



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

**POSTGRADO DE RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD
GANADERÍA**

**PREDICCIÓN DE CAMBIOS DE PESO DE BOVINOS PASTOREANDO
EN TRÓPICO: DESARROLLO Y APLICACIÓN
DE UN MODELO DE SIMULACIÓN**

GILBERTO CARLOS ORTEGA NAVARRO

TESIS

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE**

DOCTOR EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

2011

**PREDICCIÓN DE CAMBIOS DE PESO DE BOVINOS PASTOREANDO EN
TRÓPICO: DESARROLLO Y APLICACIÓN DE UN MODELO DE SIMULACIÓN**

La presente tesis, titulada: **Predicción de cambios de peso de bovinos pastoreando en trópico: desarrollo y aplicación de un modelo de simulación**, realizada por el alumno: **Gilberto Carlos Ortega Navarro**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**DOCTOR EN CIENCIAS
RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD
GANADERÍA**

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO:



DR. OMAR HERNÁNDEZ MENDO

ASESOR:



DR. GERMÁN DAVID MENDOZA MARTÍNEZ

ASESOR:



DR. MAXIMINO HUERTA BRAVO

ASESOR:



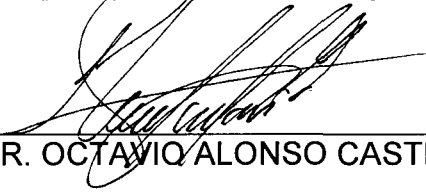
DR. LUÍS MANUEL VARGAS VILLAMIL

ASESOR:



DR. GLAFIRO TORRES HERNÁNDEZ

ASESOR:



DR. OCTAVIO ALONSO CASTELÁN ORTEGA

Montecillo, Texcoco, Estado de México, junio de 2011

PREDICCIÓN DE CAMBIOS DE PESO DE BOVINOS PASTOREANDO EN TRÓPICO: DESARROLLO Y APLICACIÓN DE UN MODELO DE SIMULACIÓN

Gilberto Carlos Ortega Navarro, Dr.

Colegio de Postgraduados, 2011

El presente estudio comprendió tres etapas, que consistieron en 1 (Capítulo 1), desarrollar un modelo para predecir la ganancia de peso vivo vacío (GPV) de toros pastoreando praderas en zonas tropicales con y sin complemento alimenticio (MCPV); 2 (Capítulo 2), realizar un análisis de sensibilidad del modelo desarrollado descrito en el capítulo dos, utilizando las técnicas *uno a la vez* y *multi pasos*, y 3 (Capítulo 3), realizar un análisis comparativo de las predicciones de ganancia de peso de toros ayunados (GPAp) utilizando el MCPV y modelo del NRC, éste último, considerando la energía metabolizable (MNRC EM) y proteína metabolizable (MNRC PM). En el capítulo uno, se describe el procedimiento que se siguió para la construcción del modelo, utilizando las ecuaciones desarrolladas por Lofgreen y Garrett (1968), ARC (1980), NRC (1984) y CSIRO (1990), empleándose la base de datos de once experimentos con ganado bovino engordado en praderas tropicales. Para la evaluación de las predicciones de las ganancias de peso y determinación de la exactitud de los modelos involucrados, se realizó un análisis de regresión, prueba de medias, y se generaron los estadísticos de prueba como tendencia media (MB), cuadrado medio del error de predicción (MSPE), raíz de MSPE, variación residual (RV) y error absoluto medio (MAE). Los resultados indican una subestimación en la GPV en 25% aproximadamente, y de acuerdo a los estadísticos de prueba, análisis de regresión y prueba de medias, se considera que el modelo tiene una baja exactitud para predecir la GPV. El análisis de sensibilidad con el procedimiento *uno a la vez*, indican que la entrada FD generó el mayor cambio en todas las salidas del modelo, con valores de 0.4641, 38.0873 y 0.0285 para las salidas GPVp, CMS y energía disponible para ganancia (EDG), respectivamente. Con el procedimiento *multipasos*, la máxima GPVp se obtiene con la combinación de las entradas digestibilidad de la MS del forraje con el valor de 58.3% y con la entrada forraje disponible, con un valor de 3.5 t MS ha⁻¹. El análisis comparativo de los las ganancias de peso residuales (GPAr) con los MCPV, MNRCEM y MNRCPM fueron -0.184, -0.284 y -0.149, respectivamente. Se concluye que existe una subestimación de los modelos MCPV, MNRCEM y MNRCPM, y cuando se considera solamente la energía disponible, el MCPV tiene una mejor GPAp que la del MNRC EM.

Palabras clave: *bos indicus*, tropical, energía, sensible, magnitud de entrada, NRC.

PREDICTING WEIGHT CHANGES IN BOVINES GRAZING IN THE TROPICS:
DEVELOPMENT AND APPLICATION OF A SIMULATION MODEL

Dr. Gilberto Carlos Ortega Navarro, Dr

Colegio de Postgraduados, 2011

The present study was done in three stages: 1 (Chapter 1), developing a model to predict live empty weight gain (LEW) of bulls grazing in tropical grasslands without an alimentary complement (MCPV); 2 (Chapter 2), doing a sensibility analysis of the developed model described in Chapter 2, using two techniques –*one at a time* and *multistep*; and 3 (Chapter 3), doing a comparative analysis of the predictions of weight gain in fasted bulls (GPAP) using the MCPV and model of the NRC, this latter considering metabolisable energy (MNRC EM) and metabolisable protein (MNRC PM). In Chapter one is described the procedure followed to build the model, using the equations developed by Lofgreen and Garrett (1968), ARC (1980), NRC (1984), and CSIRO (1990), using the database from eleven experiments with bovine livestock grown in tropical grasslands. To evaluate the predictions in weight gain and determine the accuracy of the involved models were done a regression analysis, mean test, and test statistics were generated, such as mean tendency (MB), mean square prediction error (MSPE), root of the MSPE, residual variation, and mean absolute error (MAE). The results indicate an underestimation of LEW of approximately 25%, and according to the test statistics, regression analysis and mean test, the model is considered to have a low accuracy in predicting LEW. The sensibility analysis with the *one at a time* procedure indicates that the AF input generated the greatest changes in all the outputs of the model; values 0.4641, 38.0873, and 0.0285 for outputs EWG, DMC, and available energy for gain (AEG), respectively. With the *multistep* procedure, the greatest EWG is obtained by combining the inputs digestibility of forage DM with a value of 58.3% and available forage, with a value of 3.5 t DM ha⁻¹. The comparative analysis of the predictions for GPAP with MCPV, MNRCEM, and MNRCPM were -0.184, -0.284, and -0.149, respectively. It is concluded that there is an underestimation of the MCPV, MNRCEM, and MNRCPM models, and when on available energy is considered, the MCPV has a better prediction of GPA than does MNRC EM.

Key words: *bos indicus*, tropical, energy, sensible, input magnitude, NRC.

DEDICATORIA

A mi esposa, padres y hermanos.

AGRADECIMIENTOS

A el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por haber otorgado beca y a el Colegio de Postgraduados, por haber permitir realizar los estudios de doctorado.

A cada uno de los miembros del Comité particular por haber dirigido el estudio de la presente investigación, Dr. Omar Hernández Mendo, Dr. Germán Mendoza Martínez, Dr. Maximino Huerta Bravo, Dr. Manuel Vargas Villamil, Dr. Glafiro Torres Hernández y al Dr. Octavio Castelán Ortega.

A todo el personal administrativo por su apoyo.

CONTENIDO	Página
INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1. Planteamiento del problema.....	3
2. Objetivos.....	4
3. Hipótesis.....	5
4. Revisión de literatura.....	6
5. Literatura citada.....	27
CAPITULO I. MODELO PARA PREDECIR CAMBIOS DE PESO VIVO VACÍO DE TOROS EN PASTOREO EN EL TRÓPICO MEXICANO	33
1.1. Introducción.....	35
1.2. Materiales y métodos.....	36
1.3. Resultados y discusión.....	47
1.4. Conclusiones.....	54
1.5. Literatura citada.....	55
CAPITULO II. ANALISIS DE SENSIBILIDAD DEL MODELO PARA PREDECIR CAMBIOS DE PESO VIVO VACÍO DE TOROS EN PASTOREO EN EL TRÓPICO MEXICANO	74
2.1. Introducción.....	76
2.2. Materiales y métodos.....	77
2.3. Resultados y discusión.....	78
2.4. Conclusiones.....	83
2.5. Literatura citada.....	84

CAPITULO III. ANÁLISIS COMPARATIVO EN LA PREDICCIÓN DE CAMBIOS DE PESO DE TOROS EN PASTOREO EN EL TRÓPICO USANDO DOS MODELOS	93
3.1. Introducción.....	95
3.2. Materiales y métodos.....	96
3.3. Resultados y discusión.....	100
3.4. Conclusiones.....	103
3.5. Literatura citada.....	104
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES.....	117
1. Conclusiones.....	117
2. Recomendaciones.....	118

ÍNDICE DE CUADROS

	Página
Cuadro 1. Incremento calórico de distintos nutrimentos que componen a los alimentos.....	13
Cuadro 2. Valores energéticos de ingredientes de diferentes sistemas y años.....	18
Cuadro 3. Composición nutrimental de la alfalfa deshidratada con aproximadamente 19% de proteína cruda.....	19
Cuadro 4. Índice de aminoácidos esenciales (EAA) y aminoácidos limitantes.....	24
Cuadro 5. Entradas en el modelo para realizar el análisis de sensibilidad con el procedimiento <i>uno a la vez</i>	59
Cuadro 6. Combinación de las entradas, disponibilidad de forraje y digestibilidad de la materia seca en el modelo para realizar el análisis de sensibilidad con el procedimiento <i>dos pasos</i>	60
Cuadro 7. Resultado del análisis de sensibilidad del modelo para predecir la ganancia de peso vacío.....	61
Cuadro 8. Valores predichos, observados y residuales obtenidos en el estudio.....	62
Cuadro 9. Estadísticos de la evaluación del modelo.....	64
Cuadro 10. Estadísticos de prueba para evaluar la exactitud de los modelos.....	65

Cuadro 11.	Entradas en el modelo para realizar el análisis de sensibilidad con el procedimiento uno a la vez.....	86
Cuadro 12.	Resultado del análisis de sensibilidad del modelo para predecir la ganancia de peso vacío.....	87
Cuadro 13.	Estadísticos de los datos observados y predicciones de las ganancias de peso ayunado de los modelos.....	107
Cuadro 14.	Estadísticos de los datos observados y predicciones de los consumos de materia seca de los modelos.....	108
Cuadro 15.	Estadísticos de prueba para evaluar la exactitud de la predicción de la ganancia de peso de los modelos.....	109
Cuadro 16.	Estadísticos de prueba para evaluar la exactitud de la predicción de consumo de materia seca de los modelos.....	110

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Partición de la energía química.....	8
Figura 2. Esquema de la partición de energía en un animal.....	10
Figura 3. Esquema de la distribución energética.....	20
Figura 4. Ruta del nitrógeno dentro del organismo de los rumiantes....	26
Figura 5. Diagrama de flujo del desarrollo del modelo.....	66
Figura 6. Relación entre la entrada consumo materia seca y salida ganancia de peso vacío del modelo.....	67
Figura 7. Relación entre la entrada pendiente del terreno y la salida ganancia de peso vacío del modelo.....	68
Figura 8. Combinación de las entradas disponibilidad y proteína cruda del forraje con la salida ganancia de peso.....	69
Figura 9. Distribución de las predicciones de ganancia de peso del animal por el modelo.....	70
Figura 10. Distribución de los residuales de ganancia de peso vacío del animal por el modelo.....	71
Figura 11. Comparación del consumo de materia seca observado y del predicho por el modelo.....	72
Figura 12. Combinación de las entradas disponibilidad y digestibilidad del forraje con la salida ganancia de peso, representado de manera tridimensional.....	88

Figura 13.	Combinación de las entradas disponibilidad y digestibilidad del forraje con la salida ganancia de peso, representado de manera bidimensional.....	89
Figura 14.	Combinación de las entradas disponibilidad y digestibilidad del forraje con la salida EDG.....	90
Figura 15.	Combinación de las entradas disponibilidad y digestibilidad del forraje con la salida consumo de materia seca.....	91
Figura 16.	Distribución de las predicciones de la ganancia de peso de los modelos.....	111
Figura 17.	Distribución de los residuales de las ganancias de pesos de los modelos.....	112
Figura 18.	Comparación del consumo de materia seca observado y del predicho por el los modelos.....	113
Figura 19.	Distribución de los residuales del consumo de materia seca observado y del predicho por los modelos.....	114

INTRODUCCIÓN GENERAL

La producción de carne de bovino en trópico es un sistema que se basa en el pastoreo con poca o nula suplementación, infraestructura básica y uso mínimo de materiales externos, haciéndolo un sistema de producción a bajo costo y en algunos casos, sustentables (FIRA, 1999). Sin embargo, existe el inconveniente de no contar con registros de producción, y por tanto, es difícil establecer estrategias de suplementación para hacer un sistema de producción rentable. En este contexto, los modelos de simulación ocupan un papel importante para la predicción de ganancias de peso en un momento determinado.

La modelación se entiende como el proceso para comprender y representar un fenómeno (Hoch *et al.*, 2004), y se clasifican en estáticos, dinámicos, empíricos, mecánicos, estocásticos, determinísticos, continuos o discretos (Tedeschi *et al.*, 2005).

De los modelos, el NRC es clásico, actualizado en 2000 (NRC, 2000), con el cual se obtienen dos soluciones distintas para la predicción de la ganancia diaria de peso, contando además, con dos niveles. El nivel uno utiliza valores tabulares de energía de los alimentos y el sistema de proteína metabolizable (MP) desarrollada por Burroughs en 1974. El nivel dos utiliza el modelo ruminal de Cornell Net Carbohydrate and Protein System (CNCPS), para predecir la energía digestible de los ingredientes, la fermentación de las proteínas y carbohidratos, así como crecimiento de la población bacteriana (Tedeschi *et al.*, 2005).

Algunos otros modelos, como el del INRA en Francia, basa sus requerimientos en la proteína digestible en el intestino (PDI), relacionando el nitrógeno que llega a

rumen con lo absorbido, digerido y excretado por el animal (Jarrige, 1989). En tanto que el CSIRO en Australia, en 2007, publica el reporte de requerimientos nutrimentales, donde se consideran aspectos de ganado en pastoreo, donde se contempla el gasto de energía para mantenimiento generado por la actividad del animal, edad, sexo y raza (CSIRO, 2007).

Lo anterior es un indicativo que los modelos han sido propuestos para desarrollarse en situaciones diferentes, con características específicas, y difícilmente puede ser extrapoladas, con seguridad de éxito. Ante este panorama, es necesario el desarrollo de modelos propios, que para el caso de México, algunos autores (Medina, 2006; Tobias, *et al.*, 2006) se han dado a realizar dicha tarea; sin embargo, su aplicación es aún muy limitado.

Por tanto, el presente estudio consistió en desarrollar un modelo para predecir cambio de peso de toretes en condiciones tropicales en pastoreo con y sin suplementación, cuyo objetivo es obtener una alta exactitud.

1. Planteamiento del problema

Uno de los problemas básicos de la producción animal en pastoreo en el trópico es el consumo de materia seca, que normalmente es bajo, por diversos factores involucrados, donde la calidad del forraje juega un papel preponderante, cuyo contenido de energía y proteína es bajo, y los contenidos de fibras detergentes es alto.

Consecuentemente, la producción animal es reducida. Si a esto se le une el mal manejo por los productores, hace de esto, un sistema de producción ineficiente.

Por tanto, es importante buscar alternativas para mejorar dicha eficiencia, donde se consideren todos los factores involucrados (planta-animal-ambiente-manejo), y con ello, obtener beneficios al productor, que al final, representará beneficios económicos.

En este sentido, generar un modelo de simulación que englobe todos estos aspectos, representaría una ventaja al predecir tanto el consumo como las ganancias de peso, de acuerdo a las condiciones específicas de la zona, que en términos reales, su aplicación representaría mejores ganancias de peso, obtenidas a partir de diferentes escenarios extraídos del modelo en cuestión.

2. Objetivos

Desarrollar un modelo para predecir la ganancia de peso vacío de toros en pastoreo con y sin suplemento en zonas tropicales.

Evaluar la exactitud del modelo para predecir la ganancia de peso vacío de toros en pastoreo con y sin suplemento en zonas tropicales.

Evaluar la exactitud del modelo para predecir el consumo de materia seca de toros en pastoreo con y sin suplemento en zonas tropicales.

Comparar la exactitud de las predicciones de dos distintos modelos.

3. Hipótesis

La predicción de la ganancia de peso vacío de toros pastoreando en zonas tropicales con y sin suplemento puede realizarse con una alta exactitud.

La predicción del consumo de materia seca de toros pastoreando en zonas tropicales con y sin suplemento puede realizarse con una alta exactitud.

4. Revisión de literatura

4.1. Modelos de simulación: generalidades

Un modelo es una ecuación o grupo de ecuaciones que representan un fenómeno o el desarrollo de un sistema (Thornley y France, 2007). De acuerdo a Tedeschi *et al.* (2005), los modelos se clasifican como estáticos o dinámicos, empíricos o mecanísticos, estocásticos o determinísticos.

En los modelos estáticos, no se considera la variable tiempo, a diferencia de los dinámicos donde si se considera el tiempo. Los modelos empíricos, son aquellos donde se toman en cuenta las relaciones entre variables, sin explicar el porqué, a diferencia de los mecanísticos, donde existe una relación de correspondencia entre las variables del modelo. En los modelos estocásticos, se consideran aspectos probabilísticos y existe la incertidumbre; mientras que en el caso de los modelos determinísticos, no se contempla la existencia del azar (Tedeschi *et al.*, 2005; France y Kebreab, 2008).

En el área de ciencia animal, existen diversos tipos de modelos donde se desarrollan y explican diversos conceptos como crecimiento animal, curvas de lactancia, función de órganos y tejidos, producción animal, excreción de elementos como nitrógeno y fósforo del animal, pastoreo, desarrollo de sistemas pecuarios, impacto ambiental de la ganadería, cruzamiento animal (Hirooka, 2010), efecto ambiental en el animal (Ku, 1995; Mendoza *et al.*, 2003), procesos metabólicos, digestivos y ruminales (Baldwin *et al.*, 1987; Russell *et al.*, 1992; Vargas *et al.*, 2005).

Es evidente que las particularidades varían de modelo a modelo, y dependen en gran medida, del objetivo buscado, tomando en consideración las entradas y salidas que mayor precisión del modelo, que finalmente, es el objetivo buscado.

4.2. Sistema de valoración energética

Los productos de origen animal pueden expresarse en calorías, lo que significa que el alimento que ofrecemos al animal, se transforma en alguno de los productos carne, leche, grasa, piel o lana, confirmando así el principio que sostiene a la primera ley de la termodinámica, que indica, la energía no se crea ni se destruye, solo se transforma (Potter y Somerton, 2006).

Esta primera ley es fundamental para realizar balances energéticos, que se pueden explicar con la siguiente formula, $\Delta E = \Delta U + \Delta E_k + \Delta E_p$, donde ΔU , ΔE_k , y ΔE_p son los cambios en energía interna, energía cinética y energía potencial respectivamente (Klye, 1999; Mareš *et al.*, 2008). La energía consumida por medio del alimento es igual a la energía de las heces, orina, incremento calórico, mantenimiento y crecimiento. En la primera ley de la termodinámica se describe cuanta energía existe en un alimento y de esta energía total se enuncia cuanta carne se puede producir (Kohn y Boston, 2000).

Cualquier forma de energía es transferible a otra forma de energía, y la manera de medir la energía es por medio de la caloría (cal) o el joule (J); una cal equivale a 4.184 J (NRC, 1981). Y la caloría se puede entender como la cantidad de calor para incrementar la temperatura de un gramo de agua de 14.5 °C a 15.5 °C. La calorimetría es utilizada para medir todas las representaciones de energía, por esta razón la

energía química es medida como calor y expresada como calorías (Kleiber, 1961; Atake, 2008).

En la figura 1 se muestra la relación de la energía libre con otras formas de energía en un proceso de combustión.

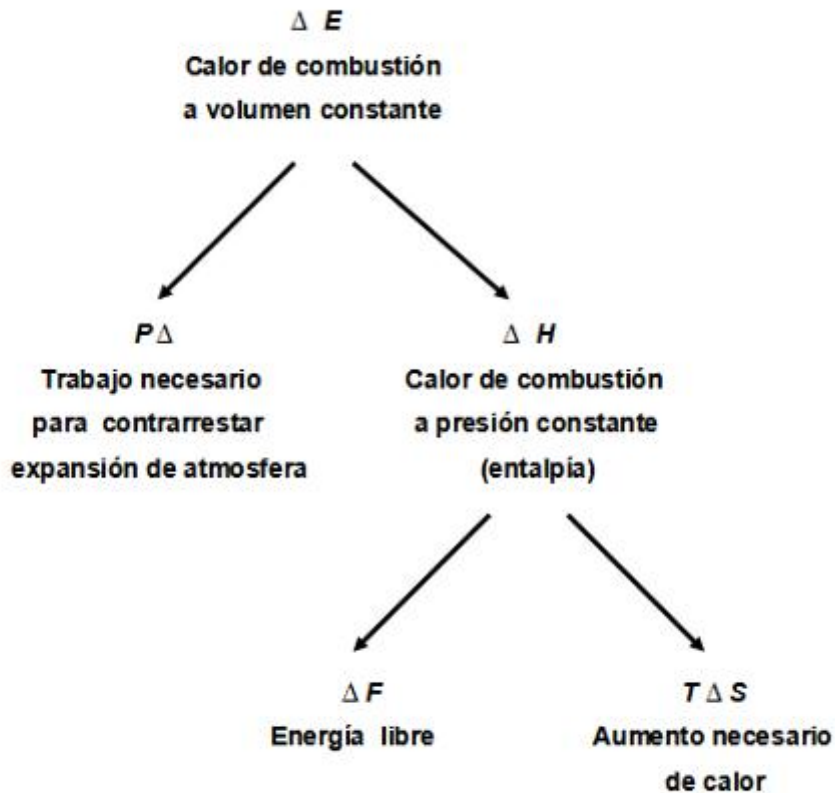


Figura 1. Partición de la energía química. Adaptado de Kleiber (1961).

El NRC (1981) utilizó una terminología para entender el desarrollo de la transformación de la energía en un sistema de alimentación, donde se inicia con la energía consumida como alimento, posteriormente se pierde parte de esta energía en distintas maneras, como energía en las heces, energía en los gases, energía calórica,

o recuperada en producto (carne, grasa piel). Posteriormente la energía calórica puede ser separada y asociada con el metabolismo basal, actividad voluntaria, formación de productos, digestión y absorción, regulación termal, calor producido por fermentación y generación de desechos y excreción. La energía neta de los productos debe ser identificada como proteína y grasa corporal. Es necesario tomar en cuenta que la mayor pérdida de energía se realiza como energía en heces y energía calórica y que finalmente la energía retenida (RE) constituye relativamente una pequeña proporción, comparada con la energía inicial.

Se debe considerar que cuando un animal esta en pastoreo cambia la composición corporal de los animales y que afecta la partición de la energía en el cuerpo del ganado (Hata *et al.*, 2005). La energía retenida de un animal se puede obtener por medio de la técnica de sacrificio comparativo propuesta por Lofgreen (1964). Hata *et al.* (2005) utilizando la técnica de sacrificio comparativo encontró que la retención de energía fue menor en bovinos en pastoreo que en animales consumiendo concentrado (1.84 y 2.37 Mcal día⁻¹ respectivamente) aun cuando las ganancias diaria de peso eran similares. Lo anterior es debido a la que la composición de la canal es distinta entre animales en pastoreo y animales en confinamiento consumiendo dietas altas en grano.

En la figura 2. se describe la representación esquemática de la manera de distribución energética partiendo de la energía del alimento hasta llegar a la energía utilizada para producción de tejido.

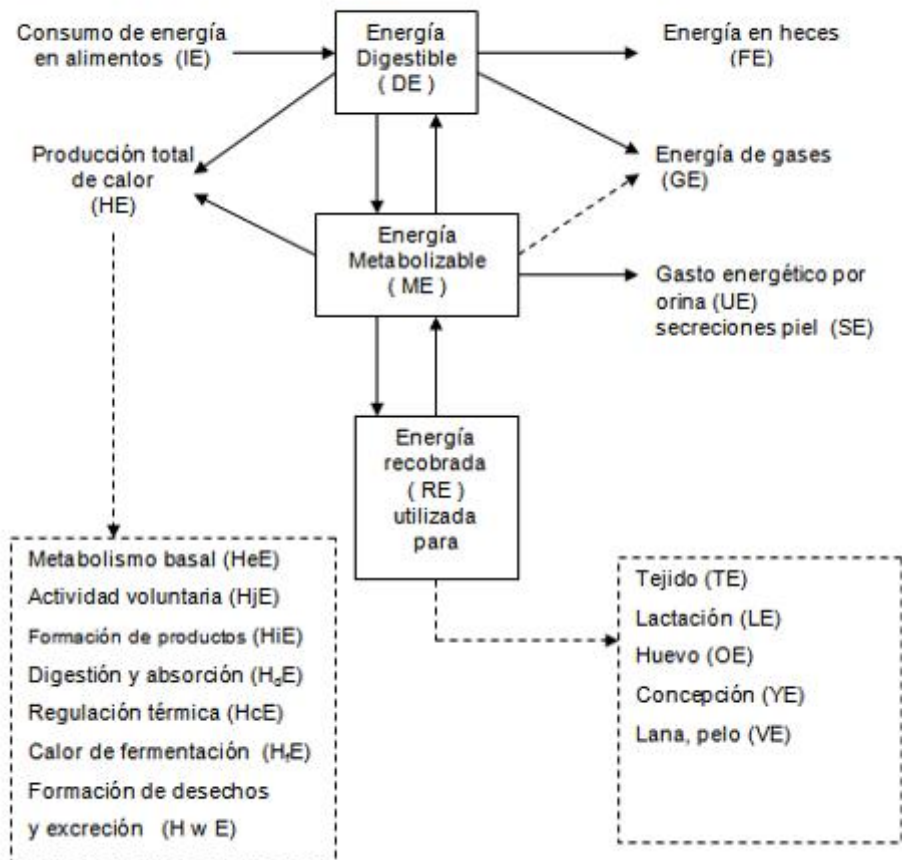


Figura 2. Esquema de la partición de energía en un animal. Adaptado de NRC (1981).

En la nutrición animal es necesario conocer la eficiencia de utilización de los nutrimentos energéticos, en donde se distinguen cuatro tipos de energía en los alimentos la energía total, energía digestible, energía metabolizable y energía neta (NRC, 1981). Se utilizan estos diferentes tipos de energía ya que a medida que hay un paso de energía a través del animal ocurre una ineficiencia energética, y hay pérdidas en varias fases (NRC, 2006).

Energía total

La energía total (ET) es aquella energía que se desprende de un alimento al ser quemado en su totalidad, para lo cual se utiliza una bomba calorimétrica (NRC, 1981).

La bomba calorimétrica esta conformada por un receptáculo, en donde se quema una cantidad de alimento previamente pesado que esta encerrado por un aislante conteniendo agua, al ser combustión el alimento se genera una cantidad de calor y se calienta el agua alrededor y hay un cambio en la temperatura, la cual se registra en un termómetro y de esta manera se puede medir el calor producido; (Maynard *et al.*, 1979). Durante este proceso, el alimento es completamente oxidado a bióxido de carbono y agua, resultando en la generación de calor que es medido. Esta medida de energía tiene muy poca o nula validez para predecir el comportamiento animal o para describir los requerimientos energéticos ya que no toma en consideración la disponibilidad de la energía hacia el animal. Se debe considerar que la ET de un alimento depende de la concentración de grasa, proteína y carbohidratos (NRC, 2006).

La energía total de un alimento puede ser calculada considerando la proporción de carbohidratos, grasa y proteína de un determinado alimento o ingrediente, considerando el principio de la primera ley de termodinámica, que nos dice que la energía no se destruye y que solo se transforma (Schmid, 1984), por lo que se considera el calor de combustión de cada nutrimento y se multiplica por la cantidad del mismo para de esta manera obtener el valor de combustión total. En el Cuadro 1 se presenta los valores combustión para distintos nutrimentos, así por ejemplo para las grasas el valor es de 9.30 Mcal kg⁻¹, para los carbohidratos de 4.20 Mcal kg⁻¹ y para

las proteínas de $5.75 \text{ Mcal kg}^{-1}$ (Merril y Watt, 1973). Existe un compuesto que no es un carbohidrato pero que está estrechamente asociado a ellos, que es la lignina (Maynard y Loosli, 1956). La lignina es un polifenol de alto peso molecular (Van Soest, 1982), los fenoles son compuestos con la fórmula general **Ar OH**, donde **Ar** es fenil; los fenoles difieren de los alcoholes por que en los fenoles el grupo $-\text{OH}$ está enlazado directamente con el anillo aromático (Morrison y Boyd, 1992; Carey y Sundberg, 2008). Una característica de la lignina es que contiene una estructura condensada con enlaces carbono – carbono que son resistentes a la acción hidrolítica de ácidos y álcalis (Van Soest, 1982).

La lignina da soporte estructural a las paredes celulares de las plantas, se encuentra en raíces, tallos y hojas (Maynard *et al.*, 1979). A medida que la planta crece y por lo tanto hay mayor madurez se incrementa la cantidad de lignina en la planta, encontrándose valores de 5 % de lignina y 23 % proteína cruda en una planta de alfalfa que ha sido secada al sol en estado fisiológico temprano contra una planta de alfalfa secada al sol pero con un estado fisiológico donde la planta está florecida completamente con valor de contenido de lignina de 10 % y 15 % de proteína cruda (NRC, 1988); lo anterior nos indica que a mayor madurez se incrementa el contenido de lignina en una planta y se reduce la calidad.

Cuadro 1. Incremento calórico de distintos nutrimentos que componen a los alimentos.

Producto	Valor de combustión (Kcal g ⁻¹)
Grasa de bovino	9.50
Grasa de cerdo	9.50
Aceite de trigo	9.36
Aceite de maíz	9.28
Grasa de lácteos	9.25
Grasa de cereales	9.30
Azúcar de caña	3.96
Celulosa	4.20
Almidón	4.20
Carbohidratos cereales	4.20
Carbohidratos legumbres	4.20
Proteína de cereales	5.80
Proteína de leguminosas	5.70
Alcoholes	7.07

Fuente: Merrill y Watt, 1973.

Se debe considerar que de acuerdo a la información del Cuadro 3, cualquier forraje tendrá un valor mínimo de energía total de por lo menos 4.20 Mcal kg⁻¹ MS, el valor anterior puede ser explicado por el hecho de que el mayor contenido en porcentaje es de carbohidratos y estos tienen un valor de combustión de 4.2 kcal g⁻¹ (Cuadro 2), por lo que se puede decir que cualquier valor de energía total de un alimento menor de 4.2 Mcal kg⁻¹ será erróneo. Se debe considerar que el valor de

energía total no brinda información sobre la cantidad de energía que pueda ser utilizada por el animal (Ferrell, 1988).

La energía digestible (ED) se obtiene de la energía total de un alimento menos la energía de las heces (EF). Lo cual es debido a que una vez que se consume un alimento hay un proceso de degradación y absorción y la manera de expresarlo es en Mcal DE kg⁻¹ MS (NRC, 2000). La ED es considerada como “aparente” debido a que parte de la energía en heces es de origen no dietario (que no procede del alimento) tal como secreciones del tracto gastrointestinal, tejido epitelial y células microbianas.

La digestión se puede definir como el proceso en el cual macro moléculas de alimento son degradadas a compuestos mas simples que son absorbidos en el tracto gastrointestinal (Merchen, 1988).

Una de las mediciones más importantes en los valores energéticos, es determinar la digestibilidad de los alimentos, ya sea *in vivo* o *in vitro*. Entre las determinaciones que existen esta: digestibilidad de la materia seca, digestibilidad de la materia orgánica y digestibilidad de la materia orgánica en la materia seca (CSIRO, 1990). La digestibilidad de los alimentos puede ser estimada por métodos biológicos con los que se simulan procesos digestivos (Getachew *et al.*, 1988)

Existen diversos métodos para determinar la digestibilidad de los alimentos entre los que se encuentran: directos, indirectos y micro digestión. El método directo es el mas confiable y exacto, pero es considerado tedioso y costoso (Khan *et al.*, 2003). En el método indirecto para medir la digestibilidad se utilizan sustancias inertes que sirven como referencia, entre las sustancias que se utilizan son los marcadores. Existen los marcadores internos como lignina, sílice, ceniza insoluble en ácido (Merchen, 1988),

cromógeno (Van Soest, 1988) y nitrógeno insoluble; los marcadores externos existentes son alimentos teñidos, óxido de cromo, elementos de tierras raras (lantano, samario, cerio, iterbio y disprosio) y marcadores hidrosolubles como CoEDTA (Merchen, 1988).

Entre los métodos de micro digestión se tienen las técnicas *in situ* e *in vitro*, actualmente se han hecho mas extensivas y comunes las técnicas *in vitro* como la desarrollada por Tilley y Terry (1963), donde se realiza la digestión en dos fases, en la primer fase se incuba una muestra de alimento molido finamente durante 48 horas en condiciones anaeróbicas en un tubo con líquido ruminal, posteriormente en la segunda fase se eliminan las bacterias acidificando el medio utilizando ácido clorhídrico hasta que se alcanza un pH de 2.00 y se digiere realizando una incubación con pepsina durante 48 horas (Tilley y Terry, 1963).

Otra técnica *in vitro* es la del método de gas desarrollada por Menke *et al.* (1979). La técnica *in situ*, corresponde a la estimación de la digestibilidad utilizando bolsas de nylon, descrita por Orskov y McDonald (1979).

La estimación de la energía digestible es uno de los cálculos en los cuales se debe considerar diversos aspectos ya que existen una gran cantidad de variables que pueden afectarla, como puede ser consumo de alimento, relación hoja tallo, madurez del forraje, forrajes de zona tropical o templada, procesamiento, uso de aditivos en la dieta del animal (Merhen y Bourquin, 1994), tamaño de partícula, composición química, edad del animal, frecuencia de alimentación (Khan *et al.*, 2003), temperatura ambiental (Merchen, 1988), entre otros factores.

Se debe considerar que la digestibilidad de los forrajes o alimentos puede variar ya que existen factores que influyen como los animales, errores técnicos y/o analíticos (Merhen y Bourquin, 1994). Puede haber variación en los resultados por variedad de la planta, clima, suelo y tiempo de almacenamiento; dichas variaciones pueden fluctuar en el caso de constituyentes orgánicos como proteína cruda, pared celular, extracto etéreo, y aminoácidos hasta en un 15 %, en el caso de constituyentes inorgánicos hasta en un 30 % y los valores de energía hasta un 10 % (NRC, 1982).

En lo referente a la variabilidad entre los resultados de las pruebas de digestibilidad, Weiss (1994) realizó una investigación para determinar cual método es el mas preciso, en donde comparo distintos procedimientos como la digestibilidad *in vitro* de la materia seca (IVDMD), digestibilidad *in situ*, digestibilidad enzimática y la digestibilidad utilizando la composición química; concluyendo que la mejor estimación es la IVDMD. Sin embargo, es necesario considerar que el método *in vitro* requiere un tiempo de análisis prolongado y la necesidad de animales canulados. El método utilizando la digestión enzimática es económico, se pueden utilizar enzimas comerciales; es necesario desarrollar ecuaciones para correlacionar los resultados de la digestibilidad *in vivo* y la enzimática. La digestibilidad *in situ* tiene datos aceptable y similares a los de *in vitro* la ventaja es que en la digestibilidad *in situ* no es necesario preparar medios para incubación. En lo referente a la estimación de la digestibilidad utilizando datos de la composición del forraje se debe tomar en cuenta que es el método menos exacto de todos, en caso de utilizar esta metodología se deberá tener mucha precaución en los resultados obtenidos (Weiss, 1994).

Aun cuando se realice el mismo método para determinar la digestibilidad de un forraje existe variabilidad entre laboratorios, lo anterior se puede corroborar en el estudio realizado por Barnes (1967), donde se efectuaron estudios colaborativos entre 17 laboratorios de distintos centros de investigación en Estados Unidos para determinar la digestibilidad de la harina de alfalfa utilizando la digestibilidad *in vitro* de la celulosa y de la materia seca, de dos sustratos de alfalfa y uno de pasto bromus analizándolos con tres corridas por duplicado con una duración de incubación de 6, 12, 24 y 48 horas; los resultados indicaron una variabilidad entre valores finales de digestibilidad entre técnicas empleadas entre laboratorios, la digestibilidad *in vitro* de la celulosa media para laboratorios individuales fue de 47.38 % en un rango de 40.00 % a 63.90 %, y para la digestibilidad *in vitro* de la materia seca la media fue de 45.68 % con un rango de 38.70 % a 53.30 %, lo cual indica que la estimación de la energía digestible puede variar de acuerdo a los resultados que se obtengan en las pruebas de digestibilidad de los forrajes.

En estudios posteriores Barnes (1968) encontró que en ensayos de digestibilidad *in vivo* de alfalfa en borregos existió variación entre resultados de digestibilidad concluyendo que es necesario incrementar el número de animales para reducir la variabilidad.

La energía metabolizable (ME) se obtiene de la energía digestible menos la energía de los gases de la fermentación y la energía de la orina. La manera de expresarlo es en Mcal ME kg⁻¹ MS (NRC, 2000).

Para la transformación de DE a ME se desarrolló la siguiente ecuación, ME en Mcal kg⁻¹ = DE Mcal kg⁻¹ x 0.82 (Harris *et al.*, 1972).

Cuadro 2. Valores energéticos de ingredientes de diferentes sistemas y años.

Ingrediente	Energía total ET (Mcal kg ⁻¹ MS)	Energía digestible ED (Mcal kg ⁻¹ MS)	Energía metabolizable EM (Mcal kg ⁻¹ MS)
Alfalfa deshidratada			
NRC, 1970.	nr	nr	2.24
NRC, 1976.	nr	nr	2.24
NRC, 1978.	nr	2.73	2.31
NRC, 1984.	nr	2.69	2.21
NRC, 1985.	nr	2.65	2.17
NRC, 1988.	nr	2.69	2.27
NRC, 1989.	nr	2.69	2.27
NRC, 1996.	nr	nr	2.13
NRC, 2000.	nr	nr	2.13
NRC, 2001.	nr	2.60	1.96
NRC, 2007.	nr	2.70	2.20
ARFC, 1992.	nr	nr	2.17
ARFC, 1995.	nr	nr	2.10
INRA, 1981.	4.50	2.83	2.31
Rastrojo de maíz			
NRC, 1970.	nr	nr	2.13
NRC, 1976.	nr	nr	2.44
NRC, 1978.	nr	2.60	2.18
NRC, 1984.	nr	2.21	1.81
NRC, 1985.	nr	2.60	2.13
NRC, 1988.	nr	2.21	1.78
NRC, 1989.	nr	2.21	1.78
NRC, 2007.	nr	2.60	2.10
INRA, 1981.	4.16	2.23	1.80

nr = no reportado

Considerando los principios de la termodinámica, se puede estimar la energía metabolizable de un alimento a partir de su composición, esto es por que si se conoce el calor producido por medio de un calorímetro de cada nutrimento, se puede determinar la energía total y posteriormente reducir de la energía total las energías por perdidas de proceso digestión, metano y orina.

Para lo cual se debe conocer las proporciones que conforman a un alimento y clasificación en base a la composición (Maynard y Loosli, 1956; Owens *et al.*, 2010), como son carbohidratos totales (hemicelulosa, celulosa, azucares y almidón), grasa y proteína.

Cuadro 3. Composición nutrimental de la alfalfa deshidratada con aproximadamente 19% de proteína cruda.

Referencia	Carbohidratos Totales (%) *	Proteína (%)	Grasa (%)	Total (%)
NRC, 1970.	78.05	19.2	2.75 *	100
NRC, 1976.	78.05	19.2	2.75 *	100
NRC, 1978.	77.55	19.7	2.75 *	100
NRC, 1984.	78.10	18.90	3.00	100
NRC, 1985.	78.35	18.9	2.75 *	100
NRC, 1988.	78.10	18.9	3.00	100
NRC, 1989.	78.10	18.9	3.00	100
NRC, 1996.	80.3	17.3	2.4	100
NRC, 2000.	80.3	17.3	2.4	100
NRC, 2001.	78.3	19.2	2.5	100
NRC, 2007.	78.00	19.0	3.0	100
ARFC, 1995.	77.3	19.9	2.8	100

* valor estimado

La energía neta (NE) es la energía que se utiliza para mantenimiento (NEm) y producción (NEp) del animal (Garrett y Johnson, 1983). Para lo cual en 1963 Lofgreen y Garrett introducen el sistema de Energía Neta (NE) diseñado para utilizarse en ganado bovino en crecimiento y finalización, el cual es denominado Sistema de Energía Neta de California (CNES).

Kromann (1973) esquematizan la distribución energética considerando las pérdidas como es energía fecal, urinaria, metano y calor, presenta un diagrama (Figura 3) basado en el Sistema CNES.

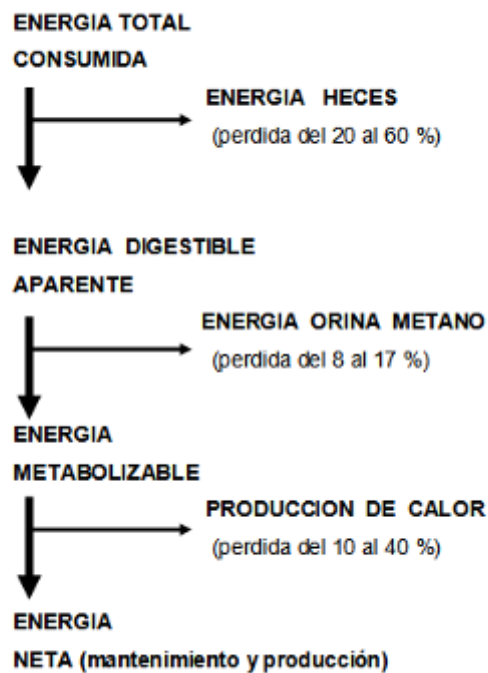


Figura 3. Esquema de la distribución energética. Adaptado de Kroman (1973).

El sistema CNES separa los requerimientos para mantenimiento y para ganancia de peso, expresando dos valores de energía para los alimentos, energía neta de

mantenimiento (NE m) y energía neta de ganancia (NE g) y prepara los requerimientos de energía para el animal en los mismos términos (Lofgreen y Garrett, 1968). La NE representa la cantidad de la energía total que es disponible para las funciones que realiza el animal como son las de mantenerse, producir y su reproducción. El cálculo de la NE es la siguiente: $NE = ME - CI$, donde CI es el incremento calórico correspondiente a la fracción de energía metabolizable (EM) que es liberada como energía térmica durante la utilización de la energía. En el caso de ganado de crecimiento, la NE se divide en la NE m y la NE g. La NE de un producto animal es equivalente al contenido de energía total que también es conocido como el valor energético y se puede expresar como $Mcal\ kg^{-1}$ (Lofgreen *et al.*, 1963; Lofgreen y Garrett, 1968).

Para convertir valores de ME de un alimento a NE m y NE g ($Mcal\ kg^{-1}\ MS$) del alimento se utilizan las siguientes ecuaciones (NRC, 1984):

$$NE\ m = 1.37\ ME - 0.138\ ME^2 + 0.0105\ ME^3 - 1.12$$

$$NE\ g = 1.42\ ME - 0.174\ ME^2 + 0.0122\ ME^3 - 1.65$$

4.3. Sistema de valoración proteica

El nombre proteína proviene del griego “proteios”, que significa primero (Morrison y Boyd, 1992). Son sustancias complejas de alto peso molecular y de naturaleza coloidal que contienen carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno, algunas contienen también azufre; existen distintas maneras de clasificar a las proteínas, una de ellas es en proteínas simples o conjugadas; otra clasificación es de acuerdo a su conformación estructural, pudiendo ser fibrosas o globulares (Maynard *et al.*, 1979).

Las proteínas están conformadas por aminoácidos, se puede decir que los aminoácidos son la estructura básica de las proteínas (Garret y Grisham, 2010); a excepción de la prolina y la hidroxiprolina que se consideran α – iminoácidos, los demás aminoácidos son ácidos α – amino carbolixicos (Meierhenrich, 2008), la unión principal entre los aminoácidos de una proteína es por medio de un grupo amino de un acido y del grupo carboxilo de otro, a esta unión se le llama enlace peptídico (Maynard *et al.*, 1979).

En lo referente a las formas ópticamente activas que seria los isómeros D y L, todos los aminoácidos presentan estas dos formas, a excepción de las glicina que tiene un átomo de hidrogeno como radical R (Meierhenrich, 2008).

Algunas propiedades de los aminoácidos son las siguientes, se comportan como ácidos y bases debido a que tienen un grupo amino y un grupo carboxilo, por presentar esta característica se le llama sustancia anfótera; insolubles en solventes no polares; en soluciones con pH neutro son moléculas con ion dipolar también llamado zwitterion (Garret y Grisham, 2010).

Cuando el aminoácido esta en forma bipolar, el grupo amino es protonado ($-\text{NH}_3^+$) y el grupo carboxilo es disociado ($-\text{COO}^-$). El estado de ionización de un aminoácido depende del pH, en una solución acida el grupo amino es ionizado y en una solución alcalina el grupo carboxilo es ionizado (Garret y Grisham, 2010).

Los aminoácidos se pueden clasificar de distintas formas, una de ellas es de acuerdo a la naturaleza del grupo R, esta clasificación es la siguiente: aminoácidos alifáticos, aromáticos y heterocíclicos; dentro de los del grupo de aminoácidos alifáticos se dividen en ácidos monoamino-monocarboxilicos (neutros) donde se encuentra la

glicina, alanina, serina, valina, leucina, isoleucina, treonina; en ácidos monoamino-carboxilicos (ácidos) donde se encuentra el ácido aspártico y el ácido glutámico; en ácidos diamino-monocarboxilicos (básicos) donde se encuentra la arginina, lisina y citrulina; y aminoácidos que contienen azufre se encuentra la cistina, cisteína y metionina; en el grupo de los aminoácidos aromáticos se encuentra la fenilalanina, tirosina, diyodotirosina y tirosina; y por ultimo los aminoácidos heterocíclicos en donde se encuentra histidina, prolina, hidroxiprolina y triptófano (Maynard *et al.*, 1979).

El conocimiento de las características de los aminoácidos cobra importancia ya que cuando se compara el perfil de aminoácidos de las distintas fuentes de proteína que pasan al intestino de los rumiantes se observa que el mejor índice de aminoácidos esenciales (EAA) con 82 unidades, se tiene con la proteína proveniente de los microorganismos ruminales (Cuadro 4), sin embargo la proteína de los microorganismos del rumen tiene deficiencia en su composición de aminoácidos como leucina, isoleucina y valina; pero no es limitante ni en lisina como lo es la harina de cuero, harina de gluten de maíz, harina de alfalfa deshidratada, granos de cervecería o granos de destilería; ni limitante en metionina como lo es la harina de carne, harina de cuero o pasta de soya (Santos *et al.*, 1998); lo anterior es relevante ya que se considera que los aminoácidos mas limitantes en el crecimiento de rumiantes son metionina, lisina y treonina (Richardson y Hatfield, 1978), y que metionina y treonina limitan el nitrógeno retenido (Nolte *et al.*, 2008). Después de la proteína de origen microbiana en lo referente al índice EAA, la segunda y tercera mejor proteína es la de pasta de soya y harina de pescado respectivamente. Por otra parte el índice de EAA

mas bajo, con 34 unidades, se tiene con la harina de cuero, siendo esta deficiente en los aminoácidos histidina, lisina y metionina (Santos *et al.*, 1998).

Cuadro 4. Índice de aminoácidos esenciales (EAA) y aminoácidos limitantes.

Fuente de proteína	Índice EAA	Aminoácidos limitantes		
Harina de sangre	60	Ile	Arg	Met
Harina de pescado	68	Ile	Leu	Val
Harina de cuero	34	His	Lys	Met
Harina de carne	53	Ile	Trp	Leu
Harina de carne y hueso	51	Trp	Ile	Leu
Harina de gluten de maíz	52	Lys	Trp	Arg
Harina de alfalfa deshidratada	65	Lys	Arg	Ile
Granos de cervecería	67	Lys	Arg	His
Granos destilados	54	Lys	Ile	Arg
Pasta de soya	71	Ile	Leu	Met
Microorganismos ruminales	82	Leu	Ile	Val

Fuente: Santos *et al.*, 1998.

La determinación de la proteína en el alimento se hace calculando el nitrógeno (N) total multiplicado por un factor de 6.25 (AOAC, 2005); Maynard *et al.* (1979) menciona que esta proteína total esta compuesta por proteica verdadera y otros sustancias conocidas como nitrógeno no proteico (NNP).

Para el entendimiento a lo referente a proteína se hablara del ciclo del N. Una vez que rumiante consume alimento, este alimento contiene nitrógeno e ingresa al organismo como N dieta.

En la Figura 4, se muestra a través de un diagrama el camino que sigue el N en un rumiante. El N que consume el animal es el N de las proteínas y del NNP, correspondiente a los aminoácidos libres, ácidos nucleicos, urea y aminos (Maynard *et al.*, 1979). Una vez que llega el N al retículo – rumen, una parte de la proteína se degrada en rumen (PDR) y otra pasa a intestino, llamada proteína no degradable en rumen (PNDR) (NRC, 2001). Las proteínas que llegan al rumen son atacadas por los microorganismos y son hidrolizadas a aminoácidos, los cuales son desaminados y se incorporan a la bacteria. La bacteria utiliza los aminoácidos como base para la síntesis microbiana en combinación con el NH_4^+ y como fuente de energía (NRC, 1985).

Una vez en el intestino, el N se diferencia como las fracciones nitrogenadas, proteína de bacterias que se sintetizaron en rumen, proteína del alimento que no se degrado en el rumen y otra fracción que la conforma el NNP. Se lleva a cabo la digestión en el intestino, donde se absorben los aminoácidos y algunos compuestos NNP. El N que llega a intestino grueso prácticamente no se absorbe y pasa a heces (NRC, 1985).

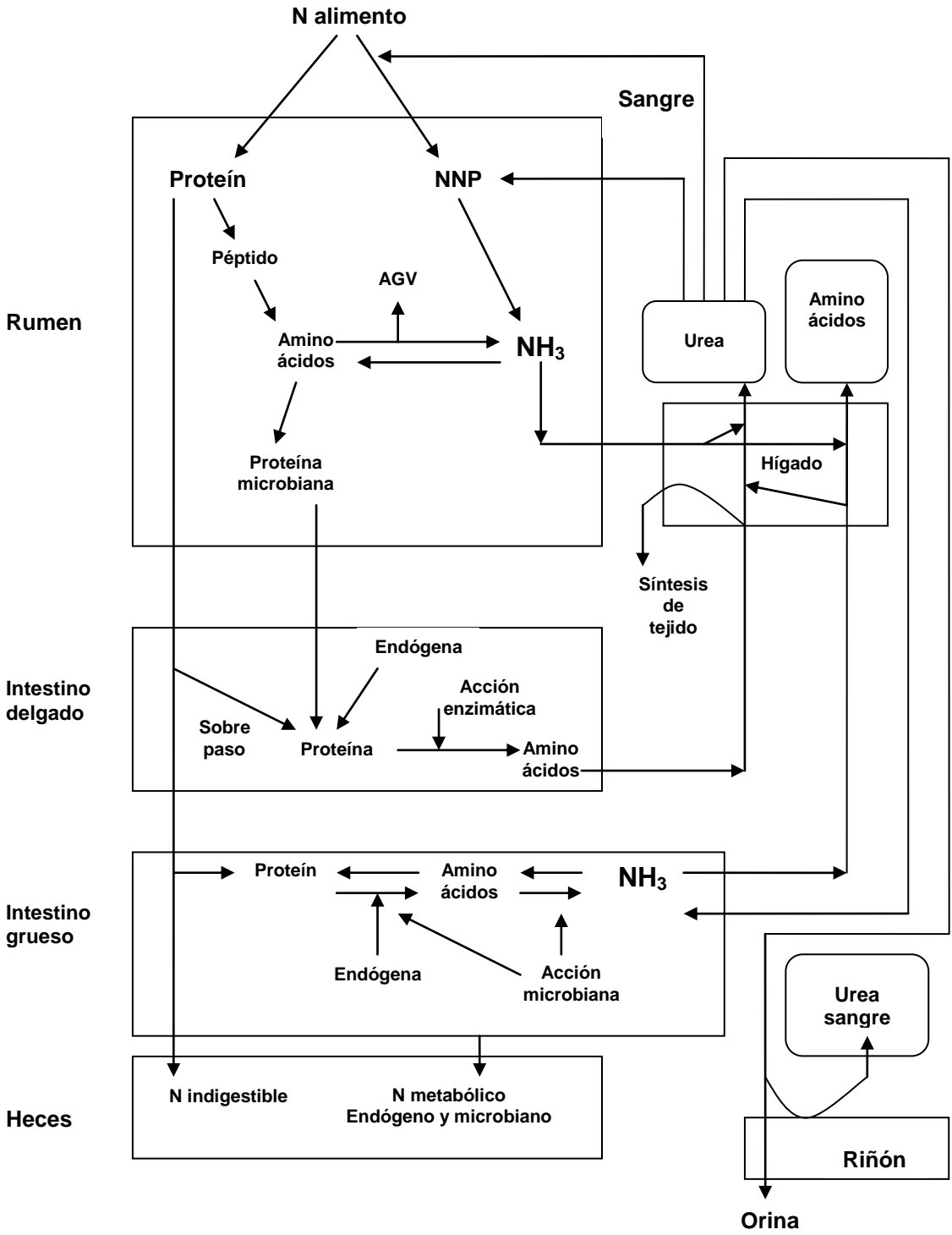


Figura 4. Ruta del nitrógeno dentro del organismo de los rumiantes. Adaptado de Maynard *et al.* (1979).

5. Literatura citada

- AOAC. 2005. Official Methods of Analysis. 18th ed. Association of Official Analytical Chemist, Washington, D.C.
- ARFC. 1992. Technical Committee on Response to nutrients, Reports No. 9. Nutritive requirements of ruminant animals: protein. Nutr. Abs & Rev. Series B. 62:787-835.
- ARFC. 1995. Technical Committee on Response to nutrients. Energy and protein requirements of ruminant. Cab International. Wallingford, United Kingdom, 159 pp.
- Atake, T. 2008. Application of calorimetry and thermodynamics to critical problems in materials science. The J. Chem. Thermodynamics. 41:1-10.
- Baldwin, L., Thornley, J., and Beever, D. 1987. Metabolism of lactating cow. J. Dairy Res. 54:107-131.
- Barnes, R. F. 1967. Collaborative in vitro rumen fermentation Studies on forage substrates. J. Anim. Sci. 26:1120-1130.
- Barnes, R. F. 1968. Variability within and among experiment stations in the determination of in vivo digestibility and intake of alfalfa. J. Anim. Sci. 27:519-524.
- Carey, F. A., and Sundberg, R. J. 2008. Stereo chemistry, conformation, and stereoselectivity. In: F. Carey and R. Sundberg (eds), advanced organic chemistry, Springer Science+Business Media, New York, United States of America, 119-252.
- CSIRO. 1990. Feeding standards for Australian livestock. CSIRO Publications, Australia. 266 pp.
- CSIRO. 2007. Nutrient requirements of domesticated ruminants. CSIRO Publishing, Australia. 270 pp.
- Ferrell, C. L. 1988. Energy metabolism. In: D. Church (ed), The ruminant animal. Digestive physiology and nutrition, Prentice Hall, New Jersey, United States of America, 250-268.
- Fira. 1999. Agronegocios sostenibles: Alternativas para el desarrollo del sector rural y pesquero. 75 pp.

- France, J., and Kebreab, E. 2008. Introduction. In: J. France and E. Kebreab (eds), *Mathematical modeling in animal nutrition*, CABI, London, United Kingdom, 1-11.
- Garrent, W. N., and Johnson, D. E. 1983. Nutritional energetics of ruminants. *J. Anim. Sci.* (suppl. 2) 57:478-497.
- Garret, R. H., and Grisham, C. M. 2010. Molecular components of cell: proteins, their primary structure and biological functions. In: R. Garret and C. Grisham (eds), *Biochemistry*, Brooks-Cole, Boston, United States of America, 93-180.
- Getachew, G., Blummel, M., Makkar, H. P., and Becker, K. 1988. In vitro gas measuring techniques for assessment of nutritional quality of feeds: a review. *Anim. Feed Sci. Technol.* 72:261- 281.
- Harris, L. E., Keael, L. C., and Fennesbeck, P. V. 1972. Use of regression equations in predicting availability of energy and protein. *J. Anim. Sci.* 35:658-680.
- Hata, H., Suzuki, K., Tomioka, T., Tanaka, K., Matsunaga, N., and Hidari, H. 2005. Effect of grazing on deposition of chemical body compounds, energy retention and plasma hormones in stress. *Anim. Sci. J.* 76 :225-236.
- Hirooka, H. 2010. systems approaches to beef cattle production systems using modelling and simulation. *Anim. Sci. J.* 81 :411-424.
- Hoch, T., Pradel, P., and Agabriel, J. 2004. Modélisation de la croissance de bovins: évolution des modèles et applications. *INRA Prod. Anim.* 17 :303-314.
- INRA. 1981. *Alimentación de los rumiantes*. Ediciones Mundi – Prensa. Madrid, España. 696 pp.
- Jarrige, J. 1989. *Ruminant nutrition. Recommended allowances & feed tables*. John Wiley & Sons, Inc. London, England, 389 pp.
- Khan, M. A., Nisa, M. U., and Sarwar, M. 2003. Review. Techniques measuring digestibility for the nutritional evaluation of feeds. *Int. J. Agric. Biol.* 1:91-94.
- Kleiber, M. 1961. *The fire of life. An introduction to animal energetics*. John Wiley & Sons Inc., New York, United States of America, 454 pp.
- Kohn, R. A., and Boston, R. C. 2000. The role of thermodynamics in controlling rumen metabolism. In: J. McNamara, J. France, and D. Beever (eds), *Modelling Nutrient utilization in farm animals*, CABI Publishing, Wallington, United Kingdom, 11-24.
- Kromann, R. P. 1973. Evaluation of net energy systems. *J. Anim. Sci.* 37:200-212.

- Ku, V. J. 1995. El incremento calórico de alimentación en los ruminates. *Vet. Méx.* 26:263-269.
- Kyle, B. G. 1999. The first law of thermodynamics. In: B. Kyle (ed), *Chemical and process thermodynamic*, Prentice Hall. New Jersey. United States of America, 15-39.
- Lofgreen, G. P., Bath, D. L., and Strong, H. T. 1963. Net energy of successive increments of feed above maintenance for beef cattle. *J. Anim. Sci.* 22:598-603.
- Lofgreen, G. P., and Garrett, W. N. 1968. A system for expressing net energy requirements and feed values for growing and finishing beef cattle. *J. Anim. Sci.* 27:793-806.
- Medina, P. S. 2006. Validación de modelos mecanísticos basada en la prueba jicuada de Freese, su modificación y extensión. Tesis de Maestría, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.
- Mareš, J. J., Hubík, P., Šesták, V., Krištofik, J., and Stávek, J. 2008. Phenomenological approach to the caloric theory of heat. *Thermochimica Acta.* 474:16-24.
- Maynard, L. A., and Loosli, J. K. 1956. *Animal Nutrition*. McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, United States of America, 484 p.
- Maynard, L. A., Loosli, J. K., Hintz, H. F., and Warner, R. G. 1979. *Animal Nutrition*. McGraw-Hill Book Company, New York, United States of America, 602 p.
- Meierhenrich, U. 2008. Stereochemistry for the study of the origin of life. In: U. Meierhenrich (ed), *Amino acids and the asymmetry of life. Advances in astrobiology and biogeophysics*, Springer-Verlag, Berlin, Germany, 17-46.
- Mendoza, M. G., Pinos, R. J., Ricalde, V. R., Aranda, I. E., y Rojo, R. R. 2003. Modelo de simulación para estimar el balance calórico de bovinos en pastoreo. *Interciencia.* 28:202-207.
- Menke, K. H., Raab, L., Salewski, A., Steingass, H., Fritz, D., and Schneider, W. 1979. The estimation of the digestibility and metabolisable energy content of ruminant feedingstuffs from gas production when they are incubated with rumen liquor. *J. Agri. Sci.* 93:217-222.
- Merchen, N. R. 1988. Digestion, Absorption and excretion in ruminants. In: D. Church (ed), *The ruminant animal. Digestive physiology and nutrition*. Prentice Hall, New Jersey, United States of America, 172–216.

- Merchen, N. R., and Bourquin, L. D. 1994. Processes of digestion and factors influencing digestion of forage-based diets by ruminants. In: G. Fahey (ed), Forage quality, evaluation, and utilization. American Society of Agronomy, Inc. Wisconsin, United States of America, 564-612.
- Merrill, A. L. and Watt, B. K. 1973. Energy value of foods. Agricultura Research Service United States Department of Agriculture. Agriculture Handbook No. 73.
- Morrison, R. T. and Boyd, R. N. 1992. Proteins and nucleic acids. Molecular biology. In: R. Morrison and R. Boyd (eds), Organic chemistry, Printice-Hall, Inc., New York, United States of America, 1205-1250.
- Nolte, J. V., Löest, C. A., Ferreira, A. V., Waggoner, J. W., and Mathis C. P. 2008. Limiting amino acids for growing lambs a diet low in ruminally undegradable protein. J. Anim. Sci. 86:2627-2641.
- NRC. 1970. Nutrient Requirements of beef cattle. Fourth Rev. Ed Washington D. C. National Academy Press. 55 pp.
- NRC. 1976. Nutrient Requirements of beef cattle. Fifth Rev. Ed Washington D. C. National Academy Press. 56 pp.
- NRC. 1978. Nutrient Requirements of dairy cattle. Fifth Rev. Ed Washington D. C. National Academy Press. 76 pp.
- NRC. 1981. Nutritional Energetics of Domestic Animals and Glossary of Energy Terms. Ed Washington D. C. National Academy Press. Update. 54 pp.
- NRC. 1982. United States – Canadian tables of feed composition. National Academic Press. Washington, D. C. 148 p.
- NRC. 1984. Nutrient Requirements of beef cattle. Sixth Rev. Ed Washington D. C. National Academy Press. 242 pp.
- NRC. 1985. Nutrient Requirements of sheep. Sixth Rev. Ed Washington D. C. National Academy Press. 99 pp.
- NRC. 1988. Nutrient Requirements of dairy cattle. Sixth Rev. Ed Washington D. C. National Academy Press. 157 pp.
- NRC. 1989. Nutrient Requirements of dairy cattle. Sixth Rev. Ed Washington D. C. National Academy Press. Update. 157 pp.
- NRC. 1996. Nutrient Requirements of beef cattle. Seventh Rev. Ed Washington D. C. National Academy Press. 242 pp.

- NRC. 2000. Nutrient Requirements of beef cattle. Seventh Rev. Ed Washington D. C. National Academy Press. Update. 242 pp.
- NRC. 2001. Nutrient Requirements of dairy cattle. Seventh Rev. Ed Washington D. C. National Academy Press. 381 pp.
- NRC. 2007. Nutrient Requirements of Small Ruminants. Sheep, goats, cervids, and new world camelids. Ed Washington D. C. National Academy Press. 362 pp.
- Orskov, E. R., and McDonald, I. 1979. The estimation of protein degradability in the rumen from incubation measurements weighted according to rate of passage. J. Agri. Sci. 92:499-503.
- Owens, F. N., Sapienza, D. A., and Hassen, A. T. 2010. Effect of nutrient composition of feeds on digestibility of organic matter: a review. J. Anim. Sci. 88(E. Suppl.):E151-E169.
- Potter, M. C., and Somerton, C. W. 2006. The first law of thermodynamics. In: M. Potter and C. Somerton (eds), Thermodynamics for engineers, McGraw-Hill Companies, Inc., United States of America, 62-116.
- Richardson, C. R., and Hatfield, E. E. The limiting amino acids in growing cattle. 1978. 46:740-745.
- Russell, J. B., O'Connor, J. D., Fox, D. G., Van Soest, P. J., and Sniffen C. J. 1992. A net carbohydrate and protein system for evaluating cattle diets: I. Ruminal fermentation. J. Anim. Sci. 70:3551-3561.
- Santos, F. A., Santos, J. E., Theurer, C. B., and Huber, J. T. 1998. Effects of rumen-undegradable proteín on Dairy cow performance: a 12-year literature review. J. Dairy Sci. 81:3182-3213.
- Schmid, G. B. 1984. An up-to-date approach to physics. Am. J. Phys. 52:794-799.
- Tedeschi, I. O., Fox, D. G., Sainz, R. D., Barioni, L. G., De Medeiros, S. R., and Boin, C. 2005. Mathematical models in ruminants nutrition. Sci. Agric. 62:76-91.
- Thornley, J. H. and France, J. 2007. Role of mathematical models. In: J. Thornley, and J. France (eds), Mathematical models in agriculture, CABI, London, United Kingdom, 1-18.
- Tilley, J. M. A., and Terry, R. A. 1963. A two-stage technique for the *in vitro* digestion of forage crops. J. Br. Grassl. Soc. 18:104-111.

- Tobias, C. B., Mendoza, M. G., Aranda, I. E., González, M. S., Arjona, S. E., Plata, P. F., and Vargas, V. L. 2006. A simulation model to predict body weight gain in growing steers grazing tropical pastures. *Agri. Systems* 90:99-111.
- Van Soest, P. J. 1982. *Nutritional ecology of the ruminant*. O & B Books, Inc. Corvallis, Oregon. 374 p.
- Van Soest, P. J. 1988. Fecal composition, mathematical of digestion balances and markers. In: Van Soest, P. *Nutritional ecology of the ruminant*. O & B Books, Inc. Corvallis, Oregon. 374 p.
- Vargas, V. L., Ku, V. J., Vargas, V. F., y Medina, P. S. 2005. Evaluación de un sistema ruminal basado en caña de azúcar mediante un modelo dinámico mecanístico. *Interciencia*. 30:424-430.
- Weiss, W. P. 1994. Estimation of digestibility of forages by laboratory methods. In: G. Fahey (ed), *Forage quality, evaluation, and utilization*, American Society of Agronomy, Wisconsin, United States of America, 644-681.

CAPITULO I. MODELO PARA PREDECIR CAMBIOS DE PESO VIVO VACÍO DE TOROS EN PASTOREO EN EL TRÓPICO MEXICANO

Resumen

Se desarrolló un modelo para predecir la ganancia de peso vivo vacío (GPV) de toros pastoreando praderas en zonas tropicales con y sin complemento alimenticio. El estudio se llevó a cabo en dos fases. La primera consistió en construir un modelo utilizando ecuaciones desarrolladas por Lofgreen y Garrett (1968), ARC (1980), NRC (1984) y CSIRO (1990). La segunda, en validar y evaluar el modelo empleando la base de datos de once experimentos con ganado bovino engordado en praderas tropicales con y sin suplemento, realizando un análisis de sensibilidad, análisis de regresión, prueba de medias, y estadísticos de prueba como tendencia media, cuadrado medio del error de predicción (MSPE), raíz de MSPE, variación residual y error absoluto medio. De acuerdo al análisis de sensibilidad las entradas con mayor efecto en la predicción de la GPV, son la disponibilidad de forraje en la pradera y el consumo de materia seca. Los resultados indican subestimación en la GPV en 25% aproximadamente, y de acuerdo a los estadísticos de prueba, análisis de regresión y prueba de medias, se considera que el modelo tiene una baja exactitud para predecir la GPV. Ello implica una subestimación de la GPV, por lo que es necesario desarrollar un modelo mecanístico que considere mayor exactitud en el consumo de materia seca tomando en consideración la tasa de pasaje.

Palabras clave: predicción, simulación, crecimiento, pradera, energía, sensibilidad.

CHAPTER I. MODEL TO PREDICT CHANGES IN LIVE EMPTY WEIGHT OF GRAZING BULLS IN THE MEXICAN TROPICS

Abstract

A model was developed to predict live empty weight (LEW) of bulls grazing in prairies in tropical zones, with and without supplementation. The study was done in two stages. The first one consisted in building a model using equations developed by Lofgreen and Garrett (1968), ARC (1980), NRC (1984), and CSIRO (1990). The second one consisted in validating and evaluating the model using the database of eleven experiments with bovine livestock grown in tropical grasslands, with and without supplementation, carrying out a sensibility analysis, regression analysis, mean test, and proof statistics such as mean tendency, mean square prediction error (MSPE), MSPE root, residual variation, and absolute mean error. According to the sensibility analysis the inputs with the greatest effect on the prediction of the LEW are forage availability in the prairie and dry matter intake. The results indicate an underestimation of the LEW of 25%, approximately; and according to the proof statistics, regression analysis, and mean test, the model is considered to have a low accuracy in predicting LEW. This implies an underestimation of the LEW, thus making it necessary to develop a mechanistic model that considers a greater accuracy in dry matter consumption, taking into account the passage ratio.

Key words: prediction, simulation, growth, prairie, energy, sensibility.

1.1. Introducción

La región tropical en México ocupa aproximadamente el 34 % de la superficie nacional, y tiene un alto potencial para la producción animal, principalmente bovinos productores de carne, quienes basan su alimentación en los forrajes (INEGI, 2010). Sin embargo, la calidad nutritiva de éstos es variable, con porcentaje de proteína cruda y fibra detergente neutro, de 4.0 a 11.2% y 76.5 a 87.6%, respectivamente (Arthington and Brown, 2005). Esta variabilidad afectada por radiación solar, humedad del suelo entre múltiples factores, afecta la ganancia de peso de los animales (McKenzie *et al.*, 1999). Esto implica, que al ser el forraje la base de la alimentación del ganado bovino en zona tropical, la ganancia de peso estará determinada por la cantidad y calidad del forraje ingerido, ganancia de peso vacío promedio alrededor de 0.700 kg (Chizzotti *et al.*, 2008). Además, la complementación alimenticia es otro factor que afecta la ganancia diaria de peso con variaciones de 0.500 a 1.000 kg d⁻¹ dependiendo de la cantidad y calidad del suplemento (Lima *et al.*, 2009). Adicionalmente, otros factores como temperatura, viento, clima, condición del animal, características propias de la pradera, influyen fuertemente en la ganancia de peso de un animal (NRC, 2000), y normalmente no se consideran al momento de determinar las ganancias diarias de peso.

Lo anterior hace de los experimentos en pastoreo necesario para la evaluación de la ganancia diaria de peso (GDP), un proceso complicado por lo que los modelos de predicción podrían ser una herramienta adecuada para estimar el peso de bovinos en pastoreo en un determinado escenario. El propósito de los modelos de predicción es escribir matemáticamente el desarrollo de un sistema, y se clasifican en empíricos o

mecanísticos, estáticos o dinámicos, y /o determinísticos o estocásticos (Dijkstra *et al.*, 2005). Actualmente se han desarrollado diversos modelos para estimar la ganancia diaria de peso, utilizando diferentes metodologías. El NRC es uno de los modelos más conocidos, y se ha venido actualizando desde su formulación en 1945 (NRC, 1963). A pesar de ello, este modelo presenta algunas imprecisiones para condiciones de pastoreo, por ejemplo, en su sexta edición(NRC, 2000), indica que el máximo consumo de materia seca de animales en pastoreo se obtiene con 1150 kg ha⁻¹ de forraje disponible, siendo 2250 kg ha⁻¹ la cantidad real requerida para obtener dicho máximo consumo de materia seca (NRC, 1987). Las consecuencias de utilizar el primer valor citado, y no el segundo, recae en el hecho de una estimación de CMS incorrecta, ya que con 1150 kg ha⁻¹ el CMS se reduce en aproximadamente un 13% (NRC, 1987).

Por tanto, necesariamente se requiere generar un modelo para predecir la ganancia de peso de bovinos en pastoreo en condiciones tropicales en México, especialmente porque las características ambientales son totalmente diferentes a las consideradas en el modelo NRC.

El objetivo del presente estudio fue predecir la ganancia de peso vacío con una alta exactitud de toros en pastoreo, consumiendo forraje con y sin suplemento alimenticio por medio de un modelo de simulación considerando las características del animal, ambiente y pradera.

1.2. Materiales y métodos

El estudio se llevó a cabo en dos fases (Figura 5). La primera fase consistió en el desarrollo del modelo, utilizando diferentes ecuaciones, iniciando con la estimación

de la energía para mantenimiento, incluida la actividad por pastoreo, y ganancia de peso. Una vez desarrollado el modelo, se introdujeron las entradas y obtuvo la salida predicción de ganancia de peso. La segunda fase consistió en la validación y evaluación del modelo, para lo cual se utilizó la base de datos de once experimentos, la evaluación se realizó utilizando diversos análisis comparando lo observado contra lo predicho por el modelo.

Fase uno. Desarrollo del modelo

Para el desarrollo del modelo, se utilizaron diversas ecuaciones, basándose en el Sistema de Energía Neta de California (Lofgreen y Garrett, 1968), determinándose la energía neta para mantenimiento del animal y el valor de energía del alimento.

Determinación de la energía neta para mantenimiento del animal

Se estimaron los requerimientos de energía para mantenimiento, utilizando la ecuación (1), desarrollada por el Lofgreen y Garrett (1968). Se consideraron factores propios del animal como condición animal (NRC, 2000), temperatura (NRC, 1981), y la actividad de pastoreo (CSIRO, 2007).

$$ENm_a = \left((a * PVV^{0.75}) * COMP \right) + EGRAZE_{MCAL} \quad (1)$$

Donde:

ENm_a = requerimiento animal de energía neta para mantenimiento (Mcal d⁻¹)

a = ajuste de requerimiento de NEm por climatización metabólica

$PVV^{0.75}$ = peso metabólico de animal vacío (kg)

COMP = valor de ajuste del crecimiento compensatorio

EGRAZE_{Mcal} = energía utilizada por la actividad en pastoreo (Mcal d⁻¹)

El ajuste por climatización metabólica (a), se determinó utilizando la ecuación (2). Este ajuste es necesario debido a que el metabolismo basal fuera de la zona termo neutral (20°C) requiere gastar energía para mantener la temperatura corporal. Para ello se obtuvo una regresión lineal con el procedimiento MODEL (SAS Institute, 1997), considerando que por cada °C que el animal está expuesto por encima o debajo de 20 °C, se debe restar o adicionar respectivamente 0.0007 Mcal d⁻¹ (NRC, 1981) al valor de 0.077 (Mcal d⁻¹) NEm de PVV^{0.75} (Lofgreen y Garrent 1968).

$$a = 0.091 - 0.0007 * TEMP_x(^{\circ}C) \quad (2)$$

Donde:

a = ajuste al requerimiento de NEm por climatización

TEMP_x = temperatura promedio ambiental en la fase de engorda del ganado

El peso corporal del animal vacío (PVV), se estimó restando el contenido gastrointestinal, utilizando la ecuación (3), dicha ecuación se desarrolló a partir del ajuste de la fórmula $PVA = 1.09 * (PVV + 14)$ desarrollada por el ARC (1980) para bovinos consumiendo forraje fresco. La ecuación (3) se generó siendo el peso corporal del animal ayunado (PVA) la variable dependiente y PVV la variable independiente, considerando el rango normal de animales en crecimiento reportado en la literatura, con un valor de peso inicial de 200 kg hasta 450 kg, con un incremento de 5 kg, para lo cual se utilizó el procedimiento MODEL (SAS Institute, 1997).

$$PVV_{\chi} = -14 + 0.917431 * (PVA_{\chi}) \quad (3)$$

Donde:

PVV_x = peso corporal promedio de animal vacío (kg)

PVA_x = peso corporal promedio de animal con ayuno (kg)

$$PVA_{\chi} = \frac{(PVA_f + PVA_i)}{2} \quad (4)$$

Donde:

PVA_f = peso corporal final de animal con ayuno (kg)

PVA_i = peso corporal inicial de animal con ayuno (kg)

El valor de factor de ajuste por crecimiento compensatorio (COMP), se obtuvo con la ecuación (5), donde se contempló una escala de condición corporal (ECC) de 1 – 9 para ganado bovino en crecimiento, donde 1 es un animal delgado, y 9 un animal con exceso de grasa (NRC, 1996). La ENm se incrementó o redujo en cinco unidades porcentuales por cada valor de BCS arriba o debajo del valor de la escala de cinco (Fox *et al.*, 2004), respectivamente. Para la evaluación del modelo, el valor de condición corporal de los animales se fijó en cinco, siendo un punto en el cual los animales se encuentran en una condición moderada (NRC, 1996).

$$COMP = 0.8 + (ECC_{1-9} - 1) * 0.05 ; \text{ (Fox et al., 2004)} \quad (5)$$

Donde:

COMP = factor de ajuste por condición corporal del animal

ECC_{1-9} = escala de condición corporal; donde 1= animal delgado y 9 = animal con exceso de grasa

La energía utilizada por la actividad en pastoreo (EGRAZE), se obtuvo con la ecuación (6), la cual contempla los desplazamientos horizontales y verticales que realiza el animal para seleccionar el forraje que consume (CSIRO, 1990).

$$EGRAZE = \frac{\left[\left(0.006 * CMS_f * (0.09 - Dig_f) \right) + \left(\frac{0.05 * T}{FD + 3} \right) \right] * PVV}{4.184} \quad (6)$$

Donde:

EGRAZE = energía requerida para actividad de pastoreo (Mcal d⁻¹)

CMS_f = consumo de materia seca de forraje (kg d⁻¹)

Dig = digestibilidad de la energía total del forraje (%)

T = pendiente del terreno (1.0 plano hasta 2.0 lomerío)

FD = forraje disponible en pradera (t ha⁻¹)

Determinación del valor de energía del alimento

El valor de la energía total de los alimentos (forraje y/o suplementos alimenticios), se obtuvo con la ecuación (7), se consideró el valor del calor de combustión (Merril y Watt, 1973) de los distintos nutrientes, y a su vez la cantidad que constituyó cada uno de los alimentos, que varió dependiendo del nutriente. Para el caso de grasa, el calor de combustión equivale a 9.3 Mcal kg⁻¹, proteína de cereales vegetal a 5.8 Mcal kg⁻¹, y para carbohidratos a 4.2 Mcal kg⁻¹.

$$ET_{fcs} = \left(\left(\frac{\%grasa_{fcs}}{100} * 9.3 \right) + \left(\frac{\%PC_{fcs}}{100} * 5.75 \right) + \left(\frac{\%CHO_{fcs}}{100} * 4.20 \right) \right) \quad (7)$$

Donde:

ET_{fcs} = energía total del alimento (Mcal kg⁻¹ CMS)

$Grasa_{fcs}$ = grasa del alimento (%)

PC_{fcs} = proteína cruda del alimento (%)

CHO_{fcs} = carbohidratos del alimento (%)

El valor de la energía digestible de los alimentos (ED), se obtuvo con la ecuación (8), descrita por Jarrige (1990).

$$ED_{fcs} = ET_{fcs} * Dig_{fcs} \quad (8)$$

Donde:

ED_{fcs} = energía digestible del alimento (Mcal kg⁻¹ CMS)

ET_{fcs} = energía total del alimento (Mcal kg⁻¹ CMS)

Dig_{fcs} = digestibilidad del alimento (forraje y/o suplementos) (%)

El valor de la energía metabolizable de los alimentos (EM), se obtuvo con la ecuación (9) (NRC, 1984). Una vez obtenido el valor de ED, se determinó la EM, para lo cual se consideró una pérdida de 18 unidades porcentuales por concepto de orina y producción de gases (Kromann, 1973; NRC, 1984).

$$EM_{fcs} = ED_{fcs} * 0.82 \quad (9)$$

Donde:

EM_{fcs} = energía metabolizable del alimento (Mcal kg⁻¹)

ED_{fcs} = energía digestible del alimento (Mcal kg⁻¹)

Una vez estimada la EM, se estimó la energía neta para mantenimiento y la energía neta para ganancia. Se consideró el principio de partición de energía descrita

por NRC (1981). Para estimar la ENm_{fcs} y ENG_{fcs} de los alimentos se utilizaron las ecuaciones (10) y (11) descritas por Garrett (1980).

$$ENm_{fcs} = -1.12 - 1.37 * EM_{fcs} - 0.138ME_{fcs}^2 + 0.0105EM_{fcs}^3 \quad (10)$$

$$ENG_{fcs} = -1.65 - 1.74 * EM_{fcs} - 0.142EM_{fcs}^2 + 0.0122EM_{fcs}^3 \quad (11)$$

Donde:

ENm_{fcs} = energía neta para mantenimiento del alimento (Mcal kg⁻¹ CMS)

ENG_{fcs} = energía neta para ganancia del alimento (Mcal kg⁻¹ CMS)

EM_{fcs} = energía metabolizable del alimento (Mcal kg⁻¹ CMS)

Estimación del consumo de materia seca

La estimación CMS se realizó utilizando la ecuación (12) desarrollada por el NRC (1984), la cual se basa en el peso metabólico del animal y la ENm de la dieta.

$$CMS_{fcs} = PVA^{0.75} * (0.1493 * ENm_d - 0.046 * ENm_d^2 - 0.0196) * 1.05 \quad (12)$$

Predicción de la ganancia de peso corporal vacío

Para la estimación de la GPV, primeramente se calculó el requerimiento de ENm del animal, considerando PVV promedio en la engorda, condición corporal, temperatura ambiental, forraje disponible, pendiente del terreno, digestibilidad del forraje.

Se calculó el alimento requerido para cubrir las necesidades de energía neta para mantenimiento.

$$Ra\ lim\ ENm_a = \frac{ReqENm_a}{ContENmta\ lim} \quad (13)$$

Donde:

R_{limENm_a} = alimento requerido para cubrir los requerimientos de energía neta para mantenimiento del animal (kg MS d⁻¹).

$ReqENm_a$ = requerimiento de ENm del animal (Mcal d⁻¹)

$ContENmalim$ = contenido total de ENm del alimento (Mcal ENm kg⁻¹ MS)

La estimación del alimento disponible para la ganancia de peso ($AlimdispGPV$), se calculó con la formula (14).

$$Alim\ dispGPV = CMSt - Ra\ lim\ ENm_a \quad (14)$$

Donde:

$AlimdispGPV$ = alimento disponible para ganancia diaria de peso (kg MS d⁻¹)

$CMSt$ = consumo total de materia seca (kg MS d⁻¹)

La estimación de la energía neta disponible para ganancia de peso vacío ($AlimdispGPV$), se calculó con la formula (15).

$$ENgdispGPV = Alim\ dispGPV * ContENgalim \quad (15)$$

Donde:

$ENgdispGPV$ = ENg disponible para la ganancia de peso (Mcal d⁻¹)

$ContENgalim$ = contenido total de ENg del alimento (Mcal ENg kg⁻¹ MS)

La estimación de la ganancia de peso corporal, se estimó con la ecuación (16) en base PVV utilizando la ecuación establecida por el NRC (1984) para animales compensando.

$$GPV = 15.40 * (ENgdispGPV^{0.9116}) * (PVV^{-0.6837}) \quad (16)$$

Donde:

GPV = ganancia de peso corporal vacío (kg)

ENgdispGPV = ENg disponible para la ganancia de peso (Mcal d⁻¹)

PVV = Peso corporal vacío (kg)

Fase dos. Validación y evaluación del modelo

Para la validación del modelo se utilizó la base de datos de once experimentos que se llevaron a cabo en los estados de Veracruz, Tabasco, Puebla y Chiapas (Caro, 2007; Mijares, 2006; Cano *et al.*, 2003; Pérez *et al.*, 2001; Cabrera *et al.*, 2000; Zuart, 1999; García, 1998; Olmos, 1998; Ramos *et al.*, 1998; Joaquín, 1996; Reyes, 1996), resultando en un total de 50 tratamientos, de los cuales se incluyeron bovinos machos en pastoreo con y sin suplemento, considerando las condiciones de producción en México. Los valores de entrada requeridos por el modelo fueron obtenidos de la información necesaria de cada uno de los once experimentos por separado, posteriormente se corrió el modelo y se obtuvieron los valores predichos de GPV. Una vez obtenidas las salidas de GPV de cada experimento se procedió a realizar la evaluación del modelo.

La evaluación del modelo consistió en un análisis de sensibilidad, obtención del residual, obtención de indicadores estadísticos, análisis de regresión, comparación de medias y la obtención de estadísticos de prueba.

Para el análisis de sensibilidad se utilizaron las técnicas *uno a la vez* y *dos pasos*, descritas por Hamby (1994). La primera técnica consistió en formar rangos para cada una de las entradas en el modelo, fijando un valor para cada entrada e ir modificando el valor de las demás entradas. Los valores utilizados para el análisis de sensibilidad (Cuadro 5) fueron: temperatura promedio de 28.84°C, terreno con una

pendiente moderada en donde se engorda ganado bovino cebú con un peso vivo vacío de 225 kg y con una condición corporal de 5.0, en pradera de pasto estrella de África con 57.6% de digestibilidad de la MS y con una disponibilidad de forraje de 2.7 t ha⁻¹,

La técnica de *dos pasos* consistió en construir una matriz de 10 x 10 donde la hilera fue la entrada PC del forraje (%) con un rango de 5 a 10, y la columna fue la entrada disponibilidad de forraje (t ha⁻¹), con un rango de 0.5 a 3.5. Una vez construida la matriz, se fijaron las entradas restantes con los valores que se describen en el Cuadro 6. Posteriormente se combinaron cada uno de los valores de entrada PC del forraje contra forraje disponible. Con esta combinación se obtuvieron los valores de salida de GPV, y se graficaron de manera tridimensional, donde el eje **X** represento la entrada disponibilidad de forraje, el eje **Z** la entrada PC del forraje y el **Y** la salida GPV.

Se obtuvo la ganancia de peso vacío residual (GPV_{res}), procedimiento descrito por Whetsell *et al.* (2006), se comparó la predicción de ganancia de peso vacío (GPV_{pred}) contra la ganancia de peso vacío observado (GPV_{obs}), como se muestra en la formula (17).

$$GPV_{res} = GPV_{pred} - GPV_{obs} \quad (17)$$

Donde:

GPV_{res} = residual de la ganancia de peso corporal vacío

La evaluación del modelo se realizó utilizando diversos indicadores como los estadísticos: media (*M*), desviación estándar (STD), coeficiente de variación (Coeff Var), valor mínimo (MIN), valor máximo (MAX) de la GPV_{pred}, GPV_{obs} y GPV_{res}; utilizando el procedimiento UNIVARIATE (SAS Institute, 1997).

La determinación de la exactitud del modelo se realizó un análisis de regresión, donde los datos predichos se ubicaron en el eje X y los datos observados en el eje Y , de acuerdo a lo descrito por Tedeschi (2006), utilizando el procedimiento REG (SAS Institute, 1997).

Se efectuó una evaluación visual de los residuales que corresponde a una gráfica de dos ejes (X y Y), donde los datos observados se ubicaron en el eje X y los datos residuales en el eje Y (Zhao *et al.*, 2008).

Se llevó a cabo la comparación de prueba de medias entre lo observado y predicho, se utilizó el procedimiento TTEST (SAS Institute, 1997).

Los estadísticos de prueba utilizados para la evaluación de los modelo fueron tendencia media (MB), variación residual (RV) y raíz cuadrada del cuadrado medio del error de predicción (RMSPE) descritos por Hanigan *et al.* (2000); cuadrado medio del error de predicción (MSPE) explicado por Rook *et al.* (1990), y error absoluto medio (MAE) descrito por Willmott y Matura (2006), donde Y_i fueron los valores observados, X_i los valores predichos y n_i el número de observaciones, para las ecuaciones (18), (19), (20), (21) y (22).

$$MB = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - X_i)}{n} \quad (18)$$

Donde:

MB = tendencia media

$$MSPE = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - X_i)^2}{n} \quad (19)$$

Donde:

MSPE = cuadrado medio del error de predicción

$$RMSPE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - X_i)^2}{n}} \quad (20)$$

Donde:

RMSPE = raíz del cuadrado medio del error de predicción

$$RV = \sqrt{RMSPE} \quad (21)$$

Donde:

RV = variación residual

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |Y_i - X_i|}{n} \quad (22)$$

Donde:

MAE = error medio absoluto

* valores absolutos

1.3. Resultados y discusión

Los resultados del análisis de sensibilidad con el procedimiento uno a la vez (Cuadro 7), indican que la entrada FD y CMS generan el mayor cambio en la

GPVpred, ya que presentan los mayores valores de sensibilidad, superando en 17 y 18.2% al obtenido en la entrada pendiente del terreno (T) que presentó el valor mas bajo de sensibilidad. Las entradas con menores valores de sensibilidad fueron TEMP, ECC y PVV, siendo 0.2228, 0.1553 y 0.1370 respectivamente. El valor mas bajo de sensibilidad fué el de la pendiente del terreno, con un valor de 0.0880. Las diferencias en los valores de sensibilidad obtenidas en cada entrada son debido al distinto valor de predicción. Por ejemplo, en la entrada FD se obtuvo un valor mínimo de predicción de GPV de 0.000 kg y valor máximo de 0.598 kg, a diferencia del valor de sensibilidad de la pendiente del terreno con el valor de sensibilidad mas bajo (0.0880), donde el valor de predicción mayor fué de 0.525 kg con un valor de pendiente de 1, y un valor de predicción de GPV de 0.437 cuando la pendiente presentaba un valor de 2.

Estos resultados coinciden con los obtenidos por otros autores quienes reportan que el CMS es una de las variables de entrada con mayor efecto en el cambio de las salidas, como el incremento en producción de leche (Kolver *et al.*, 1998) y ganancia de peso (Ortega *et al.*, 2010). Esto sugiere que este los resultados obtenidos en este estudio, donde los altos valores de sensibilidad como el de FD presentan una mayor variabilidad en las predicciones de GPV debido a que la entrada FD es una variable que influye en gran medida en la estimación del CMS predicha por el modelo, lo que a su vez determina el flujo energético para ganar peso.

La razón por la que la entrada CMS tiene un valor de sensibilidad mayor al de otras entradas en el modelo se debe a que el CMS y la ganancia de peso tienen una alta correlación positiva, como se muestra en la Figura 6, donde al incrementar el CMS se incrementa la GPV, lo que resulta en una mayor cantidad de energía disponible para

ganancia de peso (NRC, 1984). Cuando se estimó un CMS de 4.190 kg se obtuvo un valor de 0.007 Mcal d⁻¹ de energía disponible para ganancia, pero a medida que se incrementa el CMS se incrementa la energía disponible, ya que con un CMS de 6.197 se obtuvo un valor de 1.256 Mcal d⁻¹ de energía disponible para ganancia, con lo cual se estimó una GPV de 0.481 kg d⁻¹.

Un valor de sensibilidad bajo, como el que se obtuvo con la entrada pendiente (0.0880), indica que esta entrada tiene poco efecto en la salida GPV de los animales. En la Figura 7 se muestra la correlación negativa entre la entrada pendiente y la salida GPV, lo cual es explicado por el hecho de que al aumentar la pendiente el animal requiere mayor energía para mantenimiento, por lo tanto se destina una menor cantidad de energía para ganancia de peso (CSIRO, 1990).

Los resultados del análisis de sensibilidad con el procedimiento *dos pasos* en donde se combinaron las entradas DigMS y FD indican que la GPV está en función del valor asignado a cada entrada. Por ejemplo, en la Figura 4 se muestra que la máxima GPV se puede obtener cuando se tiene una alta disponibilidad de forraje en la pradera (3.5 t ha⁻¹) y una alta calidad de forraje (58.5% de digestibilidad). De manera contraria, cuando se tiene una baja disponibilidad de forraje (0.5 t ha⁻¹) y calidad de forraje de 53.2% de digestibilidad de la MS, se estima que el animal no cubre sus necesidades de mantenimiento, por lo que no podrá ganar peso y esto se debe a que el CMS se ve limitado por cantidad y calidad de forraje (NRC, 1997).

La gráfica de doble entrada (Figura 8) permitió identificar un patrón de respuesta en la GPV independiente del FD, lo cual significa que a medida que se incrementa el % DigMS del forraje, la GPV se incrementa independientemente de la disponibilidad de

forraje de la pradera. Así por ejemplo, cuando se tiene una disponibilidad alta de forraje (3.5 t ha^{-1}) y un 58.5% de DigMS del forraje, la GPV diaria puede alcanzar los 0.563 kg, favorecido por un incremento en la calidad de los forrajes, que mejora la digestibilidad, lo cual favorece un mayor CMS (Minson, 1971; NRC, 1997) y segundo, al haber mayor digestibilidad y CMS, se tiene mayor cantidad de energía disponible para ganancia de peso (NRC, 1984).

El comportamiento anterior sugiere que para hacer una adecuada estimación de GPV de animales en pastoreo, es necesario considerar la calidad del forraje seleccionado, y no solo el disponible. En el caso de la determinación de calidad de forraje, es necesario utilizar técnicas de muestreo que simulen la conducta de CMS de animales en pastoreo, como podría ser la técnica de "hand pluncking" (Burns, 2008), donde la muestra analizada es lo mas cercano a lo que realmente consume el animal. Mientras que técnicas como la de doble muestreo, donde se considera el forraje presente antes y después del pastoreo, pueden arrojar resultados de % PC del forraje menor a lo que en realidad el animal esta consumiendo, como lo encontrado por Hernandez y Leaver (2006), donde al muestrear el forraje de la pradera, reportaron valores de 18.25% PC, y al analizar el forraje colectado, encontraron valores en el PC en el forraje de 23.8%, lo cual demuestra la habilidad del animal para consumir forraje de mejor calidad, lo que favorece un mejor comportamiento productivo.

En el Cuadro 8 se presentan los valores predichos de ganancia de peso vacío obtenidos con el modelo desarrollado en este estudio. Así mismo los valores de los residuales son resultado de la evaluación de la GPVpred contra la GPVobs. Se observa

una tendencia a subestimar la GPV, ya que se reportan en su mayoría valores negativos de los residuales.

La media de la GPVpred fué de 0.430 kg, menor a la media de GPVobs, lo que indica una subestimación de la predicción, lo cual se puede verificar con los 35 valores que se subestimaron (71.43%), y con 14 datos sobreestimados, que solo representa el 28.57% de las observaciones (Cuadro 9). En términos prácticos el modelo tiene una predicción de la ganancia de peso para animales en pastoreo de aproximadamente 25% menor a la real, lo que significa una predicción de solo 0.375 kg cuando los datos observados reportan ganancias de peso de 0.500 kg.

En la Figura 9, se muestra la distribución de los residuales, al comparar la GPVobs contra la GPVpred. La ecuación obtenida del análisis de regresión, demuestra que estadísticamente el intercepto fue diferente de cero y la pendiente distinta de uno ($P=0.05$), indicando una inexactitud del modelo, y con $r^2=0.2992$, indica que el modelo tiene una baja precisión (Tedeschi, 2006). En los modelos predictivos utilizados por diversos autores (Whetsell *et al.*, 2006; Molina *et al.*, 2004; Block *et al.*, 2001), se han obtenido interceptos distintos de cero, que estadísticamente muestran que los modelos no son exactos. Algunos modelos pueden presentar tendencias en las predicciones, como lo reportado por Block *et al.* (2001), donde las ganancias de peso se reportan alrededor de 0.700 kg fueron sobreestimadas y aquellas mayores a 0.700 kg subestimadas. Por tanto, es necesario considerar algunos criterios como: (1) alto valor de r^2 (mayor a 0.75), (2) intercepto cercano a cero, pero estadísticamente no distinto de cero, y (3) pendiente cercana a uno para definir la exactitud de un modelo (Zhao *et*

al. 2008). En conjunto los tres criterios antes mencionados permitirán que los datos observados estén cercanos a la línea perfecta, lo que significa un modelo con un alto valor de exactitud.

La distribución de los residuales del modelo (Figura 10) muestra un valor promedio de -0.146, lo cual indica que el modelo de predicción subestima la ganancia de peso vacío en promedio 0.146 kg, y en términos prácticos implica por ejemplo, que en un animal engordado en pastoreo por un periodo de 90 días, se estarían obteniendo aproximadamente 13 kg (peso vacío) menor de lo predicho. Consecuentemente, se obtendría una menor eficiencia en el sistema de producción de ganado bovino en pastoreo, producto de una subestimación en la cantidad de energía disponible para el animal.

La comparación de medias de la GPV observada contra la predicha utilizando la distribución de t de *student*, mostró diferencias significativas ($P > 0.05$) entre lo predicho y lo observado, lo que significa una baja exactitud del modelo para estimar la ganancia de peso. Un modelo para considerarse exacto, no debe presentar diferencias estadísticas al realizar la comparación de medias.

Los resultados de los estadísticos de prueba se presentan en el Cuadro 10. La tendencia media en el modelo predicho y observado fue de -0.146. La RMSPE registró un valor elevado 0.259, al igual que los demás estadísticos de prueba. Un modelo con una alta exactitud, deberá presentar los estadísticos descritos anteriormente con valores cercanos a cero (Tedeschi, 2006), sin embargo, los resultados del modelo desarrollado en este estudio indican una baja exactitud del modelo, lo que implica una subestimación de la ganancia de peso, lo cual puede ser atribuido a un bajo valor de

consumo estimado por modelo propuesto. Zhao *et al.* (2008) reportaron que al evaluar la ganancia de peso de toros en pastoreo, y compararlo con la predicción del modelo, se obtuvo valores del indicador tendencia media que fluctuaron entre -0.01 y -0.120 kg d^{-1} , lo que significa que este modelo subestimó la ganancia de peso con tan solo 10 y 120 g d^{-1} ; en lo referente al estadístico de prueba RMSPE, se obtuvieron valores entre 0.010 y 0.210 , valores aceptados para determinar que el modelo predice con una alta exactitud. A diferencia del valor de 0.259 (Cuadro 10) del estadístico RMSPE que se obtuvo en el presente estudio, y que en conjunto con la prueba de medias y la regresión lineal, dichas pruebas indican la baja exactitud del modelo.

Considerando que el CMS es una entrada en el modelo con un valor alto de sensibilidad 0.4814 , se comparó el CMS predicho contra el observado (Figura 11), resultando en una subestimación en el CMS en un 80% de los casos, lo que limita la energía disponible, lo que a su vez restringe la estimación de GPV, resultando en un mayor valor de GPV residual. Similares resultados presentados por Whetsell *et al.* (2006) al evaluar la ganancia diaria de peso en pastoreo y suplementados donde la GDP observada fue de $0.940 \pm 0.2900 \text{ kg}$ y la GDPpred de $0.600 \pm 0.240 \text{ kg}$, como consecuencia de la subestimación de la predicción del CMS. Una subestimación en el CMS tiene efecto en la energía disponible para ganancia (NRC, 1984) y en el propio consumo, ya que al predecir un consumo más bajo se disminuye la concentración de energía en la dieta y esto provoca una menor estimación del consumo (NRC, 1987), como sucedió en el presente estudio, ya que como se indica en el análisis de sensibilidad, la ganancia de peso está en función de la energía disponible para ganancia, y está en función del consumo de alimento (NRC, 2000).

Es importante considerar que el CMS tiene un gran impacto en el desarrollo de los animales y que su estimación involucra aspectos del animal, ambiental y del forraje (Forbes, 1996). Esto adquiere especial importancia en las zonas tropicales, donde la enorme variabilidad en la calidad del pasto puede afectar y limitar las estimaciones de CMS de los animales en pastoreo.

1.4. Conclusiones

La predicción de los cambios de peso vacío obtenida con el modelo para ganado bovinos en trópico en pastoreo presentó una subestimación en alrededor del 25%. De acuerdo a los resultados de los estadísticos de prueba, del análisis de regresión y la prueba de medias se considera que el modelo tiene una baja exactitud para predecir la GPV.

El modelo desarrollado predice la ganancia de peso vacío con mayor exactitud cuando se considera, una mejor calidad del forraje consumido, ya que esto incrementa la estimación de CMS, lo que a su vez estima mayor cantidad de energía disponible para ganancia de peso.

Los resultados presentados en este estudio, sugieren mayor investigación, formulando y evaluando modelos para estimar el consumo de forraje de animales en pastoreo en trópico, considerando aspectos de la conducta animal, así como la calidad del forraje real consumido, que podrían cambiar los valores de la predicción de la ganancia de peso aquí reportados, obteniendo así, una mejor exactitud.

1.5. Literatura citada

- ARC, 1980. The nutrient requirements of ruminant livestock. Commonwealth Bureaux. CAB International, Wallingford, UK. 347 pp
- Arthington, J. D., and Brown, W. F. 2005. Estimation of feeding value of four tropical forage species at two stages of maturity. *J. Anim. Sci.* 83:1726-1731.
- Block, H. C., McKinnon, J. J., Mustafa, A. F., and Christensen, D. A. 2001. Evaluation of the NRC beef model under western Canadian environmental conditions. *J. Anim. Sci.* 79:267-275.
- Burns, J. C. 2008. Utilization of pasture and forage by ruminants: a historical perspective. *J. Anim. Sci.* 86:3647-3663.
- Cabrera, E. I., Mendoza, M. G., Aranda, I. E., García-Bojalli, C., Barcena, G. R., and Ramos, J. J. 2000. *Saccharomyces cerevisiae* and nitrogenous supplementation in growing stress grazing tropical pastures. *Anim. Feed Sci. Technol.* 83:49-55.
- Cano, A. L., Aranda, I. E., Mendoza, M. G., Pérez, P. J., y Ramos, J. J. 2003. Comportamiento de toretes en pastos tropicales suplementados con caña de azúcar y enzimas fibrolíticas. *Tec. Pecu. Mex.* 41:153-164.
- Caro, H. J. 2007. Evaluación de tejido adiposo de toretes finalizados con ensilado de caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.). Tesis de Maestría, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.
- Chizzotti, M. L., Tedeschi, L. O., and Valadares Filho, S. C. 2008. A meta-analysis of energy and protein requirements for maintenance and growth of Nellore cattle. *J. Anim. Sci.* 86:1588-1597.
- CSIRO. 1990. Feeding standards for Australian livestock. CSIRO Publications, Australia. 266 pp.
- CSIRO. 2007. Nutrient requirements of domesticated ruminants. CSIRO Publishing, Australia. 270 pp.
- Dijkstra, J., Forbes, J. M., and France, J. 2005. Introduction. In: J. Dijkstra (ed), Quantitative aspects of ruminant digestion and metabolism, CABI Publishing, Wallingford, United Kingdom, 1-10.
- Forbes, J. M. 1996. Integration of regulatory signals controlling forage intake of ruminants. *J. Anim. Sci.* 74:3029-3035.

- Fox, D. G., Tedeschi, L. O., Tylutki, T. P., Russell, J. B., Van Amburgh, M. E., Chase, L. E., Pell, A. N., and Overton, T. R. 2004. The Cornell net carbohydrate and protein system for evaluating herd nutrition and nutrient excretion. *Anim. Feed Sci. Technol.* 112:29-78.
- García, S. I. 1998. Adición de un suplemento, una sal mineral y un ionóforo a toretes en finalización en praderas en el trópico húmedo. Tesis de Maestría, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.
- Garrett, W. N. 1980. Energy utilization by growing cattle as determined in 72 comparative slaughter experiments. In: L. Mount (ed), *Energy Metabolism*, EAAP Pub No. 26, Butterworth, London, 3-7.
- Hamby, D. M. 1994. A review of techniques for parameter sensitivity analysis of environmental models. *Environmental Monitoring and Assessment.* 32:135-154.
- Hanigan, M. D., France, J., Crompton, L. A., and Bequette, B. J. 2000. Evaluation of a representation of limiting amino acid theory for milk protein synthesis. In: J. McNamera, J. France and D. Beever (eds), *Modelling nutrient utilization in farm animals*, Cabi Publishing, United Kingdom, 127-144.
- Hernandez, M. O., and Leaver, J. D. 2006. Production and behavioural response of high and low yielding dairy cows to different periods of access to grazing or to a maize silage and soyabean meal diet fed indoors. *Grass and forage Sci.* 61:335-346.
- INEGI. 2010. Anuario estadístico de los Estados Unidos Mexicanos 2009. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. México. p 167.
- Jarrige, J. 1990. Ruminant nutrition. Recommended allowances and feed tables. John Libbey Eurotext. Paris, France. 389 pp.
- Joaquín, A. J. 1996. Cambio de peso de toretes y del perfil de rebrote de una pradera de estrella (*Cynodon plectostachyus*), en pastoreo rotativo con diferentes tiempos de ocupación. Tesis de Maestría, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.
- Kolver, E. S., Muller, L. D., Barry, M. C., and Penno, J. W. 1998. Evaluation and application of the Cornell net carbohydrate and protein system for dairy cows fed diets based on pasture. *J. Dairy Sci.* 81:2029-2039.
- Kromann, R. P. 1973. Evaluation of net energy system. *J. Anim. Sci.* 37:200-212.

- Lima, S. M., Paulino, M. F., Valadares, F. S., Rodrigues, P. P., Oliveira, P. M., and Moreira, C. V. 2009. Body composition and energy requirements of supplemented grazing beef cattle. *Rev. Bras. Zootecn.*
- Lofgreen, G. P., and Garrett, W. N. 1968. A system for expressing net energy requirements and feed values for growing and finishing beef cattle. *J. Anim. Sci.* 27: 793-806.
- McKenzie, B. A., Kemp, P. D., Moot, D. J., Matthews, C., and Lucas, R. J. 1999. Environmental effects on plant growth and development. In: J. White and J. Hodgson (eds), *New Zealand pasture and crop science*, Oxford University Press, Auckland, New Zealand, 29-44.
- Merrill, A. L., and Watt, B. K. 1973. Energy value of foods. Agricultural Research Service. Agriculture Handbook No. 74.
- Minson, D. J. 1971. The digestibility and voluntary intake of six varieties of *Panicum*. *Aust. J. Exp. Agric.* 11:18-25.
- Mijares, L. H. 2006. Cambios de peso de toretes en pastoreo suplementados con bloque multinutricional en condiciones tropicales. Tesis de Maestría, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.
- Molina, D. O., Matamoros, I., Almeida, Z., Tedeschi, L., and Pell, A. N. 2004. Evaluation of the dry matter intake predictions of the Cornell Net Carbohydrate and Protein System with Holstein and dual-purpose lactating cattle in the tropics. *Anim. Feed Sci. Technol.* 114:261-278.
- Nolte, J. V., Löest, C. A., Ferreira, A. V., Waggoner, J. W., and Mathis C. P. 2008. Limiting amino acids for growing lambs a diet low in ruminally undegradable protein. *J. Anim. Sci.* 86:2627-2641.
- N R C., 1963. Nutrient Requirements of beef cattle. Fourth Rev. Ed Washington D. C. National Academy Press. 30 pp.
- N R C., 1981. Nutrient Energetics of Domestic Animals and Glossary of Energy Terms. Ed Washington D. C. National Academy Press. 54 pp.
- N R C., 1984. Nutrient Requirements of beef cattle. Sixth Rev. Ed Washington D. C. National Academy Press. 242 pp.
- N R C., 1987. Predicting feed intake of food-producing animals. Ed Washington D. C. National Academy Press. 85 pp.

- N R C., 1996. Nutrient Requirements of beef cattle. Sixth Rev. Ed Washington D. C. National Academy Press. 242 pp.
- N R C., 2000. Update. Nutrient Requirements of beef cattle. Sixth Rev. Ed Washington D. C. National Academy Press. 242 pp.
- Olmos, O. G. 1998. Efecto de un suplemento nitrogenado, una sal mineral y un ionóforo (lasalacida sódica) en el crecimiento de toretes en praderas en trópico húmedo. Tesis de Maestría, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.
- Ortega, G. C., Hernández, O., Vargas, L., Mendoza, G. D., Martínez, P. A., and Avendaño, L. 2010. Sensitivity analysis of 1996 National Research Council model for supplemented grazing beef cattle. Cuban J. Agric. Sci. 44:1-7.
- Pérez, P. J., Alarcón, Z. B., Mendoza, M. G., Barcena, G. R., Hernández, G. A., y Herrera, H. J. 2001. Efecto de un banco de proteína de kudzú en la ganancia de peso de toretes en pastoreo de estrella africana. Téc. Pecu. Méx. 39:39-52.
- Ramos, J. A., Mendoza, M. G., Aranda, I. E. García-Bojalli, C., Barcena, G. R., and Alanis, R. J. 1998. Escape proteína supplementation of growing stress grazing stargrass. Anim. Feed Sci. Technol. 70:249-256.
- Reyes, B. O. 1996. Efecto del nivel de urea y la adición de un cultivo de *Saccharomyces cerevisiae* en toretes pastoreando en trópico húmedo. Tesis de Maestría, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.
- Richardson, C. R., and Hatfield, E. E. The limiting amino acids in growing cattle. 1978. 46:740-745.
- Rook, A. J., Dhanoa, M. S., and Gill. 1990. Prediction of the voluntary intake of grass silages by beef cattle. Anim. Prod. 50:455-466.
- SAS Institute. 1997. SAS/STAT software: changes and enhancements though release 6.12 SAS Institute. Cary, NC. 1162 p.
- Tedeschi, L.O. 2006. Assessment of adequacy of mathematical models. Agric. Sys. 89:225-247.
- Whetsell, M. S., Rayburn, E. D., and Osborne, P. I. 2006. Evaluation in Appalachian pasture systems of the 1996 (update 2000) National Research Council model for weaning cattle. J. Anim. Sci. 84:1265-1270.
- Willmott, C. J., and Matura, K. 2005. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. Clim. Res. 30:79-82.

- Zhao, J. S., Zhou, Z. M., Ren, L. P., Xiong, Y. Q., Du, J. P., and Meng, Q. X. 2008. Evaluation of dry matter intake and daily weight gain predictions of the Cornell Net Carbohydrate and Protein system with local breeds of beef cattle in China. *Anim. Feed Sci. Technol.* 86:53-69.
- Zuart, R. C. 1999. Aplicación de dos modelos matemáticos para predecir cambios de peso de toretes en pastoreo en trópico humado. Tesis de Maestría, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.

Cuadro 5. Entradas en el modelo para realizar el análisis de sensibilidad con el procedimiento *uno a la vez*.

Entrada	Rango de entrada	Valor fijo de entrada
Peso corporal animal vacío (kg)	151.137 – 307.100	225
Condición corporal	3 - 7	5
Temperatura (°C)	22 - 32	28.84
Forraje disponible (t MS ha ⁻¹)	0.5 – 3.5	2.7
Digestibilidad de la MS del forraje (%)	53.7 – 58.5	57.6
Pendiente de la pradera (°)	1 - 2	1.5

Cuadro 6. Combinación de las entradas, disponibilidad de forraje y digestibilidad de la materia seca en el modelo para realizar el análisis de sensibilidad con el procedimiento *dos pasos*.

Entrada	Rango de entrada	Valor fijo de entrada
Peso corporal animal vacío (kg)	-	225
Condición corporal	-	5
Temperatura (°C)	-	28.84
Forraje disponible (t MS ha ⁻¹)	0.5 – 3.5	-
Digestibilidad de la MS del forraje (%)	53.7 – 58.5	-
Pendiente de la pradera	-	1.5

Cuadro 7. Resultado del análisis de sensibilidad del modelo para predecir la ganancia de peso vacío.

Variable entrada	Unidad	Valor de sensibilidad ^a
Forraje disponible (FD)	t MS ha ⁻¹	0.4977
Consumo de materia seca (CMS)	kg	0.4814
Digestibilidad de la MS del forraje (DigMS)	%	0.3958
Temperatura (TEMP)	°C	0.2228
Condición corporal (ECC)		0.1553
Peso corporal animal vacío (PVV)	kg	0.1370
Pendiente del terreno (T)	°	0.0880

^a valor de sensibilidad más distante de cero, significa que la variable de entrada genera un mayor cambio en la predicción de GPV.

Cuadro 8. Valores predichos, observados y residuales obtenidos en el estudio.

GPVpred	GPVobs	GPVres	Tipo de experimento	Referencia	
0.373	0.519	-0.146	32 toretes, PVinicial 220±63 kg	Cano <i>et al.</i> (2003)	
0.525	0.532	-0.007	pastoreo <i>Cynodon</i> <i>plectostachyus</i>		
0.457	0.536	-0.079	y <i>Hemarthria altísima</i> , suplemento		
0.513	0.513	0.000	concentrado, caña enriquecida	Ramos <i>et al.</i> (1998)	
0.725	0.890	-0.165	32 toretes, PVinicial 220±63 kg		
0.731	1.018	-0.287	pastoreo <i>Cynodon</i> <i>plectostachyus</i>		
0.799	1.110	-0.311	suplementos proteicos		
0.770	0.963	-0.194			
0.762	1.110	-0.348			
0.803	0.927	-0.124			
0.779	0.917	-0.139			
0.283	0.758	-0.474	30 toretes, PVinicial 319±30 kg		Pérez <i>et al.</i> (2001)
0.191	0.588	-0.397	pastoreo <i>Cynodon</i> <i>plectostachyus</i>		
0.277	0.711	-0.434	y <i>Pueraria phaseoloides</i>		
0.191	0.617	-0.426			
0.032	0.506	-0.473			
0.236	0.651	-0.415	42 toretes, PVinicial 190±80 kg	Cabrera <i>et al.</i> (2000)	
0.233	0.633	-0.400	pastoreo <i>Cynodon</i> <i>plectostachyus</i> ,		
0.398	0.734	-0.336	<i>Paspalum conjugatum</i> y suplemento proteico - energético		
0.386	0.761	-0.376			
0.663	0.761	-0.098			
0.620	0.826	-0.206			
0.453	0.385	0.068	42 toretes, PVinicial 259±42 kg	Reyes (1996)	
0.609	0.385	0.223	pastoreo, <i>Paspalum</i> <i>conjugatum</i> ,		
0.225	0.312	-0.087	<i>Cynodon plectostachyus</i> y suplemento proteico - energético		
0.481	0.321	0.160			
0.651	0.495	0.156			

Continuación Cuadro 8. Valores predichos, observados y residuales obtenidos en el estudio.

0.221	0.321	-0.100		
0.161	0.110	0.051	39 toretes, PVinicial 235.4±45.9 kg pastoreo, <i>Paspalum</i> <i>conjugatum</i> ,	Olmos (1998)
0.553	0.358	0.195	<i>Cynodon plectostachyus</i> y suplemento nitrogenado	
0.570	0.495	0.074		
0.577	0.440	0.137	39 toretes, PVinicial 275±25 kg pastoreo, <i>Paspalum</i> <i>conjugatum</i> ,	García (1998)
0.126	0.550	-0.424	<i>Cynodon plectostachyus</i> y suplemento proteico - energético	
0.284	0.642	-0.358		
0.218	0.642	-0.424	30 toretes, PVinicial 360±30 kg pastoreo <i>Cynodon</i> <i>plectostachyus</i> suplemento proteico y mineral	Mijares (2006)
0.285	0.642	-0.357		
0.207	0.367	-0.160		
0.477	0.452	0.025	24 toretes, PVinicial 248±49 kg pastoreo <i>Cynodon</i> <i>plectostachyus</i> suplemento proteína sobrepaso,	Zuart (1999)
0.106	0.379	-0.273	grasa protegida y urea	
0.466	0.694	-0.229	24 toretes, PVinicial 300 kg pastoreo <i>Cynodon</i> <i>plectostachyus</i> suplemento proteína	Joaquín (1996)
0.686	0.481	0.205	distintos días ocupación	
0.780	0.467	0.313	<i>Saccharum officinarum</i> L. pastoreo <i>Cynodon</i> <i>plectostachyus</i> suplemento caña enriquecida	Caro (2007)
0.075	0.292	-0.217		
0.474	0.394	0.079		
0.379	0.316	0.064		
0.268	0.226	0.043		
0.030	0.372	-0.342		
0.395	0.444	-0.049		
0.529	0.644	-0.115		
0.444	0.567	-0.123	<i>Saccharum officinarum</i> L.	

Cuadro 9. Estadísticos de la evaluación del modelo.

	GPVobs	GPVpre	GPVres
Media	0.576±0.229	0.430±0.224	-0.146±0.216
Valor máximo	1.110	0.803	0.313
Valor mínimo	0.110	0.030	-0.474
Coeficiente variación (%)	39.79	52.16	-147.68
Valores sobreestimados (No.)		14	
Valores subestimados (No.)		35	

Cuadro 10. Estadísticos de prueba para evaluar la exactitud de los modelos.

Estadístico	Valor
Tendencia media (MB)	-0.146
Cuadrado medio del error de predicción (MSPE)	0.067
Raíz de MSPE (RMSPE)	0.259
Variación residual (RV)	0.213
Error absoluto medio (MAE)	0.218

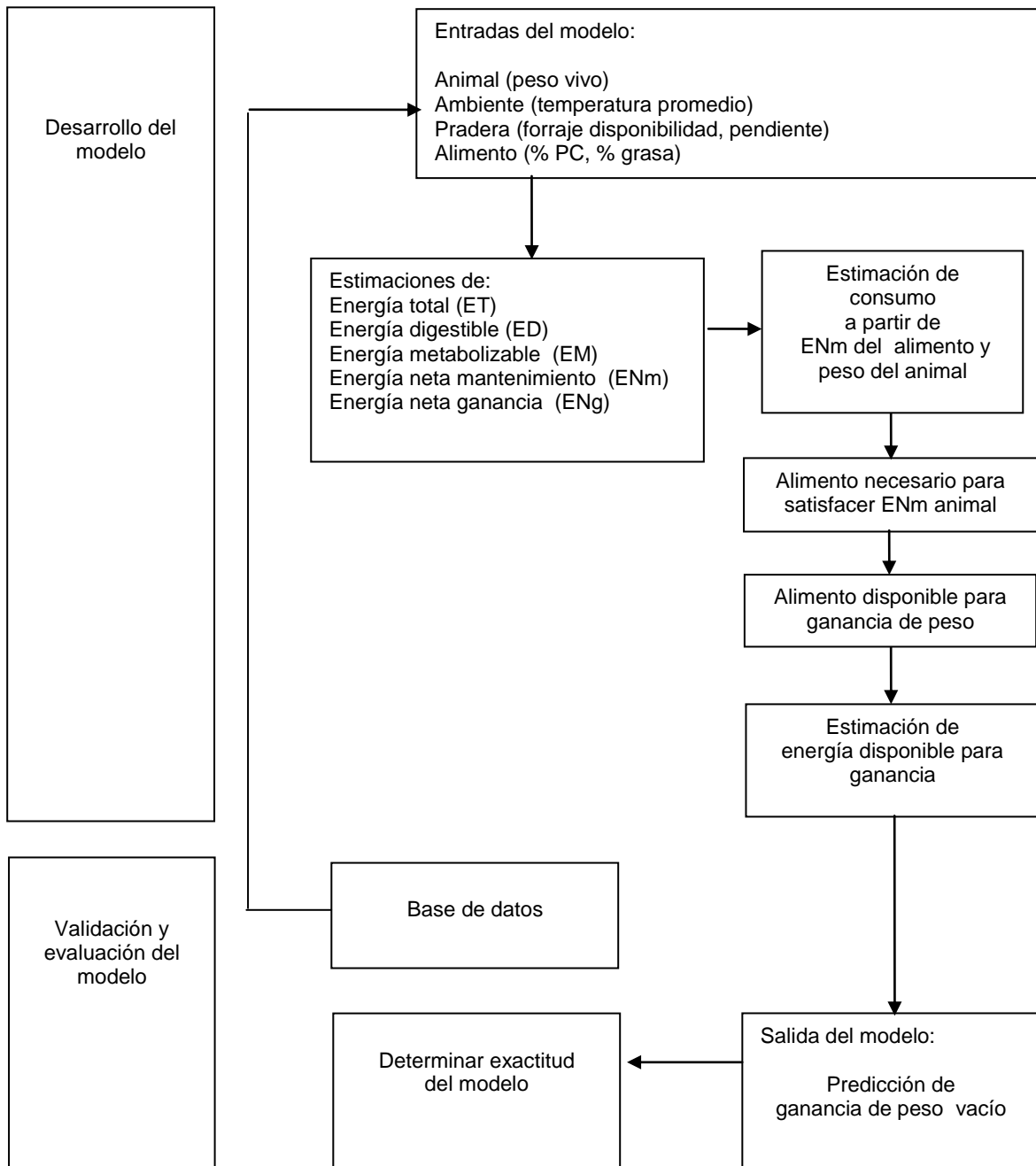


Figura 5. Diagrama de flujo del desarrollo del modelo.

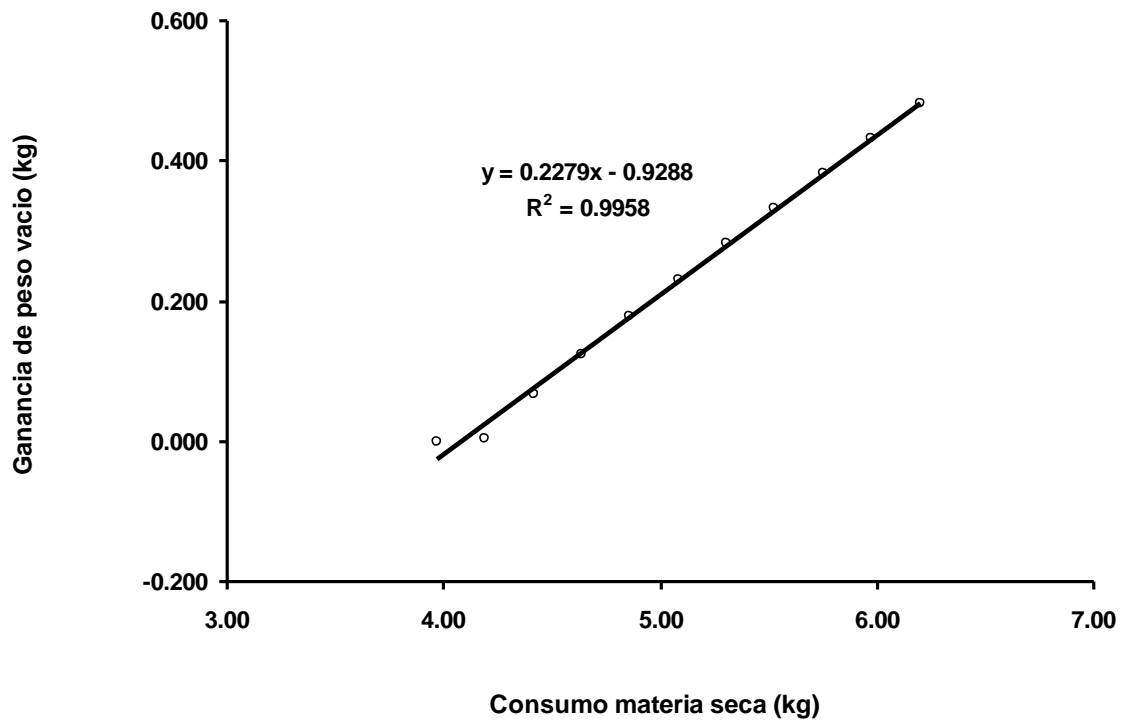


Figura 6. Relación entre la entrada consumo materia seca y salida ganancia de peso vacío del modelo.

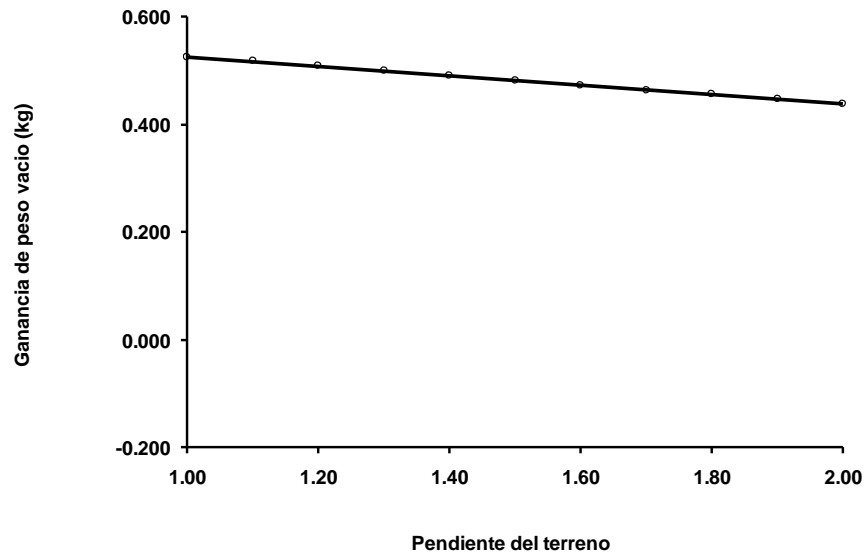


Figura 7. Relación entre la entrada pendiente del terreno y la salida ganancia de peso vacío del modelo.

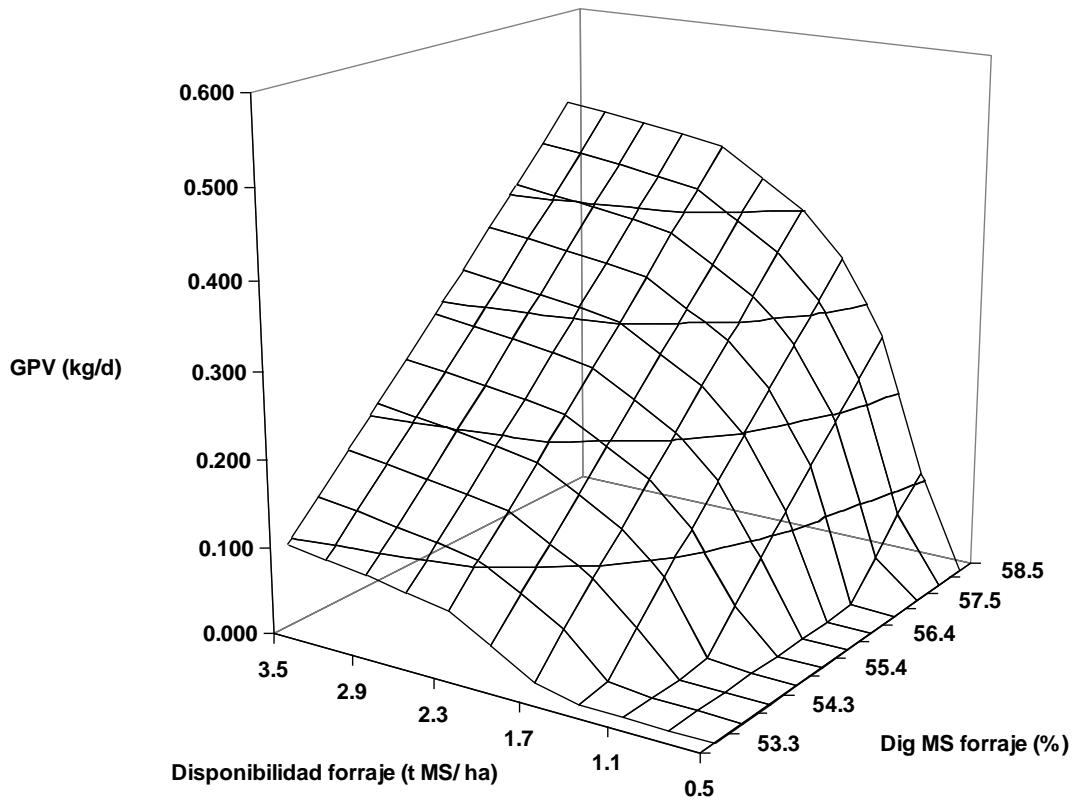


Figura 8. Combinación de las entradas disponibilidad y proteína cruda del forraje con la salida ganancia de peso.

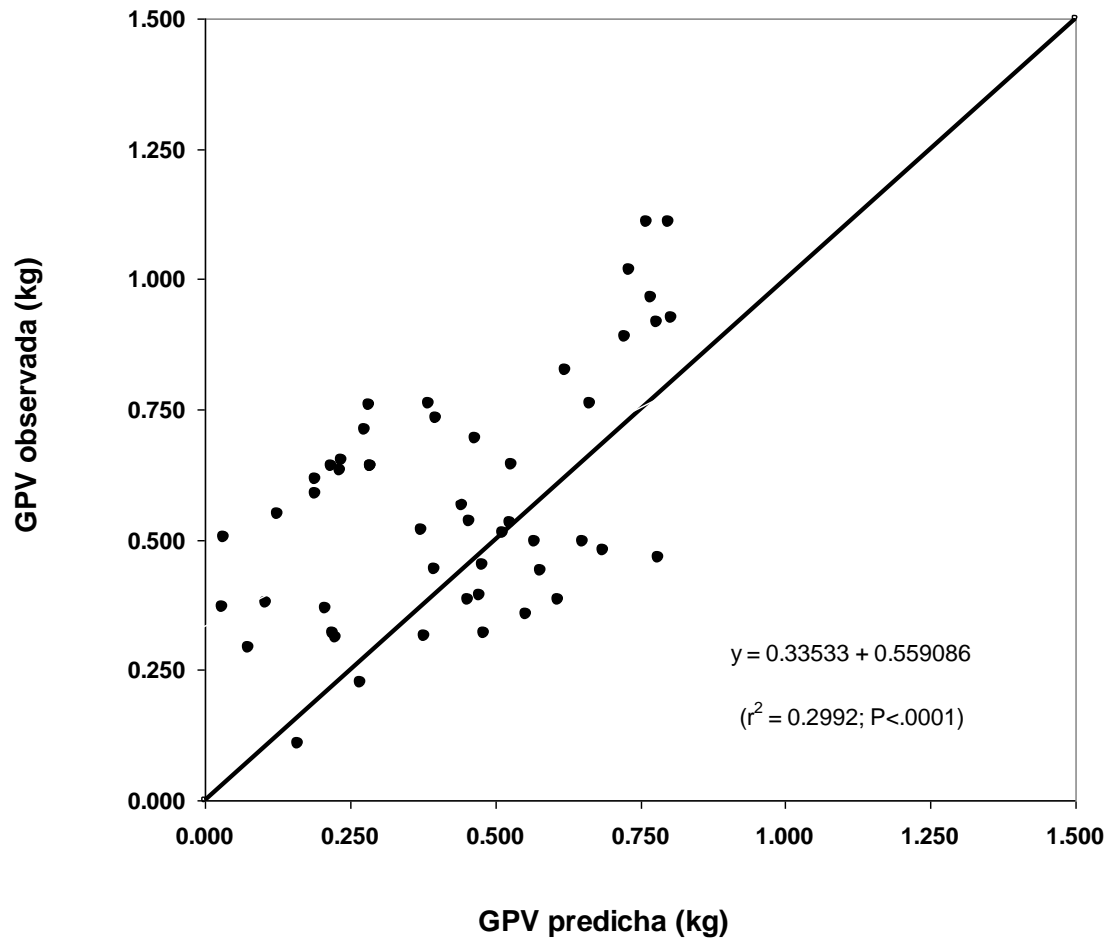


Figura 9. Distribución de las predicciones de ganancia de peso del animal por el modelo.

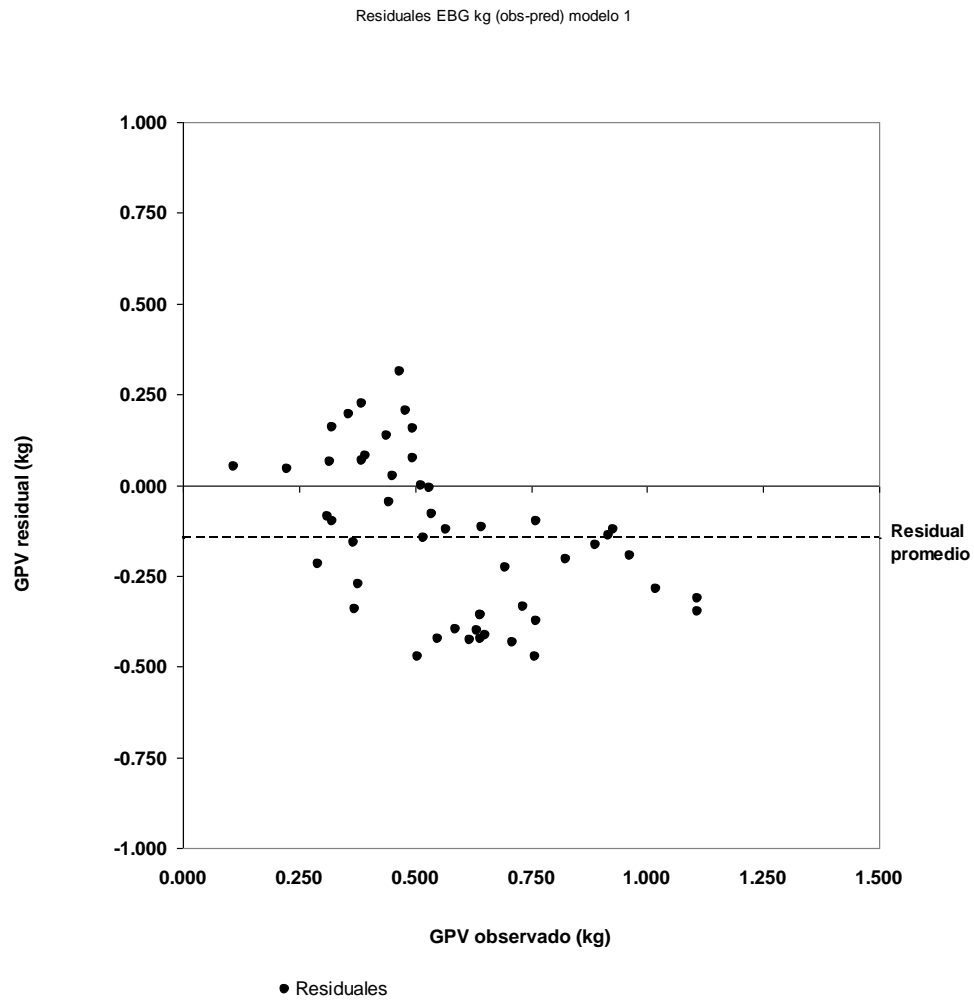


Figura 10. Distribución de los residuales de ganancia de peso vacío del animal por el modelo.

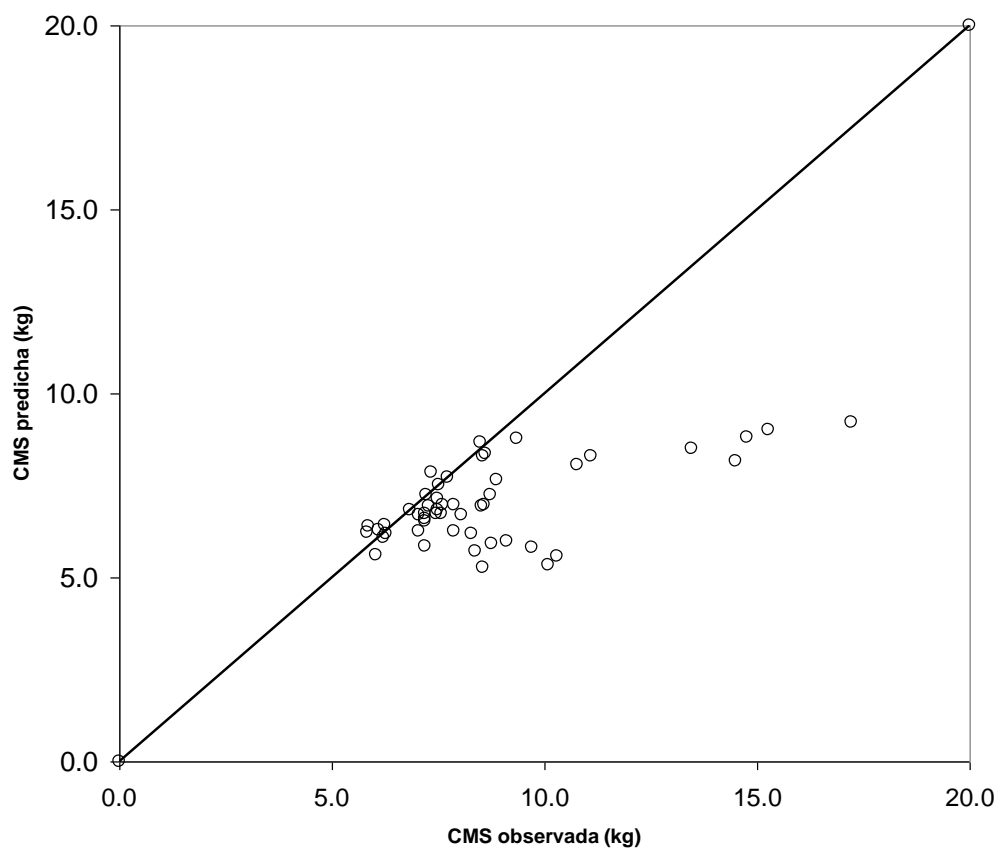


Figura 11. Comparación del consumo de materia seca observado y del predicho por el modelo.

CAPITULO II. ANALISIS DE SENSIBILIDAD DEL MODELO PARA PREDECIR CAMBIOS DE PESO VIVO VACÍO DE TOROS EN PASTOREO EN EL TRÓPICO MEXICANO

Resumen

Se llevó a cabo un análisis de sensibilidad del modelo para predecir la ganancia de peso vacío (GPVp) de toros pastoreando praderas en zonas tropicales, descrito en el capítulo anterior. Para ello, se utilizaron las técnicas *uno a la vez* y *multi pasos*. Se consideró la base de datos proveniente de diversos experimentos desarrollados en el trópico húmedo de México. De acuerdo al análisis de sensibilidad las entradas con mayor efecto en la GPVp fueron la disponibilidad de forraje en la pradera (FD) y el consumo de materia seca (CMS). Los resultados del análisis de sensibilidad con el procedimiento *uno a la vez*, indican que la entrada FD generó el mayor cambio en todas las salidas del modelo, con valores de 0.4641, 38.0873 y 0.0285 para las salidas GPVp, CMS y energía disponible para ganancia (EDG), respectivamente. Contrariamente, la entrada que generó el menor cambio en las salidas del modelo fue la pendiente del terreno (T), con valores de 0.0945, 0.0000 y 0.0046 para las salidas GPVp, CMS y EDG respectivamente. En el caso de la salida CMS, las entradas que presentaron los mayores valores de sensibilidad fueron FD y TEMP, seguido de la digestibilidad de la materia seca del forraje (DigMS) y peso vivo vacío (PVV). Las entradas ECC y T, no presentaron cambios, con un valor de sensibilidad de 0.0000. Finalmente, con el procedimiento *multipasos*, la máxima GPVp se obtiene con la combinación de las entradas digestibilidad de la MS del forraje con el valor de 58.3% y con la entrada forraje disponible, con un valor de 3.5 t MS ha⁻¹. El análisis de sensibilidad realizado al modelo estudiado, mostró ser de utilidad en determinar la magnitud de cambio entre las entradas, ya que hay determinadas entradas que deben ser medidas con mayor precisión, que consecuentemente contribuyen a una mayor exactitud del modelo.

Palabras clave: entradas, salidas, sensible, magnitud, valor de cambio.

CHAPTER II. SENSIBILITY ANALYSIS OF THE MODEL TO PREDICT CHANGES IN LIVE EMPTY WEIGHT IN GRAZING BULLS IN THE MEXICAN TROPICS

Abstract

A sensibility analysis was done of the model to predict empty weight gain (EWG) in bulls grazing in tropical grasslands, described in the previous Chapter. To do this, two techniques were used: *one at a time* and *multistep*. The database from several experiments developed in the humid tropics of Mexico was taken into account. According to the sensibility analysis, the inputs with the greatest effect on EWG were availability of forage in the grassland (AF), and dry matter consumption (DMC). The results of the sensibility analysis using the *one at a time* procedure indicate that AF caused the greatest change in all the model's outputs; values being 0.4641, 38.0873, and 0.0285 for EWG, DMC, and energy available for gain (EAG), respectively. Contrarily, the input with the lowest change on outputs was terrain slope (T); values being 0.0945, 0.0000, and 0.0046 for EWG, DMC, and EAG, respectively. In the case of DMC, the inputs with the greatest sensibility values were AF and TEMP, followed by digestibility of forage dry matter (DigDM) and live empty weight (LEW). Finally, inputs ECC and T showed no changes, with a sensibility value of 0.0000. The sensibility analysis done on the studied model proved to be useful in determining the magnitude of the changes among inputs, since there are some entries which have to be measured with greater precision, and consequently contribute to a greater accuracy of the model.

Key words: inputs, outputs, sensible, magnitude, change value.

2.1. Introducción

Un modelo es la representación simplificada de los procesos del mundo real por medio de ecuaciones. En general, los modelos se construyen utilizando datos e información experimental la cual es analizada por medio de la estadística (Hirooka, 2010). Una vez que se ha generado un modelo, es necesaria su evaluación, para ello existen diferentes mecanismos, uno de ellos es el un análisis de sensibilidad, el cual concede la oportunidad de conocer la magnitud de cambio de las salidas de acuerdo a un determinado valor de entrada en el modelo respectivo (Gunawan *et al.*, 2005).

Verdoodt *et al.* (2004) definen a la sensibilidad, como el procedimiento en el cual a un modelo se le determina el valor de cambio de las salidas de acuerdo a un valor asignado de entrada. Además, con este análisis se simulan valores extremos, que sirven para evaluar el modelo, que en la practica es de mucha importancia ya que están mas apegados a la realidad (Jones y Luyten, 1998). Adicionalmente, el análisis de sensibilidad identifica los parámetros del modelo que tienen un mayor impacto en las salidas (Verdoodt *et al.* 2004).

Lo anterior sugiere integrar un análisis de sensibilidad en el desarrollo y evaluación de un modelo de simulación, con el estricto objetivo de tener mayor exactitud y precisión del mismo.

Por tanto, el objetivo del presente estudio fue conocer el comportamiento del modelo de predicción de los cambios de peso vivo vacío de toros en pastoreo en praderas tropicales a través del análisis de sensibilidad, para lo cual se evaluó la magnitud de cambio en las salidas ganancia de peso vacío, disponibilidad de energía

para ganancia y consumo de materia seca, de acuerdo a un determinado valor de entrada.

2.2. Materiales y métodos

Una vez desarrollado el modelo para predecir los cambios de peso vivo vacío de toros en pastoreo en el trópico, el cual se describe en el capítulo uno, se realizó su evaluación a través del análisis de sensibilidad, para lo cual se utilizaron las técnicas *uno a la vez* y la de *multi pasos* (Hamby, 1990).

La primera técnica consistió en formar rangos para cada una de las entradas en el modelo, fijando un valor para cada entrada e ir modificando el valor de las demás entradas. En el Cuadro 11 se presentan los valores que fueron utilizados para el análisis de sensibilidad. Se consideró la base de datos proveniente de diversos experimentos desarrollados en el trópico húmedo de México (Caro, 2007; Mijares, 2006; Cano *et al.*, 2003; Pérez *et al.*, 2001; Cabrera *et al.*, 2000; Zuart, 1999; García, 1998; Olmos, 1998; Ramos *et al.*, 1998; Joaquín, 1996; Reyes, 1996). Los datos fijos utilizados en el análisis fueron: temperatura promedio (TEMP) de 28.84°C, terreno con una pendiente (T) con valor de 1.5° en donde se engorda ganado bovino cebú con un peso vivo vacío (PVV) de 225 kg, toros en condición corporal (ECC) de 5.0, pradera de estrella de África con 57.6 % de digestibilidad de la MS (DigMS) y forraje disponible en la pradera (FD) de 2.7 t ha⁻¹.

Una vez seleccionados los valores asignados a cada una de las entradas, éstos se utilizaron para correr el modelo para predecir los cambios de peso, con la finalidad de obtener la predicción respectiva de los valores asignados a cada una de las

entradas. Se tomó individualmente cada entrada y se introdujo cada valor del rango descrito, y se corrió el modelo para obtener la predicción respectiva, como describen Ortega *et al.* (2010).

La segunda técnica, llamada de *dos pasos* (Hamby, 1990; Walker y Fox, 2001), consistió en construir una matriz de 10 x 10 donde la hilera fue la entrada DigMS con un rango de 53.27 a 58.53, y la columna fue la entrada FD, con un rango de 0.5 a 3.5 t MS ha⁻¹. Una vez construida la matriz, se fijaron las entradas restantes con los valores que se describen en el Cuadro 10. Posteriormente se combinaron cada uno de los valores de entrada FD contra DigMS. Con esta combinación se obtuvieron los valores de salida de ganancia de peso vacío predicho (GPVp), energía disponible para ganancia (EDG) y consumo de materia seca (CMS). Posteriormente se graficaron de manera tridimensional utilizando el programa Sigmaplot2000 ®, donde el eje **X** representó la entrada FD, el eje **Z** la entrada DigMS, y el **Y** cada una de las salidas. La salida CMS se graficó de manera bidimensional, utilizando las entradas FD en el eje **X** y DigMS en el eje **Y** utilizando el programa Sigmaplot2000 ®.

Todos los cálculos del análisis de sensibilidad se realizaron en una hoja de calculo de Excel® versión 2003 de Windows.

2.3. Resultados y discusión

Los resultados del análisis de sensibilidad con el procedimiento *uno a la vez* (Cuadro 12), indican que la entrada FD generó el mayor cambio en todas las salidas del modelo, con valores de 0.4641, 38.0873 y 0.0285 para las salidas GPVp, CMS y EDG, respectivamente. De manera contraria, la entrada que generó el menor cambio

en las salidas del modelo fue T, con valores de 0.0945, 0.0000 y 0.0046 para las salidas GPVp, CMS y EDG respectivamente. Para el caso de las salidas GPVp y EDG, los valores de sensibilidad en orden descendente, fueron para las entradas FD, DigMS, TEMP, ECC, PVV y T. En el caso de la salida CMS, las entradas que presentaron los mayores valores de sensibilidad fueron FD y TEMP, seguido de DigMS y PVV. Finalmente, las entradas que no presentaron cambios o que obtuvieron un valor de sensibilidad de 0.0000, fueron las entradas ECC y T.

La entrada FD presenta el mayor valor de sensibilidad en la salida GPVp, debido a que la FD tiene un efecto directo en el CMS, que a su vez determina la EDG y finalmente a la GPVp. Valores bajos de FD establece límites en el CMS, mientras que con valores altos de FD, el CMS se maximiza. Por ejemplo, un valor de FD de 0.5 t MS ha⁻¹ predice un CMS de 4.284 kg d⁻¹, mientras que un FD de 3.5 t MS ha⁻¹, predice un CMS de 6.693 kg d⁻¹. Este comportamiento se explica biológicamente con lo reportado por diversos autores (Benvenuti *et al.*, 2006; Hirata *et al.*, 2007), donde los mayores CMS se obtienen por la respuesta del animal, ya que realiza un mayor número de bocados y un mayor peso de los bocados.

Las entradas FD y DigMS, las cuales obtuvieron los valores de sensibilidad más altos en el modelo, y que determinan en parte el CMS, coinciden con lo reportado por otros autores, al indicar que el CMS es una de las variables de entrada con mayor efecto en el cambio de las salidas, como el incremento en producción de leche (Kolver *et al.*, 1998) y ganancia de peso (Ortega *et al.*, 2010).

La entrada TEMP registró un valor de sensibilidad para la salida CMS de 14.8148, que resultó ser el segundo valor más alto, lo cual es debido a que el modelo

contempla que con una temperatura promedio de 30°C, el CMS se reduce en un 90%. El NRC (1981) considera una reducción en el CMS de ganado bovino de 3 a 10% cuando existe una temperatura promedio de 25 a 35°C. El incremento en la temperatura provoca en el animal diversos cambios fisiológicos que ocurren en el sistema digestivo, en la química de la relación ácido-base, en la reducción de la actividad de pastoreo, en el incremento de la tasa respiratoria, y en la disminución del CMS. Particularmente, la reducción en CMS es con el objetivo de reducir el calor endógeno (West, 2003), situación que se ve reflejado en el modelo, al reducir la estimación en el CMS, cuando el valor de la entrada TEMP es mayor o igual a 30°C.

La entrada DigMS registró un valor de sensibilidad para la salida CMS de 9.4125, siendo la segunda entrada que genera el mayor impacto en la salida CMS, después de FD. El efecto de la digestibilidad de la MS del forraje está relacionado con la velocidad de paso del alimento por el tracto digestivo del rumiante (Leng, 1990). Goetsch y Johnson (1999), reportan incrementos en el CMS de 25 % en borregas a medida que incrementa la digestibilidad del forraje ofrecido de un 52 a 62 % de digestibilidad.

La entrada condición corporal del animal (ECC), registró un valor de 0.0000, lo que significa que la ECC del animal no tiene ningún efecto en la salida CMS. Sin embargo, NRC (1984) reporta que animales cambian patrones de CMS cuando se les ofrece alimento *ad limitum*, lo que se traduce en un factor a considerar en la ecuación de CMS. El valor de sensibilidad obtenido en la salida CMS considerando la entrada ECC, sugiere ajustar la ecuación de CMS en la primera fase de engorda de toros, y incorporar la variable condición corporal del animal en la ecuación de CMS.

La entrada PVV registró un valor de sensibilidad de 4.4891 para la salida CMS. Lo cual es adecuado ya que la capacidad de ingesta de un animal está altamente correlacionado con el tamaño del animal y la capacidad del tracto gastrointestinal (Jarrige, 1989). El valor de sensibilidad es consecuencia del origen de la ecuación para estimar CMS, ya que las dos variables consideradas en la ecuación de CMS son peso del animal y contenido de energía en la dieta ofrecida al animal. La ecuación $CMS_{fcs} = PVA^{0.75} * (0.1493 * ENm_d - 0.046 * ENm_d^2 - 0.0196) * 1.05$, coincide con las variables consideradas en las ecuaciones descritas por diversos otros autores (ARC, 1980; Fox y Black, 1984; NRC, 1984; NRC, 1996; NRC, 2000).

La entrada T registró un valor de 0.0000, lo que significa que de acuerdo al modelo, un animal que pastorea en una pradera con lomerío a diferencia de una pradera sin ninguna pendiente el CMS es similar. Se debe considerar, que esta misma entrada (T) registró un valor de sensibilidad de 0.0945 para la salida GPVp, lo que significa que existe un efecto de la T en la ganancia de peso de un toro en pastoreo. Estos resultados coinciden con los reportes de CSIRO (2007) y NRC (2000), donde indican que a medida que aumenta la pendiente de un terreno la ganancia de peso de un animal disminuye, consecuencia de un incremento en la ENm en el animal y una menor EDG.

Con el procedimiento *dos pasos*, donde se combinaron las entradas FD y DigMS, los resultados del análisis de sensibilidad indican que la máxima GPVp (0.512 kg d⁻¹ a⁻¹), se obtiene cuando la entrada DigMS del forraje presenta un valor de 58.5% y la entrada FD tiene un valor de 3500 kg ha⁻¹ de MS (Figura 12 y 13). Esto corresponde

a lo descrito por el NRC (1987), donde indican que el 100% del CMS relativo se obtiene con valores $\geq 2250 \text{ kg ha}^{-1}$ de MS disponible. En lo referente a la digestibilidad de los forrajes NRC (2000), muestra una relación positiva entre la DigMS y la ENg, lo que a su vez permite inferir que a mayor ENg de un alimento, la ganancia de peso incrementa.

Para el caso de valores bajos de FD (Figura 12 y 13) que se encuentran en el rango de 500 a 2200 kg ha^{-1} de MS disponible, combinado con la DigMS de 54%, el modelo no predice ganancia de peso en los animales, lo que se atribuye a que no se alcanzan a cubrir las necesidades de energía neta para mantenimiento.

Los valores de la salida EDG (Figura 14) al combinarse con las entradas FD y DigMS, indican que valores de FD entre 0.5 a 0.8 t MS ha^{-1} combinado con valores de entrada de DigMS entre 53.27 a 55.38 %, estiman valores de EDG negativos, implicando valores negativos en el cambio de peso del animal. En términos prácticos, al obtener valores negativos de EDG, significa que animal no gana peso. Explicado con la formula $GPV = 15.40 * (ENg_{disp} GPV^{0.9116}) * (PVV^{-0.6837})$, ecuación descrita por el NRC (1984).

En la Figura 15, se presentan las entradas que caracterizan la cantidad y calidad del forraje en la pradera. Los resultados obtenidos de la combinación de las entradas FD y DigMS indican en términos prácticos, las condiciones en las cuales se pueden obtener los mayores CMS por parte de un animal. La combinación de las entradas del modelo FD y DigMS, son entradas que obtuvieron altos valores de sensibilidad, así mismo, se identificó que la mayor magnitud de cambio en la salida CMS, es causada por la entrada FD cuando los valores se encuentran entre ≥ 0.500 y

2.249 t MS ha⁻¹. Una vez alcanzado el valor de 2.250 t MS ha⁻¹ de la entrada FD, la predicción de CMS presenta menor magnitud de cambio, lo que se confirma con la estabilidad registrada por el NRC (1987) en el CMS al combinar la disponibilidad de forraje con el consumo.

Para el caso de los valores de la DigMS, se registra un incremento. Sin embargo, la magnitud de cambio es menor a la registrada por la entrada FD. Lo cual es debido a que la primer limitante en el CMS de un animal es el forraje disponible.

2.4. Conclusiones

Las entradas que generaron el mayor cambio en las salidas GPVp, ENG y CMS, fueron forraje disponible, digestibilidad de la materia seca y temperatura. De manera contraria, la entrada que generó el menor cambio en las salidas GPVp y ENG, fué la pendiente del terreno. Las entradas condición corporal del animal y pendiente del terreno no crearon ni cambio en la salida consumo de materia seca.

Los resultados obtenidos en esta investigación permiten identificar las variables del modelo que deberán introducirse con mayor precisión, como son las entradas FD y DigMS.

La metodología descrita podría utilizarse para cuantificar la magnitud de cambio de valores de entrada extremos para determinada zona. Tal es el caso de regiones del país donde las temperaturas máximas superiores promedio superen los 35°C.

2.5. Literatura citada

- ARC, 1980. The nutrient requirements of ruminant livestock. Commonwealth Bureaux. CAB International, Wallingford, UK. 347 pp
- Benvenuti, M. A., Gordon, I. J., and Poppi, D. P. 2006. The effect of the density and physical properties of grass stems on the foraging behaviour and instantaneous intake rate by cattle grazing an artificial reproductive tropical sward. *Grass forage Sci.* 61:272-281.
- Cabrera, E. I., Mendoza, M. G., Aranda, I. E., García-Bojalli, C., Barcena, G. R., and Ramos, J. J. 2000. *Saccharomyces cerevisiae* and nitrogenous supplementation in growing stress grazing tropical pastures. *Anim. Feed Sci. Technol.* 83:49-55.
- Cano, A. L., Aranda, I. E., Mendoza, M. G., Pérez, P. J., y Ramos, J. J. 2003. Comportamiento de toretes en pastos tropicales suplementados con caña de azúcar y enzimas fibrolíticas. *Tec. Pecu. Mex.* 41:153-164.
- Caro, H. J. 2007. Evaluación de tejido adiposo de toretes finalizados con ensilado de caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.). Tesis de Maestría, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.
- CSIRO. 2007. Nutrient requirements of domesticated ruminants. CSIRO Publishing, Australia. 270 pp.
- Fox, D. G., and Black, J. R. 1984. A system for predicting body composition and performance of growing cattle. *J. Anim. Sci.* 58:725-739.
- García, S. I. 1998. Adición de un suplemento, una sal mineral y un ionóforo a toretes en finalización en praderas en el trópico húmedo. Tesis de Maestría, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.
- Goetsch, A. L., and Johnson, Z. B. 1999. Feed intake and digestion in the summer and fall by different breeds of ewes consuming forages differing in quality. *Small Ruminant Res.* 31:109-116.
- Gunawan, R. 2005. Sensitivity analysis of discrete stochastic systems. *Biophy. J.* 88:2530-2540.
- Hamby, D. M. 1994. A review of techniques for parameter sensitivity analysis of environmental models. *Environmental Monitoring and Assessment.* 32:135-154.
- Hirata, M., Ogura, S., Hasegawa, H., and Mećešić. 2007. Effect of herbage mass on the selection and use by cattle of fine-scale locations in a progressively grazed tropical grass pasture. *Grassland Sci.* 53:226-239.

- Hirooka, H. 2010. Systems approaches to beef cattle production systems using modeling and simulation. *Anim. Sci. J.* 81:411-424.
- Jarrige, J. 1990. Ruminant nutrition. Recommended allowances and feed tables. John Libbey Eurotext. Paris, France. 389 pp.
- Joaquín, A. J. 1996. Cambio de peso de toretes y del perfil de rebrote de una pradera de estrella (*Cynodon plectostachyus*), en pastoreo rotativo con diferentes tiempos de ocupación. Tesis de Maestría, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.
- Jones, J. J., and Luyten, J. C. 1998. Simulation of biological processes. In: R. Peart and R. Curry (eds), *Agricultural systems modeling and simulation*, Marcel Dekker, Inc., New York, United States of America, 19-62.
- Kolver, E. S., Muller, L. D., Barry, M. C., and Penno, J. W. 1998. Evaluation and application of the Cornell net carbohydrate and protein system for dairy cows fed diets based on pasture. *J. Dairy Sci.* 81:2029-2039.
- Leng, R. A. 1990. Factors affecting the utilization of poor quality forages by ruminants particularly under tropical conditions. *Nutr. Res. Rev.* 3:277-303.
- Mijares, L. H. 2006. Cambios de peso de toretes en pastoreo suplementados con bloque multinutricional en condiciones tropicales. Tesis de Maestría, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.
- N R C., 1981. *Nutrient Energetics of Domestic Animals and Glossary of Energy Terms*. Ed Washington D. C. National Academy Press. 54 pp.
- N R C., 1984. *Nutrient Requirements of beef cattle. Sixth Rev.* Ed Washington D. C. National Academy Press. 242 pp.
- N R C., 1987. *Predicting feed intake of food-producing animals*. Ed Washington D. C. National Academy Press. 85 pp.
- N R C., 1996. *Nutrient Requirements of beef cattle. Sixth Rev.* Ed Washington D. C. National Academy Press. 242 pp.
- N R C., 2000. *Update. Nutrient Requirements of beef cattle. Sixth Rev.* Ed Washington D. C. National Academy Press. 242 pp.
- Olmos, O. G. 1998. Efecto de un suplemento nitrogenado, una sal mineral y un ionóforo (lasalacida sódica) en el crecimiento de toretes en praderas en trópico húmedo. Tesis de Maestría, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.

- Ortega, G. C., Hernández, O., Vargas, L., Mendoza, G. D., Martínez, P. A., and Avendaño, L. 2010. Sensitivity analysis of 1996 National Research Council model for supplemented grazing beef cattle. *Cuban J. Agric. Sci.* 44:1-7.
- Pérez, P. J., Alarcón, Z. B., Mendoza, M. G., Barcena, G. R., Hernández, G. A., y Herrera, H. J. 2001. Efecto de un banco de proteína de kudzú en la ganancia de peso de toretes en pastoreo de estrella africana. *Téc. Pecu. Méx.* 39:39-52.
- Ramos, J. A., Mendoza, M. G., Aranda, I. E. García-Bojalli, C., Barcena, G. R., and Alanis, R. J. 1998. Escape proteína supplementation of growing stress grazing stargrass. *Anim. Feed Sci. Technol.* 70:249-256.
- Reyes, B. O. 1996. Efecto del nivel de urea y la adición de un cultivo de *Saccharomyces cerevisiae* en toretes pastoreando en trópico húmedo. Tesis de Maestría, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.
- Verdoodt, A., Ranst, E. V., and Ye, L. 2004. daily simulation of potential dry matter production of annual fields crops in tropical environments. *Agron. J.* 96:1739-1753.
- Walker, D., and Fox, R. J. 2001. allowing for uncertainty in economic evaluations: qualitative sensitivity analysis. *Health Policy and Planning.* 16:435-443.
- West, J. W. 2003. Effects of heat-stress on production in dairy cattle. *J. Dairy Sci.* 86:2131-2144.
- Zuart, R. C. 1999. Aplicación de dos modelos matemáticos para predecir cambios de peso de toretes en pastoreo en trópico humado. Tesis de Maestría, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.

Cuadro 11. Entradas en el modelo para realizar el análisis de sensibilidad con el procedimiento uno a la vez.

Entrada	Rango de entrada	Valor fijo de entrada
Peso corporal animal vacío (kg)	146 – 289	217
Condición corporal	3 - 7	5
Temperatura (°C)	22 - 32	27.5
Forraje disponible (t MS ha ⁻¹)	0.5 – 3.5	2.5
Digestibilidad MS del forraje (%)	53.27 - 58.53	57.69
Pendiente de la pradera (°)	1 - 2	1.5

Cuadro 12. Resultado del análisis de sensibilidad del modelo para predecir la ganancia de peso vacío.

Variable entrada	Unidad	Valor de sensibilidad		
		GPVp	EDG	CMS
FD	t MS ha ⁻¹	0.4641	0.0285	38.0873
DigMS	%	0.3958	0.0185	9.4125
TEMP	°C	0.2214	0.0106	14.8148
ECC		0.1587	0.0077	0.0000
PVV	kg	0.1382	0.0071	4.4891
T		0.0945	0.0046	0.0000

FD: forraje disponible; DigMS: digestibilidad de la materia seca del forraje; TEMP: temperatura; ECC: condición corporal del animal; T: pendiente del terreno.

GPVp: ganancia de peso vacío predicha; EDG: energía disponible para ganancia;

CMS: consumo de materia seca.

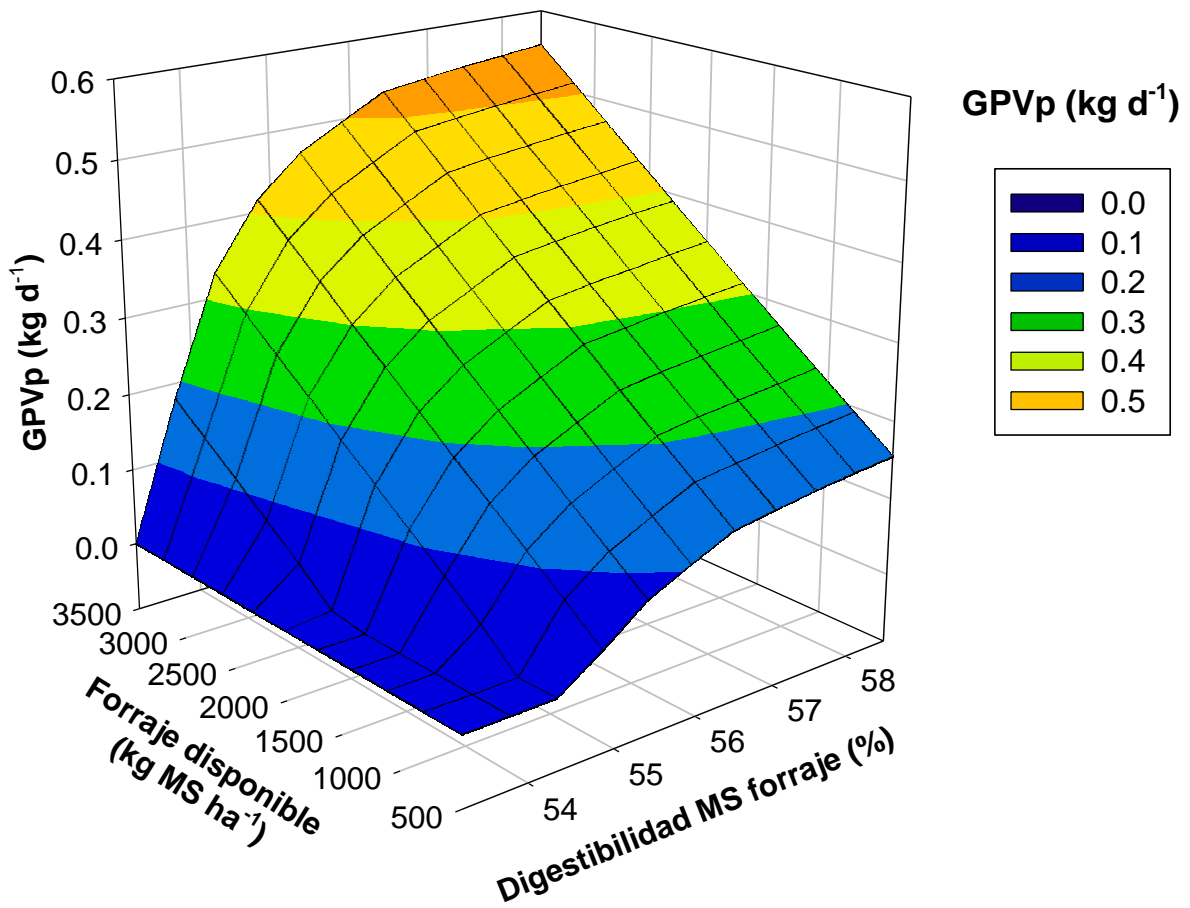


Figura 12. Combinación de las entradas disponibilidad y digestibilidad del forraje con la salida ganancia de peso, representado de manera tridimensional.

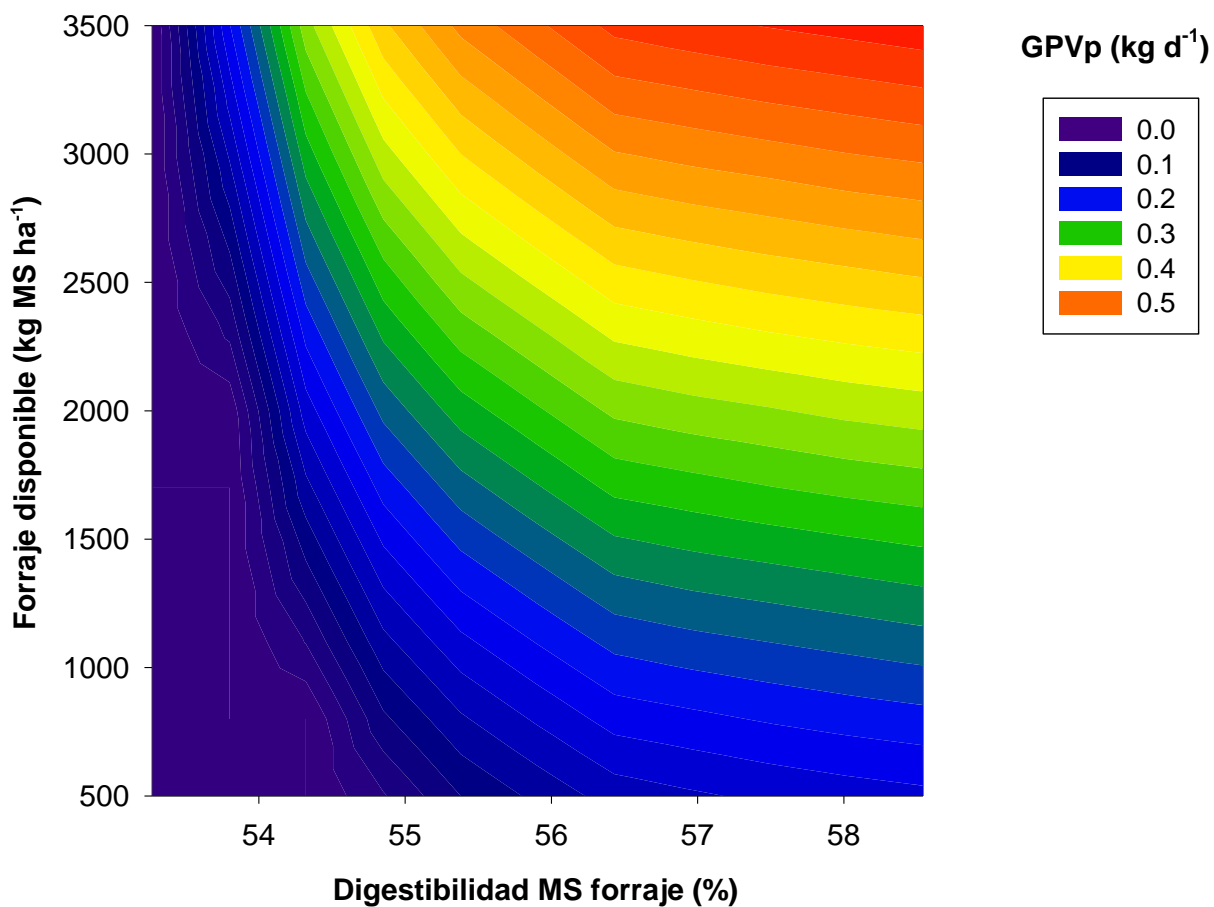


Figura 13. Combinación de las entradas disponibilidad y digestibilidad del forraje con la salida ganancia de peso, representado de manera bidimensional.

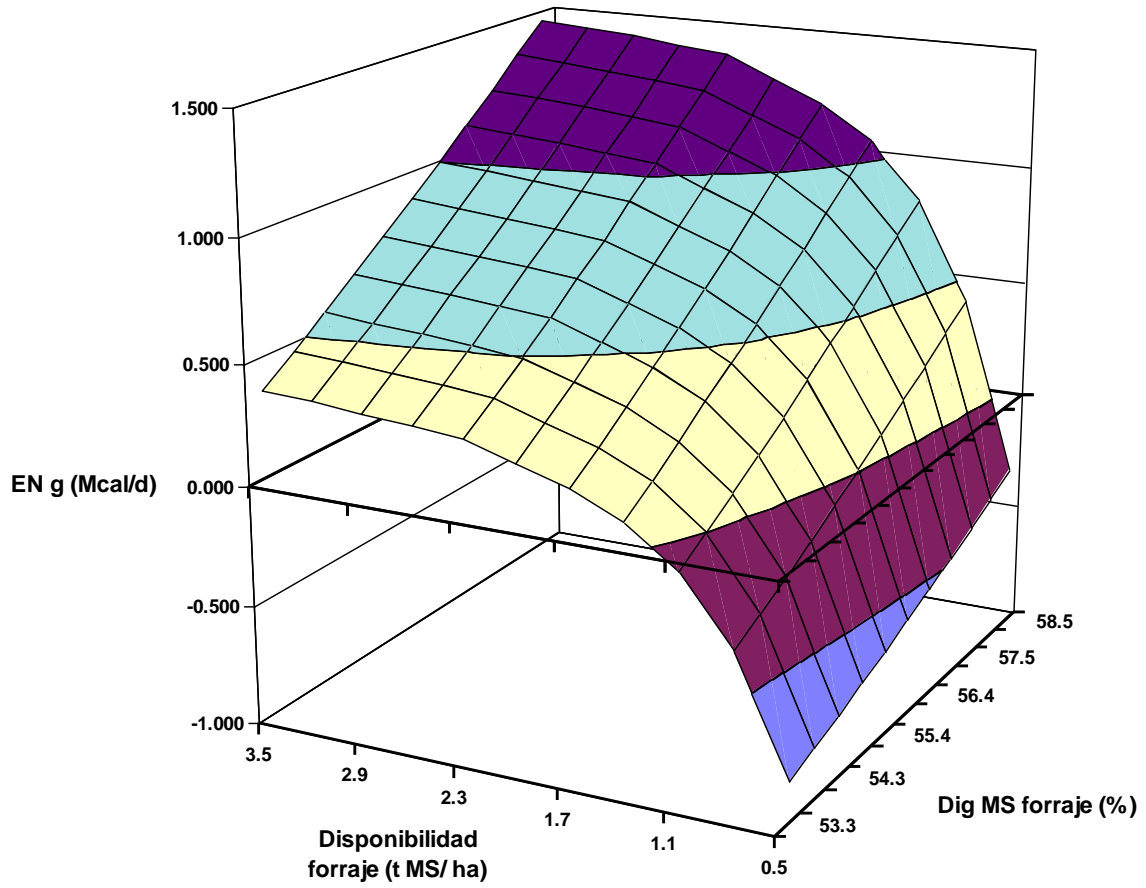


Figura 14. Combinación de las entradas disponibilidad y digestibilidad del forraje con la salida EDG.

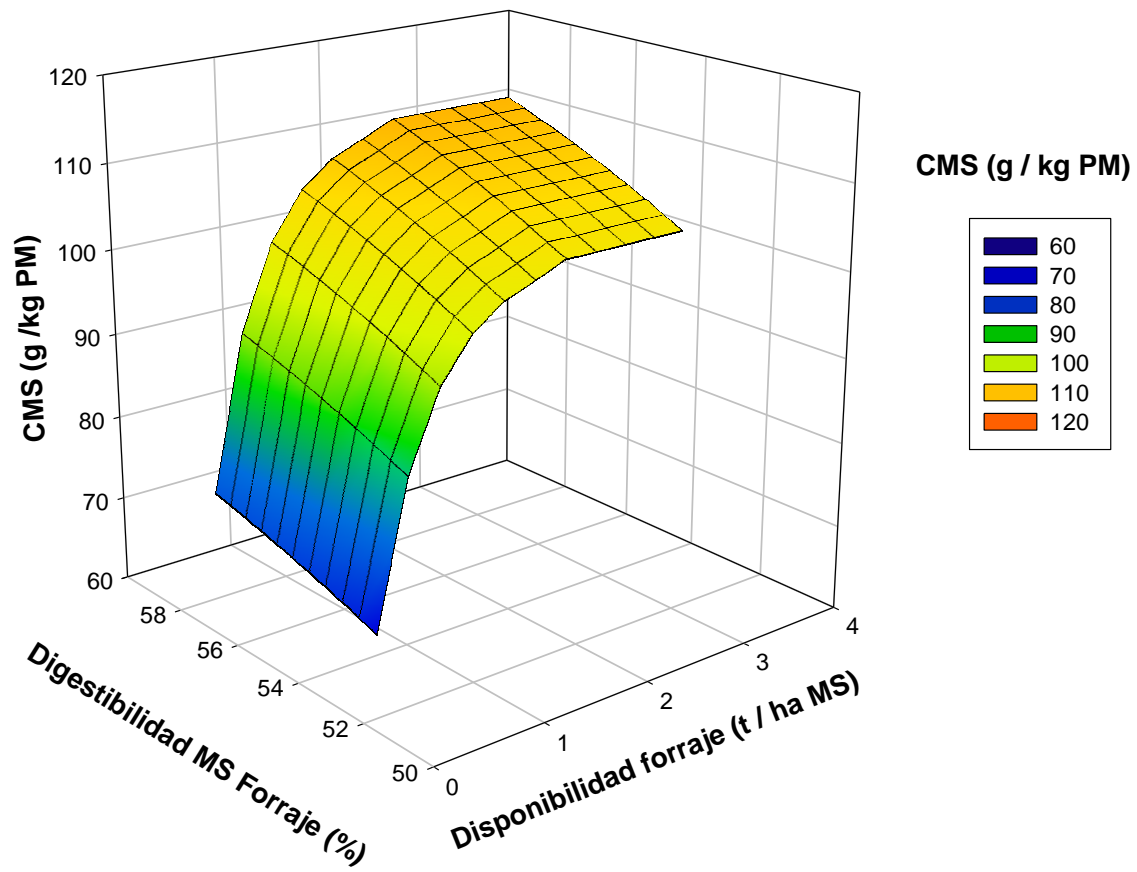


Figura 15. Combinación de las entradas disponibilidad y digestibilidad del forraje con la salida consumo de materia seca.

CAPITULO III. ANÁLISIS COMPARATIVO EN LA PREDICCIÓN DE CAMBIOS DE PESO DE TOROS EN PASTOREO EN EL TRÓPICO USANDO DOS MODELOS

Resumen

El análisis comparativo consistió en la predicción de la ganancia de peso de toros ayunados (GPA_p), utilizando dos modelos. El primero, modelo para predecir los cambios de peso vivo de toros (MCPV), en el cual se utilizaron ecuaciones desarrolladas por Lofgreen y Garrett (1968), NRC (1984) y CSIRO (1990). El segundo, modelo NRC (1996) (MNRC), donde se utilizó el primer nivel, considerándose dos predicciones, la de ganancia de peso utilizando energía metabolizable (EM) y proteína metabolizable (PM). Para la evaluación de cada uno de los modelos, se realizó un análisis de regresión, prueba de medias, y estadísticos de prueba como tendencia media (MB), cuadrado medio del error de predicción (MSPE), raíz de MSPE (RMSPE), variación residual (RV) y error absoluto medio (MAE). Los estadísticos usados para evaluar los modelos fueron media (*M*), desviación estándar (STD), coeficiente de variación (Coeff Var), valor mínimo (MIN), valor máximo (MAX) de la GPA_p, ganancia de peso de toros con ayuno observada GPA_o y la ganancia de peso de toros en ayuno residual GPA_r. Los resultados mostraron que las predicciones de las GPA_r con los MCPV, MNRCEM y MNRCPM fueron -0.184, -0.284 y -0.149, respectivamente. Se considera que ambos modelos tienen una baja exactitud para predecir la GPA_p. Los modelos MCPV y el MNRC subestiman la ganancia de peso y el consumo de materia seca. Se sugiere desarrollar un modelo donde se considere la proteína metabolizable y se compare con la salida de predicción de ganancia de peso del modelo del NRC considerando PM.

Palabras clave: praderas tropicales, NRC, comparación de modelos, rumiantes.

CHAPTER III. COMPARATIVE ANALYSIS OF THE PREDICTION OF WEIGHT CHANGES IN BULLS GRAZING IN THE TROPICS USING TWO MODELS

Abstract

The comparative analysis consisted in the prediction El análisis comparativo consistió en la predicción de la ganancia de peso de toros ayunados (GPAp), utilizando dos modelos. El primero, modelo para predecir los cambios de peso vivo de toros (MCPV), en el cual se utilizaron ecuaciones desarrolladas por Lofgreen y Garrett (1968), NRC (1984) y CSIRO (1990). El segundo, modelo NRC (1996) (MNRC), donde se utilizó el primer nivel, considerándose dos predicciones, la de ganancia de peso utilizando energía metabolizable (EM) y proteína metabolizable (PM). Para la evaluación de cada uno de los modelos, se realizó un análisis de regresión, prueba de medias, y estadísticos de prueba como tendencia media (MB), cuadrado medio del error de predicción (MSPE), raíz de MSPE (RMSPE), variación residual (RV) y error absoluto medio (MAE). Los estadísticos usados para evaluar los modelos fueron media (M), desviación estándar (STD), coeficiente de variación (Coeff Var), valor mínimo (MIN), valor máximo (MAX) de la GPAp, ganancia de peso de toros con ayuno observada GPAo y la ganancia de peso de toros en ayuno residual GPAr. Los resultados mostraron que las predicciones de las GPAr con los MCPV, MNRCEM y MNRCPM fueron -0.184, -0.284 y -0.149, respectivamente. Se considera que ambos modelos tienen una baja exactitud para predecir la GPAp. Los modelos MCPV y el MNRC subestiman la ganancia de peso y el consumo de materia seca. Se sugiere desarrollar un modelo donde se considere la proteína metabolizable y se compare con la salida de predicción de ganancia de peso del modelo del NRC considerando PM.

Palabras clave: praderas tropicales, NRC, comparación de modelos, rumiantes.

CHAPTER III. COMPARATIVE ANALYSIS IN THE PREDICTION OF WEIGHT CHANGES IN GRAZING BULLS IN THE TROPICS USING TWO MODELS

Abstract

The comparative analysis consisted in the prediction of weight gain of shrunken bulls (GPA_p) using two models. The first model to measure changes in the live weight of bulls (MCPV) used equations developed by Lofgreen and Garrett (1968), NRC (1984) and CSIRO (1990). The second model, NRC (1996) (MNRC), used the first level, considering two predictions for weight gain, using: metabolisable energy (EM) and metabolisable protein (PM). To evaluate each of the models were done a regression analysis, a mean test, and proof statistics such as mean tendency (MB), mean square prediction error (MSPE), root of MSPE (RMSPE), residual variation (RV), and mean absolute error (MAE). The statistics used to evaluate the models were: mean (*M*), standard deviation (STD), variation coefficient (Coeff Var), minimum value (MIN), and maximum value (MAX) of the GPA_a, observed weight gain in shrunken bulls GPA_o, and weight gain in bulls in residual shrunken GPA_r. The results showed that the predictions for the GPA_r with the MCPV, MNRCEM, and MNRCPM were -0.184, -0.284, and -0.149, respectively. It is considered that both models have a low accuracy in predicting GPA_p. The MCPV and MNRC models underestimate weight gain and consumption of dry matter. It is suggested that a model be developed which considers metabolisable protein and compares it with the prediction output of weight gain in the NRC model, considering PM.

Key words: tropical grasslands, NRC, model comparison, ruminants.

3.1. Introducción

A raíz del surgimiento del NRC, en 1945 según NRC (1963), se han realizado diversos estudios con enfoque a modelos de simulación, para estimar el crecimiento (Fox y Black, 1984; Oltjen *et al.*, 1986; Williams *et al.*, 1992; Hoch y Agabriel, 2004; Garcia y Agabriel, 2008; Tibayunga *et al.*, 2010), y predecir la ganancia de peso del ganado bovino (NRC, 1984; ARFC, 1990; CSIRO, 1990; Fox *et al.*, 1992; NRC, 1996, NRC, 2000; Tobias *et al.*, 2006; CSIRO, 2007; Ocampos *et al.*, 2010). Sin embargo, a pesar que dichos modelos han sido desarrollados para las condiciones específicas de interés, el NRC sigue siendo de mayor uso, no obstante han que sido reportadas algunas inconsistencias, como es la determinación del máximo CMS a partir del forraje disponible, donde NRC (1996) considera que el máximo CMS se obtiene con 1125 kg de forraje disponible en la pradera, cuando en realidad, éste se logra con mayor FD (NRC, 1987).

La anterior, lleva a replantear los modelos que actualmente se tienen, incluyendo el propuesto en esta investigación, mismo que se describe en el capítulo uno. De aquí la importancia de realizar comparaciones de los resultados en las predicciones, que de cada modelo se deriva. Sin embargo, realizar todo ello, no es una tarea fácil, por lo que en el presente capítulo solo se tomara de base únicamente el NRC como modelo comparativo con el propuesto en este estudio.

El objetivo del presente estudio fué predecir las ganancias de peso de toros en pastoreo en el trópico utilizando dos modelos distintos, así como evaluar la predicción de los modelos y comparar la exactitud entre ellos.

3.2. Materiales y métodos

Para realizar el análisis comparativo, se utilizaron dos modelos, 1) el de predicción de los cambios de peso vivo de toros en pastoreo en el trópico mexicano (MCPV), producto de este estudio, y 2) el del NRC de 1996 (MNRC), donde se consideraron dos salidas, la primera, donde el modelo NRC predice la ganancia de peso considerando energía metabolizable (MNRC EM) y, la segunda, donde el modelo NRC predice la ganancia de peso considerando proteína metabolizable (MNRC PM); para lo cual se utilizó el software computacional incluido en la séptima edición de los Requerimientos Nutricionales de Bovinos para Carne (NRC, 1996).

Para ello, se procedió de la siguiente manera:

1. Caso MCPV

- a. Se obtuvieron los valores de las predicciones de las ganancias de peso de los animales que conformaron la base de datos referidas en capítulo uno.
- b. Los valores de las predicciones de las ganancias de peso vivo vacío, se transformaron a valores de ganancias de peso vivo ayunado. Para ello al peso vivo vacío inicial de engorda y al peso vivo vacío predicho se les adicionó el contenido gastrointestinal, valor que se obtuvo con la ecuación establecida por el ARC (1980), donde considera el tipo de dieta consumida y el peso del animal, $\text{Peso vivo animal ayunado} = 1.09 * (\text{Peso vivo vacío} + 14)$.
- c. Una vez obtenido los valores de las predicciones de las ganancias de peso vivo ayunado, se realizó la evaluación del modelo.

2. Caso MNRC

a. Se utilizó la base de datos de once experimentos que se llevaron a cabo en el trópico de México (Caro, 2007; Mijares, 2006; Cano *et al.*, 2003; Pérez *et al.*, 2001; Cabrera *et al.*, 2000; Zuart, 1999; García, 1998; Olmos, 1998; Ramos *et al.*, 1998; Joaquín, 1996; Reyes, 1996), utilizando un total de 50 tratamientos, de los cuales se incluyeron toros en pastoreo con y sin suplemento. Los valores de entrada introducidos al MNRC fueron: edad del animal (meses), peso de animal ayunado (kg), condición corporal del animal (en escala de 1 a 9, siendo 1 un animal extremadamente delgado y 9 un animal con exceso de grasa corporal), peso maduro (kg), tipo de cruzamiento (, raza de progenitores, uso o no de implante, uso o no de ionóforo, masa de forraje inicialtemperatura ambiental presente, temperatura ambiental previa, velocidad del viento, existencia o no de noches frías, estrés calórico o no por el animal, grosor de cuero, lodo en cuero, forraje disponible en pradera donde pastorea el ganado, pendiente del terreno, tipo y cantidad de ingrediente consumido por el animal, composición de los ingredientes consumidos por el animal.

b. Se corrió el modelo y se obtuvieron los valores predichos de ganancia de peso vivo ayunado.

3. Ambos casos

Se realizó la evaluación de los modelos, que consistió en la obtención de indicadores estadísticos, análisis de regresión, comparación de medias e estadísticos de prueba.

Posteriormente, se obtuvo la ganancia de peso ayunado residual (GPA_r), se comparó la (GPA_p) contra la ganancia de peso ayunado observado (GPA_o), de

acuerdo a la fórmula propuesta por Whetsell *et al.* (2006) $GPA_r = GPA_p - GPA_o$.

De igual manera se obtuvo el consumo de materia seca residual (CMSr), se comparó el consumo de materia seca predicho (CMSp) con el consumo de materia seca observado (CMSo), de acuerdo a la fórmula propuesta por Whetsell *et al.* (2006) $CMS_r = CMS_p - CMS_o$.

Se obtuvieron los indicadores estadísticos: media (M), desviación estándar (STD), coeficiente de variación (Coeff Var), valor mínimo (MIN), valor máximo (MAX) de la GPA_p, GPA_o, GPA_r, CMS_p, CMS_o y CMS_r, utilizando el procedimiento UNIVARIATE (SAS Institute, 1997).

Se determinó la exactitud del modelo, para lo cual se realizó un análisis de regresión, donde los datos predichos se ubicaron en el eje X y los datos observados en el eje Y , de acuerdo a lo descrito por Tedeschi (2006), utilizando el procedimiento REG (SAS Institute, 1997).

Se elaboró gráfica de residuales, con dos ejes (X y Y), donde los datos observados se ubicaron en el eje X y los datos residuales en el eje Y (Zhao *et al.*, 2008).

Se llevó a cabo la comparación de prueba de medias entre lo observado y predicho, para las ganancias de peso y otra para los consumos de materia seca, utilizando el procedimiento TTEST (SAS Institute, 1997).

Finalmente, se obtuvieron los estadísticos de prueba tendencia media (MB), variación residual (RV) (Hanigan *et al.*, 2000), cuadrado medio del error de predicción (MSPE) (Rook *et al.*, 1990), y error absoluto medio (MAE) (Willmott y Matura, 2006);

donde Y_i fueron los valores observados, X_i los valores predichos y n_i el número de observaciones, para las ecuaciones: (2), (3), (4), (5) y (6).

$$MB = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - X_i)}{n} \quad (\text{Hanigan et al., 2000}). \quad (2)$$

Donde:

MB = tendencia media (MB)

$$MSPE = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - X_i)^2}{n} \quad (\text{Rook et al., 1990}). \quad (3)$$

Donde:

MSPE = cuadrado medio del error de predicción

$$RMSPE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - X_i)^2}{n}} \quad (\text{Hanigan et al., 2000}). \quad (4)$$

Donde:

RMSPE = raíz del cuadrado medio del error de predicción

$$RV = \frac{RMSPE}{MSPE} \quad (\text{Hanigan et al., 2000}). \quad (5)$$

Donde:

RV = variación residual

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |Y_i - X_i|}{n} \quad (\text{Willmott y Matsuura, 2005}). \quad (6)$$

Donde:

MAE = error medio absoluto

* valores absolutos

3.3. Resultados y discusión

La media de la GPAp fué de 0.439, 0.355 y 0.474 kg para el MCPV, MNRC EM y MNRC PM, respectivamente, lo que indica una subestimación de la predicción (Cuadro 13), ya que la GPAo tuvo una media de 0.623 kg. Considerando la predicción de ganancia de peso por concepto de energía, el MCPV tuvo un valor más cercano a la GPAo, con una diferencia de -0.188 kg, en comparación del MNRC EM, donde se obtuvo una subestimación de -0.272 kg. Esto indica que si se toma en consideración la disponibilidad de energía, la predicción de la ganancia de peso con el MCPV es más cercana a la GPAo, a diferencia de la predicción con el MNRC EM. Cuando se compara la GPAp del MCPV y la del MNRC PM, se observa que el MNRC PM solo subestima la GPA con 0.153 kg, a diferencia del MCPV, el cual subestima la GPA con 0.188 kg. En el Cuadro 13 se puede observar que los coeficientes de variación entre las GPAp entre los modelos MCPV, MNRC EM y MNRC PM fueron de 51.95, 84.24 y 47.84, respectivamente. Lo que indica que cuando se considera la predicción de energía, con el MNRC EM se obtiene 32.29% de mayor variación que con el MCPV.

Los indicadores estadísticos muestran que la media del consumo de materia seca predicho (CMSp) fué de 6.980 y 6.912 kg para el MCPV y MNRC respectivamente, resultado que son un indicativo de una subestimación en el CMS de ambos modelos, ya que el CMSo fué de 8.706 kg; lo que significa un CMS promedio predicho menor para ambos modelos de 1.000 kg (Cuadro 14).

El valor de CMSo fué de 8.706 kg, con un coeficiente de variación de 28.64%, variación que fue superior a la obtenida con el MCPV y MNRC, donde se obtuvieron coeficientes de variación para el CMSp de 14.65 y 14.56 respectivamente. La menor variación en el CMSp de los modelos MCPV y MNRC, con respecto a la variación del CMSo, se explica por el hecho de que en ambas ecuaciones la limitante es la ENm de la dieta (NRC, 1984; NRC, 1996; NRC, 2000).

Al analizar los valores mínimos de los CMS (Cuadro 14), sobresale la similitud en los valores mínimos de consumo, donde se obtuvieron 5.830, 5.286 y 5.500 para el CMSo, CMSp por el MCPV y CMSp por el MNRC, respectivamente. El valor máximo de CMSo fué superior en 1.9 veces al valor máximo de CMSp por los MCPV y MNRC.

En la Figura 16, se muestra la distribución de las GPAp de los MCPV, MNRC EM y MNRC PM al comparar las GPAo contra las GPAp. En todos los casos, el intercepto fué diferente de cero y la pendiente diferente a uno, indicando que el uso de los valores utilizados no mejoró la predicción de ninguno de los modelos. El análisis de regresión indica una inexactitud de las predicciones obtenidas por ambos modelos. Cuyas $r^2=0.30, 0.34, 0.22$ para el MCPV, MNRC EM y MNRC PM, respectivamente. Este resultado sugiere que el MCPV y el MNRC con ambas salidas (EM y PM) tienen una baja precisión como indica Tedeschi (2006).

En la Figura 17 se presentan las GPAr de los MCPV, MNRC EM y MNRC PM, con valores de -0.184, -0.284 y -0.149, respectivamente. El análisis de los residuales permite conocer el diferencial entre los modelos con los valores observados y determinar el grado de subestimación de las predicciones. Se observa una tendencia a

incrementar el valor de la GPAR después de GPAo después de los 0.500 kg (Figura 17). Lo tendencia anterior puede estar relacionada con los CMSp que estiman los modelos MCPV y MNRC, ambos modelos limitan el consumo en función de la ENm de la dieta (NRC, 1984; NRC, 1996; NRC, 2000).

Al comparar el CMSp con el CMSo (Figura 18), se observó una diferencia negativa en los valores de consumo, dando como resultado una subestimación en el CMS. En la mayoría de los casos de ambos modelos (MCPV y MNRC), la limitante fué la energía disponible, ya que al estar limitada la energía se restringe la estimación de GPAP, resultando en un mayor valor de GPAR.

En la Figura 19 se presenta el consumo de materia seca residual (CMSr) generado por los modelos MCPV y MNRC con valores de -1.726 y -1.794, comportamiento debido a las variables incluidas en las ecuaciones para estimar el consumo. La gráfica de la distribución de los residuales permite observar alguna tendencia de los datos, en el caso de la Figura 19 se observa que las GPAR después de los 0.600 kg de GPAo, son en su mayoría negativas.

Las medias de la GPAo con la GPAP, utilizando la distribución de t de *student*, fueron diferente significativamente ($P > 0.05$) entre observado y lo predicho por el MCPV y MNRC tanto en EM como PM, lo que significa una baja exactitud (Tedeschi, 2006) de ambos modelos para estimar la ganancia de peso.

En el Cuadro 15, se muestra la tendencia media de la GPAP del MCPV, MNRC EM y MNRC PM con valores de -0.188, -0.272 y -0.153, respectivamente. La RMSPE registró valores de 0.294, 0.371 y 0.288 para el MCPV, MNRC EM y MNRC MCPV, respectivamente. Respecto al significado de los estadísticos de prueba, Tedeschi

(2006) menciona que el grado de exactitud de un modelo, es cuando los estadísticos MB, MSPE, RMSPE, RV y MAE presentan valores de cero. Como se observa en el Cuadro 15, cuando se considera la GPAP por concepto de energía se obtiene una mejor predicción de GPA con el MCPV seguido por el MNRC EM, sin embargo, cuando se considera energía y proteína metabolizable se obtiene una mejor predicción con el MNRC PM.

Como se observa en el Cuadro 16, la MB de los CMSp para el MCPV y el MNRC fue de -1.726 y -1.795, respectivamente. La RMSPE registró un valor de 2.631 y 2.655 para el MCPV y MNRC, respectivamente. Dicho resultado indica una subestimación en la predicción del CMS de ambos modelos. NRC (1996) al desarrollar la ecuación de CMSp obtuvieron valores de predicción de CMS menores a los estimados por NRC (1984). Los resultados de los estadísticos de prueba como RMSPE, RV y MAE obtenidos para determinar la exactitud de la CMSP de los MCPV y MNRC fue similar, sin embargo, se observan valores más cercanos a cero con el MCPV, lo que significa una mejor predicción.

3.4. Conclusiones

De acuerdo a los resultados obtenidos en este estudio, se considera que ambos modelos tienen una baja exactitud para predecir la GPVp.

La predicción de los cambios de peso considerando la energía fue más exacta con el MCPV, a diferencia del MNRC EM. Cuando se considera la predicción de cambios de peso con el MNRC PM y el MCPV, ambas predicciones son similares.

Con la metodología descrita por el MCPV se requiere menor número de entradas que el MNRC, lo cual es favorable para los casos en donde cierta información es limitante o no se conoce.

3.5. Litertura citada

- ARC, 1980. The nutrient requirements of ruminant livestock. Commonwealth Bureaux. CAB International, Wallingford, UK. 347 pp
- ARFC. 1990. Technical Committee on Response to nutrients, Reports No. 5. Nutritive requirements of ruminant animals: energy. Nutr. Abs & Rev. Series B. 60:729-804.
- Cabrera, E. I., Mendoza, M. G., Aranda, I. E., García-Bojalli, C., Barcena, G. R., and Ramos, J. J. 2000. *Saccharomyces cerevisiae* and nitrogenous supplementation in growing stress grazing tropical pastures. Anim. Feed Sci. Technol. 83:49-55.
- Cano, A. L., Aranda, I. E., Mendoza, M. G., Pérez, P. J., y Ramos, J. J. 2003. Comportamiento de toretes en pastos tropicales suplementados con caña de azúcar y enzimas fibrolíticas. Tec. Pecu. Mex. 41:153-164.
- Caro, H. J. 2007. Evaluación de tejido adiposo de toretes finalizados con ensilado de caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.). Tesis de Maestría, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.
- CSIRO. 1990. Feeding standards for Australian livestock. CSIRO Publications, Australia. 266 pp.
- CSIRO. 2007. Nutrient requirements of domesticated ruminants. CSIRO Publishing, Australia. 270 pp.
- Fox, D. G., and Black, J. R. 1984. A system for predicting body composition and performance of growing cattle. J. Anim. Sci. 58:725-739.
- Fox, D. G., Sniffen, C. J., O'Connor, J. D., Russell, J. B., and Van Soest, P. J. 1992. A net carbohydrate and protein system for evaluating cattle diets: III. Cattle requirements and diet adequacy. J. Anim. Sci. 70:3578-3596.
- García, S. I. 1998. Adición de un suplemento, una sal mineral y un ionóforo a toretes en finalización en praderas en el trópico húmedo. Tesis de Maestría, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.

- Garcia, F., and Agabriel, J. 2008. CompoCow: a predictive model to estimate variations in body composition and the energy requirements of cull cows during finishing. *J. Agri. Sci.* 146:251-265.
- Hanigan, M. D., France, J., Crompton, L. A., and Bequette, B. J. 2000. Evaluation of a representation of limiting amino acid theory for milk protein synthesis. In: J. McNamera, J. France and D. Beever (eds), *Modelling nutrient utilization in farm animals*, Cabi Publishing, United Kingdom, 127-144.
- Hoch, T., and Agabriel, J. 2004. a mechanistic dynamic model to estimate beef cattle growth and body composition: 1. Model description. *Agri. Systems.* 81:1-15.
- Joaquín, A. J. 1996. Cambio de peso de toretes y del perfil de rebrote de una pradera de estrella (*Cynodon plectostachyus*), en pastoreo rotativo con diferentes tiempos de ocupación. Tesis de Maestría, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.
- Lofgreen, G. P., and Garrett, W. N. 1968. A system for expressing net energy requirements and feed values for growing and finishing beef cattle. *J. Anim. Sci.* 27: 793-806.
- Mijares, L. H. 2006. Cambios de peso de toretes en pastoreo suplementados con bloque multinutricional en condiciones tropicales. Tesis de Maestría, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.
- N R C., 1963. *Nutrient Requirements of beef cattle. Fourth Rev. Ed* Washington D. C. National Academy Press. 30 pp.
- N R C., 1984. *Nutrient Requirements of beef cattle. Sixth Rev. Ed* Washington D. C. National Academy Press. 242 pp.
- N R C., 1987. *Predicting feed intake of food-producing animals. Ed* Washington D. C. National Academy Press. 85 pp.
- N R C., 1996. *Nutrient Requirements of beef cattle. Sixth Rev. Ed* Washington D. C. National Academy Press. 242 pp.
- N R C., 2000. *Update. Nutrient Requirements of beef cattle. Sixth Rev. Ed* Washington D. C. National Academy Press. 242 pp.
- Ocampo, O. D., López, J., Jardim, B. J., and Esteves, O., T., 2010. development and validation of a performance predictive modelo f beef stress supplemented in tropical pastures. *R. Bras. Zootec.* 39:402-410.

- Olmos, O. G. 1998. Efecto de un suplemento nitrogenado, una sal mineral y un ionóforo (lasalacida sódica) en el crecimiento de toretes en praderas en trópico húmedo. Tesis de Maestría, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.
- Oltjen, J. W., Bywater, A. C., Baldwin, R. L., and Garrett, w. N. 1986. Development of a dynamic model od beef cattle growth and composition. *J. Anim. Sci.* 62:86-97.
- Pérez, P. J., Alarcón, Z. B., Mendoza, M. G., Barcena, G. R., Hernández, G. A., y Herrera, H. J. 2001. Efecto de un banco de proteína de kudzú en la ganancia de peso de toretes en pastoreo de estrella africana. *Téc. Pecu. Méx.* 39:39-52.
- Ramos, J. A., Mendoza, M. G., Aranda, I. E. García-Bojalli, C., Barcena, G. R., and Alanis, R. J. 1998. Escape proteína supplementation of growing stress grazing stargrass. *Anim. Feed Sci. Technol.* 70:249-256.
- Reyes, B. O. 1996. Efecto del nivel de urea y la adición de un cultivo de *Saccharomyces cerevisiae* en toretes pastoreando en trópico húmedo. Tesis de Maestría, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.
- Rook, A. J., Dhanoa, M. S., and Gill. 1990. Prediction of the voluntary intake of grass silages by beef cattle. *Anim. Prod.* 50:455-466.
- SAS Institute. 1997. SAS/STAT software: changes and enhancements though release 6.12 SAS Institute. Cary, NC. 1162 p.
- Tedeschi, L.O. 2006. Assessment of adequacy of mathematical models. *Agric. Sys.* 89:225-247.
- Tibayungwa, F., Mugisha, J. Y., and Nabasirye, M. 2010. Modeling growth of dairycattle heifers fed elephant grass under stall-feeding systems in Uganda. *African J. Agri. Res.* 5:1220-1227.
- Tobias, C. B., Mendoza, M. G., Aranda, I. E., González, M. S., Arjona, S. E., Plata, P. F., and Vargas, V. L. 2006. A simulation model to predict body weight gain in growing steers grazing tropical pastures. *Agri. Systems* 90:99-111.
- Whetsell, M. S., Rayburn, E. D., and Osborne, P. I. 2006. Evaluation in Appalachian pasture systems of the 1996 (update 2000) National Research Council model for weaning cattle. *J. Anim. Sci.* 84:1265-1270.
- Williams, C. B., Keele, J. W., and Bennett, G. L. 1992. a computer model to predict the effects of level of nutrition on composition of empty body gain in beef cattle: II. Evaluation of the model.

- Willmott, C. J., and Matura, K. 2005. Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Clim. Res.* 30:79-82.
- Zhao, J. S., Zhou, Z. M., Ren, L. P., Xiong, Y. Q., Du. J. P., and Meng, Q. X. 2008. Evaluation of dry matter intake and daily weight gain predictions of the Cornell Net Carbohydrate and Protein system with local breeds of beef cattle in China. *Anim. Feed Sci. Technol.* 86:53-69.
- Zuart, R. C. 1999. Aplicación de dos modelos matemáticos para predecir cambios de peso de toretes en pastoreo en trópico húmedo. Tesis de Maestría, Colegio de Postgraduados, Montecillo, México.

Cuadro 13. Estadísticos de los datos observados y predicciones de las ganancias de peso ayunado de los modelos.

	GPAo	GPAp	GPAp	GPAp
		MCVP	MNRC EM	MNRC PM
Media	0.623	0.439	0.355	0.474
Desviación estándar	±0.249	±0.228	±0.299	±0.227
Valor máximo	1.210	0.819	0.940	1.010
Valor mínimo	0.120	0.031	0.000	0.000
Coefficiente de variación (%)	39.80	51.95	84.24	47.84

MCPV: modelo para predecir los cambios de peso vivo de toros, MNRC EM: modelo NRC 1996 considerando energía metabolizable; MNRC PM: modelo NRC 1996 considerando proteína metabolizable.

Cuadro 14. Estadísticos de los datos observados y predicciones de los consumos de materia seca de los modelos.

	CMSo	CMSp	CMSp
		MCPV	MNRC
Media	8.706	6.980	6.912
Desviación estándar	±2.494	±1.022	±1.006
Valor máximo	17.220	9.205	8.910
Valor mínimo	5.830	5.286	5.500
Coeficiente variación (%)	28.64	14.65	14.56

MCPV: modelo para predecir los cambios de peso vivo de toros,

MNRC: modelo NRC 1996

Cuadro 15. Estadísticos de prueba para evaluar la exactitud de la predicción de la ganancia de peso de los modelos.

	MCPV	MNRC EM	MNRC PM
Estadístico			
Tendencia media (MB)	-0.188	-0.272	-0.153
Cuadrado medio del error de predicción (MSPE)	0.086	0.137	0.083
Raíz de MSPE (RMSPE)	0.294	0.371	0.288
Variación residual (RV)	0.226	0.252	0.244
Error absoluto medio (MAE)	0.247	0.321	0.240

MCPV: modelo para predecir los cambios de peso vivo de toros, MNRC EM: modelo NRC 1996 considerando energía metabolizable; MNRC PM: modelo NRC 1996 considerando proteína metabolizable.

Cuadro 16. Estadísticos de prueba para evaluar la exactitud de la predicción de consumo de materia seca de los modelos.

Estadístico	MCPV	MNRC
Tendencia media (MB)	-1.726	-1.795
Cuadrado medio del error de predicción (MSPE)	6.922	7.050
Raíz de MSPE (RMSPE)	2.631	2.655
Variación residual (RV)	1.986	1.957
Error absoluto medio (MAE)	1.807	1.846

MCPV: modelo para predecir los cambios de peso vivo de toros,
 MNRC EM: modelo NRC 1996 considerando energía metabolizable; MNRC PM: modelo NRC 1996 considerando proteína metabolizable.

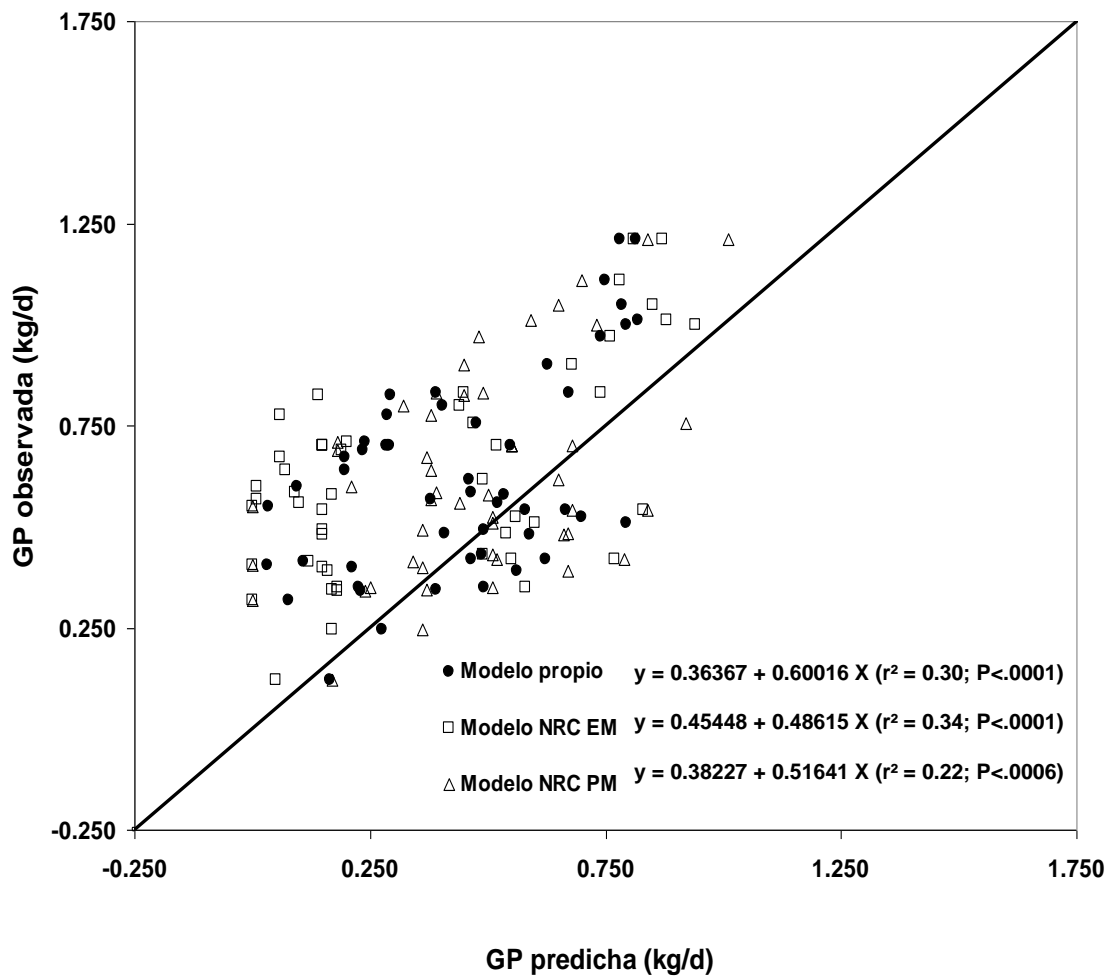


Figura 16. Distribución de las predicciones de la ganancia de peso de los modelos.

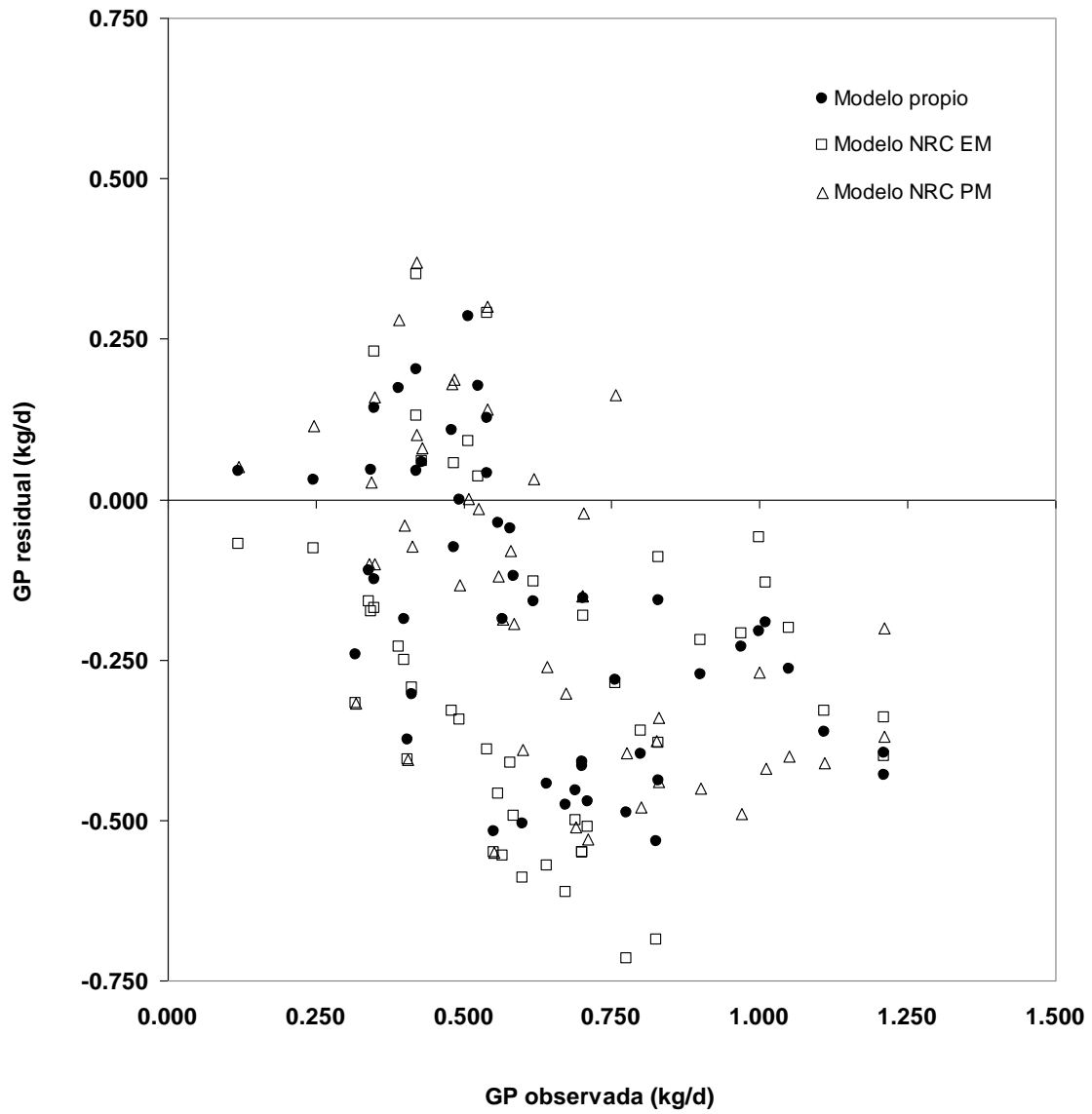


Figura 17. Distribución de los residuales de las ganancias de pesos de los modelos.

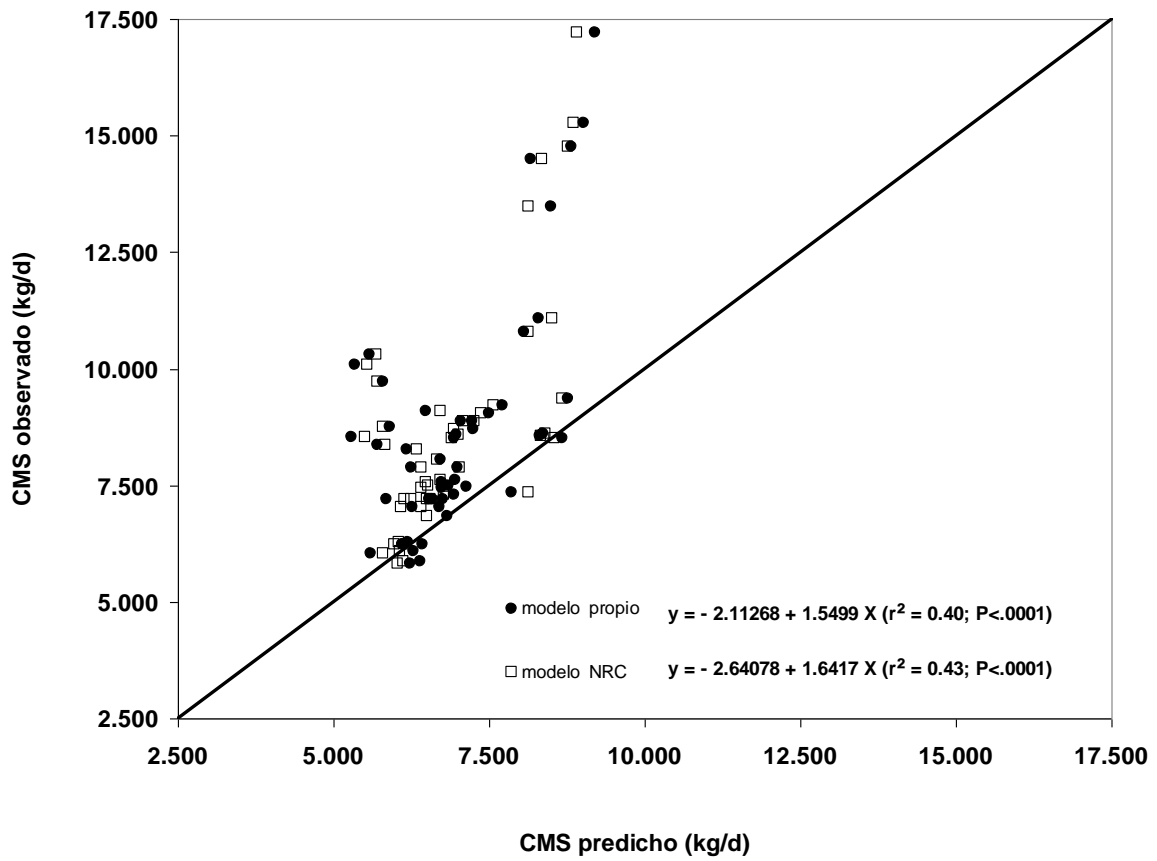


Figura 18. Comparación del consumo de materia seca observado y del predicho por el los modelos.

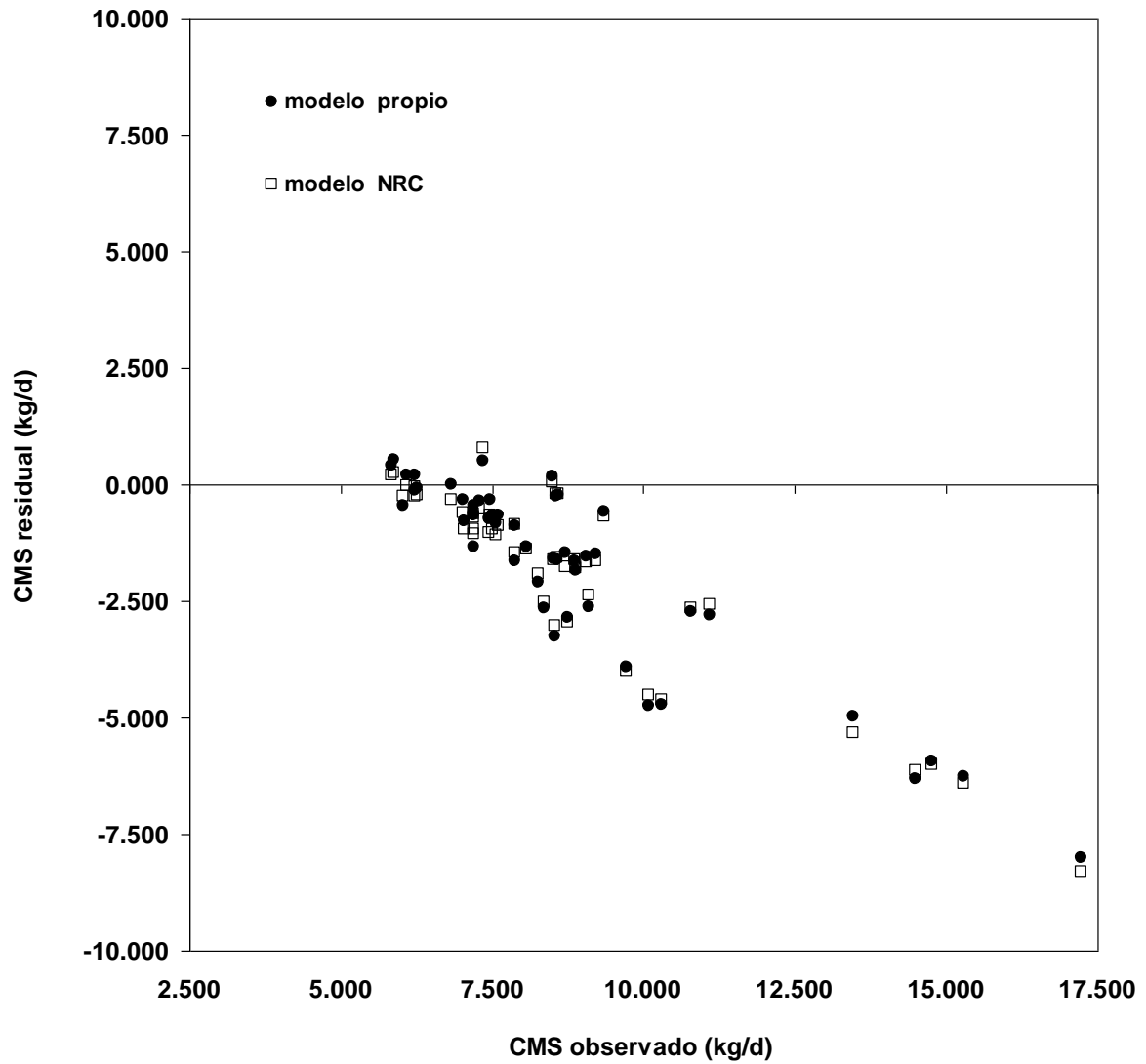


Figura 19. Distribución de los residuales del consumo de materia seca observado y del predicho por los modelos.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES

1. Conclusiones

La predicción de los cambios de peso vivo vacío obtenida con el modelo para predecir los cambios de peso de toros en pastoreo considerando la energía, presentó una subestimación en alrededor del 25%.

Las entradas que generaron el mayor cambio en las salidas GPVp, ENG y CMS, fueron forraje disponible, digestibilidad de la materia seca y temperatura.

Al combinar las entradas digestibilidad de la MS del forraje con el valor de 58.3% y forraje disponible, con un valor de 3.5 t MS ha⁻¹ se obtiene la máxima ganancia de peso.

Se requiere menor número de entradas para predecir los cambios de peso con el MCPV, a diferencia del MNRC, donde el número de entradas requerido es mayor.

Cuando se considera la predicción de cambios de peso con el MNRC PM y el MCPV, ambas predicciones son similares. La predicción de los cambios de peso considerando la energía fué más exacta con el MCPV, a diferencia del MNRC EM.

2. Recomendaciones

Aun cuando no fue exacta la predicción de cambios de peso de toros en pastoreo, se puede mejorar la predicción si se considere la calidad de la dieta real que animal este consumiendo, lo que significa utilizar la técnica de muestreo de forraje “hand plunking”.

También es necesario plantear modelos mecanísticos para determinar el consumo de materia seca donde se considere la tasa de pasaje del alimento por el tracto digestivo.

Es necesario generar un modelo para predecir los cambios de peso de toros en pastoreo considerando la proteína metabolizable.