

**CONSTRUCCIÓN Y CALIBRACIÓN DE MODELOS DE SIMULACIÓN PARA
ALFALFA (*Medicago sativa* L.) y MAÍZ FORRAJERO (*Zea mays* L.) EN EL
SUR DE NUEVO LEÓN, MÉXICO.**

CAMERINO ROJAS MONTES

TESIS

**Presentada como requisito parcial para
obtener el grado de:**

**Maestría en Ciencias
en Zootecnia**



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
ANTONIO NARRO
PROGRAMA DE GRADUADOS**

**Buenavista, Saltillo, Coahuila, México
Diciembre del 2008**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
DIRECCIÓN DE POSTGRADO**

**CONSTRUCCIÓN Y CALIBRACIÓN DE MODELOS DE SIMULACIÓN PARA
ALFALFA (*Medicago sativa* L.) Y MAÍZ FORRAJERO (*Zea mays* L.) EN EL
SUR DE NUEVO LEÓN, MÉXICO.**

TESIS

POR:

CAMERINO ROJAS MONTES

**Elaborada bajo la supervisión del comité particular de asesoría
y aprobada como requisito parcial, para optar al grado de:**

**MAESTRO EN CIENCIAS
EN ZOOTECNIA**

COMITÉ PARTICULAR

Asesor principal:

Dr. Heriberto Díaz Solís

Vocal:

Dr. Eduardo Aizpuru García

Vocal:

Dr. Ramiro López Trujillo

Vocal:

Dr. Froylan Rincón Sánchez

**Dr. Jerónimo Landeros Flores
Director de Postgrado**

**Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.
Diciembre del 2008**

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme sus bendiciones, por guiarme todos los días hacia el camino del bien y por darme las fuerzas necesarias para lograr mis metas en la vida.

A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, por darme la oportunidad de formarme profesionalmente.

Al Dr. Heriberto Díaz Solís, por su apoyo incondicional, orientación, sugerencias en la realización de este trabajo y por su amistad.

Al Dr. Eduardo Aizpuru García, por sus aportaciones y consejos en el desarrollo de este trabajo.

Al Dr. Ramiro López Trujillo, por sus aportaciones y consejos en el desarrollo de este trabajo.

Al Dr. Froylan Rincón Sánchez, por sus aportaciones y consejos en el desarrollo de este trabajo.

A todos los maestros que intervinieron en mi formación profesional durante mi estancia en la maestría. "Gracias".

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo económico en la realización de la Maestría.

Al Sr. Jesús H. Cabrera Hernández, por su colaboración en los muestreos de campo.

A la Ing. María de Lourdes Hernández Hernández, por su apoyo en la medición de Área Foliar.

Al TLQ Carlos Alberto Arévalo Sanmiguel, por su colaboración en el trabajo de laboratorio.

A mis compañeros y amigos Bulmaro, Higinio, Luis Ángel, Miguel, Misael, Sergio, que de una manera u otra colaboraron en este trabajo.

A mis amigos Veracruzanos (Paraíso # 21), José Juan, Roberto, José, Ángel, Emilio, Esteban, Lupe, por brindarme su amistad y por colaborar en los muestreos.

A todas aquellas personas que de una manera u otra colaboraron en la realización de este trabajo.

DEDICATORIA

A mis padres. Con amor y cariño para mis padres **Antonio Rojas Pérez y Josefa Montes Espinoza** gracias por darme la vida, por sus sabios consejos que me han impulsado a seguir el camino de la superación, por enseñarme a ser responsable; gracias por todo el apoyo moral y económico que me han brindado siempre para seguir adelante y lograr mis metas. “Eternamente mil gracias, los quiero mucho y que Dios los bendiga siempre”.

A mis **hermanos y hermanas**. Gracias por el cariño que siempre me han brindado, por su apoyo económico para lograr mis objetivos en la vida y por sus valiosos consejos que me han servido para ser una persona de bien.”Los quiero mucho”.

COMPENDIO

**CONSTRUCCIÓN Y CALIBRACIÓN DE MODELOS DE SIMULACIÓN PARA
ALFALFA (*Medicago sativa* L.) Y MAÍZ FORRAJERO (*Zea mays* L.) EN EL
SUR DE NUEVO LEÓN, MÉXICO.**

POR

CAMERINO ROJAS MONTES

**MAESTRÍA EN CIENCIAS
EN ZOOTECNIA**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
BUENAVISTA, SALTILLO, COAHUILA, MEXICO DICIEMBRE 2008**

DR. HERIBERTO DÍAZ SOLÍS --ASESOR—

**Palabras clave: Simulación, Maíz, Alfalfa, Stella, DSSAT, Coeficientes
genéticos.**

Los modelos de simulación son utilizados para predecir el comportamiento de fenómenos naturales, y son una herramienta importante en la investigación agropecuaria. Estos modelos no sustituyen a los experimentos de campo, pero reducen su número y los costos de investigación.

El objetivo en este trabajo fue obtener información de campo para estimar relaciones funcionales de variables físicas y biológicas en los cultivos

de la alfalfa y maíz; desarrollar modelos de simulación de su crecimiento con el programa Stella 9.0.2; calibrar los modelos de maíz dentro del programa DSSAT 4.0.2 (Decision Support System for Agrotechnology Transfer) y analizar las ventajas y desventajas de dichos programas. El trabajo experimental se realizó en el campo experimental de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro que se encuentra ubicado en Navidad, Galeana, Nuevo León, México. La alfalfa (variedad Cuf-101) se sembró al voleo el 7 de marzo de 2007, con una densidad de 35 kg/ha; la toma de datos comenzó el 26 de junio del mismo año y el diseño experimental fue de bloques al azar con tres repeticiones.

Para el maíz, se utilizaron tres cultivares: AN447, AN388 y A7573. La siembra se realizó el 5 de mayo de 2007, la fertilización se llevó a cabo al momento de la siembra con la dosis de 60-60-60 (N-P-K), bajo un diseño experimental de bloques al azar con tres repeticiones. El ciclo de este cultivo concluyó el 19 de octubre de 2007.

En la alfalfa las variables evaluadas fueron: acumulación de materia seca parcial, índice de área foliar, altura de la planta, número de hojas por tallo, rendimiento anual, kilogramos de proteína anual, proteína cruda, fibra detergente ácido y fibra detergente neutro. Para el maíz se evaluaron las mismas variables más la acumulación de materia seca parcial en grano y relación hoja-tallo.

Los valores de las variables estudiadas predichos con el programa Stella 9.0.2, fueron similares a los observados en campo. Los coeficientes de determinación (r^2) entre los valores observados y simulados fueron superiores a 0.9. El programa DSSAT 4.0.2 también mostró buenas predicciones para el cultivo de maíz. La mayoría de los valores de r^2 fueron superiores a 0.9. Los valores de la raíz cuadrada del cuadrado medio del error (RMSE) fueron mínimas en todas las variables simuladas. En los dos programas se obtuvieron resultados satisfactorios, pero en DSSAT 4.0.2 se dificulta más el proceso de

simulación ya que necesita información detallada del manejo del cultivo, no es flexible para simular cambios importantes en el sistema de producción y no incluye la predicción del valor nutritivo de la planta.

ABSTRACT

CONSTRUCTION AND CALIBRATION OF THE SIMULATION MODELS FOR ALFALFA (*Medicago sativa* L.) AND FORAGE MAIZE (*Zea mays* L.) IN THE SOUTH OF NUEVO LEON, MEXICO.

BY

CAMERINO ROJAS MONTES

**MASTER IN SCIENCE
IN ZOOTECNIA**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA ANTONIO NARRO
BUENAVISTA, SALTILLO, COAHUILA, MEXICO DECEMBER, 2008**

DR. HERIBERTO DÍAZ SOLÍS –Adviser—

Key Words: Simulation, Maize, Alfalfa, Stella, DSSAT, Genetics coefficient.

Simulation models are applied to predict the performance of natural phenomena, and therefore, they are an important tool in agricultural research. Do not mean that simulation models substitute the field experiments completely, but they reduce its number and costs.

The objectives in this work were: -to get information from field to estimate functional relationships of physical and biological variables of the alfalfa and

maize crops, - to develop simulation models of growth and development with the program Stella 9.0.2, - to calibrate the maize model within the program DSSAT 4.0.2 (Decision Support System for Agrotechnology Transfer) and, -to examining advantages and disadvantages of both programs. The experimental work was carried out at the Universidad Autonoma Agraria Antonio Narro experiment station located at Navidad, Galeana, Nuevo León, Mexico. In alfalfa was used the variety Cuf-101, the planting date was on March 7, 2007, broadcast with 35 kg/ha of seed. Data recording began the June 26 the same year. The experimental design was randomized blocks with three replicates.

For maize, we evaluated three cultivars: AN447, AN388 and A7573. The planting date was on May 5, 2007, the fertilization was done at planting with 60-60-60 (N-P-K), under an experimental design of randomized blocks with three replicates. The cycle of this crop concluded on October 19, 2007.

The evaluated variables of alfalfa were: Accumulation of partial dry matter, leaf area index, height of plant, number of leaves per stem, annual yield, kg of yearly protein, crude protein, acid detergent fiber and neutral detergent fiber. Were evaluated the same variables for maize adding the dry partial matter in grain and the ratio leaf – stem.

The values of the studied variables predicted with the program Stella, were similar to the observed at the field. The coefficients of determination (r^2) between the observed and simulated values were higher than 0.9. The program DSSAT 4.0.2 also showed good predictions for the maize crop. The value of the root mean square error (RMSE) were very low in all simulated variables. In the two programs were obtained satisfactory results, but in DSSAT 4.0.2 the process to accomplish the simulation is harder since needs information detailed of the handling of crop, if important changes are done, DSSAT is not flexible to simulate the system, and does not include the prediction of the nutritive value of the plant.

ÍNDICE DE CONTENIDO

	Página
ÍNDICE DE CUADROS	xiv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xvi
1. INTRODUCCIÓN	1
2. REVISIÓN DE LITERATURA	4
2.1 Conceptos generales de los modelos de simulación.....	4
2.2 Origen de los modelos de simulación	5
2.3 Fases y etapas para desarrollar un modelo de simulación con Stella.....	5
2.3.1 Fase I. Elaboración del modelo conceptual	5
2.3.2 Fase II. Especificación cuantitativa del modelo.....	6
2.3.3 Fase III. Evaluación del modelo	6
2.3.4 Fase IV. Uso del modelo	7
2.4 Descripción de DSSAT	7
2.5.1 Para operar el modelo	9
2.5.2 Para la Calibración	11
2.5.3 Evaluación	11
2.6 Descripción del modelo de maíz (desarrollo y crecimiento) en el programa DSSAT.....	12
2.6.1 Simulación del desarrollo fenológico del maíz.....	12
2.6.1.1 Aspectos operativos del modelo.....	12
2.6.1.3 Funcionamiento del modelo en los distintos subperíodos....	15
2.6.1.4 Subperíodo desde aparición de estigmas hasta madurez fisiológica.....	17
2.6.2 Simulación del crecimiento del maíz	18
2.6.2.1 Simulación de la producción de biomasa.....	18
2.6.2.2 Determinación del número de hojas totalmente expandidas	19

2.6.2.3 Determinación del incremento de área foliar y materia seca	20
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	30
3.1 Descripción del sitio experimental	30
3.2 Establecimiento de los cultivos.....	30
3.3 Cultivo de alfalfa	31
3.3.1 Diseño de tratamientos.....	31
3.3.2 Variables de respuesta	32
3.3.3 Datos climáticos.....	33
3.3.4 Índices agroclimáticos.....	33
3.4 Cultivo de maíz	34
3.4.2 Variables de respuesta	34
3.4.3 Datos climáticos.....	36
3.4.4 Índices agroclimáticos.....	36
3.4.5 Carga de datos al programa DSSAT.....	36
3.4.5.1 Archivo de manejo del cultivo (Archivo X)	36
3.4.5.2 Archivo de datos de suelo (*.SOL).....	37
3.4.5.3 Archivo de datos climáticos (*.WTH)	37
3.4.5.4 Archivo de datos observados (archivo A y Archivo T)	38
3.4.6 Calibración de DSSAT para los tres cultivares.....	39
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	40
4.1 Cultivo de alfalfa	40
4.1.1 Descripción del modelo de simulación.....	40
4.1.1.1 Submodelo de clima	40
4.1.1.2 Submodelo de crecimiento y desarrollo del cultivo	41
4.1.1.3 Submodelo de manejo	45
4.1.2 Resultados del modelo de simulación.....	45
4.1.2.1 Resultados del submodelo crecimiento y desarrollo del cultivo.....	46
4.1.2.2 Resultados del submodelo de manejo	53
4.1.3 Evaluación del modelo.....	56
4.1.3.1 Materia seca parcial.....	56

4.1.3.2 Índice de Área Foliar	57
4.1.3.3 Altura(ALT).....	58
4.1.3.3 Numero de Hojas por vástago	59
4.1.3.4 Rendimiento Anual (REN ANUAL).....	60
4.1.3.5 Composición química	61
4.2 Cultivo de maíz	63
4.2.1-Resultados del modelo en STELLA	63
4.2.1.1 Descripción del modelo.....	63
4.2.1.2 Resultados del modelo de simulación	69
4.2.2 Resultados de la calibración de DSSAT	81
4.2.2.1 Materia seca Parcial	83
4.2.2.2 Materia seca parcial en hojas	84
4.2.2.3 Materia seca parcial en tallo.....	85
4.2.2.4 Materia seca parcial en grano.....	86
4.2.2.5 Índice de Área Foliar	87
5. CONCLUSIONES.....	89
6. RESÚMEN	90
7. LITERATURA CITADA.	92

ÍNDICE DE CUADROS

	Página
Cuadro 2.1 Descripción de los estadios fenológicos usados por el modelo.	13
Cuadro 3.1 Secuencias de corte en el cultivo de la alfalfa (<i>Medicago sativa</i> L.) en Navidad, Galeana, Nuevo León, México.	32
Cuadro 4.1 Temperatura promedio mensual del año 2007 y promedio mensual de largo plazo (11 años) registradas en el campo experimental de Navidad, Galeana, Nuevo León, México.	41
Cuadro 4.2 Diferencia entre el valor simulado y observado de proteína cruda (PC), fibra detergente ácido (FDA) y fibra detergente neutro (FDN) en alfalfa cuf-101 en Galeana, Nuevo León, México.	62
Cuadro 4.4 Valores estadísticos de los observados y simulados de materia seca parcial y rendimientos a la cosecha, de tres cultivares de maíz en Galeana, Nuevo León, México.	71
Cuadro 4.5 Valores estadísticos de los observados y simulados de índice de área foliar y valores máximos, de tres cultivares de maíz en Galeana, Nuevo León, México.	72
Cuadro 4.6 Valores estadísticos de los observados y simulados de altura y altura máxima, de tres cultivares de maíz en Galeana, Nuevo León, México.	74
Cuadro 4.7 Valores estadísticos de los observados y simulados de relación hoja-tallo y valores a la cosecha, de tres cultivares de maíz en Galeana, Nuevo León, México.	75
Cuadro 4.8 Valores estadísticos de los observados y simulados de proteína cruda y proteína a la cosecha, de tres cultivares de maíz en Galeana, Nuevo León, México.	76

Cuadro 4.9 Coeficientes genéticos utilizados para la calibración de DSSAT
(Decision Support System for Agrotechnology Transfer). 82

Cuadro 4.10 Rangos de los coeficientes genéticos reportados en la base de
datos de DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology
Transfer). 82

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 2.1 Tasa de aparición de ápices foliares de maíz en función de la temperatura.....	14
Figura 2.2 Ajuste para la tasa de iniciación de primordios foliares de maíz en función de la temperatura.....	15
Figura 4.2 Submodelo de crecimiento y desarrollo del cultivo de la alfalfa.....	42
Figura 4.3 Materia seca parcial simulada para la alfalfa Cuf-101 en Galeana, Nuevo León, México (Las líneas verticales descendentes representan los cortes).	47
Figura 4.4 Índice de área foliar simulada para la alfalfa Cuf-101 en Galeana, Nuevo León, México (Las líneas verticales descendentes representan los cortes).	48
Figura 4.5 Altura simulada para la alfalfa Cuf-101 en Galeana, Nuevo León, México (Las líneas verticales descendentes representan los cortes).	48
Figura 4.6 Número de hojas simulado para la alfalfa Cuf-101 en Galeana, Nuevo León, México (Las líneas verticales descendentes representan los cortes).	49
Figura 4.7 Rendimiento anual simulado \pm 1 desviación estándar (MSP) en Galeana, Nuevo León, México.....	50
Figura 4.8 Proteína cruda simulada para la alfalfa Cuf-101 en Galeana, Nuevo León, México (Las líneas verticales ascendentes representan los cortes).	52
Figura 4.9 Fibra detergente ácido simulada para la alfalfa Cuf-101 en Galeana, Nuevo León, México (Las líneas verticales descendentes representan los cortes).	52

Figura 4.10 Fibra detergente neutro simulada para la alfalfa Cuf-101 en Galeana, Nuevo León, México (Las líneas verticales descendentes representan los cortes).	53
Figura 4.11 Rendimiento anual en la alfalfa cuf-101 bajo las condiciones actuales de temperatura (Temp. 0) y con incrementos de 2 ^o C (Temp. 2) y 3 ^o C (Temp. 2) en Galeana, Nuevo León, México.	54
Figura 4.12 Proteína cruda anual en la alfalfa cuf-101 bajo las condiciones actuales de temperatura (Temp. 0) y con incrementos de 2 ^o C (Temp. 2) y 3 ^o C (Temp. 2) en Galeana, Nuevo León, México.	54
Figura 4.13 Rendimiento anual en la alfalfa cuf-101 bajo diferentes días al corte, a los 28 días, 35 días y 42 días, en Galeana, Nuevo León, México.....	55
Figura 4.14 Proteína cruda anual en la alfalfa cuf-101 bajo diferentes días al corte, a los 28 días, 35 días y 42 días, en Galeana, Nuevo León, México.....	55
Figura 4.15 Materia seca parcial simulada y observada en alfalfa cuf-101 en Galeana, Nuevo León, México (Las líneas verticales descendentes representan los cortes).	57
Figura 4.16 Índice de área foliar simulada y observada en alfalfa cuf-101 en Galeana, Nuevo León, México (Las líneas verticales descendentes representan los cortes).	58
Figura 4.17 Altura simulada y observada en alfalfa cuf-101 en Galeana, Nuevo León, México (Las líneas verticales descendentes representan los cortes).	59
Figura 4.18 Número de hojas simulado y observado en alfalfa cuf-101 en Galeana, Nuevo León, México (Las líneas verticales descendentes representan los cortes).	60
Figura 4.19 Rendimiento anual simulado y observado en alfalfa cuf-101 en Galeana, Nuevo León, México.....	61

Figura 4.20 Proteína cruda, fibra detergente ácido y fibra detergente neutro simulada y observada para la alfalfa Cuf-101 en Galeana, Nuevo León, México.....	62
Figura 4.21 Submodelo de clima del modelo construido en Stella 9.0.2 para los tres cultivares de maíz.	63
Figura 4.22 Submodelo de crecimiento y desarrollo del cultivo.	65
Figura 4.23 Materia seca parcial observada y simulada para los tres cultivares de maíz en Galeana, Nuevo León, México.....	70
Figura 4.24 Índice de área foliar observada y simulada para los tres cultivares de maíz en Galeana, Nuevo León, México.....	72
Figura 4.25 Altura observada y simulada para los tres cultivares de maíz en Galeana, Nuevo León, México.....	73
Figura 4.26 Relación Hoja-Tallo observada y simulada para los tres cultivares de maíz en Galeana, Nuevo León, México.....	74
Figura 4.27 Proteína cruda observada y simulada para los tres cultivares de maíz en Galeana, Nuevo León, México.	75
Figura 4.28 Fibra Detergente Ácido observada y simulada para los tres cultivares de maíz en Galeana, Nuevo León, México.....	77
Figura 4.29 Fibra Detergente Neutro observada y simulada para los tres cultivares de maíz en Galeana, Nuevo León, México.....	77
Figura 4.30 Materia seca parcial (MSP) simulada bajo las condiciones actuales de temperatura (Temp. 0) y con un incremento de 3°C (Temp. 3) en 3 genotipos de maíz Galeana, Nuevo León, México. .	79
Figura 4.31 Índice de área foliar (IAF) simulada bajo las condiciones actuales de temperatura (Temp. 0) y con un incremento de 3°C (Temp. 3) en 3 genotipos de maíz en Galeana, Nuevo León, México.	80
Figura 4.32 Proteína cruda (PC) simulada bajo las condiciones actuales de temperatura (Temp. 0) y con un incremento de 3°C (Temp. 3) en 3 genotipos de maíz en Galeana, Nuevo León, México.	81
Figura 4.33 Acumulación de Materia seca parcial (biomasa total) observada y simulada de los tres cultivares de maíz durante el ciclo del cultivo	

	(3 de mayo de 2007 – 19 de octubre de 2007) en Galeana, Nuevo León, México.....	83
Figura 4.34	Acumulación de materia seca parcial en hojas observada y simulada de los tres cultivares de maíz durante el ciclo del cultivo (3 de mayo de 2007 – 19 de octubre de 2007) en Galeana, Nuevo León, México.....	84
Figura 4.35	Acumulación de materia seca parcial en tallos observada y simulada de los tres cultivares de maíz durante el ciclo del cultivo (3 de mayo de 2007 – 19 de octubre de 2007) en Galeana, Nuevo León, México.....	85
Figura 4.36	Acumulación de materia seca parcial en granos observada y simulada de los tres cultivares de maíz durante el ciclo del cultivo (3 de mayo de 2007 – 19 de octubre de 2007) en Galeana, Nuevo León, México.....	86
Figura 4.37	Índice de área foliar observada y simulada de los tres cultivares de maíz durante el ciclo del cultivo (3 de mayo de 2007 – 19 de octubre de 2007) en Galeana, Nuevo León, México.....	88

1. INTRODUCCIÓN

Los cultivos de alfalfa (*Medicago sativa* L.) y maíz (*Zea mays* L.) son los más utilizados como forraje en la actividad ganadera de México, tanto por la alta producción de materia seca, como por su calidad nutritiva.

En los países en vía de desarrollo, existe la necesidad de aumentar la producción de todos los cultivos en forma sustentable. Sin embargo, en estos países es donde se dispone de menos recursos para desarrollar investigación agropecuaria. Los modelos de simulación son herramientas de investigación que pueden reducir los costos de la investigación agropecuaria en relación a la investigación experimental tradicional.

El uso de modelos de predicción es una alternativa para estimar el comportamiento de un cultivo, lo cual constituye una herramienta importante de investigación; es decir, mediante la simulación es posible conocer, en forma aproximada, lo que puede esperarse que ocurra en el sistema cuando se efectúa un cambio en alguno de sus componentes. De esta forma, es factible hacer más corto el proceso de investigación. No sustituye totalmente a los experimentos de campo, pero es menos costosa al reducir el número de experimentos y el tiempo de investigación (Maciel, 1992).

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 (Téllez, 1999).

De ahí que los modelos de simulación en las actividades agrícolas han sido desarrollados básicamente para cubrir tres aspectos: primero, ayudar a entender fenómenos dentro de un sistema; segundo, como herramienta de investigación y tercero, para monitorear el crecimiento y desarrollo de los cultivos a nivel comercial. Los modelos de simulación se dividen en icónicos, empíricos o correlativos, analógicos y mecanicistas. Los *icónicos* que son una representación física a escala; los *empíricos o correlativos* describen las relaciones entre cultivo y ambiente sin referirse a un seguimiento biológico o físico que exista entre las variables gobernantes del crecimiento y desarrollo del cultivo, para este tipo de modelos la herramienta es la estadística; los *analógicos* que se basan en la analogía entre los sistemas, en tanto y los *mecanicistas* se basan en conocimientos detallados del funcionamiento del sistema (Whisler *et al.*, 1986). El modelo utilizado en el presente estudio es de tipo mecanicista.

Los objetivos del presente trabajo fueron:

- Construir modelos de crecimiento y desarrollo de los cultivos de alfalfa y maíz en Stella 9.0.2.
- Calibrar el programa DSSAT 4.0.2 (Decision Support System for Agrotechnology Transfer) para tres cultivares de maíz.
- Comparar las ventajas y desventajas de los programas Stella 9.0.2 y DSSAT 4.0.2.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Conceptos generales de los modelos de simulación

Sistema. Es el conjunto ordenado de partes o componentes relacionados entre sí y con su ambiente, de manera que forman y actúan como una unidad, una entidad o un todo con propiedades emergentes no evidentes en las partes mismas, por lo que no puede ser dividido sin perder sus propiedades o funciones esenciales (Ackoff, 1999; Becht, 1974; Coyle, 1996; Hart, 1985; Odum, 1994; Ruiz y Oregui, 2001). Por otra parte, Grant *et al.* (1997) considera un sistema como una colección organizada de componentes físicos y/o biológicos interrelacionados caracterizados por un límite y unidad funcional. Es una colección de materiales y procesos que en conjunto realizan algunas funciones.

Modelo. Un modelo es una representación abstracta de la realidad de un sistema para describir su estructura, interrelaciones y procesos, mediante el conocimiento estructurado, con el fin de estudiar su comportamiento y de entender su funcionamiento (Dent y Anderson, 1974; Forrester, 1968 y 1969; Godet, 1989; Grant *et al.*, 1997; Odum, 1994; Overton, 1990; Thornley, 1998).

Para Roberts *et al.* (1994) Un modelo de simulación puede ser un modelo físico, una concepción mental, un modelo matemático, un modelo de computadora, o una combinación de todos.

Los modelos pueden ser clasificados de varias formas. Las dicotomías más pertinentes para el propósito incluyen (1) físico vs abstracto, (2) dinámico vs estático, (3) empírico (correlativo) vs mecanístico (explicativo), (4) determinístico vs estocástico y (4) simulación vs analítico (Grant *et al.*, 1997).

Simulación. Simulación es el uso de un modelo para imitar, predecir o describir el comportamiento del sistema en estudio. Los modelos de simulación están compuestos de una serie de operaciones aritméticas y lógicas que, en conjunto, representa la estructura (estado) y el comportamiento (cambio de estado) del sistema de interés. El sistema de interés existe en diferentes estados y momentos en el tiempo y existen reglas que rigen la forma en la cual el estado del sistema cambia a medida que transcurre el tiempo, ya que cada una por sí misma es una función del mismo. Si se escogen las variables apropiadas para describir el sistema y se representan adecuadamente las reglas que gobiernan el cambio, se deberían poder determinar los cambios en el estado del sistema a través del tiempo, es decir, se podría simular el comportamiento del sistema (Grant *et al.*, 1997).

Por otra parte, Odum (1994) menciona que la simulación es el proceso de generar, con ayuda de computadoras, modelos en relación con el tiempo que resulta de una operación de sistemas; la simulación presenta lo que un sistema hace a través del tiempo. En el principio de la repetición digital, la simulación es acompañada por cálculos sucesivos de cantidades en almacenes conforme cambian con entradas y salidas. Al simular sistemas complejos (sistemas con más de un almacén o variable de estado), existe una ecuación diferencial y una línea programada para cada uno, en este proceso, los cálculos son totalmente basados sobre estados al mismo tiempo. En cuanto a precisión, existe un pequeño sesgo en los cálculos realizados por este medio, pero existen procedimientos para hacer correcciones.

Para Guevara (1999), Un modelo de simulación es un programa que permite describir mediante fórmulas matemáticas diferentes procesos, mecanismos e interacciones que ocurren dentro de un sistema biológico o físico y que permite representar una simplificación del sistema.

2.2 Origen de los modelos de simulación

La aparición de los modelos de simulación ocurre a partir de la década de los 50's con modelos descriptivos y matemáticos de los procesos involucrados, a mediados de los 60 aparece el concepto de sistemas dinámicos que incluyen la variable tiempo y que representaban el flujo de esos procesos y sus interacciones. En la década de los 70's se formaliza el concepto de dinámica de sistemas y en los 80's se utilizan procesos, via computadoras, de verificación, validación y evaluación de modelos. En ésta década aparecen los primeros modelos de simulación para los cultivos de maíz, soya, trigo y arroz, incluidos en el programa DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer). A partir de entonces la simulación de sistemas agrícolas empezó a ser una herramienta para la integración de los diferentes componentes productivos dentro de los cultivos agrícolas. Los avances en el conocimiento de las interacciones dentro del ecosistema, influenciados por el ambiente y por las prácticas de manejo, expandió la potencialidad de uso de esta herramienta como ayuda para la toma de decisiones (Barrett y Nearing, 1998).

2.3 Fases y etapas para desarrollar un modelo de simulación con Stella

Grant *et al.* (1997) consideran cuatro fases, cada una con diferentes etapas, para el desarrollo de los modelos de simulación, las cuales se enuncian como sigue:

2.3.1 Fase I. Elaboración del modelo conceptual

El objetivo de la primera fase es desarrollar un modelo conceptual o modelo cualitativo del sistema de interés y comprende las siguientes etapas:

1. Establecer los objetivos del modelo.
2. Establecer los límites del sistema de interés.
3. Categorizar los componentes dentro del sistema de interés.

- 3.1. Variables de estado.
- 3.2. Variables de dirección.
- 3.3. Constantes.
- 3.4. Variables auxiliares.
- 3.5. Transferencia de material e información.
- 3.6. Fuentes y salidas.
4. Identificar las interrelaciones de los componentes esenciales del área de interés.
 - 4.1. Submodelos
5. Representación del modelo conceptual.
6. Descripción del funcionamiento del sistema.

2.3.2 Fase II. Especificación cuantitativa del modelo

Esta fase implica traducir el modelo conceptual en una serie de ecuaciones matemáticas con evidencias o sustento empírico, las etapas de esta fase son las siguientes:

1. Desarrollar la estructura cuantitativa del modelo.
2. Escoger la unidad de espacio y tiempo para las simulaciones (escala espacio – tiempo).
3. Identificar las funciones a utilizar en el modelo.
4. Estimar los parámetros de las funciones a emplear en el modelo (Parametrización).
5. Codificar las funciones del modelo para su empleo en computadora.
6. Ejecutar la simulación básica (inicial).
7. Presentar las funciones del modelo en el lenguaje adecuado.

2.3.3 Fase III. Evaluación del modelo

El objetivo de esta fase, es evaluar el modelo en términos de su utilidad para el propósito que fue diseñado. Las etapas de esta fase son las siguientes:

1. Juzgar la racionalidad estructural e interpretativa de las relaciones funcionales del modelo.
2. Evaluar la coincidencia o grado de correspondencia entre el comportamiento del modelo y los patrones esperados del comportamiento del modelo.
3. Examinar la coincidencia o correspondencia entre las predicciones del modelo y los datos del sistema real.
4. Determinar la sensibilidad de las predicciones del modelo o los cambios en los valores de parámetros importantes.

2.3.4 Fase IV. Uso del modelo

Se busca responder a las preguntas que fueron planteadas al principio en la elaboración del modelo, y consta de:

1. Desarrollar y ejecutar el diseño experimental para las simulaciones.
2. Analizar e interpretar los resultados de la simulación.
3. Examinar los tipos adicionales de políticas de gerencia o de situaciones ambientales.
4. Publicar los resultados de la simulación.

2.4 Descripción de DSSAT

Uehara and Tsuji (1998) mencionan que en 1982 fue convocada una reunión internacional de científicos agrícolas y en sistemas en el International Crops Research Institute for the Semi-arid Tropics (ICRISAT) en Hyderabad, India, para diseñar un sistema de apoyo para la toma de decisiones en la transferencia de agro tecnología, de donde se inició la integración del programa DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer). Posteriormente expertos en análisis de sistemas y simulación de cultivos, diseñaron y desarrollaron este programa en base a la interacción genotipo-ambiente (suelo-planta-atmósfera). En seguida un pequeño grupo de modeladores y científicos

en sistemas generaron un plan para combinar los modelos en lenguaje FORTRAN con bases de datos dbf o dBASE.

Este programa es un paquete que integra suelo, cultivo, atmósfera, bases de datos, herramientas y aplicaciones para estimar la producción y riesgos económicos a escala del campo con diferente clima, suelo y prácticas de manejo (Bruma *et al.*, 2001).

Para Tsuji *et al.* (1994), el sistema DSSAT es un programa de computación interactivo que permite a los usuarios utilizar datos y modelos de simulación para resolver problemas específicos. Incluye un programa que integra los modelos de simulación de cultivos, con una base de datos, un programa de utilidades, y programas de aplicación de las simulaciones. La finalidad principal de la aplicación de este sistema es mejorar la eficiencia de quienes toman decisiones, reduciendo el tiempo requerido para analizar interacciones complejas.

El programa DSSAT está diseñado para permitir a los usuarios (Jones *et al.*, 1998):

- Cargar, organizar y almacenar datos de cultivos, suelos y meteorológicos.
- Recuperar, analizar y mostrar información.
- Calibrar y evaluar los modelos de crecimiento de cultivos.
- Evaluar diferentes prácticas de manejo en diferentes sitios.

En la adaptación y aplicación de DSSAT para una localidad los usuarios normalmente usan el siguiente procedimiento (Jones, 1993):

1. Llevar a cabo el experimento en campo en uno o más cultivos y coleccionar un conjunto de datos mínimo requerido para correr y evaluar un modelo de cultivo. El experimento de campo es necesario para calibrar los cultivares de la localidad. Correr el modelo usando los nuevos datos para evaluar la

habilidad del modelo para predecir el comportamiento del cultivo en la región de interés. En muchos casos, son usados los datos previos del experimento. El modelo es modificado si la evaluación demuestra que no alcanza el nivel de precisión requerido.

2. Cargar los datos de suelo y datos meteorológicos históricos para los sitios de la región. Revisar la calidad de suelo y datos meteorológicos. Realizar el análisis de sensibilidad en el modelo de cultivo para tener una visión general de la respuesta del modelo para el manejo de prácticas alternativas y condiciones meteorológicas.
3. Seleccionar un conjunto de nuevas prácticas de manejo y simular cada uno de estos conjuntamente con prácticas existentes por un número determinado de años para predecir el comportamiento y la incertidumbre asociada con cada una de las prácticas. Comparar las prácticas alternativas usando medias, varianzas y distribución de la probabilidad acumulativa del rendimiento simulado, uso de agua, longitud de la estación, aplicación de nitrógeno, la ganancia neta y otras respuestas. Proveer resultados y recomendaciones para tomar decisiones.

2.5 Datos Mínimos Necesarios para la operación, calibración, y evaluación de un modelo en el programa DSSAT

Los datos mínimos necesarios para la operación, calibración y evaluación de un modelo en DSSAT son los siguientes (Hunt y Boote, 1998):

2.5.1 Para operar el modelo

Requiere los aspectos relacionados a la caracterización del sitio, clima y suelo más otros aspectos del sistema como las características genéticas de los cultivos y el manejo del cultivo, los datos específicos son los siguientes:

Sitio:

- Latitud y longitud, elevación, promedio de temperatura anual y promedio de la amplitud térmica anual.
- Pendiente y aspecto general del paisaje, drenaje, presencia de piedras en superficie.

Clima:

- Radiación global diaria, temperatura máxima y mínima y precipitaciones.

Suelos:

- Clasificación usando el sistema local y a nivel de familia del sistema taxonómico del USDA-SCS.
- Características básicas del perfil por cada capa de suelo u horizonte: determinaciones *in situ* de curvas de retención hídrica (saturación, límite superior de drenaje (CC = Capacidad de Campo) y límite inferior (PM = Punto de Marchites); densidad aparente, carbono orgánico, pH, factor de crecimiento de raíces, coeficiente de drenaje.

Análisis de suelos:

- Mediciones en las capas superficiales del suelo de la densidad aparente, carbono orgánico, nitrógeno orgánico, pH, P y K.

Condiciones Iniciales:

- Cultivo anterior, raíces y cantidad de nódulos
- Agua, amonio y nitratos por capa de suelo

Manejo:

- Nombre del cultivar y tipo
- Fecha de siembra, profundidad y método, espaciamiento entre surcos y dirección, densidad de plantas
- Irrigación y manejo del riego, fechas, métodos de riego y cantidades o profundidades
- Fertilización inorgánica

- Residuos (fertilizante orgánico), material vegetal, profundidad de incorporación cantidad y concentración de nutrientes
- Aplicaciones de otros agroquímicos
- Labranza
- Esquema de Cosecha

2.5.2 Para la Calibración

Lo indicado en el apartado para operar el modelo más los siguientes datos:

Funcionamiento del cultivo:

- Fecha de emergencia
- Fecha de floración o polinización
- Fecha de madurez fisiológica
- Área foliar y peso de la parte aérea de la planta en tres distintos momentos del ciclo.
- Rendimiento en grano expresado como materia seca
- Materia seca total a cosecha o índice de cosecha
- Peso unitario del grano en materia seca
- Número de granos por planta
- Número de hojas producidas
- Porcentaje de nitrógeno en el grano
- Porcentaje de nitrógeno en el resto de la planta

Estos datos son necesarios tomando en cuenta los mismos cultivares y contemplando el mayor rango posible de condiciones ambientales.

2.5.3 Evaluación

Incluye todos los aspectos para la operación del modelo más la información de campo para la cual se validará el modelo (por ejemplo, fecha de

floración femenina, madurez fisiológica, rendimiento en grano, materia seca de la parte aérea, entre otros). Se requieren datos de un número de experimentos que permitan evaluar la precisión del modelo en un amplio rango de ambientes. La evaluación de un modelo incluye la comparación de las salidas del modelo previamente calibrado con los datos reales para las variables deseadas. Esta evaluación permite conocer las bondades de uso de esta herramienta, a partir de la precisión obtenida en la simulación. Si el objetivo fuera la predicción del rendimiento, la evaluación permitiría conocer la relación entre los valores calculados por el modelo y los valores reales medidos. Se pueden especificar ambientes a partir de índices ambientales, o bien en función de factores agronómicos (fecha de siembra, densidad de plantas) o en términos de los aspectos físicos más importantes del ambiente (profundidad del perfil de suelo, duración del día, temperaturas medias).

2.6 Descripción del modelo de maíz (desarrollo y crecimiento) en el programa DSSAT

Ritchie *et al.* (1998) describen el modelo de maíz (desarrollo y crecimiento) en el programa DSSAT como sigue:

2.6.1 Simulación del desarrollo fenológico del maíz

El modelo CERES-Maize dentro de DSSAT utiliza el fotoperíodo y la temperatura para predecir el desarrollo fenológico. Este modelo posee un sistema de pronóstico detallado de las fases y número de hojas y un mecanismo sencillo de calibración y validación.

2.6.1.1 Aspectos operativos del modelo

Hay cuatro parámetros o coeficientes genéticos, que describen el comportamiento fenológico de cada cultivar:

1. Suma de temperaturas (expresada en grados día sobre una temperatura base de 8 °C) desde la emergencia hasta el final de la etapa juvenil (P1).
2. Sensibilidad fotoperiódica, establecida en días de retraso del espigamiento por cada hora de aumento del fotoperíodo por encima de un valor umbral de 12.5 hr (P2).
3. Suma de temperaturas desde la aparición de los estigmas a madurez fisiológica (P5).
4. Suma de temperaturas, entre apariciones sucesivas de ápices foliares (PHINT).

Los intervalos entre las fases fenológicas consideradas en el modelo representan períodos condicionados por diferentes procesos fisiológicos. En la Cuadro 2.1, se listan y describen las fases empleadas por el modelo.

Cuadro 2.1 Descripción de los estadios fenológicos usados por el modelo.

Estadio fenológico ISTAGE	Descripción de los subperíodos
7	Previo a la siembra (barbecho)
8	Siembra a germinación
9	Germinación a emergencia
1	Emergencia a fin del estadio juvenil
2	Fin del estadio juvenil a comienzo de espigamiento (subperíodo sensible al fotoperíodo)
3	Comienzo de espigamiento a fin de crecimiento foliar
4	Fin de crecimiento foliar a fin de crecimiento de la espiga
5	Fin del crecimiento de la espiga a fin de llenado del grano
6	Fin del llenado del grano a madurez fisiológica

2.6.1.2 Principios considerados en la fenología del maíz

El modelo considera que la velocidad de desarrollo en los diferentes estadios aumenta linealmente sobre la temperatura base (TBASE) de 8 °C hasta el nivel de 34 °C y luego decrece linealmente hasta cero desde 34 a 44 °C (Figura 2.1).

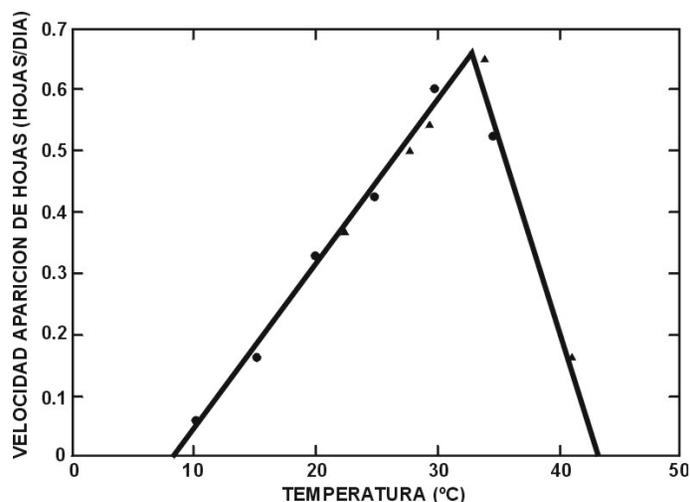


Figura 2.1 Tasa de aparición de ápices foliares de maíz en función de la temperatura.
La suma de temperaturas (DTT) se efectúa según la siguiente ecuación:

$$DTT = TEMPM - TBASE$$

para $TEMPM > TBASE$

Donde TEMPM es la temperatura media diaria.

La suma de temperaturas es igual a cero, si la temperatura máxima diaria (TEMPMX) es menor que la temperatura base. Este procedimiento se modifica si ocurre alguna de las siguientes condiciones:

1. $TEMPMX > TBASE$ y la temperatura mínima diaria $TEMPMN < TBASE$ o,
2. $TEMPMX > 34\text{ °C}$

En tales casos, se interpolan ocho valores entre TEMPMX y TEMPMN, con un factor TEMPFAC que varía entre 0 y 1, y es calculado con ajuste polinomial a una función seno. Los valores interpolados sustituyen a TEMPM para temperaturas entre TBASE y 34 °C y, con la siguiente ecuación, para temperaturas entre 34 y 44 °C .

$$DTT = \frac{44 - TEMPM}{10} \times (34 - TBASE)$$

El promedio de estos valores interpolados constituye el valor de DTT.

Se utiliza la temperatura de 8 °C como temperatura base de desarrollo para todos los subperíodos excepto en siembra-emergencia (estadios 8 y 9). Este valor surge de un ajuste lineal a velocidades de aparición de ápices foliares en función de la temperatura (Figura 2.1). Un ajuste lineal para la predicción de la tasa de iniciación foliar en el rango medio de temperaturas, tiene también una TBASE cercana a 8 °C (Figura 2.2). La DTT desde germinación a emergencia tiene una TBASE de 10 °C.

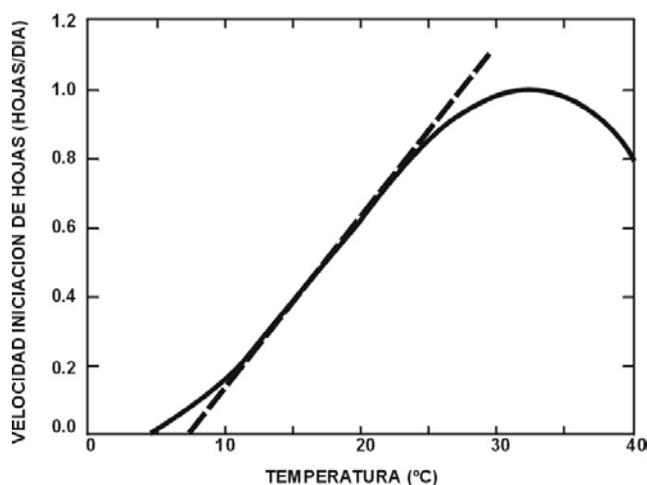


Figura 2.2 Ajuste para la tasa de iniciación de primordios foliares de maíz en función de la temperatura.

2.6.1.3 Funcionamiento del modelo en los distintos subperíodos

Subperíodo siembra-emergencia: En el modelo, este subperíodo requiere un día para la germinación y 45 DTT para la elongación del coleoptilo. Se supone que existe una humedad edáfica adecuada para la germinación al momento de la siembra.

Subperíodo emergencia-aparición de estigmas: Este subperíodo tiene tres sistemas diferentes interrelacionados.

- El número total de hojas ($L\#SD$), se determina a partir del número de primordios foliares iniciados entre emergencia y comienzo de espigamiento.

- La fecha de inicio del espigamiento se determina utilizando sumas térmicas y fotoperíodo.
- La aparición de estigmas o final de la etapa de crecimiento foliar se determina a partir de L#SD y la tasa de aparición de los ápices foliares. Estos tres sistemas se calibran independientemente.

El mismo procedimiento en base a DTT descrito anteriormente se utiliza para predecir la iniciación del primordio foliar (que requiere 21 DTT) y la aparición de los ápices foliares (que requiere de un valor de sumas térmicas igual al asignado en el coeficiente genético PHINT).

La predicción del inicio del espigamiento es muy importante para el modelo. En la etapa juvenil, el desarrollo es dependiente de la temperatura e independiente del fotoperíodo. Luego que la suma térmica requerida para finalizar la etapa juvenil ha sido alcanzada (coeficiente genético P1), el desarrollo del ápice de crecimiento se torna independiente de la temperatura y sensible al fotoperíodo. En el modelo todos los genotipos inician el espigamiento 4 días después del final de la fase juvenil si el fotoperíodo es menor a 12.5 hr. Para fotoperíodos mayores a 12.5 hr, la tasa de inducción (RATEIN) es:

$$\text{RATEIN} = \frac{1}{4 + P2(\text{HRLT} - 12.5)}$$

Donde HRLT es el número de horas de luz (incluyendo los crepúsculos) y P2 es el coeficiente genético que expresa la sensibilidad al fotoperíodo. En el modelo, las plantas alcanzan el estadio de iniciación de la espiga (comienzo de fase 3), cuando la suma total de valores diarios de RATEIN supera el valor de 1.

En este modelo, se asume que la aparición de estigmas y el final del crecimiento foliar ocurren el mismo día. Para determinar la DTT desde la emergencia de la plántula hasta el final del crecimiento de la última hoja, se deben tener en cuenta dos factores. El segundo ápice foliar emerge

aproximadamente 20 DTT después de la emergencia de la plántula. Además se necesitan unos 76 DTT desde la aparición del último ápice foliar hasta la aparición de la lígula de la misma hoja. Por lo tanto, el DTT total desde emergencia de la plántula hasta la aparición de la última lígula es:

$$DTT_{e-uh} = (L\#SD - 2) \times PHINT + 96.0$$

Donde DTT_{e-uh} es la suma térmica desde la emergencia de la plántula hasta el final del crecimiento de la última hoja.

2.6.1.4 Subperíodo desde aparición de estigmas hasta madurez fisiológica

El desarrollo del grano es el proceso más importante durante este subperíodo; existen tres fases en este proceso de desarrollo: una fase de crecimiento inicial lento, una fase de crecimiento lineal del grano a tasa máxima y una fase final de crecimiento lento hasta madurez fisiológica.

Se encontró que las sumas térmicas eran menos variables que el número de días observados en este subperíodo. El modelo utiliza una suma térmica genotipo-específica para este subperíodo (P5).

Durante la fase de crecimiento inicial lento, no existe diferencia significativa de la suma térmica entre genotipos, por lo que para este modelo se estableció una suma de 170 GDD. El período efectivo de llenado comienza luego de la fase inicial de crecimiento lento y culmina cuando se ha completado el 95 % del total de la suma térmica de este subperíodo. En la fase final, desde fin de la fase de crecimiento lineal del grano a tasa máxima hasta la madurez fisiológica, se utiliza el 5 % restante. En caso de bajas temperaturas que eviten la acumulación térmica durante esta fase final, el modelo establece que si la suma térmica es menor o igual a 2 GDD en un día, se produce la maduración.

El valor de P5 es la suma de temperaturas desde la aparición de estigmas hasta maduración y oscila entre 620 y 990 GDD aproximadamente. Estos valores han sido obtenidos de ensayos experimentales.

2.6.2 Simulación del crecimiento del maíz

El modelo simula el crecimiento y el desarrollo del área foliar, la intercepción de la luz, la fotosíntesis y la distribución de la biomasa en las distintas partes de la planta (raíz, tallos, hojas, etc.). Si se activa el balance de nitrógeno (N) el modelo estima la deficiencia de N y sus efectos sobre el crecimiento del cultivo.

2.6.2.1 Simulación de la producción de biomasa

La simulación de la producción de biomasa se efectúa por medio de tres ecuaciones:

Se calcula la radiación fotosintéticamente activa (PAR, MJ/m²) a partir de la radiación solar diaria SRAD (langleys/día o cal/cm²/día).

$$PAR = 0.02 \times SRAD$$

Donde 0.02 resulta del producto del factor de conversión de unidades cal/cm² a MJ/m² (0.04) y de considerar que sólo el 50 % de la radiación solar registrada es PAR.

Se calcula la producción potencial de materia seca (PCARB, g/planta/día), considerando una eficiencia de uso de la radiación (RUE) de 4.2 g/MJ, utilizando la siguiente ecuación:

$$PCARB = 2.1 \frac{SRAD}{PPOP} [1 - e^{-(Y1-LAI)}]$$

Donde PPOP es el número de plantas/m², LAI es el índice de área foliar, y Y1 es un coeficiente de extinción que se calcula como:

$$Y1 = 1.5 - 0.768[(0.01 \times \text{PLRS})^2 \times \text{PPOP}]^{0.1}$$

Siendo PLRS el espaciamiento entre hileras

Finalmente, se utiliza la función AMIN1 para identificar al valor mínimo de tres índices de agobio y establecer la producción diaria de materia seca a partir de PCARB.

$$\text{CARBO} = \text{PCARB} \times \text{AMIN}(\text{SWFD1}, \text{NDEF1}, \text{PRFT})$$

Donde SWFD1 es el índice de agobio para la deficiencia hídrica, que se calcula a partir del balance de agua, NDEF1 es un índice de deficiencia de N calculado a partir del balance de N y PRFT es un índice de agobio térmico calculado con las temperaturas mínimas (TEMPMN) y máximas (TEMPMX) mediante la siguiente expresión:

$$\text{PRFT} = 1 - 0.0025 [(0.25 \times \text{TEMPMN} + 0.75 \times \text{TEMPMX}) - 26]^2$$

2.6.2.2 Determinación del número de hojas totalmente expandidas

Si las hojas aún estuvieran creciendo (ISTAGE menor o igual que 3), el número de hojas totalmente expandidas (CUMPH) se calcula por la suma de temperaturas diarias (DTT) y el coeficiente genético PHINT.

$$\text{CUMPH} = \text{CUMPH} + \frac{\text{DTT}}{\text{PHINT} + \text{PC}}$$

Para CUMPH mayor o igual que 5, PC=1; de lo contrario:

$$\text{PC} = 0.66 + 0.068 \times \text{CUMPH}$$

La hoja que aparece en cada día (TI) es igual a

$$DTT / PHINT \times PC$$

El número de hoja más recientemente expandida (XN) es:

$$CUMPH + 1$$

2.6.2.3 Determinación del incremento de área foliar y materia seca

A continuación se determina el incremento diario del área foliar y de la materia seca para las distintas partes de la planta. Estos cálculos varían para cada subperíodo fenológico:

Subperíodo 1 (desde emergencia hasta fin del estadio juvenil): El crecimiento diario del área foliar por planta (PLAG), si XN es menor que 4, se calcula como:

$$PLAG = 4.0 \times XN \times TI \times SWDF2$$

Donde SWDF2 es un índice de estrés hídrico que se calcula a partir del balance de agua, su valor se encuentra entre 0 y 1, y si por algún motivo en su cálculo se exceden estos límites, el programa toma como valor el límite que es superado.

Si XN es mayor o igual a 4,

$$PLAG = 3.0 \times XN^2 \times TI \times SWDF2$$

El área foliar total de la planta se recalcula,

$$PLA = PLA + PLAG$$

El peso de las hojas nuevas (XLFWT) se calcula como:

$$XLFWT = \frac{PLA^{1.25}}{250}$$

El crecimiento foliar diario (GROLF) se calcula a partir de XLFWT y el monto del día anterior (LFWT).

$$\text{GROLF} = \text{XLFWT} - \text{LFWT}$$

Dado que en este subperíodo sólo crecen hojas y raíces, el crecimiento radical (GRORT) es igual a

$$\text{GRORT} = \text{CARBO} - \text{GROLF}$$

En el caso que GRORT sea inferior a $0.25 \times \text{CARBO}$, se utiliza la reserva de carbohidratos de la semilla (SEEDRV) para mantener el ritmo de crecimiento radical ($\text{GRORT} = 0.25 \times \text{CARBO}$), y SEEDRV es disminuida con:

$$\text{SEEDRV} = \text{SEEDRV} + \text{CARBO} - \text{GROLF} - \text{GRORT}$$

Cuando SEEDRV se agota, GROLF es reducida a $\text{CARBO} \times 0.75$ y PLA es recalculada, con:

$$\text{PLA} = 267 \times (\text{LFWT} + \text{GROLF})^{0.8}$$

Luego se recalcula LFWT con el agregado del incremento foliar (GROLF) de ese día.

Finalmente, se calcula la senescencia foliar total (SLAN) desde emergencia, debido a la evolución fenológica.

$$\text{SLAN} = \text{DTT} \times \text{PLA} / 10000$$

Subperíodo 2 (desde fin del estadio juvenil hasta el inicio de la espiga): En este subperíodo, el cálculo de PLAG, PLA, XLFWT, GROLF, LFWT, GRORT y SLAN es semejante al del subperíodo 1. Una diferencia importante corresponde a SEEDRV, la cual se supone que está reducida a cero y por lo tanto no está disponible para reforzar GROLF o GRORT, en el caso de que CARBO sea insuficiente.

Subperíodo 3 (Desde inicio de la espiga hasta la finalización del crecimiento foliar y aparición de estigmas): En este subperíodo se utilizan tres ecuaciones para el cálculo de PLAG, GROLF y el crecimiento del tallo (GROSTM). La elección de la ecuación que corresponde depende del número de la hoja (XN).

Si XN es menor de 12, se aplica,

$$\begin{aligned} \text{PLAG} &= 3.5 \times \text{XN} \times \text{XN} \times \text{TI} \times \text{SWDF}^2 \\ \text{GROLF} &= 0.00116 \times \text{PLAG} \times \text{PLA}^{0.25} \\ \text{GROSTM} &= \text{GROLF} \times 0.0182 \times (\text{XN} - \text{XNTI})^2 \end{aligned}$$

Donde XNTI es el número de hojas al comienzo del panojamiento.

Si XN se encuentra entre 12 y el número final de hojas (L#SD) menos 3, se usan las siguientes ecuaciones,

$$\begin{aligned} \text{PLAG} &= 3.5 \times 170 \times \text{TI} \times \text{SWDF}^2 \\ \text{GROLF} &= 0.00116 \times \text{PLAG} \times \text{PLA}^{0.25} \\ \text{GROSTM} &= \text{GROLF} \times 0.0182 \times (\text{XN} - \text{XNTI})^2 \end{aligned}$$

Cuando las tres últimas hojas se están expandiendo, se utiliza:

$$\begin{aligned} \text{PLAG} &= 170 \times 3.5 / [(\text{XN} + 3.0 - \text{L\#SD})^{0.5}] \times \text{TI} \times \text{SWDF}^2 \\ \text{GROLF} &= 0.00116 \times \text{PLAG} \times \text{PLA}^{0.25} \\ \text{GROSTM} &= 3.1 \times 3.0 \times \text{TI} \times \text{SWDF}^2 \end{aligned}$$

El crecimiento radical se calcula como:

$$\text{GRORT} = \text{CARBO} - \text{GROLF} - \text{GROSTM}$$

En el caso que GRORT sea menor que $0.08 \times \text{CARBO}$ y SWDF1 mayor que 0, y GROLF o GROSTM sean mayores que 0:

$$\begin{aligned} \text{GRORT} &= 0.1 \times \text{CARBO} \\ \text{GRF} &= \text{CARBO} \times 0.90 / (\text{GROSTM} + \text{GROLF}) \end{aligned}$$

Los valores de GROLF y GROSTM son reducidos por el factor GRF.

$$\begin{aligned} \text{GROLF} &= \text{GROLF} \times \text{GRF} \\ \text{GROSTM} &= \text{GROSTM} \times \text{GRF} \end{aligned}$$

PLA, LFWT y STMWT son actualizados como en el subperíodo 1 y SLAN se actualiza de la siguiente forma,

$$\text{SLAN} = \text{PLA} / 1000$$

Subperíodo 4 (Desde aparición de estigmas hasta comienzo de llenado de granos): Luego de la aparición de los estigmas, comienza el crecimiento de la espiga y cesa el de las hojas.

$$\text{GROEAR} = 0.22 \times \text{DTT} \times \text{SWDF}^2$$

El tallo continúa aumentando de peso durante este estadio.

$$GROSTM = 0.40 \times GROEAR$$

El crecimiento de la raíz es igual a:

$$GRORT = CARBO - GROEAR - GROSTM$$

Si GRORT es mayor que $0.08 \times CARBO$,

$$GRORT = CARBO - GROEAR - GROSTM$$

Si GRORT es menor que $0.08 \times CARBO$, GROEAR es mayor que 0, y GROSTM es mayor o igual a 0, entonces:

$$GRF = CARBO \times 0.92 / (GROEAR + GROSTM)$$

$$GRORT = CARBO \times 0.10$$

En caso que GROEAR y GROSTM asuman otros valores, $GRF = 1$

Con este valor de GRF, cuando GRORT es menor que $0.08 \times CARBO$, se procede a ajustar los valores de GROEAR y GROSTM de la siguiente manera:

$$GROEAR = GROEAR \times GRF$$

$$GROSTM = GROSTM \times GRF$$

La senescencia foliar se calcula de la siguiente manera:

$$SLAN = PLA \times (0.05 + (SUMDTT \times 0.05) / 200)$$

Donde SUMDTT es la suma de grados días desde la aparición de los estigmas.

El peso de la espiga y el tallo es actualizado así,

$$EARWT = EARWT + GROEAR$$

$$STMWT = STMWT + GROSTM$$

Finalmente se actualizan las variables SUMP y IDURP que van a ser utilizadas para el cálculo del número de granos.

$$SUMP = SUMP + CARBO$$

$$IDURP = IDURP + 1$$

Subperíodo 5 (Desde comienzo a fin del llenado de los granos): La influencia de la deficiencia de N sobre el número de granos por planta (GPP) se determina desde el primer día de este subperíodo. El máximo número de

granos (de 200 mg cada uno y con 0.95 % de N) se calcula a partir del N disponible para la planta (NPOOL), estimado a partir del balance de nitrógeno. GPP se establece como el menor valor entre NPOOL y GPP calculado previamente en la sección de fenología.

SLAN es calculado como:

$$SLAN = PLA \times (0.1 + 0.6 \times (SUMMDTT/P5)^3)$$

Donde, SUMDDTT es la suma de grados días entre la aparición de los estigmas y madurez fisiológica.

El llenado relativo de granos (RGFILL) se calcula ocho veces por día a partir de valores interpolados de temperatura cada tres horas (TTMP) (visto en la sección de desarrollo).

Cuando TTMP es mayor que 6 °C, RGFILL es acumulado ocho veces en la siguiente manera:

$$RGFILL = RGFILL + [1 - 0.0025 \times (TTMP - 26)^2] / 8$$

El crecimiento diario del grano (GROGRN, g/planta) se calcula de la siguiente forma:

$$GROGRN = RGFILL \times GPP \times G3 \times 0.001 \times (0.45 + 0.55 \times SDWF1)$$

Donde GPP es el número de granos por planta (coeficiente genético G2), G3 es el coeficiente genético que determina el máximo ritmo de llenado de cada grano (mg/d) y SDWF1 es un índice de estrés por sequía.

Cuando la tasa de llenado del grano es muy pequeña (RGFILL menor de 0.1 mg/d), durante dos días consecutivos, se produce la madurez fisiológica. Esto es más factible que ocurra si la TMAX es menor de 6 grados en dos días consecutivos.

La materia seca diaria es distribuida entre el grano, tallo, hojas y raíces. Primero se determina el crecimiento y peso de tallos, raíces y hojas. Si toda la materia seca producida (CARBO) no es utilizada para el llenado del grano, entonces es distribuida en partes iguales entre tallos y raíces.

$$\begin{aligned} \text{GROSTM} &= \text{CARBO} - \text{GROGRN} \\ \text{STMWT} &= \text{STMWT} + \text{GROSTM} \times 0.5 \\ \text{GRORT} &= \text{GROSTM} \times 0.5 \end{aligned}$$

Si CARBO es menor que GROGRN, un monto limitado de materia seca puede ser traslocado desde el tallo y las hojas hacia el grano. El mínimo peso del tallo (SWMIN) es calculado en PHASEI al comienzo del Subperíodo 4 y es el 80 % del peso del tallo en ese momento. El mínimo peso de hojas (LWMIN) se calcula al comienzo del Subperíodo 5 y es el 85 % del peso de la hoja en ese momento.

Cuando la traslocación de materia seca del tallo al grano no reduce el peso del tallo por debajo de $\text{SWMIN} \times 1.07$, no se transfiere materia seca desde las hojas al grano. Sin embargo, cuando se desciende de dicho nivel, se puede traslocar hasta el 0.5 % del peso de las hojas al tallo, siempre que LFWT sea mayor que LWMIN. Esta traslocación al tallo puede ser luego transferida al grano.

El llenado del grano (GROGRN) no es afectado por la reducción de STMWT hasta que éste alcanza el SWMIN. Cuando esto ocurre, no se produce más traslocación del tallo al grano, y éste se ve limitado en la obtención de materia seca desde el tallo, y cumpliéndose entonces la ecuación $\text{GROGRN} = \text{CARBO}$.

A partir del balance de N, se calcula el efecto del estrés por deficiencia de N sobre la concentración del mineral y sobre el crecimiento de las distintas

partes de la planta. Se establecen dos factores (TFAC y SFAC) para determinar el efecto de la temperatura media (TEMPM) y de la sequía (SWDF1) en la concentración de N (GNP) en GROGRN para cada día. Se usa la función FORTRAN llamada AMAX1 para encontrar el máximo de dos o más valores.

$$TFAC = 0.69 + 0.0125 \times TEMPM$$

$$SFAC = 1.125 - 0.125 \times SWDF1$$

$$GNP = (0.004 + 0.013 \times NDEF2) \times AMAX1(TFAC, SFAC)$$

Las temperaturas medias elevadas y el estrés por sequía determinan que el valor de AMAX1 (TFAC, SFAC) exceda el valor de 1. La deficiencia de N determina que NDEF3 sea inferior a 1. El efecto final de estos cálculos es lograr que GNP oscile entre 0.010 para deficiencias severas a 0.018 para disponibilidad adecuada de N. Sin embargo, las temperaturas elevadas y las sequías pueden limitar el crecimiento del grano.

La demanda de N para el crecimiento del grano es calculada como,

$$NSINK = GROGRN \times GNP$$

El N disponible para su traslocación al grano (NPOOL) es la suma del N en la parte aérea de la planta (NPOOL1) y en las raíces (NPOOL2).

$$NPOOL = (NPOOL1 + NPOOL2) \times XNF$$

XNF se calcula como:

$$XNF = 0.15 + 0.25 \times NFAC$$

Donde NFAC es un índice de deficiencia de N.

Los cálculos de NPOOL1 y NPOOL2 se tratan detalladamente en la sección de balance de N.

En el caso que NPOOL no pudiera proveer suficiente cantidad de N a la demanda del grano (NSINK), se usa la relación $NSDR = NPOOL / NSINK$, para reducir GROGRN y NSINK en forma proporcional.

$$GROGRN = GROGRN \times NSDR$$

$$NSINK = GROGRN \times GNP$$

Se recalcula la concentración de N en la planta y en los destinos. Si NSINK es mayor que $XNF \times NPOOL1$, entonces el N total de la parte aérea (STOVN) es:

$$STOVN = STOVN - XNF \times NPOOL1$$

y el N total en raíces (ROOTN) es:

$$ROOTN = ROOTN - (NSINK - XNF \times NPOOL1)$$

La nueva concentración de N en raíces (RANC), se calcula como el cociente entre el N total de raíces (ROOTN) y el peso seco de las mismas (RTWT)

$$RANC = ROOTN / RTWT$$

En caso contrario, cuando NSINK es menor que $XNF \times NPOOL1$,

$$STOVN = STOVN - NSINK$$

La concentración de N en la parte aérea (VANC) es igual al valor total del N de la parte aérea (STOVN) respecto de su peso seco total (STOWT):

$$VANC = STOVN / STOWT$$

Finalmente, NSINK es traslocado al N del grano (GRAINN).

$$GRAINN = GRAINN + NSINK$$

Ahora se produce la actualización del peso del grano (GRNWT) y peso de la espiga (EARWT).

$$GRNWT = GRNWT + GROGRN$$

$$EARWT = EARWT + GROGRN$$

En el caso que STMWT supere el valor de SWMAX (STMWT al comienzo del llenado de los granos), aquél es igualado a SWMAX.

El balance de N permite calcular el potencial del crecimiento del tallo (PDWI) y raíz (PGRORT), los cuales se usan en el balance de N. Los cálculos se realizan desde el Subperíodo 1 al 5.

$$PDWI = PCARB \times (1.0 - GRORT / CARBO)$$

$$PGRORT = PCARB \times GRORT / CARBO$$

El modelo calcula los factores de senescencia foliar por sequía (SLFW), competencia por luz (SLFC) y bajas temperaturas (SLFT). Estos factores oscilan entre 0 y 1.

$$SLFW = 0.95 + 0.05 \times SWDF1$$

Si LAI es menor que 1, SLFC=1, pero si el LAI es mayor que 4,

$$SLFC = 1 - 0.008 \times (LAI - 4)$$

$$SLFT = 1 - (6 - TEMPM) / 6$$

Si TEMPMN es menor o igual a 0, SLFT = 0

Se debe destacar que la senescencia foliar por bajas temperaturas ocurre por congelamiento (temperatura media menor de 6 °C o temperatura mínima igual o inferior a 0 °C).

En todo momento, el monto total de área foliar verde es la diferencia entre el área foliar producida (PLA) y el área foliar que ha envejecido (SENLA).

El área foliar senescente (PLAS) en un día es:

$$PLAS = (PLA - SENLA) \times [1.0 - \text{AMIN}(SLFW, SLFC, SLFT)]$$

Luego se actualiza SENLA,

$$SENLA = SENLA + PLAS$$

En el caso que SENLA sea menor que la senescencia que ocurriría en el desarrollo normal del subperíodo (SLAN), entonces SENLA se iguala a SLAN.

Los cálculos del índice de área foliar (LAI), la materia seca aérea (g/m^2) y la fracción aérea de la planta se efectúan de la siguiente manera

$$\text{LAI} = (\text{PLA} - \text{SENLA}) \times \text{PPOP} \times 0.0001$$

$$\text{BIOMAS} = (\text{LFWT} + \text{STMWT} + \text{EARWT}) \times \text{PPOP}$$

$$\text{PTF} = (\text{LFWT} + \text{STMWT} + \text{EARWT}) / (\text{RTWT} + \text{LFWT} + \text{STMWT} + \text{EARWT})$$

El peso radical se calcula teniendo en cuenta un crecimiento y senescencia normales. Se supone que la mitad de GRORT se consume en la respiración y la senescencia radical es de 0.5 % por día.

$$\text{RTWT} = \text{RTWT} + 0.5 \times \text{GRORT} - 0.005 \times \text{RTWT}$$

La simulación de todos los procesos explicados anteriormente, además de depender directamente del desarrollo fenológico del cultivo, tiene en cuenta el balance de agua y de nitrógeno para predecir diariamente el crecimiento del cultivo en su conjunto y de cada órgano en particular.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Descripción del sitio experimental

El experimento se llevó a cabo en el campo agrícola experimental de Navidad propiedad de la UAAAN. El campo se ubica dentro del municipio de Galeana, Nuevo León. Geográficamente se encuentra entre las coordenadas 25° 02' 19" N, 100° 37' 29" O y a una altura de 1895 m.

El clima es semiseco, templado muy extremo. La temperatura media anual es de 14.3 °C, con máximas extremas de 40 °C y mínimas de -15 °C en el mes de Enero. La precipitación media anual es de 416 mm distribuidos entre los meses de abril a octubre, donde ocurre el 79 % del total anual. El periodo libre de heladas es de mayo a septiembre. La evaporación media anual es de 1116.7 mm y agosto es el mes con mayor evaporación (Mendoza, 1983).

Respecto a los suelos en la región de Navidad, estos se caracterizan por ser de textura migajón limoso y de color crema a claros, localizados en valles y extensas llanuras, presentan contenidos bajos de materia orgánica, con pH medianamente alcalino y profundos. Medianamente ricos en P asimilable, extremadamente ricos en K intercambiable y pobres en N (Musito, 2003).

3.2 Establecimiento de los cultivos

Para el caso de la alfalfa se utilizó la variedad CUF-101 y en el maíz se utilizaron tres variedades las cuales son: AN447, AN388 y A7573. El establecimiento del cultivo de la alfalfa fue el 7 marzo de 2007 y el cultivo del maíz fue el 3 de mayo del mismo año.

Enseguida se describe la metodología que se utilizó en los dos cultivos.

3.3 Cultivo de alfalfa

3.3.1 Diseño de tratamientos

El experimento se sembró el 07/03/2007 y la densidad de población promedio fue de 700 vástagos/m². Establecido el cultivo, el registro de información empezó el 29 de junio de 2007. Para la distribución de los tratamientos se utilizó un diseño de bloques al azar con tres repeticiones. Las parcelas fueron de 20 x 5 m (100 m²) con espacio de 1 m entre parcelas y entre repeticiones.

Se utilizó un programa de cinco cortes semanales traslapados en el tiempo de acuerdo a la metodología utilizada por Anslow y Green (1967), Gutiérrez (1991) y Gómez (2005). Se inicio con el corte 1, posteriormente, cada semana se cortó según correspondió a los cortes 2, 3, 4 ó 5, y se inicio otro ciclo en ese orden, los cortes se repitieron hasta 20 de junio del 2008, por lo que todas las parcelas contaron con 35 días de rebrote (Figura 3.1). De esta forma se obtuvo una observación cada semana.

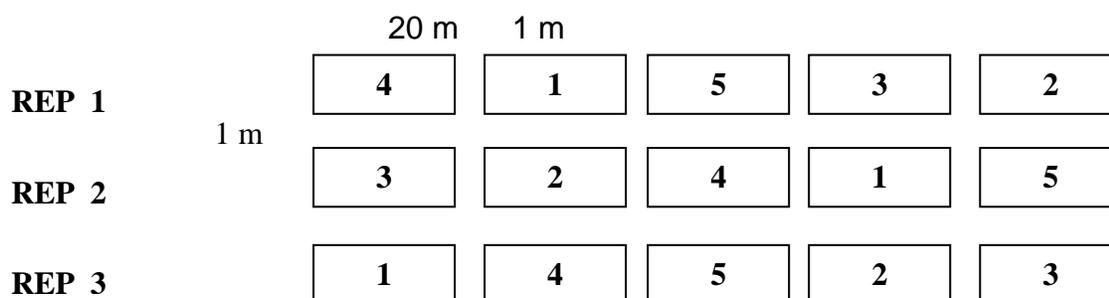


Figura 3.1 Distribución de los cortes programados y su repetición (bloque) de la alfalfa (*Medicago sativa* L.) en Navidad, Galeana, Nuevo León, México.

La secuencia de cortes por fecha de muestreo se presenta en el Cuadro 3.1.

Cuadro 3.1 Secuencias de corte en el cultivo de la alfalfa (*Medicago sativa* L.) en Navidad, Galeana, Nuevo León, México.

Muestreo	Fecha	Programa de cortes
1	29/06/2007	1
2	06/07/2007	2
3	13/07/2007	3
4	20/07/2007	4
5	27/07/2007	5
6	03/08/2007	1
7	10/08/2007	2
8	17/08/2007	3
9	24/08/2007	4
10	31/08/2007	5
.	.	.
.	.	.
.	.	.
	26/06/2008	4

3.3.2 Variables de respuesta

Fenología. El muestreo fue semanal y se midió la altura y se contó el número de hojas en cinco plantas permanentes, identificadas al inicio del ciclo de rebrote, la identificación fue realizada al azar por medio de cinco estacas lanzadas sobre puntos en zigzag y la planta más cercana a esta se identificó con la estaca y con una liga de color dentro de cada unidad experimental.

Materia seca parcial (MSP). Se tomaron dos muestras de un área de 0.25 por 0.20 m (0.05 m²) elegidas al azar aventando el cuadrante sin ver dentro de cada unidad experimental, se cortaron las plantas a una altura de 5 cm, se metieron en bolsa de papel, se secó en una estufa a 65 °C por 72 hr y se pesaron. Los resultados se expresaron en kg/ha.

Componentes del rendimiento. Se utilizaron cinco plantas por parcela con altura de corte de 5 cm y se recolectó el material vegetativo, enseguida se separaron

manualmente los componentes del rendimiento: hoja y tallo después se secaron en estufa a 65 °C durante 72 hr y se pesaron.

Índice de área foliar (IAF). De las cinco plantas que se utilizaron para componentes del rendimiento, el componente hoja se utilizó para determinar el área foliar; esta se cuantificó con un medidor de área foliar portátil LICOR mod. LI-3100A. Para estimar IAF se realizó el muestreo de población de plantas en un área de 25 x 30 cm y así determinar el área que utilizaban las cinco plantas y finalmente dividir el área foliar entre la superficie que ocupaban.

3.3.3 Datos climáticos

Los datos climáticos utilizados en este trabajo se obtuvieron de una estación climática automática (Davis Vantage Pro 2) que se instaló al inicio del experimento, los datos que se utilizaron fueron: temperatura mínima, máxima y radiación solar.

3.3.4 Índices agroclimáticos

Se calcularon grados día de desarrollo (GDD) de acuerdo a las fórmulas propuestas por Raiput (1980):

$$I. \text{ Grados día de desarrollo ó GDD} = \sum_{i=1}^n (\bar{T}_i - T_{base})$$

Donde:

$$\bar{T}_i = \frac{(T_{max} + T_{min})}{2}$$

\bar{T}_i = Temperatura media diaria para el día.

T_{max} = Temperatura máxima para el día

T_{min} = Temperatura mínima para el día

T_{base} = Temperatura base (7 °C)

II. Radiación solar acumulada

Los datos de radiación solar en la estación climática se registrarán cada media hora en watts/m^2 pero para la construcción de los modelos se requerían en $\text{MJ/m}^2/\text{día}$ para hacer esta conversión se hizo lo siguiente:

Se sumaron los datos de radiación solar de un día, la suma se dividió entre 48 para obtener la radiación en watts/m^2 por segundo, posteriormente se multiplicó por 86,400 (segundos en 24 horas) la unidad de medida resultante fueron $\text{J/m}^2/\text{día}$ los cuales se transformaron $\text{MJ/m}^2/\text{día}$.

3.4 Cultivo de maíz

3.4.1 Establecimiento del experimento

Los tratamientos (híbridos) utilizados en este experimento son: T1 = AN447, T2 = AN388 y T3 = A7573, la siembra se realizó el 3 de mayo de 2007 en parcelas de 100 m^2 (10 x 10 m) con una población de 100,000 plantas por hectárea en el cultivar AN447, 86,000 plantas por hectárea en AN388 y 45,500 plantas por hectárea en el cultivar A7573, Al momento de la siembra se fertilizó con la dosis 60 – 60 – 60 siendo la fuente el 17 – 17 – 17 (N-P-K).

Para la distribución de los tratamientos se utilizó un diseño de bloques al azar con tres repeticiones.

3.4.2 Variables de respuesta

Emergencia. Se realizó a la primera y segunda semana después de la siembra, este consistió en contar el número de plantas emergidas en tres surcos (10 m) seleccionados al azar dentro de cada unidad experimental.

Fenología. El muestreo fue semanal, se midió la altura y se contó el número de hojas en cinco plantas permanentes, identificadas al inicio del ciclo de cultivo seleccionadas al azar por medio de cinco estacas lanzadas sobre puntos en

zigzag y la planta más cercana a esta se identificó con la estaca y con una liga de color dentro de cada unidad experimental.

Materia seca parcial. Se cortaron tres plantas elegidas al azar (se lanzaban tres estacas y la planta que quedaba más cerca de estas es la que se cortaba) dentro de cada unidad experimental, se metieron en bolsas de papel, se secaron en una estufa a 65 °C por 72 hr y se pesaron en una balanza analítica, de los tres pesos se obtuvo la media para obtener el peso por planta y para expresarlo en kg/ha se multiplicó por la población de plantas por hectárea.

Componentes del rendimiento. Se utilizaron las mismas plantas que se cortaron para estimar materia seca separando manualmente los componentes del rendimiento: hoja, tallo, espiga y elote, después se secaron en estufa a 65 °C durante 72 hr y se pesaron.

Índice de área foliar. De las tres plantas que se utilizaron para materia seca, el componente hoja se utilizó para determinar el área foliar, este se cuantificó con un medidor de área foliar portátil LICOR mod. LI-3100A. Para estimar el IAF se utilizaron los datos de muestreo de población de plantas en una hectárea, se estimó el área que ocupaban las tres plantas cortadas y finalmente se dividió el área foliar entre la superficie que ocupaban estas plantas.

Análisis químico de la planta. Para determinar la calidad nutritiva de la planta se cortaron tres plantas en cada unidad experimental, se metieron en bolsa de papel, se secaron en una estufa a 65 °C por 72 hr y se mandaron a un laboratorio (AGRO-LAB MEXICO, S. A. DE C. V.) para realizar el análisis bromatológico mediante un método químico, esto se realizó en seis puntos durante el desarrollo del cultivo, en estas muestras se determinaron las siguientes variables: Proteína cruda (PC), fibra detergente ácido (FDA) y fibra detergente neutro (FDN).

3.4.3 Datos climáticos

Los datos climáticos utilizados se obtuvieron de una estación climática automática (Davis Vantage Pro 2) que se instaló al inicio de experimento, los datos diarios que se utilizaron fueron: temperatura mínima, máxima y radiación solar.

3.4.4 Índices agroclimáticos

Para calcular los GDD se utilizó el mismo procedimiento usado en el cultivo de la alfalfa lo único que se modificó es la temperatura base, en este cultivo se usó 8 °C y con radiación solar acumulada se siguió el mismo procedimiento que en la alfalfa.

3.4.5 Carga de datos al programa DSSAT

3.4.5.1 Archivo de manejo del cultivo (Archivo X)

El archivo de manejo del cultivo llamado archivo X es indispensable para poder simular el experimento, este archivo contiene 8 secciones en las cuales se cargó la siguiente información:

1. Detalles experimentales: en esta sección se capturaron características del experimento como código y nombre del experimento, año y cultivo, en información general los nombres de los investigadores participantes en el experimento sus direcciones y el sitio del experimental, también esta sección se capturaron la información de las parcelas.
2. Tratamientos: los nombres de los tratamientos, y la especificación de los niveles de los factores de los tratamientos (cultivar, de análisis de suelo, condiciones iniciales, detalles de plantación, manejo del riego, manejo de

fertilizante, manejo de residuos, aplicación de agroquímicos, cosecha y controles de simulación).

3. Cultivares: en esta sección se seleccionó el cultivar con que se trabajó (AN447, AN388 y A7573), previo a esto se cargaron los tres nuevos cultivares de maíz dentro del archivo .CUL.
4. Campos: identificador de campo, estación meteorológica, tipo de drenaje, profundidad de drenaje, textura del suelo, profundidad del suelo y nombre del suelo.
5. Condiciones iniciales: cultivo previo al experimento, fecha de la medición de las condiciones iniciales, peso de las raíces del cultivo previo.
6. Detalles de siembra: fecha de siembra, fecha de emergencia, método de siembra, densidad de siembra, densidad de plantas a la emergencia, espaciamiento entre surcos, profundidad de siembra.
7. Nivel de manejo de fertilizantes: fecha de fertilización, nombre del fertilizante utilizado, dosis de aplicación de N, P y K.

3.4.5.2 Archivo de datos de suelo (*.SOL)

Se capturaron datos como país, nombre del sitio, código del instituto, latitud, longitud, clasificación del suelo usando el sistema local, color, drenaje, pendiente, factor de fertilidad y la descripción por capas del perfil del suelo en esta sección se cargaron los siguientes datos: profundidad de la capa en centímetros, nombre del horizonte, por ciento de arcilla, por ciento de limo, por ciento de arena, por ciento de carbono orgánico, por ciento de N total, contenido de CaCO_3 expresados en g/kg (Laboratorio de riego y drenaje, UAAAN).

3.4.5.3 Archivo de datos climáticos (*.WTH)

Para correr el modelo se cargaron datos diarios del tiempo meteorológico durante el período de la simulación (año 2007). En este archivo se capturó información de la localización de la estación como localidad, estado, país,

latitud, longitud, elevación y los datos de clima los cuales fueron temperatura mínima y máxima diarias expresadas en grados centígrados, radiación solar diaria en MJ/m/d y precipitación diaria en mm.

3.4.5.4 Archivo de datos observados (archivo A y Archivo T)

Archivo A. En este archivo se cargaron los datos de rendimiento a la madurez, datos máximos observados en el experimento y días julianos de eventos importantes del cultivo. Las variables observadas fueron las siguientes:

HWAM: rendimiento de grano a madurez (kg/ha)

HWUM: peso seco de cada grano cosechado (g)

H#AM: número de granos por metro cuadrado a madurez

H#UM: número de granos cosechados por unidad (planta), a madurez

LAIX: índice de área foliar máximo

CWAM: peso seco de la biomasa aérea (rastroy+granos) a madurez (kg/ha)

BWAH: peso seco del rastrojo (kg/ha)

ADAT: fecha de antésis (día juliano)

MDAT: fecha de madurez fisiológica (día juliano)

Archivo T. En el archivo T se capturaron los datos de las diferentes fechas de muestreo de las variables observadas durante el período de simulación, la información necesaria en este apartado son: fecha (día juliano), índice de área foliar, peso seco del tallo (kg/ha), peso seco de la hoja (kg/ha), peso seco del grano (kg/ha) y peso seco de la biomasa aérea (kg/ha).

Archivo *.CUL. En este archivo se cargaron los parámetros que caracterizan a los cultivares (coeficientes genéticos) utilizados en este experimento, el contenido de este archivo es el siguiente:

VAR#: Código de identificación o número de cada variedad

VAR-NAME: Nombre de la variedad

- ECO#: Código del ecotipo al que pertenece el cultivar
- P1: Tiempo térmico (expresado en grados día sobre una temperatura base de 8 °C) para el sub-período que va desde la emergencia de la plántula hasta el final de la fase juvenil, durante el cual la planta no responde a cambios en el fotoperiodo.
- P2: Retraso del desarrollo del cultivo (expresado en días) por cada hora de incremento en el fotoperiodo por encima de un valor umbral de 12.5 horas.
- P5: Tiempo térmico (expresado en grados/día sobre una temperatura base de 8 °C), desde la antesis hasta madurez fisiológica.
- G2: Máximo número posible de granos por planta.
- G3: Tasa de llenado de granos durante la fase lineal, bajo condiciones óptimas (mg/d).
- PHINT: Intervalo del filocrono; tiempo térmico (expresado como suma de GDD), entre apariciones sucesivas de ápices foliares.

3.4.6 Calibración de DSSAT para los tres cultivares

La calibración se hizo modificando los coeficientes genéticos del archivo *.CUL (P1, P2, P5, G2, G3, PHINT) con el fin de reducir la diferencia de datos observados y simulados de cada cultivar y así minimizar la raíz cuadrada del cuadrado medio del error (RMSE), este valor cuantifica la dispersión o variación entre los valores simulados con los observados (Gijssman *et al.*, 2002) y acercar el coeficiente de determinación (r^2) a 1.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Cultivo de alfalfa

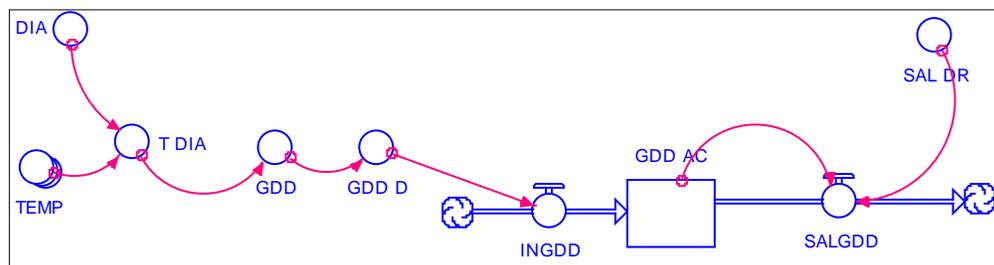
4.1.1 Descripción del modelo de simulación

Para la construcción del modelo para el cultivo de alfalfa con el programa Stella 9.0.2, con cálculos diarios. El modelo de simulación está constituido por 3 submodelos los cuales son: submodelo de clima (Figura 4.1), submodelo de crecimiento y desarrollo del cultivo (Figura 4.2) y submodelo de manejo.

4.1.1.1 Submodelo de clima.

La base del submodelo climático es un generador (TEMP) de temperatura media diaria (T DIA), este generador utiliza una distribución normal con las temperaturas medias y desviaciones estándar mensuales obtenidas de datos de temperatura de 12 años del lugar de estudio (Cuadro 4.1).

Figura 4.1 Submodelo de clima del modelo construido en Stella 9.0.2 para alfalfa.



Para calcular los Grados Días Desarrollo (GDD) se usaron las temperaturas medias diarias generadas por el modelo (T DIA) menos la

temperatura base del cultivo que fue de 7 °C. La variable de estado de GDD acumulados (GDD AC) tiene una entrada que son los ingresos diarios de GDD (INGDD) y la salida (SALGDD) o descarga de GDD AC que se realiza al momento del corte cada 35 días (SAL DR).

Cuadro 4.1 Temperatura promedio mensual del año 2007 y promedio mensual de largo plazo (11 años) registradas en el campo experimental de Navidad, Galeana, Nuevo León, México.

Mes	Temperatura promedio mensual	
	2007 Media±DE	(12años) Media±DE
Enero	10.54±4.33	8.21±3.18
Febrero	11.64±4.12	9.68±3.58
Marzo	14.92±4.27	13.56±3.54
Abril	16.72±3.84	15.27±3.17
Mayo	18.05±3.06	18.10±2.46
Junio	19.01±2.66	19.10±2.09
Julio	19.09±1.97	18.39±2.31
Agosto	18.92±1.99	18.19±2.14
Septiembre	18.85±2.66	17.49±2.64
Octubre	15.06±3.28	14.81±3.24
Noviembre	12.53±4.33	11.42±3.40
Diciembre	10.41±4.27	9.36±3.45

4.1.1.2 Submodelo de crecimiento y desarrollo del cultivo

En este submodelo se usaron los GDD diarios para simular las variables: materia seca parcial (MSP), índice de área foliar (IAF), altura de la planta (ALT), número de hojas (N HOJAS), relación hoja-tallo (RHT) y el rendimiento anual en MSP (REN ANUAL) (Figura 4.2).

a) Materia seca parcial (MSP).

La variable de estado materia seca parcial (MSP) fue representada como sigue:

$$MSP(t) = MSP(t - dt) + (TCC \text{ MSP} - \text{CORTE MSP} - \text{HELA MSP}) * dt$$

Donde, TCC MSP es la ecuación para la tasa de crecimiento del cultivo que es como sigue:

$$TCC \text{ MSP} = -8.9405 + (0.4944 * GDD \text{ D}) + (0.7054 * GDD \text{ D}^2) \quad \text{Ec. 1}$$

Esta ecuación cuadrática fue la de mejor ajuste y fue obtenida al relacionar la variable independiente GDD diarios (GDD D) con la variable dependiente tasa de crecimiento diario de materia seca parcial (TCC MSP), con un valor de r^2 de 0.82. CORTE MSP representa las pérdidas de forraje por el corte que se realizó cada 35 días solo si el cultivo tenía una cantidad de materia seca acumulada mayor a 1000 kg/ha, ya que no es práctico cortar para empacar con menor cantidad de forraje. Las pérdidas por heladas fueron representadas por HELA MSP como la pérdida de todo el forraje cuando la temperatura media del día fuera menor o igual a 6°C considerando que la oscilación diaria de la temperatura media es de $\pm 8^{\circ}\text{C}$.

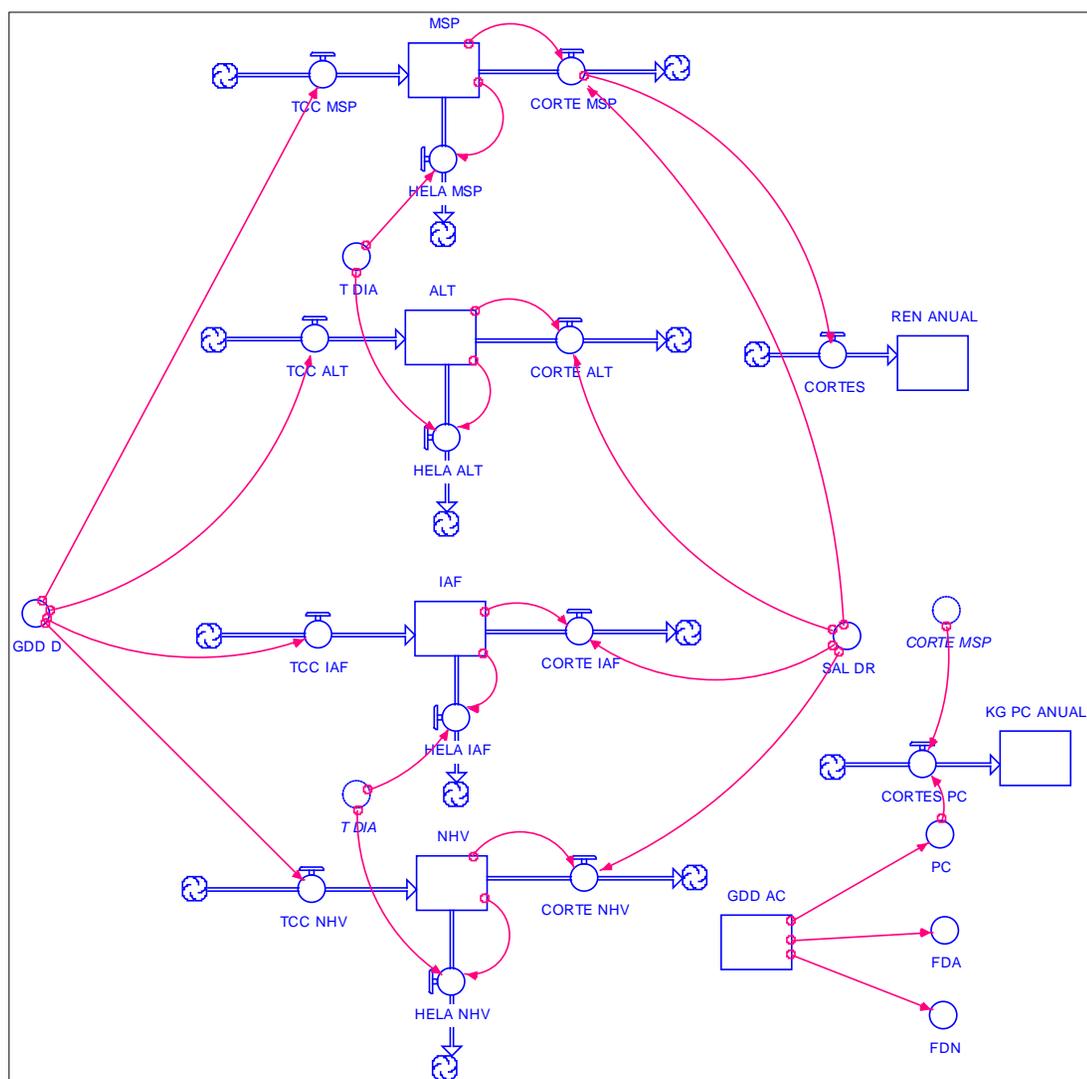


Figura 4.2 Submodelo de crecimiento y desarrollo del cultivo de la alfalfa.

b) Índice de Área Foliar

La variable de estado índice de área foliar (IAF) fue representada como sigue:

$$IAF(t) = IAF(t - dt) + (\Delta IAF - CORTE IAF - HELA IAF) * dt$$

Donde, ΔIAF es el incremento diario del IAF:

$$\Delta IAF = -0.0114 + (0.0017 * GDD D) + (0.0006 * GDD D^2) \quad Ec. 2$$

Esta ecuación fue obtenida al relacionar la variable independiente GDD D y la variable dependiente cambio diario de IAF, el modelo que tuvo mejor ajuste es el cuadrático con un valor de r^2 de 0.82. Las pérdidas de esta variable de estado se calcularon como en el caso de la variable anterior (MSP) cuando se realizó un corte de forraje o cuando se presentó una helada.

c) Altura (ALT)

La variable de estado altura (ALT) fue representada como sigue:

$$ALT(t) = ALT(t - dt) + (\Delta ALT - CORTE ALT - HELA ALT) * dt$$

Donde, ΔALT es:

$$\Delta ALT = \frac{1.6275}{1 + 4439.9914 * \exp^{-0.9925 * GDD D}} \quad Ec. 3$$

Esta ecuación fue obtenida al relacionar la variable independiente GDD D de desarrollo y la variable dependiente incremento diario de altura. El modelo que tuvo mejor ajuste fue el logístico con un valor de r^2 de 0.94. Las pérdidas de esta variable de estado fueron calculadas como en las variables anteriores.

d) Número de hojas por vástago (NHV)

La variable de estado número de hojas por vástago (NHV) fue representada como sigue:

$$NHV(t) = NHV(t - dt) + (\Delta NHV - CORTE NHV - HELA NHV) * dt$$

Donde, Δ NHV es el incremento diario en el número de hojas calculado por:

$$\Delta \text{ NHV} = -0.1025 + (0.0197 * \text{GDD D}) + (0.0046 * \text{GDD D}^2) \quad \text{Ec. 4}$$

Esta ecuación fue obtenida al relacionar la variable independiente grados diarios de desarrollo y la variable dependiente incremento diario de hojas. El modelo que tuvo mejor ajuste fue el cuadrático con un valor de r^2 de 0.85. Las pérdidas de esta variable de estado fueron calculadas como en las variables anteriores.

e) Rendimiento anual (REND ANUAL)

Esta variable se calculó como la suma del rendimiento de materia seca parcial en cada uno de los cortes del año.

f) Proteína cruda (PC)

La proteína cruda fue representada como una variable auxiliar con el nombre de PC. Esta variable fue estimada a partir de los GDD AC, el mejor ajuste que se obtuvo fue el cuadrático con un valor de r^2 de 0.93, siendo la siguiente ecuación resultante:

$$\text{PC} = 48.969 + (-0.125 * \text{GDD AC}) + (0.00015 * \text{GDD AC}^2) \quad \text{Ec. 5}$$

g) Fibra Detergente Ácido (FDA)

La fibra detergente ácido fue representada con una variable auxiliar (FDA), esta es estimada a partir de los GDD AC con la siguiente ecuación:

$$\text{FDA} = 17.118 + (0.0499 * \text{GDD AC}) + (-4.67e - 005 * \text{GDD AC}^2) \quad \text{Ec. 6}$$

Esta ecuación es el resultado de la relación de GDD AC con el cambio de FDA, el mejor modelo de ajuste encontrado fue el cuadrático con una r^2 de 0.87.

h) Fibra Detergente Neutro (FDN)

Esta variable, también fue representada con una variable auxiliar (FDN) y se estimó con la ecuación siguiente:

$$\Delta \text{FDN} = 25.016 + (0.0347 * \text{GDD AC}) + (-1.338e - 005 * \text{GDD AC}^2) \quad \text{Ec. 7}$$

Al igual que la PC y FDA esta variable también fue estimada a partir de los GDD AC relacionándolo con el cambio de FDN observado durante cada período de rebrote. El mejor ajuste obtenido fue el cuadrático con un valor de r^2 de 0.76.

4.1.1.3 Submodelo de manejo

Este submodelo produce escenarios con diferentes días de rebrote (21, 28, 35 y 42 días) y escenarios con incrementos en la temperatura media (incremento de 1 a 3 °C) lo que resulta en diferente cantidad y calidad del forraje producido. Estos escenarios son establecidos por el usuario.

4.1.2 Resultados del modelo de simulación

Las variables que se presentan como resultado de la simulación son: materia seca parcial (MSP), índice de área foliar (IAF), altura (ALT), rendimiento anual (REN ANUAL), proteína cruda (PC), fibra detergente ácido (FDA) y fibra detergente neutro (FDN). Para presentar estos resultados se corrió 100 veces el modelo a 365 días con el fin de obtener la media y la desviación estándar del comportamiento de cada variable estudiada en un año. La única variable aleatoria del modelo es la temperatura media del día.

4.1.2.1 Resultados del submodelo crecimiento y desarrollo del cultivo

a) Materia seca parcial

Usando la Ec. 1, la simulación muestra que en promedio, se pueden obtener en la región seis cortes de alfalfa al año (Figura 4.3). Los rendimientos promedio y desviaciones estándar (kg/ha) de cada corte fue como sigue: 1 = $1,574 \pm 408$, 2 = $2,569 \pm 351$, 3 = $3,348 \pm 207$, 4 = $3,275 \pm 223$, 5 = $3,119 \pm 200$ y 6 = $2,512 \pm 412$, con una producción anual de 16,397 kg/ha. Se ha encontrado una fuerte relación positiva de la temperatura media con la producción de MSP (Santamaría *et al.*, 2000), de forma que los meses con mayor producción de MSP son aquellos cuya temperatura media mensual es superior a 14°C . La producción de MSP en cada corte no supera el valor reportado por Morales *et al.* (2006) en donde obtuvieron producciones de 4.05 toneladas/ha de MSP a los 45 días de rebrote en la misma variedad (Cuf-101) en Oaxaca, México.

Aunque en éste trabajo se cortó cada 35 días. Rivas *et al.* (2005) reportan en la variedad Cuf-101 los siguientes valores en cada corte (ton/ha): enero = 2.3, febrero = 2.35, marzo = 2.91, abril = 2.34, mayo = 1.85, junio = 1.76, julio = 3.4, agosto = 2.48, septiembre = 2.27, octubre = 2.6, noviembre = 2.41 y diciembre = 2.36, en la época de primavera-otoño los valores difieren muy poco pero en invierno estos valores son superiores a los simulados para el lugar de Navidad, Nuevo León ya que el trabajo realizado por Rivas fue realizado en Texcoco, México y el lugar presenta una temperatura media anual más alta (15°C) que Navidad, Nuevo León.

Los valores de MSP en cada corte está por debajo de lo reportado por Villegas *et al.* (2004) el cual reporta rendimientos de 4.7 toneladas de MS/ha en la variedad Valenciana y 4.1 toneladas de MS/ha en la variedad Oaxaca en la época de primavera con 42 días de rebrote en Oaxaca, México.

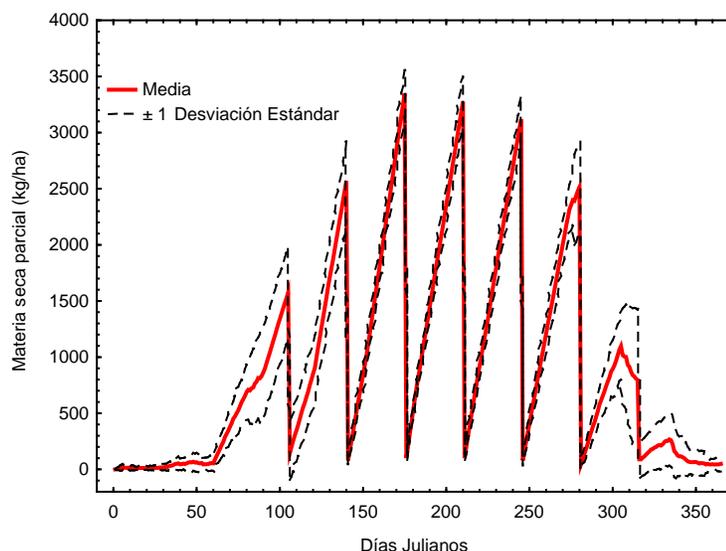


Figura 4.3 Materia seca parcial simulada para la alfalfa Cuf-101 en Galeana, Nuevo León, México (Las líneas verticales descendentes representan los cortes).

b) Índice de Área Foliar

Usando la Ec. 2 la simulación muestra altos valores de IAF en los días de verano (temperatura media alta). El máximo valor de IAF fue de 3.2. En los primeros 60 días del año (enero y febrero) los valores de IAF son muy bajos debido al efecto de las heladas, pero a medida que la temperatura media diaria va aumentando al iniciar la primavera, el IAF aumenta hasta el día juliano 280, y después de este día (otoño) el valor del IAF decrece hasta el término del año. Los valores de IAF en cada corte fueron los siguientes: 1 = 1.3 ± 0.3 , 2 = 2.4 ± 0.3 , 3 = 3.2 ± 0.2 , 4 = 3.2 ± 0.2 , 5 = 2.9 ± 0.2 y 6 = 2.5 ± 0.3 (Figura 4.4).

Al igual que las otras variables el valor de IAF varía de acuerdo a la estación del año; en primavera y verano es cuando se observa mayor IAF, Villegas *et al.* (2004) reportó los siguientes valores de IAF: 2.6, 2.3, 1.4 y 1.4 en invierno, primavera, verano y otoño, en la variedad Valenciana en Oaxaca, México.

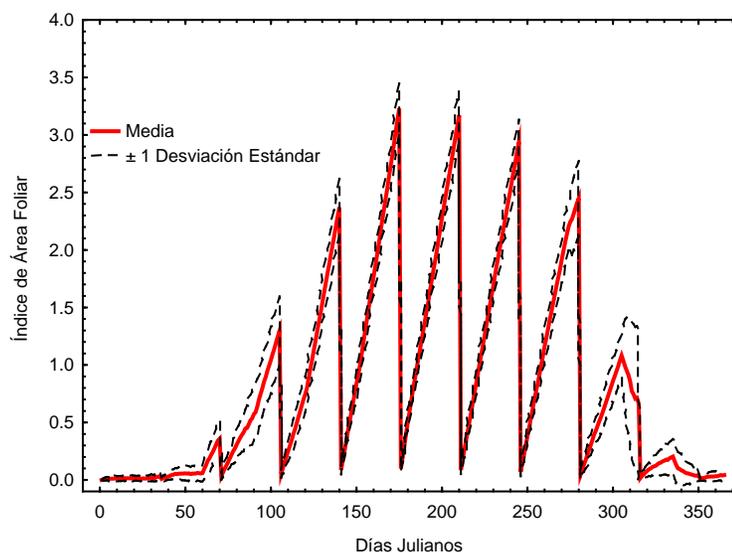


Figura 4.4 Índice de área foliar simulada para la alfalfa Cuf-101 en Galeana, Nuevo León, México (Las líneas verticales descendentes representan los cortes).

c) Altura (ALT)

En la simulación de la variable altura de la planta se utilizó la Ec. 3, la altura en cada corte fue la siguiente (cm): 1 = 19.8 ± 5.7 , 2 = 36.7 ± 3 , 3 = 49.2 ± 1.8 , 4 = 48.9 ± 2.3 , 5 = 47.6 ± 2.2 , 6 = 38.4 ± 4.9 (Figura 4.5).

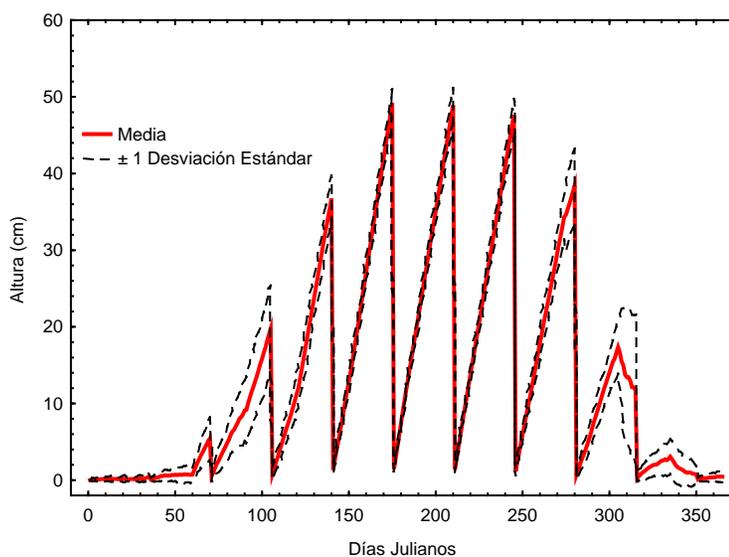


Figura 4.5 Altura simulada para la alfalfa Cuf-101 en Galeana, Nuevo León, México (Las líneas verticales descendentes representan los cortes).

Al igual que en las otras variables estudiadas, esta también tiene una fuerte relación con la temperatura media. La altura máxima simulada es de 48.9 cm este valor se encuentra por debajo de lo reportado por Morales *et al.* (2006) donde reportan una altura de 65.4 cm en la misma variedad de alfalfa (Cuf-101) en Oaxaca, México.

d) Numero de Hojas por vástago (NHV)

El número de hojas por vástago fue simulado utilizando la Ec. 4, y su comportamiento se muestra en la Figura 4.6. Se observa el mismo comportamiento que en las variables anteriores, a mayor temperatura media mayor producción de hojas. El número de hojas para cada corte fue el siguiente: 1 = 11 ± 3 , 2 = 20 ± 2 , 3 = 27 ± 2 , 4 = 27 ± 2 , 5 = 25 ± 1 , 6 = 20 ± 4 .

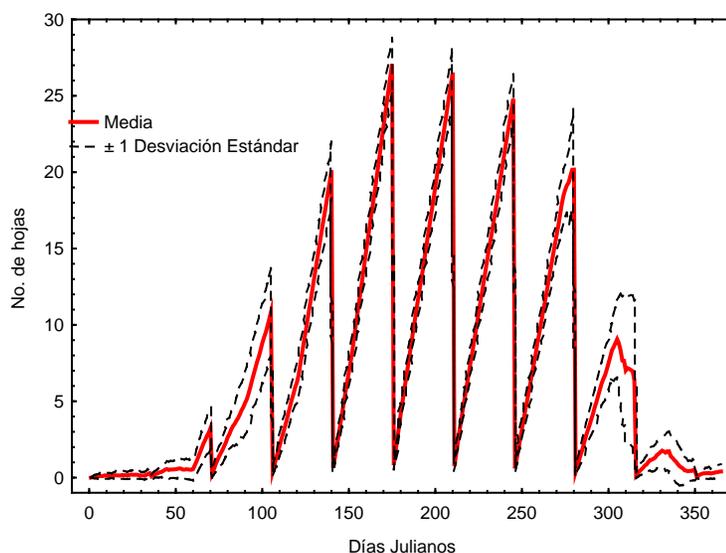


Figura 4.6 Número de hojas simulado para la alfalfa Cuf-101 en Galeana, Nuevo León, México (Las líneas verticales descendentes representan los cortes).

Las hojas representan la biomasa fotosintéticamente activa, la cual es responsable del crecimiento y potencial productivo de las plantas forrajeras. Conforme aumenta la edad de rebrote se incrementa el NHV hasta los 35 días, el cual varía dependiendo de la estación del año, en la época de invierno es

cuando se observa un menor NHV. Villegas *et al.* (2004) reportaron 45 hojas por vástago en la variedad valenciana en época de primavera y en la variedad Oaxaca reportaron 42 y 68 hojas en primavera y verano, respectivamente. Estos valores están por arriba de los simulados para la región de Navidad, Galeana, Nuevo León debido a que es diferente la temperatura del lugar, (temperatura media de 20.6 °C y 14.5 °C en Oaxaca y Navidad) y diferente material genético.

e) Rendimiento anual

La simulación del comportamiento en el rendimiento anual (REND ANUAL) se puede observar en la Figura 4.7. El rendimiento promedio al año de las 100 corridas (100 años) es de $16,928 \pm 1,046$ kg/ha.

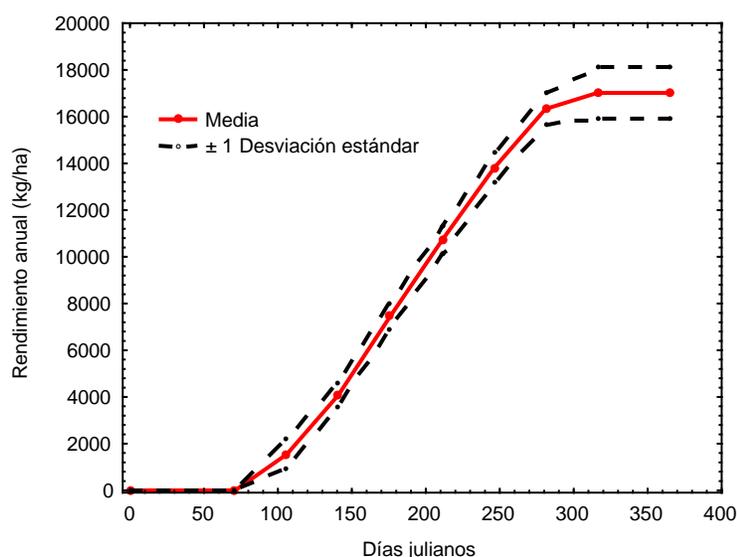


Figura 4.7 Rendimiento anual simulado ± 1 desviación estándar (MSP) en Galeana, Nuevo León, México.

Este rendimiento no supera los rendimientos encontrados por Santamaría *et al.* (2,000), donde reportan rendimiento anual en la alfalfa Cuf-101 de 39,050 kg/ha en Delicias, Chihuahua, 49,200 kg/ha para Zacatecas, 58,660 kg/ha para Morelia, Michoacán, 50,090 kg/ha para Texcoco, México, 56,150 kg/ha y 56,920 kg/ha para Torreón, Coahuila y Durango. En otro estudio, Rivas *et al.* (2,005) reportaron un rendimiento anual de 26,787 kg/ha. El bajo

rendimiento anual de MSP se debe a que el sitio evaluado en este trabajo es de los más restrictivos para la producción de la alfalfa por las bajas temperaturas del invierno y por las características del suelo que presenta el lugar.

f) Composición química

En este apartado se consideraron las variables: proteína cruda (PC), fibra detergente ácido (FDA) y fibra detergente neutro (FDN).

Para simular la PC se utilizó la Ec. 5, el comportamiento de esta variable en cada corte es similar a los valores observados (Figura 4.8). En los primeros 70 días del año el valor de PC fue 34 a 45 %, esto se debió a que las plantas tienen un desarrollo fenológico muy lento por las bajas temperaturas que se presentan en estas fechas, y se mantienen en estado vegetativo temprano. En la época de primavera, verano y otoño se predice un promedio de 22 % de PC al corte (a los 35 días), en cada corte se aprecia la caída de la PC conforme se van acumulando los días de rebrote hasta llegar al corte (de 47 % a 22% de PC).

La variable FDA fue simulada con la Ec. 6, el comportamiento es muy similar a lo observado en el campo; a medida que la planta va acumulando días de rebrote, el valor de FDA va aumentando (Figura 4.9). En los cortes de primavera, verano y otoño el valor promedio en cada corte es de 29 % de FDA. En cada uno de los cortes se muestra el incremento de FDA que va de 17 % al día 1 hasta llegar al corte (35 días) con el 29% de FDA; en invierno los valores de FDA son bajos porque las plantas no se alcanzaban a desarrollar completamente por las pérdidas por heladas y así las plantas no acumulaban muchos días de rebrote y no avanzan en estados fenológicos.

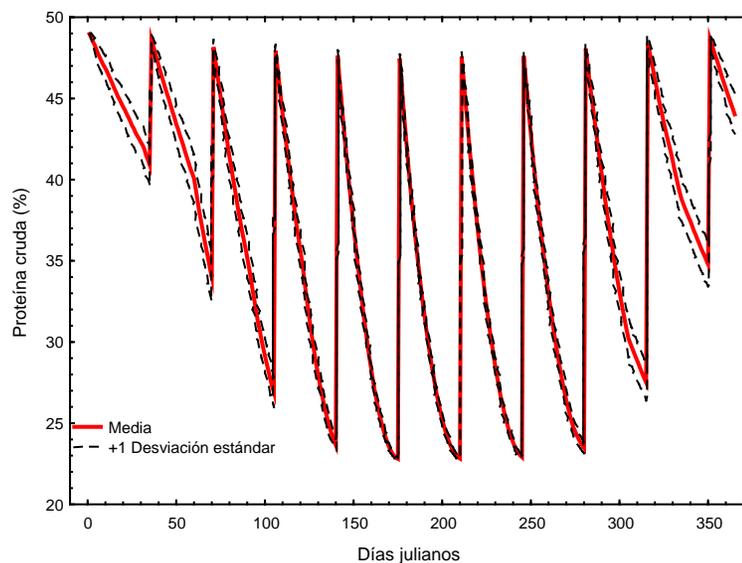


Figura 4.8 Proteína cruda simulada para la alfalfa Cuf-101 en Galeana, Nuevo León, México (Las líneas verticales ascendentes representan los cortes).

La variable FDN se simuló utilizando la Ec. 7. El comportamiento de esta variable es similar al de FDA (Figura 4.10), la única diferencia es que los valores son más altos, estos valores son de 25 % al día 1 de rebrote y a los 35 días de rebrote, se simula un valor promedio de 36 % para los días en que hubo corte o producción de alfalfa superior a 1,000 kg/ha (primavera-otoño).

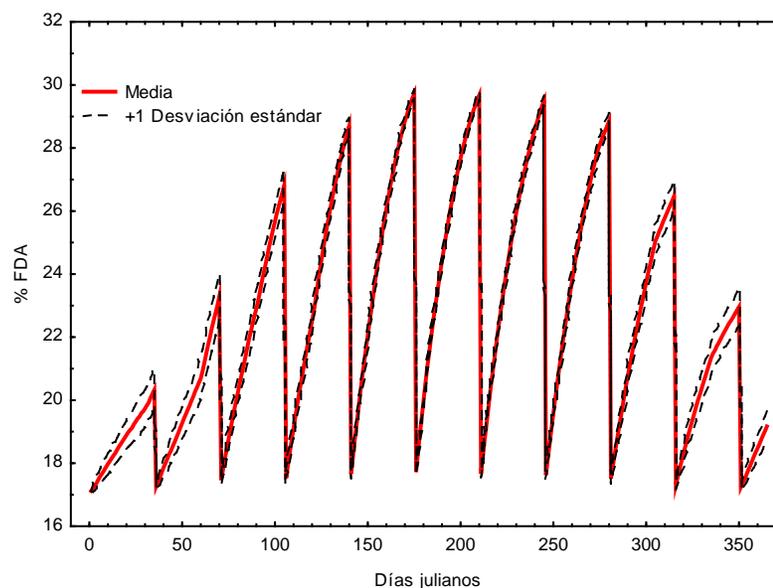


Figura 4.9 Fibra detergente ácido simulada para la alfalfa Cuf-101 en Galeana, Nuevo León, México (Las líneas verticales descendentes representan los cortes).

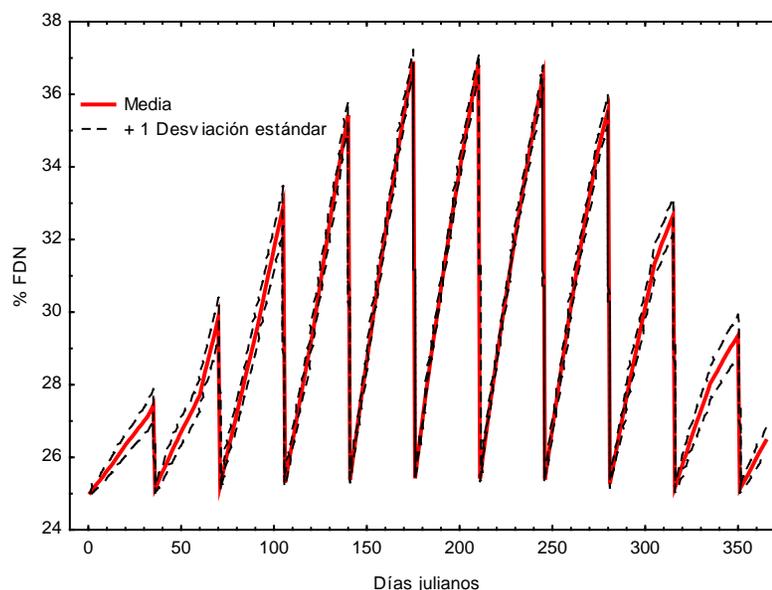


Figura 4.10 Fibra detergente neutro simulada para la alfalfa Cuf-101 en Galeana, Nuevo León, México (Las líneas verticales descendentes representan los cortes).

4.1.2.2 Resultados del submodelo de manejo

En este apartado se presentan los diferentes escenarios en el cambio de temperatura y cambio en los días de rebrote para el corte. Las variables que se reportan son el MSP (kg/ha/año) y la producción de PC (kg/ha/año). En cuanto a temperaturas, se simuló el escenario con las condiciones actuales de temperatura y un escenario en que se supone un incremento de 3 °C en la temperatura media. Los días de rebrote simulados fueron: 28, 35 y 42.

a) Cambio de la temperatura

Al incrementar la temperatura el rendimiento anual aumenta (Figura 4.11), esto es debido a que hay mayor acumulación de GDD en cada corte y como consecuencia mayor producción de alfalfa. En el simulado (Temp 0) sin cambio de temperatura mostró un rendimiento anual de 16,897 kg/ha, en el simulado con incremento de 2 °C (Temp 2) el rendimiento fue de 26,358 kg/ha y con incremento de 3 °C (Temp 3) el rendimiento fue de 30,763 kg/ha. La diferencia es muy alta entre cada escenario de temperatura.

El comportamiento de la producción de PC al año es muy parecido al comportamiento del rendimiento anual, a mayor temperatura mayor producción de PC (Figura 4.12).

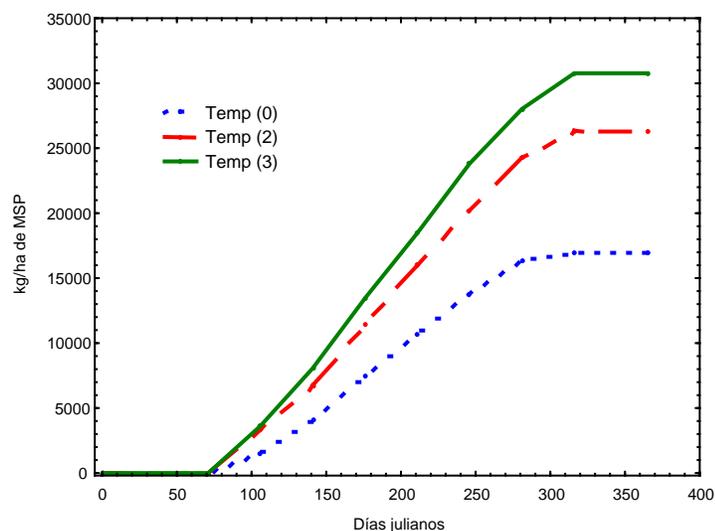


Figura 4.11 Rendimiento anual en la alfalfa CUF-101 bajo las condiciones actuales de temperatura (Temp. 0) y con incrementos de 2^o C (Temp. 2) y 3^o C (Temp. 2) en Galeana, Nuevo León, México.

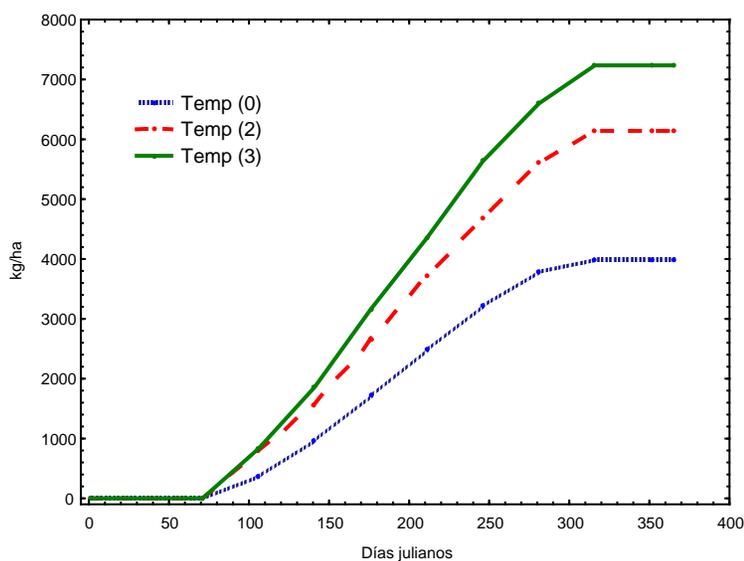


Figura 4.12 Proteína cruda anual en la alfalfa CUF-101 bajo las condiciones actuales de temperatura (Temp. 0) y con incrementos de 2^o C (Temp. 2) y 3^o C (Temp. 2) en Galeana, Nuevo León, México.

b) Cambio de días de rebrote

Al realizar cambios de días de rebrote para el corte no se observan cambios significativos en el rendimiento anual de MSP (Figura 4.13). En cambio

el comportamiento de la PC si hay diferencia entre los escenarios de días de rebrote (Figura 14), se observa que a mayor días de rebrote (42 días) el rendimiento de PC (kg/ha) anual es más bajo que cuando el corte es a los 28 días. Esto se debe a que las plantas conforme van acumulando los días de rebrote se van lignificando y también por la pérdida de hojas por senescencia que sufre la planta.

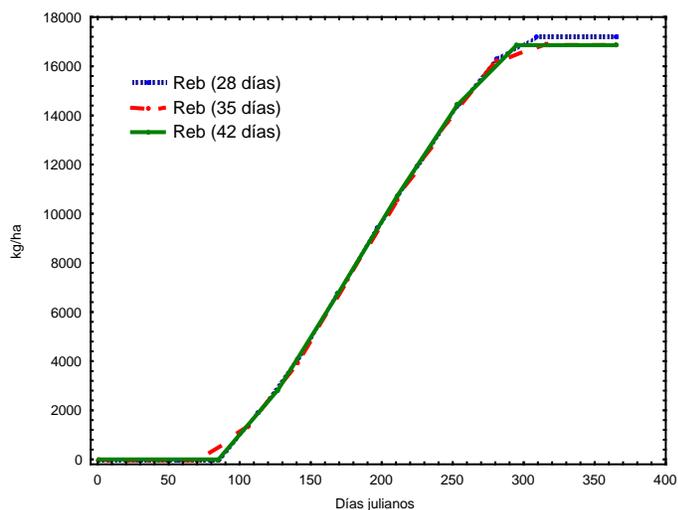


Figura 4.13 Rendimiento anual en la alfalfa cu-101 bajo diferentes días al corte, a los 28 días, 35 días y 42 días, en Galeana, Nuevo León, México.

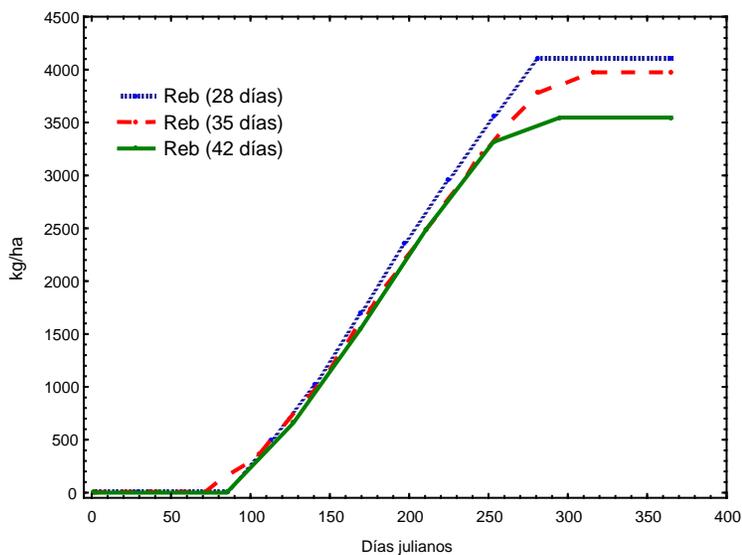


Figura 4.14 Proteína cruda anual en la alfalfa cu-101 bajo diferentes días al corte, a los 28 días, 35 días y 42 días, en Galeana, Nuevo León, México.

4.1.3 Evaluación del modelo

Para realizar la evaluación del modelo se hizo lo siguiente: De los cinco programas de corte, se eligió uno de ellos al azar y no fue incluido en la obtención de las ecuaciones para estimar cada una de las variables; el programa elegido para evaluar el modelo fue el 1; así que los programas 2, 3, 4 y 5 se utilizaron para obtener las ecuaciones para predecir cada variable. Las fechas de corte de los programas son diferentes en todos los casos, aunque sus rebrotes se traslapan.

Para esta evaluación se utilizaron las temperaturas medias diarias observadas en las fechas indicadas y se corrió el modelo en su forma determinista. Las variables de estado descritas anteriormente fueron usadas para esta evaluación.

4.1.3.1 Materia seca parcial

La variable MSP se estimó con la ecuación descrita anteriormente para MSP(t). La ecuación para estimar la TCC MSP fue:

$$\text{TCC MSP} = -9.6937 + (0.78098 * \text{GDD D}) + (0.6955 * \text{GDD D}^2) \quad \text{Ec. 8}$$

La ecuación es de tipo cuadrático, el valor de r^2 fue de 0.82.

El modelo simula de manera aceptable los cortes y el rendimiento de cada uno de ellos (Figura 4.15). En los primeros tres cortes, el modelo sobre estima el rendimiento, en el primer corte con 1,406 kg/ha, en el segundo con 751 kg/ha y el tercero con 281 kg/ha, los otros dos son sub estimados con 509 kg/ha en el quinto corte y en el último con 626 kg/ha. Para los datos observados solo se hicieron muestreos cuando la producción de MSP era considerable, por eso, del 26 de octubre al 28 de marzo se muestran valores observados de 0,

pero en realidad en estas fechas si hubo producción pero muy baja y difícil de estimar. El modelo simula esa baja producción durante el invierno por debajo de los 1,100 kg/ha. Los valores estadísticos obtenidos entre los valores simulados y observados fue de 0.85 para r^2 , esto explica la asociación que existe entre estos dos valores y RMSE fue de 444.1 kg/ha.

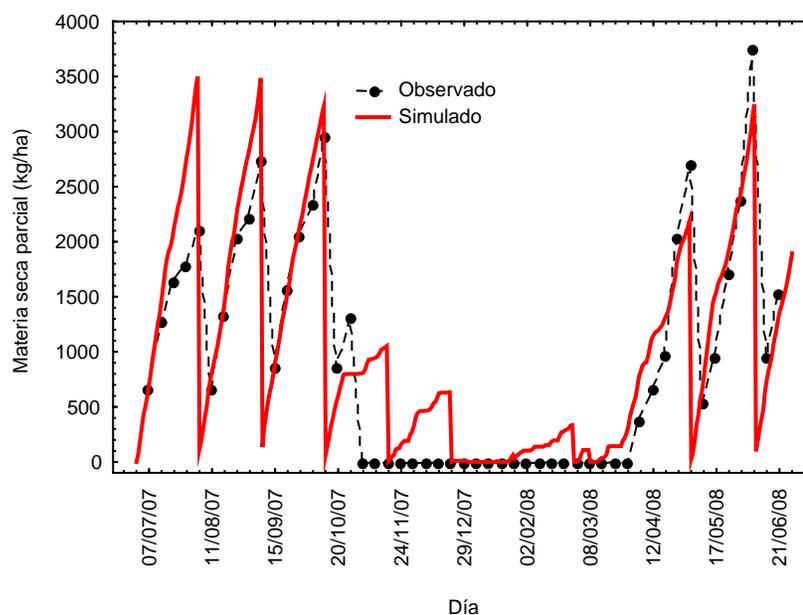


Figura 4.15 Materia seca parcial simulada y observada en alfalfa cuf-101 en Galeana, Nuevo León, México (Las líneas verticales descendentes representan los cortes).

4.1.3.2 Índice de Área Foliar

El IAF fue estimado a partir de una ecuación de tipo cuadrático con un valor de r^2 de 0.84. Esta ecuación es el resultado al relacionar los GDD D con la tasa de crecimiento del IAF, la ecuación es la siguiente.

$$\Delta \text{IAF} = -0.0123 + (0.0019 * \text{GDD D}) + (0.00063 * \text{GDD D}^2) \quad \text{Ec. 9}$$

El modelo simuló de manera aceptable esta variable, sobre estima el valor de IAF en los cinco cortes (Figura 4.16), los sesgos en cada corte son los siguientes: 2, 1.1, 0.39, 0.67 y 0.07 respectivamente.

Los valores estadísticos entre datos simulados y observados para esta variable son: $r^2 = 0.85$ y $RMSE = 0.58$, lo que es muy aceptable considerando que es un modelo simple que solo utiliza como variable independiente la temperatura media.

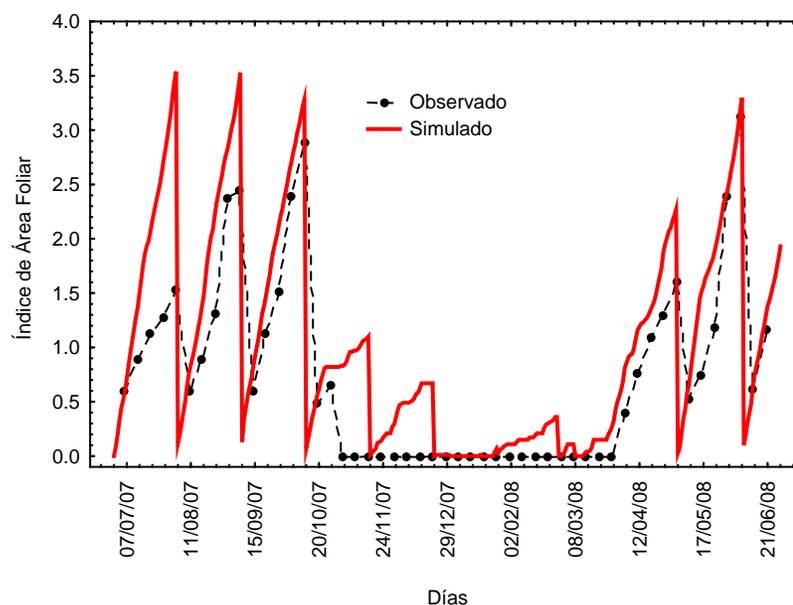


Figura 4.16 Índice de área foliar simulada y observada en alfalfa cuf-101 en Galeana, Nuevo León, México (Las líneas verticales descendentes representan los cortes).

4.1.3.3 Altura (ALT)

Esta variable fue simulada adecuadamente ya que se observa un comportamiento similar a los datos observados aunque estos se encuentran ligeramente por debajo de los simulados (Figura 4.17). Para estimar la altura se utilizó la siguiente ecuación:

$$\Delta ALT = \frac{1.69599}{1 + 3507.8466 * Exp^{-0.9517 * GDD D}} \quad Ec. 10$$

Esta ecuación se obtuvo al relacionar los GDD D con la tasa de crecimiento diario de la altura, el modelo con mayor ajuste fue el conocido como logístico, el valor de la r^2 fue de 0.89. En los cinco cortes la simulación sobre estima los

observados (Figura 4.17), los sesgos en cada uno estos son los siguientes: en el primero de 20, en el segundo de 17, el tercero de 10 y en el cuarto y quinto de 8 cm.

Lo valores entre los valores simulados y observados de r^2 y RMSE son los siguientes: 0.87 y 7 cm.

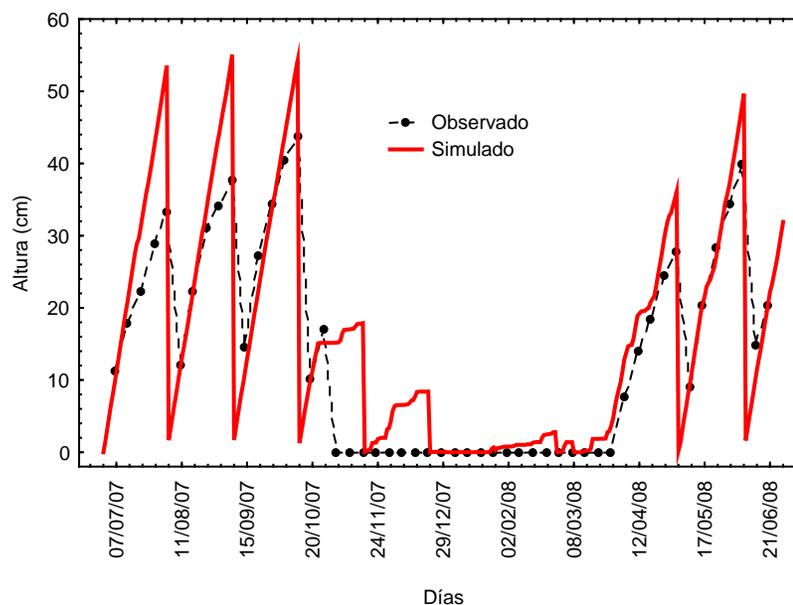


Figura 4.17 Altura simulada y observada en alfalfa cuf-101 en Galeana, Nuevo León, México (Las líneas verticales descendentes representan los cortes).

4.1.3.3 Numero de Hojas por vástago

Esta variable fue la mejor simulada (Figura 4.18), la diferencia entre los valores observados y los simulados es muy baja. En la simulación se utilizó la siguiente ecuación:

$$\Delta NH = -0.1035 + (0.0199 * GDD D) + (0.0046 * GDD D^2) \quad Ec. 11$$

Esta ecuación es el resultado de la relación de los GDD D con la tasa de incremento del número de hojas por vástago. El tipo de ecuación es cuadrático, y tuvo el mejor ajuste; el valor de r^2 fue de 0.85. El simulado y el observado

tienen un comportamiento similar (Figura 4.18), aunque con un ligero error en el segundo corte (3 hojas) y en el cuarto (4 hojas).

Los valores de r^2 y RMSE para esta variable con los datos simulados y observados fueron: 0.92 y 2.9 hojas.

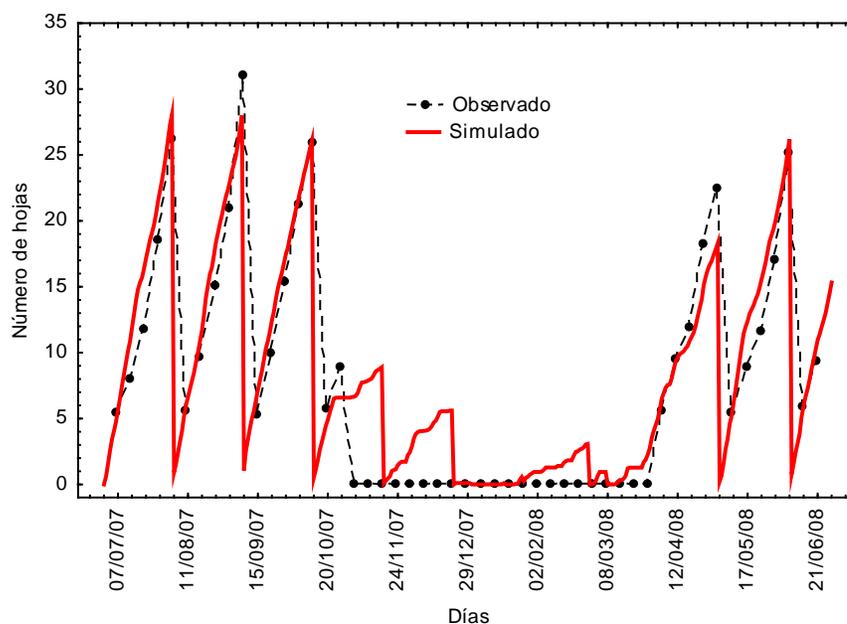


Figura 4.18 Número de hojas simulado y observado en alfalfa cf-101 en Galeana, Nuevo León, México (Las líneas verticales descendentes representan los cortes).

4.1.3.4 Rendimiento Anual (REN ANUAL)

El rendimiento anual simulado sobre estima el observado con un sesgo de 2,093 kg/ha (Figura 4.19). Esta diferencia es aceptable ya que se encuentra por abajo del 12 % del rendimiento total.

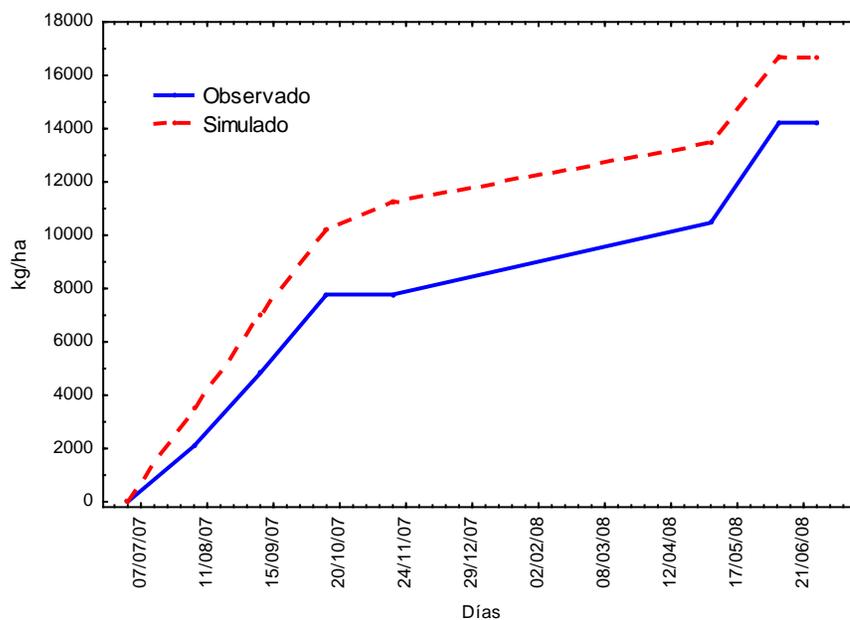


Figura 4.19 Rendimiento anual simulado y observado en alfalfa cuf-101 en Galeana, Nuevo León, México.

4.1.3.5 Composición química

Para se simuló el comportamiento de los valores de PC, FDA y FDN en un período de rebrote que comprende del 7 septiembre al 12 de octubre de 2007 (35 días). La PC se simuló utilizando la Ec. 12, FDA con la Ec. 13 y FDN con la Ec. 14, estas ecuaciones son el resultado de la relación de los GDD acumulados con el cambio semanal de PC, FDA y FDN durante los 35 días que comprende un rebrote, las ecuaciones resultantes son las siguientes:

$$PC = 48.46 + (-0.124 * GDD AC) + (0.00015 * GDD AC^2) \quad Ec. 12$$

$$FDA = 18.236 + (0.044 * GDD AC) + (-3.76e - 005 * GDD AC^2) \quad Ec. 13$$

$$FDN = 27.98 + (0.019 * GDD AC) + (7.175e - 006 * GDD AC^2) \quad Ec. 14$$

El ajuste que tienen estas ecuaciones son de tipo cuadrático, el valor de r^2 para la Ec. 12 es de 0.91, para la Ec. 13 de 0.87 y 0.80 para la Ec. 14.

En la Figura 4.20, se observa el comportamiento simulado y observado de los valores de PC, FDA y FDN. Se aprecia que la simulación es aceptable para estas variables. Los errores en cada uno de los puntos se muestran en el Cuadro 4.2.

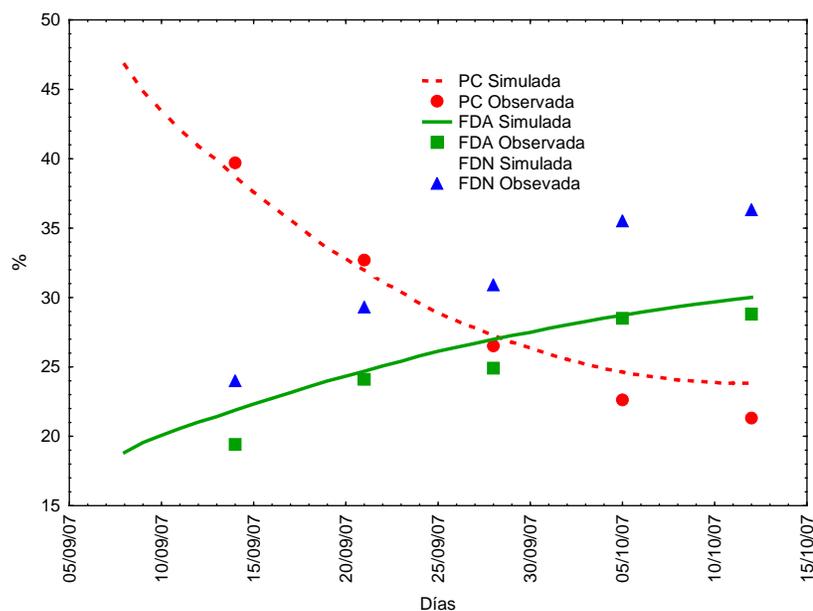


Figura 4.20 Proteína cruda, fibra detergente ácido y fibra detergente neutro simulada y observada para la alfalfa Cuf-101 en Galeana, Nuevo León, México.

La RMSE entre simulados y observados es mínima para las tres variables y decrece a medida que se incrementa el tiempo de rebrote.

Los valores entre simulados y observados para cada variable son los siguientes: PC 0.99 y 1.6 %; FDA 0.95 y 1.6 %; y FDN 0.94 y 3.0 % para r^2 y RMSE.

Cuadro 4.2 Diferencia entre el valor simulado y observado de proteína cruda (PC), fibra detergente ácido (FDA) y fibra detergente neutro (FDN) en alfalfa cuf-101 en Galeana, Nuevo León, México.

Días de rebrote	Sesgo entre el simulado y observado		
	% PC	% FDA	% FDN
7	1.0	2.5	5.7
14	0.7	0.5	2.1
21	0.7	2.0	2.3
28	2.0	0.2	0.4
35	2.5	1.2	0.5

4.2 Cultivo de maíz

4.2.1-Resultados del modelo en STELLA

4.2.1.1 Descripción del modelo

Para la construcción de este modelo se utilizó el programa Stella 9.0 con cálculos diarios. Al igual que en el cultivo anterior, el modelo de simulación está constituido por tres submodelos los cuales son: submodelo de clima (Figura 4.21), submodelo de crecimiento y desarrollo del cultivo (Figura 4.22) y submodelo de manejo.

a) Submodelo de clima

La base del submodelo climático es un generador de temperatura media diaria, mediante una función normal con las temperaturas medias y desviaciones estándar del Cuadro 4.1 obtenidas de datos de temperatura de 12 años (año 2007 y 11 años de datos históricos) del lugar de estudio.

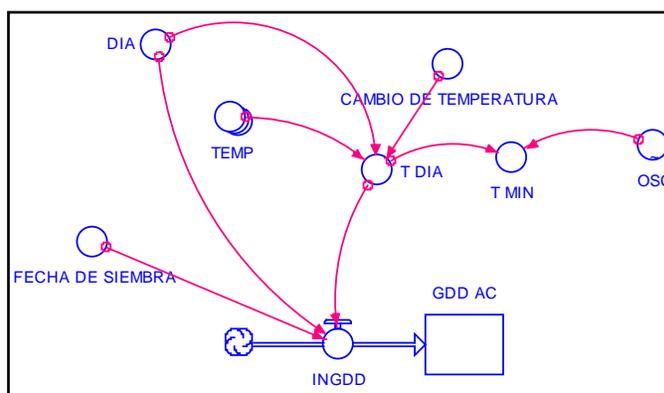


Figura 4.21 Submodelo de clima del modelo construido en Stella 9.0.2 para los tres cultivares de maíz.

Para calcular los Grados Días de Desarrollo se restó la temperatura media diaria generada por el modelo (T DIA) a la temperatura base del cultivo

que fue de 8 °C. Para realizar estos cálculos desde la siembra y evitar valores negativos, se utilizó la siguiente regla de decisión:

```
IF T DIA<=8 THEN 0 ELSE IF DIA>=FECHA DE SIEMBRA THEN T DIA-8
ELSE 0
```

Con esta regla el modelo aplica la ecuación $T_{media} - T_{base}$ después de la siembra y cuando la temperatura media del día es superior a 8 °C. FECHA DE SIEMBRA es una variable auxiliar donde se registró la fecha de siembra como día juliano (123 para este caso). En la variable de estado GDD AC se acumulan los GDD durante el ciclo de cultivo. CAMBIO DE TEMPERATURA es una variable auxiliar que se utilizó para incrementar la temperatura de 1 a 3 °C para evaluar el comportamiento del cultivo al hacer estos cambios en la temperatura media.

b) Submodelo de crecimiento y desarrollo del cultivo

En este submodelo, a partir de los GDD acumulados se simularon las siguientes variables del cultivo: MSP, IAF, ALT y la RHT (Figura 4.22).

- **Materia seca Parcial (MSP)**

La variable de estado MSP fue representada como sigue:

$$MSP(t) = MSP(t - dt) + (IN DIF MSP - COSECHA MSP) * dt$$

Donde, IN DIF MSP es la diferencia resultante del estado de la MSP en el tiempo actual menos el estado en el tiempo anterior ($MSP_t - MSP_{t-1}$). Los estados de la MSP son la variable dependiente y se estimaron a partir de las Ecs. 15, 16 y 17 (MSP EC) que utilizan como variable independiente a GDD AC. El usuario debe indicar al modelo el genotipo que desea simular. La función utilizada para esta variable en los tres cultivares fue el conocido como modelo

Gaussiano. Las ecuaciones utilizadas fueron las que mostraron un mejor ajuste al relacionar las dos variables.

$$MSP\ AN447 = 21,050.415 * \exp \left[\frac{-(GDD\ AC - 1,825.828)^2}{2(446.029)^2} \right] \quad Ec. 15$$

$$MSP\ AN388 = 14,311.825 * \exp \left[\frac{-(GDD\ AC - 2,146.343)^2}{2(584.52)^2} \right] \quad Ec. 16$$

$$MSP\ A7573 = 22,403.961 * \exp \left[\frac{-(GDD\ AC - 2,125.224)^2}{2(562.63)^2} \right] \quad Ec. 17$$

Los valores de r^2 fueron los siguientes: para el cultivar AN447 0.95, para AN388 0.96 y A7573 0.97. COSECHA MSP es la pérdida de MSP por la cosecha.

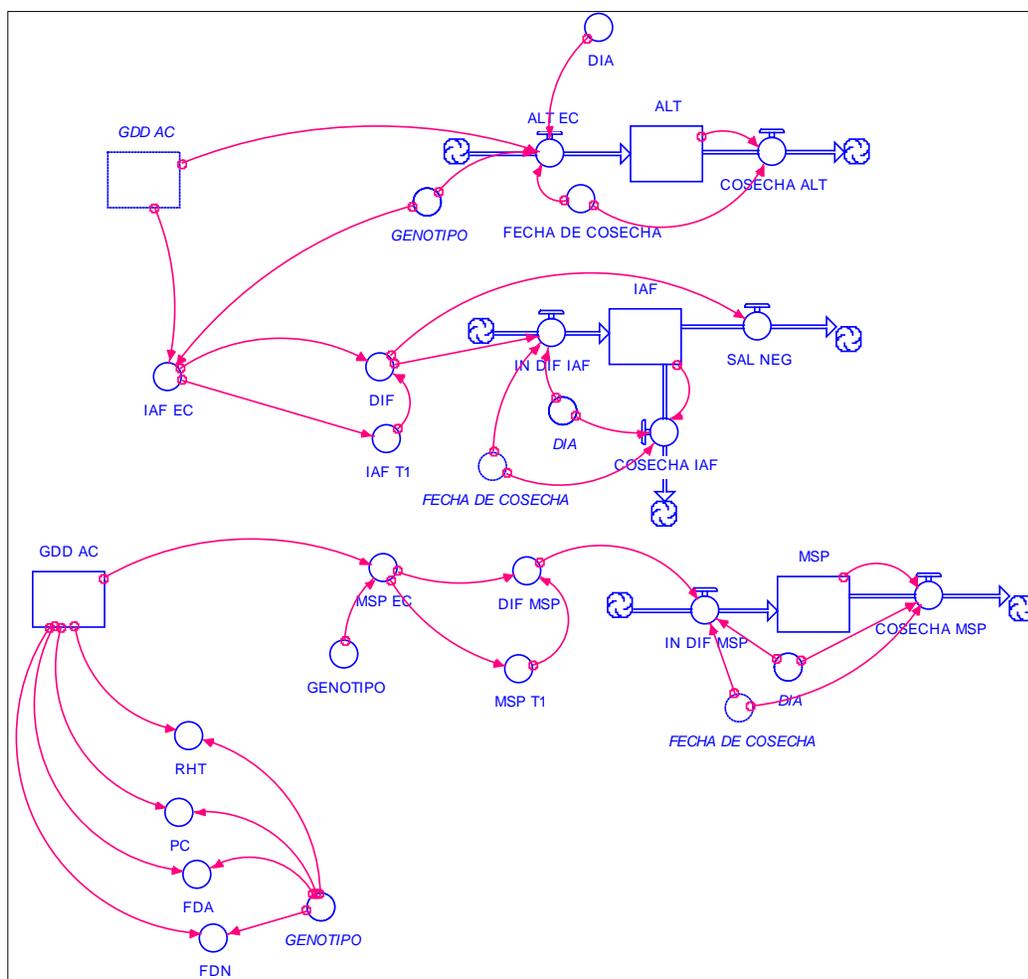


Figura 4.22 Submodelo de crecimiento y desarrollo del cultivo.

- **Índice de Área Foliar**

La variable de estado IAF fue representada como sigue:

$$IAF(t) = IAF(t - dt) + (IN DIF IAF - SAL NEG - COSECHA IAF) * dt$$

Donde: IN DIF IAF es la diferencia entre el estado actual del IAF (IAF EC) menos el IAF en el tiempo anterior (IAF EC_t-IAF EC_{t-1}). El IAF a diferentes tiempos, se estimó a partir de las Ecs. 18, 19 y 20 (IAF EC). El usuario debe indicar al modelo que genotipo desea simular. Las ecuaciones fueron obtenidas al relacionar la variable independiente (GDD AC) con la variable dependiente IAF, la función utilizada para esta variable en los tres cultivares fue la conocida como modelo Gaussiano. Las ecuaciones utilizadas fueron las que mostraron el mejor ajuste al relacionar las dos variables.

$$IAF AN447 = 4.388 * exp \left[\frac{-(GDD AC - 1,365.039)^2}{2(382.687)^2} \right] \quad Ec. 18$$

$$IAF AN388 = 2.117 * exp \left[\frac{-(GDD AC - 1,424.09)^2}{2(442.046)^2} \right] \quad Ec. 19$$

$$IAF A7573 = 4.03 * exp \left[\frac{-(GDD AC - 1,472.203)^2}{2(466.049)^2} \right] \quad Ec. 20$$

Los valores de r^2 fueron los siguientes: para el cultivar AN447 0.86, para AN388 0.88 y A7573 0.89.

SAL NEG es la pérdida de IAF cuando empieza el decrecimiento de esta variable, COSECHA IAF es la pérdida de IAF a la cosecha.

- **Altura**

La variable de estado Altura (ALT) fue representada de la siguiente manera:

$$ALT(t) = ALT(t - dt) + (\Delta ALT - COSECHA ALT) * dt$$

Donde: Δ ALT es la ecuación que estima el cambio diario de la altura en la planta para cada uno de los cultivares como en el caso de las variables anteriores. El usuario debe indicar al modelo que genotipo desea simular para así tomar la ecuación para el genotipo a estudiar. Las Ecs. 21, 22 y 23 fueron las utilizadas para predecir la altura de la planta en los tres cultivares.

$$\Delta ALT AN447 = 1.335 + 1.585 * \cos(0.004 * GDD AC - 3.557) \quad Ec. 21$$

$$\Delta ALT AN388 = 1.03 + 1.204 * \cos(0.004 * GDD AC - 3.31) \quad Ec. 22$$

$$\Delta ALT A7573 = 1.123 + 1.2 * \cos(0.004 * GDD AC - 3.37) \quad Ec. 23$$

Estas ecuaciones son el resultado de la relación de la variable independiente grados días de desarrollo acumulados con la variable dependiente incremento de altura (Δ ALT). El mejor ajuste que se encontró entre estas dos variables para los tres cultivares fue el modelo cuadrático, los valores de r^2 fueron los siguientes: para el cultivar AN447 0.90, para AN388 0.89 y A7573 0.89. La pérdida para esta variable de estado es cuando se realiza la cosecha.

- **La Relación Hoja-Tallo**

La variable RHT fue estimada a partir de GDD AC durante el ciclo del cultivo, la función utilizada para los tres cultivares fue la conocida como modelo Harris este modelo es el que tuvo mayor ajuste al relacionar la variable independiente y la dependiente (valor diario en la relación hoja tallo). Las ecuaciones utilizadas en el modelo son las siguientes:

$$RHT AN447 = \frac{1}{[-0.194 + (0.001 * GDD AC^{0.909})]} \quad Ec. 24$$

$$RHT AN388 = \frac{1}{[-0.164 + (0.001 * GDD AC^{0.882})]} \quad Ec. 25$$

$$RHT A7573 = \frac{1}{[-0.255 + (0.005 * GDD AC^{0.706})]} \quad Ec. 26$$

Los valores de r^2 fueron los siguientes: para el cultivar AN447 0.92, para AN388 0.88 y para A7573 0.87.

- **Proteína Cruda (PC)**

La variable PC fue estimada a partir de los GDD AC durante el ciclo del cultivo. Esta fue representada con una variable auxiliar PC; la ecuación para simular PC para el cultivar AN447 tuvo un ajuste de tipo Gaussiano con un valor de r^2 de 0.96 (Ec. 27); para el cultivar AN388 se obtuvo un ecuación de tipo cuadrático con 0.98 de r^2 (ecuación 28) y para el cultivar A7573 se utilizó la ecuación 29 que es de tipo Gaussiano con un valor de 0.98 de r^2 .

$$PC_{AN447} = 27.243 * \exp \left[\frac{-(GDD_{AC} + 17.933)^2}{2(1024.084)^2} \right] \quad Ec. 27$$

$$PC_{AN388} = 37.824 + (-0.03 * GDD_{AC}) + (7.679e - 006 * GDD_{AC}^2) \quad Ec. 28$$

$$PC_{A7573} = 24.989 * \exp \left[\frac{-(GDD_{AC} - 368.25)^2}{2(689.509)^2} \right] \quad Ec. 29$$

- **Fibra Detergente Ácido (FDA)**

La fibra detergente ácido se simuló a partir de los GDD AC, las ecuaciones utilizadas son de tipo cuadrático para los tres cultivares. Estas ecuaciones son el resultado de la relación de la variable independiente (GDD AC) con la variable dependiente (valor de FDA por día) para simular FDA. Las ecuaciones obtuvieron diferentes valores de r^2 ; para el cultivar AN447 se utilizó la ecuación 30, esta ecuación tuvo una r^2 de 0.89, para el cultivar AN388 se utilizó la ecuación 31 con una r^2 de 0.86 y para A7573 se usó la ecuación 32 esta tuvo una r^2 de 0.81.

$$FDA_{AN447} = 7.279 + (0.061 * GDD_{AC}) + (-2.891e - 005 * GDD_{AC}^2) \quad Ec. 30$$

$$FDA_{AN388} = 0.696 + (0.076 * GDD_{AC}) + (-3.693e - 005 * GDD_{AC}^2) \quad Ec. 31$$

$$FDA A7573 = 15.703 + (0.041 * GDD AC) + (-2.12e - 005 * GDD AC^2) \quad Ec. 32$$

- **Fibra Detergente Neutro (FDN)**

Para simular esta variable para los tres cultivares se utilizaron ecuaciones con modelo de ajuste de tipo cuadrático. Estas ecuaciones fueron obtenidas al relacionar los GDD AC con los valores de FDN en el ciclo del cultivo. Para simular FDN en el cultivar AN447 se usó la ecuación 33, esta tuvo un valor de r^2 de 0.96, para AN388 se utilizó la ecuación 34 con un valor de r^2 de 0.93, y para A7573 se utilizó la ecuación 35 para simular FDN, el valor de r^2 fue de 0.86.

$$FDN AN447 = 9.68 + (0.11 * GDD AC) + (-5.079e - 005 * GDD AC^2) \quad Ec. 33$$

$$FDN AN388 = 8.779 + (0.116 * GDD AC) + (-5.74e - 005 * GDD AC^2) \quad Ec. 34$$

$$FDN A7573 = 22.481 + (0.081 * GDD AC) + (-3.983e - 005 * GDD AC^2) \quad Ec. 35$$

c) Submodelo de manejo

En este submodelo se incluyen las variables de manejo que pueden modificarse y producir diferentes respuestas del cultivo. Estas variables fueron: a) Genotipo utilizado (AN477, AN388 y A7573), b) Cambio de fecha de siembra (días julianos: 0-365), c) Cambios en la temperatura media (incremento de 1 a 3° C).

4.2.1.2 Resultados del modelo de simulación

Las variables que se presentan como resultado de la simulación son: Materia seca parcial (MSP), índice de área foliar (IAF), altura (ALT), relación hoja tallo (RHT), proteína cruda (PC), fibra detergente ácido (FDA) y fibra detergente neutro (FDN). Para presentar estos resultados se corrió 100 veces el modelo con el fin de obtener la media y la desviación estándar del

comportamiento simulado de cada variable estudiada para los tres cultivares durante el ciclo del cultivo. La única variable aleatoria del modelo es la temperatura media del día.

a) Submodelo de crecimiento y desarrollo del cultivo

- **Materia seca parcial**

La variable MPS fue simulada adecuadamente como se observa en la Figura 4.23. Las series de valores simulados y observados son muy semejantes, hay una alta asociación de los valores observados con los simulados en los tres cultivares esto está demostrada con el valor alto de r^2 (superior a 0.95) y el valor de RMSE es aceptable.

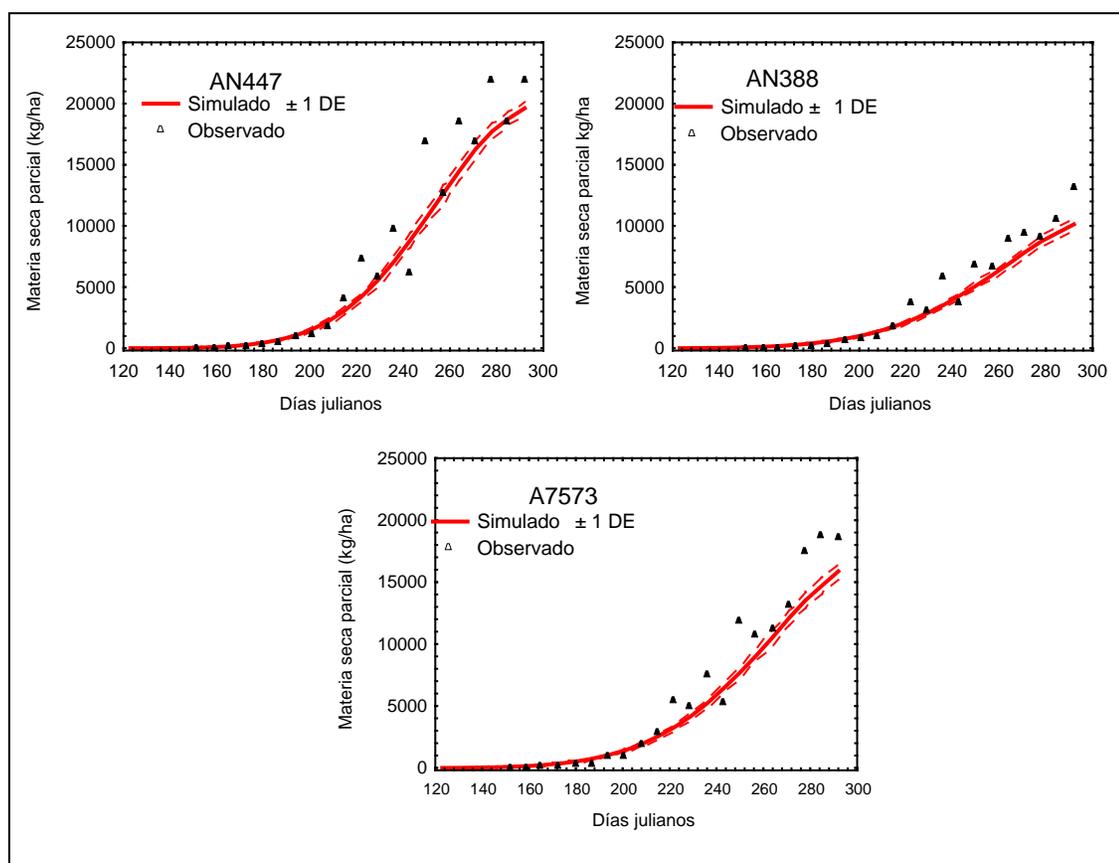


Figura 4.23 Materia seca parcial observada y simulada para los tres cultivares de maíz en Galeana, Nuevo León, México.

Analizando el último muestreo el modelo, éste subestima el rendimiento en los tres cultivares: en AN447 y A7573 la subestimación es menor del 15 % del rendimiento total, pero en AN388 fue subestimada con 23 % de rendimiento total observado.

Los rendimientos de MSP a la cosecha (170 días después de la siembra con 1807 GDD AC) y los valores estadísticos de los simulados y observados se muestran en el Cuadro 4.4. Estos valores no difieren de mucho con los rendimientos simulados por el modelo EPIC en el cultivar AN447 (Téllez, 1999), que fue de un promedio de 16,930 kg/ha al trabajar con diferentes niveles de humedad en el suelo, en Saltillo, Coahuila, México. Por otro lado, Fuentes *et al.* (2001) reporta un rendimiento de 29,270 kg/ha para el cultivar AN447 y para AN388 reporta un rendimiento de 15,961 kg/ha, éste trabajo también fue realizado en el mismo lugar. Latournerie *et al.* (2001) trabajando con diferentes densidades de siembra reportó un rendimiento promedio de 27,070 kg/ha para el cultivar AN447 en Celaya, Guanajuato. Para el cultivar A7573 no se encontraron reportes de otros autores.

Cuadro 4.4 Valores estadísticos de los observados y simulados de materia seca parcial y rendimientos a la cosecha, de tres cultivares de maíz en Galeana, Nuevo León, México.

CULTIVAR	r^2	RMSE* kg/ha	MSP COSECHA SIM* kg/ha	MSP COSECHA OBS* kg/ha	DIFERENCIA kg/ha
AN447	0.95	2,245.1	19,556 ± 575	21,988	-2,432
AN388	0.97	1,180.9	10,111 ± 458	13,157	-3,046
A7573	0.97	1,852.2	15,884 ± 654	18,550	-2,666

RMSE: Raíz cuadrada del cuadrado medio del error, **MPS COSECHA SIM**: Rendimiento a la cosecha de MSP simulada en kg/ha, **MPS COSECHA OBS**: Rendimiento a la cosecha de MSP observada.

- **Índice de Área Foliar**

El IAF fue simulado adecuadamente, el comportamiento de valores observados y simulados son similares (Figura 4.24). En el Cuadro 4.5 se observan los valores estadísticos de los observados con los simulados, los

valores máximos de IAF durante el ciclo del cultivo y la diferencia existente entre estos dos. Los valores de r^2 son aceptables ya que estos se encuentran por arriba de 0.8 en los tres cultivares. El sesgo encontrado en el cultivar AN447 es superior a lo que reportó Téllez (2001) al usar el modelo EPIC en Buenavista, Saltillo, Coahuila, México. Éste autor encontró un sesgo de 0.5, los valores de IAF máximo simulado y observado fueron los siguientes: 5.43 y 4.89.

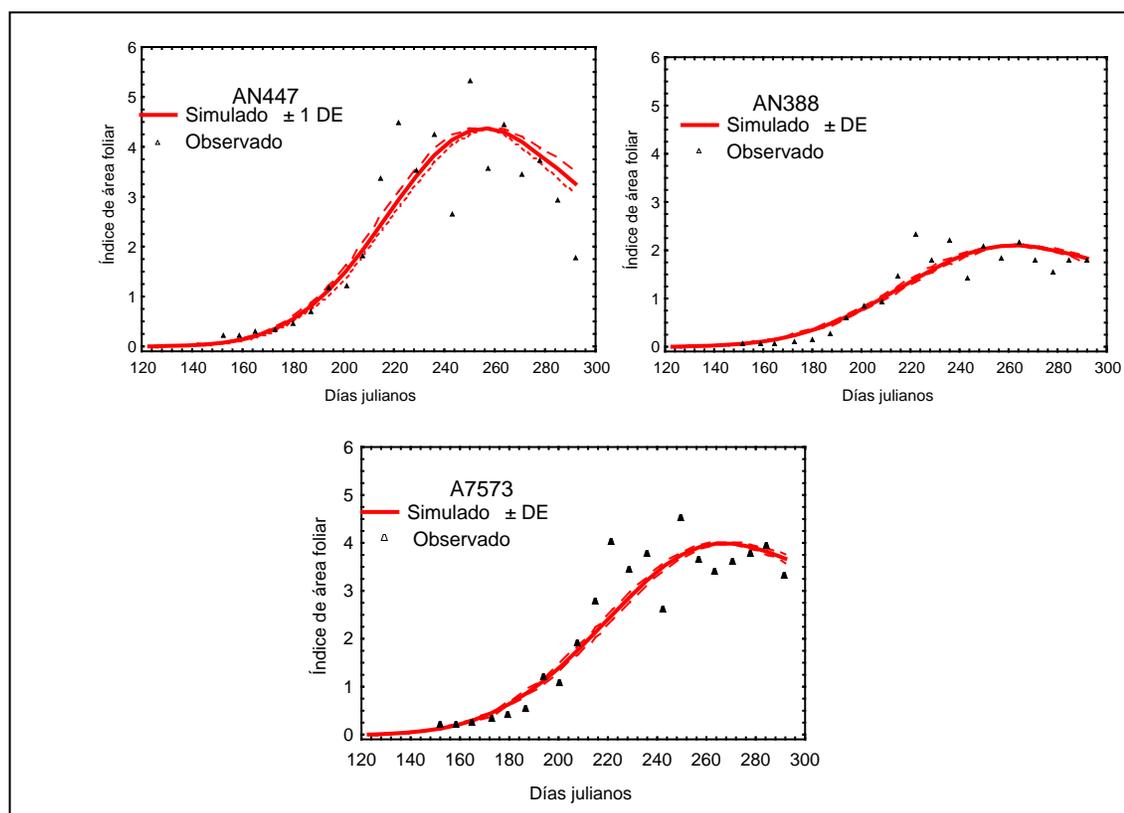


Figura 4.24 Índice de área foliar observada y simulada para los tres cultivares de maíz en Galeana, Nuevo León, México.

Cuadro 4.5 Valores estadísticos de los observados y simulados de índice de área foliar y valores máximos, de tres cultivares de maíz en Galeana, Nuevo León, México.

CULTIVAR	r^2	RMSE	IAF MAX SIM	IAF MAX OBS	DIFERENCIA
AN447	0.82	0.7	4.4 ± 0.02	5.3	0.9
AN388	0.86	0.3	2.1 ± 0.01	2.3	0.2
A7573	0.88	0.53	3.9 ± 0.05	4.5	0.6

IAF MAX SIM: Índice De area foliar maximo simulado, **IAF MAX OBS:** Índice De rea foliar maximo observado.

- **Altura (ALT).**

La altura se simuló adecuadamente, los valores estadísticos de r^2 y RMSE son aceptables. Para los tres cultivares se observa que el comportamiento simulado subestima los observados hasta el día juliano 250, después de este día el sesgo entre el valor observado y simulado de la variable altura es mínimo (Figura 4.25). Los valores máximos de altura entre observados y simulados los sesgos son mínimos (Cuadro 4.6). En el cultivar AN447 se han encontrado valores de esta variable superior al de este trabajo como Latournerie *et al.* (2001) trabajando con diferentes densidades de siembra reporta una altura máxima de 267 cm para el cultivar AN447 en Celaya, Guanajuato.

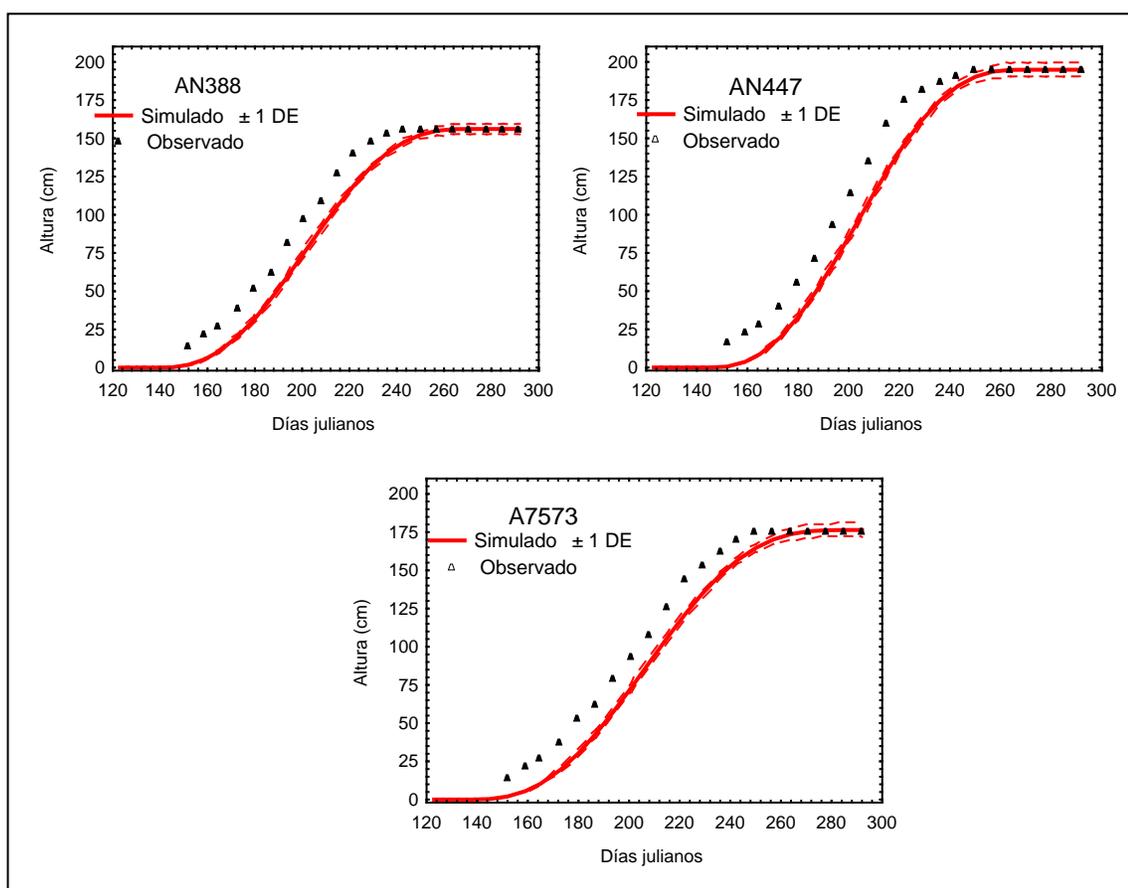


Figura 4.25 Altura observada y simulada para los tres cultivares de maíz en Galeana, Nuevo León, México.

Cuadro 4.6 Valores estadísticos de los observados y simulados de altura y altura máxima, de tres cultivares de maíz en Galeana, Nuevo León, México.

CULTIVAR	r^2	RMSE	ALT MAX SIM. Cm	ALT MAX OBS. cm	DIFERENCIA cm
AN447	0.98	18	195 ± 4.3	194	1
AN388	0.99	14.2	155.3 ± 3.5	153	-2.3
A7573	0.99	15.2	177 ± 3	174.6	2.4

• La Relación Hoja-Tallo

Los resultados obtenidos en la RHT fueron satisfactorios ya que los valores estadísticos para los tres cultivares son aceptables (Figura 4.26). Se observa el comportamiento similar de simulado con el observado, los valores difieren un poco durante el ciclo del cultivo, al analizar esta variable a la cosecha el sesgo se encuentra por debajo de 0.6 para los tres cultivares (Cuadro 4.7).

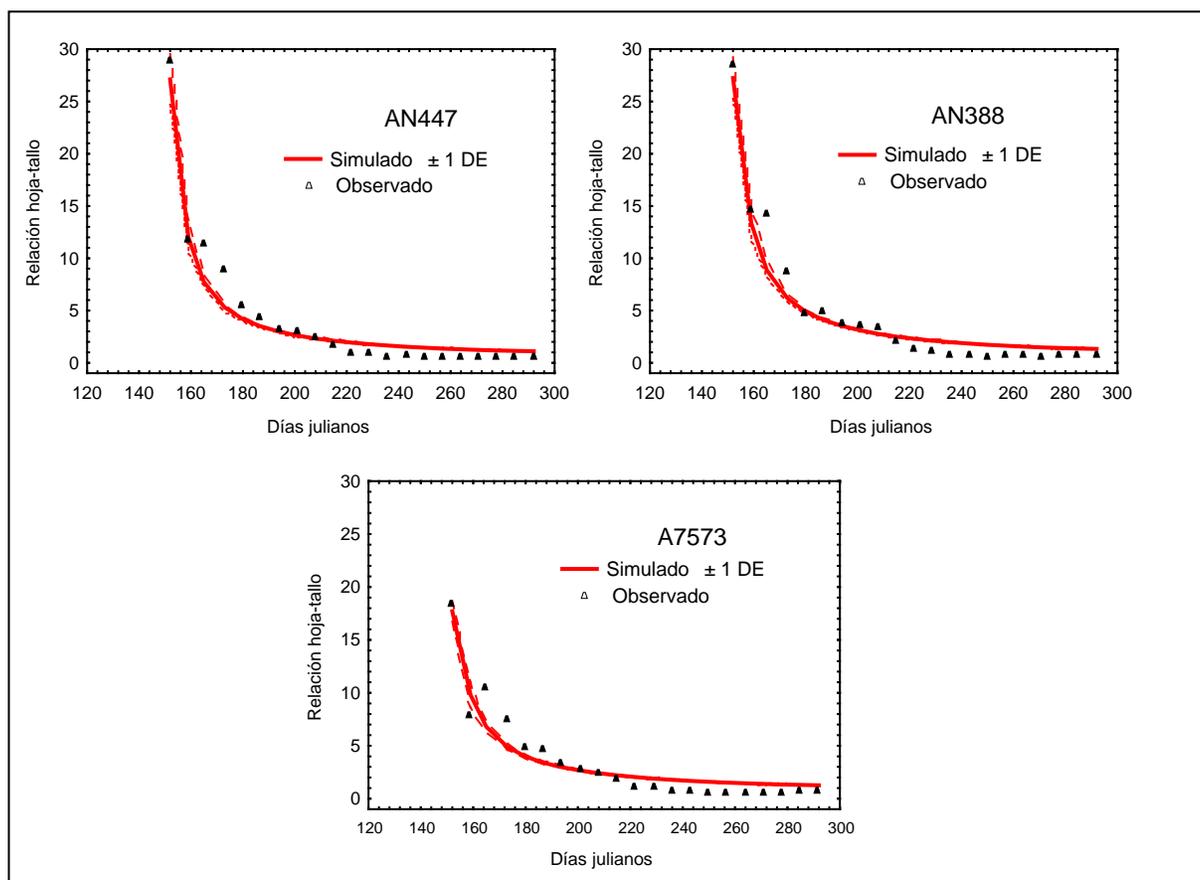


Figura 4.26 Relación Hoja-Tallo observada y simulada para los tres cultivares de maíz en Galeana, Nuevo León, México.

Cuadro 4.7 Valores estadísticos de los observados y simulados de relación hoja-tallo y valores a la cosecha, de tres cultivares de maíz en Galeana, Nuevo León, México.

CULTIVAR	r^2	RMSE	RHT COSECHA SIM.	RHT COSECHA OBS.	DIFERENCIA
AN447	0.76	4.2	1.1 ± 0.02	0.6	0.5
AN388	0.88	3.8	1.3 ± 0.03	0.67	0.6
A7573	0.8	2.5	1.2 ± 0.02	0.67	0.5

• Proteína Cruda

La PC se simuló adecuadamente, el comportamiento del observado con el simulado son similares (Figura 4.27). Los valores estadísticos son aceptables para los tres cultivares, el valor de r^2 es superior a 0.96 y el valor de RMSE el más alto es de 1.6 % (Cuadro 4.8).

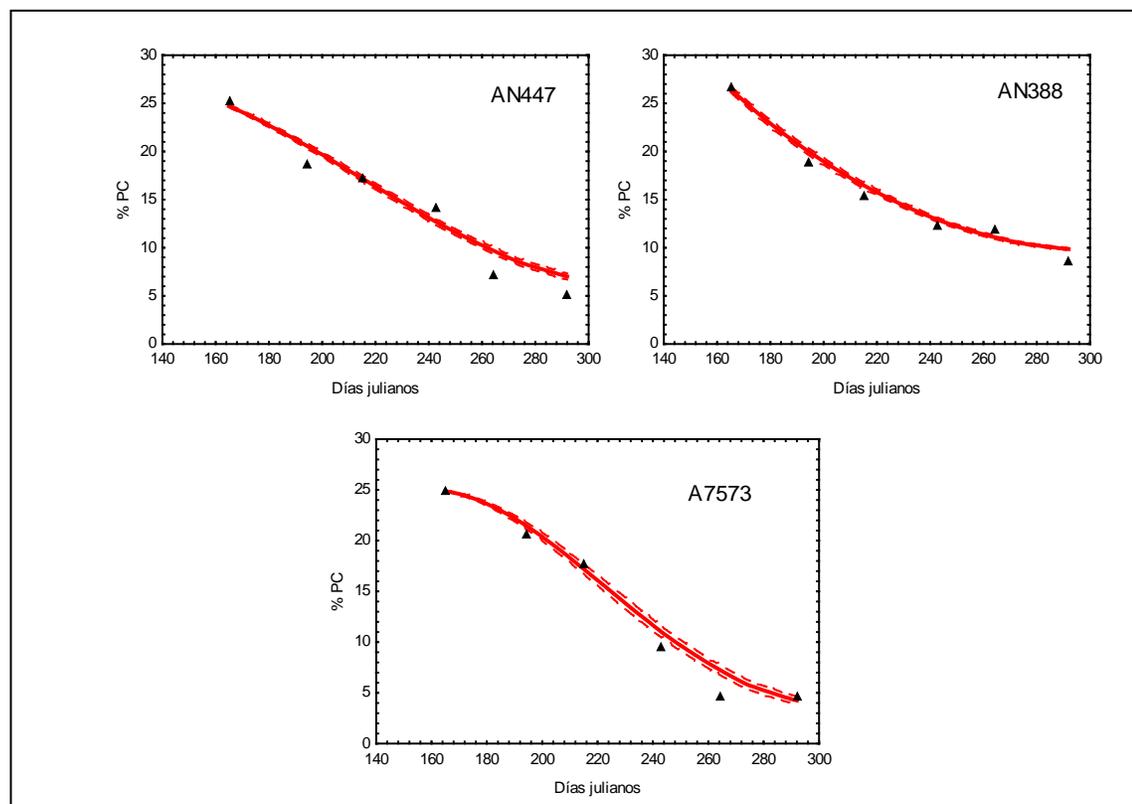


Figura 4.27 Proteína cruda observada y simulada para los tres cultivares de maíz en Galeana, Nuevo León, México.

Cuadro 4.8 Valores estadísticos de los observados y simulados de proteína cruda y proteína a la cosecha, de tres cultivares de maíz en Galeana, Nuevo León, México.

CULTIVAR	r^2	RMSE	PC MADUREZ SIM.	PC MADUREZ OBS.	DIFERENCIA
AN447	0.96	1.6	7 ± 3	5.2	1.8
AN388	0.98	0.9	9.9 ± 0.11	10	0.1
A7573	0.98	1.3	4.2 ± 0.4	4.6	0.4

Los valores de PC no difieren mucho con los reportados por Fuentes *et al.* (2001) al evaluar diferentes cultivares de maíz en Buenavista, Saltillo, Coahuila; para AN447 reportó 6.42 % y para AN388 reportó 7.28 %. Por otra parte, Latournerie *et al.* (2001) reportó para el cultivar AN447 un valor de 8.9 % al trabajar con diferentes densidades de siembra en Celaya, Guanajuato, México.

La diferencia de los valores simulados y observados de PC a la cosecha son muy bajos se encuentran por debajo de 1.8 %.

- **Fibra Detergente Ácido y Fibra Detergente Neutro**

Las variables FDA y FDN se simularon de manera aceptable (Figuras 4.28 y 4.29). Los valores estadísticos para FDA son como sigue: para el cultivar AN447 los valores de r^2 y RMSE fueron de 0.8 y 3.2 % respectivamente, para el cultivar AN388 el valor de r^2 fue de 0.78 y RMSE de 4.6 %, y para el cultivar A7573 la r^2 fue de 0.79 y RMSE de 3.3 %.

Los valores estadísticos del comportamiento simulado y observado de la variable FDN para el cultivar AN447 fue de 0.84 y 4.7 % de r^2 y RMSE respectivamente, para el cultivar AN388 el valor de r^2 fue de 0.87 y RMSE de 6.1 % y para el cultivar A7573 tuvo un valor de 0.8 de r^2 y 5.3 % para RMSE. La variable FDA y FDN al inicio del cultivo comienza a incrementar el valor hasta llegar un máximo y estos valores comienzan a descender por el llenado de grano.

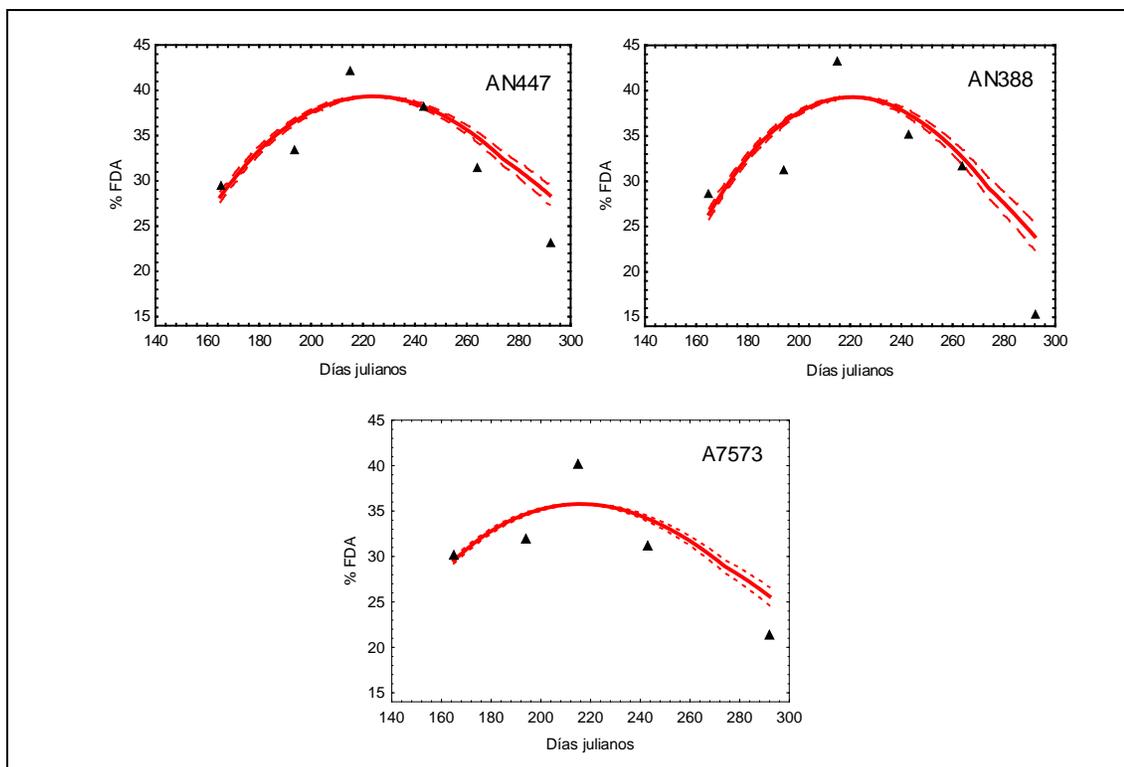


Figura 4.28 Fibra Detergente Ácido observada y simulada para los tres cultivares de maíz en Galeana, Nuevo León, México.

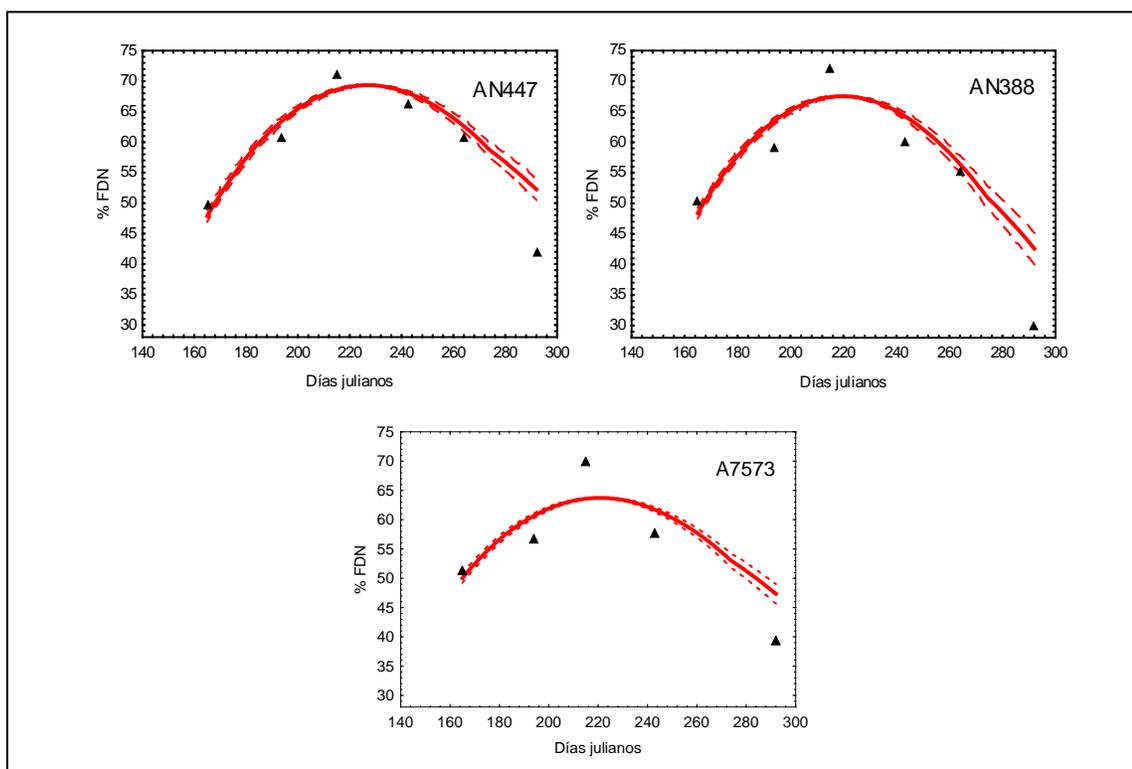


Figura 4.29 Fibra Detergente Neutro observada y simulada para los tres cultivares de maíz en Galeana, Nuevo León, México.

b) Resultados del submodelo de manejo

En este apartado se presentan los resultados del cultivo en la acumulación de MSP , IAF y PC para los tres cultivares en diferentes escenarios de temperatura. Uno de estos escenarios, representa a las condiciones actuales de temperatura, y el segundo, representa un incremento en la temperatura media diaria de 3 °C.

- **Materia seca parcial (MSP)**

En los resultados al realizar el cambio en la temperatura (aumento de 3 °C) se observa que el ciclo del cultivo se reduce (Figura 4.30), esto se observa claramente en el cultivar AN447, el rendimiento máximo con la temperatura actual se obtuvo al día juliano 292 (170 días después de la siembra) y en la simulación con incremento de temperatura de 3 °C el rendimiento máximo de MSP fue al día juliano 259 (137 días después de la siembra). El ciclo se redujo 33 días y el rendimiento fue de 21,045 kg/ha, o sea un incremento de 1,039 kg/ha con relación al rendimiento sin cambio. Téllez (1,999), reporta el rendimiento máximo a los 158 días después de la siembra en el mismo cultivar pero en un ambiente con mayor temperatura al de este estudio (4.1 °C mayor al promedio de la temperatura media del ciclo).

En general se observa que lo simulado con el modelo se acerca a lo que sucede en un experimento real (a mayor temperatura se reduce el ciclo). Para el cultivar AN388 y A7573 no se observa el mismo comportamiento que en el cultivar anterior, en estos dos simula un aumento en el rendimiento de MSP al incrementar 3 °C, en el cultivar AN388 se observa un incremento de 4,900 kg/ha y en el A7573 de 5,100 kg/ha esto es con relación al comportamiento de la MSP donde no se realizó ningún cambio en la temperatura.

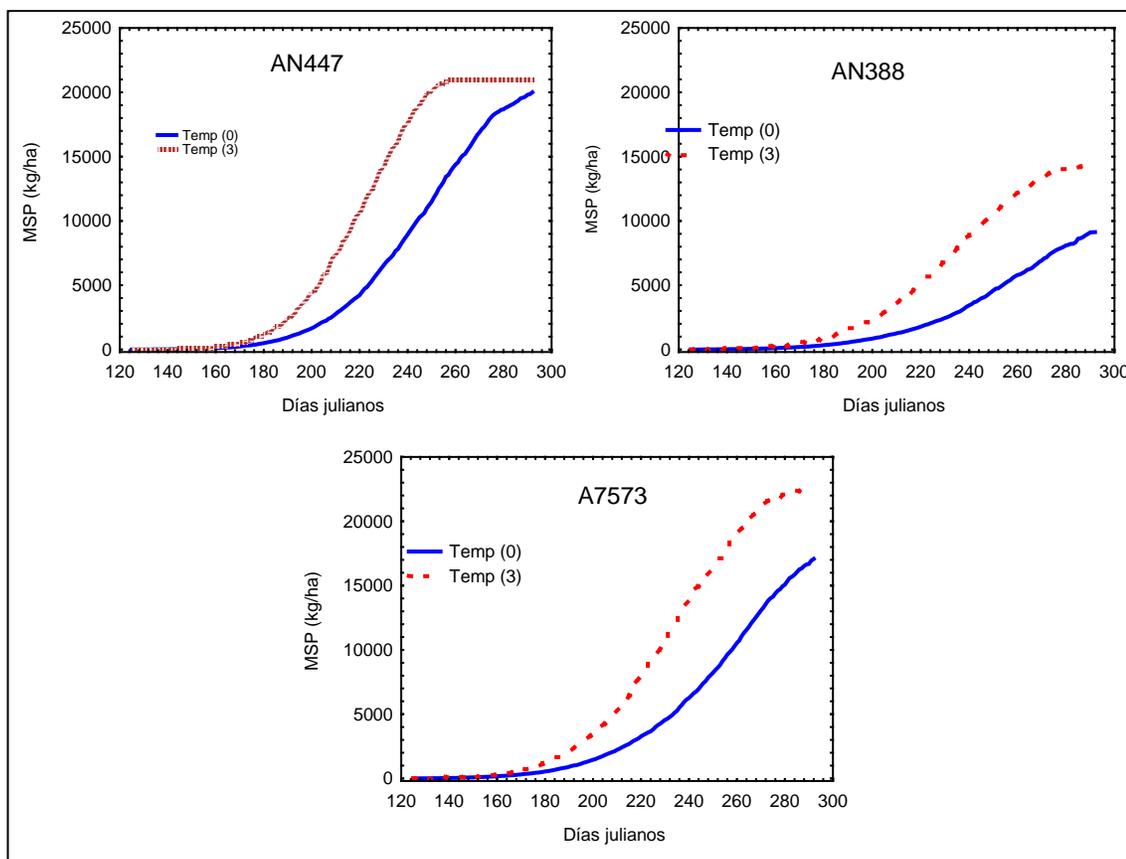


Figura 4.30 Materia seca parcial (MSP) simulada bajo las condiciones actuales de temperatura (Temp. 0) y con un incremento de 3°C (Temp. 3) en 3 genotipos de maíz Galeana, Nuevo León, México.

- **Índice de área foliar**

En esta variable se observa en los tres cultivares la reducción del ciclo del cultivo del comportamiento simulado al incrementar la temperatura (Figura 4.31). La reducción se puede apreciar con los valores máximos del IAF, en el cultivar AN447 el IAF máximo se presenta 26 días antes del IAF simulado sin cambio de temperatura, en AN388 el máximo fue 28 días antes y A7573 el máximo valor de IAF fue 30 días antes que el simulado sin cambios. Los valores máximos de IAF para los dos comportamientos simulados no presentan ninguna diferencia.

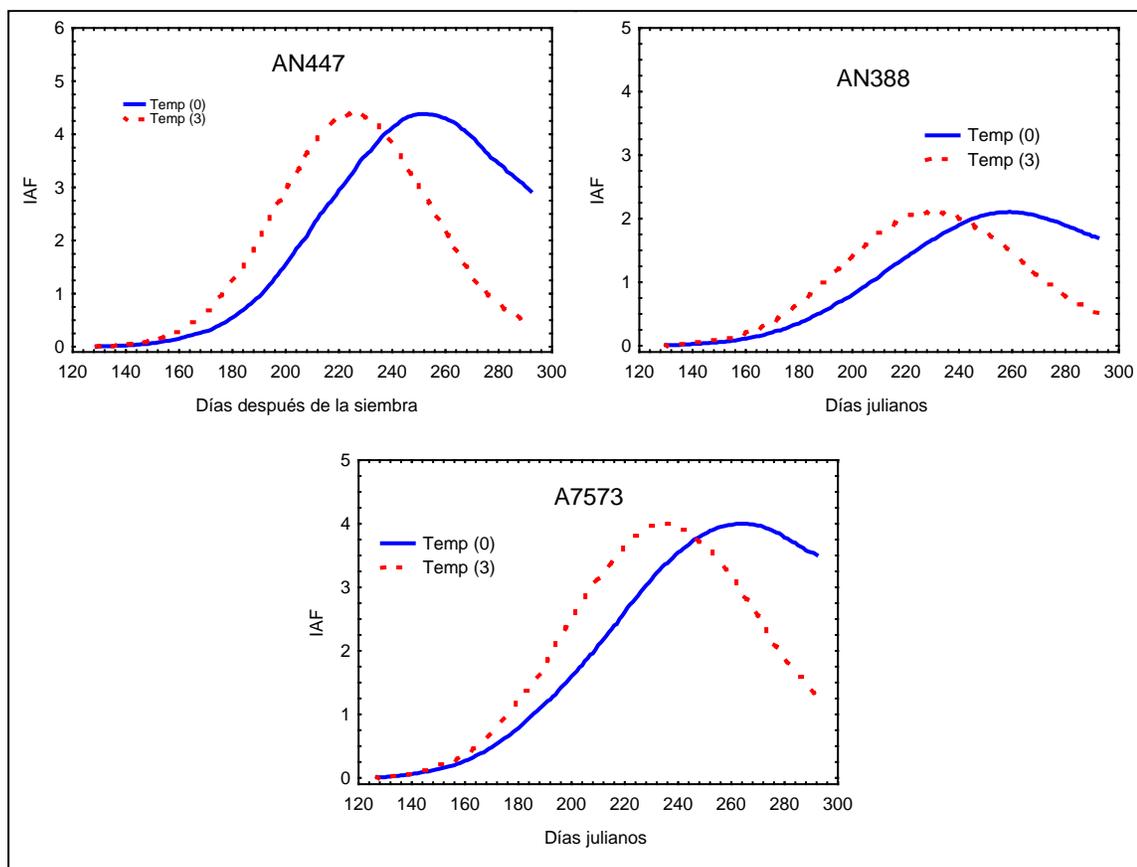


Figura 4.31 Índice de área foliar (IAF) simulada bajo las condiciones actuales de temperatura (Temp. 0) y con un incremento de 3°C (Temp. 3) en 3 genotipos de maíz en Galeana, Nuevo León, México.

- **Proteína cruda (PC)**

La respuesta de la PC al aumentar la temperatura, es la caída más acelerada de ésta variable (Figura 4.32). En el cultivar AN447 el valor de PC al día de la cosecha muestra un valor de 6.5 % en el simulado sin cambio y 2.65 % en el simulado con incremento de temperatura. En el cultivar AN388 el comportamiento es diferente, la caída de la PC es acelerada hasta llegar al día juliano 245 (con 9.9 % de PC) después este valor se mantiene hasta llegar al día de la cosecha, donde coincide con el valor simulado sin cambios y en el cultivar A7573 tiene un comportamiento parecido al primer cultivar; la caída de la PC es acelerada y a la cosecha es menor el valor de PC en el simulado con cambios de temperatura. Los valores de PC a la cosecha son los siguientes:

4.26 y 0.76 % con temperatura actual y con cambio de temperatura, respectivamente.

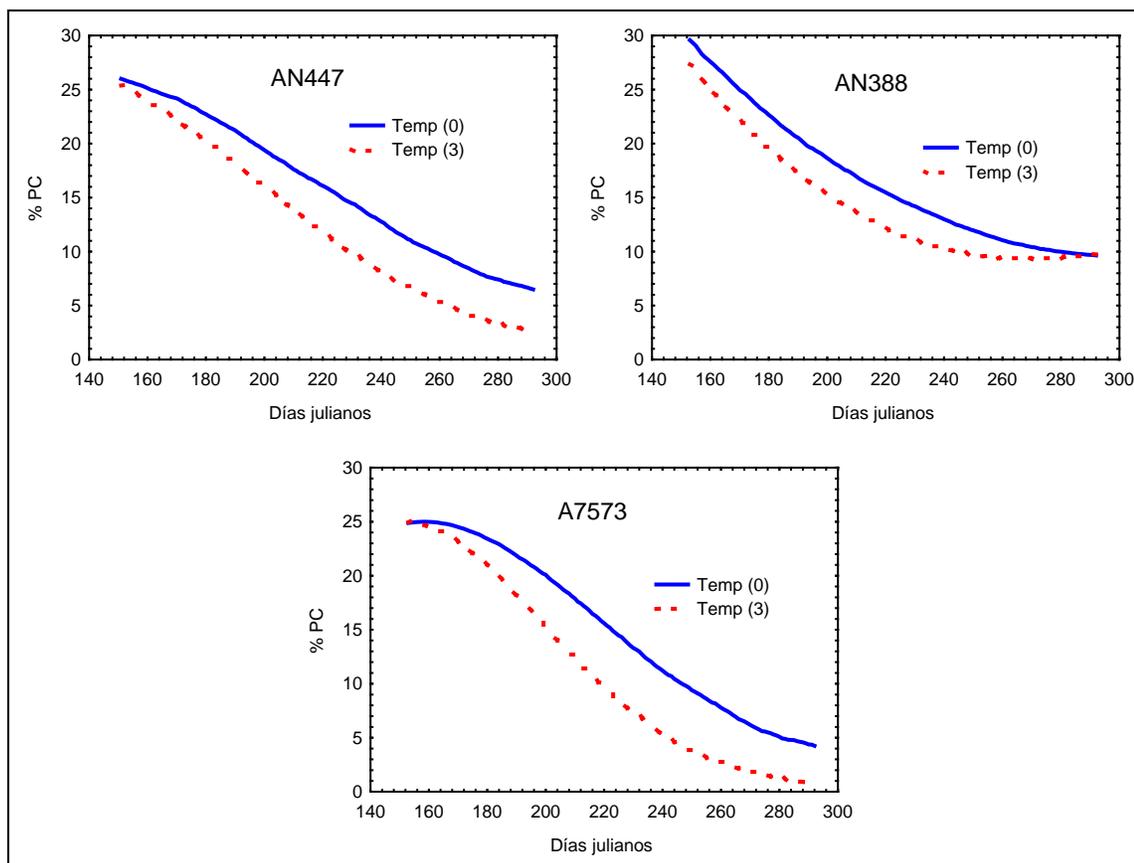


Figura 4.32 Proteína cruda (PC) simulada bajo las condiciones actuales de temperatura (Temp. 0) y con un incremento de 3°C (Temp. 3) en 3 genotipos de maíz en Galeana, Nuevo León, México.

4.2.2 Resultados de la calibración de DSSAT

Los coeficientes genéticos obtenidos para los tres cultivares de maíz en la calibración de DSSAT se presentan en el Cuadro 4.9. Los coeficientes genéticos obtenidos en este trabajo difieren un poco con los que se encuentran dentro del programa DSSAT, ya que los trabajos fueron realizados en ambientes y con genotipos muy diferentes a los de este experimento.

Cuadro 4.9 Coeficientes genéticos utilizados para la calibración de DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer).

CULTIVAR	Coeficientes Genéticos*					
	P1	P2	P5	G2	G3	PHINT
AN447	355	0.700	540	430	12	80
AN388	375	0.500	500	450	11	75
A7573	365	0.400	500	380	8	80

* **P1**: Tiempo térmico (expresado en grados día sobre una temperatura base de 8 °C) para el sub-período que va desde la emergencia de la plántula hasta el final de la fase juvenil, durante el cual la planta no responde a cambios en el fotoperíodo; **P2**: Retraso del desarrollo del cultivo (expresado en días) por cada hora de incremento en el fotoperíodo por encima de un valor umbral de 12.5 horas; **P5**: Tiempo térmico (expresado en grados/día sobre una temperatura base de 8 °C), desde la antesis hasta madurez fisiológica; **G2**: Máximo número posible de granos por planta; **G3**: Tasa de llenado de granos durante la fase lineal, bajo condiciones óptimas (mg/d); **PHINT**: Intervalo del filocrono; tiempo térmico (expresado como suma de GDD), entre apariciones sucesivas de ápices foliares.

Los valores de los coeficientes genéticos de los cultivares que se encuentran en el archivo *.CUL en la base de datos de DSSAT se presentan en el Cuadro 4.10.

Cuadro 4.10 Rangos de los coeficientes genéticos reportados en la base de datos de DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer).

Coeficientes Genéticos*					
P1	P2	P5	G2	G3	PHINT
110 - 450	0 - 0.800	625 - 1000	248 - 990	6 - 13	30 - 50

Los cultivares reportados en la base de datos de DSSAT, son sembrados en Georgia, Carolina del Sur, Hawaii, Iowa y Zaragoza, España; no hay trabajos realizados en México. Por ejemplo, los materiales evaluados en este trabajo muestran un mayor filocrono (PHINT; tiempo térmico entre la aparición de ápices de hoja sucesivas) que los materiales reportados para Georgia. Una explicación, es que los materiales de bajas latitudes requieren mas GDD para producir una hoja ya que se han desarrollado en ambientes con mayor temperatura y que los materiales de altas latitudes deben ser de ciclo más corto al haberse desarrollado en ambientes con menor temperatura.

4.2.2.1 Materia seca Parcial

La variable materia seca parcial se simuló adecuadamente ya que al hacer la comparación de los simulados con los observados (Figura 4.33). Existe una diferencia mínima en el comportamiento durante el ciclo del cultivo en los tres cultivares, los valores estadísticos son los siguientes: RMSE y r^2 . Estos valores son aceptables en la simulación de MSP, en el cultivar AN447 se obtuvo un valor de RMSE de 1,970 kg/ha con r^2 de 0.94, para el cultivar AN388 el valor de RMSE fue de 744 kg/ha, con r^2 de 0.96 y para el A7573 los valores de RMSE y r^2 fueron de 95 y 1,405 kg/ha respectivamente.

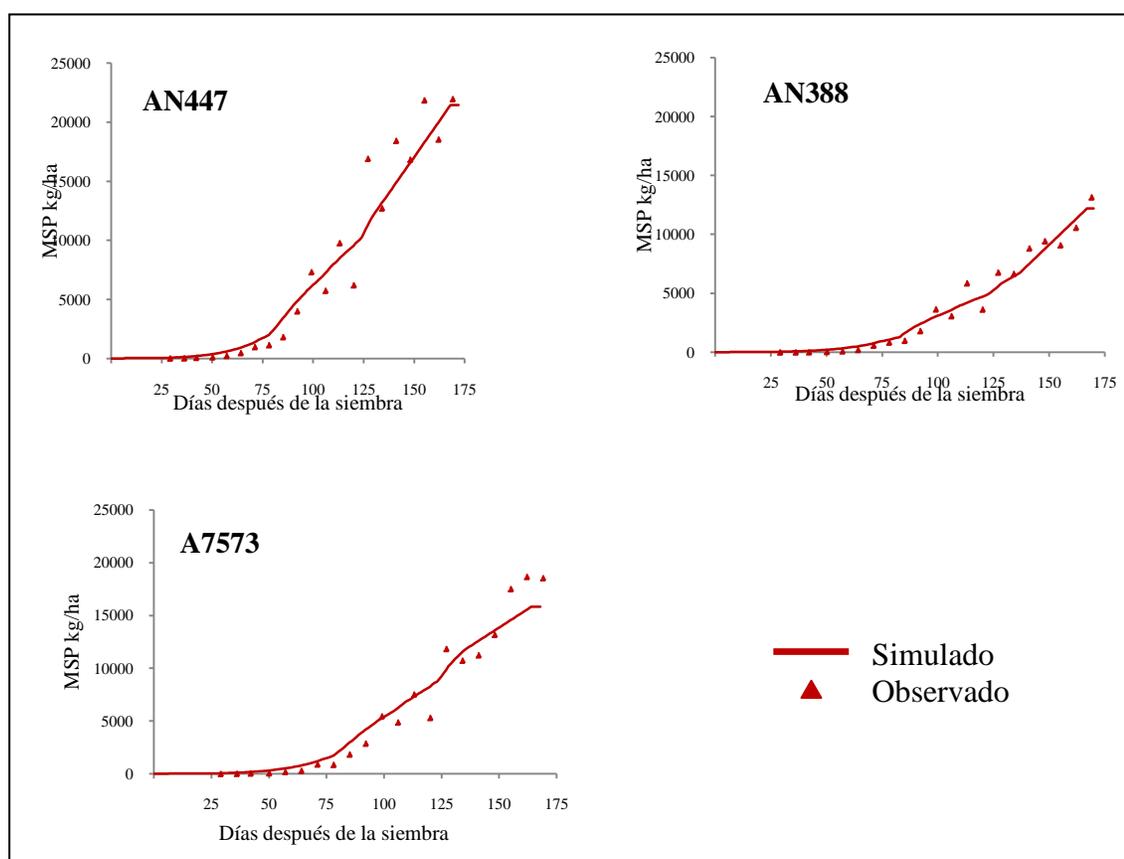


Figura 4.33 Acumulación de Materia seca parcial (biomasa total) observada y simulada de los tres cultivares de maíz durante el ciclo del cultivo (3 de mayo de 2007 – 19 de octubre de 2007) en Galeana, Nuevo León, México.

Los rendimientos de MSP a la cosecha los sesgos entre los observados y los simulados son bajos, el sesgo para el cultivar AN447 fue 544 kg/ha esto representa el 2.5 % del total, para AN388 fue de 964 kg/ha lo que representa el 7.3 % y en A7573 el error fue de 687 kg/ha lo que representa el 3.7 % del rendimiento total observado en los tres casos el error se encuentra por debajo del 8 % entre los simulados y los observados.

4.2.2.2 Materia seca parcial en hojas

En la materia seca parcial del componente hoja fue simulado de forma aceptable, al comparar el comportamiento observado en la acumulación de esta variable es similar al observado (Figura 4.34).

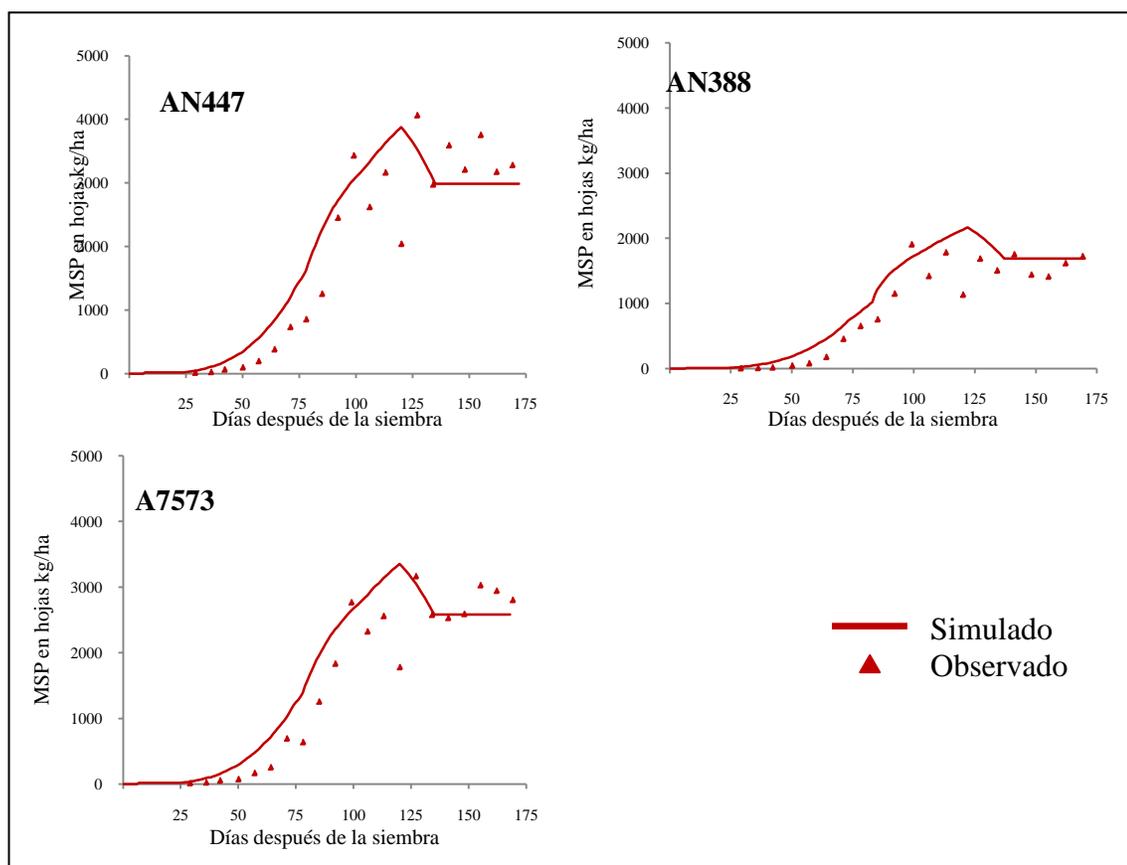


Figura 4.34 Acumulación de materia seca parcial en hojas observada y simulada de los tres cultivares de maíz durante el ciclo del cultivo (3 de mayo de 2007 – 19 de octubre de 2007) en Galeana, Nuevo León, México.

Aunque con una ligera sobreestimación de esta variable en los primeros 100 días después de la siembra, pero la diferencia es muy baja, los valores estadísticos arrojados por el programa DSSAT son: para el cultivar AN447 el valor de RMSE fue de 612 kg/ha con r^2 de 0.83, para AN388 en RMSE fue de 320 kg/ha y el r^2 de 0.89 y en el cultivar A7573 fue de 511 kg/ha y 0.85 de RMSE y r^2 . El comportamiento simulado de la acumulación de MSP en la hoja alcanza el valor máximo a los 120 días después la siembra cuando termina la etapa vegetativa, después comienza un decrecimiento hasta llegar al comienzo de llenado de grano (136 días después de la siembra) después de esta fecha el modelo simula MSP en hoja como constante hasta la cosecha.

4.2.2.3 Materia seca parcial en tallo

La acumulación de materia seca parcial en el componente tallo se observa en la Figura 4.35.

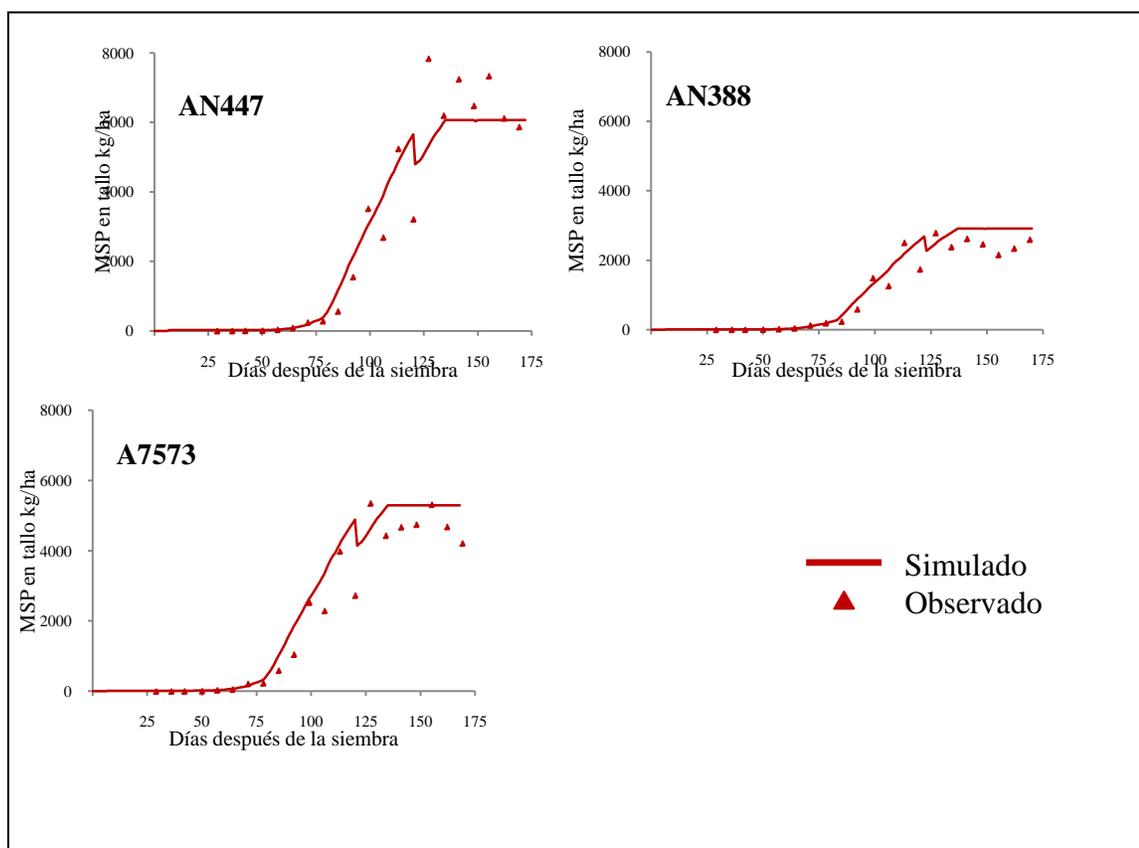


Figura 4.35 Acumulación de materia seca parcial en tallos observada y simulada de los tres cultivares de maíz durante el ciclo del cultivo (3 de mayo de 2007 – 19 de octubre de 2007) en Galeana, Nuevo León, México.

Esta variable se simuló de manera aceptable, en el comportamiento del observado con el simulado se aprecia una ligera diferencia. Los r^2 fueron: 0.90, 0.94 y 0.93 para AN447, AN388 y A7573., El valor de RMSE calculado por el programa fue de 928 kg/ha para el primer cultivar, 358 kg/ha para el segundo y 662 kg/ha para el tercer cultivar.

4.2.2.4 Materia seca parcial en grano

El rendimiento en grano fue simulado de manera adecuada, el comportamiento de los valores observados y simulados son semejantes (Figura 4.36).

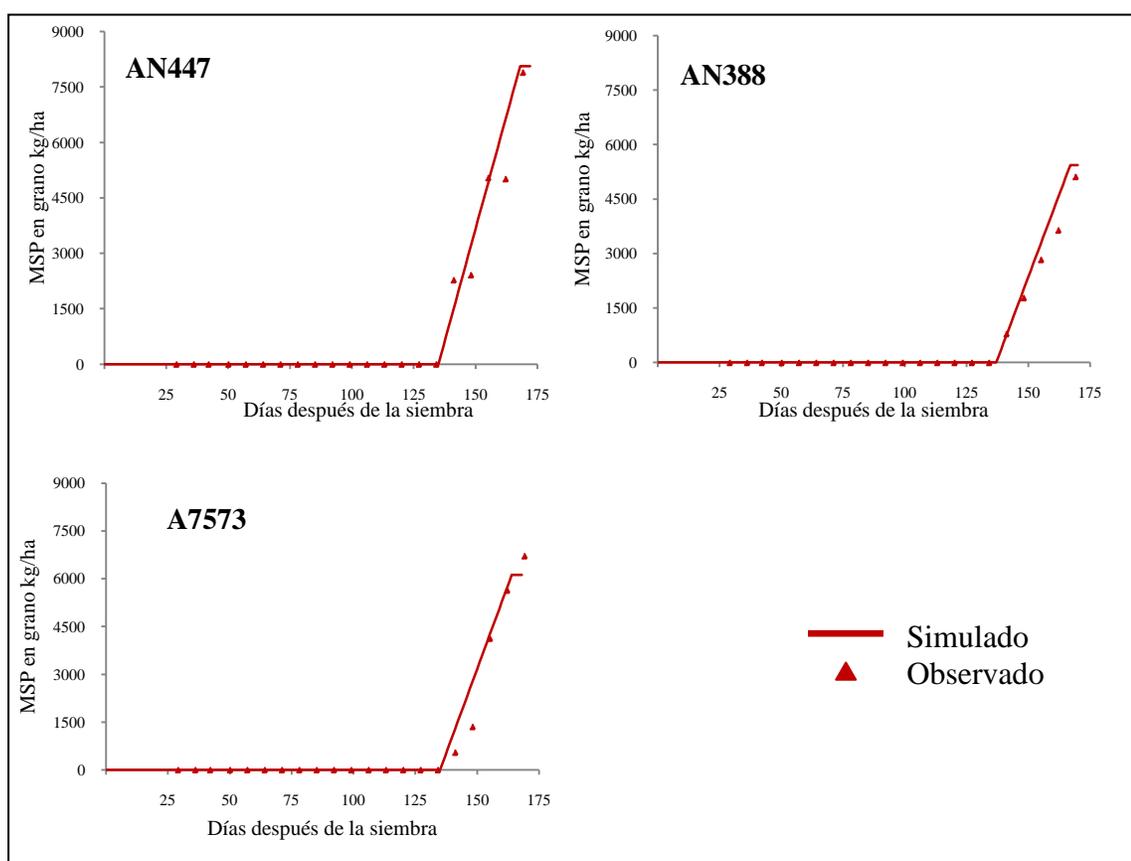


Figura 4.36 Acumulación de materia seca parcial en granos observada y simulada de los tres cultivares de maíz durante el ciclo del cultivo (3 de mayo de 2007 – 19 de octubre de 2007) en Galeana, Nuevo León, México.

Los valores estadísticos son los siguientes: para el cultivar AN447 la r^2 fue de 0.88 y RMSE de 872 kg/ha, para el cultivar AN388 la r^2 tuvo un valor de

0.98 y RMSE de 474 kg/ha y para el cultivar A7573 tuvo los valores de 0.96 y 784 kg/ha de r^2 y RMSE. El rendimiento de grano simulado a la madurez para el cultivar AN447 fue de 8,066 kg/ha y el observado de 7,899 kg/ha el simulado sobrestima con 323 kg/ha, este sesgo es mínimo en comparación con lo reportado por Téllez (1,999). Este autor reporta una subestimación de 4,051 kg/ha para este cultivar, al utilizar el modelo EPIC con diferentes condiciones de humedad en el suelo siendo sus valores observado y simulado de 10,554 y 6,502 kg/ha; para AN388 fue de 5,437 kg/ha de rendimiento simulado y 5,114 kg/ha en el observado y para el cultivar A7573 el valores de grano en el simulado y observado a la madurez fue 6,122 kg/ha y 6716 kg/ha.

4.2.2.5 Índice de Área Foliar

Esta variable fue simulada adecuadamente, el comportamiento de los simulados con los observados son semejantes (Figura 4.37). Los valores estadísticos para el cultivar AN447 fue de 0.84 de r^2 y RMSE de 0.74, para el cultivar AN388 el valor de la r^2 fue de 0.79 y RMSE de 0.47 y para el cultivar A7576 la r^2 fue de 0.77 y RMSE de 0.76. En más del 50 % de los puntos observados en el cultivo, DSSAT sobreestima estos valores.

Los valores de IAF máximo para cada cultivar es como sigue: para el AN447 se encontró el valor máximo de IAF simulado a los 122 días después de la siembra con 4.6 y en los datos observados fue a los 127 días después de la siembra con un valor de 5.3, el error encontrado es de 0.7 de IAF y con una diferencia en días de 5. Para el cultivar AN388 el valor máximo simulado fue a los 122 días con 2.65 y el observado fue a los 99 días después de la siembra con un valor de 2.3 y para A7573 el valor máximo simulado fue a los 120 días después de la siembra y en el observado fue a los 127 días con 4.5 de IAF.

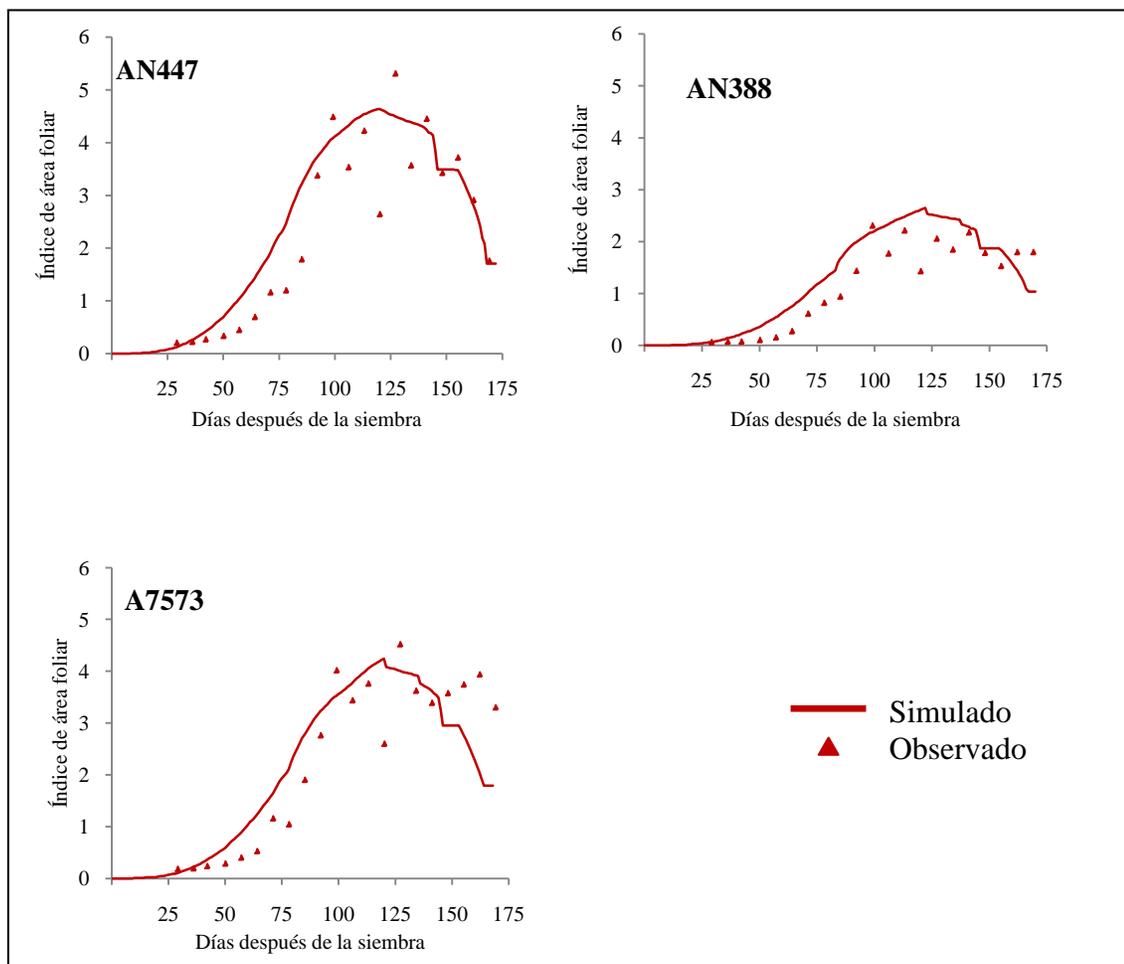


Figura 4.37 Índice de área foliar observada y simulada de los tres cultivares de maíz durante el ciclo del cultivo (3 de mayo de 2007 – 19 de octubre de 2007) en Galeana, Nuevo León, México.

5. CONCLUSIONES.

El modelo construido en Stella 9.0.2 simuló con un buen nivel de precisión el crecimiento y desarrollo de los cultivos de maíz y de alfalfa en la región de estudio a partir de información del ambiente (clima, manejo) y datos experimentales del cultivo. La ventaja de contar con un sistema de predicción, es que se pueden describir anticipadamente las respuestas de cultivos y genotipos a diferentes escenarios (siempre y cuando sean similares a los delimitados en el trabajo) ambientales y de manejo para fortalecer la toma de decisiones.

La calibración del modelo de maíz en el programa DSSAT 4.0.2 para los cultivos y región de estudio se logró de forma satisfactoria. En base a la calibración los modelos tuvieron la capacidad de simular valores muy semejantes a los valores observados. La falta de información confiable de clima y suelo es una limitante para la calibración de estos modelos y poder sistematizar la transferencia de agro-tecnología.

Los programas Stella 9.0.2 y DSSAT 4.0.2 producen simulaciones con buen nivel de precisión, en los dos casos las simulaciones no difieren sustancialmente con los valores observados; sin embargo, el proceso de la construcción de modelos, se dificulta mas en el programa DSSAT ya que este necesita información detallada sobre el cultivo y el manejo del mismo, además la ventaja con que cuenta un modelo de simulación construido en Stella es que es más flexibles al adicionarle otras variables al modelo; por ejemplo, en el programa DSSAT no es posible simular el valor nutritivo de la planta, y en Stella fue posible, ya que es sencillo agregar nuevas variables de acuerdo a los objetivos.

6. RESÚMEN

Los modelos de simulación en la agronomía son utilizados para predecir el comportamiento de un cultivo, y son una herramienta importante en la investigación agropecuaria. El objetivo en este trabajo fue obtener información de campo para estimar las relaciones funcionales de variables físicas y biológicas de los cultivos de la alfalfa y maíz, y así construir modelos que simulen de su crecimiento y desarrollo con el programa Stella 9.0.2. Además, calibrar los modelos de maíz dentro del programa DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer) y analizar las ventajas y desventajas en el uso de estos dos programas. El trabajo experimental se realizó en el campo experimental de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro que se encuentra ubicado en Navidad, Galeana, Nuevo León, México. Se trabajó con cultivares de alfalfa (Cuf-101) y maíz (AN447, AN388, A7573). Las variables evaluadas fueron: acumulación de materia seca parcial, índice de área foliar, altura de la planta, número de hojas por vástago, rendimiento anual, producción de proteína anual, proteína cruda, fibra detergente ácido y fibra detergente neutro. Para el maíz se evaluaron, además de las variables anteriores, la acumulación de materia seca parcial en grano y la relación hoja-tallo. Las ecuaciones utilizadas en la construcción del modelo en Stella 9.0.2 fueron obtenidas a partir de la relación de los grados días desarrollo con las variables biológicas del cultivo. Las variables estudiadas en los dos cultivos fueron simuladas adecuadamente con el modelo construido en Stella 9.0.2, los valores de coeficiente de variación entre los simulados con los observados en más de 70 % tuvieron un valor superior a 0.9 y en la RMSE los valores fueron mínimos, al igual en la simulación de las variables del cultivo de maíz con el programa DSSAT después de su calibración. Los coeficientes genéticos de los tres cultivares de maíz utilizados para la calibración de DSSAT fueron los siguientes: AN447 P1=420, P2=0.100, P5=500, G2=400, G3=15 y PHINT=72;

AN388 P1=400, P2=0.300, P5=550, G2=400, G3=13 y PHINT=65; A7573 P1=410, P2=0.300, P5=500, G2=400, G3=12 y PHINT=66. En los dos programas se obtuvieron resultados satisfactorios, pero en DSSAT se dificulta más el proceso de simulación que en Stella, ya que el primero necesita información detallada del manejo del cultivo y no permite simular algunas variables como la composición química de la planta.

Palabras claves: Maíz, alfalfa, Stella, DSSAT, coeficientes genéticos.

7. LITERATURA CITADA.

- Ackoff, R. L. 1999. Re-creating the corporation. A design of organizations for the 21th century. New York, USA: Oxford University Press. 336 p.
- Anslow, R.C. y J.O. Green. 1967. The seasonal growth of pasture grasses. J. Agric. Sci. (Cambridge) 68:109-122.
- Barrett, J.R. y M.A. Nearing. 1998. Humanization of Decision Support Using Informations from simulations. pp 1-17 In: Peart R. and R.B. Curry (eds) Agricultural System Modelling and Simulation. Marcel Dekker Inc., New York, USA.
- Becht, G. 1974. Systems theory, the key to holism and reductionism. Bioscience 24(10): 579-596.
- Bruma, J. y J. W. Jones. 2001. An international collaborative network for agricultural systems applications (ICASA). Agricultural Systems. 70:355–368.
- Coyle, R. G. 1996. Systems dynamics modeling. A practical approach. New York, USA: Chapman & Hall. 413 p.
- Dent, J. B. y J. R. Anderson. 1974. El análisis de sistemas de administración agrícola. México: Editorial Diana. 463 p.
- Dent, J. B. y J. R. Anderson. 1974. Sistemas, administración y agricultura. En: Dent, J. B. y J. R. Anderson. El análisis de sistemas de administración agrícola. México: editorial Diana. 29-41 p.
- Forrester, J. W. 1968. Principles of systems. Cambridge, Mass., USA: MIT Press.
- Forrester, J. W. 1969. Urban dynamics. Massachussets Institute of Technology. Cambridge, Mass., USA: The M.I.T. Press. 285 p.
- Fuentes A., J. 2001. Evaluación de variedades e híbridos de maíz (*Zea mays* L.) para ensilado. Agronomía Mesoamericana. Costa Rica. 12 (2): 193-197.

- Gómez F., E. 2005. Crecimiento y desarrollo del zacate buffel (*Cenchrus ciliaris* L.) en la zona centro de Tamaulipas. Tesis Doctorado. Universidad Autónoma de Tamaulipas. Cd. Victoria, Tamaulipas, México.
- Gijsman, A. J., G. Hoogenboom, W. J. Parton y P. C. Kerridge. 2002. Modifying DSSAT crop models for low-input agricultural systems using a soil organic matter-residue module from CENTURY. *Agron. J.* 94:462-474.
- Godet, M. 1989. Effective strategic management: the prospective approach. *Technology Analysis and Strategic Management*. Vol. 1, No. 1. 45-55 p.
- Grant, W. E., E. K. Pedersen y S. L. Marín. 1997. Ecology and natural resource management: System analysis and simulation. John Wiley. New York.
- Guevara, E. 1999. La simulación del desarrollo, crecimiento y rendimiento en maíz. INTA.
- Gutiérrez P., M.L. y D.U. López. 1991. Tolerancia de cinco cultivares de zacate buffel a la salinización artificial durante la germinación. 6º Congreso de la Sociedad Mexicana de Manejo de Pastizales. Monterrey, N.L. p 72.
- Hart, R. D. 1985. Conceptos básicos sobre agroecosistemas. Serie Materiales de Enseñanza. Centro agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Turrialba, Costa Rica. 160 p.
- Hunt, L. A. y K. J. Boote. 1998. Data for model operation, calibration and evaluation. En: G. Y. Tsuji, G. Hoogenboom y P. K. Thornton (Eds.). *Understanding options for agricultural production*. Kluwer Academic Publishers. USA. 39 p.
- Jones, J. W. 1993. Decision support system for agricultural development. En: Penning de Vriets F., W. T., P. S. Teng y K. Metselaar (Eds.). *Systems approaches to agricultural development*. Kluwer Academic Publishers. USA. 472 p.
- Jones, J. W., G. Y. Tsuji, G. Hoogenboom, L. A. Hunt, P. K. Thornton, P. W. Wilkens, D. T. Imamura, W. T. Bowen y U. Singh. 1998. Decision support system for agrotechnology transfer: DSSAT v3. En: Tsuji, G. Y., G. Hoogenboom, P. K. Thornton. (Eds.). *Understanding options for agricultural production*. USA. 399 p.

- Latournerie M., L., S. A. Rodríguez H., J. A. Urquiza V., G. Castañón, M. Mendoza E. y A. López B. potencial forrajero de veintidós híbridos de maíz evaluados en tres densidades de siembra. *Agronomía Tropical*. 51(3): 405-419.
- Maciel P., 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. M. C. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.
- Mendoza H., J. M. 1983. Diagnostico climático para la zona de influencia inmediata de la UAAAN. Departamento de Agrometeorología. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.
- Morales A., J., J. L. Jiménez V., V. A. Velasco V., Y. Villegas A., J. R. Enríquez V., A. Hernández G. 2006. Evaluación de 14 variedades de alfalfa con fertirriego en la Mixteca de Oaxaca. *Tec. Pec. Mex.* 44(3):177-288.
- Musito R., N. 2003. Genotipos de maíz tolerantes a sanidad, un estudio preliminar para iniciar un programa de selección. Tesis M. C. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.
- Odum, T. H. 1994. *Ecological and general systems: introduction to systems ecology*. Colorado, USA.
- Overton, W. S. 1990. A strategy of model construction. 49-73 p. En: Hall, Ch. A. S., and J. W. Day (Eds.). 1990. *Ecosystem modeling in theory and practice: An introduction with case histories*. Niwet, Colorado: University Press of Colorado. 684 p.
- Raiput, R.P. 1980. Response of soybean crop to climate and soil environments. IARI, New Delhi, India.
- Ritchie, J. T., U. Sinch, D. C. Godwin y W. T. Bowen. 1998. Cereal growth, development and yield. En: G. Y. Tsuji, G. Hoogenboom y P. K. Thornton (Eds.). *Understanding options for agricultural production*. Kluwer Academic Publishers. USA. 36 p.

- Rivas J., M. A., C. López C., A. Hernández G. y J. Pérez P. 2005. Efecto de tres regímenes de cosecha en el comportamiento productivo de cinco variedades comerciales de la alfalfa (*Medicago sativa* L.). Tec. Pec. Mex. 43(1):79-92.
- Roberts, N., D.F. Andersen, R.M. Deal, M.S. Garet, y W.A. Shaffer. 1994. Introduction to computer simulation. A system dynamics modeling approach. Productivity Press. Portland, Oregón, USA. p. 3.
- Ruiz, R. y L. M. Oregui, 2001. El enfoque sistémico en el análisis de la producción animal: Revisión bibliográfica. Investigación agrícola. Producción y sanidad animal. Vol. 16 (1), 2001.
- Santamaría C., C., G. Nuñez H., G. Medina G., J. A. Ruiz C., M. Tiscareño L. y M. H. Quiroga G. 2000. Evaluación del modelo EPIC para estimar el potencial productivo de la alfalfa (*Medicago sativa* L.) en diferentes ambientes ecológicos de México. Tec. Pec. Méx. 38(2): 151-161.
- Téllez O., O. S. 1999. Validación del modelo EPIC, para simular el índice de área 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. Tesis. M. C. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.
- Thornley, J. H. M. 1998. Grassland dynamics. An ecosystem simulation model. Wallingford, United Kingdom: CAB International. 241 p.
- Uehara, G. y G. Y. Tsuji. 1998. Overview of IBSNAT. En: Tsuji G. Y., G Hoogemboom. Thorton (Eds). Understanding options for agricultural production. Kluwer Academic Publishers. Great Britain. p. 1-7.
- Villegas A., Y., A. Hernández G., J. Pérez P., C. López C., J. C. Herrera H., J. F. Enríquez Q. y A. Gómez V. 2004. Patrones estacionales de crecimiento de dos variedades de alfalfa (*Medicago sativa* L.). Tec. Pec. Mex. 42(2):145-158.
- Whisler, F. D., B. Acock, D. N. Baker, R. E. Fye., H. F Hodges, J. R. Lambert, H. E. Lemmon, J. M. Mckinion y V. R. Reddy. 1986. Crop simulation models in agronomic systems. Adv. Agron. 40:141 – 208.