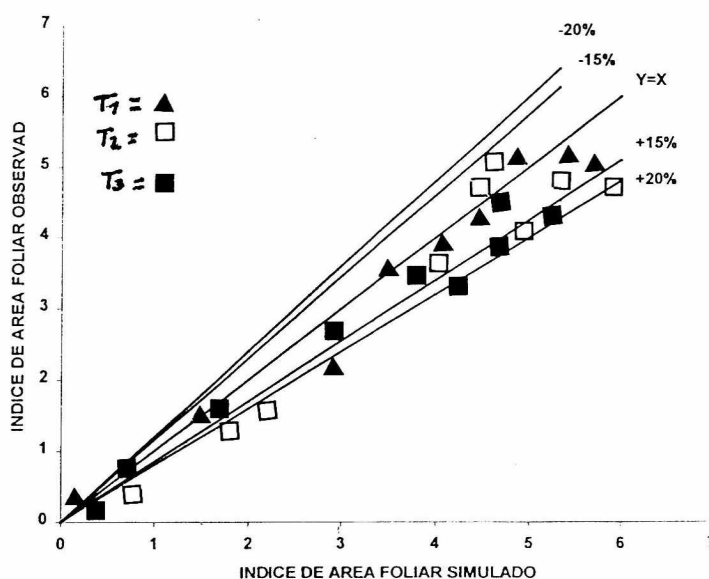


Figura. 4.8. Capacidad de predicción del modelo en la variable índice de área foliar, en las tres condiciones de humedad evaluada, durante el desarrollo del cultivo.

Simulación de nitrógeno

La Figura 4.9 presenta los valores de nitrógeno acumulado y simulado en función del tiempo. La cual denota que para los tres tratamientos los valores simulados se desvían fuertemente de los observados, en la Figura 4.10 se observa desviaciones entre las dos variables superiores a un ± 20 por ciento en 50 por ciento de los datos.

Este resultado no puede ser atribuible únicamente al modelo que tiene baja capacidad de predecir en contenido de nitrógeno, es importante considerar que el nitrógeno es un parámetro que no es fácil de evaluar cuantitativamente

en el campo y en la planta por la variabilidad existente requiriéndose para estudios futuros llevar un mejor control del contenido de nitrógeno en el suelo y del aportado por otras fuentes.

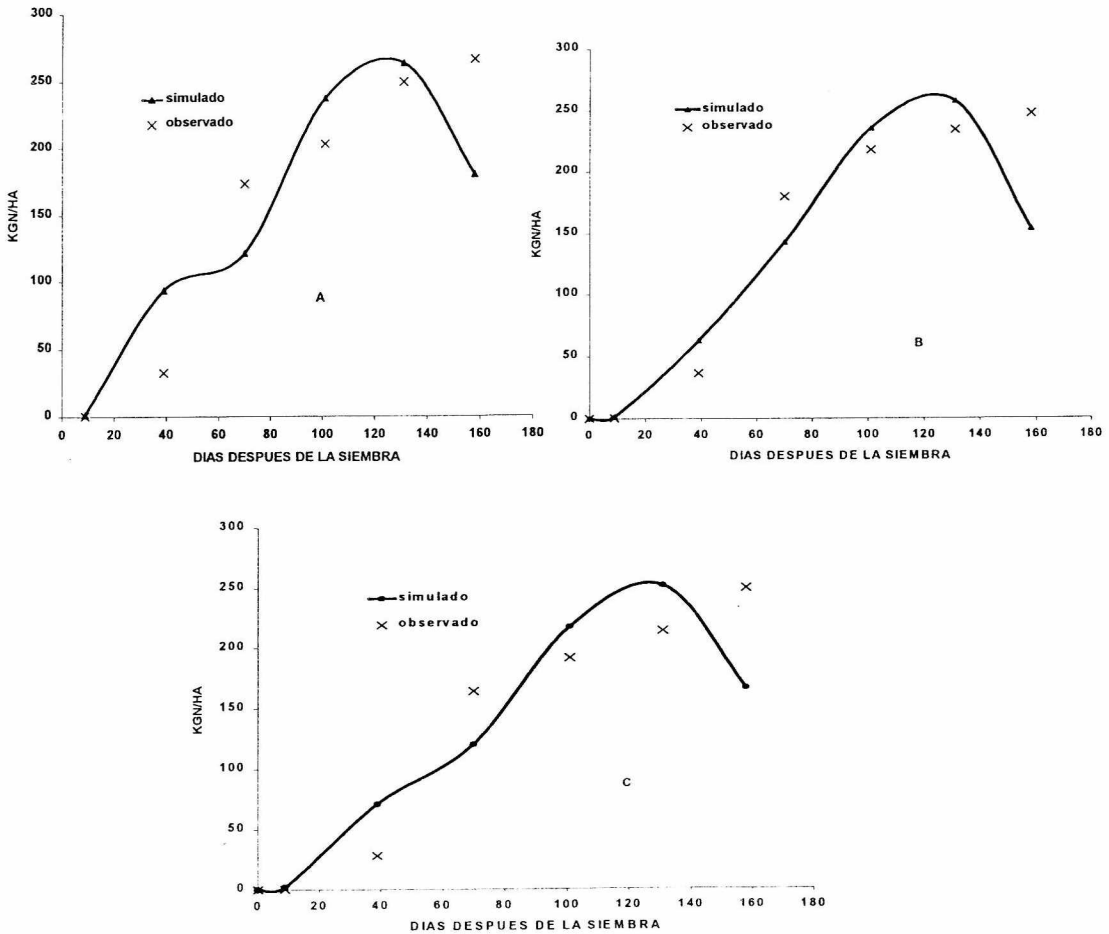


Figura. 4.9 Acumulación de nitrógeno en la planta, simuladas y observadas en las tres condiciones de humedad de suelo, ETM-RE (A), T2 (B) y T3 (C), durante el desarrollo del cultivo.

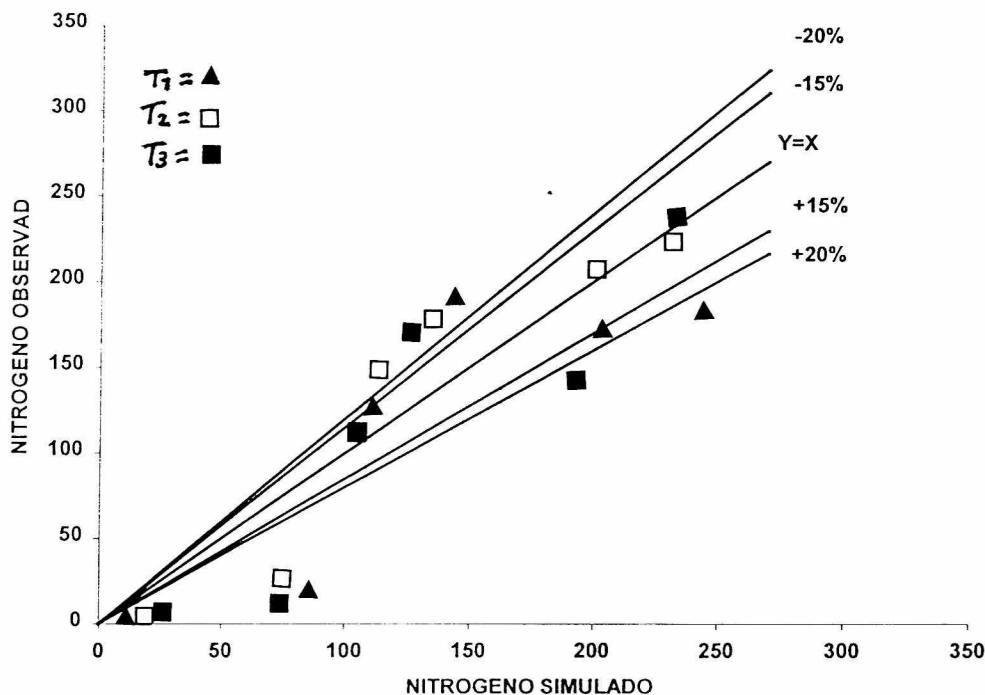


Figura 4.10 Predicción del modelo en la variable acumulación de nitrógeno, en las tres condiciones de humedad de suelo, ETM-RE (A), T2 (B) y T3 (C), durante el desarrollo del cultivo.

Materia seca simulada

De acuerdo a los supuestos del modelo y tomando en cuenta que la simulación permite reproducir la esencia de un sistema pero no el sistema en sí, los resultados que se presentan a continuación tratan de simular las condiciones reales de campo, reflejadas en parámetros y variables de respuesta que son aproximaciones a la realidad, pero que difícilmente serán idénticos a la naturaleza.

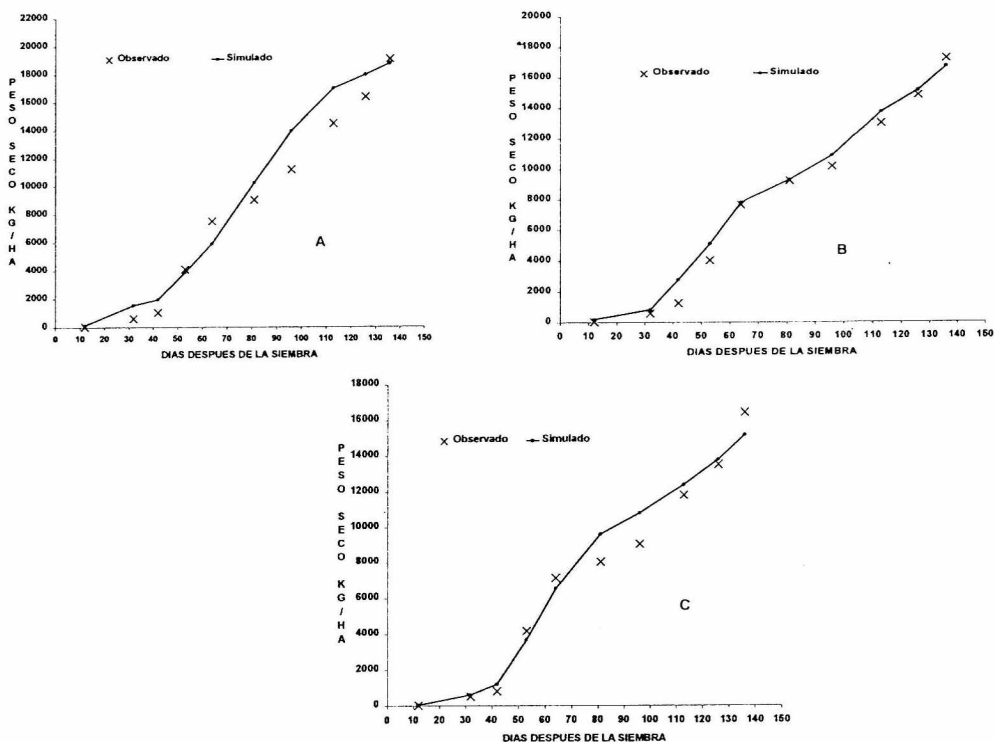


Figura 4.11. Acumulación de materia seca observadas y simulada, en las tres condiciones de humedad de suelo, ETM-REF (A), T2 (B) y T3 (C), durante el desarrollo del cultivo.

En la Figura 4.11., se presentan las tendencias de la materia seca tanto simuladas como observadas en las tres condiciones de humedad de suelo ETM-REF, T2 y T3 (A, B, y C, respectivamente),

Con la información de las variables observadas en el campo (índice de área foliar, materia seca, acumulación de nitrógeno en la planta), se procedió a compararlas con los valores simulados del modelo EPIC. La comparación se realizó para las tres condiciones de humedad de suelo (definidas por el número

de riegos y las precipitaciones pluviales que se presentaron durante el ciclo del cultivo).

Para la materia seca en la condición ETM-REF la predicción del modelo sobre estima ligeramente los valores en el periodo de 88 a 120 días, esta situación no fue similar para las otras dos condiciones en las cuales el ajuste del modelo fue más preciso. En términos generales se puede decir que el modelo hace una buena simulación de la materia seca a través del tiempo en las diferentes condiciones del estudio, puesto que los valores observados tienen la misma tendencia que los simulados tal como se observa en la Figura 4.11.

Los valores máximos del peso seco observados en el campo en las condiciones ETM-RE, T2 y T3 fueron de 19, 17 y 15 ton/ha, los cuales muestran que el estrés hídrico a que fueron sometidos los tratamientos, 2 y 3 en las etapas de floración y formación del grano influyeron en el rendimiento de materia seca y de grano, siendo el efecto del estrés hídrico más acentuado en el tratamiento 3 que estuvo bajo condiciones más críticas de déficit de agua en el suelo. Respectivamente dichos valores son similares a los valores máximos que simuló el modelo. Los valores máximos de peso seco en las tres condiciones no son tan diferentes como se pudo haber esperado de acuerdo a los números de riegos ya que las precipitaciones influyeron a no detectar diferencias más marcadas. Los valores altos de materia seca observados en el campo se debieron principalmente a que el material de maíz sembrado presentó un buen vigor,

elevada altura de planta (3.20 m en promedio) y un considerable números de hojas por planta (22 hojas por plantas aproximadamente).

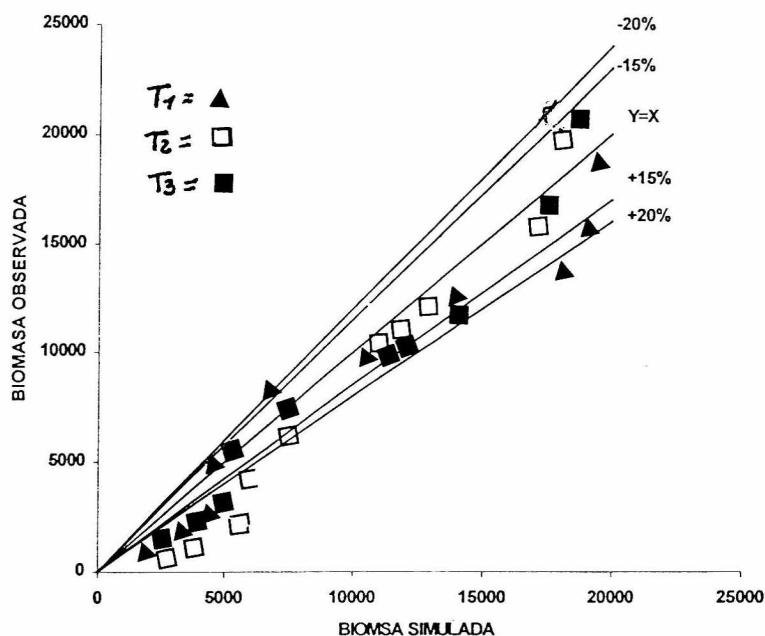


Figura 4.12 Capacidad de predicción del modelo en variable de biomasa en las tres condiciones de humedad de suelo evaluada, ETM-REF (A), T2 (B) y T3 (C), durante el desarrollo del cultivo.

Rendimiento de Grano Observado y Simulado

Cuadro 4.3 Rendimiento de grano observado y simulado en Kg/ha y la desviación entre ellos en kg/ha y en por ciento del valor observado.

Tratamiento	R. observado Kg/ha	R. simulado Kg/ha	Desviaciones Kg/ha	Desviaciones %
1	10,554	6502.3	-4051.7	-38.3
2	9,612	6227.3	3384.7	-35.2
3	8740	4284.0	4456.0	-50.9

En el Cuadro 4.3 Se presentan los valores de rendimiento de grano observado y simulado y las desviaciones. Los resultados muestran que el modelo subestima el rendimiento en un 38.3; 35.2 y 50.9 por ciento por los tratamientos 1, 2 y 3 respectivamente, siendo la desviación elevada, indicada con esto que el modelo no simuló convenientemente el rendimiento.

Como se citó anteriormente el rendimiento al momento de la cosecha es calculado en base a un Índice de Cosecha (IC), multiplicado por la materia seca total en ese momento.

De acuerdo a la ecuación 2.55 el IC es calculado en función del IAF es cual a su vez es determinado por coeficientes que definen la tasa de variación del IAF (DLAI; DLAP y RLAD Cuadro 3.3) y por lo tanto estos parámetros influyen en el Índice de Cosecha.

Consideramos que el comportamiento de la variable Índice de Área Foliar fue una de las causales para que el modelo simulara el rendimiento de grano inferior al observado, siendo necesario en trabajos futuros determinar para esta variedad los parámetros que definen la tasa de variación del Índice de Área Foliar (DLAI, DLAP y RLAP) para que el modelo simule convenientemente el rendimiento de grano.

CONCLUSIONES

- * Los tratamientos estuvieron diferenciados en cuanto a condiciones de déficit hídrico en el suelo durante el ciclo del cultivo. En el tratamiento tres el cultivo estuvo sometido a mayor condición de déficit hídrico en el suelo que el tratamiento dos y este a su vez que el del tratamiento uno, el cual se desarrolló bajo condiciones óptimas de humedad en el suelo, para mantener la condición potencial de consumo de agua.

- * Se obtuvieron las curvas que describen en el tiempo los cambios de IAF, acumulación de materia seca y nitrógeno para los tres tratamientos. Detectándose como influye los tratamientos sobre esta variable.

- * Se presentaron efectos significativos de los niveles de humedad en el suelo sobre el rendimiento del grano, el tratamiento uno produjo 10,554 kg/ha, el tratamiento dos obtuvo 9,612 kg/ha y el tratamiento tres alcanzó 8,740 kg/ha. Las lluvias aportaron durante el ciclo del cultivo 437.2 mm amortiguando el efecto del déficit hídrico del suelo sobre los tratamientos dos y tres, siendo esta la razón que no hubo grandes diferencias en rendimiento.

- * El modelo EPIC simuló correctamente el índice de área foliar en parte del desarrollo del cultivo, así como la acumulación de materia seca, las desviaciones entre valores simulados y observados en su mayoría se encuentran de un rango de + 15 por ciento.

- * El modelo no simula convenientemente la acumulación del nitrógeno, desviaciones fuera del rango + 15 por ciento son detectadas en el 50 por ciento de las observaciones. Siendo difícil separar las faltas del modelo, de aquellas proporcionadas por los datos con que se alimenta este, así como posibles errores de muestreo en los datos observados se considera que, para mejorar el grado de precisión son necesarios perfeccionar los procedimientos de muestreo para esta variable.

- * El modelo subestima el rendimiento de grano en un 38.3 por ciento, 35.2 por ciento y 50.9 por ciento para los tratamientos 1, 2 y 3 respectivamente. Como se citó en el caso anterior, es difícil separar los errores del modelo de aquellos ocasionados por los datos con que se alimenta el modelo. Pero en este caso, hemos detectado que una de las posibles causas que influyen en que el modelo subestime el rendimiento, es debido a que el IAF, al final del ciclo del cultivo subestime la acumulación de materia seca y el índice de cosecha, ya que el IAF determina estas dos variables. Correcciones en las variables que definen la tasa del IAF en el tiempo como son DLAI, DLAP y RLAD con necesarias efectuar a un futuro.

- * Muchos procesos quedan por cumplir en el caos de la simulación de maíz, tanto en la adquisición de conocimientos que en la simulación. La respuesta del cultivo a diferentes condiciones de manejo y ambiente son poco comprendidas, ofreciendo grandes perspectivas para la simulación como una herramienta de simulación que permita comprender el comportamiento de la planta bajo diferentes situaciones.

RESUMEN

El uso de modelo de simulación para predecir el comportamiento de los cultivos, es un medio para el estudio de fenómenos complejos y se justifica su utilización si mejora nuestra comprensión de las características del comportamiento del mismo, de una manera más efectiva que si se observara el sistema real. Es importante mencionar que un modelo comparado con el sistema que representa puede proporcionar información a un costo menor y permitir el conocimiento anticipado de las condiciones que no se observan en la vida real. El objetivo de este estudio fue evaluar la capacidad de predicción del modelo propuesto por Williams et al., (1984), para simular el índice de área foliar, la acumulación de materia seca y nitrógeno y rendimiento de grano en maíz bajo tres condiciones de humedad en el suelo. El trabajo experimental se realizó en terrenos de la Universidad Autónoma Agraria "Antonio Narro", el suelo migajón arcilloso. La siembra se hizo mecánica y el material genético fue el híbrido AN-447 (22 de Mayo de 1998), Utilizando 20 kg ha⁻¹; la dosis empleada fue 180-104-70 (N-P-K), aplicando fraccionado (al momento de la siembra y a los 45 DDS). Se evaluaron tres condiciones de humedad de suelo: 1) condición de menor déficit hídrico en el suelo con la finalidad de satisfacer las necesidades máximas de agua por el cultivo, 2) el tratamiento en donde se

aplicaron seis riegos de auxilio en dos etapas fenológica (vegetativa y floración) y 3) tratamiento en el que se aplicó riegos de auxilio en la etapa vegetativa del cultivo cada tratamiento fue ubicado en una parcela de 120 m² representando un escenario de simulación. Las variables evaluadas fueron índice de área foliar, acumulación de materia seca, y nitrógeno en la planta y rendimiento de grano. La simulación se efectuó a intervalos de 10 a 15 días, utilizando para ello datos para alimentar el modelo de temperatura (máxima, media y mínima), humedad relativa, precipitación, insolación, vientos, variables de suelo y otras del cultivo.

Los tratamientos estuvieron diferenciados en cuando a condiciones de déficit hídrico en el suelo, el cultivo en el tratamiento tres estuvo sometido a mayor condición de déficit hídrico en el suelo que el tratamiento dos y este a su vez que el del tratamiento 1. A la cosecha se detectó diferencia estadística en el rendimiento de grano, siendo similares ETM-REF con el tratamiento 2 y diferente con el tratamiento 3.

Los resultados de la simulación, indicaron que el modelo simuló convenientemente el IAF en ciertas partes, las desviaciones entre valores observados y simulados se encontraron dentro de un rango de ± 15 por ciento. En el caso de la acumulación de nitrógeno las desviaciones quedan fuera del rango ± 15 por ciento, en el 50 por ciento de las observaciones y en el rendimiento del grano el modelo subestima el rendimiento del grano dentro

de un rango de 35.2 a 50.9 por ciento. Para mejorar el nivel de ajuste se propone perfeccionar los procedimientos de muestreo de las variables como es el caso del nitrógeno y corregir variables que definan las tasas de IAF en el ciclo del cultivo.

LITERATURA CITADA

- Acevedo, E., T. C. Hsiao, and D. W. Henderson. 1971. Immediate and subsequent growth responses of maize leaves to changes in water status. *Plant Physiol.* 48:631-636.
- A. Toure, d.j. Mahor, and C.W. Lindwall. 1995. *Canadian Journal of Plant Science* Vol. 75 Rev. 1 pp. 69-74.
- Baker, C. H. and R. D. Horrocks. 1973. A computer simulation of corn grain production. *Trans of the Am. Soc. Agric. Eng.* 16: 1027-1031.
- Baker, C. K., J.N. Gallagher, and J.L. Monteith. 1980. Daylength change and leaf apperance in winter wheat. *Plant, Cell Environ.* 3:285-287.
- Borg, H. And D. W. Grimes. 1986. Depth development of roots with time: An empirical description. *Trans. ASAE* 29:194-197.
- Cabelguenne M., Charpentreau J.L., Jones C.A., Marty J.R., Rellier J.P. 1986. Conduite des systemes de grande culture et prevision des redements: tentative de modelization. II. Etalonnage du modele: resultats et perspectives.- *C.R. Acad. Agric. Fr.* 72 p. 125-132.
- Cazanga Solar, R.R 1991. Modelo climático de simulación de la productividad del trigo. Tesis. Ing. Agr. Santiago, Chile, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias, Veterinarias y Forestales. 112 p.
- Comisión Nacional de Estudios del Territorio Nacional (CETENAL). 1976. Saltillo. Carta Edafológica 614C33. Escala 1:50000. México
- Cornelius, W. T. 1982. *Simulation of Living Systems. IN: Simulation of plant Growth and Crop Production.* Centre for Agricultural Publishing and Documentation, PUDOC, Wageningen.

- Crofts, C. F., D. L. Jackson, D. M. Martín and J. C. Patrick. 1971. Los vegetales y sus cosechas. Fundamentos de Agricultura Moderna. 2ª. Edición Aedos, Barcelona, España.
- Curry, R.B. 1971. Dynamic simulation of plant growth. Part I. Development of a model. Trans. Of the Am. Soc. Agric. Eng. 14:946-959.
- Curry, R. B. And L. H. Chen. 1971. Dynamic simulation of plant growth. Part. II. Incorporation of actual daily weather and partitioning of net photosynthesis. Trans. Of the Am. Soc. Agric. Eng. 14: 1170-1174.
- Charpentreau, J.L., C.A. Jones, J.R. Marty, J.P Rellier and J.R. Williams. 1986. Conduite des systèmes de grande culture et prévision des rendements: tentative de modélisation. 1) Choix et construction du modèle. C.R. Acad. Agric. Fr. 72 (1):118-124.
- Doorenbos, J. And A. H. Kassam. 1979. Yield response to water. Irrigation and Drainage Paper 33. Food Agric. Org. United Nations, Rome.
- Eavis, B. W. 1972. Soil physical conditions affecting seedling root growth. I. Mechanical impedance, aeration, and moisture availability as influenced by bulk density and moisture levels in a sandy loam soil. Plant Soil 36:613-622.
- Edwards, D. A. 1982. Physiological Determinants of Crop Growth. Academic Press, New York.
- Eck, H.V. 1986. Effects of water deficits on yield, yield components, and water use efficiency of irrigated corn. Agronomy Journal. Vol. 78: 1035-1040.
- Eik, K. and J. J. Hanway. 1965. Some factors affecting development and longevity of leaves of corn. Agron., J. 57:7-12.
- Edelstein-Keshet, L. 1988, Mathematical Models in Biology. Random House New York.

- Fisher, K. J., E. C. Johndon y G. O. Edmeades. 1981 Mejoramiento y selección de maíz tropical para incrementar su resistencia a la sequia. CIMMYT. México.
- Frey, N.M. 1982. Dry matter accumulation in kernels of maize. *Crop Sci.* Vol. 21:118-122.
- García, E. 1973. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Adaptado a las condiciones climáticas de la República Mexicana. Instituto de Geografía – UNAM. México. 264 p.
- Garzía, R. F. and M. R. Garzía. 1987. Discrete-event simulation. *IEEE Spectrum* 23:32-36.
- Georgie Mitchell, Ray H. Griggs, Verel Benson, and Jimmy Williams, 1997 Project Leaders Steve Dagitz, Webmaster.
- Gerakis, P and A. D. Papacosta – Tasa pavlov. 1979. Growth Dynamics of Zea Mays L. populations differing in genotype and density and growth under illumination stress. *Ecol. Plant.* 14: 13 – 26.
- González, S.S.H. Silveira, Salvador H. 1990. Análisis de crecimiento de dos Genotipos de papa (*Solanum tuberosum* L.) evaluados bajo diferentes dosis de Fertilización. Tesis de Licenciatura UAAAN. Buenavista, Saltillo, Coahuila.
- Grossman, R.B., W.D. Nettleton, and B.R. Brasher. 1985. Application of pedology to plant response prediction for tropical vertisols. *In Proc. Fifth Int. Soil Classification Workshop, Sudan, November 2-11, 1982.*
- Hall, W.A. y J.A. Dracup. 1974. Ingeniería de sistemas en recursos hidráulicos. Trad. De la Primera edición inglesa. C.E.C.S.A. México.
- Hanks, R. J. 1983. Yield and water-use relationships: An overview. Pp. 393-411 In H. M. Taylor, W. R. Jordan, and T. R.

- Harder, H., R. E. Carlson and R. H. Shaw. 1982. Yield, yield components, and nutrients content of corn grain as influenced by post-silking moisture stress agronomy Journal. Vol. 74. Pags. 275-278.
- Heer Arana, C.E. 1988. Validación de un modelo de crecimiento de maíz (Zea mays L.) en monocultivo y asociado con yuca(Manihot esculenta C) en el trópico. Tesis. Mg. Sc. Turrialba, C.R., Programa Universidad de Costa Rica/CATIE. 120 p.
- Hesketh, J. D. And J. W. Jones. 1976. Some comments on computer simulators for plant growth- 1975. Ecol. Modelling 2: 235-247.
- Horton, J. C. And C. J. Bickel. 1987. Modeling for biologists. BioScience 37: 808-809.
- Jager, E. 1986. Mathematical modelling in chemistry and biology. Interdisciplinary Science Reviews 11: 181-188.
- Jones, C. A. 1983a. A survey of the variability in tissue nitrogen and phosphorus concentrations in maize and grain sorghum. Field Crops Res. 6:133-147.
- Jones, C.A. 1983b. Effect of soil texture on critical bulk densities for root growth. Soil Sci. Soc. Am. Plant Anal. 15:327-335.
- Jones, C.A. and J.R. Kiniry, 1986. CERE-Maize. Texas A&M Univ. Press, College Station. 194pp.
- Karlen, D.L., Sadler E. J. And Camp C.R. 1987. Dry matter, nitrogen, phosphorus and potassium acumulation rates by corn on Norfolk loamy sand. Agronomy Journal. Vol. 79:649-656.

- Loomis, R. S., R. Rabbinge and E. Ng. 1979. Explanatory models in crop physiology. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 30: 339-367.
- Maertens, C. And M. Cabelgunne. 1974. Intensité et limites de desséchement du sol en relation avec l'enracinement de quelques espèces végétales cultivées. *C.R. Acad. Agric. Fr.* : 2039-2042.
- Maciel, L.H. 1992. Simulación de la acumulación de materia seca y rendimiento de grano en Maíz (*Zea mays* L.) bajo diferentes condiciones de humedad en el suelo. Tesis de Maestría. UAAAN. Buenavista, Saltillo, Coah. México.
- Mayaki, W.C., I.D. teare and L.R. Stone. 1976. Top and root growth of irrigated and nonirrigated soybeans. *Crop Science*. Vol. 16(1):92-94.
- Meyer, G. E., J. A. Lamb and W. E. Splinter. 1984. Crop moisture stress Analysis using computer-controlled environmental chambers and simulated weather sequences. *Trans. Of the Am. Soc. Agric. Eng.* 27: 182-1870.
- Monteith, J.L. 1977. Climate and the efficiency of crop production in Britain. *Phil. Trans. Res. Soc. London Ser. B.* 181:277-329.
- Monteith, J. L. 1981. Epilogue: Themes and variations. *Plant and soil* 58:305-309.
- Monteith, J.L. and C. L. Bonath. 1965. The effect of soil strength on sugarcange growth. *Tropl agric.* 42:293-296.
- Monsi, M. And T. Saeki. 1953. Uber den Licthfaktor in den Pflanzengesellschaften und sein Bedeutung fur die Stoffproduktion. *Japan J. Bot.* 14:22-52.
- Naylor, H.T., J. L. Balintfy, S. D. Burdick and K. Chu. 1986. Técnicas de simulación en computadoras. Sexta reimpresión. Ed. LIMUSA. México. 390 p.

- Palacios, S.J.E. 1980. Repuesta del cultivo del maíz (*Zea mays* L.) a diferentes niveles de humedad en el suelo, entre etapas fenológicas. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma de Chiapingo. 76 p. México.
- Papadakis, J. 1977. Los fertilizantes. Editorial Albatros, Buenos Aires, Argentina p. 67.
- Parsons, David, B. 1988. Maíz. Editorial Trillas, México, D.F.
- Passioura, J. B. 1973. Sense and nonsense in crop simulation. J. Aust. Inst. Agric. Sci 39:181-183.
- Penning de Vries, F. W. T. 1982. Systems Analysis and models of Crop Growth. In Penning de Vries, F. W. T. And H. H. van laar (Eds.). simulation of Plant Growth and Crop Production. Centre for Agricultural Publishing and Documentation, Wageningen.
- Reed, A. J.,; G. W. Singletary, J. R. Schussler, D. R. Williamson, and A. L. Christy. 1988. Shading effects on dry matter and nitrogen partitioning kernel number, and yield of maize. Crop Science. Vol. 28. Pags. 819-825
- Ritchie, J.T. 1972, model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. Water Resources Research 8 (5) : 1204-1213.
- Rodríguez, G.M.A. 1985. Efecto del stress de humedad sobre el desarrollo, rendimiento y evapotranspiración del maíz (*zea may* L.). Tesis de Licenciatura. UAAAN. Buenavista, Saltillo, Coah. México.
- Rojas, G.M 1972. Fisiología vegetal aplicada. Segunda edición. Ed. McGraw-Hill. México. 120 p.
- Tanaka, A. y Yamaguchi J. 1981. Producción de materia seca, componentes del rendimiento y rendimiento de grano del maíz. Traducido al español por Dr. Kohashi Shibata. Rama de botánica. Colegio de posgraduados. Chiapingo, México. Pp. 16-18.

-
- _____ 1984. Producción de materia seca, componentes del rendimiento y rendimiento del grano en maíz. Colegio de Posgraduados. Pags. 9-15.
- Taylor, H.M. 1983 A program to increase plant available water through rooting modification. Pp. 463-472 *In* Root Ecology and Its Practical Application. Int. Symp., Gumpenstein. September 1982. Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft, A-8952 Irding.
- Tollenaar, M., T.B. Daynard, and R.B. Hunter. 1979. Effect of temperature on rate of leaf appearance and flowering date of maize. *Crop Sci.* 19:363-366.
- Van Keulen, H. 1986. Production situations. I: Optimum supply of water, nitrogen and minerals. In: Modelling of agricultural production: Weather, soils and crops (van Keulen, H. Wolf J. (Eds)). Simulations Monographs, Pudoc, Wageningen.
- Watts, W.R. 1972. Leaf extension in *Zea mays*. II. Leaf extension in response to independent variation of the temperature of the apical meristem, of the air around the leaves, and of the rootzone. *J. Exp. Bot.* 23:713-721.
- Wayne, J.M. Laurin, 1984. Non destructive leaf area measurements of Ipomoea patatas. C.V. Centennial. *Hort Sci.* 19(7): 58.
- Whisler, F. D., Acock, D. N. Baker, R. E. Fye, H. F. Hodges, J. R. Lambert, H. E. Lemmon, J. M. Mckinion and V. R. Reddy. 1986. Crop simulation models in agronomic systems. *Adv. Agron.* 40: 141-208.
- Williams, J.R., C.A., Jones and T. Dyke. 1984. A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil product. *Trans. of the ASAE* 129-144.

A P E N D I C E

Cuadro A.1 Valores de parámetros físico-químico del suelo donde se estableció el experimento.

Características	Estratos del perfil (cm)					
	0-20	20-40	40-60	60-80	80-100	100-120
Físico-químicas						
Materia orgánica (%)	4.15	5.20	1.44	1.81	1.06	0.91
Nitrógeno Total. (%)	0.21	0.26	0.07	0.09	0.05	0.05
Fósforo Aprox. kg/ha	112.50	90.45	52.20	81.45	50.85	53.10
Potasio Inter. Kg/ha	900.00	103.55	337.50	499.50	333.00	360.00
pH	6.44	6.49	6.40	6.21	6.24	6.19
Carbono Total (%)	68.13	65.68	68.13	59.31	61.76	59.80
C.E. (ds/m)	1.20	0.81	0.60	0.95	0.83	0.58
CC (%vol)	26.80	25.94	24.50	25.50	28.41	28.41
PMP (%vol)	13.07	12.71	13.80	14.26	13.70	13.70
Da (gr cm-3)	1.28	1.09	1.10	1.08	1.24	1.24
Arena (%)	56.40	57.60	49.60	41.60	41.60	45.60
Limo (%)	15.60	16.00	16.00	20.00	18.00	14.00
Arcilla (%)	28.00	26.40	34.40	38.40	40.40	40.40
Textura		MAA		MA	A	AA

MAA = Migajon arcilloso-arenoso

MA = Migajon -arcilloso

A = Arcilloso

AA = Arcillo arenoso

Cuadro A.2 Información climatológica mensual promedio de 1998 de la Estación de Buenavista, Saltillo, Coah.

MES	Temperatura (°C)			Lluvia (mm)	Evaporación (mm)	H.R %
	Máxima	Mínima	Media			
ENERO	20.40	4.80	12.60	0	119.84	64
FEBRERO	20.30	5.30	12.70	0	194.53	41
MARZO	23.30	6.80	15.10	0	213.95	48
ABRIL	27.1	10.60	18.90	0	225.15	48
MAYO	33.20	17.00	25.10	7.20	299.29	32
JUNIO	32.20	18.70	25.20	7.70	242.10	73
JULIO	29.10	16.70	22.90	80.30	188.14	61
AGOSTO	26.90	15.50	21.20	0	134.06	75
SEPTIEMBRE	23.80	14.20	19.00	143.20	88.58	80
OCTUBRE	23.20	11.70	17.40	50.20	85.16	76
NOVIEMBRE	22.30	9.10	15.70	6.00	92.39	69
DICIEMBRE	20.60	5.90	13.20	0	101.87	60

Fuente: Departamento de Agrometeorología UAAAN 1998.

Cuadro A.3. Distribución del riego y lluvia cada diez días durante el ciclo de crecimiento del maíz.

Décimo del año	Láminas de riego aplicadas (mm)			Lluvia (mm)
	ETM-REF	T2	T3	
10	30	20	20	7.2
20	30	20	20	15.1
30	32.0	23.0	70.0	14.5
40	72.0	52.0	80.5	47.4
50	84.5	0	0	28.7
60	43.1	0	0	2.4
70	41.0	96.7	0	49.2
80	0	34.5	0	33.1
90	32.0	0	0	35.5
100	20.0	0	0	10.7
110	0	0	0	22.8
120	0	0	0	107.9
130	0	0	0	12.5
140	0	0	0	2.8
150	0	0	0	38.2
160	0	0	0	9.2
TOTAL (mm)	384.6	246.2	190.5	437.2

Cuadro A.4. Días después de la siembra, etapas fenológicas y unidades calor acumulado durante el ciclo del cultivo del maíz.

DDS	Nomenclatura (Etapas)	UCA
21	V6	374.50
32	V8	585.00
42	V11	748.60
53	V14	928.30
64	V15	1097.60
81	VT	1347.15
96	R1	1563.90
113	R2	1765.40
126	R3	1916.15
136	R4	2050.10
148	R6	2179.80
158	R6	2248.80

DDS = Días después de la siembra

V6, V8...Vn = Número de hojas

R1 = Estigmas visibles, R2 = Ampolla, R3 = Leche, R4 = Masa, R6 = Madurez fisiológica.

Cuadro A.5 Contenido de humedad en base volumen para la condición ETM-REF, en los diferentes estratos de profundidad del suelo, durante el ciclo de cultivo.

DDS	Estratos del perfil del suelo (cm)					
	0 -20	20 - 40	40 - 60	60 - 80	80 - 100	100-120
1	26.80	25.94	24.50	25.50	28.41	28.41
10	18.55	21.58	21.20	23.13	21.64	25.56
26	20.90	24.10	22.53	22.79	21.83	22.88
31	18.32	21.56	21.65	23.23	21.30	21.56
34	24.02	26.99	22.61	22.09	22.44	21.04
39	26.29	25.94	22.44	22.35	21.56	20.86
45	20.37	22.88	22.44	22.26	21.65	21.04
49	23.87	29.88	26.99	22.18	22.70	22.44
52	23.64	25.33	23.05	23.05	23.75	22.18
59	21.74	22.53	22.79	22.70	23.23	21.74
63	30.02	27.87	24.10	22.96	22.79	24.72
66	26.68	26.56	25.68	23.40	22.96	21.65
69	24.47	23.31	23.75	23.05	23.40	22.18
72	21.21	22.35	24.37	22.09	22.96	21.39
75	24.55	27.69	25.07	22.00	22.88	21.65
79	22.50	20.95	17.62	17.36	19.46	20.86
82	19.53	21.65	22.88	22.18	22.88	21.04
86	27.44	29.97	29.80	27.69	26.56	22.00
90	23.94	26.21	27.52	25.94	25.42	22.88
97	30.02	27.87	24.63	25.07	22.70	23.58
100	16.49	19.46	25.85	23.23	24.80	24.37
104	17.56	20.86	24.80	22.53	24.54	21.83
107	22.12	22.70	23.14	21.91	23.14	22.53
114	14.82	23.84	25.15	22.88	23.66	22.09
118	30.05	29.87	29.63	27.07	26.70	23.58
123	27.94	26.31	27.87	25.85	25.62	22.50
127	24.55	24.69	24.07	24.00	22.88	22.65
132	22.12	22.70	23.14	21.91	23.14	22.53
137	18.82	20.84	21.15	20.88	22.66	21.09
141	16.52	19.64	20.03	19.05	21.48	20.08
146	24.48	24.44	24.86	24.04	23.58	24.65
150	23.12	23.84	23.56	23.45	22.46	23.56
154	22.56	22.56	23.89	24.05	24.16	24.86
158	20.46	20.46	21.08	21.49	22.23	23.45

Cuadró A.6 Contenido de humedad en base volumen para el Tratamiento 2, en los diferentes estratos de profundidad del perfil del suelo, durante el ciclo del cultivo.

DDS	Estratos del perfil del suelo (cm)					
	0 – 20	20 – 40	40 – 60	60 – 80	80 – 100	100 – 120
1	26.80	25.94	24.50	25.50	28.41	28.41
10	18.55	21.58	21.20	23.13	21.64	25.56
26	17.81	19.37	20.25	20.86	20.69	18.32
31	13.99	16.22	19.81	19.90	21.39	17.18
34	22.27	19.02	19.28	19.81	20.51	18.41
39	26.45	24.98	19.72	20.25	20.77	17.45
45	18.09	19.37	19.72	20.51	21.12	17.88
49	30.17	26.47	22.26	19.64	20.86	18.58
52	21.36	21.39	20.69	21.83	21.39	17.36
59	17.56	15.78	16.48	17.80	19.72	17.88
63	28.05	23.84	17.45	18.32	19.90	17.36
66	24.78	23.75	24.19	24.19	23.40	18.93
69	23.33	20.69	22.35	22.18	22.96	19.55
72	20.14	19.37	19.90	20.51	21.65	17.97
75	21.36	18.06	17.80	19.11	20.51	17.62
79	23.26	18.06	17.53	18.93	19.72	17.71
82	19.76	17.36	17.53	17.88	19.02	16.83
86	24.32	27.34	25.77	21.65	18.23	16.74
90	27.83	25.89	24.51	20.91	17.91	16.61
97	23.94	20.07	19.28	20.25	18.67	16.66
100	19.23	17.88	19.11	19.20	18.85	16.57
104	25.46	23.23	22.44	20.07	19.20	16.31
107	29.03	27.26	25.33	22.26	19.90	17.01
114	17.80	23.66	24.28	24.63	24.19	18.58
118	22.10	25.24	26.45	21.12	23.12	23.27
123	21.17	22.18	22.18	19.87	20.12	20.49
127	15.15	16.45	17.71	18.18	18.06	18.34
132	14.12	16.02	17.14	17.20	17.54	16.17
137	14.10	15.13	16.35	17.12	17.56	17.18
141	13.14	13.55	15.15	16.17	16.99	17.21
146	16.45	17.85	17.65	18.75	18.16	18.91
150	15.89	16.77	17.28	17.48	17.76	17.23
154	14.17	16.13	17.12	17.29	17.56	17.41
158	13.26	15.55	16.18	17.08	17.70	17.31

Cuadro A.7 Contenido de humedad en base volumen para el Tratamiento 3 en los diferentes estratos de profundidad del perfil del suelo, durante el ciclo de cultivo.

DDS	Estrato del perfil del suelo (cm)					
	0 – 20	20 – 40	40 – 60	60 – 80	80 – 100	100 – 120
1	26.80	25.94	24.50	25.50	28.41	28.41
10	18.55	21.58	21.20	23.13	21.64	25.56
26	19.99	21.39	21.65	22.88	23.14	24.02
31	16.11	18.32	19.46	21.65	22.79	23.14
34	25.31	22.88	19.64	21.12	22.70	22.35
39	22.42	21.12	18.85	20.42	22.00	22.96
45	16.34	18.15	18.06	19.99	21.91	22.44
49	25.84	20.07	16.92	18.93	20.42	22.09
52	20.67	18.58	17.36	19.99	21.74	23.49
59	15.66	16.83	16.57	17.62	20.07	21.39
63	24.25	17.18	16.66	17.79	19.37	21.56
66	26.83	25.15	19.90	17.27	19.46	20.69
69	22.88	22.35	19.46	18.76	20.95	21.47
72	16.11	18.58	19.20	18.58	19.90	21.12
75	22.19	19.46	17.45	18.41	20.07	21.39
79	22.27	25.07	26.47	21.83	23.05	22.00
82	19.69	18.76	17.71	17.45	18.50	19.72
86	20.67	24.80	18.85	16.22	17.09	18.15
90	17.41	20.16	17.80	16.39	17.62	19.11
97	20.22	17.53	16.31	16.57	18.32	18.67
100	14.82	15.69	16.92	16.31	17.01	17.97
104	14.59	16.04	16.57	15.87	16.92	17.27
107	19.84	16.92	15.87	15.87	16.48	18.23
114	8.95	18.58	18.41	15.61	16.31	17.18
118	22.23	25.35	26.80	21.98	23.16	23.56
123	21.47	22.12	22.36	19.19	20.80	20.56
127	15.82	16.69	17.92	18.31	18.01	18.97
132	14.56	16.05	17.03	17.52	17.69	16.54
137	13.50	15.03	16.99	17.02	17.21	17.09
141	13.21	13.58	15.02	16.55	17.00	17.10
146	16.82	17.93	17.92	18.31	18.01	18.97
150	15.09	16.70	17.20	17.25	17.24	17.45
154	14.16	16.02	17.01	17.21	17.27	17.49
158	13.87	15.78	16.17	17.00	17.47	17.26

Cuadro A.8 Índice de área foliar de 6 plantas en un área de 0.85 m², observado en el campo, expresado en m² m⁻², durante el ciclo del maíz.

DDS	Índice de área foliar (m ² /m ²)					
	Tratamiento 1		Tratamiento 2		Tratamiento 3	
	Observado	Simulado	Observado	Simulado	Observado	Simulado
21	0.05	0.33	0.05	0.71	0.05	0.37
32	1.27	1.48	0.87	1.73	0.81	0.86
42	1.95	2.70	1.86	2.20	1.82	1.99
53	3.83	4.00	3.54	3.55	2.99	2.74
64	3.93	4.69	3.83	4.41	3.09	3.50
81	4.21	4.78	4.03	5.00	3.39	4.52
96	4.52	5.62	4.42	5.55	4.09	4.96
113	4.80	5.30	4.77	4.93	4.42	5.11
126	5.12	4.57	4.82	4.09	4.74	4.57

DDS = Días después de la siembra

T1=Parcela que no tuvo déficit hídrico.

T2 = Parcela en la que aplico riegos de auxilio en las etapas vegetativa e inicio de floración.

T3 = Parcela donde se aplico riegos de auxilio en la etapa vegetativa.

Cuadro A.9 Polinomios de tercer grado para la fracción de incremento del índice de área foliar de la planta de maíz para las diferentes condiciones de humedad.

TRATAMIENTOS	MODELO	R ²
1	$-2.527+0.141X-0.00066X^2+0.000000732X^3$	0.950
2	$-2.56+0.134X-0.000566X^2-0.000000319X^3$	0.960
3	$-1.444+0.0763X+0.0000527X^2-0.00000227X^3$	0.955

Cuadro A.10 Acumulación de materia seca en las tres condiciones de humedad de suelo durante el ciclo del cultivo de maíz expresado en kg ha^{-1} .

DDS	Acumulación de peso seco en kg ha^{-1}					
	Tratamiento 1		Tratamiento 2		Tratamiento 3	
	Observado	Simulado	Observado	Simulado	Observado	Simulado
21	16.40	112.50	16.40	193.50	16.40	49.50
32	583.80	1561.40	570.40	823.40	501.80	606.30
42	1023.00	1954.10	1244.00	2788.00	801.00	1200.40
53	4100.00	3875.60	4026.80	5100.20	4153.40	3678.40
64	7500.00	5910.20	7606.30	7778.20	7103.40	6524.90
81	9021.00	10245.70	9213.00	9296.10	8005.20	9596.80
96	11203.00	13956.10	10162.00	10888.90	9025.30	10791.30
113	14500.30	17005.10	13051.00	13769.60	11780.00	12368.20
126	16400.00	18000.10	14905.30	15228.60	13502.00	13784.40
136	19123.12	18809.20	17356.20	16829.70	16405.24	15153.70

DDS = Días después de la siembra

ETM-REF = Parcela que no tuvo restricciones de estrés hídrico

T2 = Parcela que se le aplico riegos de auxilio en al etapa vegetativa e inicio de floración

T3 = Parcela que se le aplico riego de auxilio en la etapa vegetativa

Cuadro A.11 Polinomios de tercer grado para el peso seco total expresado en kg ha^{-1} para los niveles de humedad evaluados.

TRATAMIENTOS	MODELO	R ²
1	$-469.017-49.404X+3.174X^2-0.013X^3$	0.986
2	$-1625.787+17.765X+2.224X^2-0.0104X^3$	0.980
3	$-1543.832+22.431X+1.873X^2-0.0085X^3$	0.971

X = Días después de la siembra

Cuadro A.12 Acumulación de nitrógeno en la planta de maíz en las tres condiciones de humedad de suelo durante el ciclo del cultivo.

DDS	Acumulación de nitrógeno kg ha ⁻¹					
	Tratamiento 1		Tratamiento 2		Tratamiento 3	
	Observado	Simulado	Observado	Simulado	Observado	Simulado
9	0.27	1.57	0.25	1.32	0.27	2.17
39	30.55	93.41	34.82	62.48	24.55	71.24
70	178.07	121.27	195.29	142.46	154.87	120.45
101	202.23	237.36	236.18	235.23	172.63	217.20
131	216.44	263.45	249.95	257.36	260.98	251.37
158	265.35	180.05	247.17	153.49	234.41	166.38

DDS = Días después de la siembra

T1 = Parcela que no tuvo restricciones de estrés hídrico

T2 = Parcela que se le aplicó riegos de auxilio en la etapa vegetativa e inicio de floración

T3 = Parcela que se le aplicó riego de auxilio en la etapa vegetativa

Cuadro A.13 Polinomios de tercer grado para la fracción de incremento de nitrógeno en la planta de maíz para las diferentes condiciones de humedad.

TRATAMIENTOS	MODELO	R ²
1	$-164.959+8.263X-0.0668X^2+0.000196X^3$	0.916
2	$-147.247+7.193X-0.0475X^2+0.000111X^3$	0.915
3	$-118.850+6.079X-0.0440X^2+0.000129X^3$	0.906

Cuadro A.14 Capacidad de predicción del modelo EPIC, en las variables involucradas en la simulación en el tratamiento ETM-REF.

Variables	Condición de humedad de suelo			
	Evaluada			
	ETM –REF			
	Observados	Simulados	Diferencia	Predicción
Índice de área foliar (m ² /m ²)	5.12	5.62	+0.50	Sobre estima
Materia Seca (kg/ha)	19,123.12	18,809.2	-313.92	Sub estima
Acumulación de nitrógeno (kg/ha)	265.35	263.45	-1.90	Sub estima
Rendimiento (kg/ha)	10,554.00	6,502.31	-4051.69	Sub estima

Cuadro A.15 Capacidad de predicción del modelo EPIC, en las variables involucradas en la simulación en el tratamiento T2.

Variables	Condición de humedad de suelo			
	Evaluada			
	T2 (Riegos en etapa vegetativa y floración)			
	Observados	Simulados	Diferencia	Predicción
Índice de área foliar (m ² /m ²)	4.82	5.55	+0.73	Sobre estima
Materia Seca (kg/ha)	17,356.20	16,829.7	-526.50	Sub estima
Acumulación de nitrógeno (kg/ha)	249.94	257.36	+7.42	Sobre estima
Rendimiento (kg/ha)	9,612.00	6,227.3	-3,384.70	Sub estima

Cuadro A.16 Capacidad de predicción del modelo EPIC, en las variables involucradas en la simulación en el tratamiento T3.

Variables	Condición de humedad de suelo			
	Evaluada			
	T3 (Riegos en etapa vegetativa)			
	Observados	Simulados	Diferencia	Predicción
Índice de área foliar (m ² /m ²)	4.74	5.11	+0.37	Sobre estima
Materia Seca (kg/ha)	16.405.24	15,153.7	-1,251.54	Sub estima
Acumulación de nitrógeno (kg/ha)	260.98	251.37	-9.61	Sub estima
Rendimiento (kg/ha)	8,740.00	4,284.03	-4,455.97	Sub estima