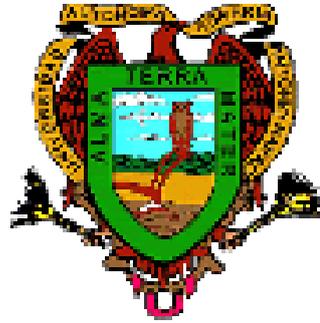


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA

ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE CIENCIA ANIMAL

DEPARTAMENTO DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES



Modelo de simulación del crecimiento de cebada forrajera (*Hordeum vulgare*) en el sur de Nuevo León México.

POR

ALFREDO GINES FLORES

TESIS

Presentada Como Requisito Parcial Para Obtener

El Título profesional de:

INGENIERO AGRÓNOMO ZOOTECNISTA

Buena vista saltillo Coahuila, México, Diciembre del 2010.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA

ANTONIO NARRO

DIVISIÓN DE CIENCIA ANIMAL

DEPARTAMENTO DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES

Modelo de simulación del crecimiento de cebada forrajera (*Hordeum vulgare*) en el sur de Nuevo León México.

POR:

ALFREDO GINES FLORES

TESIS

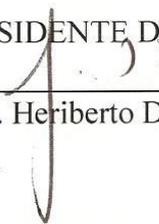
Que somete a consideración de H. Jurado Examinador

Como requisito parcial para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO ZOOTECNISTA

APROBADA POR

PRESIDENTE DEL JURADO


Dr. Heriberto Díaz Solís


Ing. Fidel Maximiano Peña Ramos

SINODAL

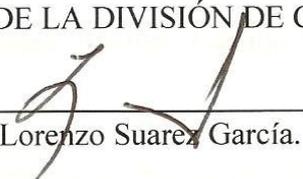

M.C. Misael Rodríguez Arvizu

SINODAL


M.C. Modesto Colín Rico

SINODAL

COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE CIENCIA ANIMAL


M.C. Lorenzo Suarez García.

Universidad Autónoma Agraria
"ANTONIO NARRO"



COORDINACION DE
CIENCIA ANIMAL

Buнавista, Saltillo, Coahuila, México, Diciembre del 2010

AGRADECIMIENTOS

Le doy gracias a Dios, primeramente por darme la oportunidad de nacer además porque nunca ha dejado de bendecirme y siempre me ha guiado por un camino correcto, hoy cumplo mi sueño de ser profesionista y nunca dejare de agradecer por esto.

A la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro porque me dio la oportunidad de formarme como un profesionista y me ha dado las bases para defenderme en la vida y no ser uno más.

A mis asesores:

Dr. Heriberto Díaz Solís, Ing. Fidel Maximiano Peña Ramos, M.C. Misael Rodríguez Arvizu, M.C. Modesto Colín Rico.

Porque con sus consejos y sugerencias hicieron posible terminar exitosamente esta tesis.

A los profesores de la división de ciencia animal por contribuir en mi formación académica y humana.

A los compañeros de consejo universitario por darme la oportunidad de intercambiar ideas por el bien de la UAAAN.

A los amigos que me acompañaron en los buenos y malos momentos durante mi estancia en la universidad; Rolando Nieves Díaz (puebla), Jaime Espinoza Núñez, Raúl Calderón Valdez, Luis Antonio Rodríguez Hernández (Volador), Rodrigo Hernández San Juan, Cristóbal Morales Ramírez, Heisler Leines Ibarra (rondalla), Norberto Tipa Solís, Abdiel Soto Pérez, Edwin Morales Ramírez (macho), Fernando Ruiz Guajardo (matehuala), Valente De Jesús Fuentes Farrera, Constancio Corso Cruz (Tancho), Alfredo Avendaño Álvarez (tocayo). Jesús Alejandro Cornelio Infante (gordo), Luis Pichardo, Juan Manuel Pérez Espinoza (Juancho), Avidail Calvó López, Cinthia Herrera Palacios (flaca), Teresa Bautista Castillo, Berenice Esquivel, Nancy Ramos Mancilla.

A los compañeros de mi cuarto: Marcos Martínez Velázquez, Marco Antonio Díaz Rosales, Eliazar Carrera Pacheco.

Gracias a todos por contribuir en mi formación profesional.

DEDICATORIAS

Mis padres

Delia Flores Pérez: Mama eres un ser divino, hoy en día te dedico con mucho amor esta tesis que demuestra la inteligencia y la capacidad que me heredaste, te doy las gracias por darme la vida y por guiarme por un buen camino. Te agradezco por confiar en mí y por apoyarme incondicionalmente en mi vida sin pedirme nada a cambio.

Celso Gines Toribio: Papa te agradezco por ser mi guía y mi ejemplo, sin tus consejos y cariño nunca hubiera cumplido mi sueño de ser un profesionalista. Siempre has sido responsable y dedicado en tu trabajo para que mis hermanas y yo seamos unas personas exitosas, te dedico mi tesis que demuestra un agradecimiento a todo lo que has hecho por mí.

A mis hermanas

María de los Ángeles Gines Flores: Eres mi hermana mayor a la que respeto y quiero, hoy se cumple mi sueño de ser profesionalista y quiero dedicarte con mucho cariño esta tesis en agradecimiento a tu ejemplo que me ha guiado a ser una persona de bien.

Esther Gines Flores: La tesis que hoy escribo te la dedico con mucho cariño por ser mi hermanita menor gracias por quererme y respetarme.

A mi esposa

Laura Erika García Carlón: Te dedico mi tesis por ser una persona muy especial gracias por confiar en mí, por tu amor y comprensión.

A mi hijo

Alfredo Alain Gines García: Eres la bendición que dios me mando, mi esfuerzo y dedicación se refleja en esta tesis que hoy me hace ser profesionalista te la dedico con todo mi amor hijo.

A mi abuelitos:

Esther Pérez Castañeda (Mami), Rogelio Flores Sotelo (Papi) Paula Toribio Andrade, Guillermo Gines Gines (†): Les dedico con mucho cariño este trabajo.

A mis tíos

A cada uno de ustedes les dedico esta tesis por ser parte de mi vida y porque me han demostrado su cariño a base a consejos y ejemplos; Silvia Flores Pérez, Miguel Flores Prez, Rosario Flores Pérez, David Flores Pérez, Carlos Flores Pérez, Vicente Flores Pérez, Humberto Flores Pérez, Hugo, Daniel, Gabriela, Teódulo Gines Toribio, Cleofás Gines Toribio, Andrés Gines Toribio, Nicolasa Gines Toribio, Esteban Gines Toribio, Valente Gines, Porfiria, Adela, Eusebia.

A mis primos

A ustedes que han sido como hermanos para mí que los quiero y los respeto les dedico este trabajo; Fernando Gines Tecpil, Hugo Gines Gines, Emiliano Gines Gines, Silverio Gines Gines, José Luis Gines Gil, Sandra Gines Tecpil, Jesús Flores Jiménez, Cesar Flores Jiménez, Juliana Flores Jiménez.

A mi compadre Marcos.

A todos los mencionados les comparto este trabajo que demuestra mi dedicación y esfuerzo gracias por ser parte de mi vida.

ÍNDICE GENERAL	
AGRADECIMIENTOS.....	iii
DEDICATORIAS.....	iv
ÍNDICE GENERAL.....	vi
ÍNDICE DECUADROS.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS.....	2
3. HIPÓTESIS.....	2
4. REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
4.1 Modelo de simulación.....	3
4.1.1. Modelo.....	3
4.1.2. Simulación.....	3
4.2 Uso de la cebada como forraje.....	4
4.3 Índice de área foliar.....	4
4.4 Uso de la temperatura en los modelos de simulación.....	4
4.5 Cambio climático.....	6
4.6 STELLA.....	7
4.6.1. Descripción del programa STELLA.....	7
5. MATERIALES Y MÉTODOS.....	10
5.1 Ubicación del área de estudio.....	10

5.2	Experimento en campo.....	10
5.3	VARIABLES DE RESPUESTA.....	10
5.4	Datos climáticos.....	11
5.5	Construcción del modelo con STELLA 8.0.....	12
5.6	Descripción del modelo con STELLA 8.0.....	12
	5.6.1. Submodelo del clima.....	13
	5.6.2. Submodelo crecimiento del cultivo.....	14
6.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	16
6.1	Índice de área foliar (IAF).....	16
	6.1.1. Simulación del índice de área foliar en tres escenarios de temperatura.....	17
6.2.	Materia seca parcial (MPS).....	18
	6.2.1. Simulación de materia seca parcial en tres escenarios de temperatura.....	19
6.3.	Altura del cultivo (ALT).....	20
	6.3.1. Simulación de altura del cultivo en tres escenarios de temperatura.....	21
7.	CONCLUSIONES.....	23
8.	LITERATURA CITADA.....	24

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Promedios históricos de temperatura de 13 años (1993-2006) registrada en la comunidad el Prado, Galeana, Nuevo León, México.....	16
--	----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Elementos básicos en Stella.....	11
Figura 2. Croquis del experimento.....	13
Figura 3. Submodelo de clima en el modelo de cebada.....	17
Figura 4. Submodelo crecimiento del cultivo en el modelo de Cebada.....	18
Figura 5. Índice de área foliar observado y simulado.....	20
Figura 6. Índice de área foliar con los diferentes escenarios de temperatura.	20
Figura 7. Materia seca total observada y simulada.....	22
Figura 8. Materia seca total con los diferentes escenarios de temperatura....	23
Figura 9. Altura observada y simulada.....	24
Figura 10 Altura con diferentes escenarios de temperatura.....	25

1. INTRODUCCIÓN

En el norte de México predominan las condiciones semiáridas, por ello, la producción de forraje presenta un punto crítico en el periodo de invierno e inicios de primavera, a consecuencia del frío, cuando decrece drásticamente la producción de las diferentes especies forrajeras, tanto nativas como cultivadas, lo mismo anuales que perennes. Entre las opciones que existen para aumentar la producción en el periodo mencionado, destaca la cebada (*Hordeum vulgare*) (Colín *et al.*, 2007). Esto ha sido importante, pero en la actualidad se viven variaciones climáticas como el calentamiento global y se tienen que tomar en cuenta los efectos derivados de las variaciones en la temperatura (Watson, 1997). Por estos antecedentes debemos utilizar una herramienta que utilice y que considere las situaciones actuales y que nos permita analizar los escenarios esperados.

Los modelos biofísicos de simulación son una herramienta para predecir eventos importantes en un cultivo, y para investigar procesos en todo tipo de sistemas (Thornley y Johnson, 2000). Este tipo de modelos, ayudan a tomar decisiones anticipadas de las prácticas de manejo, con lo que ayudan a reducir los costos de producción en sistemas productivos. En sistemas agrícolas, juegan un papel importante porque explican los mecanismos fisiológicos de los cultivos en función del sistema clima (Peña, 2010).

En esta investigación se utilizó el programa STELLA 8.0 para la simulación ya que ayuda a modelar sistemas dinámicos, sin requerir de matemáticas sofisticadas.

Palabras clave: Cebada (*Hordeum vulgare*), Modelos de simulación, Cambio climático, Temperatura.

2. OBJETIVOS

- Construir un modelo de simulación del crecimiento de cebada forrajera variedad Narro-92-05.
- Describir el crecimiento de la cebada forrajera variedad Narro-92-05, bajo diferentes escenarios de temperatura.

3. HIPÓTESIS

- Los modelos creados en STELLA pueden proveer una buena estimación del crecimiento, desarrollo y producción de cultivos forrajeros.

4. REVISIÓN DE LITERATURA

4.1. Modelos de simulación

4.1.1. Modelo.

Thornley y Johnson (2000) definen a los modelos como simplificaciones de la realidad que describen y explican los fenómenos ya sea en forma teórica o conceptual (modelos matemáticos), o bien en forma analógica.

Un modelo es una abstracción de la realidad donde se describen los elementos esenciales de un problema (Grant *et al.*, 1997).

4.1.2. Simulación.

Simulación es el uso de un modelo para imitar, o describir paso a paso, el comportamiento del sistema que estamos estudiando. Los modelos de simulación están compuestos de una serie de operaciones aritméticas y lógicas que, en conjunto, representan la estructura (estado) y el comportamiento (cambio de estado) del sistema de interés (Grant *et al.*, 1997).

Odum y *Odum* (2000) reportan que los modelos de simulación son una herramienta de la actualidad que permite hacer la representación de un sistema real en base a variables que interaccionan en este.

Los modelos de simulación sirven para evaluar los efectos de las estrategias de manejo en la eficiencia biológica y económica de los sistemas de producción, incorporando elementos como por ejemplo: requerimiento nutricional, biológicos reproductivos, producción de forraje, socioeconómico, etc. *Levine et al.*, 1978; *Baker et al.*, 1992; *Williams et al.*, 1992; *Watts*, 1998, citados por *Villalobos* (2009).

Los modelos de simulación de crecimiento de cultivos, son instrumentos para reproducir el comportamiento de un cultivo y evaluar su respuesta al ambiente que lo circunda. La principal ventaja está ligada a la

posibilidad de aplicar los modelos en condiciones agronómicas, de cultivos y de gestión diversas a aquellos bajo las cuales fueron desarrollados (Bindi, 2003).

4.2. Uso de la cebada como forraje

Uno de los principales problemas que enfrentan en la actualidad los ganaderos en el norte de México, es la falta de insumos para alimentar el ganado especialmente durante épocas críticas como el periodo invernal. Los cereales de invierno como la cebada son una fuente de forraje durante el invierno e inicio de la primavera, y su uso se ha extendido en los últimos años utilizándolos en pastoreo, heno, verdeo, picado y ensilado (Colín *et al.*, 2007).

4.3. Índice de área foliar

El índice de área foliar (IAF) es el área de hoja verde por unidad de área de suelo (Gregorini, 2007).

Se ha considerado que el área foliar óptima es aquella que permite que el 5% de la radiación solar que llega a la superficie de la pradera alcance la superficie del suelo. Un bajo índice de área foliar (IAF) desperdicia la energía del sol, y un alto índice de área foliar produce sombreo de la parte baja de la planta que a su vez produce la senescencia y muerte de esas partes de la planta. Se considera que un nivel de índice de área foliar entre 1 y 2 produce un adecuado balance en la producción total del forraje, el consumo de forraje por el animal y la muerte del follaje (Díaz, 2004).

4.4. Uso de temperatura en los modelos de simulación

Muchos procesos biológicos como la fotosíntesis, respiración, traslocación, crecimiento celular y desarrollo se ven afectados por la temperatura, mostrando efectos diferentes entre especies y variedades. Es por esto que los modelos biofísicos de simulación consideran a la temperatura como una variable primaria que influye en el desarrollo y producción de los

cultivos, asumiendo que las tasas de desarrollo son directamente proporcionales a un rango de temperatura dado (Peña, 2010).

A la cantidad de calor que requiere una especie se le denomina unidades calor (UC) ó unidades térmicas, traducción al español del término grados-días-crecimiento (GDD)

En el concepto de unidades calor se asume una relación lineal entre la tasa de desarrollo y la temperatura promedio del aire, la cual se considera dentro de un límite térmico máximo y un mínimo definido para la especie (Cross y Zuber, 1972; Summerfield *et al.*, 1988).

Todos los procesos fisiológicos de las plantas superiores son realizados dentro de ciertos límites de temperatura, los cuales se encuentran entre los 0° y los 50°C. Las plantas para completar su ciclo vegetativo deben acumular cierto número de grados de temperatura (Torres, 1983).

Ritchie *et al.*, (1998), Rodríguez (2008), y Peña (2010) coinciden en que la escala de tiempo de las plantas de cereales está estrechamente relacionada con la temperatura, primero sugieren que la duración de un estado de crecimiento en particular está directamente relacionado con la temperatura y esta duración se puede predecir para una especie en particular utilizando la sumatoria de la temperatura media diaria del aire. Pero un término más apropiado para describir la duración de crecimiento de las plantas es "Thermal Time" porque la escala de tiempo de las plantas está estrechamente relacionada con las condiciones térmicas considerando una temperatura base a la que se detiene el crecimiento. Y proponen una fórmula para calcular "Thermal time" (Td) en grados centígrados por día.

$$Td = \sum_{i=1}^n (\bar{T}a - Tb)$$

Donde:

$\bar{T}a$ = Temperatura media en el día.

Tb = Temperatura base a la que se detiene el desarrollo.

n = Número de días de observaciones de temperatura usadas.

Temperatura media del día se calcula con la siguiente formula

$$T_a = \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2}$$

Wilson y Cooper (1969) citados por Rodríguez (2008) reportan que la temperatura puede modificar la anatomía y morfología de las hojas debido a que causa cambios en el tamaño de las células del mesófilo y la anatomía de los estomas lo cual tiene influencia en el proceso de fotosíntesis.

4.5.Cambio climático

El impacto del cambio climático en la producción agrícola se relaciona con la temperatura. El aumento de las temperaturas puede tener impactos significativos en las operaciones de las explotaciones agrícolas.

Una de las formas más utilizadas actualmente para estudiar el impacto de un cambio climático sobre los sistemas agrícolas y pecuarios, es evaluando escenarios futuristas de cambio en modelos computacionales de simulación de crecimiento de cultivos. Estos permiten analizar el comportamiento productivo durante todo el ciclo del cultivo bajo diferentes marcos climáticos, obteniendo resultados sobre los efectos de variaciones en la temperatura (Villalobos *et al.*, 2009).

La tendencia en las investigaciones agrícolas que utilizan escenarios climáticos derivados de los modelos es que sean del orden de 1 a 4°C en la temperatura. Con estos rangos de variación, las posibilidades de construcción de escenarios es grande, máxime que algunos modelos de simulación de crecimiento permiten manejar combinaciones de factores y factores aislados como tratamientos de estudio (Villalobos *et al.*, 2009).

La proyección del cambio climático hacia un calentamiento global que se daría en los siguientes 30 o 40 años, producirá efectos importantes en el entorno agrícola del planeta. No solamente se afectará la biología de los cultivos (positiva o negativamente en referencia a su producción), sino que hará variar el componente socioeconómico y ecológico de las regiones que son

sustentadas por las actividades agrícolas. El efecto del cambio climático sobre la agricultura mundial no se debe ver solo a la luz de la influencia negativa o positiva del cultivo y su derredor, sino en el contexto del desarrollo económico mundial, lo cual hará que algunos países vulnerables al cambio climático pero con buen nivel de desarrollo, respondan mejor a las medidas de adaptación que aquellos que no posean recursos de inversión, cuya tasa de crecimiento sea baja y que experimenten un rápido incremento poblacional y una alta degradación ecológica (Watson,1997).

4.6.STELLA

4.6.1. Descripción del programa STELLA

Martin y Tilley (2000) citados por Rodríguez (2008) reportan que STELLA es un programa que sirve como una herramienta para modelar sistemas dinámicos, con pocas matemáticas sofisticadas y poco conocimiento de programación. Para crear un modelo de simulación en STELLA se usan símbolos, los cuales representan almacenes, flujos y variables que influyen dentro del sistema, los símbolos se conectan y se emplean ecuaciones matemáticas para relacionar los componentes del modelo.

Charles-Edwards *et al.*, (1986) citados por Díaz *et al.*, (2005), mencionan que el estudio científico de fenómenos agropecuarios debe cubrir las siguientes fases:

- a) Adquisición del conocimiento acerca del problema que se está investigando.
- b) Ordenamiento de este conocimiento y desarrollo de un entendimiento del problema.
- c) Aplicación del conocimiento y el entendimiento para la solución del problema.

La interface se puede utilizar para describir y analizar sistemas biológicos, físicos, químicos o sociales muy complejos. Complejidad que se puede representar muy bien, con sólo 4 elementos o bloques de construcción: *stock, flujo, conector y convertidor*.

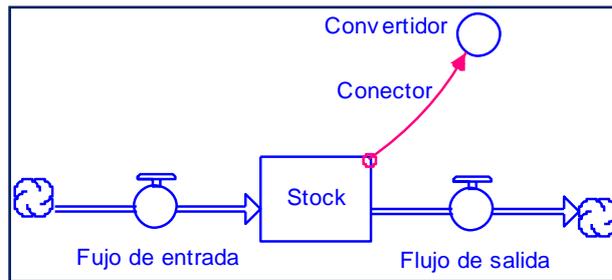


Figura 1. Elementos básicos en Stella.

Stock.

Es un símbolo genérico para cualquier cosa que acumula o consume recursos.

Flujo.

Un flujo es la tasa de cambio de un stock.

Convertidor.

Un convertidor se utiliza para tomar datos de entrada y manipularlos para convertir esa entrada en alguna señal de salida.

Conector.

Un conector es una flecha que le permite a la información pasar entre: convertidores; stocks y convertidores; stocks, flujos y convertidores. Un conector cuya dirección va de un convertidor 1 a un convertidor 2 significa que el convertidor 2 es función del convertidor 1. En otras palabras, el convertidor 1 afecta el convertidor 2.

Grant *et al*, (1997) proponen el uso de nombres como variables de estado, transferencia de materia o energía, variables auxiliares y transferencia de información para los stocks, flujo, convertidor y conector, respectivamente. (Figura 1).

Rojas (2008) construyó un modelo de simulación con STELLA para predecir el crecimiento de Alfalfa y Maíz en el Sur de Nuevo León, México, los resultados obtenidos en la simulación tienen un comportamiento similar al

observado en campo, los valores del coeficiente de determinación (R^2) entre el simulado y el observado se encuentran por arriba del 0.9.

Rodríguez (2008) construyó un modelo de simulación con STELLA para predecir el crecimiento de cereales forrajeros en el sur de Nuevo León, México; la simulación, produjo resultados aceptables. Las variables que utilizó en su experimento son acumulación de materia seca parcial aérea, acumulación de materia seca para forraje, altura del cultivo, relación hoja tallo, índice de área foliar, acumulación de materia seca parcial en grano, contenido de proteína cruda y fibra detergente acida.

Peña (2010) construyó un modelo de simulación con STELLA para predecir el crecimiento desarrollo y producción de los cultivos maíz, alfalfa, avena, trigo, cebada y triticale. Los resultados obtenidos en la simulación tienen un comportamiento similar al observado en campo, los valores del coeficiente de determinación (R^2) entre simulados y observados se encuentran por arriba del 0.9.

5. MATERIAL Y MÉTODOS

5.1. Ubicación del área de estudio

Se sembró y evaluó el cultivo de Cebada forrajera en el ciclo otoño-invierno 2008-2009 en el campo agrícola de una unidad de producción en la comunidad el Prado municipio de Galeana, N.L. El campo se encuentra ubicado en las coordenadas 25° 05' de latitud Norte, 100° 42' longitud Oeste, a una altitud de 1890 msnm.

5.2. Experimento en campo

Se trabajó con el cultivo de cebada (*Hordeum vulgare*), se sembró la variedad Narro-95-02 el 15 de noviembre del 2008 (día juliano 319). La siembra se realizó al voleo con una densidad de 160 kg/ha.

Para la siembra realizada se preparo previamente el terreno con maquinaria y riego.

El cultivo se estableció en 15 unidades experimentales de 16 m de ancho por 10 m de largo, es decir con una superficie de 160 m² cada una. La distribución de unidades experimentales y de muestreos se presenta a continuación:

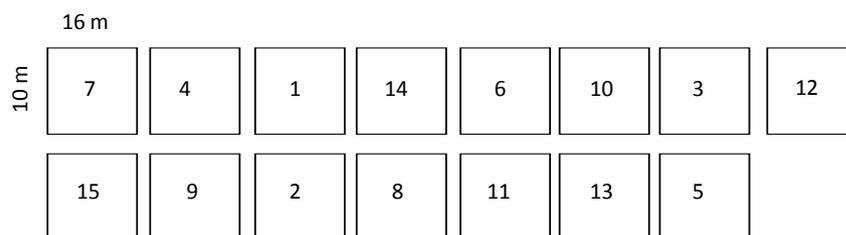


Figura 2. Croquis del experimento.

5.3. Variables de respuesta

Emergencia.

En cada parcela se contó el número de plantas emergidas en un m². Esto se realizó a la segunda semana de la siembra.

Fenología.

Cada catorce días se registró: altura, número de hijuelos así como números de hojas verdes y secas en cinco plantas. Estas plantas fueron seleccionadas al azar dentro de la unidad experimental.

Materia seca Parcial (MSP).

Este muestreo se realizó cada 14 días, a este tiempo se cortaban las plantas encontradas en 1 m², después se colocaron en bolsas de papel, se secaron en una estufa a 65 °C por 72 h y se pesaron en una balanza analítica, posteriormente se separó manualmente tallos, y espigas para pesar por separado los componentes del rendimiento, todo esto se hizo desde el primer muestreo hasta la madurez fisiológica del cultivo. Para estimar el rendimiento por hectárea se usó el peso de dichas plantas, extrapolado en base a los muestreos de densidad de población realizados al principio y al final del cultivo.

Índice de área foliar (IAF).

De las plantas muestreadas en 1 m² el componente hoja se utilizó para determinar área foliar, este se cuantificó con un medidor de área foliar LICOR mod. LI-3100A. Para estimar el índice de área foliar (IAF) se utilizaron los datos de muestreo de población de plantas en una hectárea, finalmente se dividió el área foliar entre la superficie.

5.4. Datos climáticos.

Los datos climáticos se registraron diariamente por medio de una estación meteorológica (Davis Vantage Pro II) instalada en el sitio del experimento. Los registros se hacían en intervalos de 30 minutos y los datos se descargaron cada semana. La base de datos se procesó en una hoja de cálculo de Excel y se obtuvieron temperaturas máximas y mínimas por día en grados centígrados.

La temperatura se utilizó para calcular los Grados-Días-Crecimiento (GDD), que acumuló el cultivo durante su ciclo de desarrollo, utilizando la

fórmula propuesta por Ritchie *et al.*, (1998), aunque estos autores la manejan como tiempo térmico.

$$GDD = \frac{T_{\max} + T_{\min}}{2} - T_b$$

Donde:

GDD = Grados Día de Desarrollo.

T_{max} = Temperatura máxima del día.

T_{min} = Temperatura mínima del día.

T_b = Temperatura base a la que la planta detiene su crecimiento, que para cebadase considera de 0 grados C.

5.5. Construcción del modelo con STELLA 8.0

Para desarrollar el modelo conceptual, en primer lugar se identificaron los componentes que intervienen dentro del cultivo y las variables medidas en el experimento, posteriormente con los resultados obtenidos en el experimento y las variables climáticas medidas, se analizaron los datos con STATISTICA 8.0 y CurveExpert 1.4 para obtener las relaciones funcionales entre las variables estudiadas. Después se emplearon las ecuaciones obtenidas, funciones del programa y reglas lógicas para conectar cada uno de los componentes del modelo.

5.6. Descripción del modelo construido con STELLA 8.0

El modelo de cebada está compuesto por dos submodelos o sectores los cuales se describen como: -clima y -crecimiento del cultivo. El modelo corre en pasos diarios desde la fecha de siembra hasta que el cultivo llega a un índice de área foliar de 1 para obtener un forraje de buen valor nutritivo. Díaz (2004) menciona que el área foliar óptima es aquella que permite que el 5% de la radiación solar que llega a la superficie de la pradera alcance la superficie del suelo. Un bajo índice de área foliar (IAF) desperdicia la energía del sol, y

un alto IAF produce sombra de la parte baja de la planta que a su vez produce la senescencia y muerte de estas partes de la planta, Se considera que un nivel de IAF entre 1 y 2 produce un adecuado balance entre la producción total del forraje y el consumo de forraje por animal.

5.6.1. Submodelo de clima

El Submodelo clima (Figura 3) sirve para simular las temperaturas medias diarias (TD). Este generador utiliza una distribución Normal con temperaturas medias y desviaciones estándar mensuales históricas. Las temperaturas utilizadas (Cuadro 1) se obtuvieron de registros históricos de 13 años, medidos en la localidad donde se estableció el experimento de campo.

Cuadro 1. Promedios históricos de temperatura de 13 años (1993-2006) registrada en la comunidad el Prado, Galeana, Nuevo León, México.

Temperatura media mensual		
Mes		
	Media	DE
Enero	8.457	3.208
Febrero	9.660	3.966
Marzo	13.559	3.527
Abril	15.433	3.085
Mayo	18.054	2.363
Junio	19.075	2.210
Julio	18.448	2.387
Agosto	18.303	2.035
Septiembre	17.434	2.595
Octubre	14.840	3.113
Noviembre	11.427	3.223
Diciembre	9.572	3.390

Para calcular los grados-días-crecimiento (GDD) se usaron las temperaturas medias diarias (TD) generadas por el modelo menos la temperatura base del cultivo que fue de 0⁰ C. Después de calcular GDD diarios, se acumulan en la variable de estado grados-días-crecimiento acumulados (GDD AC). La variable Temperatura incluye una distribución Normal con la media y desviación estándar para cada mes del año, y mediante reglas de decisión relacionadas con la variable DIAS, el modelo produce TD dependiendo del día juliano (Figura 3). En la variable GDD el usuario especifica el cambio de temperatura. En este trabajo, GDD toma tres diferentes valores que simulan 3 escenarios.

- GDD1 = TD
- GDD2 = TD+1
- GDD3 = TD+3

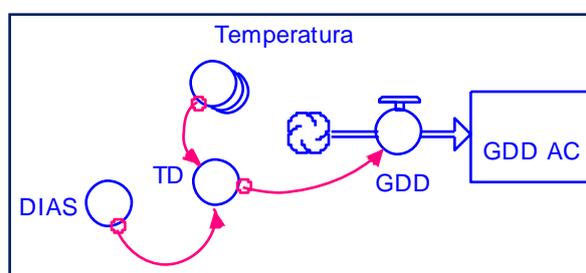


Figura 3. Submodelo de clima en el modelo de cebada.

Los GDD acumulados (GDD AC) representan el tiempo térmico o grados día de desarrollo en grados centígrados acumulados a partir de la fecha de siembra, estos se acumulan de acuerdo a la ecuación:

$$\text{GDD_AC}(t) = \text{GDD_AC}(t - dt) + (\text{GDD}) * dt$$

Donde GDD son los grados-días-crecimiento y dt es el cambio en el tiempo.

5.6.2. Submodelo crecimiento del cultivo.

En el submodelo crecimiento del cultivo (Figura 4) se usaron los GDD AC para predecir las variables: materia seca parcial (MSP), índice de área

foliar (IAF), y altura del cultivo (ALT) donde se utilizaron ecuaciones obtenidas de CurveExpert para cada variable.

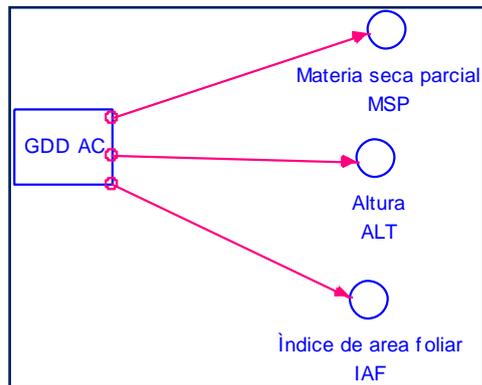


Figura 4. Submodelo crecimiento del cultivo en el modelo de cebada.

Para saber si las variables simulan correctamente se obtuvo el cuadrado medio del error (RMSE) con la siguiente fórmula $[\sum(\text{simulado}-\text{observado})^2/N]^{0.5}$ que cuantifica la dispersión o variación entre los valores simulados con los observados.

También se utiliza el coeficiente de determinación (R^2) que es una medida del grado de asociación entre los datos simulados y los observados (Gijssman *et al.*, 2002).

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se presenta la evaluación del modelo considerando las variables acumulación de materia seca parcial (MSP), altura del cultivo (ALT), e índice de área foliar (IAF). La variable independiente Grados-Días-Crecimiento acumulados (GDDAC) tuvo una alta relación con las variables dependientes. Para las mismas variables también se muestra el uso del modelo en tres escenarios; en el primero se utilizan temperaturas medias diarias actuales, en el segundo se considera un incremento de 1 grado centígrado a las temperaturas medias diarias actuales y en el tercero se considera un incremento de 3 grados centígrados a las temperaturas medias actuales.

6.1. Índice de área foliar (IAF)

La ecuación que se obtuvo de CurveExpert para esta variable es la siguiente:

$$\text{IAF} = 2.129 / (1 + \text{EXP}(21.673 - 0.023 * (\text{GDDAC}))^{(1/5.187)})$$

Los cálculos para el cuadrado medio del error (RMSE) y el coeficiente de determinación (R^2) son los siguientes:

➤ $\text{RMSE} = 0.003$

➤ $R^2 = 0.92$

El modelo de cebada simula correctamente ya que existe una tendencia similar a lo encontrado en campo. En la Figura 5 se puede observar la simulación de la variable IAF con los GDD AC, nos muestra que se necesitan 747 GDD AC para llegar a un índice de área foliar de 1 para ambos casos lo observado y simulado. Las plantas para completar su ciclo vegetativo deben acumular cierto número de grados de temperatura (Torres, 1983).

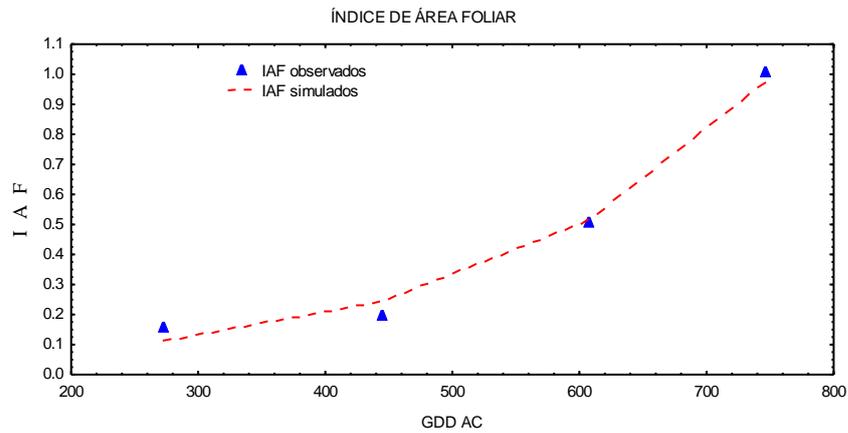


Figura 5. Índice de Área Foliar observado y simulado.

6.1.1. Simulación del índice de área foliar en tres escenarios de temperatura.

Al simular con fecha de siembra el día 15 de noviembre de 2008 (día juliano 319), en el primer escenario con la temperatura media actual, se obtiene el IAF de 1 en la fecha 19 de febrero del 2009, en el segundo escenario con el incremento de 1°C en la temperatura media actual, se obtiene el IAF de 1 en la fecha 04 de febrero del 2009 y por último el tercer escenario con el incremento de 3°C en la temperatura media actual, se obtiene el IAF de 1 en la fecha 25 de enero del 2009. Esto es, con un incremento de 3 °C, la cosecha se adelanta 25 días.

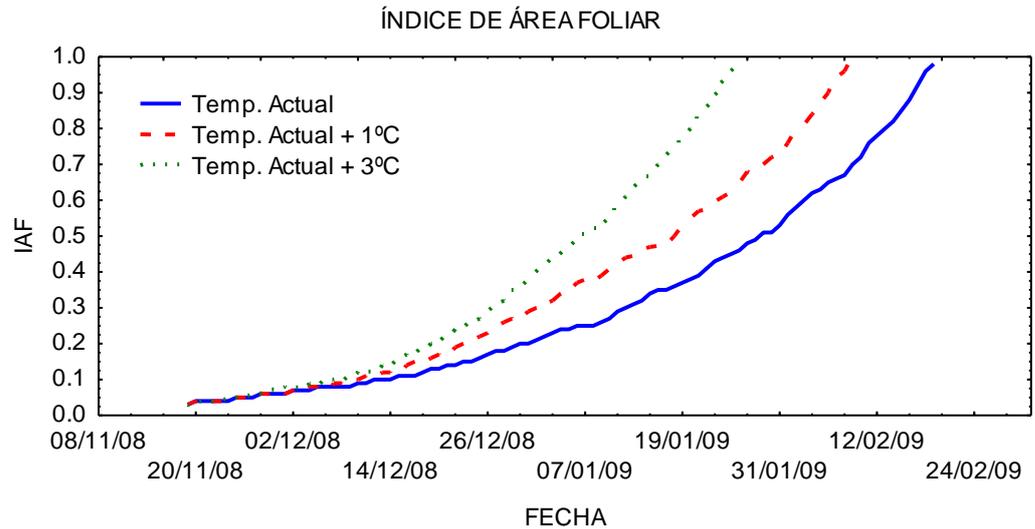


Figura 6. Índice de área foliar con los diferentes escenarios de temperatura.

Chowdhury y Wardlaw (1978) citados por Rodríguez (2008) reportan que el incremento de temperatura en el ciclo vegetativo o periodo verde se acorta debido a la aparición de las hojas con mayor rapidez y por la llegada de la senescencia prematura ya que existe una relación lineal positiva de la temperatura con el desarrollo de los meristemos y la aparición sucesiva de las hojas.

Ritchie *et al* (1998), Rodríguez (2008), y Peña (2010) coinciden en que la escala de tiempo de las plantas de cereales está estrechamente relacionada con la temperatura, sugieren que la duración de un estado de crecimiento en particular está directamente relacionado con la temperatura

6.2.Materia seca parcial (MPS):

La ecuación que se obtuvo de CurveExpert para esta variable es la siguiente:

$$MSP=11057.95/(1+EXP(10.503-0.0103*GDDAC))^{(1/1.834)}$$

Los cálculos para el cuadrado medio del error (RMSE) y el coeficiente de determinación (R^2) son los siguientes:

➤ RMSE= 71.01

➤ $R^2=0.98$

El modelo de cebada tiene buena capacidad de predicción, simula correctamente ya que existe una tendencia similar a lo encontrado en campo. La Figura 5 nos indica que cuando la planta llega a un índice de área foliar de 1 existen 4870 Kg de materia seca parcial. Rodríguez (2008) en su investigación obtiene un RMSE de 1366.1 y una R^2 de 0.94 en la variable materia seca aérea y Peña (2010), obtuvo en su investigación un RMSE de 529 y una R^2 de 0.93 en la variable materia seca parcial aérea.

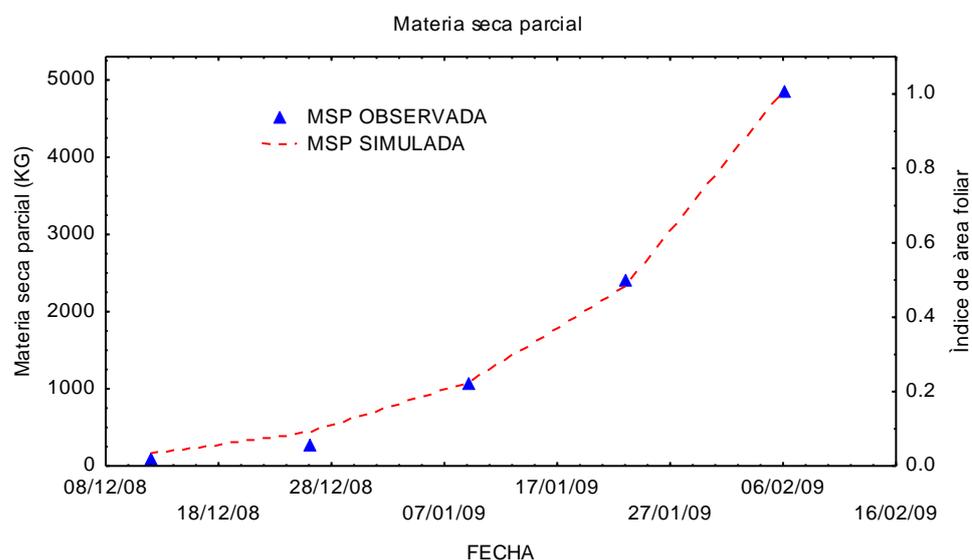


Figura 7. Materia seca parcial observada y simulada.

6.2.1. Simulación de materia seca parcial en tres escenarios de temperatura.

Considerando un índice de área foliar igual a 1 en el primer escenario con la temperatura media actual se obtuvieron 5092 kg/ha de MSP en la fecha 19 de febrero del 2009, en el segundo escenario con el aumento de un grado centígrado en la temperatura media normal la acumulación promedio es de 5059 kg/ha de MPS en la fecha 04 de febrero del 2009 y por último el tercer escenario con el aumento de tres grados centígrados en la temperatura media normal se obtuvieron 5114 kg/ha de MPS, en la fecha 25 de enero del 2009. Esto es, la materia seca producida es muy semejante en los 3 escenarios y lo que cambia es el ciclo del cultivo.

La Figura 8 indica la acumulación de materia seca parcial, al considerar temperaturas medias actuales vs incremento de 1 °C, y 3°C en la temperatura media diaria actual. Se puede observar como el ciclo del cultivo se acorta cuando se aumenta la temperatura entre mas temperatura más corto es el ciclo del cultivo. Wilson y Cooper (1969) citados por Rodríguez (2008) reportan que la temperatura puede modificar la anatomía y la morfología de las hojas debido a que causa cambios en el tamaño de las células del mesofilo y la anatomía de los estomas, lo cual tiene influencia en el proceso de fotosíntesis por lo tanto se ocasiona una alteración en la tasa de crecimiento del cultivo, así como la influencia de la temperatura en la velocidad de las reacciones químicas, dentro de los procesos fisiológicos en el crecimiento y desarrollo de las plantas.

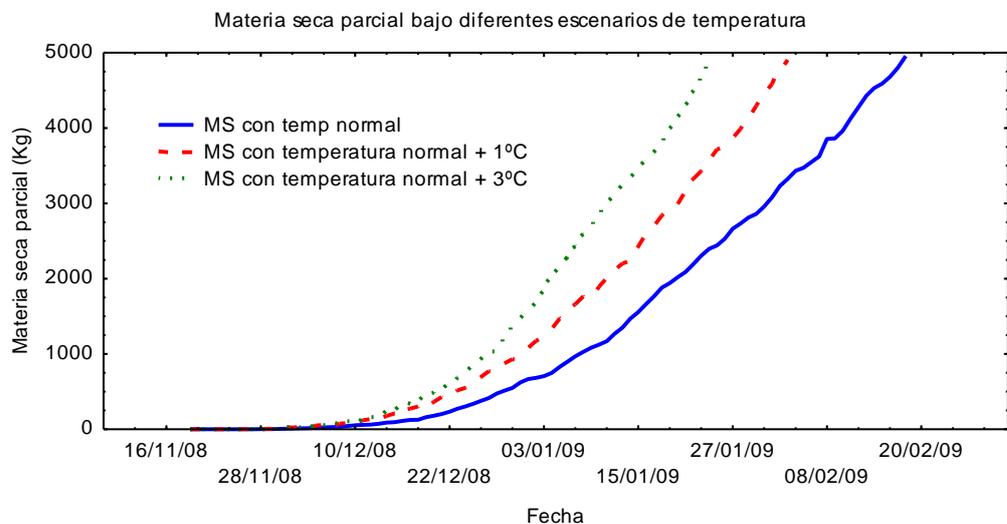


Figura 8. Materia seca parcial bajo diferentes escenarios de temperatura.

6.3. Altura del cultivo (ALT)

La ecuación que se obtuvo de CurveExpert para esta variable es la siguiente:

$$ALT = 92.447 / (1 + \exp(8.134 (0.009 * GDDAC)))^{(1/2.424)}$$

Los resultados obtenidos son los siguientes:

Cuadro 4: RMSE y R^2 en la simulación de altura.

➤ RMSE= 1.006

➤ $R^2=0.98$

El modelo de cebada tiene buena capacidad de predicción en la altura del cultivo, ya que existe una tendencia similar a lo encontrado en campo. La Figura 6 muestra que en los datos observados se llega a una altura máxima de 68 cm mientras que en los simulados registra 65.7 cm. esto es cuando la planta llega a un índice de área foliar de 1.

Rodríguez 2008 en su investigación trabajo con la misma cebada y obtiene una altura de 62 cm con RMSE de 5.8 y una R^2 de 0.94 en la variable altura.

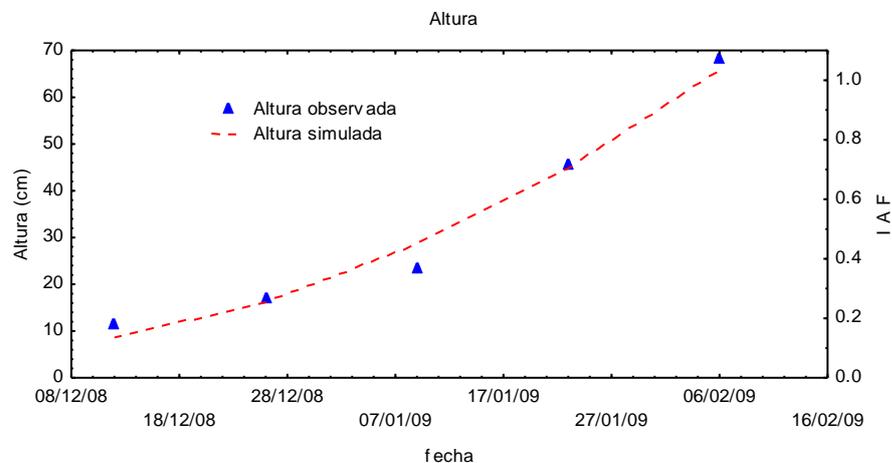


Figura 9. Altura del cultivo observada y simulada.

6.3.1. Simulación de altura del cultivo en tres escenarios de temperatura.

En el primer escenario con la temperatura media actual se obtienen 66.23 cm de Altura en la fecha 19 de febrero del 2009 con un índice de área foliar de 1, en el segundo escenario con el aumento de un grado centígrado en la temperatura media normal la acumulación promedio es de 66 cm de Altura en la fecha 04 de febrero del 2009 con un índice de área foliar de 1 y por último el tercer escenario con el aumento de tres grados centígrados en la

temperatura media normal la acumulación promedio observada es de 65.3 cm de Altura en la fecha 25 de enero del 2009 con un índice de área foliar de 1.

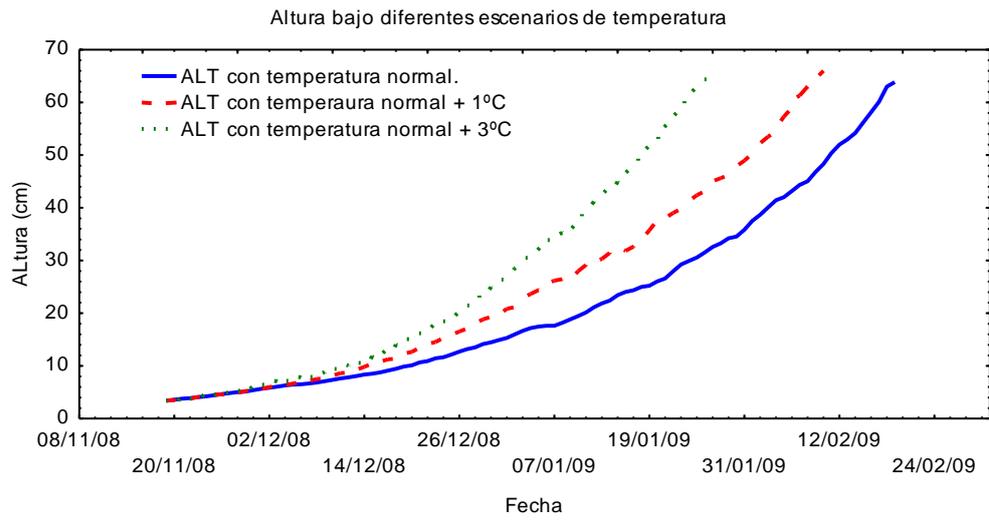


Figura 10. Altura del cultivo con diferentes escenarios de temperatura.

7. CONCLUSIONES

Se construyó y evaluó satisfactoriamente el modelo de crecimiento para el cultivo de cebada en base al experimento realizado en campo e información climática de la región de trabajo. Los modelos creados en STELLA proveen una buena estimación del crecimiento, desarrollo y producción del cultivo de cebada.

El modelo tuvo la capacidad de simular valores muy semejantes a los observados. Para la acumulación de materia seca total, se tuvo un coeficiente de determinación de 0.98 y RMSE de 71.01; la Altura tuvo un coeficiente de determinación de 0.98 y un RMSE de 1.006, el índice de área foliar tuvo un coeficiente de determinación de 0.92 y un RMSE de 0.003.

Con los resultados obtenidos podemos concluir que el incremento de temperatura en 3° C acorta el ciclo de cultivo de cebada hasta 25 días, y esta información es necesaria para diseñar nuevas secuencias de cultivos ante el esperado incremento de la temperatura.

8. LITERATURA CITADA

- Bindi.D.M 2003. Instrumentos para el monitoreo del impacto ambiental sobre la producción agrícola. MODELOS PARA CULTIVOS. Universidad católica de Santa fe.
- Colín R. M., Zamora V. V. M., Lozano R. A. J., Zambrano M.G. y Torres T.M. A. 2007. Caracterización y selección de nuevos genotipos imberbes de cebada forrajera para el norte y centro de México. Tec. Méx.
- Cross, H.Z. and M.S. Zuber. 1972. Prediction of Flowering Dates in Maize Based on different methods of Estimating Thermal units. Agron. J. 64: 351-355.
- Díaz S. H., Kothmann M.M., Grant W.E., Gonzales R.L.E y Morales G. H.C. 2005. Modelos de simulación para el análisis opciones de manejo de pastizales semiáridos. Ponencias magistrales del II simposio internacional de manejo de pastizales. Zacatecas, Zacatecas., México.pp 25.
- Díaz-S,H., 2004. Producción y utilización de forrajes, UAAAN. Manuscrito. pp. 83-84.
- Gijssman A. J., G. Hoogenboom, W. J. Parton, and 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.
- Grant, W. E., E. K. Pedersen, y S. L. Marín. 1997. Basic concepts of systemsanalysis and simulation. (Ed.) Ecology and natural resource management systems analysis and simulation. John Wiley & Sons Inc. New York, U.S.A. p. 16-28.
- Gregorini, P., S. Tamminga, and S. A. Gunter. 2006. Daily grazing patterns of cattle: a behavioral overview. Prof. Anim. Sci. 22:201-209.
- Odum, T. H y E. C. Odum. 2000. Modelling for all scales. Academic Press. San Diego, California. USA. p. 3-4.
- Peña R.M., 2010. Predicción del Crecimiento, Desarrollo y Producción de Cultivos Forrajeros con un Modelo Biofísico de Simulación y el Programa DSSAT, en el Sur de Nuevo León, México, Tesis-maestría, UAAAN, Buenavista, Saltillo, Coah., México.

- Ritchie, J. T., U. Singh, D.C. Godwin, y W. T. Bowen. 1998. Cereal growth, development and yield. En: Tsuji G. Y., G Hoogemboom, Thorton.(Eds). Understanding options for agricultural production. KluwerAcademicPublishers. Great Britain. p. 79-98.
- Rodríguez –A.M., 2008. Modelos de simulación para cereales forrajeros en el sur de Nuevo León, México Tesis-maestría, UAAAN, Buenavista, Saltillo, Coah., México.
- Rojas M. C.,(2008), Construcción y Calibración de Modelos de Simulación para Alfalfa (*Medicago sativa* L.) y Maíz (*Zea mays* L.) en el Sur de Nuevo León, México. Tesis-maestría, UAAAN, Buenavista, Saltillo, Coah., México
- Summerfield, R.J., E.H. Roberts, and R.J. Lawn.1988. Fotothermal Modulation of Flowering in grain legume Crops. In: International Congress of Fenology. In press.
- Thornley JHM and Johnson IR (2000). Plant and Crop Modelling. Blackburn Press, Caldwell, NJ.
- Torres R. E. 1983. Temperatura. en: Agrometeorología. Edit. DIANA, S. A. 1a ED. D. F., México. p. 67-79.
- Villalobos, F. R. y Barrantes J. R. (2009). Efecto del Cambio Climático en la Agricultura. Experiencias en Costa Rica revista biológica, Gestión de Desarrollo Instituto Meteorológico Nacional 1,1-2.
- Watson, R.; Zinyowera, M.; Moss, R.; Dokken, D. 1997 the regional impacts of climate change: an assessment of vulnerability.summary for policymakers. Report of IPCC Working group II. 16pp.
- Wilson D. y J. P. Cooper.1969. Effect of Temperature During Growth on Leaf Anatomy and Subsequent Lightsaturated Photosynthesis Among Contrasting *Lolium* Genotypes. New Phytol. 68:1115-1123.