

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
“ANTONIO NARRO”**

**DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO DE BOTÁNICA**



Un modelo dinámico de simulación para predecir el crecimiento y producción de forraje en cebada (*Hordeum vulgare*) en Galeana, Nuevo León, México.

POR:

JOSÉ LUIS VELÁZQUEZ RODRÍGUEZ

TESIS

Presentada como Requisito Parcial para Obtener el

Título de:

INGENIERO EN AGROBIOLOGÍA

SALTILLO, COAHUILA, MÉXICO. OCTUBRE DEL 2011

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA
"ANTONIO NARRO"**

**DIVISIÓN DE AGRONOMÍA
DEPARTAMENTO DE BOTÁNICA**

Un modelo dinámico de simulación para predecir el crecimiento y producción de forraje en cebada (*Hordeum vulgare*) en Galeana, Nuevo León, México.

Tesis presentada por:

JOSE LUIS VELAZQUEZ RODRIGUEZ

Que somete a consideración del H. Jurado examinador como requisito para

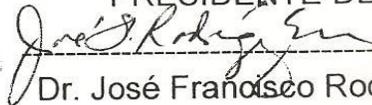
Obtener el título de:

INGENIERO EN AGROBIOLOGIA

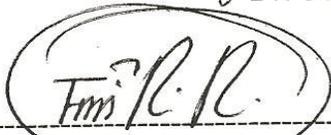
APROBADA

POR

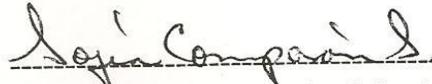
PRESIDENTE DEL JURADO



Dr. José Francisco Rodríguez Martínez
ASESOR PRINCIPAL



M.C. Fidel Maximiano Peña Ramos
ASESOR



M.C. Sofia Comparán Sánchez
ASESOR



Dra. Silvia Yudith Martínez Amador
ASESOR


Dr. Leobardo Bañuelos Herrera
Coordinador de la División de Agronomía

Saltillo, Coahuila, México. Octubre de 2011
Coordinación
División de Agronomía



AGRADECIMIENTOS

Al Soberano rey de reyes, creador del universo por importarle mi dolor si andaba en sombra oscura o de aflicción pudo darme consolación. Por prometerme que siempre ibas a estar con migo en todo momento te agradezco por cada uno de tus innumerables favores hechos en mi vida, pasado, presente y aun en el futuro estoy seguro que tus planes siempre serán para bien. Te busque de mañana y te encontré, gracias por no ocultar tu rostro a los que te buscan, has sido refugio de generación en generación.

Por haberme brindado todas las capacidades y las oportunidades para poder terminar esta carrera, tan valiosa para mí y mi familia, sobre todo por mi existencia y por todas las personas que permitiste que fueran apareciendo en el caminar de mi preparación profesional para apoyarme y enseñarme de aquello que carecía y era necesario aprender.

A mi Alma Mater por albergarme durante mi formación profesional y darme las Herramientas y conocimientos para hacer de mí una persona con criterio y visión de triunfo.

Al Dr. José Francisco Rodríguez Martínez, por su apoyo, amistad, dirección y asesoramiento en el transcurso de la realización de este trabajo.

A I MC. Fidel Peña Ramos, quién con sus sabios consejos, dirección y asesoramiento hicieron posible la realización de ésta tesis y sobre todo su amistad brindada.

Al MC. Sofía Comparan Sanchez, Por su apoyo, amistad y sus valiosas aportaciones en vías de superar el presente trabajo.

DT. Silvia Yudit, Por la revisión de este trabajo y por aceptar participar como miembro del jurado.

A todos y a cada una de las personas que de alguna manera pusieron su granito de arena en la realización del presente trabajo y durante mi formación.

DEDICATORIA

Principal mente A MIS PADRES: Sr. Joel Velázquez y Sra. Noemí Rodríguez, que me dieron la oportunidad de vivir y cimentaron las bases principales de mi educación haciéndome una persona íntegra para la sociedad. Gracias por brindarme todo su apoyo moral y económico cuando más lo he necesitado, sobre todo por sus enormes esfuerzos y sacrificios los cuales he valorado y he de valorar en toda mi existencia, por eso estoy muy orgulloso de poderle dedicar este trabajo. Sin su ayuda y comprensión no hubiese podido culminar unos de mis más anhelados sueños de ser profesional. Dios permite siempre sus esfuerzos y sacrificios.

A mi abuelo:

Plutarco Rodríguez

Gracias pa. Plutarco por ser el hombre más humilde que hubiese podido conocer en esta vida, te doy gracias porque sin ti yo no estuviera en este mundo.

A mis hermanas:

Onely y Yuri Liliana por su gran cariño y comprensión haciendo posible la culminación de mi carrera y sobre todo por ser como son, unas grandes amigas que me motivaron para culminar mi formación profesional. Así como también por

el gran amor que nos ha unido y que ha sido el pilar en la unión de nuestra familia. Gracias por el infinito apoyo moral existente.

A mis compañeros de la generación:

Fabián labrada, Héctor Fabián, Eslit, Neymar, Hilario, Toño, Manuel, Diana, Dalia, Lucy, Toñita, Rosibel. A todos ellos gracias por su valiosa amistad, pero sobre todo el apoyo que me brindaron en los momentos difíciles.

ÍNDICE DE CONTENIDO

	PAGINA
INDICE DE CUADROS.....	IX
INDICE DE FIGURAS.....	X
RESUMEN.....	XI
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. OBJETIVOS.....	3
1.1.1. Objetivo GENERAL.....	3
1.1.2. Objetivo ESPECIFICO.....	3
1.2. Hipótesis.....	3
2. REVISION DE LITERATURA.....	4
2.1. Los modelos y las simulaciones.....	4
2.1. Sistema.....	4
2.1.2.Modelo.....	6
2.1.3. Modelos de simulación.....	6
2.1.4. Simulación.....	7
2.1.5. Aplicación de los modelos de simulación.....	7
2.1.6. Simulación en cereales.....	9
2.1.7.Stella.....	11

2.2. Ambiente físico.....	12
2.2.1. Elementos del modelo biofísico de simulación.....	12
2.2.2. Radiación.....	13
2.2.3. Temperatura.....	15
2.2.4. La temperatura como parámetro de control en los modelos fenológicos.....	15
2.3. Crecimiento y rendimiento de cebada.....	16
2.3.1. Acumulación de materia seca.....	16
2.3.2. Origen citogenética de la cebada.....	19
2.3.3. Clasificación taxonómica de la cebada.....	19
2.3.4. Descripción botánica de la planta.....	20
2.3.5. Características de una especie forrajera de invierno.....	22
2.3.6. Calidad forrajera de la cebada.....	23
2.3.7. Rendimiento y calidad forrajera de la cebada en comparación con otros cultivos	24
3. MATERIALES Y MÉTODOS.....	28
3.1. Descripción del experimento.....	28
3.2. Variables de respuesta.....	28
3.3. Datos climáticos.....	29
3.4. Radiación acumulada (RA).....	29
3.5. Radiación fotosintéticamente activa (RFA).....	31
3.6. Descripción del modelo CEB-UAN.....	32

3.7. Submodulo clima.....	33
3.8. Submodulo crecimiento y desarrollo.....	35
3.8.1. Materia seca parcial aérea (MSA).....	35
3.8.2. Índice de área foliar (IAF).....	35
3.9. Submodulo manejo.....	36
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	37
4.1. Resultados del modelo CEB-UAN (STELLA 9.0.2).....	37
4.2. Materia seca parcial aérea (MSA).....	37
4.3. Índice de área foliar (IAF).....	40
5. CONCLUSIONES.....	44
6. LITERATURA CITADA.....	45

ÍNDICE DE CUADROS

	PÁGINA
Cuadro 3. Variables meteorológicas (Radiación y Temperatura) promedio mensual de los años 2007-2009 y promedios de largo plazo (13 años) registrada en la comunidad el Prado, Navidad y El Cuije, Galeana, Nuevo León, México.....	32
Cuadro 4. Prueba de t para materia seca parcial aérea, e índice de área foliar en cebada, Galeana, N.L.....	38

ÍNDICE DE FIGURAS

	PÁGINA
Figura 2. Fases teóricas para la construcción de un modelo de simulación (Grant <i>et al.</i> , 1997).....	5
Figura 3. Modelo de simulación para cebada en Galeana, Nuevo León. Submodulo clima (a) , Submodulo crecimiento y desarrollo (b) y Submodulo manejo (c) del modelo CEB-UAN.....	31
Figura 4.1. Datos observados y simulados por el modelo CEB-UAN, para materia seca parcial aérea en cultivo de cebada, en Galeana N.L	37
Figura 4.2. Presentación del índice de área foliar (IAF) para datos Simulado y observado en Cebada Narro-92-05 (15 de Noviembre 2008 al 20 de Abril de 2009) en Galeana, N.L.....	39
Figura 4.3 Materia seca parcial aérea (A), índice de área foliar (B), de la serie observada y simulada, y estimadores estadísticos de las series en el modelo CEB-UAN. Para cebada en Galeana N.L.....	41

RESUMEN

Los modelos de simulación 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. Los objetivos planteados en este trabajo fueron: desarrollar un modelo para estimar el crecimiento y producción de cebada variedad (Narro-95-02). Los trabajos experimentales se desarrollaron en el campo experimental de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, ubicados en el municipio de Galeana, Nuevo León, México. La siembra se realizó el 15 de Noviembre de 2008 en una superficie de 2500 m² y una densidad de siembra de 40 kg/ha. Se realizaron 11 muestreos cada 14 días durante el ciclo del cultivo. Las variables evaluadas fueron: Materia seca parcial aérea (MSP) e, Índice de área foliar (IAF). Para determinar la Materia seca parcial aérea (MSA). Se cortaron para el primer muestreo en un metro cuadrado un total de 380 plantas 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 separaron manualmente en tallos, hojas y espigas para pesar cada una de las muestras. Para tallo y hojas se hizo antes de la floración (70 días después de la siembra). Para determinar el Índice de área foliar (IAF), de las plantas muestreadas en el metro cuadrado, 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. Para simular las variables de estudio en cebada (narro-92-05) se utilizó el programa STELLA. Los resultados obtenidos en la simulación son cercanos a los observados en campo con coeficientes de determinación (R^2) entre los valores observados y simulados superiores a 0.9. La buena predicción del modelo para simular la materia seca

parcial aérea en cebada (narro-92-05) fue aceptable en cada muestreo durante el ciclo del cultivo debido a la buena relación de los valores observados y simulados. La predicción del modelo para esta variable fue bastante adecuada. La capacidad del modelo para simular el índice de área foliar para cebada (narro-92-05) fue aceptable en cada fecha de medición debido a lo similar de los valores encontrados al comparar el valor de índice de área foliar observado y simulado. Por lo tanto el modelo tiene buena capacidad de predicción.

Fue posible simular el crecimiento y la producción del cultivo de cebada bajo condiciones de riego, en Galeana, Nuevo León.

PALABRAS CLAVE: Simulación, modelo biofísico, cebada, STELLA, materia seca parcial aérea, índice de área foliar.

1. INTRODUCCIÓN

El cultivo de la cebada (*Hordeum vulgare*) es el más utilizado en la alimentación del ganado lechero y en la industria cervecera de los Estados Unidos y México. La ganadería del Norte de México depende principalmente de la producción de forraje de los agostaderos pero recibe apoyo de los forrajes producidos en condiciones de riego como la cebada en las épocas de escasez de forraje durante los años secos. El conocimiento de la producción futura de forraje, es de gran utilidad en la planeación de la actividad ganadera.

En los países en vías de desarrollo, urge incrementar la cantidad y calidad del forraje producido en forma sostenible. Los recursos para la investigación agropecuaria son muy escasos, y por lo tanto, existe un gran potencial para el uso de las tecnologías de modelos dinámicos de simulación por su menor costo y aplicabilidad (Carrillo, 2000). Este nuevo enfoque de la investigación, no sustituye totalmente la experimentación tradicional de campo, pero es menos costosa al reducir el número de experimentos y el tiempo de investigación.

Para este fin se han propuestos diversos modelos de simulación tales como: el modelo SESS (A Simple Ecological Sustainability Simulator) para agostaderos, el EPIC (Erosión Productivity Impact Calculator) para hidrología y erosión, y modelos mecanísticos (Willians, *et al.*, 1984; Johnson and Parsons, 1985; Díaz-Solís, *et al.*, 2006) para diversos procesos agropecuarios.

Conociendo la adaptabilidad de este cultivo y la importancia económica que tiene se construyó en el programa Stella 9.0.2 un modelo dinámico de simulación más flexible para estimar el índice de área foliar (IAF), y la materia seca parcial aérea (MSA) del cultivo. Estos modelos son fuente de apoyo en la toma de decisiones. La empresa agropecuaria las utiliza para optimizar sus costos de producción.

1.1.OBJETIVOS

1.1.1. OBJETIVO GENERAL

Construir un modelo para estimar el crecimiento y la producción de cebada a partir de información climática y datos experimentales

OBJETIVO ESPECÍFICO.

1. Desarrollar un modelo para estimar el crecimiento y la producción en el cultivo de cebada variedad (Narro-95-02)
2. Obtener una base de datos con información del cultivo cebada.

1.2 Hipótesis

La estimación del crecimiento y la producción de forraje en cebada a través de la simulación del índice de área foliar y materia seca parcial aérea del cultivo mediante el programa STELLA ver 9.0.2. Es adecuado para Galeana Nuevo León.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2. 1. Los modelos y las simulaciones.

2.1.1. Sistema.

Una de las metodologías que existen para relacionar crecimiento, desarrollo y producción de las especies con el medio en que se producen es la teoría de sistemas, cuya base conceptual consiste en distinguir los fenómenos como un todo indivisible y no tan solo como la suma de sus partes.

La aplicación de la teoría de sistemas en el campo de la biología se inicia en 1938 con Nicolás Rashevsky en la escuela de Biofísica-Matemática de la Universidad de Chicago, aún cuando se mencionan trabajos precursores como los de Lotka y Volterra desde 1925, y Bertalanffy en 1932 (Carlevaro, 1986).

Grant *et al.* (1997) definieron sistema como una serie organizada de interrelaciones entre componentes físicos caracterizada por un límite y unidad funcional o bien un ensamble complejo de procesos caracterizados por mucha reciprocidad causa-efecto.

Gran *et al.*(1997) mencionaron que para la elaboración de un modelo de simulación existen cuatro fases o etapas (Figura 2).

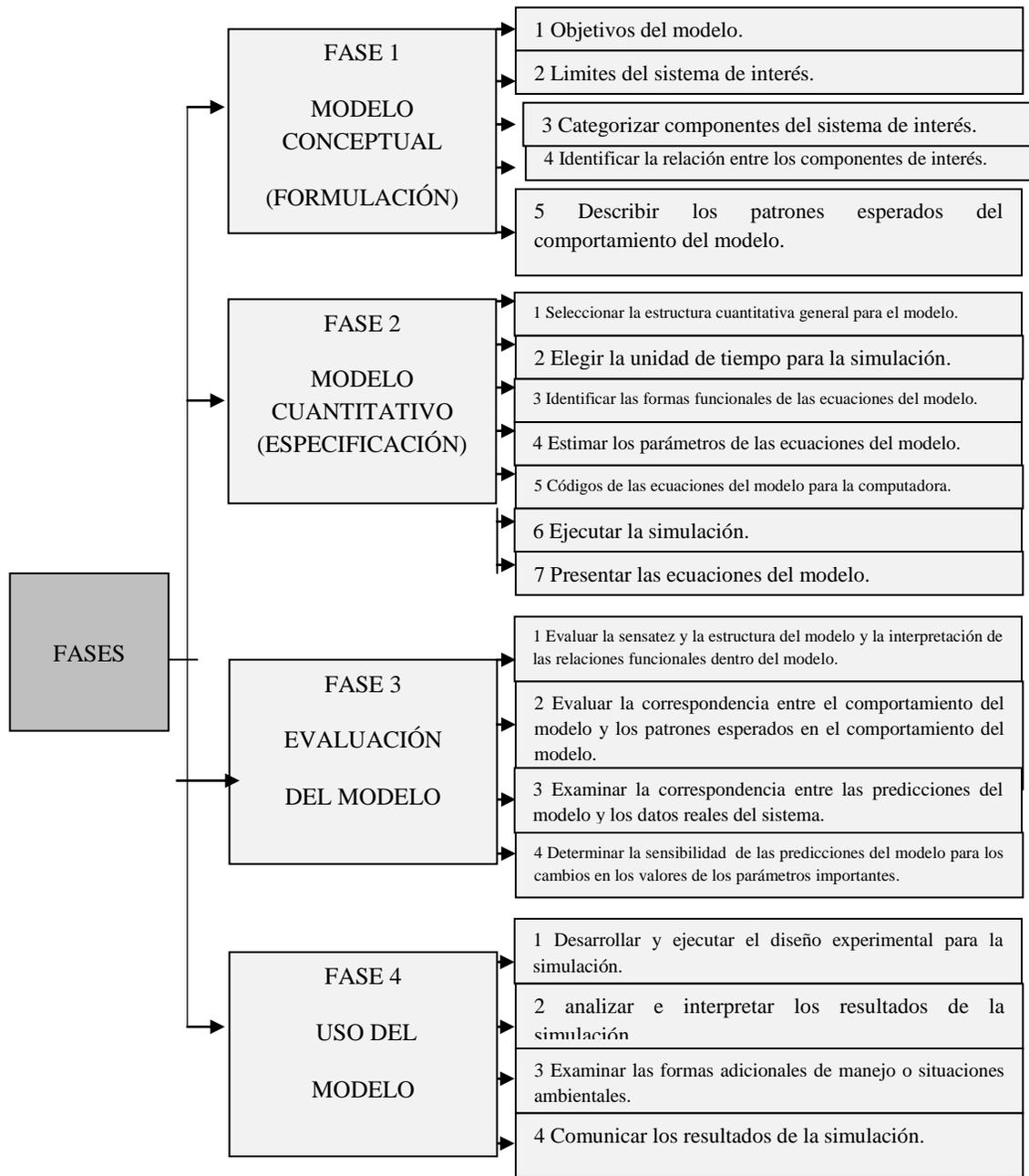


Figura 2. Fases teóricas para la construcción de un modelo de simulación (Grant *et al.*, 1997).

2.1.2. Modelo.

Un modelo es una abstracción de la realidad donde se describen los elementos esenciales de un problema (Grant *et al.*, 1997). Un modelo puede ser un modelo físico, una concepción mental, un modelo matemático, un modelo de computadora, o una combinación de todos (Roberts *et al.*, 1994).

Thornley (1984), y 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. Al proceso de imitación de un fenómeno se le denomina modelo.

2.1.3. Modelos de simulación.

Los modelos de simulación son una herramienta de la actualidad que permiten hacer la representación de un sistema real en base a variables que interaccionan en éste. Los modelos representan una conexión de las ideas con la realidad, ayudan a entender como están organizadas las cosas y cómo funcionan dentro de un sistema (Odum y Odum, 2000). Estos modelos son compuestos de una serie de operaciones lógicas y aritméticas que representan la estructura (estado) y comportamiento (cambio de estado) del sistema de interés (Grant *et al.*, 1997).

Los modelos de simulación integran el conocimiento de diferentes disciplinas y dan a los investigadores la capacidad de dirigir experimentos por computadora y reducir el número de experimentos tradicionales (Jones *et al.*, 2001).

2.1.4. Simulación.

Es el proceso de usar un modelo para replicar o imitar paso por paso el comportamiento del sistema que estemos estudiando (Grant *et al.*, 1997). La simulación viene después de construir el diagrama o esquema del modelo; la simulación se muestra como un resultado del diseño y asignación de valores numéricos a cada una de las partes del sistema (Odum y Odum, 2000).

2.1.5. Aplicación de los modelos de simulación.

Los modelos de simulación son una herramienta que utiliza información obtenida a través de experiencias anteriores y permite proyectar los resultados físicos y económicos teniendo en cuenta todos los factores que interactúan en un determinado ambiente (Forján, 2002).

Originalmente los modelos de crecimiento de cultivos, fueron usados como herramienta en las investigaciones científicas, resumiendo la compleja interacción de los diferentes procesos fisiológicos con las condiciones ambientales. Posteriormente, también se convirtieron en una herramienta para el

monitoreo sustentable de sistemas agrícolas y para crear un uso racional de la tierra (Verdoodt *et al.*, 2004).

El uso de modelos de simulación permite en forma práctica y flexible analizar las actividades agropecuarias encontradas en una cuenca o región. De la misma manera, facilita el análisis del antes y después de nuevas estrategias tecnológicas para determinar su viabilidad tanto biológica como económica y permitir determinar las condiciones necesarias para promover su difusión y fomento en determinada región (Holman, 2000).

Los modelos de simulación de crecimiento y rendimiento de las plantas, han cobrado importancia a partir del momento en que surgió la computadora como un instrumento, con el que se logra realizar y controlar a gran velocidad cálculos y procesos complicados que requieren una toma de decisión rápida. 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).

Ping *et al.*, (2004) desarrollaron un modelo llamado GEENLAB el cual fue diseñado para hacer representaciones dinámicas de la morfogénesis y arquitectura de las plantas, utilizando ecuaciones matemáticas y reglas de decisión, obtenidas de parámetros por descriptores botánicos y morfológicos

medidos de plantas muestra durante el curso de su desarrollo. El modelo pudo simular el crecimiento de un árbol integrando características arquitectónicas y morfológicas de la planta.

2.1.6. Simulación en cereales

Rodríguez *et al.* (1990) utilizaron el modelo WGS CERES-trigo para simular el crecimiento de este cultivo bajo pastoreo de ganado bovino. WGS CERES, utiliza la interacción climática, hidrológica y biofísica, y simula el crecimiento de hojas y tallos así como senescencia de hojas, acumulación de biomasa y su partición. La relación que obtuvieron para los valores observados con los simulados para el crecimiento del forraje fue una r^2 de 0.63, para la ganancia de peso una r^2 de 0.79 y para la producción de grano una r^2 de 0.74.

Travasso y Magrin (1998) calibraron y validaron CERES-cebada para 5 genotipos utilizando diferentes fechas de siembra bajo condiciones óptimas de crecimiento en variadas condiciones ambientales de Argentina. Obtuvieron una raíz cuadrada del cuadrado medio del error (RMSE) de 5.6 días al estimar la fecha de floración y una RMSE de 397 kg ha⁻¹ para estimar el rendimiento de grano en fechas de siembra normales.

Ghaffari *et al.* (2001) utilizaron el modelo CERES-trigo para analizar las estrategias de manejo y buscar las mejores prácticas agronómicas en Kent, UK y

encontraron un rendimiento de grano en datos observados de 6,900 a 7,400 kg ha⁻¹, y los datos simulados fueron de 6,900 a 7,800 kg ha⁻¹. La RMSE obtenida fue de 240 kg ha⁻¹. Reportan que CERES-trigo calibrado y validado puede ser usado para la predicción del crecimiento y rendimiento del trigo bajo condiciones adecuadas para el oeste de Inglaterra.

Moreno-Sotomayor y Weiss (2004) en Lincoln Nebraska, utilizaron CERES-trigo para hacer mejoras en la simulación y obtuvieron una RMSE de 2608 granos m⁻² para número de granos, una RMSE de 2.78 mg para peso de grano y una RMSE de 811 kg/ha⁻¹ para rendimiento de grano.

Saseendran *et al.* (2004) reportaron la exactitud al simular la materia seca y rendimiento de grano del trigo utilizando dos modelos: el CERES-trigo y el RZWQM, calibrados con tratamientos de dosis de nitrógeno en el oeste de Colorado, USA. Obtuvieron una RMSE de 500 kg ha⁻¹ para materia seca y 363 kg ha⁻¹ para rendimiento de grano con CERES-trigo y una RMSE de 1247 kg ha⁻¹ para materia seca y 1441 kg ha⁻¹, para rendimiento de grano con el modelo RZWQM.

En Punjab, India fue calibrado DSSAT-CSM-CERES para la producción y programación del riego en el cultivo de trigo, donde concluyen que este modelo es eficiente para tomar decisiones y una óptima programación del manejo del riego así como para predecir el crecimiento y desarrollo del trigo (Timsina *et al.*, 2008).

Langensiepen *et al.* (2008) probaron el CERES-trigo para estimar el rendimiento de grano y la biomasa a la cosecha con datos de campo de 9 años en el norte de Alemania y encontraron una RMSE de 2200 kg ha⁻¹ para rendimiento de grano y una RMSE de 3200 kg ha⁻¹ para biomasa a la cosecha y mencionaron que estos errores son muy grandes por lo cual CERES-trigo necesita ser mejorado considerablemente.

2.1.7. STELLA

STELLA 9.0.2 fue creado en la empresa High Performance Systems, Inc., Hanover New Hampshire, con el objetivo de simular procesos 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 de un sistema, los símbolos se conectan y se emplean ecuaciones matemáticas para relacionar los componentes del modelo (Martin y Tilley, 2000). Esto permite crear modelos

versátiles en cuanto a su posible modificación y adaptación a sistemas y condiciones específicas.

Li *et al.* (2006) construyeron un modelo de simulación con STELLA para predecir los requerimientos de nitrógeno en papa, su rendimiento del tubérculo, consumo de nitrógeno, partición de nitrógeno en raíz, hoja, tallo y tubérculo y las pérdidas de nitrógeno en la planta. En la validación obtuvieron una R^2 de 0.91 en la estimación de consumo de nitrógeno y rendimiento de tubérculos que fueron correlacionados con las entradas de nitrógeno.

2.2. Ambiente físico.

2.2.1 Elementos del modelo biofísico de simulación

De acuerdo con García (1986), el clima es el conjunto de fenómenos meteorológicos que caracterizan el estado medio de la atmósfera en un punto de la superficie terrestre.

Estos fenómenos meteorológicos o elementos del clima que son observados regularmente por el hombre y que constituyen las principales propiedades físicas de la atmósfera son:

radiación, duración de la radiación y brillo del sol, precipitación, temperatura y humedad del aire, temperatura y humedad del suelo, presión atmosférica,

dirección y velocidad del viento, nubosidad, evaporación, y evapotranspiración (Wallén, 1974; García, 1986).

Si se considera a la radiación como la principal fuente de energía, al agua y al viento como fluidos de la atmósfera que permiten la circulación y aprovechamiento de esta energía, se puede resumir en la radiación solar, la temperatura del aire, y en la precipitación, a las variables climáticas más importantes dentro del sistema de producción agrícola cuya observación diaria, son los datos de climas más usuales en los modelos biofísicos de simulación (Jonhson, 2007; Dugas y Ainsworth, 1986).

2.2.2. Radiación

Hay y Hanson (1985), manifestaron que la radiación solar presenta fluctuaciones a través del tiempo y el espacio. La causa principal de estas variaciones es el cambio en cantidad, tipo y distribución de la nubosidad. La energía solar que se disipa debido a la presencia de gases (oxígeno, bióxido de carbono, ozono), y vapor de agua, conforma la radiación difusa.

La radiación de onda corta que llega a la superficie terrestre consiste tanto de la radiación solar directa como de la radiación solar difusa. La suma de ambas se

denomina como radiación global (R_g). De ésta el 50 % se define como radiación fotosintéticamente activa (RFA), con longitud de onda entre los 0.4 y 0.7 μ ; y se considera una proporción constante en distintas condiciones atmosférica y elevaciones solares (Thornley y France, 2008).

Richardson y Wright (1981;1984), estimaron la radiación diaria a partir de generar datos diarios de precipitación utilizando un modelo exponencial de las cadenas de Markov. Parten de considerar a la precipitación como variable primaria y a la radiación como un proceso estocástico multivariado continuo, cuyos valores promedios diarios y las desviaciones están condicionadas al estado húmedo o seco del día.

Best (1962; citado por Chang 1977), clasificó los efectos de la radiación sobre las plantas en procesos foto-energéticos (fotosíntesis), y procesos fotosensibles que pueden ser de movimientos (tropismo) o formativos (expansión foliar, elongación del tallo). Ross (1975), menciona que más del 70 % de la radiación que absorben las plantas se convierte en calor y es utilizada como energía en la transpiración y en el intercambio convectivo de calor.

2.2.3. Temperatura

La temperatura de un cuerpo es la magnitud de la agitación de sus moléculas; es una medida de su intensidad de calor.

Muchos procesos biológicos como la fotosíntesis, respiración, translocación, 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.

2.2.4. La temperatura como parámetro de control en los modelos fenológicos

La primera publicación del uso de la temperatura del aire como indicador del crecimiento de las especies vegetales aparece en 1735 escrita por Réaumur, quien asumió que la cantidad de calor requerida por una planta para alcanzar su estado de madurez, es una constante térmica expresada por la suma de la temperatura media diaria (citado por Neil y Seeley, 1977).

Cada fase del desarrollo requiere un mínimo de acumulación de temperatura para llegar a su término y que la planta pueda pasar a la fase siguiente a esta cantidad de calor que requiere una especie se le denomina unidades calor (UC) ó unidades térmicas, traducción al español del término Growth Degree Days (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).

Algunos ejemplos sobre el uso de las unidades calor en la predicción del crecimiento y desarrollo del maíz y forrajes en general, y como parámetro de control en modelos de simulación se encuentran en Arkin *et al.* (1976), Daughtry *et al.* (1984), y Diaz *et al.* (2006).

2.3. Crecimiento y rendimiento de cebada.

2.3.1. Acumulación de materia seca

La estructura superior del dosel determina la penetración de la luz siguiendo la ley de Bouguer-Lambert, en donde se establece que la intensidad luminosa

decrece exponencialmente a medida que el índice de área foliar se incrementa (Monteith, 1976; Thornley y France, 2008).

Es así que las hojas participan como filtros que muestran una marcada absorción de la radiación solar hasta las 0.7 μ , por lo tanto las características ópticas del dosel dependen del área foliar, la orientación de las hojas, el ángulo de inclinación del sol y de la reflectancia del suelo (Spitters *et al.* 1986; Jonhson, 2007).

Arkin *et al.* (1978), desarrollaron un modelo para el cálculo de la radiación interceptada basado en el área foliar del dosel y la distancia entre plantas. El área foliar expuesta depende de la altura del sol, el azimut y la arquitectura de la planta. Para calcular la intensidad luminosa en la base del dosel utilizan la ley de Beer o Bouger-Lambert:

$$I = I_0 e^{-K(IAF)}$$

Dónde:

I = Intensidad luminosa en la base del dosel

I₀ = Intensidad luminosa inmediatamente arriba del dosel

K = Coeficiente de extinción que determina la cantidad de luz atenuada por las plantas

IAF = Índice de área foliar

e = Base de los logaritmos naturales

Posteriormente, Stapper y Arkin (1980), Thornley y France (2008), estimaron la radiación fotosintéticamente activa interceptada para cultivos como maíz y forrajes mediante la ecuación:

$$RFAI = 0.5 \cdot Rg(1 - e^{-K(IAF)})$$

Dónde:

Rg = Radiación global

Las especies cultivadas presentan diferentes valores del coeficiente de extinción (K); para maíz y forrajes K se encuentra comúnmente entre 0.35 a 0.98. El valor de K declina con el tiempo cuando el IAF es mayor que uno; a medida que los valores de K disminuyen la producción de materia seca es mayor.

Loomis y Williams (1962), mencionaron que la producción máxima depende principalmente de la intercepción de la luz y de la asimilación de CO₂ por el cultivo, ya que del 90 al 95 % de la materia seca total está formada por compuestos de carbono derivados de la fotosíntesis.

2.3.2. Origen citogenético de cebada

El género *Hordeum* comprende cerca de 25 especies donde se encuentran tanto diploides como tetraploides. A diferencia del trigo y de la avena, las cebadas cultivadas son especies diploides.

Especies cultivadas. *H. vulgare*, *H. Distichum*, *H. irregulare*,

Especies silvestres. *H. spontaneum*, *H. agriocrithum*, *H. nodosum*.

2.3.3. Clasificación taxonómica

La Planta de la cebada se ubica taxonómicamente de la siguiente manera

Reino-----Plantae

División -----Tracheophyta

Subdivisión-----Pterosidae

Clase-----Angiospermae

Subclase-----Monocotiledonea

Grupo-----Glumiflora

Orden -----Graminales

Familia -----Gramineae

Genero-----Hordeum

Especie-----Vulgare.

2.3.4. Descripción botánica de la planta.

Robles (1990), estableció que la cebada tiene un habito de crecimiento anual, con tendencia a convertirse en perenne bajo condiciones muy especiales. Existen variedades de primavera e invierno. Las primeras tienen un ciclo corto de 80 a 90 días, se siembran a fines de invierno o a principios de primavera, usadas principalmente para la producción de grano. Las variedades de invierno poseen un ciclo hasta de 160 días, utilizadas principalmente para la producción de forraje.

RAÍZ: el sistema radical de la cebada es fasciculado, fibroso y alcanza poca profundidad en comparación con otros cereales.

TALLO: los tallos son cilíndricos, huecos y gruesos, formados por ocho entrenudos los cuales son ligeramente más anchos en la parte central que en los extremos junto a los nudos; estos son gruesos. La altura de los tallos depende de la variedad y oscila desde 0.50 a 1.00 m.

HOJAS: las hojas de la planta de cebada son mas largas y de un color mas claro que las de trigo , siendo en general lisas y rara vez pubescentes; su ancho varia entre 5 y 15mm . Los cultivares primaverales se caracterizan por presentar hojas lisas; los invernales, por su parte, presentan hojas rizadas y mas angostas. Las hojas están compuestas por una vaina, una lamina, dos aurículas y una lígula. La vaina de cada hoja envuelve la sección del tallo ubicada sobre un nudo a partir del cual se origina; en la unión de la vaina con la lámina se observa en par de aurículas largas y abrasadoras, la lígula es lisa, corta y dentada.

FLOR: la flor de la cebada se denomina perfecta por que tiene el elemento reproductivo masculino, los estambres (donde están las anteras con polen), y el elemento reproductivo femenino, el pistilo (con ovarios y estigmas) en la mismas estructura. La polinización ocurre en la estructura que envuelve la flor y, aunque las anteras salen debido al calor del ambiente, el polen fecunda a los óvulos de la misma flor.

ESPIGA: la espiga es cilíndrica, terminal. Mide de 7.5 a 19 cm. de longitud, con barbas o sin ellas. Está conformada por estructuras llamadas espiguillas, cada una integrada por el grano y dos glumas con barbas de longitud variable, lisas o aserradas, las cuales son alternas y están adheridas en forma de zig-zag al eje llamado raquis.

Hay variedades de cebada con espigas de seis y dos hileras. En la cebada de dos hileras hay una espiguilla fértil y dos florecillas estériles en cada nudo del

raquis. La espiga de seis hileras posee de 25 a 60 gramos, mientras que las de dos hileras tienen de 15 a 20.

GRANO: el grano de cebada está compuesto por la cascarilla, la raquilla y el fruto. El fruto está formado por el pericarpio y la semilla: el pericarpio es la envoltura de la semilla, la cual está formada por una capa de aleurona (integrada por enzimas y proteínas) y el embrión (una planta en potencia que se desarrolla al germinar). La cascarilla adherida al pericarpio, es lisa y de tamaño variable. La palea cubre al lado y tiene un pliegue que abre en forma de V en una proporción a partir de su base. La raquilla es una pequeña estructura, parecida a un tallo con pelos, que está adherida a la base en el exterior del grano por el lado ventral.

2.3.5. Características de una especie forrajera de invierno

Echeverri (1958) menciona que las características más importantes de una especie forrajera de invierno son:

- Resistencia al frío para sobrevivir a heladas.
- Resistencia a las enfermedades para que no se reduzca la producción y la calidad del forraje
- Tolerancia a sequía y a las inundaciones
- Capacidad para soportar periodos ocasionales de pastoreo

- Calidad nutricional del forraje
- Adaptabilidad para labores de cosecha

Por su parte Hughes *et al.* (1974) mencionaron otras características importantes de las especies forrajeras de invierno:

- Alto rendimiento forrajero
- Alto valor nutritivo (rico en proteínas, vitaminas e hidratos de carbono).
- Buena gustocidad
- Precocidad al Corte
- Resistencia a plagas y enfermedades
- Resistencia a factores ambientales adversos
- Resistencia al acame

2.3.6. Calidad forrajera de la cebada

Mc Carthney y Vaage (1994) en un estudio comparativo en cuanto a rendimiento o producción forrajera y valor nutritivo en la alimentación de vacas con silo de cebada, avena y triticale, reportaron que la cebada presenta superioridad en cuanto al consumo por el ganado debido a su alta palatabilidad; la avena se comportó de forma intermedia entre las tres especies por lo que basados en el comportamiento de las vaquillas, concluyen que el silo de cebada fue el de

mayor preferencia de los tres. El triticale produjo el silo menos aceptable al parecer debido a baja palatabilidad y el bajo consumo de materia seca.

Oltjem y Bolsen (1980) trabajaron, alimentando novillos con silo de trigo, avena, cebada y maíz; basándose en sus resultados, concluyen que trigo y avena exhibieron un pobre comportamiento en cuanto a consumo por el ganado y ganancia de peso del mismo, mientras que en silo de cebada por su aceptación fue comparable al de maíz. Resultados similares, también en la alimentación de novillos fueron reportados por Goonewardene *et al.* (1994) quienes utilizaron triticale y cebada; además los autores mencionan que con cebada fue mayor el promedio de ganancia diaria de peso y que la adaptación de los animales a la dieta fue también más rápida con cebada que con triticale.

2.3.7. Rendimiento y calidad forrajera de la cebada en comparación con otros cultivos.

En ambos años la proporción de IVDMD Y TND no difirió entre tipos de forraje pero fue mayor en cebada que en avena. Los autores mencionan que la información obtenida sugiere que las cebadas forrajeras no son superiores a las de grano en producción de forraje. Sin embargo la cebada forrajera es de calidad superior y puede producir tanto y mas forraje que la avena en las planicies del norte.

Nikkhah *et al.* (1995) encontraron que la composición química y las características de digestibilidad del silo de cereales fueron similares a las de calidad media de la alfalfa. La mayoría de los cereales son adecuados para ensilar, pero el rendimiento y la calidad del ensilado dependerá de las especies, variedades, prácticas agronómicas y las condiciones ambientales durante el desarrollo del cultivo. Entre los cereales de grano pequeño, la cebada produce silo de mejor calidad que avena o triticale en términos de características de calidad alimenticias (Charney y Marten 1982 y Khirasoni *et al.*, 1997) y consumo y tasa de ganancia en novillos (Mc Cartney y Vaage., 1994).

La etapa de madurez a la cosecha tiene el mayor efecto sobre el rendimiento de biomasa y la calidad de los cereales (Cherney y Marten, 1982; Bergen *et al.*, 1991). El rendimiento se incrementa y la calidad puede mantenerse o mejorar cuando ocurre el desarrollo del grano (Khorasani *et al.*, 1997; González, 2007).

Bergen *et al.* (1991) citan que la etapa óptima de cosecha para ensilaje en cebada y avena es grano masoso suave; mientras que para triticale y centeno debe ser el rango entre embuche y el estado lechoso inicial (Fearon *et al.*, 1990).

Juskiw *et al.* (2002) con el propósito de determinar los efectos de densidad de siembra, especies y fecha de cosecha sobre el rendimiento y calidad del forraje de cereales , condujeron tres estudios de campo para evaluar la productividad

de cebada, avena, triticale y centeno establecidos como monocultivos y en diferentes mezclas; entre otras cosas, incluyeron que los cuatro cereales tuvieron excelente rendimiento y calidad aunque los niveles de proteína fueron generalmente bajos (6.15 a 10.1 %) y que se encontraron diferencias entre variedades.

La gran mayoría de las proteínas contenidas en los forrajes son específicas de la especie, y por ende, su valor biológico es distinto en cada uno de los forrajes. Su composición química está formada por un complejo de sustancias denominadas "aminoácidos, siempre útiles para la nutrición animal. Una carencia o deficiencia de proteínas en la alimentación puede provocar en el organismo del animal perturbación de mayor o menor gravedad. Una alimentación excesivamente rica en proteína tiene efectos contradictorios; frena el desarrollo y crecimiento del animal y el de hembras lactantes provoca el descenso en la secreción láctea (Baudilio, 1974).

La cebada destinada para forraje debe segarse cuando las hojas y tallos aun están verdes, pues de lo contrario el heno resulta poco apetecible. En las regiones semiáridas puede obtenerse un buen heno de cebada cortándolo un poco mas tarde que en las regiones húmedas (Gil, 1968).

En evaluación de calidad forrajera, Bergen *et al.* (1991), reporta que en cebadas, avena, trigo y triticale, no hubo diferencia en contenido de proteína entre especies. Encontrándose un promedio de 35 por ciento en las primeras etapas

de desarrollo y un 7 por ciento a la mitad del espigamiento. Tampoco encontró diferencias entre especies para lignina.

En cenizas la cebada presento junto con triticales y trigo un nivel significativamente más alto, con un promedio de 15 por ciento en las seis etapas fonológicas.

Malm *et al.* (1973), estudiaron triticales, cebada, avena y centeno en 5 fechas de siembra, reportando que la producción de forraje fue diferente entre las especies y entre las fechas, aunque la avena produjo bien, fue superada por la cebada.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Descripción del experimento

En la comunidad El Prado municipio de Galeana, N.L. se estableció el experimento con el cereal de invierno Cebada (Narro-95-02); la siembra se realizó el 15 de Noviembre de 2008 en una superficie de 2500 m² y una densidad de siembra de 40 kg/ha. Se realizaron 11 muestreos cada 14 días durante el ciclo del cultivo.

3.2. Variables de respuesta

Emergencia. Para este material se contó el número de plantas emergidas en un metro cuadrado. Esto se realizó en la segunda semana después de la siembra.

Materia seca parcial aérea (MSA). Se cortaron para el primer muestreo en un metro cuadrado un total de 380 plantas, 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 separaron manualmente en tallos, hojas y espigas para pesar cada una de las muestras. Para tallo y hojas se hizo antes de la floración 70 días después de la siembra; para espiga después de la floración a la cosecha. Esto se hizo desde la segunda semana hasta la madurez, este proceso

se realizó cada 14 días durante el ciclo del cultivo (15/11/2008-17/04/2009). Para estimar el rendimiento por hectárea se usó el peso de dicha plantas, extrapolado en base a los muestreos de densidad de población realizados al principio y al final del cultivo.

Fenología. En este muestreo se registró cada catorce días altura, número de hijuelos así como números de hojas verdes y secas en cinco plantas. Estas plantas fueron seleccionadas al azar.

Índice de área foliar (IAF). De las plantas muestreadas en el metro cuadrado, 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.

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, y de la estación climática del Cuije perteneciente a la Fundación Produce Nuevo León.

Los datos que se utilizaron fueron:

Temperatura mínima, máxima y radiación solar. Página web <http://funprol.org.mx/clima/estaciones/histoticos.php> (accesada el 14 de agosto de 2009).

Se calcularon grados días de desarrollo (GDD) según las formulas propuestas por Raiput (1980) y Bradley (1994).

Grados día de desarrollo:

$$GDD = \sum_{i=1}^n (T_i - T_{base})$$
$$T_i = \frac{T_{max} - T_{min}}{2}$$

Donde:

T_i = *Temperatura media en el dia*

T_{max} = *Temperatura maxima en el dia*

T_{min} = *Temperatura minima en el dia*

T_{base} = *Temperatura base (8 °C)*

3.4. Radiación acumulada (RA)

Los datos de radiación solar en la estación climática se registraron cada media hora en watts/m² pero para la construcción de los modelos se requerían en

unidades de MJ/m²/día para hacer esta conversión se siguió la propuesta de Rojas (2008) y Rodríguez (2008) como sigue:

Por definición, un Watts es igual a un J seg⁻¹ y un MJ es igual a un millón de Joules. Como los registros se hicieron cada 30 minutos se tuvieron 48 valores de radiación en W m⁻² durante el día. Entonces se obtuvo el promedio en W m⁻² seg⁻¹. El valor acumulado en el día fue el promedio multiplicado por 86,400 segundos que tiene un día y se obtiene el resultado de J m⁻² día⁻¹ que dividido entre 1,000,000 es igual a MJ m⁻² día⁻¹.

3.5. Radiación fotosintéticamente activa (RFA)

La radiación fotosintéticamente activa fue estimada por la ecuación propuesta por Stapper y Arkin (1980), la cual es como sigue:

$$RFA = 0.5 \cdot Rg(1 - e^{-K(IAF)})$$

Dónde:

Rg = Radiación global

K = Coeficiente de extinción que determina la cantidad de luz atenuada por las plantas

IAF = Índice de área foliar

e = Base de los logaritmos naturales

Los parámetros descritos de la ecuación RFA fueron tomados del Modelo Parch formulado por Bradley *et al.* (1994).

Para estimar los GDD se utilizó una temperatura base de 0 °C. Los coeficientes de extinción (k), y la eficiencia en el uso de la radiación (EUR) fueron tomadas de Jones *et al.*, (1998). Estos coeficientes son usados en el modelo construido con STELLA.

3.6. Descripción del modelo CEB-UAN

Se construyó un modelo dinámico de simulación para cebada denominado CEB-UAN. Para la construcción se utilizó el software STELLA ver 9.0.2 con cálculos diarios.

El modelo, mediante una serie de ecuaciones lineales considera el efecto del tiempo térmico o GDD (grados días- crecimiento) y el efecto de la radiación solar. El modelo de simulación está constituido por tres Submódulos que son: Submódulo clima (SC), Submodulo de crecimiento y desarrollo (SCD) y Submódulo de manejo (SM) los cuales son mostrados en la Figura 3.

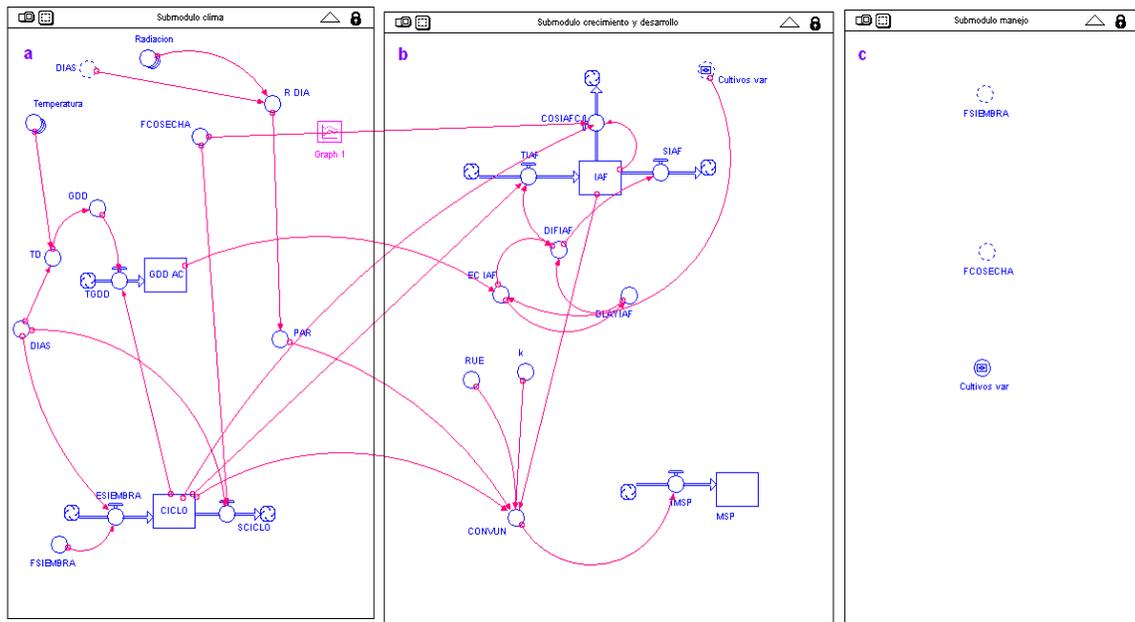


Figura 3. Modelo de simulación para cebada en Galeana, Nuevo León. Submodulo clima (a) , Submodulo crecimiento y desarrollo (b) y Submodulo manejo (c) del modelo CEB-UAN

3.7. Submodulo clima

La base del SC es un generador de temperaturas medias diarias (TD) denominado Temperatura y un generador de radiación media diaria (RDIA) denominado Radiación, estos generadores se desarrollaron con una distribución Normal bajo los supuestos de la teoría de limite central con las temperaturas y radiaciones medias y desviaciones estándar obtenidas de datos de temperatura y radiación durante 13 años del lugar de estudio (Cuadro 3. y Figura 3) y la variable PAR se estimó con la metodología de Bradley y Crut (1994). Esta metodología establece que PAR es el resultado del producto de $RDIA \cdot 0.5$.

Cuadro 3. Variables meteorológicas (Radiación y Temperatura) promedio mensual de los años 2007-2009 y promedios de largo plazo (13 años) registrada en la comunidad el Prado, Navidad y El Cuije, Galeana, Nuevo León, México.

Mes	Radiación media mensual MJ m⁻² día⁻¹		Temperatura media mensual °C	
	2007-2009 Media ± DE		13 años Media ± DE	
Enero	14.242	4.635	8.457	3.208
Febrero	18.313	4.603	9.660	3.966
Marzo	22.133	4.177	13.559	3.527
Abril	24.002	4.480	15.433	3.085
Mayo	23.106	5.345	18.054	2.363
Junio	23.093	5.327	19.075	2.210
Julio	22.060	5.726	18.448	2.387
Agosto	20.214	4.698	18.303	2.035
Septiembre	18.978	4.426	17.434	2.595
Octubre	18.667	2.855	14.840	3.113
Noviembre	14.653	3.598	11.427	3.223
Diciembre	14.123	4.582	9.572	3.390

Para calcular los grados días desarrollo (TGDD) se utilizó el método residual, el cual establece que a la TDIA, se le resta la temperatura base (0 °C) (Temperatura en la cual se llevan a cabo funciones fisiológicas). Con la variable TGDD se estimo GDD AC mediante la ecuación siguiente,

$$GDD\ AC\ (t+1) = GDD\ AC\ (t) + (TGDD) * \Delta t, (1)$$

Donde TGDD representa la tasa de GDD diarios (°C), es decir donde GDD=TD-TB si TD es mayor que TB, entonces TD es menor o igual a TB, entonces GDD=0 TD representa la temperatura media diaria en °C, la cual puede

representarse mediante una distribución normal para un día dado del año basándose en 13 años.

3.8. Submodulo crecimiento y desarrollo

En este submódulo se integraron variables tales como; Materia seca parcial aérea (MSA, kg/ha), Índice de área foliar (IAF).

3.8.1. Materia seca parcial aérea (MSA)

$$\text{MSA (t+1)} = \text{MSA (t)} + (\text{TMSA}) * \Delta t, \quad (2)$$

Donde TMSA es la tasa de MSA diaria en $\text{g dia}^{-1} \text{m}^{-2}$.

$$\text{TMSA} = \text{RUE} * \text{PAR} * (1 - \exp(-k * \text{IAF})) \quad (3)$$

Donde RUE es eficiencia en el uso de la radiación (expresa la biomasa producida por MJ de radiación interceptada por el dosel del cultivo), RFA es la radiación fotosintéticamente activa (en este trabajo se considero que las hojas absorben 0.5 PAR, RUE=2.0). para analizar los valores simulados y los observados se iso una comparacion con la programa de t de student para las variables materia seca parcial aérea, índice de área foliar.

3.8.2. Índice de area foliar (IAF)

Estimamos la variable IAF al relacionar la variable independiente GDD AC con la variable dependiente IAF(datos experimentales). Esto se obtuvo para el

cultivo. El modelo de mejor ajuste fue de distribución normal (ecuación 4). La ecuación utilizada fue la que mostro el mejor ajuste al relacionar las dos variables.

$$IAF_{\text{cebada}} = 2.41 * \text{EXP}(-((1327.73 - \text{GDD AC})^2) / (2 * 413.07^2)); \quad R^2 = 0.92 \quad (4)$$

3.9. Submódulo manejo

Este submódulo está compuesto por tres variables auxiliares que son variedad, fecha de siembra y fecha de cosecha; estas variables se pueden cambiar dentro de un rango razonable para el cultivo, según el interés de simulación. Es decir, el modelo tiene la capacidad de simular diferentes fechas de siembra, así como programar fechas de cosecha.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1.1 Resultados del modelo CEB-UAN (STELLA 9.0.2)

Los resultados obtenidos de la presente investigación se presentan a través de las variables que se utilizaron para la simulación estas fueron: Materia seca parcial aérea (MSA), Índice de área foliar (IAF).

4.1.2. Materia seca parcial aérea (MSA)

La simulación con el modelo CEB-UAN presentó buena capacidad de predicción de acumulación de materia seca parcial aérea durante el ciclo del cultivo como se observa en la figura 4; en ésta aparece la correlación de los valores simulados con los observados.

Con la ecuación 2 la simulación por el modelo CEB-UAN presenta altos valores de MSA en las fechas 9 de Febrero al 20 de marzo.

La variable MSA se simuló de manera aceptable y se observa en la Figura 4.A. Una tendencia similar entre datos simulados y observados. Aunque los datos predichos por el modelo CEB-UAN presentan un fuerte grado de asociación con los datos observados, la predicción es baja en algunos periodos del ciclo del cultivo. Cabe mencionar que las comparaciones de los indicadores estadísticos encontrados y parámetros usados en CEB-UAN. Se juzgo con una prueba de t (cuadro 4) para muestras independientes. Donde se obtuvo una buena relación con el modelo CEB-UAN los resultados de ambos fueron $p=0.87$, $R^2=0.98$

(Figura 4.A). Los valores simulados, en CEB-UAN. Fueron muy semejantes a los observados con coeficientes de determinación.

Los resultados de la simulación para el modelo, CEB-UAN en la variable materia seca parcial aérea mostraron que los valores simulados fueron muy similares a los observados (figura 4) presentando buena capacidad de predicción. El cultivo en la fecha 01/12/2009 (46 días julianos después de la siembra) alcanzo una producción de 1700 k/ha de materia seca parcial aérea, se puede observar que el crecimiento simulado tiene buena relación con el observado. De la fecha 01/29/2009-03/16/2009 (109 días julianos) el cultivo alcanza el máximo rendimiento para simulado y observado 10,200 k/ha. En la fecha 03/23/2009-04/20/2009 el cultivo mantiene la misma producción 10,200 k/ha esto se debe a que la planta a alcanzado el máximo crecimiento y se prepara para finalizar su ciclo. En esta etapa la producción se incrementa y la calidad mejora debido al crecimiento del grano. Otro factor en esta etapa es la temperatura ya que 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. Los resultados de MSA simulados y observados se aproximan a los obtenidos por Chávez y Gómez (1999). También Rodríguez (2008) al utilizar el modelo AN-CER con tres cultivares: cebada, trigo

y triticale encontró en cebada una buena capacidad de predicción de acumulación de materia seca parcial aérea durante el ciclo del cultivo con un rendimiento de 1,600 kg ha.

Peña (2011) al trabajar con datos de cereales de invierno con 3 cultivos Cebada (Narro-92-05), Triticale (AN-31-B) y Trigo (AN-239) obtenidos mediante la calibración de los modelos integrados con el programa DSSAT encontró que los coeficientes presentaron un buen nivel de ajuste entre los valores observados y simulados. También encontró que los incrementos de MSA en el cultivo de cebada comenzaron desde la germinación a la cosecha; presenta un rápido crecimiento desde el inicio del ciclo y finaliza su velocidad de crecimiento aproximadamente a los 98 días después de la siembra con un rendimiento aproximado de 10,000 kg/ha.

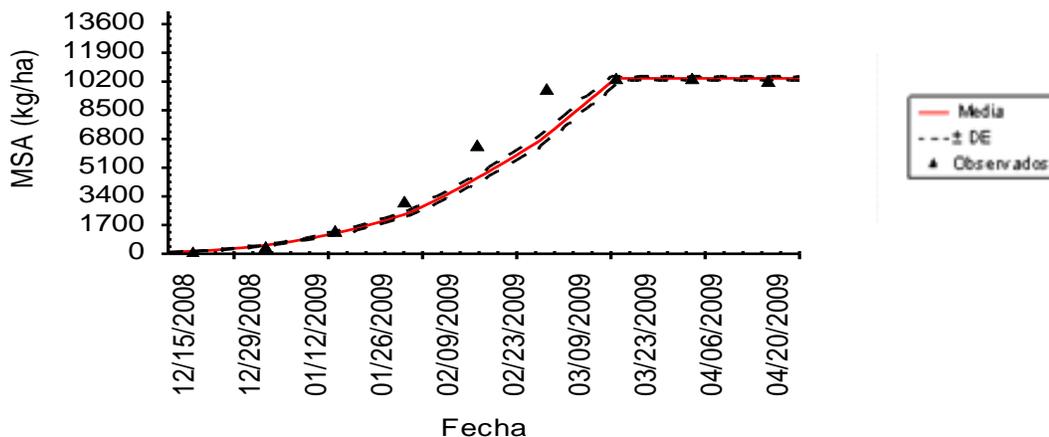


Figura 4. Datos observados y simulados por el modelo CEB-UAN, para materia seca parcial aérea en cultivo de cebada, en Galeana N.L

Cuadro 4. Prueba de t para materia seca parcial aérea, e índice de área foliar en cebada, Galeana, N.L.

Variables			t	P
	Simulado	Observado		
MSA (kg/ha)	5555.556	5877.778	0.16	0.87*
IAF	1.221	1.242	0.05	0.95*

p=nivel de significancia; 0.050.

*N.S

4.1.2. Índice de área foliar (IAF)

Utilizando la ecuación 4 de la simulación se encontraron altos valores de índice de área foliar en las fechas 9 de Febrero y 23 de Marzo de 2009 (temperatura media alta). El cultivo alcanzó un 3.32 de IAF (Figura 4.2). Rodríguez (2008) reporta un IAF máximo de 1.5 en ciclo primaveral. Una explicación a esta diferencia sería; Los cereales sembrados en épocas primaverales tienden a reducir su número de hijuelos, aumentan su lamina foliar mientras que los de inviernos tienden a un amacollamiento (incrementan el número de hijuelos) y reducen lamina foliar mientras invernan (bajas temperaturas).

Los indicadores estadísticos fueron aceptables. En la variedad Cebada (Narro-92-05) se obtuvo un R^2 de 0.99, (figura 4.B). También se analizó con una prueba de t para muestras independientes (cuadro 4). Estos indicadores fueron encontrados al relacionar datos simulados por el modelo CEB-UAN y

observados en campo. El IAF máximo observado de la variedad Narro-92-05 fue de 2.37 en la fecha 02/20/2009 (100 días julianos después de la siembra) y el simulado fue de 2.327 en la fecha 03/09/2009.

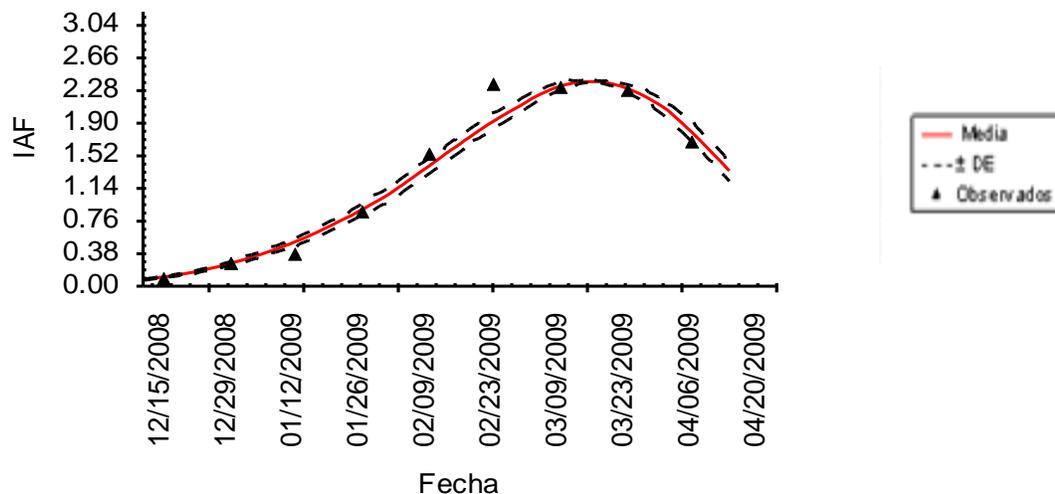


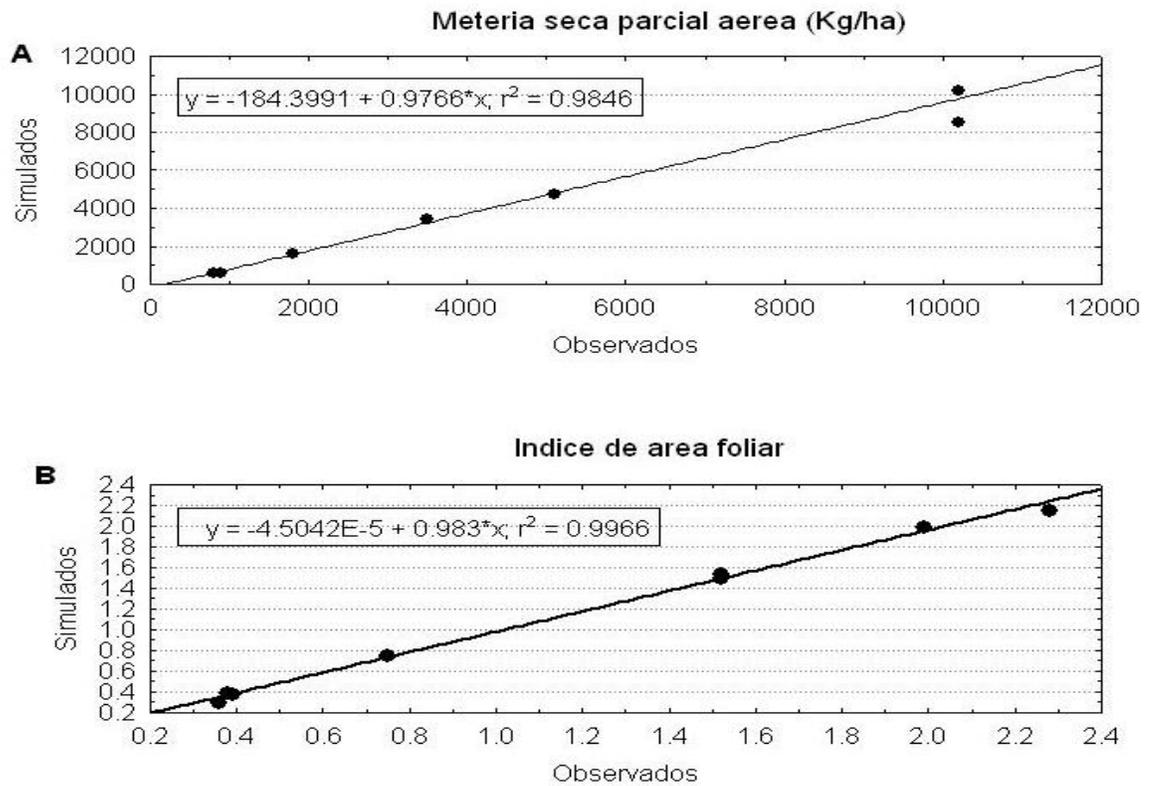
Figura 4.2. Presentación del índice de área foliar (IAF) para datos simulado y observado en Cebada Narro-92-05 (15 de Noviembre 2008 al 20 de Abril de 2009) en Galeana, N.L.

Los resultados de la simulación para el modelo CEB-UAN en la variable índice de área foliar mostraron que los valores simulados fueron muy similares a los observados en las diferentes etapas del cultivo (figura 4.2). El modelo tubo buena capacidad de predicción en observado y simulado; en la fecha 01/12/2009 (42 días después de la siembra) se puede observar que el crecimiento del cultivo empieza a acelerarse y hay una buena predicción en datos observados y

simulados con un índice de área foliar de 0.38. De la fecha 01/26/2009-03/09/2009 (112 días después de la siembra) el cultivo presenta un crecimiento acelerado y buena predicción en observado y simulado; en esta etapa se presenta el índice de área foliar máximo con un 2.37. Esto difiere de lo encontrado por Pacheco *et al.* (2007) que al trabajar con cebada (NARRO-92-05) en el campo experimental en la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. En ciclo primaveral reportó un IAF máximo de 1.51. La diferencia entre estos dos resultados es que los cereales sembrados en épocas primaverales tienden a reducir su número de hijuelos, aumentan su lamina foliar.

Ginés (2010), al trabajar con cebada (NARRO-92-05) de la fecha de siembra del 15 de noviembre del 2008 (día juliano 319) a la fecha 19 de febrero del 2009 encontró un índice de área foliar de 1. El IAF simulado concuerda con los obtenidos en campo. Se encontró que los valores generados por el modelo y los observados, estuvieron bien relacionados con el análisis estadístico de t de student (cuadro 4) ($P=0.95$, $R^2=0.99$).

Figura 4. Materia seca parcial aérea (A), índice de área foliar (B), de la serie observada y simulada, y estimadores estadísticos de las series en el modelo CEB-UAN. Para cebada en Galeana N.L.



5. CONCLUSIONES

- La buena predicción del modelo para simular la materia seca parcial aérea en cebada (narro-92-05) fue aceptable en cada muestreo durante el ciclo del cultivo debido a la buena relación de los valores observados y simulados en materia seca parcial aérea. La predicción del modelo para esta variable es bastante adecuada.
- La capacidad del modelo para simular el índice de área foliar para cebada (narro-92-05) fue un tanto aceptable en cada fecha de medición debido a lo similar de los valores encontrados al comparar el valor de índice de área foliar observado y simulado. Por lo tanto el modelo tiene buena capacidad de predicción.
- Para materia seca parcial aérea en el modelo se obtuvo una producción de 10,200 kg/ha con un coeficiente de determinación de 0.93. Con buena predicción para el crecimiento en observado y simulado.
- En el índice de área foliar para el crecimiento se obtuvo buena predicción en todo el ciclo del cultivo con un resultado de 2.37 de índice de área foliar con un coeficiente de determinación de 0.96. De esta forma es factible predecir el crecimiento y la producción de cebada con las condiciones adecuadas.
- Fue posible simular el crecimiento y la producción del cultivo de cebada bajo condiciones de riego, en Galeana Nuevo León.

6. LITERATURA CITADA

- Allard, R.W. and A. D. Bradshaw. 1964. Implications of genotype- environmental interaction en applied plant breeding. *Crop. Sci.* (4): 503-507.
- Arkin, G. F., J.T. Ritchie, and S.J. Maas 1978.A model for calculating light interception by a grain sorghum canopy. *Transactions of ASAE* 21:303-308.
- Arkin, G.F., J.T. Vanderlip, and J.T. Ritchie.1976.A dynamic grain sorghum model.*Transactions of ASAE* 19: 622-626, 630.
- Baudilio, J., 1974. Forrajes, fertilizantes y valor nutritivo. Editorial AEDOS, Barcelona, España.
- Bergen, W.G., T.M .Byrem, y A.L. Grant.1991.Ensiling characteristic of whole-crop small grains harvestd at milk and dough atages.*J.Anim. Sci.* 69:1766-1774.
- Bradley, R.G. and Crout, N.M.J. 1994. The parch model for predicting arable resource capture in hostile environments. University of Nottingham 139 p.
- Bucio A. L. 1966. Environmental and genotype environmental components of variability I. Inbreed Lines. *Heredity* (21):387-397.
- Carrillo S., J.A. 2000. An examination of the prediction of yield from two potato models.PhD. Thesis.University of Nottingham.
- Chang, Jen-Hu. 1977. Climate and agriculture. An ecological survey.Aldine Publishing Co. Chicago.pp 4-97.

- Charney, J.H. and Marten, G. C. 1982. Small grain crop forage potential: II interrelationships among biological, chemical, morphological and anatomical determinants of quality. *CropSci.* 22: 240- 245.
- Chávez D., J.A. 1999. Guía para producir cebada y avena bajo riego en la costa de Ensenada. INIFAP. MEXICO. pp 1-9.
- Colin, R.M., A.J. Lozano, G, Martínez, V .M. Zamora, J.T. Santana y Méndez. 2004. producción de materia seca de líneas de cebada forrajera imberbe en cuatro ambientes y correlaciones entre algunos componentes del rendimiento de forraje. Resultados de investigación 2003. UAAAN.Buenavista, saltillo, Coahuila, México.
- 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.
- Daughtry, C.S.T., J.C. Cochran, and S.E. Hollinger. 1984. Estimating silking and maturity dates of corn for large areas. *Agron. J.* 76(3): 415-417.
- Diaz-Solis,H., Kothmann, M.M., Grant, W.E., De Luna Villareal R. 2006. Use of irrigated pastures in semi-arid : A dynamic model for stocking rate decisions. *Agric. Sys.*88, 316–381.
- Dugas, W.A. and C.G. Ainsworth. 1985. Effect of potential evapotranspiration estimates on crop model simulations. *Trans. of ASAE* 28:471-475.
- Echeverri, S.A.1958. Anotaciones para un programa de mejoramiento de pastoreo y forrajes. *Agricultura Tropical.* 14:181- 190.

- Fearon, A.L., A. Felix, y V.T. Sapró. 1990. Chemical composition and in Vitro dry matter and organic matter digestibility of triticale forage. *CropSci* . 164:262-270.
- Forján, H. 2002. Modelos de simulación de crecimiento y desarrollo de los cultivos. *AgroBarrow Digital* No. 27. INTA. Buenos Aires, Argentina.
- García de Miranda, E. 1986. Apuntes de climatología. UNAM. México. pp 7-101.
- Ghaffari A., H. F. Cook y H. C. Lee. 2001. Simulating winter wheat yields under temperate conditions: exploring different management scenarios. *European Journal of Agronomy*. 15:231-240.
- Gil, E. J. 1968. Prueba de rendimiento de forraje de la variedad de cebada Goliat, tratadas con rallo x. tesis licenciatura. Buenavista, Saltillo, Coahuila, México
- Ginés, F, A. 2010. Modelos de simulación del crecimiento de cebada forrajera (*Hordeum vulgare*) en el sur de Nuevo León México. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buena Vista Saltillo, Coah. México.
- Goonewardene, L.A., Zobel, D. R. and Basarab, J.A. 1994. Comparison of growth and feed efficiency of steers fed barley and triticale diets . *Can . J. Anim. Sci.* (74): 159-161.
- Grant, W. E., E. K. Pedersen, y S. L. Marín. 1997. Basic concepts of systems analysis and simulation. (Ed.) *Ecology and natural resource management*

- systems analysis and simulation. John Wiley & Sons Inc. New York, U.S.A.
p. 16-28.
- Hay, J.E. and J. Hanson. 1985. Evaluating the solar resource: A review of problems resulting from temporal, spatial and angular variations. *Solar energy* 34(2): 151-161.
- Holman, F. 2000. El uso de modelos de simulación como herramienta para la toma de decisiones en la promoción de nuevas alternativas forrajeras. Presentado en la XVI reunión latinoamericana de producción animal (ALPA), Marzo 28-31. Montevideo, Uruguay.
- Hughes, H.D., M. E. Heath y D.S. Metcalfe. 1974. Forrajes, Ed. CECSA, México p. 343-373.
- Johnson, I.R and A.J Parsons. (1985) A theoretical analysis of grass growth under grazing. *J. Theor. Biol.* 112:345-367.
- Jones, J. W., B. A. Keating, y C. H. Porter. 2001. Approaches to modular model development. *Agricultural Systems.* 70:421-443.
- Jones, M.B., Lazenby, A. (Eds.) *The grass crop: The physiological basis of production.* London: Chapman & Hall, pp. 25-83.
- Johnson (2007) DairyMod Documentation. 4. Pasture Growth. Available at: www.lmj.com.au/docs/ (Accesado el 02 de enero de 2010).
- Juskiw, P.E., J.H. Helm, y D.F. Salmon. 2000. Forage yield and quality for monocrops and mixtures of small grain cereals. *Crop Sci.* 40:138-147.

- Khorasani, G.R., P.E. Bedel, J.H. Helm, y J.J.Kennelly. 1997 .Influence of stage of maturation on yield components and chemical composition of cereal grain .con. J. Anim. Sci. 77:259-267.
- Langensiepen M., H. Hanus, P. Schoop y W. Grasle. 2008. Validating CERES-wheat under North-German environmental conditions. Agricultural Systems. 97:34-47.
- Li H., L. E. Parent y A. Karam. 2006. Simulation modeling of soil and plant nitrogen use in a potato cropping system in the humid and cool environment. Agriculture, Ecosystems&Environment. 115:248-260.
- Loomis, R.S. and W.A. Williams. 1962. Maximum crop productivity: An estimate. Crop Science 2:67-72.
- Malm, R.N., J.S. Arledje and C. E. Barnes.1973.Forage production from winter small grain en south Western new Mexico. USA.Agri.Exp. ST. Bull.607.
- Martin, J. F. y D. R. Tiller. 2000. Simulating with Stella. En: Odum T. H and E. C. Odum, 2000. (Eds). Modelling for all scales.Academic Press. San Diego, California. USA. p. 133-149.
- McCartney, D.H. and Vaage, A .S. 1994.Comparative yield and feeding value of barley, oat and triticales silage.Can .J.Anim. Sci.74:91-96.
- Milloslavitch, M. J. 1991. Rendimiento de forraje verde y heno entres especies de cereales: Trigo (*Triticumaestivum*), centeno (*Secalecereale*), avena

(Avena sativa) en seis fechas de siembra en Apodaca N.L. TESIS licenciatura . ITESM.

Monteith, J. L. 1976. Principles of environmental physics. Edward Arnol. G.B. pp 23-38.

Moreno-Sotomayor A. y A. Weiss. 2004. Improvements in the simulation of kernel number and grain yield in CERES-Wheat. Field Crop Research. 88: 157-169.

Neild, R.E. and M.W. Seeley. 1977. Growing degree days predictions for corn and sorghum development and some applications to crop production in Nebraska. Institute of Agricultural and Natural Resources University of Nebraska-Lincoln. Research Bulletin 280.

Nikkhah, A., G.R. Khorasani, R. Corbett, y J.J. Kenelly. 1995. In situ DM degradation characteristics of whole crop barley silage. Can.J. Anim. Sci. 75:648-646.

Odum, T. H y E. C. Odum. 2000. Modelling for all scales. Academic Press. San Diego, California. USA. p. 3-4.

Oltejen, J.W. and Bolsen, K.K. 1980. Wheat, Barley, Oat and corn silages for growing steers. J. Anim. Sci. (51):958-965.

Orcaberro, R., y Briceño. H., V.M. 1983. Valor nutritivo y rendimiento de la avena forrajera (Avena sativa L) ópalo en distintos estados de desarrollo. Revista Chapingo Num. 42:85.

- Pacheco R. J. E., Marino M.A. y Abbate P.E. 2007 Producción forrajera de cebada de alto rendimiento vs. raigrás anual en Balcarce. Presentado en el 30° Congreso Argentino de Producción Animal. Octubre 03-07 en Santiago del Estero, Argentina.
- Peña R.M., 2011. 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.
- Ping Y. H., K. M. Zhen, P. Reffye y M. Dingkuhn. 2004. A Dynamic, Architectural Plant Model Simulating Resource-dependent Growth. *Annals of Botany*. 93:591-602.
- Richardson, C.W. and D.A. Wright. 1981. Stochastic simulation of daily precipitation, temperature and solar radiation. *Water Res. Research* 17(1):182-190.
- 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, Oregon, USA. p. 3.
- Robles, S.R. 1990. Producción de granos y forrajes . 5 Edición . Limusa. México. Pág. 267- 284.
- Rodríguez A., N. T. James, L. W. Odell, J. B. Daniel. 1990. A Wheat grazing systems model for de US southern plains: Part I-Model description and performance. *The Agricultural Systems*. 33:41-59.

- Rodríguez, A, M. 2008. Modelos de simulación para cereales forrajeros en el sur de Nuevo León México. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista, Sotillo, Coah. México.
- Rojas, M, C. 2008. 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 de Maestría. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista, Sotillo, Coah. México.
- Ross, J. 1975. Radiativetransfert in plant communities. In: Monteith, J.L. (ed.). Vegetation and the atmosphere.V.1. Academic Press.pp 13-52.
- Saseendran S. A., D. C. Nielsen, L. Ma, L. R. Ahuja y A. D. Halvorson. 2004. Modeling Nitrogen Management Effects on Winter Wheat Production Using RZWQM and CERES-Wheat. Agron. J. 96:615-630.
- Spitters, C.J.T. 1986 b. Separating the diffuse and direct component of global radiation and its implications for modeling canopy photosynthesis. Part II. Calculation of canopy photosynthesis. Agric. For. Meteorol. 38:231-242.
- Stapper, M., and G. F. Arkin. 1980. CORN. A dynamic growth and development model for maize (*Zea mays* L.). Program and Model Documentation no. 80-2.Texas Agric. Exp. Station. USA.
- 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.

- Téllez, O. O. S. 1999. Validación del modelo EPIC, para simular el índice de área foliar, acumulación de materia seca nitrogenada y rendimiento de grano en el cultivo de maíz (*Zea mays*L.) bajo diferentes condiciones de humedad en el suelo. Tesis De Maestría. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila, México.
- Thornley JHM and France J (2008). *Mathematical Models in Agriculture*. CABI, Oxford
- Timsina J., D. Godwin, E. Humphreys, S. Yadvinder, S. Bijay, S.S. Kukal and D. Smith. 2008. Evaluation of options for increasing yield and water productivity of wheat in Punjab, India using the DSSAT-CSM-CERES-Wheat model. *Agricultural Water Management*. 95:1099-1110
- Travasso M. I. y G. O. Magrin. 1998. Utility of CERES-Barley under Argentine conditions. *Field Crops Research*. 57:329-333
- Verdoodt, A., R. E Van. yL.Ye. 2004. Daily simulation of potential dry matter production of annual field crops in tropical environments. *Agron. J.* 96:1739–1753.
- Wallen, C.C. 1974. A Brief survey of meteorology as related to the biosphere. W.M.O.Special Environmental Report No. 454 pp.

