

**UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA
“ANTONIO NARRO”
DIVISIÓN DE CIENCIA ANIMAL**



**“CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO DE SIMULACIÓN PARA EL
CULTIVO DE LA ALFALFA (*Medicago sativa* L.) EN NAVIDAD,
GALEANA, NUEVO LEÓN, MÉXICO”**

Por:

ABDIEL SOTO PÉREZ

TESIS

Presentada como Requisito Parcial para Obtener el Título de:

INGENIERO AGRÓNOMO ZOOTECNISTA

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México

Diciembre del 2010

UNIVERSIDAD AUTONOMA AGRARIA "ANTONIO NARRO"
DIVISION DE CIENCIA ANIMAL
DEPARTAMENTO DE RECURSOS NATURALES RENOVABLES

"CONSTRUCCIÓN DE UN MODELO DE SIMULACIÓN PARA EL
CULTIVO DE LA ALFALFA (*Medicago sativa* L.) EN NAVIDAD,
GALEANA, NUEVO LEÓN, MÉXICO"

Por:

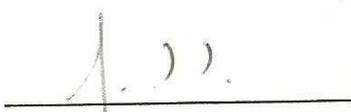
ABDIEL SOTO PÉREZ

TESIS

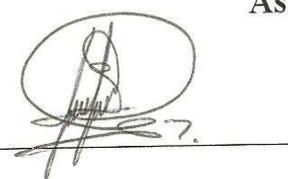
Que somete a consideración del H. jurado examinador como requisito
parcial para el obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO ZOOTECNISTA

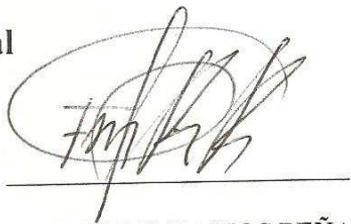
Aprobada por:


DR. HERIBERTO DÍAZ SOLÍS

Asesor principal


MC. CAMERINO ROJAS MONTES

Sinodal


ING. FIDEL RAMOS PEÑA

Sinodal


MC. LORENZO SUAREZ GARCÍA

Coordinador de la División de Ciencia Animal

Buenavista, Saltillo, Coahuila, México, Diciembre del 2010.

DEDICATORIA

A mis padres:

Sr. PANFILO SOTO GOMEZ.

Sra. FLOREVITA PÉREZ VELAZQUEZ.

Con amor y cariño escribo estas líneas, dándole las gracias por darme la vida y por sus sabios consejos, a ustedes que forjaron un carácter y sembraron en mí la semilla de la prosperidad y que ahora está dando frutos.

A mi madre, gracias, porque me has enseñado a ser un luchador incansable de mis metas y sueños en la vida, por darme mucha paciencia y por estar siempre conmigo y guiarme siempre por el buen camino.

A mi padre, gracias, por tu enorme esfuerzo y sacrificio, por darme siempre lo mejor. Y más que un padre has sido un amigo conmigo, siempre me has dicho que hay que seguir adelante ante cualquier adversidad, con tu actitud me enseñaste que solo es pobre aquel que carece de conocimientos.

Gracias por que me dieron la oportunidad de superarme, sin ustedes no estaría aquí cumpliendo mis sueños, ustedes son mi más grande ejemplo a seguir y es a ustedes a quien quiero premiar con mi esfuerzo.

Para mí no existe un mejor regalo de Dios que poder tenerlos aún en vida y brindarme esa alegría de decirles gracias papi, gracias mami por todo el apoyo moral y económico que me han brindado, estoy eternamente agradecido, los quiero mucho y que Dios los siga bendiciendo hoy y siempre.

A mis hermanos:

Alex, Wili y Eliser, gracias porque con su apoyo moral y económico, aun estando lejos de ustedes, me dieron una razón más para culminar mis estudios y así premiar el esfuerzo que hicieron en mí.

Greysi, Yuni y Ricky, gracias por haber cuidado a papá y mamá durante mis estudios, a ti chaparro que ves en mí un ejemplo a seguir y a ti flaca es para mí un orgullo ser tu hermano.

Los quiero mucho, gracias por compartir tantas alegrías, tristezas y grandes momentos en mi vida.

A mis sobrinos:

Alexis, Jacqueline. Mis pequeñitos, sé que aún no saben leer, pero espero que algún día esté le sirva para que hagan realidad sus sueños.

A mis abuelos.

Gracias por haberme hecho un hombre de campo.

A toda mi demás familia:

Que de alguna manera me apoyaron y haber creído en mí.

A la familia Saucedo Tobías:

Por brindarme ese calor de hogar, estando tan lejos y ver por mi bienestar, por hacerme sentir como un integrante más de su hermosa familia, gracias por su grandioso cariño y afecto Sra. Diana Tobías Muñoz.

AGRADECIMIENTO

Antes que todos, quiero darle gracias a **mi Dios y señor Jesucristo**, ya que con su infinita bondad y misericordia estoy escribiendo tantas cosas en estos momentos, gracias por darme la vida y la fuerza para vivirla, y como no estar agradecido si me ha permitido alcanzar una de mis metas.

A mi **“alma mater”**, por haberme cobijado y brindarme todo lo necesario para mi formación profesional. Con gran cariño siempre la recordare y pondré en alto el nombre de la universidad.

Al comité de asesoría:

Al Dr. Heriberto Díaz Solís, por su confianza y amistad sincera y al haber dedicado su tiempo al transmitirme sus conocimientos dentro del salón de clases y al asesorarme en la realización de mi tesis.

Al MC. Camerino Rojas Montes, por su gran apoyo y haber dedicado tiempo en la revisión, corrección, consejos y aportaciones de este escrito.

Al Ing. Fidel Ramos Peña, con sus conocimientos y dedicación supo inculcar en mí la confianza para realizar y culminar el trabajo de investigación en el campo y mi tesis.

A MIS MAESTROS del departamento de producción animal, por brindarme sus experiencias y conocimientos, que fueron la base de mi formación en esta institución.

A mis amigos. Carmen, Vicky, Diego, Luis y Alfredo, por brindarme su amistad y haber colaborado en los muestreos.

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

A MIS MEJORES AMIG@S. Tere Bautista, Ana Belly, Naye, Viry, Kary, Carmen, Bere Hugo Mondragon, Luis Alonso, Julio Cesar, Toño, Constancio Corzo, Fausto, Aparicio, Norberto tipa, Jesús Santiago, Adrián Ramos, Rafa, Rubén, Tino, Jorge, que fueron como una segunda familia que estuvieron ahí, gracias por su apoyo y por compartir tantos momentos juntos dentro y fuera de la universidad, con gran cariño y admiración les deseo lo mejor. Y aquellos que no menciono pero que saben que valoro su amistad.

A MIS COMPAÑEROS DE LA GENERACION CX. Con quienes conviví y compartí momentos muy agradables durante mi estancia en la universidad, espero algún día podamos volver a estar juntos.

JEHOVÁ ES MI PASTOR

Jehová es mi pastor nada me faltará, en lugares delicados pastos me hará descansar; junto a agua me pastoreará. Confortará mi alma, me guiará por sendas de justicia por amor a su nombre, aunque ande en valle de sombra de muerte, no temeré mal alguno, porque tú estarás conmigo, tu vara y tu callado me infundirán aliento. Aderezas mesa delante de mí en presencia de mis angustiadores. Unges mi cabeza con aceite, mi copa está rebosando. Ciertamente el bien y la misericordia me seguirán todos los días de mi vida, y en la casa de Jehová moraré por largos días.

Salmos 23.

CONTENIDO

	Pág.
ÍNDICE DE CUADROS	viii
ÍNDICE DE FIGURA	ix
I. INTRODUCCION	1
II. REVISION DE LITERATURA	4
2.1. Modelos de simulación.....	4
2.2. Fases y etapas para desarrollar un modelo de simulación.....	5
2.2.1. Fase I. Desarrollo del modelo conceptual.....	5
2.2.2. Fase II. Especificación cuantitativa del modelo.....	5
2.2.3. Fase III. Evaluación del modelo.....	6
2.2.4. Fase IV. Uso del modelo.....	7
2.3. Funcionamiento y aplicación de los modelos.....	7
2.4. Descripción del programa Stella 8.0.....	8
2.4.1. Stella, el entorno de trabajo.....	10
2.5. Sistema PEAQ (Prediction Equations for Alfalfa Quality).....	11
2.5.1. ¿Cómo calcular PEAQ ?.....	11
III. MATERIALES Y METODOS	14
3.1. Descripción del experimento	14
3.2. Variables estudiadas	15
3.2.1. Datos climáticos.	16
3.2.2. Índice agroclimáticos.....	16
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	18
4.1. Descripción del modelo de simulación.....	18
4.1.1. Submodelo de clima.....	18
4.1.2. Submodelo de crecimiento y desarrollo del cultivo.....	20
4.2. Resultados del modelo.....	23
4.2.1. Materia seca parcial (MSP).....	23
4.2.2. Número de hojas (NH).....	25
4.2.3. Altura (ALT).....	26

4.2.4. Índice de Área Foliar (IAF).....	28
4.2.5. Calidad nutritiva de la alfalfa.....	29
4.2.5.1. Proteína Cruda (PC).....	29
4.2.5.2. Fibra Detergente Ácido (FDA).....	31
4.2.5.3. Fibra Detergente Neutro (FDN).....	33
4.3. FDA y FDN observado, simulado en Stella y del sistema PEAQ...	34
V. CONCLUSIONES	36
VI. LITERATURA CITADA	37

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro	Título	Pág.
2.1	Escala de madurez de la planta.....	12
3.1	Secuencia de cortes en el cultivo de la alfalfa Cuf-101, en Navidad, Galeana, Nuevo León, México.....	15
4.1	Temperatura promedio mensual de 13 años, registradas en el campo experimental de Navidad, Galeana, Nuevo León, México.....	19
4.2	Coefficientes de correlación entre las variables dependientes e independientes.....	20
4.3	Fibra detergente ácido y fibra detergente neutra del cultivo de alfalfa para valores observados (Obs), simulados con el modelo en STELLA (Modelo) y estimados por el sistema PEAQ en diferentes tiempos de rebrote.....	35
4.4	Valores estadísticos comparados de FDA Y FDN, de los observados, simulados en el modelo y del sistema PEAQ.....	35

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Título	Pág.
2.1	Elementos básicos en Stella.....	9
3.1	Distribución de los cortes programados y sus repeticiones de la alfalfa Cuf-101, en Navidad, Galeana, Nuevo León, México.....	14
4.1	Submodelo de clima.....	19
4.2	Submodelo de crecimiento y desarrollo del cultivo.....	20
4.3	Materia seca parcial simulada y observada en alfalfa Cuf-101 en Galeana, Nuevo León, México.....	24
4.4	Número de hojas simulado y observado en alfalfa Cuf-101, en Galeana, Nuevo León, México.....	26
4.5	Altura simulada y observada en alfalfa Cuf-101, en Galeana, Nuevo León, México.....	27
4.6	Índice de área foliar simulada y observada en alfalfa Cuf-101, en Galeana, Nuevo León, México.....	29
4.7	Proteína cruda simulada y observada en alfalfa Cuf-101 en Galeana, Nuevo León, México.....	31
4.8	Fibra detergente ácido simulada y observada en alfalfa Cuf-101 en Navidad, Galeana, Nuevo León, México.....	32
4.9	Fibra detergente neutro simulada y observada en alfalfa Cuf-101, en Galeana, Nuevo León, México.....	34

I. INTRODUCCIÓN

En el centro y norte de México la alfalfa (*Medicago sativa L.*) es un cultivo muy importante en la actividad ganadera, ya que este cultivo es utilizado como forraje en la producción de leche en estabulación. Destinándose también para la alimentación del ganado porcino, ovino y en la elaboración de concentrados alimenticios para aves, ganado de engorda y las demás especies. Se estima que se cultivan alrededor de 3, 000,000 hectáreas de alfalfa bajo condiciones de riego en todo el país (Callejas, 2007).

La alfalfa produce un forraje de alta calidad que puede ser pastoreado, ensilado, henificado o suministrado en verde. El corte en verde de la alfalfa es la forma comercial de aprovechamiento más extendida en los valles centrales de Oaxaca; en ella es obligado que la programación de los cortes sea con base a su velocidad de crecimiento, la cual varía con la estación del año; por ello, el conocimiento de los cambios estacionales en el rendimiento acumulado de esta especie, permite determinar la frecuencia de defoliación para obtener la mayor producción de forraje de alta calidad (Hodgson, 1990 citado por Villegas *et al.*, 2004).

Sin embargo, los costos de investigación para aumentar la capacidad de producción y valor nutritivo de este cultivo son relativamente altos, debido a los múltiples factores que intervienen en estos procesos.

En los países en vía de desarrollo, existe la necesidad de aumentar la producción de todos los cultivos en forma sustentable. Sin embargo, en estos países es donde se dispone de menos recursos para desarrollar investigación agropecuaria. Los modelos de simulación son herramientas de investigación que pueden reducir los costos de la investigación agropecuaria en relación a la investigación experimental tradicional (Rojas, 2008)

Los modelos de simulación de crecimiento y rendimiento de las plantas, cobraron importancia a partir del momento en que surgió la computadora como un instrumento, con el cual se lograron realizar y controlar a gran velocidad cálculos y procesos complicados que requieren una toma rápida de decisiones. Con estos modelos se ha simplificado la tarea de los investigadores agrícolas, ya que con un grupo de variables se pueden hacer predicciones para diferentes cultivos y tiempos, y con una serie de combinaciones de las mismas se pueden llegar a establecer las condiciones necesarias para que cada cultivo se desarrolle con todo su potencial en una región determinada (Téllez, 1999).

Los modelos de simulación se dividen en *icónicos*, que son una representación física a escala, los *empíricos o correlativos*, que describen las relaciones entre cultivo y ambiente sin referirse a un seguimiento biológico o físico que existe entre las variables gobernantes del crecimiento y desarrollo del cultivo, para este tipo de modelos la herramienta es la estadística, los *analógicos*, que se basan en la analogía entre los sistemas, en tanto que los *mecanicistas*, se basan en conocimientos detallados del funcionamiento del sistema (Whiskey, 1986 citado por Rojas, 2008). El modelo utilizado en el presente estudio es de tipo empírico o correlativo.

Palabras clave: Simulación, Modelo, Stella, Alfalfa, PEAQ.

Los objetivos del presente trabajo son:

- Construir un modelo de crecimiento y desarrollo para el cultivo de alfalfa (*Medicago sativa L*) durante un año de cortes sucesivos.
- Comparar los resultados de FDA (Fibra detergente ácido) y FDN (Fibra detergente neutro) de los valores observados y simulados del modelo Stella, contra los del sistema PEAQ (Prediction Equations for Alfalfa Quality).

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Modelos de simulación.

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 (Bindi *et al.*, 2003).

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 *et al.*, 2003).

Modelo

Un modelo es una abstracción de la realidad. Es una descripción formal de los elementos esenciales de un problema. Debido a que estos elementos son exactamente los mismos que definimos para ser nuestro sistema de interés, podemos considerar un modelo como una descripción formal del sistema de interés. La descripción puede ser física, matemática o verbal, sin embargo, algunos especialistas no están de acuerdo con los modelos verbales, porque el lenguaje puede ser ambiguo (Grant *et al.*, 1997).

Sistema

Un sistema, es una parte bien delimitada del mundo real. Por ejemplo una planta con todos sus órganos (raíces, hojas, tallos), sus procesos y mecanismos (crecimiento, desarrollo, fotosíntesis, transpiración, etc.), constituyen un sistema.

La construcción de un modelo consiste de una serie de ecuaciones matemáticas mediante las cuales es posible reproducir del modo más fiel posible el comportamiento del sistema examinado (Bindi *et al.*, 2003).

2.2. Fases y etapas para desarrollar un modelo de simulación.

Grant *et al.*, (1997), considera cuatro etapas fundamentales en el proceso y uso de un modelo de simulación con sus diferentes etapas, las cuales son como sigue:

2.2.1. Fase I. Desarrollo del modelo conceptual.

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

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

2.2.2. Fase II. Especificación cuantitativa del modelo.

Esta fase consiste en desarrollar un modelo cuantitativo que básicamente implica traducir el modelo conceptual a una serie de ecuaciones

matemáticas basándonos en la información disponible sobre el mundo real, las etapas de esta fase son las siguientes:

1. Seleccionar la estructura cuantitativa general para el modelo.
2. Escoger la unidad básica de tiempo para las simulaciones (escala espacio – tiempo).
3. Identificar las formas funcionales de las ecuaciones del modelo.
4. Estimar los parámetros de las ecuaciones del modelo.
(Parametrización)
5. Codificar las ecuaciones del modelo para la computadora.
6. Ejecutar la simulación básica.
7. Presentar las ecuaciones del modelo en el lenguaje adecuado.

2.2.3. Fase III. Evaluación del modelo.

El objetivo de esta fase es evaluar el modelo en términos de su utilidad relativa para un propósito específico. Las etapas que comprenden esta fase son las que siguen:

1. Estimar lo razonable de la estructura del modelo y la interpretabilidad de las relaciones funcionales dentro del modelo.
2. Evaluar la coincidencia o grado de correspondencia entre el comportamiento del modelo y los patrones esperados del comportamiento del modelo.
3. Examinar la coincidencia o correspondencia entre las predicciones del modelo y los datos del sistema real.
4. Determinar la sensibilidad de las predicciones del modelo o los cambios en los valores de parámetros importantes.

2.2.4. Fase IV. Uso del modelo.

Busca responder a las preguntas que fueron planteadas al comienzo del proyecto de elaboración del modelo.

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

2.3. Funcionamiento y aplicación de los modelos

Desde la década del 70 se han desarrollado numerosos modelos para simular el desarrollo (fenología) y crecimiento de los cultivos. Existen modelos de diferente complejidad, tanto por la cantidad y calidad de los datos de entrada necesarios para que funcionen, como por los parámetros que pueden simular.

Los modelos simulan el momento de ocurrencia de los estados fenológicos, la evolución de la producción de materia seca por cada fracción de la planta y el rendimiento en función de variables de suelo, clima, manejo y del híbrido o la variedad empleada. Permiten definir estrategias de producción en la etapa de planificación de un cultivo futuro o bien ayudar a tomar decisiones tácticas durante el ciclo del cultivo (Forjan, 2002).

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 (Bindi, 2003).

Numerosos reportes científicos enfatizan las ventajas de los modelos de simulación con respecto al trabajo de campo en el estudio de procesos ambientales en general. Los modelos de simulación ambiental permiten a los tomadores de decisiones optimizar estrategias de manejo de los recursos naturales, mientras que a los investigadores les permite establecer las relaciones funcionales entre las variables y las respuestas que determinan los patrones de comportamiento (Jasso *et al.*, 1999).

2.4. Descripción del programa Stella 8.0

Stella es un programa de simulación por computadora, que proporciona un marco de referencia y una interface gráfica de usuario para la observación e interacción cuantitativa de las variables de un sistema (Sandoval, 2007).

Según Charles-Edwards *et al.*, (1986) citado por Díaz *et al.*, (2005), 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*.

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), propone 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 2.1).

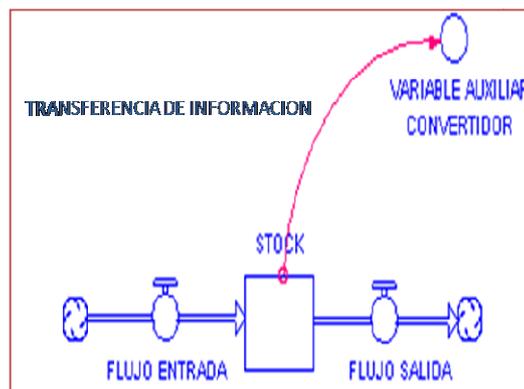


Figura 2.1. Elementos básicos en Stella.

2.4.1. Stella, el entorno de trabajo.

Esta herramienta de modelación presenta tres grandes capas:

1. La de “mapeo”, que permite definir valores iniciales de stock's, flujos o conectores, dónde también se muestra una elegante presentación del modelo ya terminado. Se podría considerar la fase de “dibujo” del sistema, dónde se definen la estructura y el aspecto que presenta cada componente.
2. La capa de construcción del modelo, que en conjunto con la capa anterior constituyen **la verdadera área de trabajo**, ya que aquí se definen los valores iniciales de las variables y de las tasas de cambio.
3. La capa de ecuaciones matemáticas utilizadas en el modelo, que el usuario puede evitar si no le interesa mucho la parte matemática del modelo.

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 de un sistema, los símbolos se conectan y se emplean ecuaciones matemáticas para relacionar los componentes del modelo (Martín y Tilley, 2000 citados por Rodríguez, 2008). Este permite crear modelos versátiles en cuanto a su posible modificación y adaptación a sistemas y condiciones específicas.

Li *et al.*, (2006) citados por Rodríguez (2008), 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 se obtuvieron un coeficiente de determinación (R^2) de 0.91 en la estimación de consumo de nitrógeno y

rendimiento de tubérculos que fueron correlacionados con las entradas de nitrógeno.

2.5. Sistema PEAQ (Prediction Equations for Alfalfa Quality).

Calidad del forraje.

La "calidad del forraje" es sinónimo de la digestibilidad, que a su vez depende de la proporción del material ingerido que es degradada en el rumen (Agnusdei, 2007).

La Universidad de Illinois, ha desarrollado una ecuación de predicción para la calidad de la alfalfa, comúnmente denominado "PEAQ" por sus siglas en inglés, predice la fibra detergente ácido (FDA) y fibra detergente neutro (FDN) mediante la altura de la planta (en pulgadas) y su madurez.

El programa PEAQ fue desarrollado por el Departamento de Agronomía de la Universidad de Wisconsin-Madison. Con el uso del mismo, los productores determinan la fecha de cosecha óptima para el corte de la alfalfa mediante la estimación del Valor Relativo del Forraje (RFV). El primer corte de alfalfa debe realizarse en la etapa de brotación, tan pronto como el VRF en el campo llega a 170 con el fin de lograr una alta calidad.

2.5.1. ¿Cómo calcular PEAQ?

Para usar el sistema PEAQ es necesario seguir el siguiente procedimiento:

1. Se selecciona un área representativa de 2 pies cuadrados.

2. Se determina el Valor de la Madurez (VM) de la planta de alfalfa más madura en el área seleccionada (Cuadro 2.1).

Cuadro 2.1. Escala de madurez de la planta.

Valor de Madurez (VM)	Estado Fenológico	Descripción
1.5	Vegetativo final	Longitud del tallo, más de 12 pulgadas.
3.5	Etapa de brotación	Uno o más nudos con brotes visibles.
5.5	Etapa de floración	Uno o más nudos con flores abiertas.

3. Se selecciona la planta más alta de la alfalfa y se mide su altura (en pulgadas) desde el suelo hasta la punta superior del tallo (no la punta de la hoja), se endereza el tronco y se registran sus mediciones en pulgadas. Posteriormente se calcula FDA Y FDN, a partir de la siguiente ecuación:

$$\text{FDA} = 10.78 + (0.53 * \text{altura de la planta}) + (0.79 * \text{VM})$$

$$\text{FDN} = 15.86 + (0.69 * \text{altura de la planta}) + (0.81 * \text{VM})$$

4. Se utiliza la tabla de PEAQ o una calculadora en línea para estimar el valor relativo del forraje (VRF, %) en base a la altura de planta. A partir de la siguiente ecuación:

$$\text{VRF} = (\text{DMS} * \text{CMS}) / 1.29, \text{ en donde;}$$

DMS= Digestibilidad de la Materia Seca.

CMS= Consumo de Materia Seca y

$$\text{DMS} = 88.9 - (0.779 * \text{FDA}).$$

$$\text{CMS} = 120 / \text{FDN}.$$

5. Para mejores resultados, se repite el paso anterior en múltiples áreas del campo y se obtiene el promedio de los resultados.

Este sistema se encuentra en línea en este enlace:

<http://peaq.triail.uiuc.edu/howto.cfm>

III. MATERIALES Y METODOS.

3.1. Descripción del experimento.

El cultivo de alfalfa se sembró el 7 de marzo de 2007 en el campo experimental “Navidad”, que se encuentra ubicado en las coordenadas 25 ° 02’ de Latitud Norte, 100° 37’ de Longitud Oeste, a una altura de 1895 msnm en el municipio de Galeana, Nuevo León, México. Se sembró la variedad Cuf-101 en 15 parcelas de 100 m². Los muestreos se realizaron del 4 de julio del 2008 al 13 de junio del 2009, con un programa de cinco cortes semanales de acuerdo con la metodología utilizada por Rojas (2008). Se inició con el corte 1, posteriormente, cada semana se cortó según correspondió a los cortes 2, 3, 4 ó 5, y se inició otro ciclo en el mismo orden. Los cortes se repitieron hasta el 13 de junio del 2009, por lo que todas las parcelas se contaron con 35 días de rebrote. De esta forma cada semana se obtuvieron observaciones.

	20 m	1m			
REP 1 5 m	4	1	5	3	2
REP 2	3	2	4	1	5
REP 3	1	4	5	2	3

Figura 3.1. Distribución de los cortes programados y sus repeticiones de la alfalfa Cuf-101, en Navidad, Galeana, Nuevo León, México.

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

Cuadro 3.1. Secuencia de cortes en el cultivo de la alfalfa Cuf-101, en Navidad, Galeana, Nuevo León, México.

Muestreo	Fecha	Programa de cortes
1	04/07/2008	1
2	11/07/2008	2
3	18/07/2008	3
4	25/07/2008	4
5	01/08/2008	5
6	08/08/2008	1
7	15/08/2008	2
8	22/08/2008	3
9	29/08/2008	4
10	06/09/2008	5
.	.	.
.	.	.
68	13/06/2009	5

3.2. Variables estudiadas.

Materia seca parcial (MSP). Se tomaron dos muestras de un área de 0.25 x 0.25 m (0.05m²) elegidas al azar dentro de cada unidad experimental, se cortaron las plantas a una altura de 4 cm, se metieron en bolsa y se secó en una estufa a 65°C por 72 h y se pesaron. Los resultados se expresaron en kg/ha.

Número de hojas (NH) y Altura (ALT). El muestreo fue semanal, se midió la altura y se contó el número de hojas en 5 plantas seleccionadas al azar de cada unidad experimental.

Índice de área foliar (IAF). Se utilizó la ecuación de regresión obtenida por Rojas (2008), a esta ecuación se le asignaron los pesos secos del componente hoja como variable independiente. Para estimar IAF se realizó el muestreo de población de plantas en un área de 25x25 cm y así

determinar el área que utilizaban las cinco plantas y finalmente se dividió el área foliar entre la superficie que ocupaba.

Calidad nutritiva de la alfalfa. Se tomaron dos muestras de un área de 0.25x0.20m (0.05 m²), esto se realizó en un evento de rebrote a 7, 14, 21, 28, y 35 días, en el tratamiento 4 con fecha del 2, 9, 16, 23 y 30 de mayo de 2009. Se metieron en bolsa de papel, se secaron en una estufa a 65°C por 72 hrs y se mandaron a un laboratorio (AGRO-LAB MEXICO, S. A. DE C. V.), para realizar el análisis bromatológico mediante un método químico, en estas muestras se determinó lo siguiente: PC, FDA y FDN.

Se compararon los valores observados y simulados en el programa Stella de la fibra detergente ácido (FDA) y fibra detergente neutro (FDN) con los valores obtenidos en el sistema PEAQ (Prediction Equations for Alfalfa Quality).

3.2.1. Datos climáticos.

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

3.2.2. Índice agroclimáticos.

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

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

$$T_i = \frac{(T_{max} + T_{min})}{2}$$

Dónde:

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

T_{\max} = Temperatura máxima para el día

T_{\min} = Temperatura mínima para el día

T_{base} = Temperatura base (7 °C)

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

4.1. Descripción del modelo de simulación.

En la construcción del modelo para el cultivo de alfalfa se utilizó el programa Stella 9, con cálculos diarios. El modelo de simulación está constituido por 2 submodelos, los cuales son: submodelo de clima (Figura 4.1), y submodelo de crecimiento y desarrollo del cultivo (Figura 4.2).

3.1.1 Submodelo de clima.

La variable $GDD = T \text{ DIA} - T_b$, donde $T \text{ DIA}$ es la temperatura media diaria generada en cada paso por TEMP Y T_b es la temperatura base para alfalfa que fue de 7° C (Figura 4.1).

La base del submodelo climático es un generador (TEMP) de temperatura media diaria ($T \text{ día}$), este generador utiliza una distribución Normal con las temperaturas medias y desviaciones estándar mensuales obtenidas de datos de temperatura de 13 años del lugar de estudio (Cuadro 4.1).

La variable independiente GDD AC se utilizó como controladora del sistema ya que tuvo la mayor relación con las variables dependientes (Cuadro 4.2). Esta variable acumula grados-días-crecimiento (GDD) durante cada evento de rebrote entre cortes sucesivos, y la variable SGDD AC tiene la función de regresar a 0 esta variable después de cada corte.

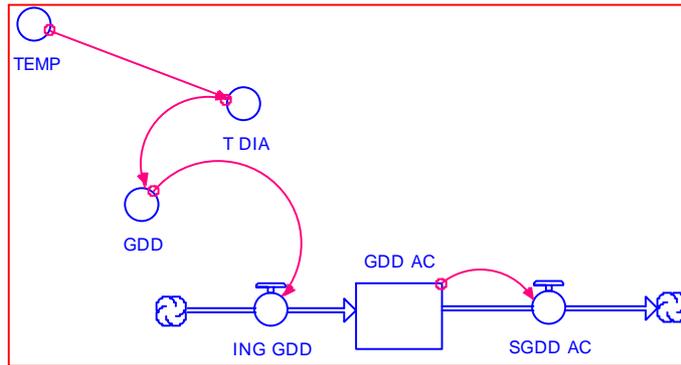


Figura 4.1 Submodelo de clima.

Cuadro 4.1. Temperatura promedio mensual de 13 años, registradas en el campo experimental de Navidad, Galeana, Nuevo León, México.

Temperatura media mensual de 13 años	
MES	Media ± DE
Enero	9.10±2.97
Febrero	11.13±3.44
Marzo	13.40±2.80
Abril	15.42±2.68
Mayo	17.98±2.18
Junio	19.00±1.65
Julio	18.43±2.14
Agosto	18.14±1.51
Septiembre	16.97±2.31
Octubre	14.77±3.09
Noviembre	10.80±2.54
Diciembre	8.90±2.70

Cuadro 4.2. Coeficientes de correlación entre las variables dependientes e independientes.

Variables	ALT	NH	MSP (kg/ha)	IAF
TEM MED/REBROTE	0.26	0.23	0.24	0.22
TEM MED 7 DIAS	0.50	0.46	0.45	0.46
GDD ACUM/PERIODO	0.50	0.46	0.43	0.46
GDD AC	0.91	0.91	0.90	0.92
RAD SOLAR ACUM/PERIODO	0.30	0.29	0.24	0.33
RAD SOLAR ACUM	0.72	0.71	0.71	0.82

4.1.2. Submodelo de crecimiento y desarrollo del cultivo.

En éste se usaron los Grados-Días-Crecimiento acumulados (GDD AC) para las variables: materia seca parcial (MSP), índice de área foliar (IAF), altura (ALT), número de hojas (NH), proteína cruda (PC), fibra detergente ácido (FDA) y fibra detergente neutro (FDN) (Figura 4.2).

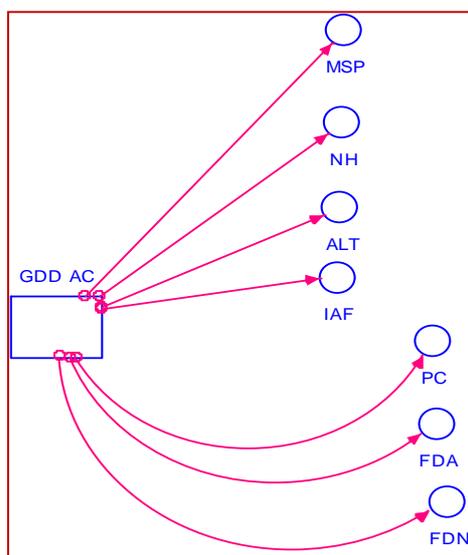


Figura 4.2. Submodelo de crecimiento y desarrollo del cultivo.

➤ ***Materia seca parcial (MSP)***

La variable auxiliar MSP fue representada como sigue:

$$\text{MSP} = 280 + 6.08 * \text{GDD_AC} + 0.012 * \text{GDD_AC}^2 \quad 1$$

Esta ecuación fue la de mejor ajuste y fue obtenida al relacionar la variable independiente GDD AC con la variable dependiente MSP, con un valor de R^2 de 0.81.

➤ ***Número de hojas (NH)***

La variable auxiliar NH fue representada como sigue:

$$\text{NH} = 7.49 + 0.0145 * \text{GDD_AC} + 0.000103 * \text{GDD_AC}^2 \quad 2$$

Esta ecuación fue obtenida al relacionar la variable independiente GDD AC con la variable dependiente NH. El modelo que tuvo mejor ajuste fue el cuadrático con un valor de R^2 de 0.82.

➤ ***Altura (ALT)***

La variable auxiliar ALT fue representada como sigue:

$$\text{ALT} = 3.9 + 0.11 * \text{GDD_AC} + 0.000016 * \text{GDD_AC}^2 \quad 3$$

Esta ecuación fue obtenida al relacionar la variable independiente GDD AC y la variable dependiente ALT. El modelo que tuvo mejor ajuste fue el cuadrático con un valor de R^2 de 0.82.

➤ ***Índice de área foliar (IAF)***

La variable auxiliar IAF fue representada como sigue:

$$\text{IAF} = .47 + 0.007 * \text{GDD_AC} + 0.000002 * \text{GDD_AC}^2 \quad 4$$

Esta ecuación fue obtenida al relacionar la variable independiente GDD AC con la variable dependiente IAF, el modelo que tuvo mejor ajuste es el cuadrático con un valor de R^2 de 0.84.

➤ ***Proteína Cruda (PC).***

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

$$PC = 41.2541 + (-0.0616 * GDD_AC) + (0.000132 * GDD_AC^2) + (0.0000003929 * GDD_AC^3)$$

5

➤ ***Fibra Detergente Ácido (FDA).***

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

$$FDA = 24.4040 + (-0.0570 * GDD_AC) + (0.0004463 * GDD_AC^2) + (-0.00000067163 * GDD_AC^3)$$

6

Esta ecuación es el resultado de la relación de GDD AC con la variable dependiente FDA, el mejor modelo de ajuste encontrado fue un polinomio de tercer grado con una R^2 de 0.87.

➤ ***Fibra Detergente Neutro (FDN)***

La fibra detergente neutro fue representada con una variable auxiliar (FDN), ésta es estimada a partir de los GDD AC con la variable dependiente FDN observado durante cada periodo de rebrote. El mejor modelo de ajuste encontrado fue una cuadrática con R^2 de 0.98, representada con la siguiente ecuación:

$$FDN = 27.995 + (-0.0209 * GDD_AC) + (0.0000078 * GDD_AC^2)$$

7

4.2. Resultados del modelo.

Los resultados del modelo se evaluaron comparando los valores simulados con observados en el periodo del 4 de julio del 2008 al 13 de julio del 2009.

Cabe mencionar, que para los datos observados se tomaron muestras aún en épocas de baja producción de forraje, pero en el modelo solamente se consideró como corte cuando la producción de MSP era mayor de 1,000 kg/ha. El modelo simuló 8 cortes, en el periodo del 16 de noviembre del 2008 al 24 de enero del 2009, el modelo no considero como corte, por la baja producción de biomasa, menos de 1000 kg/ha (Figura 4.4).

Las variables evaluadas fueron: materia seca parcial (MSP), número de hojas (NH), altura (ALT), índice de área foliar (IAF), proteína cruda (PC), fibra detergente ácido (FDA) y fibra detergente neutro (FDN). El modelo simuló de manera aceptable las variables mencionadas.

4.2.1. Materia seca parcial (MSP).

El modelo simuló de manera aceptable 8 cortes (Figura 4.3); en los primeros 4 cortes, el modelo sub estima el rendimiento, en el primer corte con 141.6 Kg/ha, en el segundo con 489.19 Kg/ha, en el tercer con 159.96 Kg/ha y el cuarto corte con 202.95 kg/ha, los valores sobre estimados se encontraron a partir del corte 5 cuyo valor fue de 829.73 kg/ha, en el corte 6 de 880.32 kg/ha, en el corte 7 fue 379.1 kg/ha y el corte 8 de 310.53 kg/ha.

Los resultados de rendimiento de MSP, son muy semejantes a los reportados por Aguilar (2005) quien con la misma variedad (Cuf-101) obtuvo una producción de 100 a 110 toneladas de forraje verde/ha/año que equivalen aproximadamente 22 toneladas por ha de forraje seco de buena calidad, con un promedio de 10 cortes por año.

Los valores estadísticos obtenidos entre los valores simulados y observados fue de 0.84 para R^2 , esto explica la asociación que existe entre estos dos valores y RMSE fue de 545.40 kg/ha, los resultados son parecidos a los reportados por Rojas (2008), quién obtuvo valores de 0.85 para R^2 y RMSE= 444.1 kg/ha, en la región de Navidad, Galeana, Nuevo León, México.

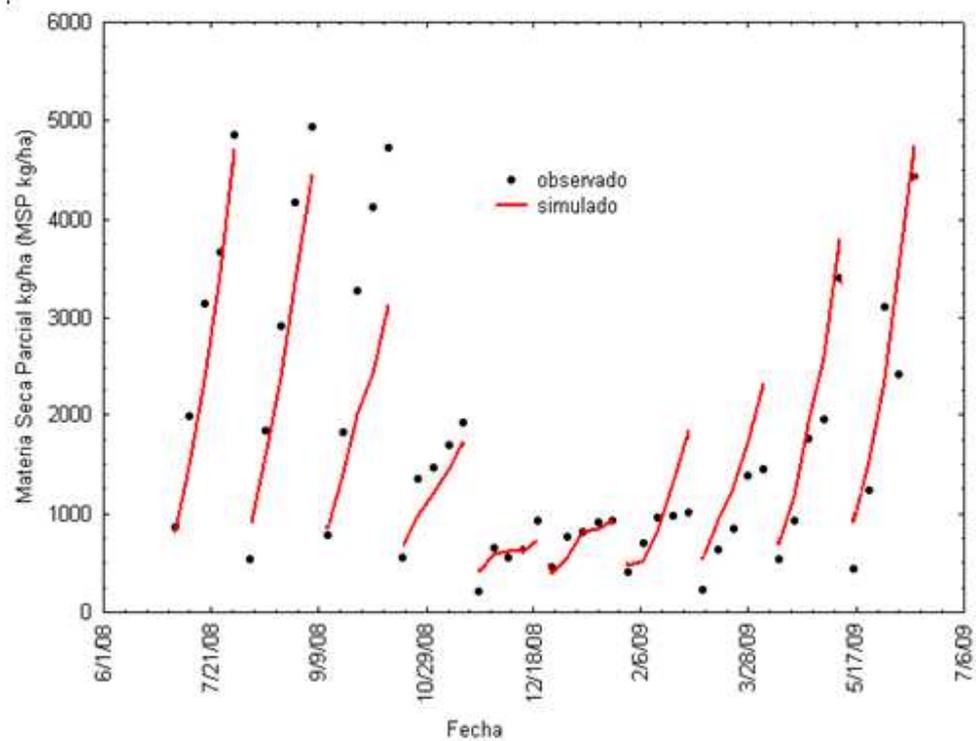


Figura 4.3. Materia seca parcial simulada y observada en alfalfa Cuf-101 en Galeana, Nuevo León, México.

4.2.2. Número de hojas (NH)

El modelo simuló de manera aceptable esta variable, la diferencia entre los valores observados y los simulados es baja (Figura 4.4), aunque en el corte 3 el modelo sub estima el valor (10 hojas), en el corte 5, 6, 7 y 8 son sobre estimados (4, 5, 9 y 4 hojas).

Rojas (2008), menciona que las hojas representan la biomasa fotosintéticamente activa, la cual es responsable del crecimiento y potencial productivo de las plantas forrajeras. Conforme aumenta la edad de rebrote se incrementa el NH hasta los 35 días, el cual varía dependiendo de la estación del año, en la época de invierno es cuando se observa un menor NH. Rojas (2008) reporto 27 hojas por vástago en la variedad Cuf-101, en región de Navidad, Galeana, Nuevo León, México.

Rojas (2008), reporta valores estadísticos de 0.92 para R^2 y $RMSE=2.9$ hojas entre observados y simulados para esta variable, en la región de Navidad, Galeana, Nuevo León, México.

Los valores encontrados entre observados y simulados para esta variable (NH) es de 0.81 para R^2 y $RMSE=2.96$ hojas

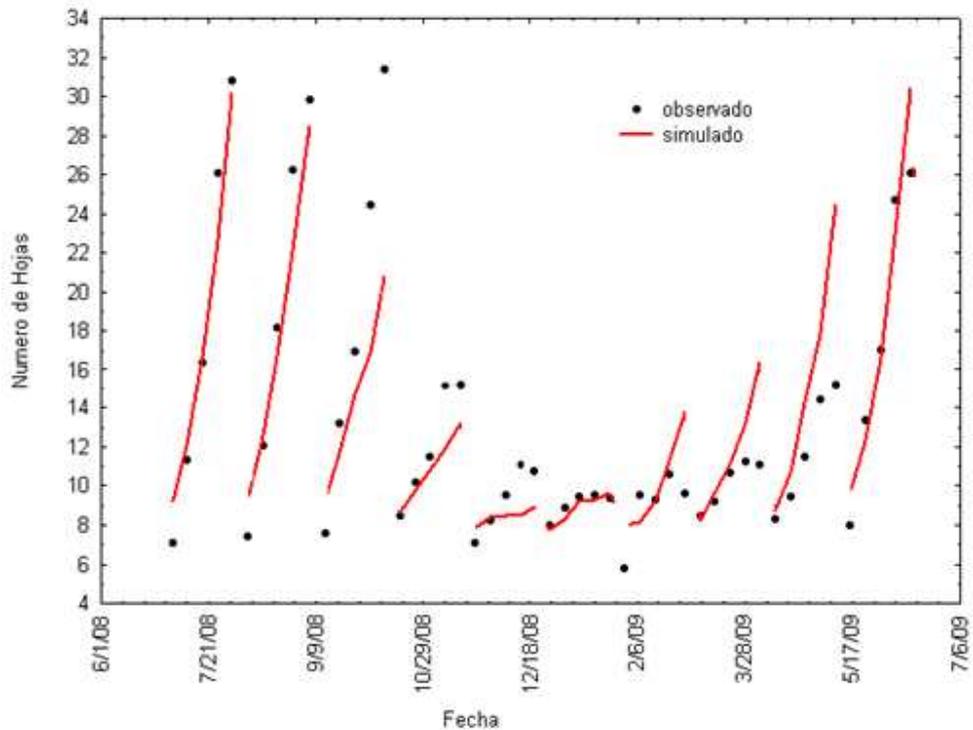


Figura 4.4. Número de hojas simulado y observado en alfalfa Cuf-101, en Galeana, Nuevo León, México.

4.2.3. Altura (ALT).

Esta variable fue simulada adecuadamente ya que se observa un comportamiento similar a los datos observados, aunque estos se encuentran ligeramente por arriba de los observados (Figura 4.5).

En 6 de 8 cortes la simulación sobre estima a los observados, la sub estimación se observa en los cortes 2 y 3 cuyos valores son los siguientes: corte 2 la diferencia es de 1 cm, el corte 3 fue de 13 cm menos que el observado. El corte 4 el valor simulado fue de 24.84 cm mientras que el observado de fue de 24.55, en el corte 5 el modelo sobre estima el valor por 8.5 cm, el corte 6 por 14 cm, el corte 7 por 18 cm y el corte 8 por 0.7 cm de altura.

La altura máxima simulada es de 53.6 cm, este valor se encuentra arriba de lo reportado por Rojas (2008) donde reporta una altura de 49.2 cm de la misma variedad Cuf-101, en la región de Navidad, Galeana, Nuevo León, México. Castillo (1990) en otro trabajo realizado con esta la variedad Cuf-101 reporta una altura de 50.3 cm, con una temperatura máxima anual de 26.9°C y una mínima de 10°C, en Celaya Guanajuato. Superan por muy poco los encontrados para el lugar de Navidad, Galeana, Nuevo León, México.

Los valores entre los simulados y observados de R^2 y de RMSE para esta variable son: 0.83 y 5.9 cm; estos valores son similares a los reportados por Rojas (2008) (R^2 de 0.87 y RMSE de 7 cm).

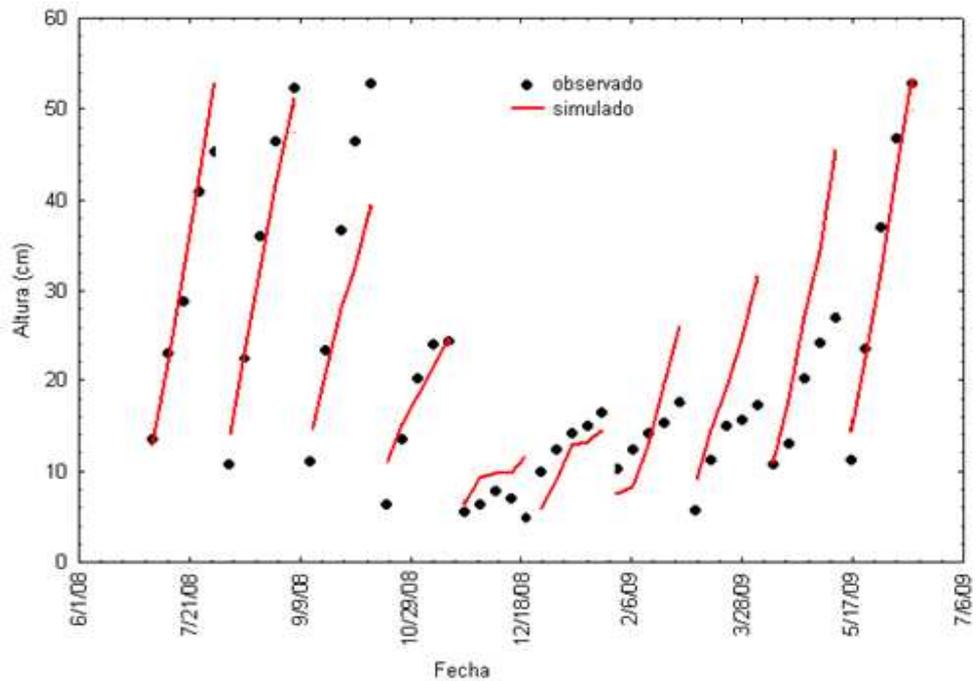


Figura 4.5. Altura simulada y observada en alfalfa Cuf-101, en Galeana, Nuevo León, México.

4.2.4. Índice de Área Foliar (IAF).

El modelo simuló de manera aceptable esta variable, en el corte 3 y 4, el valor de IAF fue sub estimado por el modelo por 0.72 y 0.54, en los cortes 5, 6 y 7 los valores son sobre estimados por 0.54, 0.95 y 0.65 (Fig. 4.6).

Los valores estadísticos entre los datos simulados y observados para esta variable son: $R^2=0.83$ y $RMSE=0.41$, lo que es muy aceptable considerando que es un modelo simple, que solo utiliza como variable importante los GDD AC.

La radiación solar influye mucho en el valor de IAF, ya que sus hojas son los órganos que atrapan la energía solar, pero en este caso al relacionar la variable IAF con radiación solar diaria se obtuvo una R^2 de 0.33, más bajo que con los Grados-Días-Crecimiento acumulado (GDD AC) que tuvo una R^2 de 0.85, como se menciona en el (Cuadro 4.2). Por eso no se consideró como la variable de mayor importancia sobre el valor de IAF. Además de lo anterior, es más fácil obtener información de temperaturas de una estación meteorológica que información de radiación solar.

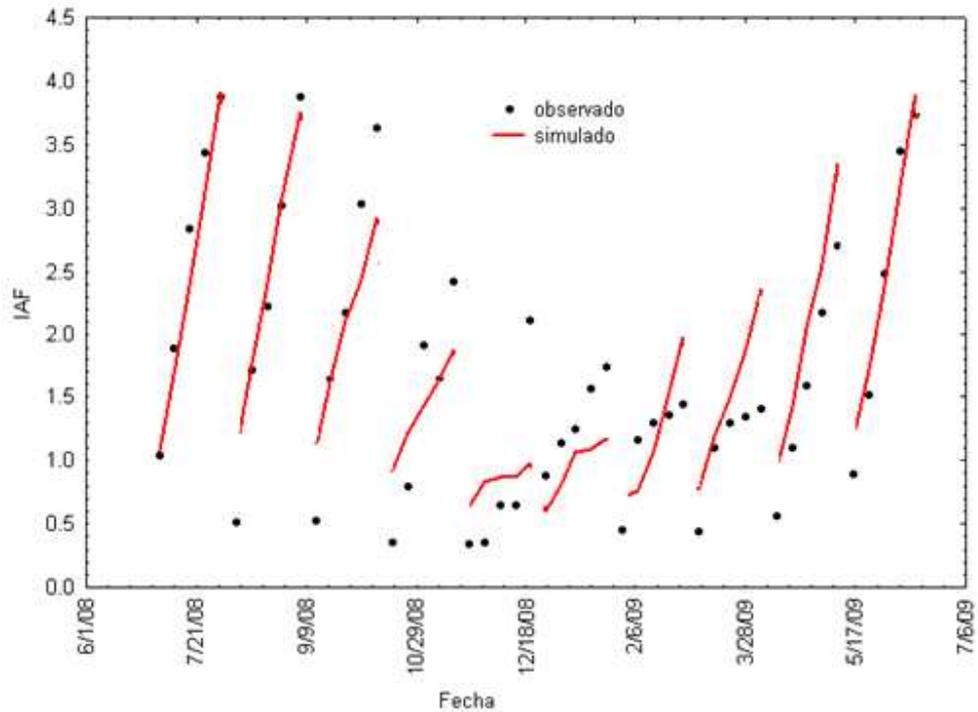


Figura 4.6. Índice de área foliar simulada y observada en alfalfa Cuf-101, en Galeana, Nuevo León, México.

4.2.5. Calidad nutritiva de la alfalfa.

En la composición química se simuló el comportamiento de los valores de (PC), (FDA) y (FDN) en un período de rebrote que comprende del 2 de mayo al 30 de mayo de 2009 (35 días).

4.2.5.1. Proteína cruda (PC)

Los datos de los valores observados, solo se obtuvieron de un periodo de rebrote que correspondió al tratamiento 4 con fecha 02, 09, 16, 23 y 30 del mes de mayo del 2009.

Esta variable fue simulada adecuadamente por que los valores de los observados de todo el ciclo (7, 14, 21, 28 y 35 días), obteniendo los resultados siguientes:

El día 7 de rebrote el observado fue de 37.5 % de PC y el simulado fue de 31% de PC en el día 14 de rebrote el observado fue de 30.5 % de PC, y el simulado de 25.3 % de PC, día 21 de rebrote el valor observado fue de 24.6 % de PC y el simulado de 21.6 % de PC, el día 28 de rebrote el observado fue de 21.3 % de PC y el valor simulado de 20.2% de PC y el día 35 de rebrote el valor observado fue de 20.4 % de PC y el simulado de 20.2 % de PC.

En la Figura 4.7, se observa que el comportamiento de PC es variable, en verano se cosecha con 20 % de PC, en éste, la calidad nutritiva es más estable, esto se debe a que las temperaturas optimas se presentan en estos días, en invierno se observa valores altos de 35 % , esto es porque las plantas no avanzan en su desarrollo fenológico y es menor su lignificación por las bajas temperaturas, sin embargo la producción de materia seca es muy baja (200 a 900 kg/ha), por lo tanto, aunque la PC es de buena calidad no es practico cortar ya que no existe el equilibrio entre calidad y cantidad del forraje.

Los valores estadísticos entre los datos simulados y observados para esta variable son: $R^2 = 0.99$ y $RMSE = 0.36\%$.

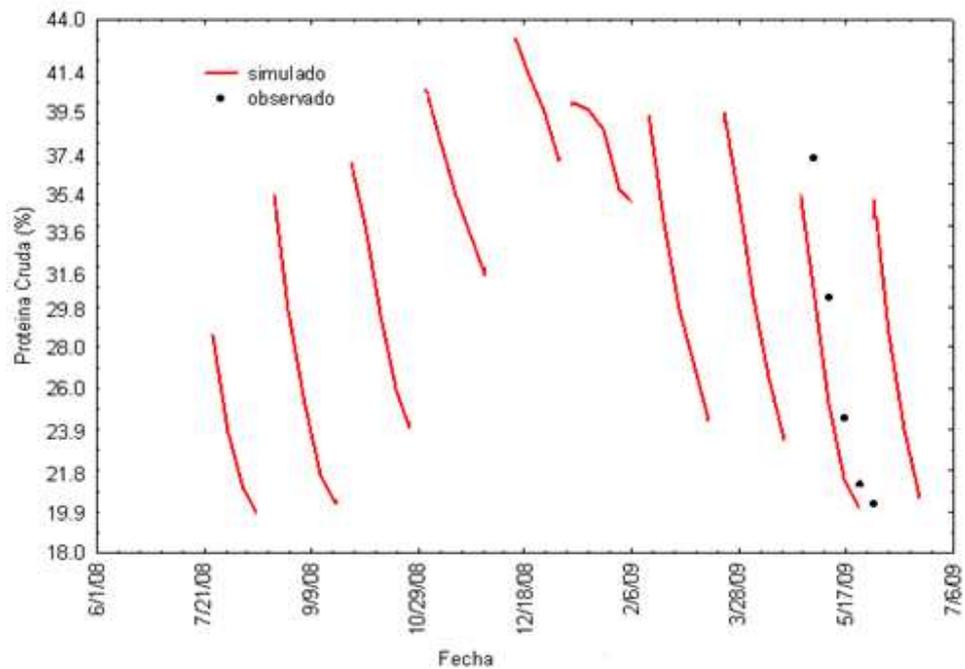


Figura 4.7. Proteína cruda simulada y observada en alfalfa Cuf-101 en Galeana, Nuevo León, México.

4.2.5.2. Fibra Detergente Ácido (FDA).

En la Figura 4.8, se observa el comportamiento simulado y observado de los valores de FDA, en los datos observados solo se aprecia de un ciclo de rebrote del 2 al 30 de mayo de 2009, se aprecia la simulación aceptable para estas variables, porque para el día 7 de rebrote el valor observado de FDA fue de 22.4 % y el simulado de 22.1 % de FDA días 14 de los días de rebrote la FDA el observado es de 23.8 % de FDA y el simulados de 24.5 % de FDA, para los 21 días de rebrote el observado fue de 23.8 % de FDA y el simulado de 24.45 % de FDA, el día 21 fue de 26.5% de FDA y el simulado de 26.8 % de FDA, del día 28 fue de 29.8 % de FDA y el simulados de 28.6 % de FDA y para el día 35 de rebrote el observado fue de 30.2 % de FDA y el simulado de 30.7 % de FDA.

A medida que la alfalfa crece en su estado de madurez su calidad disminuye y aumenta el FDA, compuesta por celulosa y lignina, es decir pierde calidad y digestibilidad.

Los valores estadísticos entre los datos simulados y observados para esta variable son: $R^2=0.95$ y $RMSE=0.67\%$.

Rojas (2008), reporta valores estadísticos de 0.95 para R^2 y $RMSE=1.6\%$ entre observados y simulados para esta variable, en la región de Navidad, Galeana, Nuevo León, México.

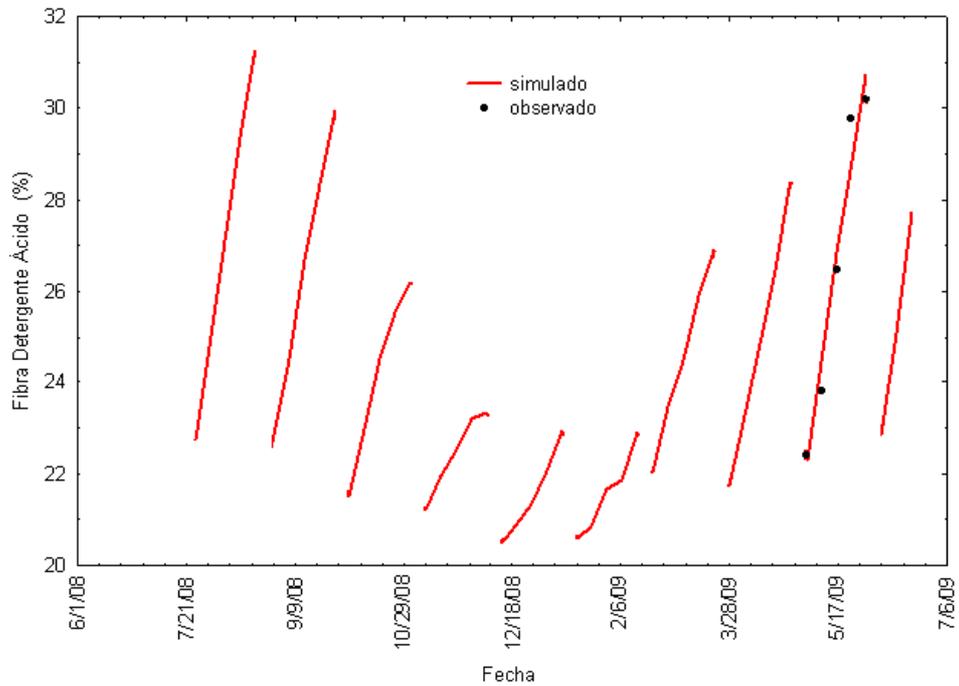


Figura 4.8. Fibra detergente ácido simulada y observada en alfalfa Cuf-101 en Navidad, Galeana, Nuevo León, México.

4.2.5.3. Fibra Detergente Neutro (FDN)

Se puede mostrar que esta variable (FDN) presenta tendencias similares a FDA, las diferencias está en que presenta valores más altos, por ejemplo, la Figura 4.9, muestran incrementos de FDN que van del 29.7 al 36.9 % (35 días), en invierno los valores de FDN son bajos porque el desarrollo de las plantas es lento debido a pérdidas por bajas temperaturas, así las plantas se mantienen en estado de latencia, hasta tener las condiciones climáticas óptimas para el rebrote nuevamente.

En la Figura 4.9, se observa el comportamiento simulado y observado de los valores de FDN, al igual que la PC y la FDA se aprecia la simulación aceptable para estas variables, porque para el día 7 de rebrote el valor observado fue de 29.7 % de FDN y el simulado de 29.21% de FDN, para el día 14 de rebrote el observado es de 30 % de FDN y el simulados de 31 % de FDN, para el día 21 de rebrote el observado fue de 33.7 % de FDN y el simulado de 33.26 % de FDN, el día 28 fue de 35.6 % de FDN el observado y el simulado de 34.91 % de FDN, el día 35 de rebrote fue de 36.5% de FDN el observado y el simulados de 36.93 % de FDN.

Rojas (2008), reporta valores estadísticos de 0.94 para R^2 y $RMSE=3.0$ % entre observados y simulados para esta variable, en la región de Navidad, Galeana, Nuevo León, México. Para este trabajo dicho valores son $R^2 = 0.94$ y $RMSE = 0.70$ % respectivamente.

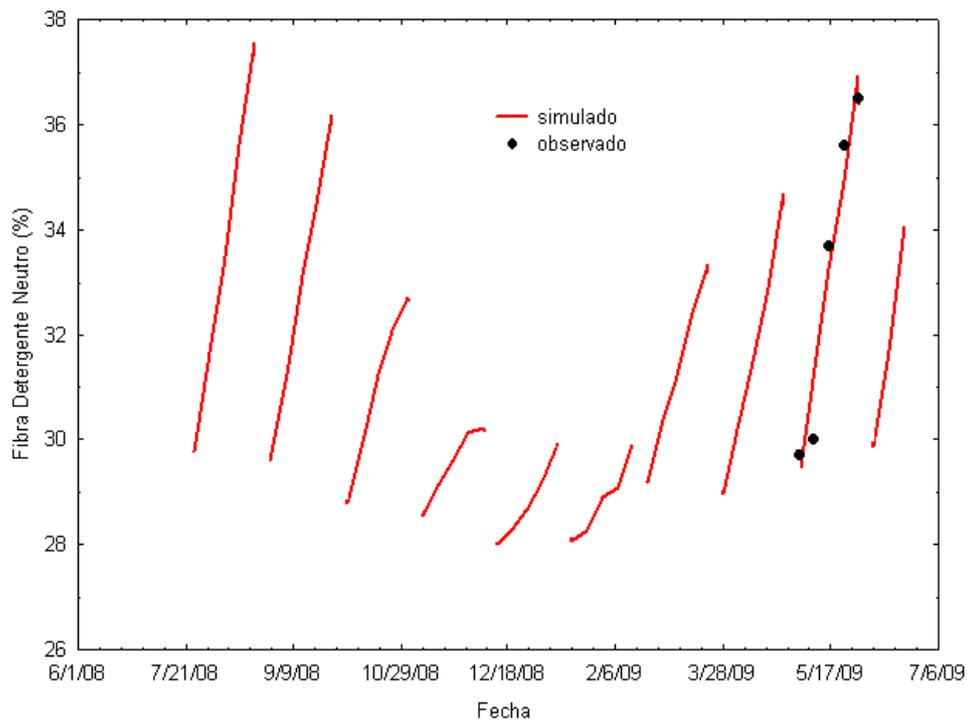


Figura 4.9. Fibra detergente neutro simulada y observada en alfalfa Cuf-101, en Galeana, Nuevo León, México.

4.3. FDA y FDN observado, simulado en Stella y del sistema PEAQ.

Fue posible hacer una comparación de la fibra detergente ácido (FDA) y fibra detergente neutro (FDN), simulado en Stella y del sistema PEAQ, con los valores observados, de un periodo de rebrote que correspondió al tratamiento 4 con fecha 02, 09, 16, 23 y 30 del mes de mayo del 2009 (Cuadro 4.3).

Cuadro 4.3. Fibra detergente ácido y fibra detergente neutro del cultivo de alfalfa para valores observados (Obs), simulados con el modelo en Stella (Modelo) y estimados por el sistema PEAQ en diferentes tiempos de rebrote.

Días de rebrote	Altura (Pulg)	VM	% FDA			% FDN		
			Obs	Modelo	PEAQ	Obs	Modelo	PEAQ
7	4.81	1.5	22.4	22.1	15.9	29.7	29.2	21.7
14	9.32	1.5	23.8	24.5	18.5	30	31.1	25.1
21	12.33	3.5	26.5	26.8	20.1	33.7	33.2	27.0
28	18.55	5.5	29.8	28.6	25.0	35.6	34.9	33.1
35	21.05	5.5	30.2	30.7	26.3	36.5	36.9	34.8

Se puede observar que el modelo en Stella produce valores simulados más cercanos a los observados que el sistema PEAQ para las variables FDA y FDN. Los coeficientes de determinación son altos tanto para el modelo en Stella como para PEAQ, sin embargo, los RMSE son 5 veces mayores para PEAQ (Cuadro 4.4).

Cuadro 4.4. Valores estadísticos comparados de FDA Y FDN, de los observados, simulados en el modelo y del sistema PEAQ.

Comparación	FDA		FDN	
	R ²	RMSE	R ²	RMSE
Observados-Modelo	0.95	0.68	0.94	0.68
Observados-PEAQ	0.97	5.46	0.96	5.28

V. CONCLUSIONES

El modelo construido en Stella simuló con un buen nivel de precisión el crecimiento y desarrollo de la alfalfa Cuf-101, en Navidad Galeana Nuevo León, a partir de información del ambiente (clima, manejo) y datos experimentales del cultivo, para las variables materia seca parcial, altura, número de hojas, índice de área foliar, contenido de proteína cruda, fibra detergente ácido y fibra detergente neutro.

El sistema PEAQ, a pesar de ser una herramienta simple, rápido y de bajo costo, no es muy fiable, ya que los valores obtenidos del sistema fueron sub estimados contra los del simulado en el modelo, con un error relativamente alto, RMSE de 5.46 para FDA y 5.28 para FDN respectivamente, comparándolos con los valores observados, ya que estos fueron valores exactos al hacer el análisis químico del laboratorio.

VI. LITERATURA CITADA

- Agnusdei M.G. 2007. Calidad nutritiva del forraje. Agromercado Temático, Bs. As., 136:11-17.
- Aguilar M. M. 2005. Importancia del cultivo de la alfalfa (*Medicago sativa*), en el estado de Coahuila. Tesis. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.
- Bindi M. M. 2003. Impacto Ambiental sobre la Producción Agrícola. Modelos para Cultivos Agrícolas.
- Callejas R.E.A. 2007. Efecto de la variedad y estación de corte sobre el rendimiento y calidad nutritiva de forraje de alfalfa, en el valle del Mezquital, Hidalgo. Tesis. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.
- Castillo A. H. 1990. Evaluación agronómica de 10 variedades de alfalfa (*Medicago sativa*), bajo riego en la región de Celaya Guanajuato. Tesis. Lic. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Saltillo, Coahuila, México.
- 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.
- Forján, H. 2002. Modelos de simulación de crecimiento y desarrollo de los cultivos. AgroBarrow Digital No. 27. INTA. Buenos Aires, Argentina.

- Grant, W. E., E. K. Pedersen y S. L. Marín. 1997. Ecología y manejo de recursos Naturales: Análisis de sistemas y simulación.
- Marco B.D. 2003. Instrumentos para el monitoreo del impacto ambiental sobre la producción agrícola. MODELOS PARA CULTIVOS. Universidad católica de Santa fe.
- Rodríguez A. M. 2008. Modelos de simulación para cereales forrajeros en el Sur de Nuevo León, México Tesis. M. C. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista, Saltillo, Coahuila, 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. M. C. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.
- Sandoval A.C., Carrara C. X. 2007. Manual práctico de Stella, software de modelación dinámica.
- Téllez O., O. S. 1999. Validación del modelo EPIC, para simular el índice de área foliar, acumulación de materia seca y nitrogenada y rendimiento de grano en el cultivo de maíz (*Zea mays* L.) bajo diferentes condiciones de humedad en el suelo. Tesis. M. C. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. Buenavista, Saltillo, Coahuila, México.
- Villegas A., Y., A. Hernández G., J. Pérez P., C. López C., J. C. Herrera H., J. F. Enríquez Q. y A. Gómez V. 2004. Patrones estacionales de crecimiento de dos variedades de alfalfa (*Medicago sativa* L.). Tec. Pec. Mex. 42(2):145-158.

_____ 1999. Ecuación de Predicción Para la Calidad de la Alfalfa (PEAQ)

Universidad de Wisconsin–Madison. Consultado en:

<http://peaq.triail.uiuc.edu/howto.cfm>, el 14 de Agosto del 2010.