



UNIVERSIDAD AUTONOMA DE CHIAPAS
FACULTAD DE MEDICINA VETERINARIA Y ZOOTECNIA



“Validación de un modelo de simulación productiva en ovinos de pelo alimentados con *Leucaena leucocephala* y *Panicum máximum*”

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el grado de
MAESTRO EN CIENCIAS EN PRODUCCIÓN AGROPECUARIA TROPICAL

Por

MVZ. ADRIANA CECILIA REBOLLO MORALES

Director

DR. GILBERTO YONG ÁNGEL

Codirector

PhD. VICENTE CELESTINO PIRES SILVEIRA

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México

Febrero, 2016



UNIVERSIDAD AUTONOMA DE CHIAPAS
FACULTAD DE MEDICINA VETERINARIA Y ZOOTECNIA



“Validación de un modelo de simulación productiva de ovinos de pelo alimentados con *Leucaena leucocephala* y *Panicum máximum*”

TESIS

Presentada como requisito parcial para obtener el grado de
MAESTRO EN CIENCIAS EN PRODUCCIÓN AGROPECUARIA TROPICAL

Por

MVZ. ADRIANA CECILIA REBOLLO MORALES

Director

DR. GILBERTO YONG ÁNGEL

Codirector

PhD. VICENTE CELESTINO PIRES SILVEIRA

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México

Febrero, 2016

DEDICATORIAS

A DIOS

Por brindarme el derecho de la vida y la luz en el sendero correcto.

A MIS PADRES

A mis padres por velar siempre por mi bienestar, por enseñarme que es lo verdaderamente importante en la vida, por apoyarme y alentarme a realizar este posgrado.

A MIS COMPAÑEROS

Con especial cariño a mis compañeros de la maestría: gracias Vera, Jorge, Susy, Argelia y Oscar (antes o después, todos importantes para mí). Necesitaría más espacio para recordar lo que hemos vivido juntos. Siempre estuvieron dispuestos a ayudar y responder cualquier duda con compañerismo y amabilidad, estas dos cosas me llevo de todos ustedes además de muy buenos recuerdos y también muchas risas. Gracias por haberme hecho sentir como en casa.

A todas aquellas personas que de una u otra manera han estado presentes para la realización de este trabajo y también para aquellas que de alguna forma han contribuido en mi formación.....a todas ellas, **Gracias!!**

AGRADECIMIENTOS



Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por otorgarme la beca para realizar la Maestría en Ciencias en Producción Agropecuaria Tropical en la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la Universidad Autónoma de Chiapas con el número de registro 380322.

AGRADECIMIENTOS

A mi director de tesis: ***Dr. Gilberto Yong Ángel***

Por su paciencia con mis deficiencias como alumna y su enorme energía en la búsqueda de conocimientos, por ser una guía gentil y una mente lógica y sobre todo por su valiosa colaboración y apoyo para la realización de esta investigación. Por compartir amablemente sus conocimientos, experiencias y su tiempo.

A mi Codirector: ***PhD. Vicente Celestino Pires Silveira***

Por su apoyo e incentivos a esta investigación y por su tiempo dedicado a la corrección de la tesis.

A mis asesores: **MC. Alberto Yamazaki Maza**

Dr. Benigno Ruiz Sesma

Dra. Paula Mendoza Nazar

Por su valiosa colaboración en la revisión de tesis y por ser parte del comité.

Al **Dr. Esaú de Jesús Pérez Luna** por proporcionar amablemente sus datos para la validación de los resultados.

A la **Dra. Guadalupe Patricia Macías Farrera** por su apoyo en la revisión de la tesis.

A la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la Universidad Autónoma de Chiapas y a los docentes de la maestría.

Por los conocimientos adquiridos y lograr mi formación profesional.

Por último y no menos importantes a los administrativos de la MCPAT y encargados de laboratorio.

Con admiración y respeto.



Universidad Autónoma de Chiapas

Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia C-II
Coordinación de Investigación y Posgrado

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas a 03 Febrero de 2016.

Esta tesis titulada **“VALIDACIÓN DE UN MODELO DE SIMULACIÓN PRODUCTIVA EN OVINOS DE PELO ALIMENTADOS CON *Leucaena leucocephala* y *Panicum máximum*”**, registrado en la Coordinación de Investigación y Posgrado de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, bajo la dirección del Dr. Gilberto Yong Ángel

Se incluye en la Línea de Generación y Aplicación del Conocimiento: Optimización de los procesos de investigación animal del grupo de investigación innovación para el desarrollo agropecuario.

Se incluye en la Línea de Generación y Aplicación del Conocimiento: Sistemas Pecuarios del Programa de Maestría en Ciencias en Producción Agropecuaria Tropical.



Universidad Autónoma de Chiapas

Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia C-II
Coordinación de Investigación y Posgrado

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas a 03 Febrero de 2016.

Esta tesis titulada “**VALIDACIÓN DE UN MODELO DE SIMULACIÓN PRODUCTIVA EN OVINOS DE PELO ALIMENTADOS CON *Leucaena leucocephala* y *Panicum máximum***”, fue realizada por la MVZ. ADRIANA CECILIA REBOLLO MORALES, bajo la dirección y asesoría del Comité Tutorial indicado, como requisito parcial para obtener el grado de MAESTRO EN CIENCIAS EN PRODUCCIÓN AGROPECUARIA TROPICAL.

COMITÉ TUTORIAL

DIRECTOR

DR. GILBERTO YONG ÁNGEL

CODIRECTOR

PhD. VICENTE CELESTINO PIRES SILVEIRA
UFSM (Brasil)

ASESORES:

DR. ALBERTO YAMASAKI MAZA

DR. BENIGNO RUIZ SESMA

DRA. PAULA MENDOZA NAZAR



Universidad Autónoma de Chiapas

Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia C-II
Coordinación de Investigación y Posgrado

Tuxtla Gutiérrez, Chiapas a 03 Febrero de 2016.

Esta tesis titulada “**VALIDACIÓN DE UN MODELO DE SIMULACIÓN PRODUCTIVA EN OVINOS DE PELO ALIMENTADOS CON *Leucaena leucocephala* y *Panicum máximum***”, realizada por la MVZ. ADRIANA CECILIA REBOLLO MORALES, ha sido aprobada por la Comisión Revisora indicada, como requisito parcial para obtener el grado de MAESTRO EN CIENCIAS EN PRODUCCIÓN AGROPECUARIA TROPICAL.

COMISIÓN REVISORA

DR. GILBERTO YONG ANGEL

PhD. VICENTE CELESTINO PIRES SILVEIRA

DR. ALBERTO YAMASAKI MAZA

DR. BENIGNO RUIZ SESMA

DRA. PAULA MENDOZA NAZAR

CONTENIDO

	<u>Página</u>
I.- INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.- Objetivo.....	1
1.1.2.- Objetivos específicos.....	2
II.- REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1.- Situación actual de la ovinocultura (nivel mundial y nacional).....	3
2.2.- Sistema ovino de pelo.....	3
2.3.- Requerimientos nutricionales en los ovinos.....	3
2.3.1.- Energía metabolizable.....	5
2.3.2.- Energía neta.....	5
2.3.3.- Energía digestible.....	6
2.3.4.- Energía metabolizable fermentable.....	6
2.3.5.- Eficiencias de utilización de la energía metabolizable.....	6
2.3.6.- Corrección para el nivel de alimentación.....	7
2.4.- Proteína metabolizable.....	7
2.5.- Sistema silvopastoriles.....	8
2.6.- <i>Leucaena leucocephala</i> en la alimentación de rumiantes.....	9
2.7.- Problemática de la alimentación en ovinos.....	10
2.8.- Los modelos en la producción animal.....	11
2.9.- Definición de un modelo.....	12
2.9.1.- Tipos de modelos.....	13
2.10.- Uso de modelos en la ganadería.....	15
2.10.1.- Uso de modelos en la nutrición animal.....	16
2.10.2.- Utilidad de los modelos.....	16
2.10.3.- Ventajas de los modelos de simulación.....	17
2.11.-Evaluación de un modelo matemático.....	17
2.11.1.- Verificación y validación de un modelo.....	18
2.12.-Técnicas para evaluar un modelo.....	18
2.13.- Origen del modelo.....	18
2.14.-Descripción del modelo.....	19
2.14.1.- Modelo pampa de corte.....	19
2.15.- Digestibilidad.....	19
2.16.- Técnicas de digestibilidad.....	19
2.16.1.- Digestibilidad in situ de forrajes.....	19
2.16.2.- Digestibilidad in vivo de forrajes.....	20
2.16.3.- Digestibilidad in vitro de forrajes.....	21
III.- MATERIAL Y MÉTODOS.....	23
3.1.- Localización del área de estudio.....	23
3.2.- Metodología.....	23

3.2.1.- Análisis de laboratorio.....	23
3.2.1.1.- Análisis químico proximal.....	23
3.3.- Modelo de simulación en la alimentación de ovinos.....	23
3.3.1.- Descripción del modelo Silveira (2002).....	23
3.3.2.- Generalidades de la validación del modelo.....	23
3.3.3.- Modelo animal.....	24
3.4.- Parámetros.....	24
3.4.1.- Ambientales.....	24
3.4.2.- Animal.....	24
3.4.3.- Alimento.....	24
3.5.- Construcción y validación del modelo.....	25
IV.- Resultados y discusión.....	30
4.1.- Construcción y validación del modelo.....	27
4.2.- Resultados de la simulación.....	27
V.- Conclusiones.....	31
VI.- Literatura citada.....	39
VII.- Apéndice.....	42

Índice de cuadros y figuras

Cuadro 1.- Análisis químico proximal de <i>Leucaena</i> – Tanzania de un sistema silvopastoril intensivo en la depresión central de Chiapas.....	10
Cuadro 2.- Parámetros ambientales en promedio por año.....	25
Cuadro 3.- Análisis químico proximal del alimento.....	26
Cuadro 4.- Dietas analizadas.....	27
Cuadro 5.- Consumo voluntario (g/ovino-1) de niveles de inclusión de <i>Leucaena leucocephala</i>	27
Cuadro 6.- Digestibilidad aparente (%) de la MS, MO y constituyentes de paredes celulares en ovinos alimentados con <i>Panicum máximum</i> y follaje de <i>Leucaena leucocephala</i>	27
Cuadro 7.- Composición porcentual de los ingredientes utilizados en la elaboración de las raciones para ovinos en la región central de Chiapas.....	28
Cuadro 8.- Análisis químico proximal de las raciones utilizadas (%) para alimentación de ovinos en la región central de Chiapas.....	28
Cuadro 9.- Consumo voluntario de materia seca (g/ovino-1) y ganancia de peso por ovinos en la región central de Chiapas.....	28
Figura 1.- Resultados del modelo Angot para simular el número de horas luz en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez.....	25
Figura 2.- Localización del área de estudio.....	23
Figura 3.- Relación entre el consumo de materia seca y la ganancia de peso en ovinos.....	27
Figura 4.- Comparación entre los datos observados vs simulados en el consumo de materia seca, en ovinos de pelo.	28
Figura 5.- Comparación entre los datos observados y los simulados en la ganancia de peso en ovinos de pelo.....	28
Figura 6.- Intervalos de confianza entre datos observados y simulados para consumo de materia seca en ovinos de pelo.....	29
Figura 7.- Consumo de materia seca y ganancia de peso en ovinos alimentados con pasto Tanzania.....	29
Figura 8.- Relación entre consumo de materia seca y ganancia de peso en ovinos alimentados con Tanzania 60%- <i>Leucaena</i> 40%, mediante simulación.....	30
Figura 9.- Consumo simulado de materia seca en tres tratamientos en ovinos de pelo (100T- 0L, 60T-40L y 80T-20L).....	31
Figura 10.- Ganancia de peso simulado con tres tratamientos de Tanzania y <i>Leucaena</i> en ovinos de pelo (100T- 0L, 60T-40L y 80T-20L).....	31

Resumen

Validación de un modelo de simulación productiva de ovinos de pelo alimentados con *Leucaena leucocephala* y *Panicum máximum*

El objetivo fue validar un modelo de simulación productiva en ovinos de pelo que nos permita pronosticar el comportamiento de los animales alimentados con *Leucaena leucocephala* y *Panicum máximum*. El trabajo se realizó en la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la Universidad Autónoma de Chiapas. En la primera fase se utilizaron 30 borregos para calibrar el modelo y en la segunda fase se simularon tres dietas a base de *Leucaena* y Tanzania. (Dieta I. 100% Tanzania- 0% *Leucaena*, dieta II. 60% Tanzania- 40% *Leucaena* y 80% Tanzania – 20% *Leucaena*). Los datos obtenidos durante la calibración nos arrojaron una R^2 de 0.73 para el consumo de materia seca (ms) y una R^2 de 0.62 para la ganancia diaria de peso. Con estos datos se simularon las ganancias de peso (GDP) y consumo de alimentos con las diferentes dietas, obteniendo una R^2 , en el modelo de 0.97 entre el consumo de ms y GDP para la dieta de 60% Tanzania y 40% *Leucaena*. Es posible simular el consumo de materia seca y la evolución de los pesos vivos de ovinos de pelo en crecimiento debido a que el modelo presenta un grado de precisión alto. Los modelos son una herramienta eficaz como una ayuda en la toma de decisiones.

Palabras claves: Ovinos, modelos, simulación, *Leucaena*, Tanzania

I.- Introducción

La producción de carne de ovinos en el mundo, se distribuye principalmente en China, Australia, España, India, Nueva Zelanda y México ocupa el lugar número 37 dentro de los países productores. Las importaciones a México de productos y subproductos ovinos son Australia, Nueva Zelanda y Uruguay, este último ocupa el 1.7% del mercado mundial (FAO, 2004).

La producción ovina en México se localiza principalmente en el centro y sur del país, generalmente se realiza bajo sistemas de pastoreo tradicionales, con escasa tecnología y con una productividad limitada. En México, se cuenta con 7'305,578 cabezas representando el 49.55 % y están distribuidas de la siguiente forma en el estado de México el 15.91%, Hidalgo el 13.02%, Veracruz 8.02%, Oaxaca con el 7.04%, San Luis Potosí el 5.56% (SAGARPA, 2010).

En las últimas décadas la ovinocultura dejó de ser una actividad de traspatio para convertirse en una de las actividades pecuarias más rentables, los ovinos de pelo son adecuados para utilizarse en los trópicos debido a su rusticidad y buena adaptación a las condiciones ambientales. Asimismo, la alternativa para mejorar la producción de carne en los ovinos de pelo es la alimentación. El aspecto nutricional constituye un problema de mayor importancia en la productividad, por eso es necesario estudiar la interacción entre planta y animal, por lo tanto se deben hacer estimaciones de producción y consumo de forraje.

Una herramienta para estimar de una manera rápida, utilizando un gran número de factores interrelacionados es usar modelos de simulación que permiten predecir la respuesta productiva de los ovinos bajo diferentes escenarios reales. Los modelos de simulación en los sistemas de alimentación tienen el propósito de integrar en forma más ordenada los conocimientos acerca del funcionamiento de estos, que permita generar información útil para una mejor y acertada toma de decisiones para el manejo en los sistemas ovinos.

El presente trabajo de investigación tiene la finalidad de evaluar la respuesta productiva en la alimentación de ovinos, mediante un modelo que fue estructurado sobre la base de un programa computacional para manejar archivos de datos y generar resultados. Mediante la resolución de ecuaciones que simulan procesos biológicos, como el consumo de alimento y ganancia de peso en ovinos.

1.1.- Objetivo

Validar un modelo de simulación productiva en ovinos de pelo que nos permita pronosticar el comportamiento de los animales alimentados con *Leucaena leucocephala* y *Panicum máximum*.

1.1.2.- Objetivos específicos

- a) Validar el modelo pampa de corte
- b) Evaluar el consumo de los ovinos alimentados con diferentes proporciones de *Leucaena leucocephala*: *Panicum máximum*.
- c) Determinar ganancia de peso

II.- Revisión de literatura

2.1.- Situación actual de la ovinocultura (nivel mundial y nacional)

En el mundo, la producción de carne de ovinos, se desarrolla principalmente en China, Australia, España, India, Nueva Zelanda, dentro del ámbito mundial, México ocupa el lugar 37. Las importaciones a México de productos y subproductos ovinos provienen de Australia, Nueva Zelanda y Uruguay, este último ocupa el 1.7% del mercado mundial. En cuanto a los Estados Unidos dentro del comercio internacional de la carne de ovino clasificada como cordero, no es un oferente sino un demandante, por lo que podría representar para México una posibilidad de mercado (FAO, 2004).

La producción ovina en México se localiza principalmente en el centro y sur del país, generalmente se realiza bajo sistemas de pastoreo tradicionales, con escasa tecnología y con una productividad limitada. En México, de acuerdo a los datos de SAGARPA se cuenta con 7'305,578 cabezas, distribuyéndose 49.55 % en el estado de México el 15.91%, Hidalgo el 13.02 %, Veracruz 8.02 %, Oaxaca con el 7.04 %, San Luis Potosí el 5.56 % (SAGARPA, 2010).

2.2.- Sistema ovino de pelo

En las últimas décadas la ovinocultura dejó de ser una actividad de traspato para convertirse en una de las actividades pecuarias más rentables, los ovinos de pelo son adecuados para utilizarse en los trópicos debido a su rusticidad y buena adaptación a las condiciones ambientales. En México, los ovinos de pelo (Pelibuey, Saint Croix y Blackbelly), se ubican en las zonas tropicales de las regiones costeras del Golfo de México y del océano Pacífico y en algunos estados del centro del país (Arteaga, 2003, Magaña *et al.*, 2011).

La principal alternativa para mejorar la producción de carne en los ovinos de pelo es la alimentación. La alimentación merece especial atención, ya que en la zona tropical la mayoría de los ovinos, pertenecen a productores con escasos recursos económicos (traspato) donde muchas veces la alimentación se basa en plantas nativas y algunos forrajes. Sólo una parte de los ovinos esta con productores que utilizan tecnología y una alimentación adecuada (Magaña *et al.*, 2011).

Esto obliga a que los programas de alimentación deberán planearse desde varios puntos de vista para atender factores como: tipo y objetivos de la explotación; razas utilizadas; tipo de animal a alimentar (sexo, edad, peso, etapa fisiológica, etc.); costos de los insumos y obviamente la disponibilidad de ingredientes (Magaña *et al.*, 2011).

2.3.- Requerimientos nutricionales en los ovinos

Es poco lo que se conoce de las exigencias nutricionales del ovino en condiciones tropicales, por lo que frecuentemente se hace uso de valores publicados en países templados (ARC, 1984; NRC, 1985; INRA, 1990).

Las recomendaciones para corderos en crecimiento consideran los requerimientos para máxima ganancia de peso, con 20 a 40% de forraje en la dieta, sin diferenciar el sexo del cordero. El animal necesita energía tanto para mantenimiento como para la producción. La alimentación de los ovinos se basa fundamentalmente en forrajes que están constituidos en su mayor parte por carbohidratos estructurales, los cuáles son la fuente principal de energía, aún cuando la proteína y la grasa de los alimentos también pueden aportar energía a través de distintos procesos metabólicos (NRC, 1995).

El consumo potencial del animal está determinado por los requerimientos energéticos, pudiendo estar limitado en el caso de los forrajes tropicales por las características físicas del alimento. La digestibilidad del mismo también afecta el consumo, cuando la cantidad de energía ingerida es inferior a los requerimientos de mantenimiento, el animal hace uso de sus reservas corporales, especialmente de grasa pudiendo esto generar problemas de orden metabólico cuando es en forma excesiva.

Se han desarrollado diversos estudios con el objetivo de abordar las diversas metodologías que se utilizan para estimar las exigencias nutricionales en rumiantes. De esta manera, levantar el interés de la comunidad científica para determinar las exigencias nutricionales en ovinos para las condiciones regionales (ARC, 1980, AFRC, 1993).

El AFRC, (1993) considera además de la producción de calor en ayuno, los gastos energéticos relacionados con las actividades de movimiento y comportamiento animal.

Las proteínas están formadas por aminoácidos, los cuales son necesarios para el mantenimiento de los órganos vitales y para la formación de la carne, lana y leche. Los rumiantes también son capaces de sintetizar aminoácidos a partir de fuentes de nitrógeno no proteico, mediante una simbiosis con microorganismos ruminales, pero requieren además de una fuente de energía para ello (Combellas, 2001).

En los últimos años se han producido, en el conocimiento del metabolismo del nitrógeno, avances que han originado nuevos enfoques sobre los sistemas de valoración proteica de los rumiantes. Así, se sustituye la proteína total por dos nutrientes, la proteína degradable en el rumen y la proteína sobrepasante. La degradabilidad de la proteína en el rumen es el factor que determina el mayor o menor aporte de estos nutrientes (Combellas, 2001).

La producción animal está estrictamente relacionada con la nutrición, que depende principalmente de cuatro factores:

- 1) Las necesidades nutricionales
- 2) Composición del alimento
- 3) Digestibilidad de los alimentos
- 4) La cantidad de nutrientes que los animales consumen

La ingesta de materia seca se conoce como el factor más importante y decisiva en el rendimiento animal, porque delimita la ingesta de nutrientes necesaria para cumplir con los requisitos para el mantenimiento y la producción (Allison, 1985).

La fibra se utiliza para caracterizar la comida y establecer los límites para la inclusión de ingredientes en la dieta; sin embargo, no hay consenso sobre la definición de fibra o la concentración de fibra dietética capaz de optimizar el consumo de energía por las ovejas. La presencia de fibra en la dieta de los rumiantes, en mayor o menor proporción, afecta a las características importantes de los alimentos, en relación el valor energético y la digestibilidad de la fermentación ruminal y, probablemente, también controla la ingesta (Van Soest, 1994).

La digestibilidad de la fibra de los forrajes no es constante para todos los animales, y las fuentes de variación se encuentran en la estructura de la planta, composición química, la relación de forraje-concentrado, así como las condiciones ambientales tales como altas temperaturas del aire. A pesar del gran interés por conocer el nivel ideal de fibra en la dieta de ovejas, pocos estudios se han realizado con este propósito (Macedo *et al.*, 2012).

2.3.1.- Energía metabolizable

La ingestión de energía metabolizable (ME) se define por el ARC (1980) como la energía bruta (GE) del alimento, menos la de las heces (FE), orina (UE) y gases combustibles (en su mayor parte metano, M_E) expresada en la unidad del SI como Megajulios por kilogramo de materia seca de un alimento o ración (MJ/KgDM). Representa la porción de la energía del alimento que puede ser utilizada por el animal. La EM se define como:

$$ME=GE-FE-UE- M_E \text{ (Alderman y Cottrill; 1993)..... (Ecuación 1)}$$

2.3.2.- Energía neta

La energía neta de un alimento o ración es la parte de la energía del alimento que es digerida y utilizada por el animal para el mantenimiento corporal y las producciones, después de tener en cuenta las pérdidas en las heces (FE), orina (UE), metano (M_E) y calor (Alderman y Cottrill; 1993).

El contenido de Energía Neta de un producto animal es numéricamente igual a su contenido en energía bruta (GE), que también se denomina Valor Energético (EV), expresado en MJ/Kg. La (GE) de un alimento o producto animal se obtiene determinando la cantidad total de calor que se origina al someter el alimento a la combustión en atmósfera de oxígeno en una bomba calorimétrica adiabática.

La energía neta empleada por el animal para el mantenimiento es igual a la producción de calor por el animal alimentado al nivel de mantenimiento en un medio ambiente de neutralidad térmica (Alderman y Cottrill; 1993).

2.3.3.- Energía digestible

La energía digestible se define como GE-FE, y puesto que FE es el mayor de los tres términos que han de sustraerse, normalmente existe una buena correlación entre los valores de (DE) y (ME) de los alimentos o raciones, oscilando la relación (ME)/(DE) de los alimentos o raciones, oscilando la relación (ME)/(DE) entre 0.81 y 0.86 (Alderman y Cottrill; 1993).

Metabolicidad de los alimentos: la metabolicidad de la (GE) de un alimento al nivel de mantenimiento (q_m) se define como la proporción de la (GE) de ese alimento que es (ME);

$$q_m = (ME)/(DE) \dots \dots \dots \text{(Ecuación 2)}$$

2.3.4.- Energía metabolizable fermentable

Conocer el contenido de energía metabolizable fermentable, (FME), de los alimentos o raciones para usar el sistema de proteína metabolizable (MP) del AFRC (1992). La unidad de (FME) es definida como el contenido en ME de un alimento o ración, (ME), expresado en MJ/KgDM, menos la (ME) presente como grasa o aceite total (ME_{fat}) y la ME aportada por los ácidos de fermentación, (ME_{ferm}) presentes en los forrajes parcialmente fermentados, como el ensilado, o alimentos prefermentados como los subproductos de cervecería y destilería;

$$(FME)(MJ/kgDM) = (ME) - (ME_{fat}) - (ME_{ferm}) \text{ (Alderman y Cottrill; 1993) (Ecuación 3)}$$

2.3.5.- Eficiencias de utilización de la ME

Las eficiencias de utilización de la ME, k_m , k_f , se calculan mediante ecuaciones lineales en las que intervienen la q_m , razón de (ME) respecto a (GE) de un alimento o ración:

$$\text{Eficiencia de mantenimiento} \quad k_m = 0,35q_m + 0,503 \dots \dots \dots \text{(Ecuación 4)}$$

Eficiencias para el crecimiento

- a) Rumiantes en crecimiento $k_f=0,78q_m+0,006$ (Ecuación 5)
(Alderman y Cottrill; 1993).

2.3.6.- Corrección para el nivel de alimentación

La ME realmente utilizable por el animal, calculada sumando la ME (determinada a nivel de mantenimiento) aportada por los componentes de la ración, se reduce significativamente para los altos niveles de alimentación debido al mayor ritmo de paso por el rumen y al menor tiempo de retención en el mismo. Para solucionar este problema, el ARC (1980) ha seguido dos enfoques distintos.

- a) Animales en crecimiento y cebo

La función exponencial para describir la relación existente entre la retención de energía (R) y la ingestión de ME por el ganado vacuno en crecimiento, con el objeto de reducir la sobreestimación de la retención de energía obtenida con el modelo lineal.

La ecuación tiene la forma:

$$R=B(1-e^{-kl})-1 \dots\dots\dots \text{(Ecuación 6)}$$

En la que R es la retención de energía neta y I es la ingestión de ME en la ración, ambas escalonadas en relación con el metabolismo de ayuno del animal (F).

Los factores B y k se calculan a partir de las eficiencias de utilización de la ME en las ecuaciones (6) y (8), como se indica a continuación:

$$B=k_m/(k_m-k_f) \dots\dots\dots \text{(Ecuación 7)}$$

$$k=k_m \times \ln(k_m/k_f) \dots\dots\dots \text{(Ecuación 8)}$$

(Alderman y Cottrill; 1993).

2.4. - Proteína metabolizable (MP)

Se define como el total de proteína verdadera digestible (aminoácidos) utilizable por el animal para el metabolismo, después de la digestión y absorción del alimento en el tracto digestivo del animal. Tiene dos componentes:

1. Proteína verdadera microbiana digestible (DMTP), producida por los microorganismos del rumen, que sintetizan proteína a partir de fuentes de energía fermentable (FME) de los alimentos y de aminoácidos o nitrógeno no proteico a partir de la degradación de las proteínas de los alimentos en el rumen. La proteína verdadera microbiana supone el 0.75 de la MCP (aporte de proteína bruta microbiana). La MTP (proteína verdadera microbiana g/d) es digestible en el intestino al nivel de 0.85 por lo que:

$$\text{DMTP (g/d)}=0.75 \times 0.85 \times \text{MCP}=0.6375 \text{MCP(g/d)} \dots \dots \dots (\text{Ecuación 9})$$

2. Proteína del alimento no degradada digestible (DUP), es la fracción del alimento que no ha sido degradada durante su paso por el rumen (UDP: proteína no degradable de la ración), pero que es suficientemente digestible como para ser absorbida en el intestino del animal. La proporción de DUP en la UDP varía entre cero y 0.9, dependiendo del alimento, su composición y los tratamientos previos. La digestibilidad de la UDP puede predecirse a partir del contenido en nitrógeno insoluble en detergente ácido (ADIN) en el alimento, o su contenido en fibra ácido detergente modificada (MADF). La proteína metabolizable se define:

$$\text{MP (g/d)}=0.6375 \text{MCP} + \text{DUP} \dots \dots \dots (\text{Ecuación 10})$$

(Alderman y Cottrill; 1993).

2.5.- Sistema silvopastoriles

Las regiones tropicales poseen fuertes limitantes que impiden incrementar la productividad de los sistemas pecuarios, dentro de los cuales destacan: disponibilidad y calidad del forraje, aunado a la presencia de pasturas degradadas o en proceso de degradación (Szott *et al.*, 2000). Una de las estrategias para la recuperación y mejoramiento de los sistemas ganaderos es el establecimiento de sistemas silvopastoriles (SSP), los cuales constituyen un tipo de agroforestería donde los árboles y/o arbustos interactúan con las forrajeras herbáceas y los animales (Mahecha, 2002; Karki y Goodman, 2010).

La inclusión de árboles en pasturas constituye una fuente importante de alimento (Musálem, 2002; Dagang y Nair, 2003); al respecto, Anguiano *et al.*, (2012) mencionan que la inclusión de altas densidades es provechosa, ya que han encontrado que los mejores resultados en cuanto a la altura y número de hojas se obtienen con 60,000 y 80,000 árboles ha⁻¹ a los 100 días de edad, con 138.28 cm y 24.74, respectivamente.

Los SSP están compuestos por gramíneas rastreras o erectas, árboles y arbustos leguminosos o no, y animales que se alimentan de los componentes forrajeros (Santana, 1998; Pezo *et al.*, 2008).

Estos sistemas presentan una mayor productividad forrajera, por lo que mejoran la cantidad y calidad de la dieta animal (Yamamoto *et al.*, 2007); lo anterior permite incrementar la producción de carne y leche, así como mejorar la reproducción en forma estable en el tiempo —con reducción de costos— al no requerir insumos como los granos, concentrados y antiparasitarios (Krishnamurthy y Ávila, 1999; Pezo *et al.*, 1999).

Los Sistemas Silvopastoriles (SSP) proveen a los animales una dieta rica en proteína, por ello la implementación de estos sistemas se convierte en una ventaja. Las leguminosas usadas para dichos sistemas pasan de los 18% de proteína y se puede alcanzar ganancias de peso en zonas tropicales hasta de 800 g⁻¹ animal⁻¹ día⁻¹ en bovinos, y un incremento de hasta dos litros de leche por vaca/día y en el caso de ovinos ganancias de peso de 106 g/día (Wencomo 2008, Barros *et al.*, 2012).

En sistemas silvopastoriles, la presencia de las leñosas perennes puede contribuir a mejorar la productividad del suelo, y por ende favorecer el desarrollo del estrato herbáceo. Algunos de los mecanismos más importantes son: la fijación de nitrógeno, el reciclaje de nutrientes, la mejora en la eficiencia del uso de nutrientes, el mantenimiento de la materia orgánica y el control de la erosión (Nair, 1993).

La asociación de leguminosas forrajeras como *L. leucocephala* con gramíneas dentro de los SSPs se presentan como una alternativa para la producción ovina debido a que proveen una dieta rica en nutrientes, constituyendo una opción importante ya que incorporan el componente arbóreo, la diversidad de especies, reciclaje y liberación de nutrientes en sincronía con los componentes del sistema (Solorio *et al.*, 2003).

Debido a la importancia de estos sistemas, se ha impulsado el diseño de nuevas modalidades para su aplicación en la ganadería tropical. Ante ello, se desarrollaron los SSP con *L. leucocephala*, el cual permite incrementar de manera considerable la productividad y la carga animal, así como la generación de servicios ambientales que resultan de la presencia de altas densidades en esta leguminosa (Murgueitio y Solorio, 2008).

A pesar de que existe evidencia sobre los beneficios que tienen los sistemas agroforestales, y en especial los SSP para la ganadería en el trópico, uno de los problemas para su adopción es la limitada comunicación entre investigadores y productores; estos últimos no consideran o desconocen los beneficios que se obtienen con estos sistemas (Beer *et al.*, 2003; Murgueitio y Ibrahim, 2008).

Los SSP constituyen una opción importante para los sistemas ganaderos en el trópico, debido a los múltiples beneficios que brindan, tales como la alta oferta y calidad de forraje para la alimentación animal; además, con dichos sistemas se obtiene mayor producción de carne y leche en comparación con los sistemas tradicionales de producción en monocultivo (Bacah *et al.*, 2013).

2.6.- *Leucaena leucocephala* en la alimentación de rumiantes

Las hojas y las vainas de *L. leucocephala* se usan extensamente como forraje para animales rumiantes, ya que entre sus cualidades está el alto contenido de proteína bruta en el forraje, que varía entre 24.0 y 30.0 %, dependiendo de la variedad y la época del año. En un trabajo sobre pastoreo de alta densidad en un sistema silvopastoril sugieren la posibilidad de poder alimentar a los rumiantes con proteína de alta calidad y de bajo costo, evitando el uso de concentrado comercial (García *et al.*, 2008).

Cuadro 1.- Análisis químico proximal de *Leucaena* – Tanzania de un sistema silvopastoril intensivo en la depresión central de Chiapas.

Análisis químico proximal	% Humedad	% Cenizas	% proteína cruda	% fibra cruda	% grasa
Mezcla 40-60*	5,78	12,91	13,03	25,07	2,65
<i>Leucaena</i> simulado	5,06	9,31	23,48	16,55	3,31
<i>Leucaena</i> corte	4,85	7,57	16,44	37,00	2,18
Pasto simulado	7,48	14,97	5,42	32,81	1,78
Pasto corte	9,90	13,44	4,56	34,88	1,46

Valor ajustado a base seca: % equivale a gr/100gr* *Leucaena*-Tanzania (Ramírez, 2015)

La digestibilidad de la proteína alcanza el 63.0% y la digestibilidad de la materia seca entre 60.0 y 70.0 % medida in vivo (Barros *et al.* 2012). Además, es muy resistente al pastoreo y a las enfermedades causadas por fitopatógenos (Solorio *et al.*, 2003).

2.7.- Problemática de la alimentación en ovinos

La ganadería en general presenta varios problemas entre los que destacan la variabilidad de la calidad y cantidad de los forrajes, y esto hace que no se cumplan con los requerimientos adecuados de cada animal dependiendo de su estado fisiológico. En corderos pelibuey en pastoreo con pasto Tanzania se reporta el déficit de energía en la etapa de crecimiento (Martínez, 2007).

La alimentación de bovinos (carne y leche) y ovinos en estas condiciones se basa en el pastoreo de especies de pastos nativos y de otros introducidos. La disponibilidad y calidad del pasto experimenta fluctuaciones durante el año, debidas a las variaciones en la precipitación pluvial (Ku *et al.* 2013).

Durante la estación de seca, está disponible el pasto seco, que contiene baja concentración de proteína cruda, alta concentración de FND, baja digestibilidad aparente y por tanto, baja concentración de energía metabolizable (EM). En esta etapa, el consumo de materia seca (MS) de los rumiantes se reduce, por lo que no pueden cubrir sus requerimientos de EM para el mantenimiento. Esto se traduce en un balance energético negativo y en pérdidas de peso, lo que retrasa el tiempo (meses) para que los animales en crecimiento alcancen el peso de sacrificio. Esta insuficiencia también repercute en bajas producciones de leche por vaca (Ku *et al.*, 2014).

Algunas de las causas que han frenado el desarrollo de la ovinocultura en zonas tropicales y subtropicales son: la baja eficiencia productiva consecuencia de la pobre calidad genética de las razas explotadas y, el efecto que ejercen las condiciones ambientales adversas (altas temperaturas) en determinadas épocas del año, sobre el desempeño productivo, principalmente a través de una disminución en la cantidad y calidad del alimento disponible para los animales. La nutrición constituye uno de los factores de mayor influencia sobre los procesos productivos y reproductivos de machos y hembras en los animales domésticos (Martín y Walkden, 1995).

2.8.- Los modelos en la producción animal

La aparición de los modelos de simulación ocurre a partir de la década de los 50 con modelos descriptivos y matemáticos de los procesos involucrados; luego a mediados de los 60's aparece el concepto de sistemas dinámicos, que incluyen la variable tiempo y que representaban el flujo de esos procesos y sus interacciones (Barrett y Nearing, 1998).

En esta etapa dos importantes precursores fueron W. G. Duncan en la University of Kentucky y C. T. de Wit en la Agricultural University de Wageningen, que desarrollaron modelos como herramienta para explicaciones científicas, como por ejemplo, sintetizar y mejorar la comprensión de procesos tales como la intercepción de radiación y fotosíntesis, desarrollando modelos simples que consideraban únicamente la producción potencial relacionada con la radiación y la temperatura (Barrett y Nearing, 1998).

En la década de los 70's se formaliza aquel concepto de dinámica de sistemas y en los 80's se refina mediante técnicas de computación la verificación, validación y evaluación de esos modelos. En esta última década aparecen los primeros modelos de simulación para los cultivos de maíz, soja, trigo y arroz, incluidos en el paquete DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer) "Sistema de apoyo para las decisiones de transferencia agrotecnológica". La simulación de sistemas agrícolas empezó entonces a ser una herramienta para la integración de los diferentes componentes productivos dentro de los sistemas agrícolas (*Op. cit.*).

Los avances en el conocimiento de las interacciones dentro del ecosistema, influenciado por el ambiente y por las prácticas de manejo, expandió la potencialidad de uso de esta herramienta como ayuda para la toma de decisiones (*Op. cit.*).

La aparición a mediados de los 90's de la tecnología informática permitió una mayor utilización de estos modelos para el estudio y resolución de problemas específicos como: desarrollo y crecimiento de los cultivos, evaluación de respuesta a la fertilización, estrategias de riego, situaciones de estrés, predicción de pérdidas por erosión, lixiviación de pesticidas, contaminación del ambiente, calentamiento global de la atmósfera, entre otros (Gálvez, 2008).

En general, son aceptables los puntos de vista de los que aseveran que el uso de los modelos de simulación para las ciencias agrícolas y biológicas y sus usos prácticos está en un momento de gran importancia (Gálvez, 2008).

2.9.- Definición de un modelo

Los modelos de simulación son una herramienta que facilita la toma de decisiones para seleccionar la mejor alternativa que se puede lograr con una combinación de recursos y precios y nos muestra cuanto se podría pagar por una unidad más de cada recurso que se agota. Existen en el mercado muchas opciones de modelos de simulación en sistemas de producción animal basados en bovinos y ovejas, aunque la metodología difiere entre ellos, el objetivo final siempre es el predecir la respuesta en productividad a una oferta de nutrientes ya sea basadas en pastoreo o en combinación con sub-productos agroindustriales y alimentos concentrados expresados en términos de flujos de energía y proteína (Holmann, 2002).

Un modelo puede ser una representación conceptual, numérica o gráfica de un objeto, sistema, proceso, actividad o pensamiento; destaca las características que el modelador considera más importantes del fenómeno en cuestión, por lo que se emplea para analizar exhaustivamente cada una de sus relaciones e interacciones, y con base en su análisis, predecir posibles escenarios futuros para dicho fenómeno. Así, un modelo puede describirse como una representación simplificada de un sistema real, y es en esencia, una descripción de entidades y la relación entre ellas (García, 2008).

Por lo anterior, el modelado o modelaje puede considerarse como un método eficiente para reducir y entender la complejidad de los sistemas. Un modelo de simulación es un conjunto de ecuaciones que representa procesos, variables y relaciones entre variables de un fenómeno del mundo real y que proporciona indicios aproximados de su comportamiento bajo diferentes manejos de sus variables (Pérez *et al.*, 2006).

Los modelos son potentes herramientas de análisis y síntesis que permiten además cuantificar las relaciones entre los componentes y los efectos que ellos tienen en el resultado final, aumentando la precisión y la racionalidad de las decisiones (Cardozo y Ferreira, 1994).

Uno de los enfoques planteados como base para estas herramientas es el enfoque de sistemas, entendiendo con ello un enfoque que permite analizar y evaluar los escenarios productivos mediante la utilización de modelos matemáticos y de simulación. Actualmente, existen modelos que simulan la respuesta de animales a pastoreo mediante la utilización de valores medios mensuales de tasas de crecimiento y digestibilidad de los pastizales (Castellaro, 2003).

Generalmente esta información es escasa y difícil de conseguir, lo que limita su uso como una herramienta que permita predecir el consumo de materia seca y el cambio de peso vivo de los animales con una buena precisión (*Op. cit.*).

El comportamiento de animales a pastoreo se ha simulado generalmente con datos experimentales o funciones empíricas obtenidos en centros experimentales o en estudios específicos (Bernues *et al.*, 1995; Finlayson *et al.*, 1995; Aguilar *et al.*, 2000).

El uso de modelos de simulación que permitan predecir la respuesta en los animales bajo diferentes escenarios productivos permitirá evaluar diferentes alternativas, reduciendo de esta manera el tiempo que lleva experimentar en campo las mismas alternativas (Abasto *et al.*, 1999).

Los modelos de simulación se diseñan y construyen con el propósito de entender, explicar o mejorar el funcionamiento de un sistema real, concepto u objeto. Pueden cumplir un papel importante en la evaluación a nivel temporal de los sistemas de producción pecuaria, proporcionando parámetros de referencia para la recopilación de información existente sobre procesos especiales y pueden ser utilizados para identificar conocimientos deficitarios, generando lineamientos a seguir en la investigación (Allende *et al.*, 2007).

2.9.1.- Tipos de modelos

Existen diferentes tipos de modelos, en función de la finalidad para la cual se crean o diseñan. Sus clasificaciones son variadas, y buscan dar una idea de sus características esenciales; pueden ser con base a su dimensión, función, propósitos y grado de abstracción. Cada fenómeno de la realidad se puede representar por medio de un modelo; por lo cual, según el número y tipo de fenómenos existentes en el mundo real, será el número y tipo de modelos posibles. Aunque los tipos básicos son icónico, analógico y simbólico o matemático (Candelaria *et al.*, 2011).

Los modelos se pueden clasificar en función de diferentes aspectos:

En función de su objetivo:

- Básicos: su objetivo es ampliar conocimientos
- Aplicados: utilizan modelos básicos para solucionar un problema
- De desarrollo: utilizan todo el conocimiento adquirido para solucionar el problema (France y Thornley, 1984).

Básicos: su objetivo es ampliar conocimientos (y sus beneficios no son cuantificables, excepto por evidencias históricas). Algunos modelos de tipo básico se han aplicado a estudios relacionados con el engorde de vacuno de carne (Oltjen, 1986).

Los modelos de tipo aplicado y los de desarrollo tienen por objeto solucionar un problema. En el caso de los modelos de tipo aplicado la solución implica una ampliación del conocimiento. Las modificaciones del modelo de Sanders y Cartwright, (1979) han sido utilizadas para evaluar el efecto de la producción lechera sobre la eficiencia del rebaño.

En los modelos de desarrollo, se utiliza todo el conocimiento adquirido para solucionar un problema. El modelo presentado por Stuth *et al.*, (1999) tiene como objetivo la predicción, a partir de los análisis de heces, del nivel nutricional de los rebaños de vacuno de carne, y de ello derivar recomendaciones directas para el ganadero.

Una segunda clasificación de los modelos se puede realizar en función de aspectos relacionados con su construcción: dinámicos o estáticos, mecanicistas o empíricos y estocásticos o deterministas:

- Estáticos: representan el sistema en un instante dado, entre los modelos estáticos de interés en ganadería se refiere a las tradicionales tablas de necesidades nutritivas de los animales de granja, que están basadas en el uso de los modelos estáticos (I.N.R.A., 1978; A.R.C., 1980; N.R.C., 1985).
- Dinámicos incorporan el tiempo como una variable más del modelo, la mayoría de los modelos en ganadería son dinámicos, en muchos casos introduciendo la variable tiempo en los modelos estáticos (France y Thornley, 1984).
- Empíricos: realizan predicciones mediante relaciones estadísticas obtenidas a partir de datos experimentales, la mayoría de los modelos descritos sobre el metabolismo energético de las vacas son de tipo empírico, puesto que basan sus predicciones en relaciones estadísticas obtenidas a partir de bases de datos propias o de la bibliografía (Sanders y Cartwright, 1979).
- Mecanicistas: describen los mecanismos subyacentes que se combinan para representar el comportamiento de un sistema complejo (Dent *et al.*, 1995). A menudo resulta complicado situar el límite entre modelos mecanicistas y empíricos. Así, un modelo que pretenda simular un sistema ganadero a nivel de rebaño, se podría considerar mecanicista si incluyese referencias al metabolismo de los nutrientes a nivel de animal (Villalba, 2000), aunque estas referencias se basaran en relaciones estadísticas empíricas a un nivel más detallado.

- Deterministas: son los que, con una información conocida, hacen predicciones definitivas. Como el sistema de predicción de las necesidades energéticas.
- Los modelos estocásticos utilizan información que se comporta de una manera probabilística y por lo tanto permiten introducir un componente de aleatoriedad (France y Thornley, 1984). En el ejemplo del cálculo de las necesidades, un modelo estocástico simularía cada animal con cierta variabilidad de manera que el resultado del modelo sería tanto una medida de la media como una medida de la variabilidad de la respuesta, en lugar del valor medio de las variables del modelo (Villalba, 2000).

En función del nivel de descripción:

- Niveles inferiores: describen macromoléculas, órganos, el animal y el rebaño.
- Niveles superiores: integran el modelo de rebaño con modelos económicos y de producción forrajera. Estos se denominan modelos bio-económicos y pueden abarcar una explotación o conjunto de explotaciones, pudiéndose agregar a nivel territorial (Kerselaers *et al.*, 2007).

En función de las salidas del modelo:

- Modelos de optimización: son los que buscan una solución óptima en función de determinadas restricciones (programación lineal multicriterio y dinámica). La salida del modelo encuentra una combinación de factores que minimizan o maximizan uno o varios objetivos. Destaca entre ellos la programación lineal (PL) utilizada mayoritariamente en el campo de la economía agraria durante más de 50 años (Kerselaers *et al.*, 2007).
- Modelos de simulación: obtienen un resultado a partir de grupos de variables predefinidas. La salida del modelo es el resultado de un experimento en el que se valoran unas condiciones concretas (Van Dyne y Abramsky, 1975).

En función de su enfoque:

- Positivo: trata de modelizar el comportamiento actual del ganadero describiendo sus respuestas y tratando de comprenderlas, de manera que prestan menos atención a las causas.
- Normativo: trata de buscar soluciones óptimas a alternativas de gestión de los recursos y de localización, prestando más atención a las normas que rigen los sistemas (Janssen y Van Ittersum, 2007).

2.10.- Uso de modelos en la ganadería

La evolución de los modelos de simulación se ha desarrollado de forma paralela a la del resto de disciplinas científicas. Esto ha significado la evolución hacia un conocimiento cada vez más profundo de los fenómenos aislados, siguiendo los principios del reduccionismo y el mecanicismo, de forma que la mayoría de los modelos de simulación desarrollados representan elementos individuales y aislados del sistema, lo que limita enormemente su aplicación al mundo real (Bernues *et al.*, 1995).

A medida que las ciencias agrarias avanzan, e influenciadas por la teoría de sistemas, los modelos ganan en perspectiva, integrando los diferentes subsistemas agrarios (animal, rebaño, explotación, territorio, mercado, políticas) para tratar de explicar y valorar los sistemas desde sus tres pilares fundamentales: económico, social y medio-ambiental (Oriade y Dillon, 1997).

Estos modelos facilitan la resolución de ciertos problemas complejos o dinámicos que de otra forma serían muy complicados de abordar (Oriade y Dillon, 1997) y por esta razón su uso como sistemas de apoyo a la toma de decisiones está en aumento (Tedeschi, 2006).

En la realización de un modelo, se distinguen dos fases: una cualitativa que se fundamenta en la elaboración de diagramas que muestran la estructura jerárquica de los subsistemas integrantes y los flujos de nutrientes, productos, dinero, etc.; y otra cuantitativa que utiliza las ecuaciones matemáticas para expresar las dinámicas del sistema de manera precisa (Bernues *et al.*, 1995).

Como resultado, el modelo será una representación simplificada de la realidad. De él se espera que represente aquellas facetas del sistema que son relevantes para su aplicación, de modo que el tipo de modelo a utilizar dependerá del uso previsto y de los objetivos del investigador (Dent y Blackie, 1979).

Para ello el investigador debe identificar cuál es la unidad de análisis y cuáles son los procesos modelizados (Thornton, 2009).

2.10.1.- Uso de modelos en la nutrición animal

Los modelos matemáticos son una herramienta valiosa en nutrición animal, se utilizan principalmente para predecir los requerimientos nutricionales del animal: digestión, tasa de pasaje del alimento, crecimiento microbiano en el rumen; para lograr una mejor toma de decisiones respecto al manejo y alimentación de los animales, reduciendo así los costos en la producción animal (Baldwin, 2000).

Consiste en un conjunto de ecuaciones que describen un fenómeno particular y buscan integrar y utilizar el conocimiento existente sobre nutrición animal (Baldwin, 2000).

Los modelos matemáticos generalmente usados en nutrición animal son una combinación de empíricos y heurísticos, estáticos y estocásticos. Los modelos matemáticos más utilizados en nutrición en rumiantes son los elaborados por el Institut National Recherche Agronomique (INRA), Agricultural and Food Research Council (AFRC), Cornell Net Carbohydrate and Protein System (CNCPS) y National Research Council (NRC) (Tedeschi, 2005).

La aplicación de estos modelos en áreas tropicales con ovinos de pelo sugiere la conveniencia de realizar algunos ajustes para mejorar la predicción de la ganancia de peso vivo (Duarte *et al.*, 2009).

2.10.2.- Utilidad de los modelos

El trabajo con modelos de simulación ha puesto de relieve la utilidad de los mismos para diferentes fines:

1. Recopilar y sintetizar lo que se sabe sobre un determinado proceso
2. Comprender la importancia relativa de los elementos de cada sistema
3. Tratar la complejidad de los sistemas dinámicos (“propiedades de emergencia”) de una manera que el enfoque reduccionista no permite (Janssen y Van Ittersum, 2007).
4. Realizar manipulaciones en los sistemas en estudio que de otra manera serían imposibles de practicar por motivos económicos o de tiempo (controlar el ambiente y experimentar con situaciones hipotéticas, estudiar los efectos a largo plazo de distintas opciones)
5. Identificar las mejores estrategias mediante la optimización
6. Poner de relieve las áreas de conocimiento que necesitan más investigación (Janssen y Van Ittersum, 2007).

2.10.3.- Ventajas de los modelos de simulación

Bernues *et al.* (1995) enunciaron las ventajas de los modelos de simulación:

- a) Permite el estudio de sistemas en situaciones en las que la experimentación real sería imposible o muy costosa en recursos humanos y materiales.
- b) Permite el estudio de efectos a largo plazo, ya que el horizonte temporal es fijado por el investigador o usuario.
- c) Permite incorporar los elementos de incertidumbre inherentes a cualquier sistema biológico.
- d) Son capaces de trabajar con un amplio rango de variables que pueden ser modificadas simultáneamente.
- e) Generan gran cantidad de resultados con escaso consumo de tiempo.
- f) Entregan antecedentes para priorizar líneas de investigación para evaluar soluciones a problemas detectados.
- g) Apoyo en la formulación de planes de manejo y desarrollo para una empresa ganadera, señalando tres funciones definidas:

- Cuantificar requerimientos y limitaciones nutricionales
- Investigar los efectos *ex ante* de nuevas opciones tecnológicas
- Definir la pauta para la obtención futura de datos, así como detectar los puntos débiles de un nuevo sistema de producción.

2.11.- Evaluación de un modelo matemático

La evaluación de los modelos matemáticos verifica el grado de precisión y constituye un argumento para su aceptación y utilidad. Sin embargo, un elemento importante dentro de los modelos matemáticos es su constante retroalimentación, lo cual permite mejorar progresivamente su precisión mediante procesos que implican múltiples interacciones o por medio de la modificación o rediseño de su estructura. La calibración es una fase importante en el proceso de construcción del modelo y consiste en la estimación de los parámetros de las ecuaciones que relacionan los componentes del modelo a partir de la información real disponible (Tedeschi, 2006).

El proceso de validación es complejo y comprende las siguientes fases:

- a) Verificación: Evalúa el diseño, la programación y los procesos que realiza el programa.
- b) Análisis de sensibilidad: Evalúa el comportamiento de cada uno de los componentes del modelo representados en determinadas variables de respuesta o variables de salida ante cambios en las variables de entrada (Tedeschi, 2006).

Mediante el análisis de sensibilidad de los modelos se verifica si las estimaciones son adecuadas (Sauvant *et al.*, 1996) y se conoce la influencia de los diferentes componentes del modelo (Ortega *et al.*, 2010).

- c) Evaluación: Compara las predicciones del modelo con datos reales.

En un modelo se busca exactitud que es la capacidad para predecir los valores reales y precisión que significa la habilidad para predecir valores similares constantemente, es decir con poca dispersión, de forma tal que la inexactitud o sesgo es la desviación sistemática de la verdad, mientras que la imprecisión o incertidumbre es una medida de la dispersión de los valores predichos respecto a un punto medio (Tedeschi, 2006).

2.11.1.- Verificación y validación de un modelo

El concepto de verificación y validación en ocasiones se usa de manera indiscriminada, por lo que es importante hacer una diferenciación entre los dos conceptos, ya que la verificación permite cotejar si el modelo se comporta como se diseñó (es capaz de generar conclusiones correctas partiendo de premisas o relaciones causa-efecto), mientras que la validación implica una evaluación más amplia que corrobora si la estructura del modelo es apropiada y establece la capacidad de este para predecir la realidad (Tedeschi, 2006).

Verificación y validación de los modelos son componentes centrales del proceso de modelado e importantes investigaciones se ha centrado en estos temas, incluyendo debates filosóficos a diferenciar la verificación de la validación (Jakeman *et al.*, 2006).

La validación es la aprobación, a través de procedimientos estadísticos adecuados, y un nivel aceptable de confianza, de tal modo, que las interpretaciones para el sistema real, efectuadas a partir de las inferencias obtenidas con el modelo, sean correctas (Aguilar y Cañas, 1992).

Es la comparación de lo simulado y lo obtenido mediante experimentos físicos; por tanto, el proceso determina en qué medida se ajusta el modelo a la representación de la realidad (Barrera y Aguilar, 1996).

2.12.- Técnicas para evaluar un modelo

Algunas técnicas empleadas para evaluar el ajuste de los modelos no lineales se basan en la regresión lineal entre valores observados y predichos, en la cual los valores predichos por el modelo son asignados al eje X y los observados al eje Y, ya que estos presentan una variación natural. Se busca que la regresión lineal tenga un coeficiente de determinación (r^2) cercano a uno, una pendiente cercana a uno y un intercepto cercano a cero. Cuando los valores están por encima de la línea $X = Y$, es decir de la línea cuya pendiente es 1, el modelo sobreestima, en caso contrario (puntos por debajo de la línea), el modelo subestima (Tedeschi, 2006).

2.13.- Origen del modelo

Este modelo de simulación de la partición de nutrientes es una adaptación para ovino de pelo del modelo de simulación del crecimiento, producción y engorde desarrollado para bovinos por Silveira (2000), el cual está basado en los modelos de (ARC,1980), AFRC (Alderman y Cottrill, 1993) y (CSIRO, 1990).

Para adaptar el modelo se han substituido las ecuaciones del AFRC (Alderman y Cottrill, 1993) por las correspondientes a ovino, y la CC se calcula a partir de la variación diaria en PV (peso vivo) según la relación observada en la raza.

2.14.-Descripción del modelo

2.14.1.- Modelo Pampa de corte

Los modelos de simulación son herramientas útiles para reducir tiempo y costos, en comparación con la experimentación clásica empírica. También son capaces de abordar una dinámica compleja y estudia los efectos largo plazo, permitiendo que el investigador pueda controlar el ambiente y las condiciones experimentales (Silveira, 2002).

La evolución histórica de los modelos utilizados en nutrición animal fue revisado por Dumas *et al.* (2008); estos autores explican que los pioneros en la alimentación animal dependían de las matemáticas en su intento de estimar los requerimientos animales de los forrajes para lograr diversas metas de producción. El modelo Pampa de corte se desarrolló con el objetivo de simular el crecimiento del ganado de carne en una forma dinámica y mecanicista. El comportamiento Animal individual se genera a través de dos sub-modelos: el primero simula el consumo de alimentos y la digestión y genera energía metabólica diaria y proteínas producción; el segundo sub-modelo considera las tasas de producción y simula cambios peso vivo en el animal (Silveira, 2002).

2.15.- Digestibilidad

La digestibilidad de los nutrientes es la diferencia, expresada como un porcentaje, entre los nutrientes presentes en el alimento ingerido y la fracción correspondiente no digerida que aparece en la excreta. La importancia de determinar la digestibilidad de un alimento radica en que es un valor variable entre distintos alimentos y posee un valor práctico; una digestión incompleta frecuentemente representa pérdidas en la cadena productiva (Londoño, 1993).

La digestibilidad de los forrajes permite estimar la proporción de nutrientes presentes en el alimento, que tienen potencial de ser absorbidos por el tracto digestivo (Church y Pond, 1987). El conocimiento de la degradabilidad, la digestibilidad de los alimentos son fundamentales para establecer su valor nutritivo y por tanto, para la formulación de raciones para rumiantes (Bochi, 1999).

2.16.- Técnicas de digestibilidad

2.16.1.- Digestibilidad *in situ* de forrajes

Los métodos para evaluar la digestibilidad *in situ* de forrajes son el resultado de muchos años de investigación y pruebas de ensayo y error, partiendo desde el material que se va a usar para las bolsas que se ingresan en el rumen, la porosidad que está ligada al material usado, el tamaño de las muestras, la posición de las bolsas en el rumen, el número de bolsas por incubar, entre otros (Orskov *et al.*, 1980).

La técnica de digestibilidad *in situ* (DISMS) utiliza bolsas sintéticas para medir la digestión de los forrajes a nivel ruminal. Este método ha ganado gran aceptación cuando se requiere medir la digestibilidad aparente de materia seca, fibra y nitrógeno, debido principalmente a la rapidez con que se puede obtener resultados y porque no demanda de equipos y materiales que requieren las otras técnicas (Quinn *et al.*, 1938; Mehrez y Orskov, 1977).

La utilidad y confiabilidad de esta técnica depende de factores tales como la cantidad de la muestra, y del tamaño de la bolsa y del tamaño de la partícula de la muestra (Torres *et al.*, 2009); otra alternativa para medir la digestibilidad de los forrajes es mediante el uso de enzimas (DCMS). El líquido ruminal es reemplazado por una solución de celulasa, enzima proveniente del hongo *Penicillium funiculosum*. Este método es de fácil aplicación y de bajo costo, no siendo necesario el uso de animales de experimentación (Burghara y Sleeper, 1986).

2.16.2.- Digestibilidad *in vivo* de forrajes

Los métodos de digestibilidad *in vivo* son métodos un poco más costosos, debido a que se deben establecer dietas completas para un grupo de animales, y estos deben ser sometidos a condiciones de jaulas metabólicas para el consumo de un alimento específico y sus heces recolectadas para realizar los estudios respectivos. Estas jaulas metabólicas corresponden a compartimientos en los cuales el animal solo tendrá acceso al alimento por estudiar y agua, además de permitir la recolección de las heces y la orina, que serán sometidas a pruebas específicas para determinar los nutrientes producto de la digestión: materia seca, ceniza, proteína, extracto etéreo, fibra cruda, fibra total. Estas pruebas, así mismo se realizan para el alimento rechazado por el animal, tomado directamente desde la jaula metabólica. (Raymond *et al.*, 1953).

En esta técnica, si se tienen en cuenta los conceptos básicos de digestibilidad, para determinarla simplemente se tendría que obtener la diferencia entre los nutrientes consumidos y los que aparecen en las heces, midiendo cada clase de nutriente; todo esto facilitado por un marcador o colorante que indica el tránsito del alimento desde el inicio hasta final del tracto digestivo. En el caso de la medición de la digestibilidad en los rumiantes, tiende a ser más complicada que una simple recolección de heces, debido a la naturaleza del rumen y sus procesos (Maynard, 1951).

2.16.3.- Digestibilidad *in vitro* de forrajes

La técnica de digestibilidad *in vitro* (DIVMS) simula la digestibilidad del tracto digestivo del rumiante y requiere de la preparación de un inóculo que contenga microorganismos viables (Tilley y Terry, 1963). El inconveniente de esta técnica reside en la variabilidad de sus resultados, debido a que la microflora ruminal está influenciada por el tipo y cantidad de dieta proporcionada al animal (Torres *et al.*, 2009).

La técnica *in vitro* de producción de gases ofrece la capacidad de predecir la tasa de digestión de las diferentes fracciones de carbohidratos; es útil para determinar y cuantificar diferencias nutricionales atribuidas a los métodos de preservación de especies forrajeras y estado de madurez de la planta, comparando el desempeño de gramíneas y leguminosas en diferentes estados de madurez y de ensilajes de estas mismas (Pell *et al.*, 1997).

Esta técnica permite estudiar la degradación de cada uno de los constituyentes del alimento o fracciones alimenticias (monosacáridos, pectinas, almidón, celulosa y hemicelulosa) y así se puede diferenciar que elementos inhiben y que otros aumentan la actividad microbiana. De esta manera se puede establecer la cinética de la fermentación, teniendo en cuenta las proporciones de partículas solubles, insolubles degradables, y no degradables del alimento (Getachew *et al.*, 1998).

Por tanto, la técnica *in vitro* es una herramienta de vital importancia para las ciencias agropecuarias, al estimar la capacidad de degradación de ciertos forrajes que componen la dieta de las especies ovinas, caprinas y bovinas del país, que serán fuentes de proteína para las poblaciones humanas en las diferentes regiones del mundo (Vargas *et al.*, 2013).

III.- Material y Métodos

3.1.- Localización del área de estudio

La investigación sobre la validación del modelo de simulación, se realizó en las instalaciones de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, localizado en el rancho San Francisco kilometro 8 de la carretera Terán- Vicente Guerrero, ejido Emiliano Zapata del municipio de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. Se encuentra localizado entre los paralelos 16°38' y 16°51' de latitud norte; los meridianos 93°02' y 93°15' de longitud oeste; con una altitud de 550 msnm y con una temperatura de 20° a 28° C (INEGI, 2008).



Figura 1.- Localización del área de estudio (INEGI, 2008).

3.2.- Metodología

3.2.1.- Análisis de laboratorio

3.2.1.1.- Bromatológico

Se realizó los análisis de laboratorio de *Leucaena leucocephala* var. Cunningham y *Panicum máximum* cv Tanzania, correspondientes a materia seca (MS), proteína cruda (PC), fibra acida detergente (FAD), fibra neutro detergente (FND) y cenizas. Para la determinación PC, MS y cenizas se utilizó la metodología de la AOAC (2004) y para la determinación de FND y FAD el método modificado de Van Soest (1967). Estos análisis fueron efectuados en el laboratorio de bromatología de la FMVZ-UNACH y en los laboratorios de ECOSUR.

3.3.- Modelo de simulación en la alimentación de ovinos

La metodología empleada para validar el modelo de simulación en la evaluación productiva de ovinos pelibuey alimentados con *Leucaena leucocephala* var. cunningham y *Panicum máximum* cv Tanzania”, comprende las siguientes etapas.

- 1) Recolección mínima de datos sobre las características nutricionales del pasto Tanzania y Leucaena
- 2) Se desarrolló los parámetros necesarios para adaptar el modelo de crecimiento ovino desarrollado por Silveira (2002)
- 3) Se calibro el modelo, para simular las estrategias de alimentación en ganado ovino.

3.3.1.- Descripción del modelo Silveira (2002)

El modelo fue desarrollado con el fin de simular la ganancia de peso de ovinos, mediante el uso de ecuaciones diferenciales integrales. Para el desempeño individual de los animales, se consideran dos sub-modelos. El primer sub-modelo simula la ingestión y digestión de los alimentos y predice las producciones diarias de la cantidad de energía metabólica y la proteína disponible para la producción. El segundo considera estas producciones y predice los cambios en el peso corporal del animal. Se utilizo el SB- ModelMaker, versión 3.0.3.

Este modelo está dividido en dos secciones funcionales: una dinámica y una estática.

La sección dinámica, describe la digestión y el flujo de los alimentos a través del tracto digestivo para simular el aporte de energía y proteína metabolizables a partir del alimento; y está basado en los trabajos de Illius y Gordon (1991) y Sniffen *et al.*, (1992).

La sección estática, estima los requerimientos potenciales de energía y proteína metabolizables del animal con base en el sistema AFRC (1993) y considera las tasas de aporte de energía y proteína metabolizables de la primera sección para simular las ganancias de peso diario.

El consumo voluntario de materia seca (DMI) del animal está determinado por las limitantes físicas para el consumo, causado principalmente por el tamaño de las partículas en el rumen y la baja digestibilidad de los alimentos, ya que si el aporte de nutrientes cubre los requerimientos del animal, éste dejará de comer.

3.3.2.- Generalidades de la validación del modelo

El modelo a validar simula el comportamiento de un sistema de producción ovina en la etapa crecimiento, considerando el desempeño nutricional animal.

Para facilitar la comprensión del funcionamiento del modelo, se ha dividido en dos bloques principales a) evaluación nutricional del animal, conformado por los mecanismos de mantenimiento y crecimiento que determinan el comportamiento productivo de los animales b) componentes de la ración, que incluye la evaluación nutritiva del forraje.

3.3.3.- Modelo animal

Como se ha mencionado el modelo permite estimar el peso vivo (P) de las distintas categorías cada 15 días, a partir del peso de la quincena anterior, sumándole una ganancia diaria de peso (GDP) multiplicada por los días del mes (se asume 30 días promedio).

3.4.- Parámetros

3.4.1.- Ambientales

Los parámetros ambientales fueron tomados de la estación meteorológica del municipio de Chiapa de Corzo, Chiapas, y de las estaciones la escalera y cañón del sumidero CFE, cercanos al área de estudio. Los datos utilizados fueron temperatura máxima, media y mínima, precipitación, humedad relativa, velocidad de los vientos, horas luz, pero las estaciones no tienen registradas este dato, por lo que se procedió a utilizar un modelo para simular las horas luz llamado Angot, que se obtiene mediante una ecuación que utiliza latitud para estimar dicha información. Los parámetros fueron tomados diariamente durante el año 2014.

Cuadro 2.- Parámetros ambientales en promedio por año.

	Temperatura			Promedio del año 2014			Horas luz
	Máxima (°C)	Media (°C)	Mínima (°C)	Humedad relativa %	Viento (km/h)	Precipitación (mm)	
Tuxtla Gutiérrez							
2014	30.02	24.8	20.6	70.0	5.9	3.5	12.00

3.4.2.- Animal

Los parámetros del animal necesarios para el modelo son los requerimientos nutricionales (edad, peso y ganancia de peso) y consumo de materia seca.

3.4.3.- Alimento

se utilizó de Leucaena y Tanzania, el contenido de proteína cruda, fibra neutro detergente (FDN), fibra ácido detergente (FDA), el contenido celular, energía, tasa de degradación, digestibilidad de las paredes celulares, digestibilidad.

Cuadro 3.- Análisis químico proximal del alimento

%	PC	MS	Ceniza	EE	FDN	FDA
Leucaena	25.16	93.03	10.72	6.78	51.42	36.16
Tanzania	8.06	89.56	12.9	1.8	76.04	46.84

3.5.- Construcción y validación del modelo

3.5.1.- Datos utilizados para comparar las predicciones del modelo

Se utilizó la base de datos de un trabajo anterior (Pérez *et al.*, 2011), constituido por 30 borregos, machos enteros Pelibuey, con un peso vivo promedio de 18.0±3.0 kg. Previo al periodo de evaluación los ovinos fueron sometidos a una desparasitación interna por vía oral (sales de valvacen) y se les aplicó una inyección de vitaminas (ADE) vía intramuscular.

El alimento lo proporcionaban *ad libitum*, se utilizó como estrategia ofrecer el alimento dos veces al día (8:00 y 16:00 horas), al día siguiente se recolectaba el alimento rechazado para estimar así, el consumo diario de alimento, se les ofreció a los animales 10% más del alimento requerido diariamente a efecto de que el ovino tuviera alimento en todo momento durante las 24 horas.

Los corderos fueron alojados en un corral de confinamiento (50 metros cuadrado), con 75% de la superficie techada y 25% a cielo abierto, respectivamente, construida a base de malla borreguera y piso de tierra. Se utilizaron comederos lineales y bebederos automáticos. En cada cordero se registro el cambio de peso vivo (gramos/día) cada 5 días, previo ayuno de 12 horas. La estimación de la ganancia diaria de peso se hizo mediante la diferencia entre peso final menos peso inicial dividido entre el número de días evaluación, utilizando una balanza electrónica graduada (Tor-Rey mod. CRS 500/1000).

El consumo de materia seca (MS g/día) fue estimada a través de la diferencia entre MS ofrecida y MS rechazada.

Los datos sobre la composición de alimentos, se obtuvieron de un trabajo previo (Pérez *et al.*, 2011) y se utilizó el AFRC (1993), con la finalidad de poder calcular el aporte total de la dieta y utilizar los datos para aplicar el modelo.

Cuadro 4.- Dietas a base de diferentes porcentajes de inclusión de Tanzania y Leucaena.

DIETAS	<i>P. maximum</i> (%)	<i>L. leucocephala</i> (%)
D1	100	0
D2	80	20
D3	60	40

Cuadro 5.- Consumo voluntario (g/ovino-1) de niveles de inclusión de *Leucaena leucocephala*.

Componente	Dietas		
	D1	D2	D3
MS	860	819	1062
MO	730	705	928
FDN	562.7	497	551
FDA	427	395	455.8

3.6.- Análisis estadístico

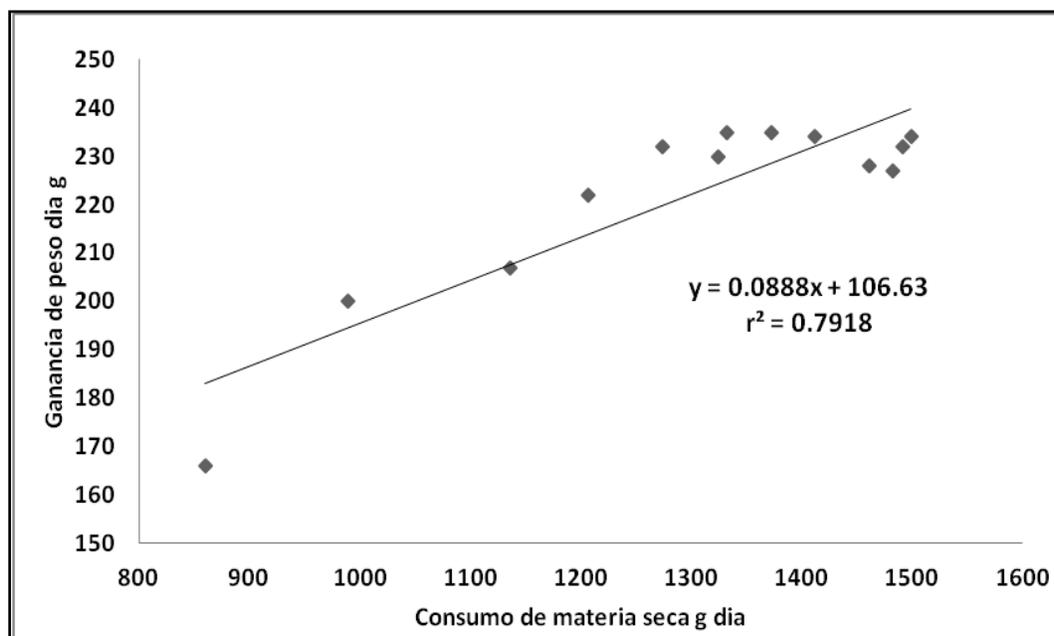
Para evaluar la relación existente entre los datos observados y simulados, se utilizará una regresión lineal simple, considerando que existe una r^2 , mayor a 0.6. Una vez que se ha obtenido esta regresión, se estima un intervalo de confianza para los datos observados y se grafican con los datos simulados para demostrar, que los datos simulados están dentro del intervalo de confianza.

IV.- Resultados y discusión

4.1.- Construcción y validación del modelo

Se realizó la construcción del modelo el cual se calibro para poder introducir los datos y realizar la simulación. A continuación, se observa la relación entre el consumo de materia seca y la ganancia de peso (estos datos fueron proporcionados por Pérez *et al.*, 2011).

Figura 3.- Relación entre el consumo de materia seca y la ganancia de peso en ovinos.

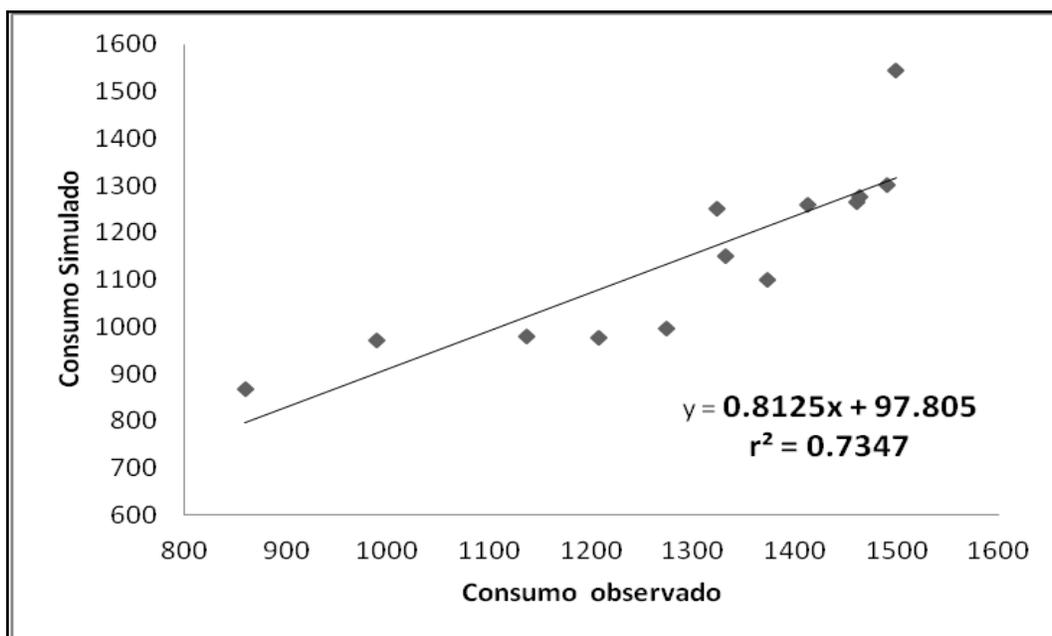


En esta grafica se observa que a mayor consumo de materia seca se incrementa la ganancia de peso de los ovinos, teniendo una r^2 de 0.7918. (Grafica elaboración propia con datos de Pérez, *et al.*; 2011)

4.2. Resultados de la simulación

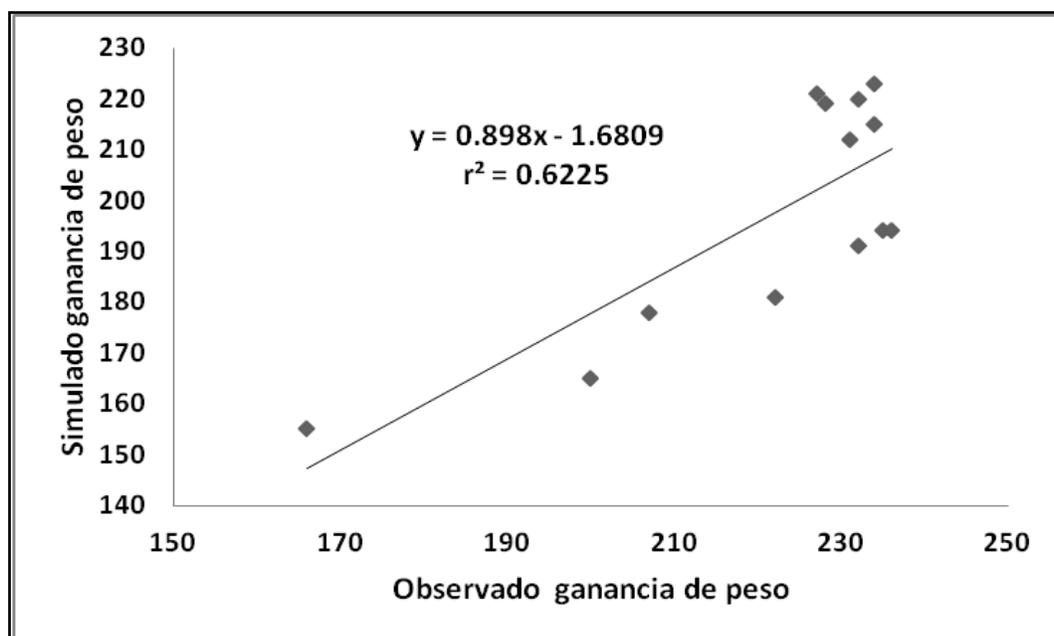
En la figura 4, se muestran los resultados observados y simulados por el modelo sobre el consumo de materia seca, estos resultados presentan una r^2 de 0.7347, por lo que se considera que se encuentra dentro de los valores permitidos de los modelos. A diferencia de Duarte *et al.*, 2009, que obtuvo una respuesta lineal con un valor r^2 de 0.495 utilizando un modelo para ovinos pelibuey.

Figura 4.- Comparación entre los datos observados vs simulados en el consumo de materia seca, en ovinos de pelo



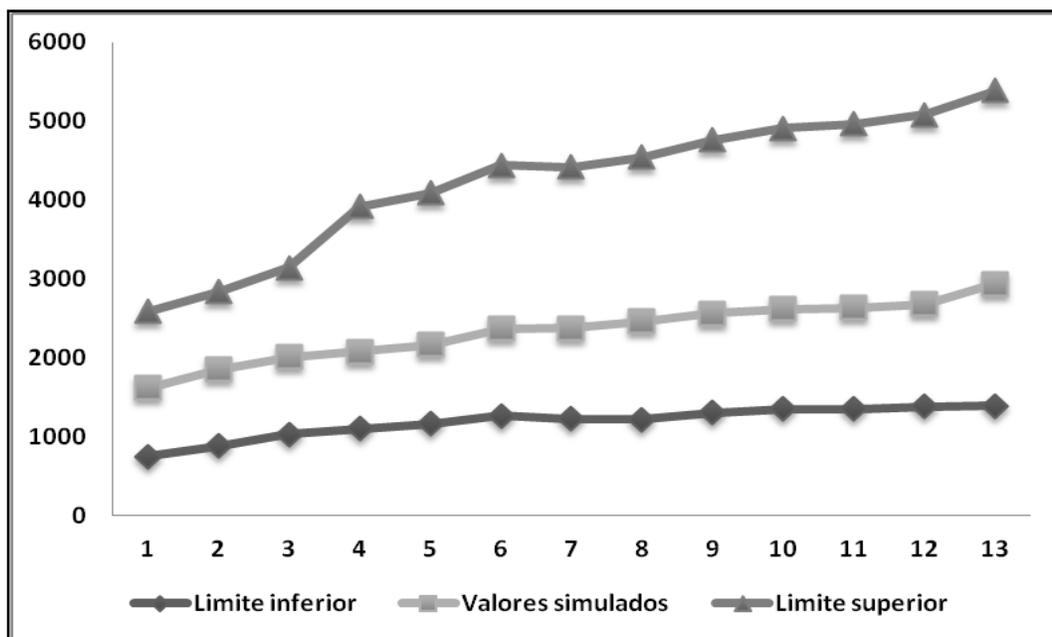
La figura 5, muestra los resultados observados y los simulados en la ganancia de peso de los ovinos, en cual se obtuvo una r^2 de 0.6225, por lo que se considera que se encuentra dentro de un rango medio permitido en la simulación del modelo.

Figura 5.- Comparación entre los datos observados y los simulados en la ganancia de peso en ovinos de pelo.



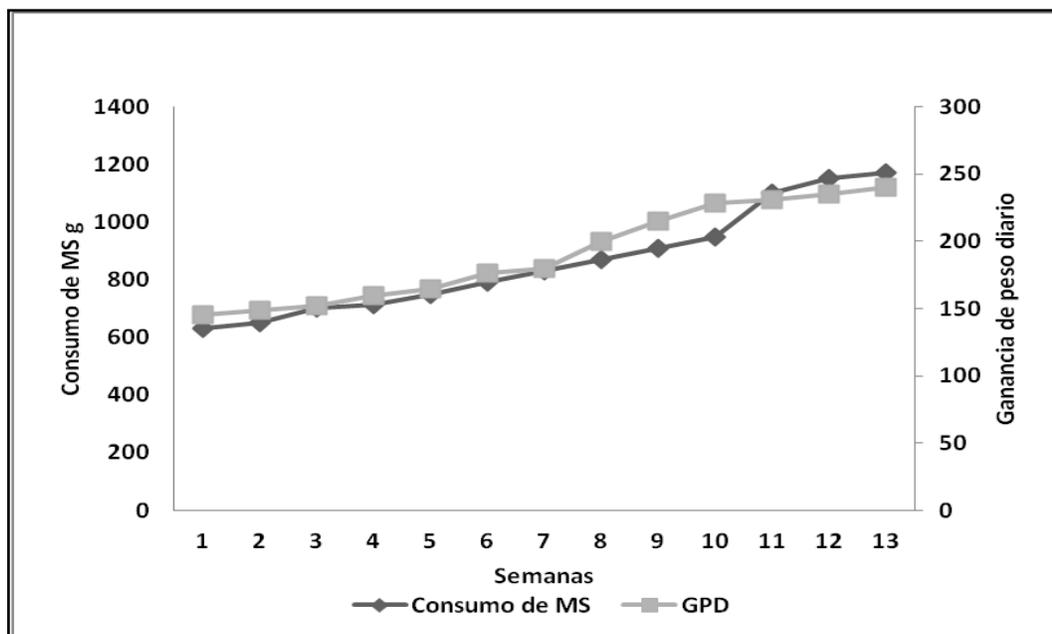
En Figura 6 se compara el intervalo de confianza entre los datos observados en el consumo de materia seca y los datos simulados; los cuales se encuentran dentro de los límites estimados, por lo que se considera que el modelo puede predecir el consumo y la ganancia de peso.

Figura 6.- Intervalos de confianza entre datos observados y simulados para consumo de materia seca en ovinos de pelo.



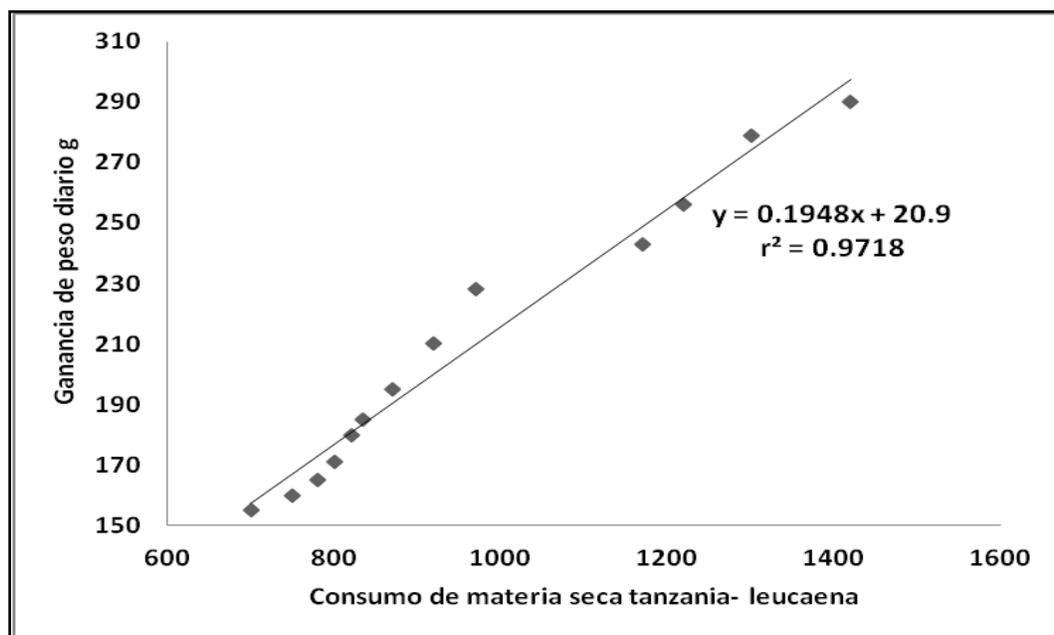
En la figura 7, se muestran los datos obtenidos mediante simulación en el consumo de la materia seca y la ganancia de peso de los ovinos; lo cual es similar a los obtenidos con los datos observados.

Figura 7.- Consumo de materia seca y ganancia de peso en ovinos alimentados con pasto Tanzania.



En la figura 8, se observa que el modelo mejoro la predicción entre el consumo y la ganancia de peso ya que se presenta una $r^2=0.7918$ contra una $r^2=0.9718$, esto puede deberse a que para mejorar la precisión del modelo se utilizó una herramienta que nos permite mejorar el ajuste mediante la semibilidad.

Figura 8.- Relación entre consumo de materia seca y ganancia de peso en ovinos alimentados con Tanzania 60%- Leucaena 40%, mediante simulación.



El procedimiento de validación involucra la comparación del desempeño del modelo respecto a registros reales del sistema modelado o a la apreciación subjetiva de las salidas que el modelo debería proporcionar, si se tiene un conocimiento suficientemente amplio de dicho sistema (Dent y Blackie, 1979). Habiendo constatado la coherencia global en los resultados obtenidos con el modelo, se procede a contrastarlo con registros de producción y de esta manera verificar el ajuste de sus resultados del modelo a observaciones reales.

A continuación, se presenta las gráficas con las simulaciones del modelo del consumo de materia seca y ganancia de peso con tres tratamientos (100% Tanzania- 0% Leucaena, 60% Tanzania- 40% Leucaena y 80% de Tanzania y 20% Leucaena) en ovinos de pelo.

Figura 9.- Consumo simulado de materia seca en tres tratamientos en ovinos de pelo (100T- 0L, 60T-40L y 80T-20L).

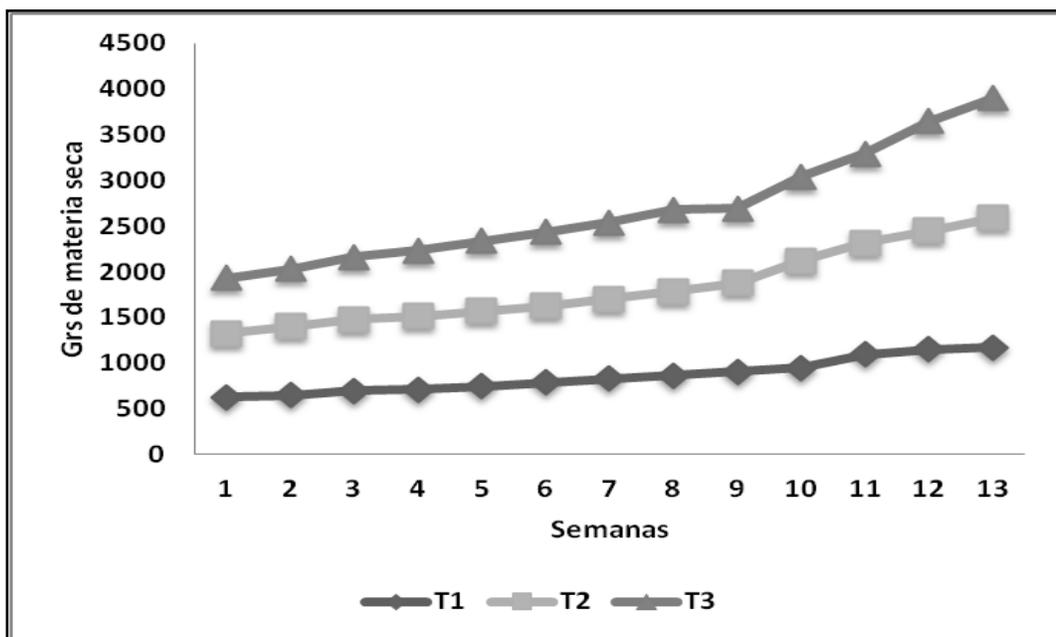
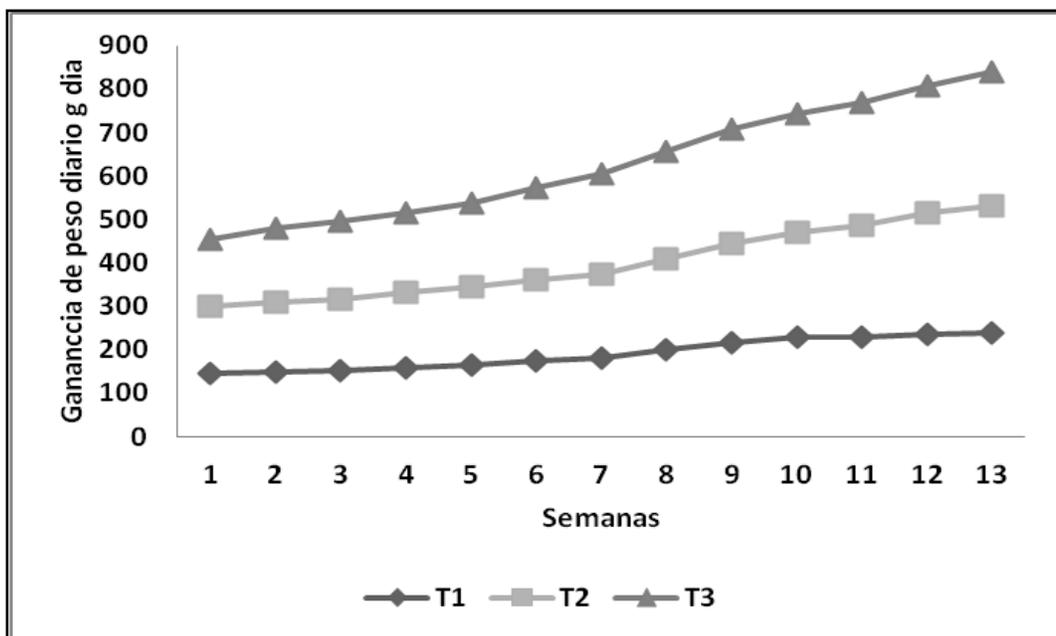


Figura 10.- Ganancia de peso simulado con tres tratamientos de Tanzania y Leucaena en ovinos de pelo (100T- 0L, 60T-40L y 80T-20L).



V.- Conclusiones

Con base en los resultados anteriores se concluye que:

- Es posible simular el consumo de materia seca y la evolución de los pesos vivos de ovinos de pelo en crecimiento de acuerdo con los datos utilizados en este modelo.
- Los modelos de simulación debidamente contruidos y validados mejoran la eficiencia en los procesos de investigación permitiendo hacer una evaluación antes de implementar estrategias en el sistema real.
- Las adecuaciones propuestas permiten emplear el modelo Pampa de corte en ovinos de pelo en la etapa de crecimiento.
- El modelo asemeja los datos reales a los simulado, lo que nos permite recomendarlo para su uso
- El modelo es una herramienta para tomar decisiones y evaluar escenarios que puede generar información en el manejo productivo en los ovinos de pelo antes de realizar la experimentación en campo, lo que nos permite tener ahorros en los costos y el tiempo.

VI. - Literatura citada

- Abasto F. P., Aguilar G. C., García G. F. y García M. A. 1999. Modelo de simulación para el estudio del manejo de sistemas pastoriles de ovejas lecheras East Friesian. Validación del modelo. Ciencia e investigación agraria 26: 49-60. Vol. 26, no. 1.
- AFRC. 1993. Energy and protein requirements of ruminants. An Advisory manual prepared by the AFRC Technical Committee on Responses to nutrients. CAB International. Wallingford.
- Aguilar, G.C. y Caña, C.R., 1992. Simulación de sistemas: aplicación en producción animal. En: Simulación de sistemas pecuarios. RISPA. p. 189-282.
- Aguilar, C., R. Allende, D. Ocampos y F. García. 2000. Producción de Leche a Pastoreo en el Subtrópico con Ganado Cruza Holando Cebú: Desarrollo y validación de un modelo de simulación. Archivos de Zootecnia 49: 457-468.
- Allende, R., Gompertz, G., Avila, J., Gallardo, M. y García, F. 2007. Grazing Beef Cattle Fattening Simulation: Model Validation and Experimentation. Asian Australasian Journal of Animal Science 2007(in submitted).
- Allison, C.D., 1985. Factors affecting forage intake by ruminants: a review. Journal Range Management. 38(4):305-311.
- Anguiano, J. M.; Aguirre, J. y Palma, J. M. 2012. Establecimiento de *Leucaena leucocephala* con alta densidad de siembra bajo cocotero (*Cocus nucifera*). Revista Cubana de Ciencia Agrícola 46: 103-107.
- AOAC Association of Official Analytical Chemist 2004. Official methods of analysis. AOAC. Arlington, VA.
- ARC.1980. The Nutrient Requirements of Ruminant Livestock. Commonwealth Agric. Bureaux, Slough. Pp. 351
- ARC,1984. The nutrient requirements of ruminants livestock. London: Commonwealth Agricultural Bureaux, 351p
- Arteaga, C. J. D. 2003. La industria ovina en México. Memoria Simposium de Ovinos. SAGARPA, INIFAP, Fundación Hidalgo PRODUCE, MCO, FIRA. Pachuca, Hidalgo, México. pp. 1-9.
- Azzam, S.M., Kinder; J.E y Nielsen N. K 1990. Modellig reproductive management systems for beff cattle. Agric. Sys. 34:103-122
- Bacab, H. M.; Madera, N. B.; Solorio, F. J., Vera, F. y Marrufo, D. F. 2013. Los sistemas silvopastoriles intensivos con *Leucaena leucocephala*: una opción para la ganadería tropical. Avances en Investigación Agropecuaria. 17(3): 67-81 Issn 0188789-0

Baldwin R.L. 2000. History and future of modeling nutrient utilization in farm animals. Modelling Nutrient Utilization in farm animals, CAB International. EUA. 1-19 P

Barrera V. y Aguilar C. 1996. Modelo de simulación para el estudio de la sostenibilidad del sistema de producción de pequeños productores de Carchi, Ecuador, I. desarrollo del modelo y validación, Archivos latinoamericanos de producción animal 4:135-166.

Barros-Rodríguez M, Solorio-Sánchez J, Ku-Vera J, Ayala-Burgos A, Sandoval-Castro C, y Solís-Pérez G. 2012. Productive performance and urinary excretion of mimosine metabolites by hair sheep grazing in a silvopastoral system with high densities of *Leucaena leucocephala*. Tropical Animal Health and Production 44, 1873-1878

Barrett, J.R. y Nearing, M.A. 1998. Humanization of decision support using informations from simulations. p. 1-17. En: Peart R. and R.B. Curry (eds) Agricultural System Modelling and Simulation. New York: Marcel Dekker.

Beer, J.; Harvey, C.; Ibrahim, M.; Harmand, J.M.; Somarraba, E. y Jimenez, F. 2003. Servicios ambientales de los sistemas agroforestales. Agroforestería en las Américas 10: 80-87.

Bernues A, Herrero M y Dent J.B.1995. Simulation of livestock farming systems: a review of sheep models at animal, herd and farm levels. Investigación Agraria, Producción y Sanidad Animales. 10(3): 243-272.

Bochi-Brum O, Carro D, Valdés C, González J. y López S., 1999. Digestibilidad in vitro de forrajes y concentrados: efecto de la ración de los animales donantes de líquido ruminal. Arch Zoot; 48:51-61.

Burghara S.S. y Sleeper DA. 1986. Digestion of several temperate forage species by a prepared cellulase solution. Agron J 78: 94-98

Candelaria Martínez Bernardino, Ruiz Rosado Octavio, Gallardo López Felipe, Pérez Hernández Ponciano, Martínez Becerra Ángel y Vargas Villamil Luis; 2011. Aplicación de modelos de simulación en el estudio y planificación de la agricultura revisión, Tropical and Subtropical Agroecosystems, 14: 999-1010

Cardozo Osvaldo y Ferreira Gustavo, 1994. Engorde de novillos, un modelo bio-económico, INIA , Montevideo, Uruguay.

Castellaro G. 2003. Crecimiento de praderas mesofíticas a largo plazo, en respuesta a factores edafoclimáticos y estrategias de defoliación. Tesis, Magíster en Ciencias Animales, Facultad de Agronomía e Ingeniería Forestal, Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile. 132 pp.

Combellas, Josefina. 2001. Comportamiento de ovejas tropicales y sus cruces en un sistema de producción intensivo. Informe anual IPA. Facultad de Agronomía, UCV. 83p.

Church D. y Pond W. 1987. Fundamentos de nutrición y alimentación de animales. México: Limusa.

Dagang, B. K. y Nair, K. R. 2003. Silvopastoral research and adoption in Central America: recent findings and recommendations for future directions. *Agroforestry Systems* 59: 149-155.

Dent JB y Blackie M.J.1979. Systems simulation in agriculture. Applied Science Publishers Ltd. London.

Dent JB, Edwards-Jones G y McGregor M.J. 1995. Simulation of ecological, social and economic factors in agricultural systems. *Agricultural Systems*. 49(4): 337-351.

Duarte Vera F., Sandoval Castro C., Sarmiento Franco L., 2009. Empleo del modelo SRNS, para predecir la ganancia de peso en ovinos machos pelibuey en crecimiento. *Arch. Zootec.* 58(224): 671-681.

Dumas, A., 2008. Mathematical modelling in animal nutrition: a centenary review. *Journal of Agricultural Science* v.126: (2) P. 123-142

France J y Thornley JHM 1984. Mathematical models in agriculture. Butterworths. London.

FAO, 2004: Base de datos FAOSTAT.www.apps.fao.org

Finlayson, J.D, Cacho O. y Bywater A. 1995. A Simulation Model of Grazing Sheep: I. Animal Growth and Intake. *Agricultural Systems* 48:1-25.

Gálvez, G.2008. Modelación del crecimiento de las plantas. Modelación de cultivos agrícolas. En: Seminario de modelación de cultivos. (1:2008 mar. 13-14).

García, J, M. 2008. Teoría y ejercicios prácticos de Dinámica de Sistemas. Fundación Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). Cataluña, España. 84 p.

Getachew G, Blumell M, Makkar H.P. y Becker K. 1998. In vitro measuring techniques for assessment of nutritional quality of feeds: a review. *Anim Feed Sci Technol.*; 72(3-4): 261- 81.

Holmann F., 2002. El uso de modelos de simulación como herramienta para la toma de decisiones en la promoción de nuevas alternativas forrajeras: el caso de Costa Rica y Perú. XVI Reunión Latinoamericana de Producción Animal (ALPA), Montevideo, Uruguay.

Illius AW y Gordon I.J. 1991. Prediction of Intake and Digestion in Ruminants by a Model of Rumen Kinetics Integrating Animal Size and Plant Characteristics. *Journal of Agricultural Science*. 116: 145-157.

INEGI. 2008. <http://www.inegi.gob.mx/estadistica>. Consulta 13 de junio del 2014.

INRA, 1990. Ovinos. En: *Alimentation des Ruminants*. Ed. INRA. Publications. 403 p. Versailles.

Jakeman, AJ, RA Letcher, y JP Norton, 2006. Diez pasos iterativos en desarrollo y evaluación de modelos ambientales, *Environmental Modelling & Software* 21 (5), 602-614

Janssen S y van Ittersum M.K. 2007. Assessing farm innovations and responses to policies: A review of bio-economic farm models. *Agricultural Systems*. 94(3): 622-636.

Karki, U. y Goodman, M. S. 2010. Cattle distribution and behavior in southern-pine silvopasture versus open-pasture. *Agroforestry Systems* 78: 159-168.

Kerselaers E, De Cock L, Lauwers L y Van Huylenbroeck G., 2007. Modelling farm-level economic potential for conversion to organic farming. *Agricultural systems*. 94(3): 671-682.

Ku-Vera, J.C., Ayala-Burgos, A.J., Solorio-Sánchez, F.J., Briceño-Poot, E.G., Ruiz-González, A., Piñeiro-Vázquez, A.T., Barros-Rodríguez, M., Soto-Aguilar, A., Espinoza-Hernández, J.C., Albores-Moreno, S., Chay-Canul, A.J., Aguilar-Pérez, C.F. y Ramírez-Avilés, L. 2013. Tropical tree foliages and shrubs as feed additives in ruminant rations. En: *Nutritional Strategies of Animal Feed Additives*. Nova Sci. Publishers. New York. USA. Pp. 59-76

Ku Vera J.C, Briceño E.G., Ruiz A., Mayo R., Ayala A.J., Aguilar C. F., Solorio F.J. y Ramírez L., 2014: Manipulación del metabolismo energético de los rumiantes en los trópicos: opciones para mejorar la producción y la calidad de la carne y leche. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, Tomo 48, Número 1

Krishnamurthy, L. y Ávila, M. 1999. *Agroforestería básica*. Serie de textos básicos para la formación ambiental No. 3. Editorial PNUMA. México. 340 pp.

Londoño, H. F. 1993. *Fundamentos de alimentación animal*. Managua, Nicaragua.

Macedo J., Fernández S.L., Nascimento DE G. F., Olalquiaga Pérez P., Romano V. T., Oiti J. y De Moura Assis R. 2012. Voluntary intake, apparent digestibility and nitrogen balance in ewes fed diets with different neutral detergent fiber levels. *Ci. Anim. Bras.*, Goiânia, v.13, (1) p. 33 – 40

Magaña Humberto Lucero, Briones Encinia Florencio, Lucero Magaña Froylán Andrés, Hernández Meléndez Javier, Castillo Rodríguez Sonia Patricia y Martínez

González Juan Carlos; 2011. Estrategias para incrementar la producción de carne de ovinos de pelo en la Huasteca Potosina, México, *Zootecnia Trop.*, 29(3): 255-260.

Mahecha, L. 2002. El silvopastoreo: una alternativa de producción que disminuye el impacto ambiental de la ganadería bovina. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias* 15: 226-231.

Martínez, A., 1988. Diseño experimental, métodos y elementos de teoría. México. Ed. Trillas, p 161-184.

Martínez H.J.M. 2007. Desarrollo sexual de corderos Pelibuey bajo diferentes manejos nutricionales en clima cálido subhúmedo. Tesis de Doctorado. Colegio de Postgraduados- Campus Veracruz.

Maynard LA. 1951. *Animal nutrition*. 3rd. ed. New York: McGraw-Hill; p. 474.

Mehrez AZ, Orskov ER. 1977. A study of the artificial fibre bag technique for determining the digestibility of feeds in the rumen. *J Agric Sci* 88: 645-650.

Murgueitio, E. y Solorio, B. 2008. El Sistema Silvopastoril Intensivo, un modelo exitoso para la competitividad ganadera en Colombia y México. En: V Congreso Latinoamericano de Agroforestería para la Producción Pecuaria Sostenible. Universidad Rómulo Gallegos, Universidad Central de Venezuela, Universidad de Zulia. Venezuela (Publicación electrónica).

Murgueitio, E. y Ibrahim, M. 2008. Ganadería y medio ambiente en América Latina. En: Murgueitio, E.; Cuartas, C. y Naranjo J. (editores). *Ganadería del Futuro: Investigación para el desarrollo*. Fundación CIPAV. Cali, Colombia. pp. 19-40.

Musálem, M. A. 2002. Sistemas agrosilvopastoriles: una alternativa de desarrollo rural sustentable para el trópico mexicano. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente* 8: 91-100.

Nair, P. 1993. *An introduction to agroforestry* Dordrecht, The Netherlands. Kluwer Academic.

NRC, 1985. *Nutrient requirements of sheep*. National Academy Press, Washington, D. C.

NRC, 1995. *Nutrient requirements of sheep*. National Academy Press, Washington, D. C.

Figura 10.- Ganancia de peso simulado con tres tratamientos de Tanzania y *Leucaena* en ovinos de pelo (100T- 0L, 60T-40L y 80T-20L).

Oltjen, J.W., Bywater, A.C., R.L. y W.N. Garrett. 1986. Development of a dynamic model of beef cattle growth and composition. *J. Anim. Sci.* 62: 86-97.

Oriade CA y Dillon C.R.1997. Developments in biophysical and bioeconomic simulation of agricultural systems: a review. *Agricultural Economics*. 17(1): 45-58.

Orskov ER, Hovell D, Mould F. 1980.The use of the nylon bag technique for the evaluation of feedstuffs. *Trop Anim Health Prod*. 5: 195-213.

Ortega, G.C., Hernández, O., Vargas, L., Mendoza, G.D., Martínez, P.A. & Avendaño, L. 2010. Análisis de sensibilidad del modelo NRC 1996 para bovinos de carne en pastoreo con suplemento. *Rev. Cubana Cienc. Agríc*. 44:1

Peck, S.L., 2004. Simulation as experiment: a philosophical reassessment for biological modeling. *Trends Ecol. E* vol. 19: 530–534

Pell An, Doane PH, Schofield P., 1997. In vitro digestibility and gas production. En: Simposio sobre Tópicos Especiais em Zootecnia. Lavras, mg; p. 109-32.

Pérez, M. O., Delfín, C., Fregoso, A. y H. Cotler. 2006. Modelos de simulación para la elaboración y evaluación de los programas de servicios ambientales hídricos. *Gaceta Ecológica*, 78: 65-84.

Pezo D, Ibrahim M., 1998. Sistemas silvopastoriles. Colección de Modelos de Enseñanza Agroforestal No. 2. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza CATIE.

Pezo, D. A.; Ibrahim, M.; Beer, J. y Camero, L. A. 1999. Oportunidades para el desarrollo de sistemas silvopastoriles en América Central. Serie Técnica, Informe Técnico No. 311. CATIE. Costa Rica. 46 pp.

Pezo, D.; Ibrahim, M. y Casasola, F. 2008. El pago por servicios ambientales: acelerador del cambio tecnológico en sistemas ganaderos basados en pasturas. En: Tejos, R. (Ed.). XII Seminario Manejo y Utilización de Pastos y Forrajes en Sistemas de Producción Animal. Mérida, Yucatán, México. pp. 1-11.

Quin JJ, Wathvan der J.G. y Myburgh S. 1938. Studies on the alimentary tract of Merino sheep in South Africa. 4. Description of experimental technique. *Ondersteport J Vet Sci Anim Ind* 11: 341- 360.

Ramírez Bonilla Fridz Reynold, 2015. Pastoreo de alta densidad en un sistema silvopastoril en la depresión central de Chiapas, licenciatura Médico Veterinario Zootecnista, Tesis profesional, UNACH, Tuxtla Gutiérrez Chiapas, Pp. 37.

Raymond WF, Harris CE y Harker VG. 1953. Studies on the digestibility of herbage. I. Technique of measurement of digestibility and some observations of factor affecting the accuracy of a digestibility data. *J Brit Grassland Soc* 8(4): 301-14.

SAGARPA, 2010, SIAP, Sistema de Información Agropecuaria de Consulta. <http://www.siap.gob.mx/poblacion-ganadera/>

Sanders, J.O. y T.C. Cartwright 1979. A general cattle production systems model. I: Structure of the model. *Agric. Sys.* 4(3): 217-227

Santana, M. 1998. Los sistemas agroforestales y su clasificación. En: Santana M. y Valencia, J. (Eds.). Seminario producción ganadera sostenible, silvopastoreo. CORPOICA. Caucasia. pp. 1-55.

Sauvant, D., Baumont, R. y Faverdin, P. 1996. Development of a Mechanistic Model of Intake and Chewing Activities of Sheep. *J. Anim. Sci.* 74: 2785

Shelton M y Dalzell S. 2007. Production, economic and environmental benefits of leucaena pastures. *Tropical Grasslands* 41: 174-190.

Silveira V.C.P. (2002). Pampa corte: a model that simulates beef cattle growing and fattening process. *Ciencia Rural*, 32(3):543-552.

Solorio-Sánchez F, Sandoval-Castro C, Armendáriz I. 2003. Manual de manejo agronómico de huaxin (*Leucaena leucocephala*). Ediciones de la universidad Autónoma de Yucatán. Mérida-Yucatán-México. pp. 11-15

Sniffen CJ, Oconnor JD, Vansoest PJ, Fox DG y Russell J.B. 1992. A Net Carbohydrate and Protein System for Evaluating Cattle Diets .2. Carbohydrate and Protein Availability. *Journal of Animal Science.* 70(11): 3562-3577.

Stuth, J.W., Free, M, Dove, M. y R.K. Lyons 1999. Nutritional management for free-ranging livestock. En "Nutritional ecology of herbivores". H.J.G. Jung, G. C.J. Fahey (ed.) American Society of Animal Science, Savoy, Illinois, USA: 696-751

Szott, L.; Ibrahim, M. y Beer, J. 2000. The hamburger connection hangover: cattle, pasture, land degradation and alternative land use in Central America. CATIE. Costa Rica. 71 pp.

Tedeschi L.O., 2005. Mathematical models in ruminant nutrition. *Sci. Agricultural* 62(1): 76-91.

Tedeschi L.O., 2006: Assessment of the adequacy of mathematical models. *Agricultural Systems.* 89(2-3): 225-247.

Tilley JMA, Terry RA. 1963. A two stage technique for the in vitro digestion of forage crops. *J Brit Grassland Soc* 18: 104-111.

Thornton P.K. 2009. Principios y elementos de los modelos. Curso avanzado sobre Análisis y evaluación prospectiva de sistemas de producción de rumiantes, FAOCIHEAM. 23-27, Zaragoza.

Torres, H. G. 1999. Importancia de los ovinos de pelo en el trópico mexicano. Producción sustentable de ovinos tropicales. Veracruz, México. En: Gláforo Torres, H. G. Díaz, R. P. Editores. pp. 1-4.

Torres G. Giovanna, Arbaiza F. Teresa, Carcelen Fernando y Lucas A. Orlando, 2009. Comparación de las técnicas in situ, in vitro y enzimática (celulasa) para estimar la digestibilidad de forrajes en ovinos. Rev Inv Vet Perú; 20 (1): 5-9

Van Dyne G. M y Abramsky Z., 1975. Agricultural systems models and modelling: An overview. Study of Agricultural Systems. 23-106.

Van Soest P. J. 1967. Development of a comprehensive system of feed analices and its application to forages. J. Anim. Sci. 26:119-128

Van Soest, P. J. 1994. Nutritional ecology of the ruminants. 2ª edición. Ithaca: Cornell University, 476 p

Vargas Bayona J, Mejía Porras G, Bedoya Mashuth J, Gómez-Patiño JF., 2013. Estimación de la técnica in vitro de gases frente a otras técnicas de digestibilidad. Spei Domus; 9(18): 59-70

Villalba D., 2000. Construcción y utilización de un modelo estocástico para la simulación de estrategias de manejo invernal en rebaños de vacas nodrizas. Tesis. Universitat de Lleida. 154 pp

Wencomo HB. 2008. Evaluación morfoagronómica e isoenzimática y selección de accesiones de *Leucaena spp.* Con fines silvopastoriles. Tesis. Doctoral. C. Agrícola. Estación experimental de pastos y forrajes. Indio Hatuey, Cuba. 106 pp j

Williams B.A., 2000. Cumulative gas-production techniques for forage evaluation. En: Givens DI, Owen E, Omed HM, Axford RFE, editors. Forage Evaluation in Ruminant Nutrition. Wallingford (uk) cab International; p. 475.