

ISSN-0253-4746

**ICA**



# " SIMULACION DE SISTEMAS PECUARIOS

Autores: ,

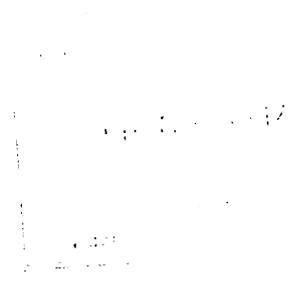
Raúl Cañas Cruchaga  
Claudio Aguilar González  
Fernando García Gómez  
Roberto A. Quiroz

Editor:

Manuel E. Ruiz

RISPAL  
RED DE INVESTIGACION EN SISTEMAS  
DE PRODUCCION ANIMAL EN LATINOAMERICA

PROGRAMA II: GENERACION Y TRANSFERENCIA DE TECNOLOGIA



# SIMULACION DE SISTEMAS PECUARIOS

RISPAL

# CONTENIDO

Presentación .....	i
Prefacio .....	iii
Organización del libro .....	v
Agradecimiento .....	v
<b>CAPÍTULO I.</b> USO DE LA BIOENÉRGICA EN PRODUCCIÓN DE BOVINOS <i>Raúl Cañas Cruchaga y Claudio Aguilar González</i> .....	
<b>CAPÍTULO II.</b> REQUERIMIENTO DE PROTEÍNA EN GANADO LECHERO <i>Fernando García Gómez</i> .....	10
<b>CAPÍTULO III.</b> REQUERIMIENTO DE CALCIO, FÓSFORO, POTASIO Y MAGNESIO EN RUMIANTES <i>Fernando García Gómez</i> .....	13
<b>CAPÍTULO IV.</b> APUNTES SOBRE MODELOS MATEMÁTICOS EN PROBLEMAS GANADEROS <i>Roberto A. Quiroz</i> .....	15
<b>CAPÍTULO V.</b> SIMULACIÓN DE SISTEMAS: APLICACIONES EN PRODUCCIÓN ANIMAL <i>Claudio Aguilar y Raúl Cañas Cruchaga</i> .....	189
<b>ANEXOS</b> .....	281
<b>ANEXO A</b> .....	283
<b>ANEXO B</b> .....	284

## PRESENTACION

Promovido por la Red de Investigación en Sistemas de Producción Animal en Latinoamérica (RISPAL), del 14 al 25 de enero de 1991 se llevó a cabo en Turrialba, Costa Rica, un Curso-Taller sobre Diseño y Utilización de Modelos de Simulación en la Investigación de Bovinos de Doble Propósito. El evento tuvo un éxito notable por su efectividad en la presentación de los conceptos y en la práctica de los procedimientos a seguir en el desarrollo y uso de modelos de simulación. El nivel profesional y la amistad brindada por los colegas Raúl Cañas, Fernando García, Claudio Aguilar, Roberto Quiroz y Blanca Arce, hizo que los participantes rápidamente asimilaran y se entusiasmaran por esta herramienta de trabajo relativamente nueva en el bagaje técnico de la Red y de todos los investigadores pecuarios en general.

Con el propósito de colocar a disposición de un ámbito mayor de profesionales los conocimientos recibidos en el Curso-Taller, se decidió divulgar los mismos para cuyo efecto los instructores prepararon los respectivos documentos y los sometieron a RISPAL.

La conclusión de la revisión técnica y edición de la presente obra científica significa una enorme satisfacción, que bien compensa innumerables horas invertidas en su corrección y en el cotejo de la exactitud de los datos, figuras y literatura citada.

Sabemos que este libro será una fuente de información bienvenida y de consulta frecuente, no sólo por los investigadores de RISPAL, sino también por todos los colegas responsables del desarrollo de tecnología y la formación de nuevos profesionales en el campo de la producción animal. Por la amplitud, dominio y claridad con que se expone el conocimiento en este libro, los autores merecen nuestro reconocimiento y agradecimiento.

Los diversos capítulos ponen en evidencia los fundamentos teóricos necesarios para la conceptualización y construcción de los modelos de simulación y deja entrever la información adicional que se requiere para la operacionalización de los mismos. Con todo ello, es necesario enfatizar que los modelos de simulación deben tomarse como una herramienta de planificación y análisis; consecuentemente, contribuyen a fortalecer nuestros esfuerzos de investigación.

Es con sumo placer y satisfacción que se coloca este documento a disposición de los investigadores, docentes y estudiantes de pecuaria. Para la Red Latinoamericana de Investigación en Sistemas de Producción Animal (RISPAL), la publicación de este libro marca un nuevo hito en sus esfuerzos en la divulgación de técnicas y conceptos que fortalezcan la capacidad profesional y que contribuyan a la búsqueda más eficiente y atinada de soluciones a la problemática de la producción animal en la región. Estos esfuerzos han sido factibles gracias al apoyo del Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura y del Centro Internacional de Investigación para el Desarrollo. Termino agradeciendo a la Sra. Rita Herrera, quien asumió la difícil tarea de preparar la versión final del documento.

Manuel E. Ruiz  
Secretario Ejecutivo de RISPAL

## PREFACIO

El objetivo de este libro ha sido el de presentar los fundamentos de la aplicación de la simulación en el estudio de los sistemas de producción animal. La metodología que se usa y enfatiza a través de todos los capítulos es la del análisis de sistemas, ilustrada con solución de problemas aplicando principios generales, de tal forma que se hace posible adaptarlos a otros casos. Esta última característica hace adecuado el libro como referencia para profesionales en el estudio de sistemas de producción animal y como texto en un curso introductorio de simulación de sistemas de producción animal, para estudiantes de pre y postgrado.

La simulación, como técnica de análisis de sistemas biológicos, requiere de conocimientos básicos de estadística, matemáticas y programación, además de la disciplina específica que caracteriza al sistema. En el texto se ha obviado lo relacionado con programación y lenguajes, dando énfasis al análisis del problema hasta el diseño y construcción de un diagrama de cálculo, incluida la verificación, que represente el sistema. El propósito de tal característica es doble. Por un lado se desea ampliar la audiencia para la difusión y conocimiento de esta poderosa herramienta de estudio y toma de decisiones, y por otro, reconociendo la complejidad de los sistemas biológicos de producción, dar mayor énfasis en el análisis mediante la aplicación de conocimientos y principios biológicos, físicos y de bioenergía.

## ORGANIZACIÓN DEL LIBRO

Se pueden distinguir tres partes en el desarrollo del libro, relacionadas con principios básicos, aplicaciones generales y análisis de componentes.

Los tres primeros capítulos abordan fundamentos necesarios para la aplicación de la simulación. En el primero se presenta el concepto de modelo, los diferentes tipos de modelos en uso y la modelación vista como herramienta de la Teoría General de Sistemas. El segundo capítulo trata de un tipo particular de modelos, como son los modelos de simulación, su estructura, clasificación y etapas a seguir para su elaboración. Y finalmente, en el marco de los principios básicos, el tercer capítulo muestra las técnicas y distribuciones de probabilidad más usadas en producción animal, para modelar incluyendo componentes con variables estocásticas.

El cuarto y quinto capítulo presentan en detalle el análisis y desarrollo de estudios donde se modelan casos simples de producción de carne y leche en bovinos. Los dos capítulos muestran la aplicación de la bioenergética en simulación y son exponentes, por ello, de una metodología para abordar el estudio de sistemas de producción animal. Se ha dado particular importancia a la discusión de factores y componentes, como etapa dentro del desarrollo de los modelos, así como a la verificación, validación y análisis de sensibilidad, en el mismo contexto.

Finalmente, el sexto y séptimo capítulo ilustran la forma en que se hacen simplificaciones para modelar, planteando hipótesis de funcionamiento que simplifican procesos complejos. Se discuten dos modelos, uno de consumo de vacas lecheras a pastoreo y otro de consumo de bovinos a pastoreo, considerando en el último la selección hecha por el animal al pastorear en diferentes condiciones. Estos dos modelos tienen diagramas de cálculo sencillos, con orden secuencial, de tal forma que es posible ponerlos en una planilla de cálculo. Tales archivos de planilla se incluyen en los anexos, a modo de ejemplo.

## AGRADECIMIENTOS

Cuando se muestran diagramas y modelos que funcionan adecuadamente, como es el caso de los que aquí se presentan, se sigue un razonamiento lógico que no denota las discusiones previas, ni la infinidad de pruebas que han sido necesarias. En tal sentido, debemos agradecer al Dr. Lee Baldwin, de la Universidad de California, Davis, que con sus profundos comentarios y sugerencias enriqueció los trabajos iniciales. Del mismo modo, hay una lista innumerable de estudiantes de postgrado, tanto nacionales como extranjeros, que han hecho valiosos aportes para conformar una metodología sólida de aplicación de la simulación en producción animal. Aún corriendo el riesgo de pecar por omisión, debemos citar a Henry Durán, José Silva, Raúl Oficialdegui, Adrián Catrileo, Rossangela Zocal, Sergio Hazard, Jorge Moya, Juan Pablo Guzmán, Blanca Arce, Rodrigo Navarro, y muchos otros, que participaron en las reuniones semanales del Laboratorio de Sistemas.

De igual manera, el apoyo de RISPAL, que propicia el enfoque de sistemas en los proyectos de su red latinoamericana, ha sido fundamental en la fase final de esta primera edición. Ello, en primer lugar, por permitirnos usar un primer manuscrito del libro como texto guía, en un curso internacional de análisis de sistemas en producción animal, organizado en Costa Rica bajo su auspicio. En segundo término, por su decidido apoyo a editarlo, debemos agradecer en la personas de Manuel Ruiz, que nos animó para llegar a buen término con adecuadas sugerencias y correcciones del original, lo que implicó que él analizara y corrigiera el libro más de una vez.

Por último, y no por ello menos importante, debemos agradecer a la Vicerrectoría Académica de la Pontificia Universidad Católica de Chile que, a través del Programa de Desarrollo de la Docencia, financió el proyecto que hizo posible el desarrollo inicial del libro.

Los Autores

# CAPÍTULO I

## USO DE LA BIOENERGÉTICA EN PRODUCCIÓN DE BOVINOS

*Raúl Cañas Cruchaga y  
Claudio Aguilar González*

*Departamento de Zootecnia, Facultad de Agronomía  
Pontificia Universidad Católica de Chile*

# CONTENIDO

1. CONCEPTOS GENERALES	11
a. Unidades energéticas	12
b. Primera Ley de la Termodinámica	13
c. Segunda Ley de la Termodinámica	13
d. Calor de combustión o energía bruta (EB)	14
e. Predicción de la energía bruta	15
2. ENERGÍA DIGESTIBLE (ED)	18
a. Métodos <i>in vivo</i> para determinar energía digestible	18
(1) Energía digestible total aparente	18
(2) Elementos nutritivos digestibles totales (ENDT)	19
(3) Método de indicadores indigeribles	22
(4) Energía digestible parcial	22
b. Métodos sin animales para determinar energía digestible	22
(1) Digestibilidad <i>in vitro</i> con licor ruminal.	23
(2) Digestibilidad <i>in vitro</i> enzimática.	23
(3) Ecuaciones de ajuste	24
3. ENERGÍA METABOLIZABLE (EM)	26
a. Métodos de determinación de la energía metabolizable	30
(1) Método directo de determinación de la energía metabolizable	30
(2) Ecuaciones de predicción de la energía metabolizable	31
4. ENERGÍA NETA (EN)	32
a. Energía neta de mantención: Metabolismo basal	32
b. Requerimiento de mantención	35
c. Factores que afectan el requerimiento de mantención	38
d. Incremento calórico	42
5. REQUERIMIENTO DE ENERGÍA PARA PRODUCCIÓN	49
a. Requerimiento de energía para producción de leche	49
b. Efecto del cambio de peso en el cálculo de requerimiento de energía metabolizable	52
c. Requerimiento de energía metabolizable para gestación	53
d. Límites de consumo en vacas lecheras estabuladas	55
e. Formulación rápida de raciones con base en forrajes y concentrados	58
f. Alimentando la vaca lechera estabulada	60
(1) Significancia de los cambios de peso vivo	60
(2) Formulación de raciones para varias etapas de lactancia	61
g. Algunos usos de la bioenergética para fijar sistemas de alimentación de vacas lecheras	62
6. USO DE ENERGÍA METABOLIZABLE EN SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE CARNE	64
a. Requerimiento de energía para mantención	64
b. Requerimiento de energía para ganancia de peso	64
c. Predicción de ganancia de peso	68
d. Formulación de raciones para un nivel de producción deseado	69
e. Determinación de consumo en novillos en pastoreo	71

7. REQUERIMIENTO DE ENERGÍA PARA COSTO DE COSECHA .....	72
a. Requerimiento ecológico de mantención .....	77
b. Requerimiento de energía para regulación de temperatura corporal .....	78
8. MÉTODO DE LA ENERGÍA NETA PARA LA FORMULACIÓN DE RACIONES .....	81
a. Desarrollo del método de la energía neta según Lofgreen y Garrett (1968) .....	82
(1) Determinación del requerimiento de energía neta para mantención .....	82
(2) Determinación del valor de energía neta de una ración .....	82
(3) Determinación del requerimiento de energía neta para ganancia de peso .....	82
(4) Determinación del valor de energía neta de ganancia de peso de una ración .....	83
b. Tabla de requerimientos .....	83
c. Usos del sistema de energía neta .....	89
d. Método de la energía neta variable .....	92
(1) Nivel de producción animal (NPA) .....	92
(2) Energía neta para mantención y producción .....	93
9. LITERATURA CITADA .....	96

# CAPÍTULO I

## USO DE LA BIOENERGÉTICA EN PRODUCCIÓN DE BOVINOS

*Raúl Cañas Cruchaga y  
Claudio Aguilar González*

*Departamento de Zootecnia, Facultad de Agronomía  
Pontificia Universidad Católica de Chile*

### 1. CONCEPTOS GENERALES

"La vida se asemeja a un proceso de combustión".  
*Max Kleiber.*

"Los mecanismos vitales tienen un objetivo:  
preservar constante el medio interno".  
*Claude Bernard.*

"Uno no puede escaparse de la sensación de que  
las fórmulas matemáticas tienen una existencia y una  
inteligencia propia... que obtenemos de ellas más que lo  
que originalmente les incluimos".  
*Heinrich Hertz.*

Tanto la llama de un hogar como un animal consumen oxígeno y lo combinan con materia orgánica desprendiendo agua y dióxido de carbono. Este es el planteamiento de Lavoisier para la combustión y el metabolismo. Sin embargo, los organismos vivos tienen el poder de adaptación, con direcciones no siempre semejantes a los sistemas no vivos. Por ejemplo, el cambiar la temperatura ambiental no produce necesariamente un cambio en la temperatura del cuerpo, pero establece un estímulo para que el aparato termorregulador neutralice este cambio. De igual forma, existen los factores hormonales que también regulan la bioenergética del organismo.

Esto sitúa al organismo vivo en un nivel diferente de los sistemas no animados, pero las transformaciones energéticas que ocurren en el organismo se rigen por la Ley de la Termodinámica, al igual que lo hacen los sistemas no vivos. Es a esto que Kleiber (1961) se refiere como el "fuego de la vida".

Tal vez la caracterización más clara de la vida es la homeostasis. Cannon (1932) se refiere a ella como la mantención, dentro de ciertos límites, de las funciones y procesos que ocurren en el organismo, impactados constantemente por el medio externo.

Bajo esta concepción, la homeostasis implica la cooperación integral de todos los sistemas fisiológicos del cuerpo para mantener un estado de régimen estacionario.

Para que se logre este estado estacionario deben haber mecanismos reguladores del sistema (retroalimentación), que están representados por funciones de control. Estas funciones pueden ser descritas mediante ecuaciones matemáticas que, desde un punto de vista analítico, permiten cuantificar el proceso, dándole dimensiones y características reales.

En consideración al permanente intercambio metabólico que se verifica en el organismo y su relación con el ambiente a través de las entradas a este sistema (alimento, energía, agua) y a las salidas (dióxido de carbono, agua, calor), se deben abandonar las concepciones clásicas de sistemas cerrados y considerar al organismo como un sistema semiabierto que responde al concepto moderno de las leyes de la termodinámica.

#### a. Unidades energéticas

Cantidades equivalentes de las diferentes formas de energía rinden igual cantidad de calor (Primera Ley de la Termodinámica). Por lo tanto, todas las formas de energía pueden representarse en unidades de calor (calorías).

La introducción del sistema métrico estableció que la unidad métrica de la energía fuera el *joule*. El joule representa el trabajo realizado por la fuerza de un Newton ejercida a través de la distancia de un metro. Sin embargo, en la actualidad, se mantiene en vigencia la resolución de 1958 del Comité de Nutrición Animal del National Research Council de los Estados Unidos de América, que especifica el uso del sistema calórico, teniendo como unidad básica la caloría térmica (cal). En América Latina se utiliza el sistema métrico, pero se mantiene vigente el uso de la caloría como la unidad calórica de la energía.

La caloría se define como la cantidad de calor requerida para elevar la temperatura de un gramo de agua de 14.5°C a 15.5°C. A pesar de que el calor específico del agua puede cambiar con la temperatura, una caloría puede definirse como el equivalente a 4184 joules.

En la práctica, la caloría es inconvenientemente pequeña y, por lo tanto, se prefiere usar la kilocaloría (kcal) que corresponde a 1000 calorías y la Megacaloría (Mcal), equivalente a 1000 kcal.

Todos los cuerpos tienen una capacidad calórica (Cc) constante y propia que equivale al producto del calor específico por su masa.

$$Cc = \text{calor específico} \cdot \text{masa}$$

El calor específico de una sustancia es la relación entre el aumento térmico del agua y la pérdida de temperatura de otra sustancia cuando se mezclan masas iguales de agua y de la otra sustancia (Kleiber 1972).

La ganancia o pérdida de temperatura entre los compuestos se llama calor. Cuando una de las sustancias cambia de estado (gas, sólido o líquido) y, por lo tanto, no hay traspaso de calor como tal, se habla de calor latente y se mide por la cantidad de sustancia que cambia de estado.

Cuando se mezclan dos sustancias y se observa un aumento en la temperatura de la mezcla, sin que sus componentes cambien de estado, se habla de energía química. En este caso sería calor de disolución.

El cambio de un estado a otro con ganancia o pérdida de energía del sistema se rige por las leyes de la termodinámica.

## b. Primera Ley de la Termodinámica

Cuando se altera el contenido de energía de un sistema, la suma de todas las formas de energía desprendidas (o absorbidas) por el sistema debe ser igual a la magnitud del cambio:

$$\Delta E = \Delta Q + \Delta W + \Delta R \quad [1]$$

en donde:

- $\Delta E$  = cambio de la energía
- $\Delta Q$  = calor desprendido por el sistema
- $\Delta W$  = trabajo realizado
- $\Delta R$  = otras formas de energía desprendidas por el sistema

La energía del sistema no es necesariamente constante; puede aumentar o disminuir dependiendo de lo que ocurra en o con el sistema. El cambio de energía del sistema es igual al calor neto agregado al sistema ( $q$ ) menos el trabajo neto realizado por él ( $w$ ).

$$\Delta E = q - w \quad [2]$$

Esta Ley sólo se refiere al estado inicial y final de energía de un sistema, y no con los mecanismos o tasas de cambio de la misma. Además, esta Ley es verdadera tanto para seres vivientes como no vivientes; el equivalente energético del trabajo realizado por un animal, más la energía de mantención del animal, debe ser igual a la energía generada a partir de la oxidación de nutrientes (Brody 1968).

## c. Segunda Ley de la Termodinámica

La Segunda Ley tiene relación con las fuerzas directrices de las reacciones: las limitaciones en la conversión de calor en trabajo. Esta Ley se basa en el principio de que una forma de energía dada por el trabajo es dependiente de su tendencia a pasar de un nivel energético superior a otro más bajo (Brody 1968).

Se podría decir que la energía total de un sistema se compone de una parte limitante no factible para trabajo llamada *entropía* y otra que es libre. Además, una parte de  $\Delta H$  es convertible en calor. Esto se debe a que el trabajo es ordenado, mientras que el calor es desorden molecular. No es posible convertir orden molecular en desorden sin producir pérdida de energía cinética (calor) de las moléculas.

Para determinar o predecir la dirección de una reacción es importante conocer la variación de energía libre. La relación entre energía libre y otras formas energéticas en un proceso de combustión se presenta en el siguiente esquema de distribución de la energía química (Kleiber 1961) (Fig. 1).

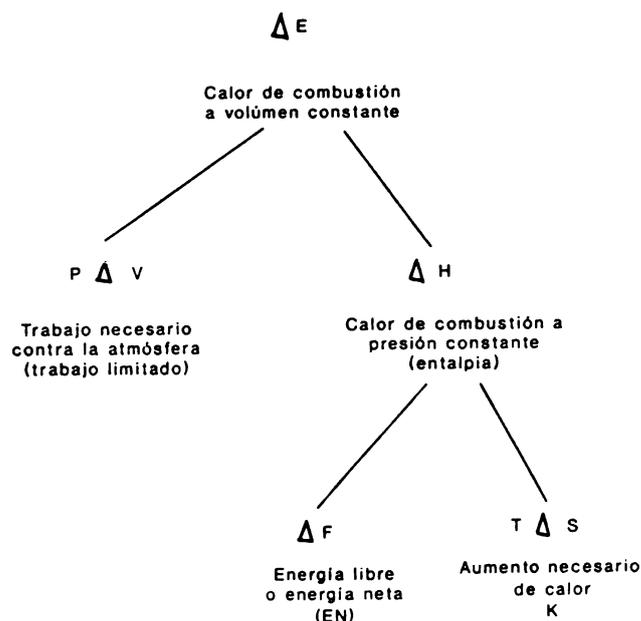


Fig. 1 Distribución de la energía eléctrica, según Kleiber (1961)

La energía libre del sistema debe describirse como:

$$\Delta F = \Delta H - T \Delta S \quad (\text{Ecuación de Gibbs}) \quad [3]$$

en la cual  $\Delta H$  representa el cambio en el contenido energético a presión constante y  $T \Delta S$  es la porción de la energía que no es convertible en trabajo.  $T \Delta S$  es el aumento en la energía perdida y se compone de dos factores:  $\Delta S$  o entropía y  $T$  o temperatura absoluta. Cuando la temperatura es constante, como en fusión:

$$\Delta S = \text{calor}/T \quad (\text{reacción reversible}) \quad [4]$$

$\Delta S$  tiene un significado molecular fundamental. La entropía de un sistema de sustancias químicas es una medida del desorden del sistema y aumenta con la complejidad química. Representa la cantidad de energía degradada de una forma libre o de alto nivel (equivalente al trabajo) a una de bajo nivel (equivalente al calor).

Existe una cierta analogía entre las categorías de energía termodinámica y las categorías de los nutrientes y alimentos para el animal, siendo esta analogía de tipo formal solamente.

#### d. Calor de combustión o energía bruta (EB)

Según la Primera Ley de Termodinámica, todas las formas de energía se pueden transformar en calor. En los procesos fisiológicos se libera calor como producto final y no como fuente de poder para ellos.

Cuando una sustancia se combustiona hasta los productos finales de la oxidación ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ , cenizas) el calor que se desprende se llama calor de combustión o energía bruta ( $\Delta E$  en termodinámica).

La ecuación esquemática que representa la energía bruta consumida (EBc) de un alimento es:

$$EBc = MS \text{ alimento consumido} \cdot \frac{EB}{MS} \quad [5]$$

El instrumento que se utiliza para medir el valor energético de los alimentos (EB/MS) se llama bomba calorimétrica, como se muestra en el esquema de la Fig. 2. Su funcionamiento consiste básicamente en la combustión de una muestra de alimento "peletizado"<sup>\*\*\*</sup>, mediante la ignición con un conductor eléctrico conectado a una bomba o cámara inyectada con  $\text{O}_2$ , la cual contiene la muestra a analizar. Esta bomba está sumergida en un recipiente con agua a temperatura ambiente. La muestra contenida en la cámara, al combustionar, desprende calor, calentando el agua circundante y provocando un cambio de temperatura en esta, el cual se registra en un termómetro. Mediante la siguiente ecuación, que relaciona las diferencias de temperatura con las kilocalorías desprendidas, se puede determinar la EB de los alimentos:

$$EB = \frac{C \cdot AT - QF}{mp} \cdot 1000 \quad [6]$$

---

\*\*\* "Peletizado": Anglicismo comúnmente usado en nutrición animal para significar "comprimido".

donde:

- EB = energía bruta del alimento, kcal/kg MS  
 C = constante hidrotérmica o standard hidrotérmico, utilizando ácido benzoico  
 AT = diferencia de temperatura del agua antes y después de combustionar la muestra, °C  
 QF = calor desprendido por aquellos elementos ajenos a la combustión de la muestra, por ejemplo, los conductores  
 mp = muestra combustionada, g  
 1000 = factor de conversión de unidades

El calorímetro de la Fig. 2 es adiabático; es decir, tiene una cubierta externa que ajusta su temperatura continuamente para mantenerse igual a la del agua, lo cual hace innecesario ajustar la ecuación por pérdidas de radiación. Además, trabaja a presión constante (40 atm) y, por lo tanto, el calor de combustión representa el cambio de entalpía,  $\Delta H$ ,

$$H = EB = q \quad [7]$$

donde:

$q$  = calor desprendido.

El calor de combustión de los macronutrientes, proteínas, grasas y azúcares, tienen un grado de variación de acuerdo al origen del compuesto. En el Cuadro 1 se muestra el valor de combustión de una serie de sustancias puras.

Atwater y Bryant (1899) derivaron el valor de combustión de las tres clases de nutrientes principales, con los siguientes resultados:

Carbohidratos	4.15 kcal/g
Grasas	9.40 kcal/g
Proteínas	5.65 kcal/g

La energía bruta de un alimento está afectada, entonces, por la relación de macronutrientes que contenga; un alimento más rico en grasa tendrá un valor de combustión mayor.

Lo anterior se puede relacionar con la cantidad relativa de oxígeno contenido en la molécula. En general, el valor de combustión de los nutrientes varía directamente con el contenido de hidrógeno y carbono e inversamente con el contenido de oxígeno.

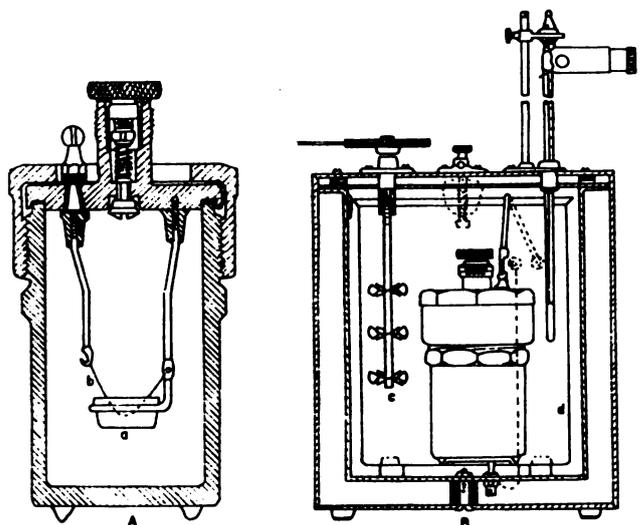


Fig. 2 Esquema de la bomba calorimétrica PARR. A = Corte de sección de la bomba: a es la copa donde se coloca la muestra; b es el cable de ignición. B = Corte de sección del calorímetro con la bomba en su lugar; c es el agitador; d es el balde para agua; e es el medidor

Cuadro 1. Valor de combustión de macronutrientes	
Sustancia pura	kcal/g MS
Glucosa	3.76
Sucrosa	3.96
Almidón	4.23
Grasa (mantequilla)	9.21
Manteca	9.48
Acido esteárico	9.53
Acido oleico	9.50
Acido palmítico	9.35
Glicerol	4.30
Acido propiónico	4.96
Acido butírico	5.35
Caseína	5.86
Alanina	4.35
Tirosina	5.92
Urea	2.53
Metano	13.25

Fuente: Maynard y Loosli (1969).

Cuadro 2. Composición elemental de los nutrientes principales				
Compuesto	Elemento, %			
	C	H	O	N
Grasa	75	12	13	-
Proteína	52	9	23	16
Carbohidratos	44	7	49	-

El calor de combustión se produce sólo por la oxidación que resulta de la unión del carbono o hidrógeno con el oxígeno adicionado al medio, provocando ruptura de enlaces covalentes energéticos. El oxígeno presente en la molécula ya ha liberado el calor ( $\Delta E$ ) durante la formación química del compuesto.

Si se analiza el Cuadro 2, se observa que en el caso de las grasas hay menor proporción de oxígeno y, por lo tanto, un mayor número de átomos que requieren de él. Por ello, su combustión implica tanto oxidación de carbonos como de hidrógenos con ruptura de enlaces más energéticos, como se aprecia en el Cuadro 3.

Desde el punto de vista de tipos de enlaces, en el caso de las proteínas, la energía libre ( $\Delta F$ ) de la hidrólisis de los enlaces peptídicos es aproximadamente 3 kcal/mol, comparado con 4.3 kcal/mol de los enlaces glucosídicos.

**Cuadro 3. Energía (entalpía) de enlaces químicos a 298°K, kcal/mol**

Enlace	C	N	O	F	Si	P	S	Cl	Br	I
H-	98.8	93.4	110.6	134.6	70.4	76.4	81.1	103.2	87.5	71.4
C-	83.1	69.7	84.0	105.4	69.3		62.0	78.5	65.9	57.4
C=	147.0	147.0	174.0				114.0			
C≡	194.0	213.0								
N-	69.7	38.4		64.5				47.7		
N=	147.0	10.0								
N≡	213.0	226.0								
O-	84.0		33.2	44.2	88.2			48.5		
O=	174.0									

Fuente: Dickerson *et al.* (1974).

El calor de combustión del hidrógeno es 34.5 cal/g, del carbono 8.08 cal/g, y del oxígeno varía de 2.6 a 3.4 cal/g.

Finalmente, otro factor que afecta el valor de combustión es el contenido de cenizas; al igual que el agua, por no ser combustibles, disminuyen el porcentaje de energía bruta del alimento.

En el organismo, la oxidación de las grasas no sólo produce más calor que los carbohidratos y las proteínas sino que también genera mayor cantidad de agua metabólica (Cuadro 4).

La determinación del valor de energía bruta, a pesar de obtenerse con gran facilidad con los calorímetros adiabáticos, es una técnica que requiere cierto grado de precisión para lograr resultados precisos.

**Cuadro 4. Agua metabólica resultante de la oxidación de los nutrientes principales**

Compuesto	Agua metabólica g/100 g compuesto
Grasa	107
Carbohidrato	60
Proteína	41

### e. Predicción de la energía bruta

Usando los resultados del método Weende, para el análisis de alimentos, la EB puede predecirse (ds = 0.2) usando la siguiente ecuación:

$$EB = 0.0065PC + 0.00940EE + 0.00415FC + 0.00415ENN \quad [8]$$

donde:

EB	=	energía bruta, Mcal/kg MS
PC	=	proteína cruda, g/kg MS
EE	=	extracto etéreo, g/kg MS
FC	=	fibra cruda, g/kg MS
ENN	=	extracto no nitrogenado, g/kg MS

Los coeficientes en la ecuación corresponden a los valores de combustión planteados por Atwater y Bryant (1899). Estos coeficientes indican que el contenido de proteína cruda y extracto etéreo son las variables que tienen mayor influencia en el contenido de EB del alimento.

Un objetivo importante de los alimentos es su aporte de energía a los procesos realizados en el cuerpo, incluyendo la reserva de energía. Todos los nutrientes pueden servir a ese propósito; por consiguiente, el valor de energía es un factor común para expresar su valor nutritivo. El hecho de que estos nutrientes, especialmente las proteínas, puedan tener funciones específicas y únicas, no altera su utilidad como fuente de energía.

Sin embargo, el valor energético de los alimentos no representa la energía realmente disponible en la célula animal, lugar donde será utilizada. Más aún, si se considera que los alimentos no son totalmente absorbidos en el cuerpo animal, hay entonces una parte de la energía del alimento que realmente no entra al cuerpo y se pierde en las heces.

## 2. ENERGÍA DIGESTIBLE (ED)

El término digestión indica todos los procesos que sufre el alimento cuando se encuentra en el tracto digestivo. Estos se pueden resumir en hidrólisis enzimática y química, emulsión, suspensión coloidal y síntesis. Los productos finales de esta digestión pueden ser absorbidos, volatilizados como gases y/o calor (y eliminados vía boca o ano) o excretados en las heces. La digestibilidad de un nutriente indica la porción de este nutriente que es digerido y absorbido y en consecuencia no aparece en las heces.

Existen varios métodos para determinar el coeficiente de digestibilidad de un nutriente, haciendo referencia en particular a la energía digestible.

### a. Métodos *in vivo* para determinar energía digestible

(1) *Energía digestible total aparente.* Uno de los métodos *in vivo* para obtener la energía digestible de un alimento involucra ensayos de digestibilidad en los cuales se mide la energía bruta de los alimentos que se están ingiriendo diariamente y de las heces recolectadas. Por diferencia se obtiene la energía digestible total aparente.

$$ED \text{ (kcal)} = EB \text{ alimento} - EB \text{ heces} \quad [9]$$

A partir de la ecuación [9] se puede establecer que la digestibilidad de la energía corresponde a la razón entre ED y EB (ED/EB). Este método es relativamente fácil de aplicar, pero requiere que el animal se alimente con la ración de interés en forma constante durante un período preliminar de por lo menos dos semanas.

El término "aparente" en este método, está indicando que existe una porción de la energía de las heces que no proviene del alimento y consiste en fluidos digestivos y células descamadas de la mucosa intestinal, denominada *energía metabólica fecal (EMF)*.

Por otra parte, durante el proceso de digestión se liberan productos gaseosos que incluyen gases combustibles producidos en el tracto digestivo durante la fermentación de la ración. La energía de estos gases se mide cuando se determina EB. Dentro de los gases producidos, el metano tiene la mayor proporción, seguido del hidrógeno, monóxido de carbono, acetona, etano y sulfuro de hidrógeno. Esta fracción se denomina como *energía de gases de digestión (EG)*. En rumiantes, esta fracción corresponde aproximadamente al 8% del valor energético del alimento consumido a nivel de mantención, disminuyendo a 6% a medida que el nivel de consumo aumenta.

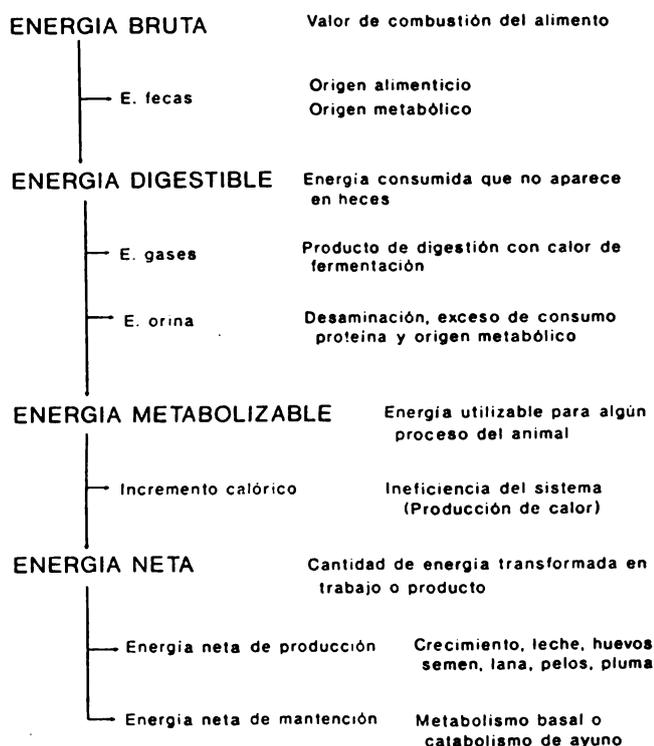


Fig. 3 Utilización de la energía

La ED real corresponde, por lo tanto, a la diferencia entre la energía digestible aparente y las pérdidas de energía que se genera en el proceso digestivo:

$$ED \text{ real} = EB \text{ alimento} - EB \text{ heces} - EMF - EG$$

Bajo el esquema convencional de energía, la energía de los gases (EG) se resta a la energía digestible para determinar EM (Fig. 3).

La ED real representa lo que realmente ocurre con el alimento después del proceso de digestión; ya que la EMF es parte del cuerpo del animal y, por consiguiente, se considera dentro del cálculo del requerimiento energético, la digestibilidad aparente adquiere mayor relevancia que la digestibilidad real bajo este punto de vista y es el término que se emplea en adelante.

En general, se puede resumir que en los rumiantes de un 20% a un 30% de la energía bruta se pierde en el proceso de digestión, cuando se está suministrando una ración a base de concentrados (Kleiber 1961). Esto indica una digestibilidad de 70% a 80%. En el caso de animales alimentados con forrajes, el rango de digestibilidad es más amplio, pudiendo fluctuar entre un 40%, en pasturas toscas, a 75% en pasturas tiernas en crecimiento.

(2) *Elementos nutritivos digestibles totales (ENDT)*. Este método se basa también en ensayos de digestibilidad, pero a diferencia del anterior se hace un análisis tanto del contenido de nutrientes del alimento que se ingiere, como de las heces fecales.

El coeficiente de digestibilidad (CD) de cada nutriente (determinado por el método de análisis de Weende) debe determinarse mediante la siguiente ecuación:

$$CD, \% = \frac{\text{Nutriente consumido} - \text{Nutriente en heces}}{\text{Nutriente consumido}} \cdot 100 \quad [10]$$

A partir de esta ecuación se puede determinar el porcentaje de nutriente digestible:

$$\% \text{ nutriente digestible} = \% \text{ nutriente alimento} \cdot CD \quad [11]$$

La sumatoria de los nutrientes energéticos digestibles representa los elementos nutritivos digestibles totales:

$$ENDT, \% = PD + CHOD + 2.25 EED + ENND + FD \quad [12]$$

donde:

PD	=	proteína digestible, %
CHOD	=	carbohidratos digestibles, %
EED	=	extracto etéreo digestible, %
ENND	=	extracto no nitrogenado digestible, %
FD	=	fibra digestible, %

Los ENDT expresan el valor relativo de energía de los alimentos. El factor 2.25 permite aproximar el valor calórico de las grasas comparado con los carbohidratos y proteínas.

Existe una alta correlación ( $r = 0.97$ ) entre el contenido de ENDT y la energía digestible aparente de los alimentos. Schneider (1954) encontró que cada gramo de ENDT equivale aproximadamente a 4.4 kcal de energía digestible. Maynard (1947) sugiere otra relación racional entre ED aparente y ENDT, desarrollada más extensamente por Abrams (1950), usando los siguientes razonamientos:

- La ED de las proteínas, grasas y carbohidratos en los alimentos varía en la proporción usual de acuerdo a sus valores de EB, los cuales son 5.65, 9.4 y 4.15 kcal/g, o reduciendo, 1.36, 2.25 y 1.0, respectivamente. Desde el punto de vista energético, si se multiplican los porcentajes de PD, EE y ENN digestibles por 1.36, 2.25 y 1.0, respectivamente, de dos alimentos, ambos quedarán reducidos a un equivalente energético común de carbohidratos.

- La relación de ENDT 1:2.25:1 (4:9:4) para PD, EE y ENN concierne a la EM y no a la ED. Es decir, equivale a multiplicar por los respectivos coeficientes de digestibilidad, restando las pérdidas correspondientes en la orina, que para grasas y carbohidratos son cero, pero para las proteínas existe una pérdida de nitrógeno (N) por formación de urea. Esta pérdida equivale a 6.25 g de proteína digestible, o sea  $7.9/6.25 = 1.264$  kcal/g de proteína digestible.

El sistema ENDT ha recibido una fuerte crítica por emplear coeficientes de digestibilidad de los nutrientes determinados por el método proximal de Weende. A pesar de que este método de análisis es legalmente usado en los Estados Unidos y otros países, existen una serie de comités encargados de desarrollar y recomendar una técnica más apta para la evaluación de dietas para animales (AOAC, EEC-IRAC, AACC, ISO, etc). Con referencia al análisis de fibra cruda, el error en su determinación nace de la extracción secuencial en caliente con ácido diluido y luego con álcali diluido. En esa extracción, de 50% a 90% de la lignina, de 0% a 50% de la celulosa y hasta un 85% de la hemicelulosa son disueltas. De aquí que las pérdidas al utilizar esta técnica son variables y dependen de la proporción de estos componentes, pudiendo alcanzar un valor cercano a 70%. Por otra parte, en la determinación de ENN se incluyen fracciones de la pared celular, especialmente en forrajes toscos, provocando en muchos casos que la digestibilidad aparente del ENN sea menor que la de la fibra cruda.

Se han estudiado otros métodos de análisis de digestibilidad de nutrientes para determinar ED (Cuadro 5), como es el sistema de detergentes. Este sistema separa la pared celular en dos fracciones: la fracción soluble en detergente neutro (SDN), que consiste en la mayor parte del contenido celular, y el residuo insoluble (FDN), que contiene los componentes indigestibles. La segunda corresponde a la fracción soluble en detergente ácido (SDA), que contiene prioritariamente a la hemicelulosa y proteína de la pared celular y el residuo insoluble (FDA),

que contiene celulosa y fracciones más indigestibles de compuestos no carbohidratados. La fibra detergente ácido reemplaza frecuentemente a lo que corresponde a fibra cruda por el método proximal.

La calidad de la fibra es una variable importante y requiere del análisis de sus constituyentes. Aunque estos constituyentes son importantes, individualmente no pueden ser sustitutos de un análisis total de la fibra. Por ello este método también tiene cierta crítica. En el Cuadro 6 se muestran las correlaciones de estos parámetros con digestibilidad y consumo animal.

Como se aprecia en el Cuadro 5, el componente energético en la mayoría de los métodos se expresa como MOD (materia orgánica digestible). El valor de MOD puede convertirse a ED con bastante precisión, asumiendo que 1 kg de MOD equivale a 4.54 Mcal de ED. Terry *et al.* (1974), citados por Alderman (1979), mostraron que la determinación de proteína cruda del forraje también puede usarse con precisión razonable para estimar ED; sin embargo, esto sería cierto sólo en el caso de los forrajes de clima templado. En otros alimentos, como tubérculos, concentrados e incluso forrajes tropicales, no parece posible predecir la ED a partir de la proteína cruda. Para el caso de los forrajes de clima templado, la estimación de la energía digestible se hace en la ecuación [13]:

$$ED \text{ de MOD} = 0.00296367 PC + 4.1348 \text{ (Mcal/kg MS)}$$

[13]

Cuadro 5. Análisis de laboratorio para predecir digestibilidad			
	Componente energético	Coefficiente de correlación (r) Residual	Desviación estándar
<b>Fracciones convencionales</b>			
Proteína cruda	MOD <sup>1</sup>	-	± 6.2
Proteína cruda	ED	+ 0.79	± 5.2
Lignina (FAD)	-	- 0.83	± 4.8
Methoxyl	MOD	- 0.42	± 3.8
Fibra detergente neutro	MOD	- 0.49	± 7.6
Fibra detergente ácido (FDA)	MOD	0.76	± 5.3
FDA modificada	MSD <sup>2</sup>	- 0.75	± 4.8
Fibra ácido normal	MOD	- 0.84	-
Fibra cruda	MOD	- 0.94	± 5.2
Fibra cruda	ED	- 0.87	± 4.1
<b>Fracciones preferenciales</b>			
<b>Desaparición de MS</b>			
- Licor ruminal	MSD	-	± 2.3
- Celulosa	MSD	+ 0.94	± 2.7

Fuente: Minson (1979).

<sup>1</sup> MOD = materia orgánica digestible

<sup>2</sup> MSD = materia seca digestible

Cuadro 6. Correlación de varios componentes del forraje con consumo y digestibilidad de 187 forrajes de diversas especies		
Mediciones	Consumo	Digestibilidad
Digestibilidad <i>in vivo</i>	+ 0.61	-
Digestibilidad <i>in vivo</i> <sup>1</sup>	+ 0.47	+ 0.80
Lignina	- 0.08	- 0.61
Fibra detergente ácido	- 0.61	- 0.75
Proteína cruda	+ 0.56	+ 0.44
Celulosa	- 0.75	- 0.56
Pared celular	- 0.76	- 0.45
Hemicelulosa	- 0.58	- 0.12

Fuente: Van Soest y Mertens (1977).

<sup>1</sup> Tilley y Terry (1963) modificado por Goering y Van Soest (1970).

(3) *Método de indicadores indigeribles*. Este método tiene la ventaja de que sólo requiere medir la concentración de los nutrientes en los alimentos y heces, utilizando una muestra de ellos. Se mezcla con el alimento una sustancia indigerible de fácil determinación, como por ejemplo el  $Cr_2O_3$ , de uso muy común.

El coeficiente de digestibilidad se obtiene relacionando la concentración de nutrientes y del indicador tanto en el alimento como en las heces.

$$\% CD = 100 - \frac{\% \text{ indicador en la MO del alimento}}{\% \text{ indicador en la MO de las heces}} \cdot 100 \quad [14]$$

Este método del indicador también puede usarse para determinar el consumo de animales en pastoreo. Si el animal recibe una cantidad diaria conocida de  $Cr_2O_3$  y se conoce la digestibilidad del material consumido, es factible calcular la indigestibilidad y, por consiguiente, el consumo.

(4) *Energía digestible parcial*. Cuando se requiere determinar la energía digestible de algún alimento, el cual no puede ser suministrado sólo, éste se agrega a la ración control, cuya digestibilidad se conoce de antemano. Luego, se determina la digestibilidad del mismo nutriente en la nueva ración. La diferencia en la digestibilidad del nutriente en estudio en las dos raciones, dividida por la diferencia en nutriente total, es la digestibilidad parcial. Para el caso de la energía, la fórmula sería:

$$ED \text{ parcial} = \frac{100(\% ED \text{ ración nueva} - \% ED \text{ ración control})}{\% \text{ alimento en la ración nueva}} + \% ED \text{ ración control} \quad [15]$$

Este método tiene cierto grado de inexactitud, puesto que existen nutrientes que alteran la digestibilidad de otros cuando se mezclan (por ejemplo, la glucosa disminuye la digestibilidad de la proteína).

## b. Métodos sin animales para determinar energía digestible

(1) *Digestibilidad in vitro con licor ruminal.* A diferencia de los métodos anteriormente descritos, este método inicialmente pretendió simular las condiciones del rumen, al fermentarse una muestra de alimento de composición conocida en un recipiente con una cantidad determinada de fluido ruminal y, posteriormente a un período de incubación, se decantaba la muestra y se determinaba por diferencia la degradabilidad de la materia seca, corrigiendo por el residuo obtenido con el inóculo del rumen sólo. Las correlaciones con respecto a digestibilidad *in vivo* no eran altas, debido a que en el animal la digestión ruminal es seguida por una digestión enzimática en abomaso e intestino.

Por lo tanto, estas técnicas fueron reemplazadas por la digestibilidad *in vitro* en dos etapas, que agrega a esta fermentación inicial una digestión enzimática, simulando así las condiciones encontradas en el abomaso e intestino delgado del rumiante. Esta técnica, como la mayoría de los métodos utilizados para determinar digestibilidad *in vitro* de los forrajes, está diseñada para lograr un resultado que permita predecir los parámetros *in vivo*.

El método Tilley y Terry (1963) fue el precursor del método de fermentación *in vitro* en dos etapas y, generalmente, se usa como patrón de excelencia para confrontar cualquier otro procedimiento para determinar digestibilidad.

La relación entre la digestibilidad de la materia seca (DMS) *in vivo* y la digestibilidad *in vitro* en dos etapas para 148 forrajes con digestibilidades entre 47% y 83% utilizando este método, se observa en la siguiente expresión (Raymond 1966):

$$\text{DMS in vivo} = 0.99 \cdot \text{DMS in vitro} - 1.01 \text{ Syx} = \pm 2.3 \quad [16]$$

Los métodos desarrollados posteriormente son, en su mayoría, modificaciones al Tilley y Terry, como el propuesto por Schmid *et al.* (1975) que incorpora urea en el "buffer"<sup>\*\*\*</sup> como fuente de nitrógeno. Otra modificación al método Tilley y Terry es la de Van Soest *et al.* (1966) que sustituye la pepsina de la segunda etapa por solución detergente neutro para determinar FDA, es decir, solubiliza la pared celular bacteriana y los productos endógenos, además de la proteína. Por lo tanto, este método más bien predice la digestibilidad verdadera.

Barnes (1973) después de una revisión exhaustiva de literatura concerniente al desarrollo, modificación y aplicación de la fermentación *in vitro*, encontró que las variaciones en los sistemas usados se deben a cambios en la composición de nutrientes de las soluciones buffer, métodos de acidificación, tiempos de incubación, pH, métodos de filtración y fuente de inóculo; siendo este último factor el que representa la mayor fuente de variación por falta de control.

Por lo tanto, la predicción de ED a partir del método *in vitro* tiene variaciones de acuerdo a la técnica usada. Schmid *et al.* (1975) encontraron una correlación de ED con DMS de 0.83 y 0.91 para variedades de maíz y sorgo, respectivamente. Barnes (1973), en una serie de muestras, encontró correlaciones entre digestibilidad *in vitro* e *in vivo* de 0.87 como promedio y nunca menores de 0.71.

(2) *Digestibilidad in vitro enzimática.* Las técnicas *in vitro* para determinar digestibilidad generalmente requieren de la preparación de un inóculo que contenga microorganismos ruminales viables, siendo éste un procedimiento que contribuye a la variabilidad en los resultados, tanto dentro como entre laboratorios. Por otra

---

\*\*\* Buffer: Palabra inglesa comúnmente usada en nutrición para significar solución tampón (aquella que tiende a mantener un valor de pH constante).

parte, se ha criticado en cierta medida el método de Tilley y Terry por tener un alto costo, además de depender de la disponibilidad del licor ruminal fresco de actividad enzimática constante.

Por estas razones, se ha reemplazado el licor ruminal por preparaciones con enzimas, especialmente carbohidrasas fungales (celulasas) (Hartley *et al.* 1974; McQueen y Van Soest 1975; Jones y Hayward 1975).

Las ventajas que representa la digestibilidad *in vitro* enzimática incluyen la facilidad de reproducir el proceso y la automatización. Sin embargo, existen riesgos de variación potencial en los procedimientos enzimáticos debido a las fuentes de enzimas, medios de incubación y procedimientos. Por ejemplo, Donefer *et al.* (1963), usando celulosa purificada, correlacionaron la digestibilidad enzimática con la ED *in vivo*, y encontraron fluctuaciones entre 53% y 63%, obteniendo resultados similares a los obtenidos con ácido-pepsina (Cuadro 7). Estos valores de correlación son relativamente bajos comparados con aquellos encontrados por Jarrige *et al.* (1970). Los coeficientes de correlación obtenidos por estos autores fueron de 0.91 y 0.92 para ED *in vivo*, al usar pastos de zonas templadas.

En el Cuadro 8 se muestra una serie de correlaciones de predicción de digestibilidad, obtenidas con diferentes métodos de digestibilidad enzimática.

Cuadro 7. Correlación de ED <i>in vitro</i> para 6 leguminosas y 6 gramíneas de clima templado		
Tratamiento	Correlación con ED <i>in vivo</i>	Rango de digestibilidad verdadera %
Celulosa	0.68	22 - 45
Celulosa + pepsina	0.70	23 - 49
Acido - pepsina	0.73	
Agua destilada	0.61	
Digestión de celulosa durante 12 h (fermentación ruminal)	0.73	27 - 55

Fuente: Marten y Barnes (1979).

(3) *Ecuaciones de ajuste.* Estudios con regresiones múltiples han demostrado que existen relaciones significativas entre el análisis químico y el coeficiente de digestibilidad de muchos nutrientes. La regresión de digestibilidad aparente con una o más de estas variables independientes y con el porcentaje de nutrientes mediante análisis proximal, es frecuentemente significativa (Schneider y Flatt 1975). Así, la composición proximal y otros métodos químicos de análisis pueden usarse para predecir la digestibilidad aparente.

Schneider (1954) desarrolló una ecuación que se ajusta a los alimentos que consumen normalmente bovinos y ovinos, usando como predictores los nutrientes obtenidos por el método proximal.

Se asume que la digestibilidad de varios nutrientes y los ENDT se pueden expresar en función del análisis de digestibilidad, como:

$$Y = \bar{y} + b_1(X_1 - \bar{X}_1) + b_2(X_2 - \bar{X}_2) + b_3(X_3 - \bar{X}_3) + b_4(X_4 - \bar{X}_4) \quad [17]$$

En esta ecuación, Y es el coeficiente de digestión para un nutriente dado (o contenido de ENDT) para un alimento en particular;  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$  y  $X_4$  son los porcentajes de proteína cruda, extracto no nitrogenado y extracto etéreo en la muestra;  $\bar{y}$  es el valor promedio del coeficiente de digestión o ENDT encontrado para la muestra de alimento;  $\bar{X}_1$ ,  $\bar{X}_2$ ,  $\bar{X}_3$  y  $\bar{X}_4$  son los porcentajes promedio de proteína, fibra cruda, ENN y EE para el alimento; los b son los coeficientes de regresión parciales. Estos coeficientes de regresión se obtienen usando dos fuentes de variación, entre grupos de alimentos (por ejemplo, concentrados y ensilajes) y entre diferentes alimentos de un mismo grupo (por ejemplo, distintos henos). El Cuadro 9 muestra los valores de b para varios alimentos.

Cuadro 8. Relaciones de digestibilidad para ensayos con enzimas seleccionadas entre 1973 - 1974				
Tipo de forraje	Digestión principal	Correlación con digest. <i>in vivo</i> o <i>in vitro</i>	Ecuación de predicción (Y=%DMS <i>in vivo</i> ) X=%DMS enzima)	Error estándar
Gramíneas (región templada)	celulasa	0.92 ( <i>in vivo</i> )	Y=0.72X+33.0	2.5
Ensilaje de gramínea	celulasa <sup>1</sup>	0.89 ( <i>in vivo</i> )	Y=0.58+31.6(MO)	2.3
Gramíneas (región templada)	pepsina + celulasa	0.96 ( <i>in vitro</i> )	Y=0.61X+30.4	2.4
Leguminosas (región templada)	pepsina + celulasa	0.94 ( <i>in vitro</i> )	Y=0.60X+31.6	2.7
Gramíneas (región temp. y trop.)	pepsina + celulasa <sup>2</sup>	0.94 ( <i>in vivo</i> )	Y=0.69X+20.3	2.7
Gramíneas (región templada)	pepsina + celulasa <sup>3</sup>	0.92 ( <i>in vivo</i> )	Y=0.56X+34.7	1.8
Gramíneas (región temp. y trop.)	celulasa <sup>4</sup>	0.94 ( <i>in vivo</i> )	Y=0.70X+18.2	2.6
Leguminosas (región temp. y trop.)	pepsina + celulasa (4)	0.91 ( <i>in vivo</i> )	Y=0.60X+22.2	3.1
Leguminosa y gramínea (región temp.)	FDN + celulasa	0.98 ( <i>in vivo</i> )	Y=0.98X-10.12	2.8

<sup>1</sup> Método Jones y Hayward (1973), modificado

<sup>2</sup> Método Jones y Hayward (1975), modificado

<sup>3</sup> Método Jones y Hayward (1975)

<sup>4</sup> Método Goto y Menson (1977)

Scheider (1952), citado por Schneider y Flatt (1975), desarrolló otra ecuación para ajustar los coeficientes de digestión de una muestra de alimentos a su análisis proximal cuando es diferente de la composición promedio:

$$Y = C + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_4X_4$$

en la cual  $C$  es una constante específica para el nutriente y la clase de alimento en consideración. Los  $b$  son los coeficientes de regresión parcial calculados en igual forma que en la ecuación anterior y los  $X$  son los porcentajes de proteína, fibra cruda, ENN y EE de la materia seca, para la muestra en estudio. Los coeficientes parciales calculados para los nutrientes de algunos grupos de alimentos se muestran en el Cuadro 10.

Estas ecuaciones son aptas para estimar ENDT del alimento cuando no se dispone de suficientes datos antes de comenzar un ensayo, cuando se calcula una dieta balanceada o cuando se quiere confeccionar una tabla de composición de alimentos para los cuales faltan datos de digestibilidad de algún nutriente.

Cuadro 9. Coeficiente de regresión parcial para ajustar ED a la composición proximal de alimentos para bovinos y ovinos				
Clase de alimentos	Proteína(%) $b_1$	Fibra(%) $b_2$	ENN(%) $b_3$	EE(%) $b_4$
<b>Bovinos</b>				
Henos	-0.750	0.022	0.039	-
Ensilajes (suministrados solos)	0.100	0.070	0.020	-
Ensilajes (método parcial)	-0.085	0.083	-0.005	-
Concentrados	0.047	-	-0.184	-0.230
<b>Ovinos</b>				
Henos	-0.042	-0.050	-0.059	-
"Green soiling" granos	0.001	-0.045	-0.021	-
Ensilajes	-0.373	-0.402	-0.342	-
Concentrados	0.083	-	0.065	0.048

### 3. ENERGÍA METABOLIZABLE (EM)

La energía metabolizable corresponde a la porción de la energía que el animal puede utilizar para procesos fisiológicos (como mantención y producción) y que, por lo tanto, sufre transformaciones en el cuerpo. La EM consumida (CEM) es, consecuentemente, igual a la suma de los procesos que el animal debe realizar.

$$\begin{aligned}
 CEM &= ENm + ICm + ENpl + ICpl + ENg + ICg + ENgp + ICgp + ENcc + \\
 &\quad + ICcc + ENrt + ICrt
 \end{aligned}
 \tag{19}$$

Mantención
Producción

donde:

- ENm = energía neta de mantención  
 ICm = incremento calórico de mantención  
 ENpl = energía neta de producción de leche  
 ICpl = incremento calórico de producción de leche  
 ENg = energía neta de gestación  
 ICg = incremento calórico de gestación  
 ENgp = energía neta de ganancia de peso  
 ICgp = incremento calórico de ganancia de peso  
 ENcc = energía neta de costo de cosecha  
 ICcc = incremento calórico de costo de cosecha  
 ENrt = energía neta de regulación de temperatura  
 ICrt = incremento calórico de regulación de temperatura

Cuadro 10. Coeficientes parciales de nutrientes					
Clase de Alimento	Predictores				
	PC $b_1$	FC $b_2$	ENN $b_3$	EE $b_4$	ENDT
<b>Heno de alta calidad (13 % P)</b>					
Constante C	302.2	383.0	198.7	-139.5	163.6
Proteína %	2.078	-6.730	1.015	-	-1.077
Fibra %	-3.266	-3.315	-2.671	0.808	-1.567
ENN %	-3.973	-3.031	-1.435	2.214	-0.960
EE %	-	-	-	30.835	-
<b>"Soiling"</b>					
Constante C	-140.2	-73.6	441.8	23.0	-84.3
Proteína %	4.694	2.284	-3.908	-	2.607
Fibra %	2.994	1.579	-4.357	0.393	1.697
ENN %	1.302	1.459	-4.330	0.255	1.485
EE %	-	-	2.729	-	-

Continuación del Cuadro 10 ...

Cuadro 10. Coeficientes parciales de nutrientes					
Clase de Alimento	Predictores				
	PC b <sub>1</sub>	FC b <sub>2</sub>	ENN b <sub>3</sub>	EE b <sub>4</sub>	ENDT
<b>Ensilaje</b>					
Constante C	-82.3	397.9	100.0	-15.9	212.7
Proteína %	3.227	-5.874	-0.293	-	2.351
Fibra %	1.634	3.976	-0.978	0.280	-2.196
ENN %	1.057	-3.242	-0.031	0.933	-1.245
EE %	-	-	-	8.645	-
<b>Concentrado (+ 18 % P)</b>					
Constante C	4.7	18.2	3.8	77.1	16.6
Proteína %	1.233	0.691	0.487	-	0.992
Fibra %	0.755	0.700	0.783	0.040	-
ENN %	0.626	-0.769	1.771	-0.262	1.119
EE %	-	-	-	0.364	2.170
<b>Concentrado (- 18 % P)</b>					
Constante C	62.0	336.6	207.5	-124.0	181.8
Proteína %	0.821	-2.372	-4.791	-	-4.500
Fibra %	1.200	-4.299	-0.027	4.647	-
ENN %	-0.204	-3.611	-0.884	2.161	-0.680
EE %	-	-	-	2.524	0.584

Fuente: Schneider y Flatt (1975).

Desde un punto de vista convencional, la EM puede definirse como la energía bruta (EB) menos las pérdidas de energía en gases (EG), heces fecales (EBh) y orina (EU), que incluye la porción no utilizada de los nutrientes absorbidos.

$$EM = EB - (EG + EBh + EU)$$

La porción de energía contenida en la orina, es el resultado de la excreción de productos nitrogenados que no se han oxidado completamente, principalmente la urea ( $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ ). El calor de combustión de la urea es 151.6 kcal/mol (28 g de N), o sea, 5.41 kcal/g de N en la urea, lo que equivale 0.9 kcal por gramo de proteína catabolizada (5.41/6.25).

El nitrógeno que se excreta en la orina tiene dos orígenes: una parte proviene del alimento y aparece en la orina cuando el consumo de nitrógeno es mayor que los requerimientos. La otra parte es de origen metabólico y se le denomina energía urinaria endógena (EUE); esta fracción se excreta continuamente, corresponde al catabolismo de la proteína del cuerpo, depende del tamaño metabólico y es la base para el cálculo del requerimiento de mantención de proteína.

En los rumiantes, la energía que se pierde en la orina representa aproximadamente 4% a 5% de la EB consumida (Maynard y Loosli 1969).

Desde el punto de vista del origen de las fracciones energéticas, se puede referir a la EM verdadera (EMv) como:

$$EMv = EB - (EBh - EMF) - EG - (EU - EUE) - CF \quad [21]$$

En este caso, se debe restar a la energía de las heces la energía fecal de origen metabólico (EMF), que no corresponde a los residuos post-absorción de la ración, sino que equivale a fluidos ruminales y células descamadas de la mucosa intestinal. También se resta otra pérdida de energía llamada calor de fermentación (CF), producto de la acción microbiana en el tracto digestivo. Este valor fluctúa entre 5% y 10% del valor energético del alimento.

Otra de las formas de expresar la EM es en función del balance del nitrógeno en el cuerpo (BN); es decir, el N consumido menos el N perdido en las heces y en la orina. En este caso, la expresión de EM se corregirá como sigue: por cada gramo de N perdido se sumarán 7.45 kcal y por cada gramo de N retenido se restarán 7.45 kcal. Este valor, sin embargo, no es muy exacto, y varía notablemente entre especies.

$$EM \text{ (kcal)} = EB \text{ alimento} - EBh - EG - EU \pm 7.45 \text{ BN} \quad [22]$$

Cuando la EM se utiliza en algún proceso fisiológico, como es la mantención más la producción, se produce una nueva pérdida de energía: el calor de metabolización de los nutrientes absorbidos (CMN). Esta última pérdida corresponde al calor producido como resultado de la utilización de los nutrientes absorbidos. Si se resta esta fracción de energía a la EM, queda una porción de energía llamada *energía neta* (EN) y corresponde a la energía que realmente se destina a los procesos fisiológicos.

$$EN = EM - CMN \quad [23]$$

donde:

- EN = energía neta
- EM = energía metabolizable
- CMN = calor de metabolización de los nutrientes absorbidos

### a. Métodos de determinación de la energía metabolizable

(1) *Método directo de determinación de la energía metabolizable.* La determinación directa de la energía metabolizable de un alimento consumido supone la determinación del calor de combustión de las heces, orina y metano producido por un animal que recibe una cantidad conocida de alimento.

Las pérdidas de metano del ganado bovino pueden calcularse con las siguientes ecuaciones (Blaxter 1962):

$$CH_4 = 4.28 + 0.059 DA \quad [24]$$

$$CH_4 = 6.05 + 0.020 DA \quad [25]$$

donde:

CH<sub>4</sub> = kcal de CH<sub>4</sub> perdidas/100 kcal de alimento  
 DA = digestibilidad aparente del alimento a nivel de mantención

Estas regresiones se desarrollaron para varios niveles de consumo, pero con poca variedad de alimentos. Usualmente se toma como valor promedio de estimación 8 kcal en CH<sub>4</sub>/100 kcal de alimento.

Por otra parte, las pérdidas de energía por la orina también se relacionan con la digestibilidad aparente. Armstrong (1964) encontró la relación:

$$EU = 0.140 DA - 2.1 \pm 0.77 \text{ kcal/100 kcal alimento} \quad [26]$$

donde:

EU = pérdidas de energía por la orina  
 DA = digestibilidad aparente, %

Además, Armstrong (1964), encontró que la relación EM/ED para una serie de pastos provenientes de zonas templadas era de 0.81. Trabajos realizados por Wainmann (1976), citado por Alderman (1979), han confirmado la validez de este valor medio para forrajes comunes y para cereales.

La materia orgánica digestible (MOD) y EM pueden entonces relacionarse mediante las siguientes expresiones:

$$ED = 0.0454 MOD \quad [27]$$

donde:

ED = energía digestible, Mcal/kg MS  
 MOD = materia orgánica digestible, % de la MS

debido a que:

$$EM = 0.81 ED \quad [28]$$

entonces:

$$EM = 0.368 MOD \quad [29]$$

donde:

EM = energía metabolizable, Mcal/kg MS

En todo caso, la suposición de que la materia orgánica digestible tiene un valor constante de 4.54 Mcal de ED no es exactamente cierta, pues varía en un rango de 3.86 a 4.89, dependiendo del forraje.

(2) *Ecuaciones de predicción de la energía metabolizable.* Existen varias ecuaciones que permiten predecir la EM a partir de la composición del forraje (Cuadro 11). Morgan (1974) describe la forma en que estas ecuaciones se desarrollaron, asumiendo un valor calórico constante de 4.4 kcal/g de MOD para estimar ED. Entonces:

$$EM = (MOD)(4.4)(0.81) \quad [30]$$

es decir:

$$EM = 3.56 MOD \quad [31]$$

Cuadro 11. Regresiones para la predicción de EM (kcal/g alimento) (Y) a partir de la composición de la materia seca		
Alimento	Expresión de la ecuación <sup>a</sup>	Desviación estándar
47 henos <sup>b</sup>	Y= 4.08 - 0.053 FDAM	0.18
	Y= 3.23 - 0.37 FDA + 0.033 PC	0.17
	Y= 0.20 + 0.033 DVMO	0.15
	Y= 0.11 + 0.03 DVMO + 0.03 PC	0.13
	Y= 3.4 + 0.004 PC - 0.0045 FDAM	-
Henos <sup>c</sup>	Y= 3.18 - 0.45 FC + 0.041 PC	-
Pasto fresco	Y= 3.8 - 0.045 FDAM	-
Leguminosas frescas	Y= 2.94 - 0.029 FDAM	-
Todos los pastos	Y= 0.05 + 0.033 DVMO + 0.024 PC	-
Ensilajes	Y= 2.61 + 0.05 PC - 0.011 FDAM - 0.14 MS	-
Ensilaje de maíz	Y= 3.35 - 0.031 FDAM - 0.007 MS	-
Concentrados <sup>d</sup>	Y= 0.0036 PD + 0.00817 EED + 0.00314 FD + 0.0038 ENND	-

<sup>a</sup> FDAM: fibra detergente ácido modificado, %; FDA = fibra detergente ácido, %; PC = proteína cruda, %; DVMO = digestibilidad *in vitro* de la materia orgánica, %; PD = proteína digestible, %; EED = extracto etéreo digestible, %; FD = fibra digestible, %; ENND = extracto no nitrogenado digestible, %.

<sup>b</sup> Morgan (1974)

<sup>c</sup> HMSO (1975)

<sup>d</sup> Datos de trabajos realizados en el Oskar Kellner Institute, Rostock, Alemania.

#### 4. ENERGÍA NETA (EN)

La energía neta, como ha sido descrita por Armsby (1917), es la máxima proporción de la energía del alimento convertible en trabajo, por ejemplo, leche, huevos (Fig. 3).

Desde el punto de vista de la termodinámica, esta energía parece corresponder a la energía libre,  $\Delta F$ , aunque en termodinámica,  $\Delta F$  se refiere al máximo teórico convertible en trabajo y no para almacenamiento (como en producción de leche) (Brody 1968).

La energía neta verdadera corresponde a:

$$ENv = EB - (EBh - EMF) - EG - CF - (EU - EUE) - CMN \quad [32]$$

o también:

$$ENv = EB - EBh - EG - CF - EU - CMN + EMF + EUE \quad [33]$$

donde:

EB	=	energía bruta
EBh	=	energía bruta de las heces
EMF	=	energía metabólica fecal
EG	=	energía de gases
CF	=	calor de fermentación
EU	=	energía urinaria
EUE	=	energía urinaria endógena
CMN	=	calor de metabolización de nutrientes

En la segunda ecuación EMF y EUE se suman por ser estas fracciones parte del requerimiento de mantención. Por lo tanto, la energía neta corresponderá a la energía bruta del tejido o de los productos sintetizados, más el requerimiento de mantención.

##### a. Energía neta de mantención: Metabolismo basal

Es el cambio químico que ocurre en la célula de un animal, con liberación de calor (producto de la oxidación de tejidos) cuando éste se encuentra en estado post-absortivo, conciente, en reposo y en ambiente de termoneutralidad.

(1) Estado post-absortivo: Significa que no debe haber alimento en el tracto digestivo. En rumiantes es muy difícil lograr esta condición, ya que puede existir alimento en el tracto digestivo hasta por una semana, por lo que se habla de ayuno prolongado (24-48 h) o catabolismo de ayuno.

(2) Reposo: En animales es un reposo relativo y se refiere a mantenerlos lo más tranquilos posible.

(3) Zona de termoneutralidad: Es una región entre la temperatura crítica mínima y el punto de aumento hipertérmico (zona B'- B, en las Figs. 4 y 5). El rango varía con la cantidad y balance de alimento consumido, que se refleja en el incremento calórico. También representa la temperatura ambiental en la cual el animal no requiere gastar energía para mantener el cuerpo caliente (ECC) o frío (ECF).

Los esquemas de las Figs. 4 y 5 son representaciones simples de la relación hipotética entre la temperatura ambiental y la tasa de producción de calor del cuerpo. Los valores varían con la especie, tipo de alimento consumido y nivel de consumo, entre otros factores.

Cuando la temperatura ambiental llega a la temperatura crítica (B') la termogénesis comienza a aumentar para contrarrestar el aumento de la termolisis. La tasa de producción de calor aumenta en proporción con la disminución en la temperatura ambiental, siguiendo el requerimiento de calor termostático.

Cuando la temperatura ambiental está bajo la temperatura crítica, en animales en condiciones basales (A), el incremento calórico del alimento disminuye proporcionalmente con la disminución de la temperatura, porque parte de este calor es utilizado como una fracción de la energía neta del animal. El incremento calórico es completamente utilizado cuando el calor mínimo del animal alimentado entrecruza el requerimiento calórico termostático.

Cuando la temperatura disminuye bajo el tercer punto crítico (C), correspondiente a la temperatura mínima para producción, la producción se reduce a cero. El punto D representa la posición a la cual la producción de calor es máxima. Sin embargo, el animal pierde sustancias del cuerpo, aunque esté consumiendo hasta su capacidad, porque su producción de calor no es suficiente para alcanzar el requerimiento de calor termostático. Así, la temperatura corporal comienza a declinar hasta la muerte.

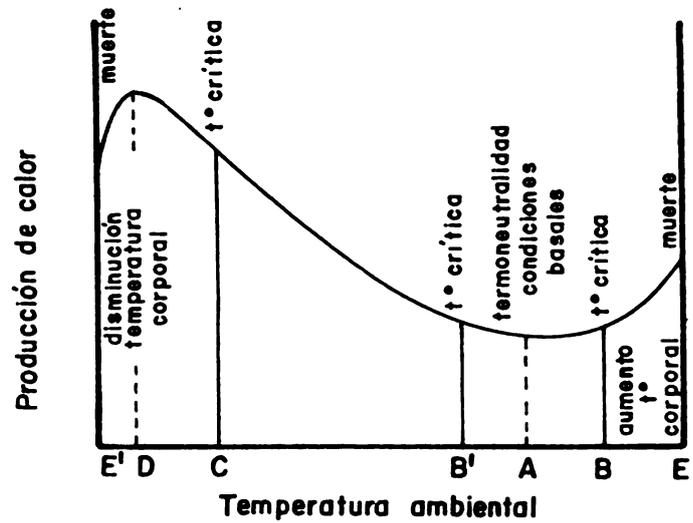


Fig. 4 Influencia de la temperatura ambiental en la producción de calor

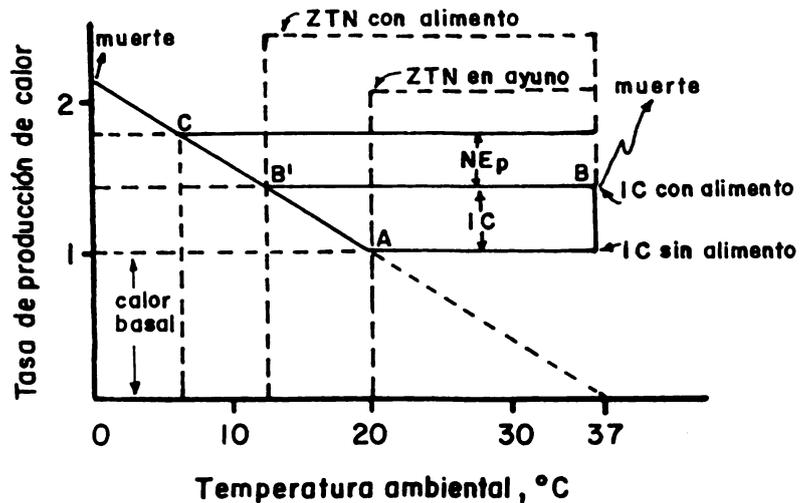


Fig. 5 Relación esquemática entre temperatura ambiental y temperatura crítica (ZTN = Zona de termoneutralidad; IC = Incremento de calor)

Una situación similar ocurre cuando la temperatura sobrepasa el punto crítico (B); el animal es incapaz de disipar el calor y muere. Entre el punto crítico B y la muerte, se produce el efecto Van Hoff, es decir, las reacciones se duplican por cada 10 C que se aumente la temperatura. En los bovinos, la tasa respiratoria se duplica cuando la temperatura aumenta en 1 C. En estas condiciones se puede conocer el metabolismo basal; para ello se debe calcular la producción de calor, la que, por unidad de peso, disminuye notoriamente con el aumento de peso. Por ejemplo, una vaca es 20 a 25 veces inferior que en un canario. Por lo tanto, el peso no es un factor adecuado como base de referencia para el metabolismo.

De acuerdo a las leyes de Newton y Stephan Boltzman, la tasa de enfriamiento del cuerpo es proporcional a la superficie del cuerpo (Brody 1968) y también lo será la producción de calor de los homeotermos.

Al relacionar el calor desprendido con el oxígeno consumido, el pulso y el volúmen sanguíneo, Kleiber (1961) postuló que: "si el tamaño corporal en el metabolismo está relacionado al transporte de oxígeno y si el volúmen/latido es proporcional a la potencia 1/4 del peso, entonces la intensidad del flujo sanguíneo será proporcional a la potencia 3/4 del peso". Dada la directa proporcionalidad entre el flujo sanguíneo y el metabolismo basal, se obtuvo que el calor desprendido durante el metabolismo basal (Y) es proporcional a la superficie corporal, o sea, el peso elevado a la potencia 3/4. La relación es de la forma:

$$Y = aW^{3/4} \quad [34]$$

donde:

Y = metabolismo basal  
W = peso del animal, kg

A partir de la teoría de la similitud, el área de superficie varía con la raíz cuadrada del tamaño o la potencia 3/4 del peso, independiente del tamaño. Esta relación indica que dos animales disiparán igual cantidad de calor por unidad de peso metabólico o unidad de superficie.

En la Fig. 6, se relaciona el balance de energía con el consumo de energía metabolizable. El punto en el cual el animal no está consumiendo y tiene un balance energético negativo, es el denominado *catabolismo de ayuno* y representa a la *energía neta de mantención*.

Lofgreen y Garrett (1968), indican que un valor recomendable para el punto B sería de 77 kcal, agregándole además un porcentaje menor a un 4% como margen de seguridad; la expresión de la ecuación es:

$$ENm \text{ ó } CA = 80 W^{0.75} \quad [35]$$

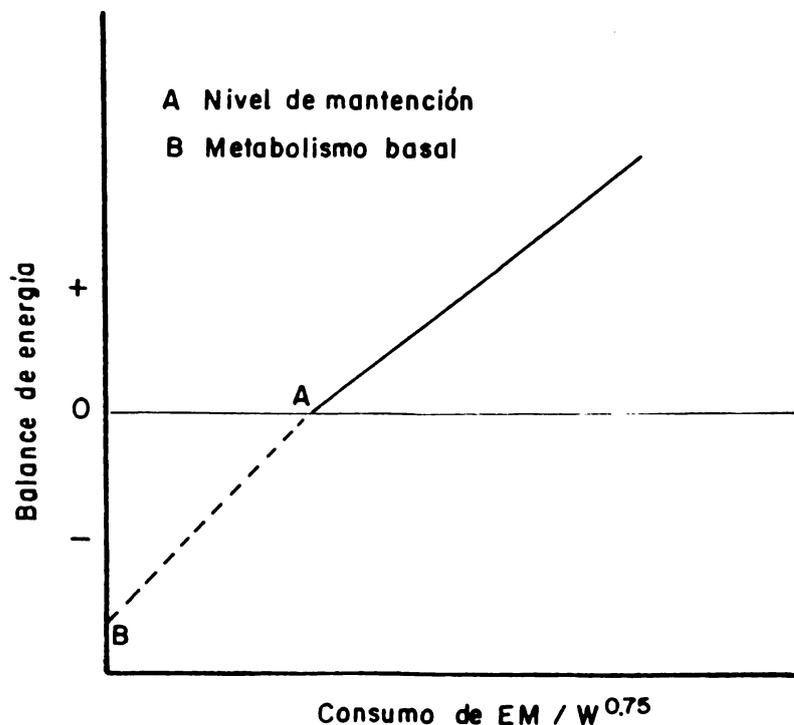


Fig. 6 Relación entre consumo de EM y balance de energía

donde:

ENm ó CA = energía neta de mantención o catabolismo de ayuno, kcal/día  
W = peso del animal, kg

Cuando el animal consume, el balance de energía se hace menos negativo, hasta llegar a un punto (A), donde el consumo de energía metabolizable produce un balance energético igual a cero. Este punto por definición se denomina *requerimiento de mantención* (RM):

$$RM = ENm + ICm \quad [36]$$

donde:

RM = requerimiento de mantención  
ENm = energía neta de mantención  
ICm = incremento calórico de mantención

#### b. Requerimiento de mantención

La pendiente de la recta sobre el nivel cero de consumo indica la eficiencia de utilización de la EM para mantención (Km). Esta pendiente es diferente dependiendo de si se está sobre el balance de energía o bajo él. La máxima eficiencia corresponde al Km, es decir, desde un consumo cero hasta aquel punto de consumo en que el balance de energía es igual a cero. Sobre este punto, la derivada es menor y por consiguiente los valores K de producción son menores que el K de mantención. Para determinar el requerimiento de EM es necesario corregir la energía neta por su valor K correspondiente según la ecuación:

$$EMm = \frac{ENm}{Km} \quad [37]$$

El Km de mantención varía con la concentración energética de la ración ( $q = EM/EB$ ). Blaxter (1974) y Van Es (1975) encontraron que el Km está correlacionado con q mediante la ecuación:

$$Km = 54.6 + 0.3 \cdot q \quad [38]$$

Si se admite el supuesto de que el valor calórico de la materia seca de los alimentos más utilizados por rumiantes es 4.4 Mcal/kg MS, se puede realizar una aproximación de la ecuación a una forma más simplificada. Esto no es totalmente correcto para alimentos muy ricos en grasa y para aquellos ricos en minerales. De esta manera, la ecuación se plantea a continuación:

$$q = \frac{EM \text{ de } 1 \text{ kg de alimento}}{EB \text{ de } 1 \text{ kg de alimento}} \cdot 100$$

$$q = \frac{100EM/MS}{4.4} = 22.727EM/MS \quad [39]$$

donde:

EM/MS = Mcal EM/kg MS

entonces:

$$Km = 54.6 + 6.818 (EM/MS) \quad [40]$$

HMSO (1975) describe una ecuación similar, en función de la concentración calórica:

$$Km = 55 + 6.694 [EM] \quad [41]$$

donde:

[EM] = concentración calórica, Mcal EM/kg MS

Este mismo procedimiento se puede aplicar en las ecuaciones de eficiencia de producción de leche y de ganancia de peso para relacionarlas con concentración calórica [EM].

Cuadro 12. Algunas cifras seleccionadas para ilustrar el cálculo de las eficiencias de utilización de la EM para mantención (Km), ganancias de peso (Kgp) y para producción de leche (Kpl) en rumiantes				
Concentración calórica (EM/MS=[EM]) Mcal EM/kg MS	Concentración energética (q) ((EM/EB) 100) Mcal	Eficiencia de utilización de EM		
		Km <sup>1</sup>	Kgp <sup>2</sup>	Kpl <sup>3</sup>
1.6	36.4	66	33	55
1.8	41.0	67	36	56
2.0	45.5	68	40	57
2.2	50.0	70	44	58
2.4	54.5	71	47	59
2.6	59.0	72	51	60
2.8	63.6	74	55	61
3.0	68.2	75	58	62
3.2	72.7	76	62	63
3.4	77.3	78	66	65
2.5 ± 0.6	56.82 ± 13.74	71.7 ± 4.03	49.2 ± 11.12	59.6 ± 3.33

Fuente: Adaptado de ARC (1980). p. 291.

<sup>1</sup> Km fue calculada a partir de  $Km = 54.6 + 0.3q$

<sup>2</sup> Kgp fue calculada a partir de  $Kgp = 3.0 + 0.81q$

<sup>3</sup> Kpl fue calculada a partir de  $Kpl = 5.45 EM/MS + 46.3$

Existen factores, por lo tanto, que afectan la eficiencia de utilización de la EM, los cuales pueden ser agrupados en tres categorías: característicos de la dieta, propios del animal y propios de las condiciones ambientales.

El Cuadro 12 muestra una estimación del Km, Kgp (eficiencia para ganancia de peso) y Kpl (eficiencia de producción de leche) para diferentes concentraciones energéticas y densidades calóricas.

De este cuadro se desprende que la eficiencia de ganancia de peso es más baja que el K de lactancia y el K de mantención.

HMSO (1975), indica un valor para Km de 0.72, como un promedio que corresponde a una concentración calórica equivalente a 2.6 Mcal EM/kg MS, lo que es alto para condiciones de pastoreo y normalmente adecuado para condiciones de estabulación.

Si se usa el valor 0.72, el requerimiento de EM para mantención corresponderá entonces a:

$$EMm = ENm/Km \quad [42]$$

es decir,

$$EMm \text{ (kcal/día)} = 80 W^{0.75}/0.72 \quad (\text{Lofgreen y Garrett 1968}) \quad [43]$$

$$EMm \text{ (Mcal/día)} = 1.36 + 0.0145 W/0.72 \quad (\text{Gough 1975}) \quad [44]$$

Cuadro 13. Requerimiento de energía metabolizable para mantención de bovinos		
Peso vivo (kg)	EM para mantención (kcal/día)	
	$EMm = \frac{80 W^{0.75}}{0.72}$	$EMm = \frac{1.36+0.0145 W}{0.72} \cdot 1000$
100	3513.64	3902.78
150	4762.40	4909.72
200	5909.22	5916.67
250	6985.74	6923.61
300	8009.37	7930.56
350	8991.01	8937.50
400	9938.08	9944.44
450	10855.93	10951.39
500	11748.57	11958.33
550	12619.13	12965.28
600	13470.10	13972.22
650	14303.51	14979.17

En el Cuadro 13 se puede observar el requerimiento de mantención para distintos pesos de vacunos tanto de carne como de leche.

Es necesario recordar que el requerimiento de mantención, así calculado, corresponde a la energía metabolizable para mantención bajo las condiciones de termoneutralidad y reposo. El valor de Km corrige el requerimiento de energía neta de mantención, es decir, el requerimiento de mantención en estado post-absortivo, a requerimiento de mantención con su correspondiente consumo, expresado en términos de energía metabolizable.

### c. Factores que afectan el requerimiento de mantención

En las últimas décadas se ha establecido que el requerimiento de mantención se relaciona, además del peso vivo, con el estado fisiológico, plano nutricional, edad, nivel de productividad, medio ambiente y otros factores (Smith 1970; Reid *et al.* 1980; Cañas 1974; Koong *et al.* 1982) y por lo tanto no es constante.

Dos posibles razones fisiológicas que se dan para el aumento en el requerimiento de mantención en animales en producción son las siguientes:

(1) Durante la gestación, lactancia o crecimiento, hay un aumento en la tasa metabólica de los tejidos corporales, como consecuencia de un mayor flujo de nutrientes y niveles hormonales en la sangre.

(2) También se produce un aumento en el peso relativo de órganos vitales, con alto gasto energético por unidad de masa, tales como hígado, tracto gastrointestinal, corazón y riñones, aumentando el gasto energético corporal por unidad de peso. El mayor peso de estos órganos se podría correlacionar con un aumento en el nivel de consumo (Cañas 1974) y posiblemente con las características de la dieta suministrada (Pulido 1988; Cañas y Navarro 1991).

En animales bajo condiciones basales, la energía que se gasta en mantención puede variar significativamente dependiendo de la fuente que la genere. Esto se debe a que existen diferentes niveles de eficiencia para atrapar la energía como enlaces fosfatos en las diferentes vías metabólicas (Cuadro 14). El cambio en el requerimiento de mantención puede fluctuar en un animal en un rango entre 20% y 25%, dependiendo de los nutrientes disponibles (Baldwin *et al.* 1980).

Cuadro 14. Valores relativos de varios nutrientes para mantención		
Fuente de energía	Pérdida de calor/ enlaces pirofosfato (kcal)	Valor relativo (%)
Estearato	18.6	100
Glucosa	17.7	105
Acetato	20.9	89
Propionato	20.4	91
Butirato	19.4	96
Proteínas	22.4 a 23.3	80 a 83

Fuente: Baldwin *et al.* (1980)

Durante la digestión, la liberación de energía se asocia a la hidrólisis de enlaces de macromoléculas en elementos más simples y a la síntesis y excreción de enzimas de jugos digestivos (Guyton 1981; Lehninger 1985). Cuando no se suministra alimento, el animal hace uso de sus reservas corporales (grasa, glucógeno, proteína), para obtener los ATP necesarios para sus funciones vitales de mantención (Ganong 1981). Una vez alimentado, los nutrientes del alimento se utilizan para síntesis de los tejidos de reserva según la cantidad de ATP que rindan (Blaxter 1962).

La eficiencia de utilización del alimento para mantención se asocia entonces a la transferencia de energía a través de metabolitos intermediarios. Esto implica que la composición de la dieta afectará la eficiencia a través de los productos finales de la digestión (Geiger y Canolty 1978), dado que para un mismo experimento los metabolitos intermediarios pueden ser diferentes según el precursor que se trate.

Por lo tanto, se comprobó que existe un efecto significativo y distinto en el peso de algunos órganos, causados por las características nutritivas de la dieta (Farid *et al.* 1978, Pulido 1988). Por ejemplo, la lipogénesis en hígado y tejido adiposo de ratas es estimulada por dietas ricas en carbohidratos y se disminuye con dietas altas en grasa (Ogunpide y Bray 1974, citados por Pulido 1988). Entonces, la lipogénesis hepática ejercería un trabajo tal, dada su complejidad, que estaría provocando una hipertrofia del órgano. Existen antecedentes que reafirman la idea sobre el menor trabajo hepático e intestinal, al aumentar la grasa en la dieta, dado que el mayor aporte de dicho nutriente actuaría disminuyendo la conversión de glucosa a  $\text{CO}_2$ , ácidos grasos y glicerol (Donald *et al.* 1975; Harper 1976).

Según la literatura, un aporte superior al 25% de proteína no propicia cambios en el peso de los órganos en ratas en crecimiento. Consecuentemente, se podría concluir que existe una mayor influencia de carbohidratos y lípidos en el tamaño de los órganos en comparación con la proteína. Esto se demuestra también con un modelo que determina en MS y tipo de dieta:

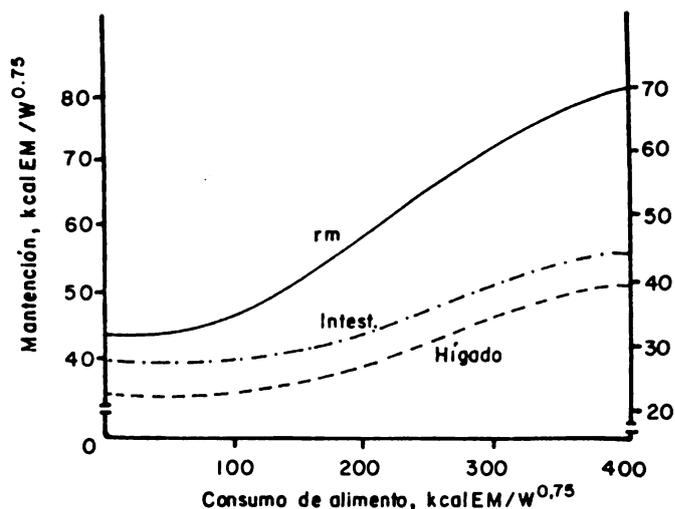
$$\text{ENM} = 8.2815 - 0.01639 (\% \text{ PR}) + 0.15532 (\% \text{ CHO}) + 0.15903 (\% \text{ EE}) + 0.09034 (\text{CMS}) \quad [45]$$

$$r^2 = 0.96$$

donde:

ENM = kcal/W<sup>0.75</sup>  
 %PR = % de proteína cruda en la dieta  
 %CHO = % de carbohidratos en la dieta  
 %EE = % de extracto etéreo en la dieta  
 CMS = consumo de MS, g

Los valores de las constantes indican que los componentes más importantes que determinan la variación de la ENM son la composición de la dieta (dentro de la cual el porcentaje de inclusión de lípidos y carbohidratos son los más relevantes), seguido por el nivel de consumo de MS.



$$r_m = \frac{126.11}{1 + 2.00262 e^{-0.0036x}} \text{ kcal / W}^{0.75}$$

$$\text{Intest} = \frac{78.25}{1 + 2.938105 e^{-0.002542x}} \text{ g / W}^{0.75}$$

$$\text{Hígado} = \frac{78.23}{1 + 2.938105 e^{-0.002542x}} \text{ g / W}^{0.75}$$

Fig. 7

Relación entre consumo de energía y requerimiento energético de mantención

Otro factor que conduce a variación en el requerimiento de mantención es el nivel de consumo del alimento, expresado como  $EM/W^{0.75}$ . Las variaciones reales de este requerimiento por unidad de peso metabólico están en un rango de 40 a 140 kcal (Reid 1974, citado por Baldwin *et al.* 1980).

El esquema de la Fig. 7 (Cañas 1974) muestra la relación que existe entre el consumo de alimento y el requerimiento de mantención. Se puede observar que este no es lineal, sino que corresponde a una ecuación logística. De acuerdo a ella y haciendo una reinterpretación de la curva de Cañas (1974), se plantea que la *energía neta de mantención* cambia dependiendo del nivel de consumo. Este valor de EN fluctúa entre 42 kcal  $EM/W^{0.75}$  y 126 kcal  $EM/W^{0.75}$ , con consumos que varían desde el ayuno por 7 días hasta consumo máximo voluntario obtenido en lactancia.

Es importante enfatizar que dada la plasticidad de los órganos a diferentes niveles de consumo, se requiere de aproximadamente 7 días para que el hígado, el tracto gastrointestinal y el corazón, logren el tamaño que corresponde a ese nivel de consumo.

El cambio en el tamaño de los órganos puede explicar en buena medida el cambio de la EN de mantención y por consiguiente el *requerimiento de mantención*.

En un estudio realizado por Cañas (1974) se analizó el cambio de nivel de consumo en el tamaño de los órganos y su efecto en el requerimiento de mantención, comparando ratas lactantes y no lactantes (Cuadros 15 y 16). Se puede observar en ambos cuadros que el gasto energético por unidad de masa del hígado, del intestino y del corazón, están por encima del gasto energético promedio del cuerpo por unidad de masa. Por lo tanto, un aumento en el peso de los órganos provoca un aumento en el gasto energético promedio del cuerpo de 0.13 kcal (Cuadro 15) a 0.16 kcal por unidad de masa (Cuadro 16).

Cuadro 15. Estimación del requerimiento de mantención en ratas no lactantes				
Tejido	Peso g	% del peso corporal	kcal/g tejido	kcal totales
Piel, cerebro y riñones	42.0	12.0	0.2383	10.01
Adiposo	52.5	15.0	0.1040	5.46
Tracto gastrointestinal	14.0	4.0	0.1400	1.96
Hígado	12.25	3.5	0.7429	9.10
Corazón	1.12	0.32	4.0600	4.55
Músculos	161.3	46.18	0.0695	11.24
Esqueleto	35.0	10.0	0.0520	1.82
Sangre	31.5	5.0	0.0435	1.37
Otros		4.0		
Total	350.0	100.0	0.1300	45.5
kcal $EM/W^{0.75}$				100.0

Fuente: Cañas (1974)

Cuadro 16. Estimación del requerimiento de mantención en ratas lactantes				
Tejido	Peso g	% del peso	kcal/g tejido	kcal totales
Piel, cerebro y riñones	42.0	12.0	0.2383	10.010
Adiposo	24.5	7.0	0.1040	2.548
Tracto gastrointestinal	21.0	6.0	0.1400	2.940
Hígado	16.1	4.6	0.7429	11.961
Corazón	1.1	0.32	4.0625	4.469
Carcasa (músculo y esqueleto)	203.28	58.08	0.06075	12.349
Sangre	17.5	5.0	0.4567	7.992
Glándula mamaria	14.0	4.0	0.1300	1.820
Otros	10.5	3.5	0.4567	4.795
Total	350.0	100.0	0.1682	58.883
kcal EM/W <sup>0.75</sup>				129.400

Fuente: Cañas (1974)

El aumento porcentual de intestino e hígado, órganos que tienen un alto gasto energético durante lactación, provocan un aumento en el gasto energético por unidad de peso metabólico de 100 a 129.4 kcal, reflejando un aumento en el consumo y en el trabajo de estos tejidos durante la lactancia.

En una experiencia similar en vacas, Smith (1970) encontró un cambio de la EM/W<sup>0.75</sup> de 110 a 121, cuando las vacas se encontraban en lactación (Cuadro 17); esto lo explica por el denominado "trabajo de mantención" y asume que corresponde fundamentalmente a un aumento de la actividad metabólica afectada por la tiroxina.

Cuadro 17. Efecto del tamaño relativo de órganos en la producción de calor a mantención				
Tejido	Vaca no lactante, % del peso	kcal/día	Vaca lactante, % del peso	kcal/día
Carcasa	58.0	3.892	53.60	3.602
Tracto digestivo	3.75	1.078	4.85	1.383
Hígado	1.30	3.369	1.65	4.220
Todos los tejidos	92.90	14.971	92.9	16.476
kcal/kg <sup>0.75</sup>	-	110.0	-	121.0

Fuente: Smith (1970)

Los resultados del estudio de Rompala y Hoagland (1987), indican que el aparato digestivo e hígado presentan modificaciones rápidas en su peso, como respuesta a cambios significativos en el nivel de alimentación, aunque el cambio es más lento en el hígado. El intestino delgado exhibe grandes modificaciones en su metabolismo y morfología en respuesta a cambios en el nivel de alimentación.

Estos resultados permiten validar la hipótesis de que niveles altos de consumo causan hipertrofia de órganos vitales, incluyendo hígado, tracto digestivo y corazón. La hipertrofia de estos órganos resultará en un aumento del requerimiento de mantención, debido a que estos órganos tienen un gasto energético por unidad de masa superior al promedio del cuerpo.

Considerando que el requerimiento de mantención es función del consumo, García *et al.* (1990) determinó requerimientos en vacas lecheras, a pesar de que la producción de leche no es función sólo del consumo sino que también de la etapa en que se encuentre en la curva de lactancia. Si para efectos prácticos se acepta que a mayor consumo mayor producción de leche, entonces se puede plantear el requerimiento de mantención en función de la producción de leche.

La ecuación que relaciona consumo con EN de mantención, indica que teniendo un Km de 0.72 el requerimiento de mantención podría llegar a ser  $175W^{0.75}$  ( $126.11/0.72 = 175$ ). Para efectos prácticos, el requerimiento aparece en el Cuadro 18.

Cuadro 18. Requerimiento de mantención para vacas lecheras en función de su nivel de producción	
Nivel de producción kg/día	Requerimiento de mantención kcal de EM/W <sup>0.75</sup>
10	120
15	135
20	153
30	175

#### d. Incremento calórico

El calor desprendido después de la ingestión del alimento, cuando el animal está en la zona de termoneutralidad, se denomina *Incremento calórico* (IC). Este corresponde a las pérdidas de energía disipadas como calor, que ocurren en el organismo cuando un nutriente o alimento es utilizado en algún proceso fisiológico; es decir, la ineficiencia de la utilización de la EM para la función asociada a él.

El IC es la suma del calor de fermentación y de metabolización de nutrientes, más una mínima cantidad perdida durante la masticación y digestión de los alimentos. Es decir:

$$IC = CF + CMN \quad [46]$$

donde:

- IC = incremento calórico
- CF = calor de fermentación
- CMN = calor de metabolización de nutrientes

El incremento calórico, es el valor complementario de la eficiencia de utilización de la EM destinada a algún proceso, designada con la letra K. En otras palabras, puede decirse que es el tributo que se paga por la utilización del alimento absorbido.

$$K (\%) = \frac{\text{retención de energía}}{EM \text{ consumida}} \cdot 100 \quad [47]$$

$$IC (\%) = \frac{\text{producción de calor}}{EM \text{ consumida}} \cdot 100 \quad [48]$$

donde:

$$\frac{\text{producción de calor}}{EM \text{ consumida}} + \frac{\text{retención de energía}}{Em \text{ consumida}} = 1$$

Por lo tanto:

$$K = 1 - IC \quad [49]$$

$$K = \frac{EN}{EM} \cdot 100 \quad [50]$$

Sistemas de alimentación como el de Equivalente de Almidón y los sistemas relacionados con las unidades de forraje, son conceptualmente equivalentes a sistemas como el de Energía Neta, pero que se usan fundamentalmente para engorda, basados en la relación:

$$ENf = EM \cdot Kf \quad [51]$$

donde Kf era calculado a partir del contenido de fibra cruda. Este sistema tiene el problema de que la eficiencia de utilización de la EM varía de acuerdo al proceso fisiológico que está ocurriendo en el animal. Por lo tanto, existe un valor K para mantención (Km), otro para producción de leche (Kpl), otro para producción de tejidos o ganancia de peso (Kgp), etc.

El incremento calórico se disipa como calor, y sólo lo aprovecha el organismo cuando el animal se encuentra en un ambiente con temperaturas bajas. En esa situación, la sumatoria de IC se usa para regular la temperatura del cuerpo. Si el animal se encuentra en la zona de termoneutralidad, el calor generado como IC se disipa. Por otra parte, si la temperatura ambiental es alta, el animal usará métodos activos de disipación de calor, como son: el aumentar la velocidad de respiración, jadeo, etc., para luego bajar su nivel de consumo, lo cual producirá una disminución del incremento calórico.

El incremento calórico parece ser análogo al término de entropía,  $T \Delta S$ , en termodinámica,

$$\Delta F = \Delta H - T \Delta S$$

$$EN = EM - IC$$

Por lo tanto:

$$EM = ENm + ICm + ENp + ICp \quad [52]$$

donde:

ENm = energía neta de mantención  
 ENp = energía neta de producción  
 ICm = incremento calórico de mantención  
 ICp = incremento calórico de producción

El incremento calórico es variable y depende del balance de nutrientes y la naturaleza del proceso fisiológico. Es decir, el incremento calórico es función de la diferencia de nutrientes que haya entre lo absorbido por el animal y la composición de lo depositado.

Mientras que la EN de mantención no es constante, sino que cambia dependiendo del nivel de consumo, el incremento calórico es constante dada una composición determinada de alimento.

Baldwin (1968), utilizó la estequiometría para medir IC. Este autor realizó una serie de estimaciones teóricas de la eficiencia de utilización de la energía (K) y planteó que una parte del gasto y de las transformaciones energéticas asociadas con la utilización del alimento para mantención, crecimiento y lactancia, puede explicarse en términos fisiológicos y bioquímicos.

La liberación de la energía, desde que se consume el alimento, ocurre durante la digestión, absorción, almacenaje y movilización, por la síntesis de enlaces pirofosfato de ATP (a expensas de la energía liberada en la oxidación del alimento) y, finalmente, durante la hidrólisis de los enlaces pirofosfato del ATP.

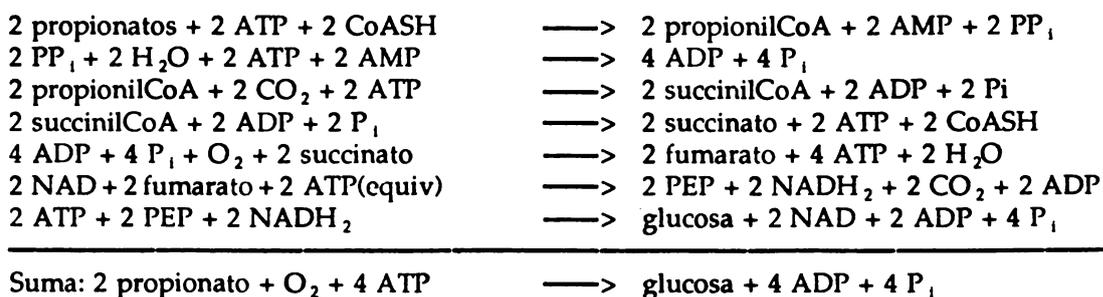
En condiciones de mantención, el balance energético es cero y no existe IC; esto estaría indicando que el IC para mantención es el calor que se relaciona a la eficiencia de utilización del alimento para que el animal llegue a un balance energético igual a cero. En el caso de producción, la eficiencia de utilización de la EM refleja la eficiencia con la cual la energía consumida se utiliza en algún proceso fisiológico de producción y el IC será el gasto energético asociado a la utilización de la energía del alimento absorbido, para convertirlo en producto.

A continuación se utiliza un ejemplo de cálculo de eficiencia de utilización de EM para producción de leche (Kpl) en rumiantes, mediante el uso de un modelo estequiométrico. (Baldwin 1968). Para simplificar el cálculo fue necesario asumir que la relación de ácido acético:ácido propiónico, absorbidos desde rumen y disponibles para la síntesis de leche es 2.5:1; también se asume que el balance de aminoácidos es el ideal para la síntesis de leche y que se considera el costo energético que ocurre después de la absorción para relacionar la EM a EN.

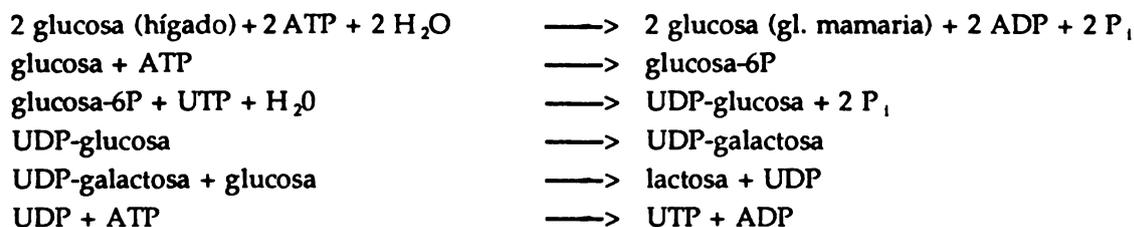
Ejemplos:

(1) Síntesis de lactosa

(a) Conversión de propionato a glucosa en el hígado:



(b) Síntesis de lactosa en la glándula mamaria:



Requerimiento neto de ATP para la conversión de 4 propionatos a 1 lactosa = 12 ATP

(c) Conversión del propionato a energía (ATP):



Rendimiento neto de 1 mol de propionato = 17 ATP

Entonces,

$$\frac{12 \text{ ATP}}{17 \text{ ATP}} = 0.7$$

Por lo tanto, 0.7 moles de propionato deben ser oxidados para satisfacer el costo energético de la formación de lactosa.

El insumo de energía será:

$$4.7 \text{ moles de propionato} \cdot 367 \text{ kcal/mol} = 1730 \text{ kcal}$$

La salida de energía será:

$$1 \text{ mol de lactosa} \cdot 1350 \text{ kcal/mol} = 1350 \text{ kcal}$$

$$K_{lac} = \frac{1350}{1730} \cdot 100 = 78\%$$

donde:

$K_{lac}$  = eficiencia de síntesis de lactosa

(2) Síntesis de proteína

Para sintetizar 100 g de proteína de la leche, se requieren 5 moles de ATP; por lo tanto, 0.295 moles de propionato deben ser oxidados para satisfacer este requerimiento de ATP.

El insumo de energía será:

$$567 \text{ kcal/mol aminoácido promedio} + \frac{367 \text{ kcal/mol propionato}}{0.295 \text{ moles de propionato}} = 675$$

La salida de energía será: 570 kcal/mol de proteína

$$K_{prot} = \frac{570}{675} \cdot 100 = 84\% \quad [54]$$

donde:

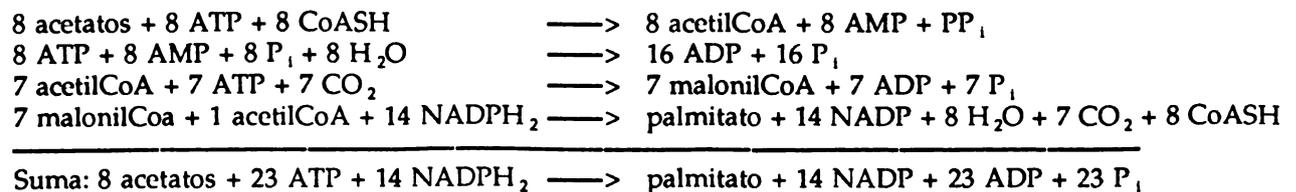
$K_{prot}$  = eficiencia de síntesis de proteína

Por lo tanto, la eficiencia metabólica estimada para la síntesis de proteína desde aminoácidos y propionato es 84%.

(3) Síntesis de grasa

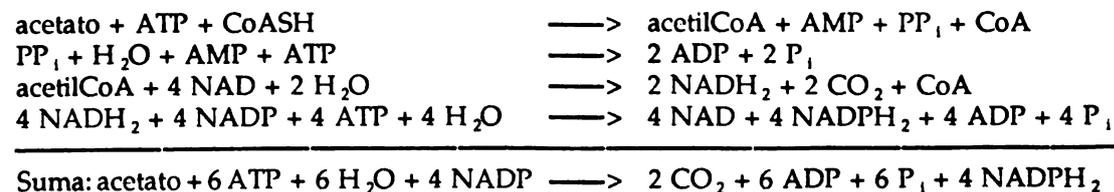
Para estimar la eficiencia metabólica de la síntesis de grasa, se utiliza el palmitato por ser el ácido graso más importante para la producción de leche.

(a) Costo de formación del palmitato a partir de acetato:



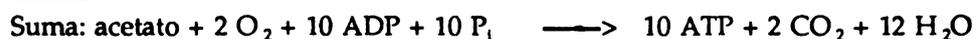
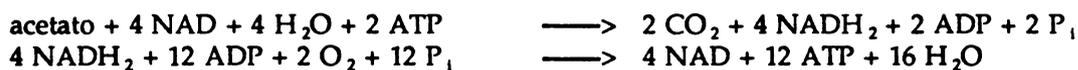
Por lo tanto, 23 ATP y 14 NADPH<sub>2</sub> provienen del acetato.

(b) Formación de NADPH<sub>2</sub> a partir de acetato:



En vista que por cada mol de acetato se forman 4 NADPH<sub>2</sub> y se requieren 14 NADPH<sub>2</sub> para la síntesis de palmitato, entonces se requieren 3.5 moles de acetato. Además, en la formación del NADPH<sub>2</sub>, se utilizan 6 moles de ATP/mol de acetato; por consiguiente, se requieren 21 moles de ATP para producir los 14 NADPH<sub>2</sub> necesarios para la síntesis de palmitato.

(c) Formación de ATP a partir de acetato:



Por lo tanto, se forman 10 ATP/mol de acetato.

Resumiendo, se requieren:

8 moles de acetato que son directamente utilizados  
 3.5 moles de acetato para producir 14 NADPH<sub>2</sub>  
 2.1 moles de acetato para producir 6 ATP requeridos en la síntesis de NADPH<sub>2</sub>  
 2.3 moles de acetato para sintetizar 23 ATP

Entonces, en total, se requieren 15.9 moles de acetato.

El insumo de energía será:

$$15.9 \text{ moles de acetato} \cdot 209 \text{ kcal/mol} = 3320 \text{ kcal}$$

La salida de energía será:

$$1 \text{ mol de palmitato} \cdot 2398 \text{ kcal/mol} = 2398 \text{ kcal}$$

$$K_{gr} = \frac{2398}{3320} \cdot 100 = 72\% \quad [55]$$

Por lo tanto, la eficiencia metabólica estimada para la síntesis de palmitato a partir de acetato es de 72%.

Los resultados representan la eficiencia de cada nutriente de la leche; por lo tanto, el Kpl será función de la composición de nutrientes de la leche.

En el Cuadro 19, se observa cómo se calcula finalmente el Kpl.

El Kpl máximo teórico posible es 0.76; si se cambia la proporción de nutrientes, cambia también la eficiencia de utilización de la EM.

La ineficiencia será entonces 0.24; pero si a esto se agrega la ineficiencia que significa el transporte de iones que es aproximadamente 0.25, se tiene que:

$$0.24 \cdot 1.25 = 0.30$$

por lo que la ineficiencia verdadera será de un 30%; por consiguiente, la eficiencia de producción de leche es de 70%, que es más aproximada que el máximo teórico.

Cuadro 19. Cálculo del Kpl				
Nutriente de la leche	%	Valor energético kcal	Kpl	Energía requerida para su información kcal
Proteína	3.3	19.0	0.84	22.6
Grasa	3.7	34.6	0.72	48.0
Lactosa	4.8	19.2	0.78	24.6
Neto	-	72.8	0.76	95.2

Cuadro 20. Gasto energético de las funciones mantención más importantes <sup>1</sup>	
Función	% del gasto de energía
<b>Funciones de servicio</b>	
Trabajo del riñón	6 a 7
Trabajo del corazón	9 a 11
Respiración	6 a 7
Funciones nerviosas	10 a 15
Funciones del hígado	5 a 10
<b>Total</b>	<b>36 a 50</b>
<b>Mantención celular</b>	
Resíntesis proteica	9 a 12
Resíntesis lipídica	2 a 4
Transporte iones	30 a 40
<b>Total</b>	<b>40 a 56</b>

Fuente: Baldwin *et al.* (1980)

<sup>1</sup> Valores de un animal en estado post abortivo. en el cual la primera fuente energética son los ácidos grasos derivados del tejido adiposo.

De lo anterior, queda claro que cuando no se dispone de la información matemática para conocer el K de algún proceso productivo, por ejemplo el Kpl de alpacas, una forma de estimarlo es haciendo un balance estequiométrico entre los nutrientes normalmente consumidos y lo depositado en este caso en la leche de alpaca.

Este valor, que corresponde a los ATP requeridos para depositar los nutrientes absorbidos en el producto, debe ser corregido por el gasto energético correspondiente al transporte de iones, que es aproximadamente un 30% a 40% de los ATP requeridos para la síntesis del producto (Cuadro 20).

## 5. REQUERIMIENTO DE ENERGÍA PARA PRODUCCIÓN

### a. Requerimiento de energía para producción de leche

En este escrito, para calcular los requerimientos de vacas lecheras se utiliza el *Sistema de Energía Metabolizable*. Es necesario separar el cálculo de requerimiento de mantención del de producción. Así, el consumo de energía metabolizada (CEM) debe utilizarse con una energía neta (EN) dada y su correspondiente incremento calórico (IC), por ejemplo, aquella energía neta destinada a la producción de leche:

$$CEM = ENm + ICm + ENpl + ICpl + ENG + ICg + ENgp + ICgp + ENcc + ICcc + ENrt + ICrt \quad [56]$$

La energía neta de la producción de leche (ENpl) es la energía de la leche secretada. Por consiguiente, la energía neta total secretada dependerá de la cantidad de leche producida y del valor energético de la leche. Este a su vez, dependerá de su composición; fundamentalmente, del contenido de materia grasa y de materia seca de esa leche.

Es por esto que el valor energético de la leche ( $VE_{\text{leche}}$ ) se puede calcular de la siguiente forma:

$$VE_{\text{leche}} = 9.22 Gr + 4.85SNG \quad [57]$$

donde:

$VE_{\text{leche}}$  = valor energético de la leche, kcal  
 Gr = grasa de la leche, g/kg leche  
 SNG = sólidos no grasos, g/kg leche

El valor de combustión de la grasa de la leche es de 9.22 kcal/g. Los sólidos no grasos están formados por proteínas y carbohidratos, con un valor de combustión de 5.7 y 4.15 kcal/g, respectivamente. Asumiendo que ambos componentes están presentes en la leche en un 50%, el valor de combustión de los SNG será el promedio, es decir, 4.85 kcal/g.

HMSO (1975) describe una ecuación lineal similar para calcular  $VE_{\text{leche}}$  que genera valores levemente superiores:

$$VE_{\text{leche}} = 0.00922Gr + 0.0049SNG - 0.0564 \quad [58]$$

donde  $VE_{\text{leche}}$  se expresa en Mcal/kg

En el Cuadro 21 se puede observar el valor energético de la leche de distintas razas de animales vacunos.

Cuadro 21. Valor energético de la leche en diferentes razas de vacas lecheras.				
Raza	Grasa g/kg	Sólidos no grasos g/kg	Valor energético <sup>1</sup> kcal/kg	Valor energético <sup>2</sup> kcal/kg
Shorthorn	36	87	753.87	758.16
Ayrshire	37	88	767.94	762.48
Friesian	35	86	739.80	744.04

$$^1 VE_{\text{leche}} = 9.22Gr + 4.85SNG$$

$$^2 VE_{\text{leche}} = 9.22Gr + 4.9SNG - 0.0564$$

Se ha establecido (Blaxter 1974; Van Es 1975) que la eficiencia de producción de leche ( $K_{pl}$ ) está correlacionada con la concentración energética del alimento ( $q = EM/EB$ ):

$$K_{pl} = 0.24q + 46.3 \quad [59]$$

Basándose en el mismo procedimiento aplicado para transformar la ecuación de  $K_m$  en función de la concentración calórica (ver ecuaciones [38] a [41]), se obtiene:

$$K_{pl} = 5.45 [EM] + 46.3 \quad [60]$$

Dado el rango de concentraciones energéticas o concentraciones calóricas normalmente utilizadas para vacas en lactancia, la variación obtenida en  $K_{pl}$  fluctúa entre 58% y 65%, dependiendo de la dieta. Por consiguiente, para un cálculo rápido se puede asumir como una constante, que es inferior al  $K_m$  y de un valor cercano al 62%.

La energía metabolizable para la producción de leche va a estar dada, entonces, por el valor energético de la producción de leche dividido por el  $K_{pl}$ :

$$EM_{pl} = \frac{EN_{pl}}{0.62} \quad [61]$$

Si se añade un 5% como margen de seguridad, se obtiene que la EM de producción será:

$$EM_{pl} = 1.7 VE_{\text{leche}} \cdot \text{Producción leche} \quad [62]$$

donde:

$EM_{pl}$  = energía metabolizable para producción de leche, kcal  
 Producción de leche = kg de leche

En el Cuadro 22 se muestra el requerimiento de energía metabolizable (Mcal/kg) para producir 1 kg de leche de diferentes composiciones.

Cuadro 22. Requerimiento de EM (Mcal) para 1 kg de leche con diferentes contenidos de grasa <sup>1</sup>								
Contenido de sólidos no grasos g/kg	Contenido de grasa de la leche, g/kg							
	30	32	36	40	42	46	50	52
84	1.16	1.19	1.25	1.32	1.35	1.41	1.47	1.50
85	1.17	1.20	1.26	1.32	1.36	1.42	1.48	1.51
87	1.18	1.21	1.28	1.34	1.37	1.44	1.50	1.53
89	1.20	1.23	1.30	1.36	1.39	1.45	1.51	1.55
90	1.21	1.24	1.30	1.37	1.40	1.46	1.52	1.55
92	1.23	1.26	1.32	1.38	1.41	1.48	1.54	1.57
94	1.24	1.27	1.34	1.40	1.43	1.49	1.56	1.59
95	1.25	1.28	1.34	1.41	1.44	1.50	1.56	1.60

<sup>1</sup> Basado en la ecuación:  $EM_{pl} = 1.7 (9.22Gr + 4.85SNG)$ .

**Ejemplo:**

Calcule el requerimiento de una vaca que pesa 600 kg y produce 20 kg de leche con 3.6% de materia grasa y 8.5% de sólidos no grasos.

Utilizando los datos aportados por García (1987), donde el requerimiento de mantención es función del nivel de producción, el requerimiento de la vaca será:

$$EM_m = 153 \frac{600^{0.75}}{1000} = 18.55 \text{ Mcal}$$

La energía metabolizable para producción (Mcal/kg) de acuerdo a la función [62] será:

$$EM_{pl} = \frac{(1.7) (744.17) (20)}{1000}$$

$$= 25.30 \text{ Mcal}$$

Por lo tanto, el requerimiento total de la vaca corresponde a la suma de la EM<sub>m</sub> más la EM<sub>pl</sub>:

$$\begin{aligned} \text{Requerimiento total} &= EM_m + EM_{pl} \\ &= 18.55 + 25.30 \\ &= 43.85 \text{ Mcal/día} \end{aligned}$$

**b. Efecto del cambio de peso en el cálculo de requerimiento de energía metabolizable**

Una vaca cambia su peso durante la lactancia no solamente por la energía consumida, sino también por la cantidad de leche producida. Es así como se puede observar en la Fig. 8 que vacas Holando Americano tienen una disminución notoria de peso postparto, hasta aproximadamente el segundo mes de lactancia. Esta pérdida de peso es común observarla en vacas de alta producción.

La pérdida de peso de un animal corresponde a tejido movilizado que se transforma energéticamente a producción de leche. El equivalente energético del tejido es de 4.8 Mcal/kg. La eficiencia de producción de leche, a partir de esta fuente de energía, es 82%. Por lo tanto, cada kilogramo de tejido movilizado es capaz de producir  $4.78 \cdot 0.82 = 3.92$  Mcal de energía como leche.

En términos de energía metabolizable equivaldría a:

$$\frac{3.92}{0.82} = 6.32 \text{ Mcal de EM}$$

Se asume el Kpl constante y con un valor igual a 0.62.

Por todo lo anterior, se puede indicar que la pérdida de un kilogramo de peso equivale a 6.32 Mcal de la EM de la dieta.

Cuando existe aumento de peso, la eficiencia de ganancia de peso (Kgpl) corresponde a un valor intermedio entre la eficiencia de producción de leche y la de ganancia de peso de vacas o novillos.

En la ecuación [60], de eficiencia de producción de leche,

$$Kpl = 5.45 [EM] + 46.3$$

el término libre tiene poca validez biológica cuando la concentración calórica tiende a cero. Por esta razón, se ajustó la ecuación por el valor promedio superior ( $Kpl = 59.6 - 3.33$ ), para concentraciones calóricas entre 1.6 y 3.4 Mcal/kg MS, descrito en el Cuadro 12. El valor obtenido es 63 y corresponde a una concentración calórica de 3.0 Mcal/kg MS. Por lo tanto, el factor de Kpl será:

$$\frac{63}{3} = 21$$

Así, la ecuación ajustada de eficiencia de producción de leche tiene la siguiente forma:

$$Kpl = 21 [EM]$$

[63]

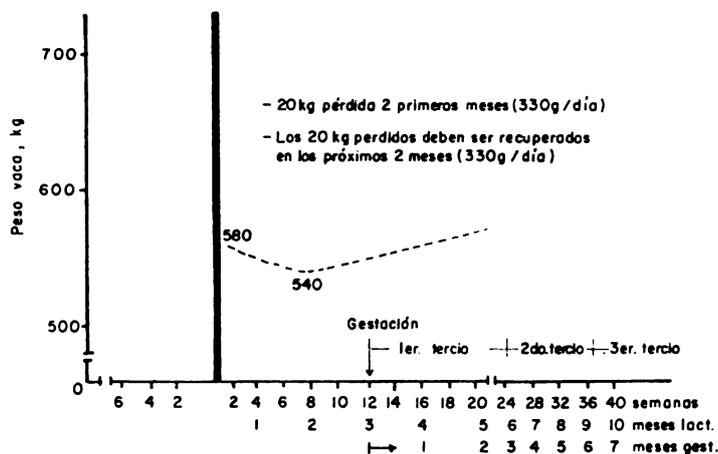


Fig. 8 Relación entre días de lactancia y cambios de peso del animal

Con respecto a la eficiencia de ganancia de peso (Kgp), ésta varía con la concentración energética (q) (Cuadro 12), de acuerdo a la siguiente función (Blaxter 1974; Van Es 1975):

$$Kgp = 0.81q + 3.0 \quad [64]$$

Al relacionarla con [EM], se obtiene la siguiente función:

$$Kgp = 18.4 [EM] + 3.0 \quad [65]$$

El término libre en la función tiene poco efecto en el valor porcentual de Kgp; por lo tanto, la función de ganancia de peso en vacas en lactancia (Kgpl) corresponde a un valor entre 18.4 [EM] y 21 [EM]. En promedio,

$$Kgpl = 19.7 [EM] \quad [66]$$

La ganancia de un kilogramo de peso en una vaca en lactancia corresponde a:

$$\frac{4.78}{0.197 [EM]} \cdot 1.05 \quad [67]$$

con un margen de seguridad de 5%.

Para concentraciones calóricas entre 3.0 y 3.2 Mcal/kg MS la eficiencia de ganancia de peso tiene un valor de 0.61. En este caso, la ganancia de 1 kg de peso será equivalente a 8.228 Mcal de energía metabolizable de la dieta.

### c. Requerimiento de energía metabolizable para gestación

Durante la preñez, una parte del consumo de energía metabolizable debe destinarse a energía neta de gestación, (ENg) con su correspondiente incremento calórico (ICg). Se calculan con la formula [56]:

$$EMC = ENm + ICm + ENpl + ICpl + ENg + ICg + ENgp + ICgp + ENcc + ICcc + ENrt + ICrt$$

El animal preñado requiere energía para mantención y para desarrollar el feto. La energía se almacena en el feto, en las membranas asociadas y en los tejidos acumulados en el útero, para la síntesis relacionada con su producción. Esta energía, almacenada diariamente en el útero y su contenido, aumenta exponencialmente a lo largo de la preñez y es de considerable significancia en las etapas finales. Para los bovinos, el depósito diario de energía (Ed) puede estimarse con la siguiente ecuación:

$$Ed = 0.00717e^{0.0174t} \quad [68]$$

donde:

Ed = energía depositada en el útero, Mcal/día  
t = días desde la concepción

El incremento calórico de los animales preñados (ICg) es mayor que lo esperado para animales no preñados con pesos similares. Este incremento de gestación se puede estimar mediante la función:

$$ICg = 0.216e^{0.01t} \quad [69]$$

donde:

ICg = Incremento calórico de gestación, Mcal/día

Aproximadamente el 50% de ICg se debe a los procesos que generan el feto y las estructuras asociadas. El resto se debe a la energía usada para la mantención del feto y el aumento del catabolismo de ayuno materno durante la gestación.

Así, el requerimiento de EM para crecimiento del feto y estructuras asociadas será la suma de Ed y de la mitad de ICg:

$$EM \text{ crecimiento del feto} = Ed + \frac{ICg}{2} \quad [70]$$

La energía para el feto y para el aumento en el requerimiento de mantención de la madre puede asumirse que proviene de la EM de la dieta; es decir, con una eficiencia de 0.72.

Por lo tanto, el requerimiento de EM adicional para gestación será:

$$EM \text{ adicional} = Ed + \frac{ICg}{2} + \frac{ICg}{2(0.72)} \quad [71]$$

El valor para esta energía adicional se obtiene de la siguiente ecuación:

$$Ed + 1.19 ICg = 0.27 e^{0.0106t} (\text{Mcal/día}) \quad [72]$$

Por lo tanto, el requerimiento de energía metabolizable para gestación, independiente del requerimiento de mantención y cambio de peso, se puede calcular de la siguiente forma:

$$EM \text{ gestación} = 0.27 \cdot e^{0.0106t} \quad [73]$$

donde:

EM gestación = energía metabolizable requerida para gestación, Mcal/día  
t = número de días de gestación

*Ejemplo:*

Requerimiento de EM gestación para una vaca con 210 días de preñez.

$$\begin{aligned} EM \text{ gestación} &= 0.27e^{0.0106(210)} \\ &= 2.50 \text{ Mcal/día} \end{aligned}$$

En los primeros cinco meses de gestación el requerimiento de gestación no llega a afectar en más de 1 Mcal la EMm.

*Ejemplo:*

Calcular el requerimiento energético diario de una vaca de 650 kg con 120 días de lactancia, 2 meses de preñez y produciendo 15 kg de leche con 3% de materia grasa y 8.5% de sólidos no grasos.

Por encontrarse el animal en su cuarto mes de lactancia, tiene una ganancia de peso de 330 g/día.

$$\begin{aligned}
 \text{Req. Total} &= \text{EMm} + \text{EM gestación} + \text{EMpl} \\
 \text{EMm} &= 135 (650^{0.75}) \\
 &= \frac{17.378}{1000} = 17.38 \text{ Mcal} \\
 \text{EMgp} &= 8.228 (0.33) = 2.715 \\
 \text{EM gest.} &= 0.27(e^{0.0106(60)}) = 0.510 \\
 \text{EM pl} &= 1.7 \cdot \text{VE}_{\text{leche}} \cdot 15 \\
 \text{VE}_{\text{leche}} &= (9.22 \cdot 30) + (4.85 \cdot 85) \\
 &= \frac{688.85}{1000} \\
 \text{EMpl} &= 1.7 \cdot 0.68885 \cdot 15 = 17.565 \\
 \text{Total} &= \underline{\underline{38.17 \text{ Mcal/día}}}
 \end{aligned}$$

#### d. Límites de consumo en vacas lecheras estabuladas

La formulación de raciones para vacas lecheras requiere de la estimación del consumo probable de materia seca, bajo las condiciones en que se esté estabulando a los animales.

El consumo está influenciado por el peso del animal y, en alguna medida, por la producción de leche y la etapa de la lactancia, además de un sinnúmero de propiedades de los alimentos, como por ejemplo, la digestibilidad, el procesamiento y los métodos de conservación de los forrajes, así como el sistema de alimentación y el tiempo de alimentación. La siguiente ecuación ha permitido estimar el consumo en vacas a la mitad y al final de la preñez, alimentadas con dietas mixtas:

$$\text{CMS} = 0.028 W + 0.1 PL \quad [74]$$

donde:

$$\begin{aligned}
 \text{CMS} &= \text{consumo de materia seca, kg} \\
 W &= \text{peso vivo, kg} \\
 PL &= \text{producción de leche, kg/día}
 \end{aligned}$$

Cabe hacer notar, que al inicio de la lactancia (primeras 10 semanas) el consumo es menor, probablemente de 2 a 3 kg por día, que los valores derivados de la ecuación, debido al fenómeno de inapetencia post-parto.

Estimaciones del consumo probable de materia seca en vacas de diferentes pesos y produciendo diferentes cantidades de leche, se presentan en el Cuadro 23.

Peso vivo kg	Producción de leche, kg/día							
	5	10	15	20	25	30	35	40
350	10.3	10.8	11.3	11.8	12.3	12.8		
400	11.7	12.2	12.7	13.2	13.7	14.2		
450	13.1	13.6	14.1	14.6	15.1	15.6	16.1	
500	14.5	15.0	15.5	16.0	16.5	17.0	17.5	
550	15.9	16.4	16.9	17.4	17.9	18.4	18.9	19.4
600	17.3	17.8	18.3	18.8	19.3	19.8	20.3	20.8
650	18.7	19.2	19.7	20.2	20.7	21.2	21.7	22.2
700	20.1	20.6	21.1	21.6	22.1	22.6	23.1	23.6

<sup>1</sup> Utilizando la ecuación [74]

Una ración para vacas es adecuada cuando satisface los requerimientos de mantención y de producción de leche a cierto nivel establecido. Si existe una diferencia positiva entre la energía metabolizable para producción y la energía metabolizable requerida para una determinada producción de leche, se puede interpretar como un cambio probable en el peso vivo de los animales.

*Ejemplo:*

Una vaquilla Holstein al final de la lactancia pesa 500 kg y tiene una producción de 10 kg de leche. Se está alimentando con una ración con las siguientes características:

- 3 kg heno (85% MS, 1.91 Mcal/kg MS)
- 30 kg maíz (25% MS, 2.39 Mcal/kg MS)
- 3 kg concentrado (86% MS, 2.987 Mcal/kg MS)

	Consumo diario	
	Materia seca, kg	Energía metabolizable, Mcal
Heno	2.55	4.87
Maíz	7.50	17.92
Concentrado	2.58	7.72
<b>Total</b>	<b>12.63</b>	<b>30.51</b>

Luego,

$$\begin{aligned}
 \text{EMm} &= 120 \cdot 500^{0.75} \\
 &= \frac{12688.45}{1000} &= 12.69 \text{ Mcal} \\
 \text{EM destinable a producción} &= 30.51 - 12.69 &= 17.82 \text{ Mcal} \\
 \text{EMpl} &= 1.7 \cdot 10 \cdot 739.8 \text{ (Cuadro 22)} \\
 &= \frac{12576.6}{1000} &= 12.58 \text{ Mcal}
 \end{aligned}$$

La diferencia entre la energía metabolizable disponible para producción (17.82 Mcal) y el requerimiento de EMpl (12.58 Mcal) estará disponible para ganancia de peso (5.24 Mcal). Si se asume que la energía metabolizable de la ganancia de peso es 8.228 Mcal/kg, entonces se puede concluir que la vaquilla es capaz de ganar 0.637 kg/día.

*Ejemplo:*

Se espera que una vaca Ayrshire de 500 kg produzca 25 kg de leche, con una pérdida de peso no mayor a 0.5 kg/día (50 días de lactancia). La composición láctea esperada es 38 g de materia grasa y 89 g de sólidos no grasos por kilogramo de leche.

Se dispone de ensilaje de pasto (30% MS y 2.15 Mcal/kg MS), "soiling" de avena Vicia (20% MS y 2.5 Mcal/kg MS) y concentrado de lechería (90% MS y 3.2 Mcal/kg MS).

$$\begin{aligned}
 &\text{Consumo esperado de MS} &= 0.028 W + 0.1 PL \\
 & &= 0.028 \cdot 500 + 0.1 \cdot 25 \\
 & &= 16.5 \text{ kg MS} \\
 \text{EMm} &= \frac{153 \cdot 500^{0.75}}{1000} &= 16.18 \text{ Mcal} \\
 \text{VE}_{\text{leche}} &= (9.22 \cdot 38) + (4.85 \cdot 89) \\
 &= 782.01 \text{ kcal/l} \\
 \text{EMpl} &= \frac{1.7 \cdot 782.01 \cdot 25}{1000} &= 33.235 \text{ Mcal} \\
 &\text{Contribución energética de la pérdida de peso:} \\
 \text{EM} &= 6.32 \text{ Mcal/kg} \cdot 0.5 &= 3.16 \text{ Mcal} \\
 & & \text{-----} \\
 \text{Total necesario a aportar} & & 46.25 \text{ Mcal}
 \end{aligned}$$

Para satisfacer este requerimiento de 46.25 Mcal se formularon dos raciones tentativas:

Ración 1		
Composición	Consumo de MS, kg	EM, Mcal
20.0 kg ensilaje	6.0	12.6
9.0 kg concentrado	8.1	25.92
15.5 kg "soiling" avena Vicia	17.2	7.75
<b>Total</b>	<b>17.2</b>	<b>46.27</b>

Con esta ración se suple la demanda de energía de la vaca; sin embargo, el consumo de materia seca se había fijado en 16.5 kg, por lo tanto, esta ración no va a ser consumida completamente.

Si se reduce la cantidad de ensilaje en 2 kg/día, se obtiene la siguiente ración y consumo:

Ración 2		
Composición	Consumo de MS, kg	EM, Mcal
18.0 kg ensilaje	5.4	11.34
9.0 kg concentrado	8.1	25.92
15.5 kg "soiling" avena Vicia	3.1	7.75
<b>Total</b>	<b>16.6</b>	<b>45.01</b>

La EM total consumida está cerca del mínimo de kcal aceptado para una pérdida de peso de 0.5 kg/día. Debe recordarse, en todo caso, que la predicción del rendimiento de un animal lechero a partir de los datos de entrada de energía es difícil, puesto que la vaca tiene dos alternativas de salida: leche y ganancia de peso (o pérdida). La proporción en que la energía de producción se distribuye entre peso vivo y leche es difícil de cuantificar. Son muchos los factores que influyen en esta distribución, como por ejemplo, el nivel de alimentación al inicio de la lactancia, la etapa de la lactancia y la naturaleza de la dieta. Si se conoce el consumo de la dieta y la producción de leche de una vaca, los cálculos indicarán si el requerimiento energético de la vaca ha sido adecuadamente estimado.

#### e. Formulación rápida de raciones con base en forrajes y concentrados

En el caso de sistemas con dos componentes alimenticios, como por ejemplo, forraje y concentrado, la concentración de energía de la ración (Mcal EM/kg MS) puede usarse como un método para calcular raciones, en el cual se incluyen el consumo máximo de materia seca y los requerimientos energéticos.

Por definición, la concentración calórica de la ración [EM] es igual a:

$$[EM] \text{ (Mcal/kg)} = \frac{\text{Requerimiento EM}}{\text{Consumo MS}} \quad [75]$$

Con base en esta ecuación, se puede construir una tabla con los valores de concentraciones calóricas mínimas de [EM] en la dieta de distintas razas de vacas (Cuadro 24).

Cuadro 24. Concentración energética mínima en la dieta de vacas lecheras, Mcal EM/kg MS							
Variación de ganancia de peso, kg/día	Producción de leche, kg/día						
	5	10	15	20	25	30	35
<b>Jersey</b>							
- 0.5	(1.4) <sup>1</sup>	2.0	2.7	3.2	-	-	-
0.0	1.8	2.4	3.0	-	-	-	-
+ 0.5	2.2	2.8	3.4	-	-	-	-
<b>Ayrshire</b>							
- 0.5	(1.2)	1.6	2.0	2.3	2.7	3.0	-
0.0	1.5	1.9	2.2	2.6	2.9	3.2	-
+ 0.5	1.8	2.1	2.5	2.9	3.2	-	-
<b>Friesian</b>							
- 0.5	(1.1)	1.5	1.8	2.1	2.3	2.6	2.9
0.0	1.4	1.7	2.0	2.3	2.6	2.8	3.1
+ 0.5	1.6	1.9	2.2	2.5	2.8	3.0	-

<sup>1</sup> Los valores entre paréntesis son teóricos; el límite de consumo con forrajes de mala calidad hacen que la ración no sea factible.

*Ejemplo:*

Una vaca Holstein de 650 kg, produciendo 15 kg de leche, tiene un requerimiento de EM de 35.38 Mcal. Si sólo se dispone de dos alimentos: forraje (1.7 Mcal EM/kg) y concentrado de lechería (2.8 Mcal EM/kg), ¿cuánto concentrado se debe suministrar a la vaca?

$$\begin{aligned}
 \text{Consumo MS} &= 0.028 W + 0.1 \cdot 15 \\
 &= 19.7 \text{ kg} \\
 \text{Concentración calórica} &= 35.38 \text{ Mcal}/19.7 \text{ kg} \\
 &= 1.796 \text{ Mcal/kg} \\
 &= \text{Consumo de forraje (F) +} \\
 &\quad \text{Consumo de concentrado (C)}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{En total a consumir} &= (F \cdot \text{EMF}) + (C \cdot \text{EMC}) &= \text{Req. EM} \\
 35.38 &= (1.7 \cdot F) + (2.8 \cdot C) \\
 F + C &= 19.7 \text{ kg} \\
 F &= 19.7 - C \\
 35.38 &= 1.7 (19.7 - C) + (2.8 \cdot C) \\
 35.38 &= 33.49 - 1.7 C + 2.8 C \\
 C &= \frac{35.38 - 33.49}{1.1} = 1.72 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

Al animal debe suministrársele 1.72 kg de concentrado para cumplir con los requerimientos y concentración calórica de la ración. El forraje a consumir será:

$$F = 19.7 - C$$

$$F = 17.98 \text{ kg}$$

El animal satisface su requerimiento de EM cuando se le ofrece 18 kg de forraje y 2 kg de concentrado.

#### f. Alimentando la vaca lechera estabulada

(1) *Significancia de los cambios de peso vivo.* Después de parir, una típica vaquilla Friesian de dos años de edad debería pesar 450 kg aproximadamente, comparado con el peso adulto a la cuarta lactancia de unos 600 kg. Por lo tanto, el requerimiento energético necesario para el crecimiento hasta el peso adulto (de aproximadamente 40 kg por lactancia), debe considerarse dentro de los programas de alimentación.

Al parto, la vaca pierde unos 60 a 70 kg de peso vivo (40 a 50 kg debido al ternero y el resto a los tejidos asociados). Frecuentemente, durante las primeras semanas de lactancia la vaca pierde peso, la magnitud de lo cual depende de las reservas de grasa que contribuyen a suplir energía para sostener la lactancia. Esta pérdida inicial de peso normalmente se recupera en el segundo y tercer tercio de la lactancia, período en el cual predomina el anabolismo de gestación, lo que hace más fácil la recuperación del peso.

La gran diferencia entre una vaca Holando Americano de alta producción de leche y una vaca Hereford es, entre otras cosas, la capacidad para movilizar tejido de su cuerpo para producir leche. Se estima que un animal lechero puede movilizar hasta un 10% de su peso durante el primer tercio de lactancia. Las razas de doble propósito movilizan hasta un 5% durante los primeros 70 días de lactancia y las razas de carne hasta un 2% durante los primeros 50 días de lactancia.

Cuando la vaca moviliza niveles mayores a los planteados, se producen mayores incidencias de acetonemia, baja el contenido de sólidos no grasos en la leche, se produce infertilidad no específica, así como una reducción en la producción al pico de la lactancia y en el rendimiento total de dicha lactancia.

En términos de ganancia o pérdida de peso, se sugiere el siguiente patrón, que podría ser típico de una buena alimentación y altos rendimientos en vacas (Cuadro 25).

Cuadro 25. Patrón de cambio de peso deseable durante la lactancia.			
No. semanas	Cambio peso kg/día	Cambio durante 10 semanas, kg	Efecto neto en el peso, kg
0 - 10	- 0.5	- 35	- 35
10 - 20	0.0	0	- 35
20 - 30	+ 0.5	+ 35	0
30 - 40	+ 0.5	+ 35	+ 35
40 - 52	+ 0.75	+ 63	+ 98

Es necesario entonces preocuparse del cambio de peso de las vacas, especialmente de las vaquillas. Este cambio puede tener tres orígenes: crecimiento en animales jóvenes, cambios de peso por crecimiento o nacimiento del ternero y movilización de tejido para producción de leche en vacas adultas.

(2) *Formulación de raciones para varias etapas de lactancia.*

(a) Las primeras 10 semanas (lactación temprana)

Parte de este período corresponde al primer tercio de la lactancia, en el cual se produce el pico de producción y el 45% de la producción de la lactancia completa.

El punto máximo de la lactancia ( $Y$ ) está relacionado con el rendimiento a la segunda semana ( $Y_2$ ) y se puede calcular mediante la fórmula:

$$Y \text{ (kg/día)} = 1.1 Y_2 \quad [76]$$

*Ejemplo:*

Si una vaca produce 18 kg/día durante la segunda semana de lactancia entonces su punto máximo de producción será:

$$Y = 1.1 \cdot 18 = 19.8 \text{ kg/día}$$

El punto máximo de la lactancia también puede estimarse dividiendo la lactancia anterior, corregida a 305 días, por 200.

$$Y \text{ (kg/día)} = \text{Rendimiento de lactancia anterior (kg)}/200 \quad [77]$$

*Ejemplo:*

Si una vaca en su lactancia anterior produjo 5500 kg de leche corregida a 305 días, entonces rendirá en el pico de producción:

$$Y = \frac{5.500 \text{ kg}}{200} = 27.5 \text{ kg de leche}$$

El consumo probable en este período de lactancia temprana será igual al consumo de materia seca, corregido por un factor de lactancia temprana (2.5). En este caso el consumo de materia seca será igual a:

$$\text{Consumo MS} = 0.028 W + 0.1 Y - 2.5 \quad [78]$$

donde:

W = peso de la vaca, kg  
Y = pico de producción, kg de leche/día

(b) Semanas 10 a 20 (mitad de lactancia)

En este período la vaca debería haber recuperado su peso y las pérdidas de peso deberían ser nulas; además, el consumo de materia seca debe ser máximo (Cuadro 23). Este período corresponde al final del primer tercio de lactancia y al comienzo del segundo tercio donde se produce un 32% de la lactancia total.

#### g. Algunos usos de la bioenergética para fijar sistemas de alimentación de vacas lecheras

Previo al establecimiento de un sistema de alimentación, hay que considerar una serie de factores como por ejemplo, el costo de la alimentación y el nivel de consumo.

Bajo el supuesto de que la alimentación en rumiantes no debe sobrepasar el 60 % de los ingresos brutos de la lechería, se tiene que el costo máximo de la alimentación (CMA) será:

$$\text{CMA} = 0.6 \text{PL} \cdot \text{Precio} \quad [79]$$

donde:

CMA = costo máximo de alimentación, H  
PL = producción de leche, l  
Precio = precio de venta de la leche, \$/l

Por lo tanto, el precio máximo a pagar en alimentación depende de la producción de leche y del precio de ésta.

*Ejemplo:*

Una vaca Friesian de 650 kg, produce 10 litros de leche/día y el precio del litro es de \$5. ¿Cuál es el precio máximo por kg de MS consumida que puede pagarse para la alimentación de ese animal?

$$\begin{aligned} \text{CMA} &= 10 \cdot 5 \cdot 0.6 \\ &= \$30 \end{aligned}$$

asumiendo que,

$$\begin{aligned} \text{Consumo MS} &= 0.028 W + 0.1 \text{ PL} \\ &= 0.028 \cdot 650 + 0.1 \cdot 10 \\ &= 19.2 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Precio} \\ \text{máximo/kg} &= 30/19.2 \\ &= \$1.56/\text{kg} \end{aligned}$$

El precio máximo a pagar, a ese nivel de producción, es de \$1.56/kg. Este precio corresponde a una concentración calórica del pasto de 1.43 Mcal/kg y se calcula de la siguiente manera:

$$[EM] = \frac{\text{Req. EM}}{\text{Consumo MS}} = \frac{27.45}{19.2} = 1.43$$

Con base en el ejercicio anterior, se puede construir un cuadro que indique el precio a pagar por el alimento, para distintos niveles de producción de leche (suponiendo que el animal no cambia de peso) (Cuadro 26).

Cuadro 26. Precio máximo a pagar por el alimento ofrecido a vacas lecheras, \$/kg							
Producción de leche, l							
Variable	5	10	15	20	25	30	35
Precio, \$/l	0.87	1.74	2.60	3.50	4.34	5.22	6.08
[EM] Mcal/kg	1.22	1.56	1.87	2.16	2.44	2.70	2.95
	←—————→ (a)		←—————→ (b)		←—————→ concentrado		

- (a) pradera normal del trópico  
(b) pradera de muy buena calidad

Producciones de 5 a 20 litros, se alcanzan a base de forrajes, aumentándose la producción a medida que se aumenta la concentración energética del forraje. Sobre los 20 litros los requerimientos no pueden cubrirse sólo con consumo de forraje y se debe recurrir al uso de concentrados.

La variación de la concentración calórica del alimento, para los distintos niveles de producción, se debe fundamentalmente al aumento en el requerimiento de energía metabolizable destinable a producción de leche en su término de energía neta de producción.

En general, en el trópico, las praderas tienen una menor concentración calórica (1.5 - 1.7 Mcal/kg MS); esto es debido a que, por las condiciones climáticas, el forraje se lignifica con mayor rapidez. Por consiguiente, la producción de leche con forrajes es menor que en zonas templadas y si se desea elevar la producción será necesario suplementar con concentrado.

La pregunta es ¿hasta dónde conviene económicamente aportar concentrado para producir leche?. La respuesta debería estar dada por la diferencia entre lo que le cueste el kg de MS de forraje y el precio máximo a pagar por kg de alimento (teniendo en cuenta las concentraciones energéticas del forraje y del concentrado).

Otro de los puntos importantes que se debe considerar para lograr una acertada respuesta, especialmente en vacas a pastoreo, es la estimación adecuada del nivel de consumo de forraje, la capacidad de consumo de las vacas a través del ciclo gestación-lactación, y las diferencias de consumo que puedan existir para diferentes sistemas de manejo y tipo de pradera.

## 6. USO DE ENERGÍA METABOLIZABLE EN SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE CARNE

El sistema de EM para producción de carne es conveniente para predecir ganancias de peso, a partir de un consumo de energía metabolizable y concentración energética o densidad calórica de la ración, conocidos. También puede servir para la formulación de raciones para un determinado nivel de rendimiento.

La producción probable, a partir de cierto consumo de EM, debe ser considerada en dos etapas separadas: en primer lugar, el requerimiento de mantención, y después, la energía disponible para ganancia de peso.

### a. Requerimiento de energía para mantención

El requerimiento de mantención (EMm), expresado en kcal/día, se determina a partir de la ecuación [43] de Lofgreen y Garrett (1968):

$$EMm = 80 W^{0.75}/0.72$$

### b. Requerimiento de energía para ganancia de peso

Del consumo de EM (CEM), el animal debe destinar parte de la energía para cubrir sus gastos de mantención y el excedente lo usará para producción. Si se toma el caso de los novillos estabulados, en zona termoneutral, la función EM destinable a producción corresponderá a ganancia de peso y la función [56] queda como sigue:

$$EMC = ENm + ICm + ICg + ENcc + ICcc + ENrt + ICrt + ENgp + ICgp \quad [80]$$

La energía metabolizable requerida para una ganancia de peso determinada es el contenido de energía de la ganancia (energía neta de la ganancia de peso, ENgp), corregido por la eficiencia de uso del consumo de energía metabolizable en ganancia de peso (Kgp).

McDonald (1973) señala que la energía retenida por unidad de ganancia (ENgp) aumenta a medida que el animal madura y, que animales de engorda rápida, a un determinado peso, retienen más energía por unidad de ganancia que aquellos que crecen a ritmo más lento. Esto se debe a que decrece la cantidad de agua corporal, mientras la grasa aumenta.

Gough (1975) desarrolló una metodología de cálculo de la energía neta de la ganancia de peso, para novillos estabulados en función de la ganancia de peso (GP) y del valor calórico de esa ganancia (VCgp). A su vez, VCgp es función lineal multivariada del peso.

$$VCgp = 1.5 + 0.30 ENgp + 0.0045 W \quad [81]$$

donde:

VCgp = valor calórico de la ganancia de peso, Mcal/kg  
 ENgp = energía neta de la ganancia de peso, Mcal  
 W = peso del novillo, kg

Dado que,

$$EM_{gp} = GP \cdot VC_{gp} \quad [82]$$

donde:

EN<sub>gp</sub> = energía neta para ganancia de peso, Mcal  
 GP = ganancia de peso, kg  
 VC<sub>gp</sub> = valor calórico de la ganancia, Mcal/kg

Uniando las relaciones anteriores se tiene que:

$$\begin{aligned} EN_{gp} &= GP(1.5 + 0.30 EN_{gp} + 0.0045W) \\ EN_{gp} &= 1.5GP + 0.3 EN_{gp}(GP) + 0.0045 W(GP) \end{aligned}$$

de donde:

$$EN_{gp} (1-0.3GP) = 1.5GP + 0.0045 W (GP)$$

y entonces:

$$EN_{gp} = \frac{GP (1.5 + 0.0045 W)}{1-0.30GP} \quad [83]$$

Lofgreen y Garrett (1968) presentaron otra ecuación para determinar la EN requerida para cualquier ganancia de peso:

$$EN_{gp} = (57.72GP + 6.84GP^2) W^{0.75}/1000 \quad [84]$$

Por otra parte, Winchester y Hendricks (1953) desarrollaron una ecuación combinada de requerimiento de mantención y de producción, a partir de estudios de crecimiento en novillos, expresada en kilogramos de elementos nutritivos digestibles totales (ENDT):

$$EN = 0.0553 W^{0.66} (1 + 0.805GP) 0.45359 \quad [85]$$

donde:

EN = energía neta para mantención y producción, kg ENDT

La expresión  $0.0553 W^{0.66}$  representa el requerimiento de mantención, la expresión entre paréntesis el requerimiento de producción a una ganancia específica y la constante 0.45359 es el factor de conversión de libras a kilogramos.

Con una metodología similar, Garrett *et al.* (1959) desarrollaron las siguientes ecuaciones para determinar el requerimiento de mantención y de producción en novillos:

$$EN \text{ (kg ENDT)} = 0.036 W^{0.75} (1 + 0.57 GP) 0.45359 \quad [86]$$

$$ED_{gp} \text{ (kg ENDT)} = 76 W^{0.75} (1 + 0.58 GP) 0.45359 \quad [87]$$

$$EM_{gp} \text{ (kg ENDT)} = 62 W^{0.75} (1 + 0.60 GP) 0.45359 \quad [88]$$

$$EN_{gp} \text{ (kg ENDT)} = 35 W^{0.75} (1 + 0.45 GP) 0.45359 \quad [89]$$

donde:

- W = peso del novillo, kg
- GP = ganancia de peso, kg

Los valores de energía neta de ganancia de peso, para un determinado peso y ganancia de peso, difieren entre sí, al aplicar las distintas ecuaciones.

Catrileo (1981) presenta otra ecuación que diferencia entre pérdida y ganancia de peso según la concentración calórica y la disponibilidad de MS. Los valores generados por esta ecuación coinciden con los presentados por Gough (1975) y Lofgreen y Garrett (1968). La Fig. 9 muestra la relación para novillos en crecimiento con ganancias diarias de 0.5, 1.0 y 1.5 kg.

La eficiencia de utilización de la energía metabolizable de la EN para ganancia de peso (Kgp), depende de la calidad del alimento suministrado, específicamente de la concentración energética (q) o densidad calórica [EM] de éste (ver Cuadro 12).

$$K_{gp} = 0.81q + 3.0 \quad [64]$$

ó, ignorando el valor 3.0 para propósitos de simplificación:

$$K_{gp} = 18.4 [EM]$$

$$K_{gp} = \frac{18.4}{100} \cdot \frac{EM \text{ requerida}}{\text{consumo MS}} \quad [90]$$

El rango de variación del Kgp es de 0.3 a 0.6 con concentraciones calóricas que fluctúan entre 1.67 y 3.35 Mcal/kg MS (Cuadro 12).

Al expresar la ganancia de peso en términos de la energía metabolizable requerida para dicha ganancia, la fórmula será:

$$EM_{gp} = \frac{EN_{gp}}{0.18 [EM]} \cdot 1.05 \quad [91]$$

El factor 1.05 se incluye para otorgar un margen de seguridad del 5%.

Ejemplo:

Calcule el requerimiento de EM de un novillo de 400 kg de peso que está ganando 0.75 kg/día, con un alimento de concentración calórica igual a 2.4 Mcal/kg. (Utilice la ecuación [43] de Lofgreen y Garrett).

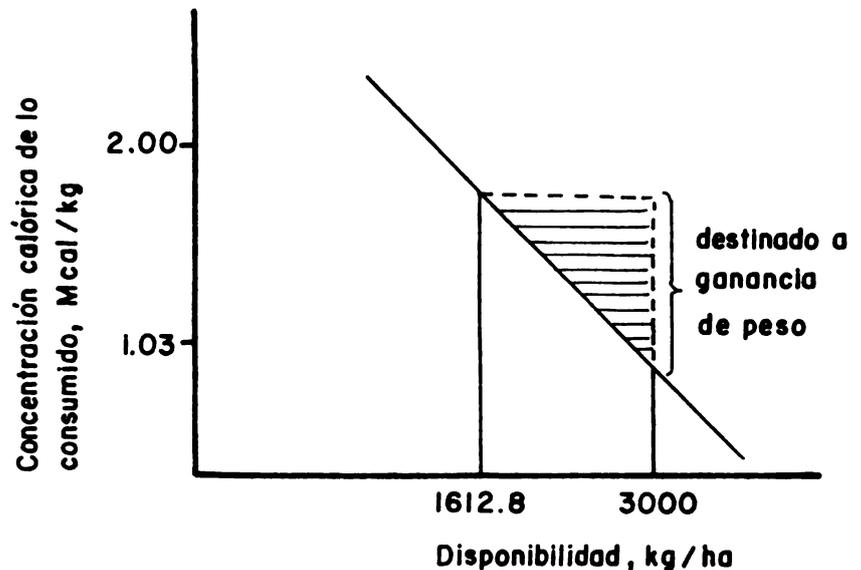


Fig. 9 Ilustración de la relación lineal entre disponibilidad de forraje y la concentración calórica en el forraje consumido, para mantenimiento (línea diagonal), cualquier incremento en concentración calórica, a una disponibilidad dada, resultará en ganancia de peso (área sombreada), similarmente si la disponibilidad aumenta a un mismo valor de concentración calórica

$$\begin{aligned}
 \text{EMm} &= 80 \cdot 400^{0.75} / 0.72 \\
 &= 9938.08 / 1000 &= 9.94 \text{ Mcal} \\
 \text{ENgp} &= \frac{0.75[1.5 + (0.0045)(400)]}{1 - (0.3)(0.75)} \\
 &= \frac{2.475}{0.775} &= 3.193 \\
 \text{Kgp} &= 0.18 \cdot 2.4 \\
 &= 0.432 \\
 \text{EMgp} &= \frac{3.193}{0.432} &= \underline{7.391 \text{ Mcal}} \\
 \text{Total} &&= 17.331 \text{ Mcal}
 \end{aligned}$$

Por lo tanto, el novillo requiere 17.331 Mcal de EM para ganar 0.75 kg/día. Si se incluye el margen de seguridad de 5%, entonces el requerimiento sería de 18.198 Mcal.

En el Cuadro 27 se muestra el requerimiento de EM para crecimiento y ganancia de peso en animales de carne, desde los 100 a los 500 kg, con una ganancia máxima de 1.5 kg/día.

Cuadro 27. Requerimiento de EM para crecimiento y engorda <sup>1</sup> , Mcal/animal/día								
Peso kg	[EM] Mcal/kg MS	Ganancia de peso, kg/día						
		0	0.25	0.5	0.75	1.0	1.25	1.5
100	1.91	3.513	5.046					
	3.34	3.513	4.389	5.516	6.808	8.378		
150	1.91	4.672	6.557					
	3.34	4.672	5.788	6.996	8.438	10.188	12.359	
200	1.91	5.909	7.890					
	3.34	5.909	7.042	8.374	9.956	11.897	14.292	17.340
300	1.91	8.009	10.361	13.129				
	3.34	8.009	9.354	10.937	12.826	15.119	17.964	21.584
400	1.91	9.938	12.662	15.866				
	3.34	9.938	11.495	13.328	15.515	18.171	21.465	25.656
500	1.91	11.748	14.843	18.485				
	3.34	11.748	13.518	15.600	18.086	21.104	24.847	29.610

<sup>1</sup> Basado en las siguientes ecuaciones:

$$\text{EMm} = 80 W^{0.75} / (0.72)(100)$$

$$\text{ENgp} = \text{GP} (1.5 + 0.0045W) / (1 - 0.3\text{GP})$$

$$\text{Kgp} = 0.18 [\text{EM}]$$

Margen de seguridad de 5%

El contenido del Cuadro 27 indica que los requerimientos de EM para animales de carne varían de acuerdo con la concentración energética de la ración suministrada, dada una determinada tasa de ganancia. La EM de los alimentos fibrosos, como en el caso de la paja, donde su concentración calórica es igual a 1.91 Mcal/kg MS, son usados con menor eficiencia para ganancia de peso que granos de cereales, tales como cebada ([EM] = 3.34 Mcal/kg). Esta es una consecuencia del efecto de la [EM] en la eficiencia de utilización de la EM para producción.

### c. Predicción de ganancia de peso

La energía metabolizable disponible para ganancia de peso se puede calcular restando al consumo total de EM la energía metabolizable destinada a mantención (EMm). A partir de la energía metabolizable disponible para ganancia de peso se puede calcular la energía neta de ganancia de peso, si es que se conoce el valor de Kgp.

La ganancia de peso se puede calcular a partir de la ecuación de EN de ganancia de peso [83]:

$$GP(\text{kg/día}) = \frac{EN_{gp}}{(1.5 + 0.30 EN_{gp} + 0.0045 W)} \quad [92]$$

Por lo tanto, la ganancia de peso es función de la EN<sub>gp</sub> y del peso del animal.

*Ejemplo:*

Calcular la ganancia de peso de un novillo de 400 kg. El animal está consumiendo 7.6 kg de forraje con una Cc de 2.4 Mcal/kg MS.

$$\begin{aligned} \text{EMm} &= \frac{80 \cdot 400^{0.75}}{(0.72 \cdot 1000)} = 9.938 \text{ Mcal} \\ \text{EM disponible para ganancia} &= (7.6 \cdot 2.4) - 9.938 \\ &= 8.302 \text{ Mcal} \\ \text{Kgp} &= 0.18 \cdot 2.4 = 0.432 \\ \text{EN}_{gp} &= 8.302 \cdot 0.432 = 3.586 \text{ Mcal} \end{aligned}$$

dado que:

$$\begin{aligned} GP &= \frac{EN_{gp}}{1.5 + 0.30 EN_{gp} + 0.0045 W} \\ GP &= \frac{3.586}{1.5 + (0.30 \cdot 3.586) + (0.0045 \cdot 400)} \\ GP &= \frac{3.586}{4.376} = 0.82 \text{ kg/día} \end{aligned}$$

En el Cuadro 28 se muestran las ganancias de peso a partir de diferentes niveles de EN, para distintos pesos vivos.

**Cuadro 28. Ganancia de peso esperada para novillos de diferentes pesos y con distintos niveles de ENgp<sup>1</sup>, kg/día**

ENgp Mcal	Peso vivo, kg							
	100	150	200	250	300	400	500	600
0.48	0.23	0.21	0.19	0.17	0.16	0.14	0.12	0.11
0.95	0.43	0.39	0.35	0.33	0.30	0.26	0.24	0.21
1.43	0.60	0.55	0.51	0.47	0.44	0.38	0.34	0.31
1.91	0.76	0.70	0.64	0.60	0.56	0.49	0.44	0.40
2.39	0.90	0.83	0.77	0.72	0.67	0.59	0.54	0.49
3.82			1.08	1.01	0.96	0.86	0.78	0.71
4.78				1.18	1.12	1.01	0.92	0.85
7.17						1.32	1.22	1.13
9.56							1.44	1.35

<sup>1</sup> Con base en la ecuación  $GP = ENgp / (1.5 + 0.3ENgp + 0.0045W)$

#### d. Formulación de raciones para un nivel de producción deseado

El valor de energía almacenada (ENgp) para una tasa de ganancia de peso particular permite el cálculo de la EM requerida para producción, en el rango de concentraciones calóricas de los alimentos disponibles.

Una vez que se ha determinado el consumo de EM total, la energía neta para producción y la EMm, la formulación óptima de una ración con varios componentes será aquella en que la diferencia entre el aporte total de energía metabolizable para producción de la dieta, menos el requerimiento de mantención, se asemeje lo más posible a la ENgp. Este método de cálculo iterativo es lento y laborioso, dado que debe intentarse varias soluciones para obtener una, que se ajuste mejor a la ENgp.

Existe otro método rápido de formulación de raciones que da la respuesta exacta, y que supone que el consumo del animal ya fue determinado. Por definición, el consumo de EM es igual al consumo de MS (CMS) por la concentración calórica del alimento.

$$\text{Consumo EM} = \text{CMS [EM]} \quad [93]$$

Idealmente, la EM de la ración debería ser igual al requerimiento de EM para producción, más el requerimiento de mantención. El requerimiento de mantención EMm se calcula de la función [43]:

$$EMm = 80 W^{0.75} / 0.72$$

La energía metabolizable de producción se puede determinar a partir de la función [91]:

$$EM_{gp} = \frac{EN_{gp} \cdot 1.05}{0.18 [EM]}$$

$$EM_{gp} = \frac{5.83 EN_g}{[EM]}$$

$$EM \text{ total} = [43] + [94]$$

o bien:

$$CMS [EM] = [43] + [94]$$

Todos estos términos están relacionados ya sea con el peso o con la ganancia de peso. Los valores de consumo de materia seca determinados por Roy (1959), citado por HMSO (1975), pueden usarse en este caso. La ecuación es de tipo cuadrática y de la siguiente forma:

$$Ax^2 + Bx + C = 0$$

donde:

x = concentración calórica

Por lo tanto, la ecuación de consumo será:

$$CMS [EM]^2 - EM_m [EM] - 5.83 EN_{gp} = 0$$

y la solución, usando la fórmula:

$$x = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

será la siguiente:

$$[EM] = \frac{EM_m + \sqrt{EM_m^2 - 23.32 CMS (EN_{gp})}}{2 CMS} \quad [95]$$

Con esta ecuación se puede calcular la concentración calórica exacta que satisfaga tanto el requerimiento de consumo de materia seca del animal, como las necesidades de EM para mantención y ganancia. Los valores calculados se muestran en el Cuadro 29.

<b>Cuadro 29. Concentración calórica mínima en dietas para vacunos de carne, Mcal/kg MS</b>							
Ganancia de peso kg/día	Peso, kg						
	100	150	200	250	300	400	500
0.0	(1.19)	(1.19)	(1.08)	(1.05)	(1.06)	(1.10)	(1.15)
0.1	(1.46)	(1.34)	(1.29)	(1.23)	(1.23)	(1.26)	(1.32)
0.3	1.87	1.69	(1.60)	(1.52)	(1.51)	(1.53)	1.59
0.5	2.22	1.99	1.88	1.77	1.75	1.77	1.83
0.8	2.61	2.41	2.26	2.13	2.09	2.11	2.17
1.0	3.02	2.69	2.52	2.36	2.32	2.34	2.40
1.3	3.53	3.14	2.93	2.74	2.16	2.70	2.77
1.5		3.46	3.23	3.02	2.95	2.97	3.04
Consumo MS, kg	2.94	4.26	5.48	7.62	9.36	10.70	11.65

( ) Valores teóricos, dado que el límite del consumo en forrajes pobres hacen que la concentración calórica no sea factible.

El uso del concepto de valores de concentración calórica mínima para raciones es la clave para la formulación de raciones simples en el sistema de energía metabolizable. Si la ración sólo consiste de dos componentes, por ejemplo, forraje y concentrado, la cantidad requerida de ambos alimentos puede ser calculada mediante la ecuación de consumo de forraje determinada para vacas de lechería.

Debe destacarse, en todo caso, que los valores de consumo aportados por Roy (1959), citado por HMSO (1975), corresponden a animales en condiciones de estabulación. Bajo condiciones de pastoreo, existen una serie de factores que estarían condicionando un nivel de consumo diferente.

#### e. Determinación de consumo en novillos en pastoreo

En condiciones de pastoreo, el consumo de materia seca está afectado por tres variables principales: las variables características del animal (peso y raza), la disponibilidad de forraje y el valor nutritivo del mismo (Kleiber 1961; Blaxter 1964; Conrad 1966; Marchi 1973).

Abreu (1975) propuso una ecuación que predice el consumo en función del peso y de la disponibilidad de forraje, para zonas templadas:

$$Y = 0.03 W (1 - e^{-0.00664D}) \quad [96]$$

donde:

Y = consumo de materia seca, kg/día  
D = disponibilidad de forraje, kg MS/día

Esta ecuación tiene como restricción que limita el consumo a un máximo de 3% de peso vivo y no considera el valor nutritivo del forraje.

Según Blaxter y Wilson (1963), la variabilidad entre individuos de un mismo peso puede alcanzar valores de 7.5% de dispersión de la media.

Con el propósito de simular esta variabilidad en el consumo, Catrileo (1981) describe una curva estocástica de distribución gaussiana, donde el consumo esperado está representado por la ecuación de Abreu (1975). De esta forma, el consumo de materia seca por animal será generado a partir de esta curva de distribución probabilística (Fig. 10), como lo demuestra la ecuación que la describe:

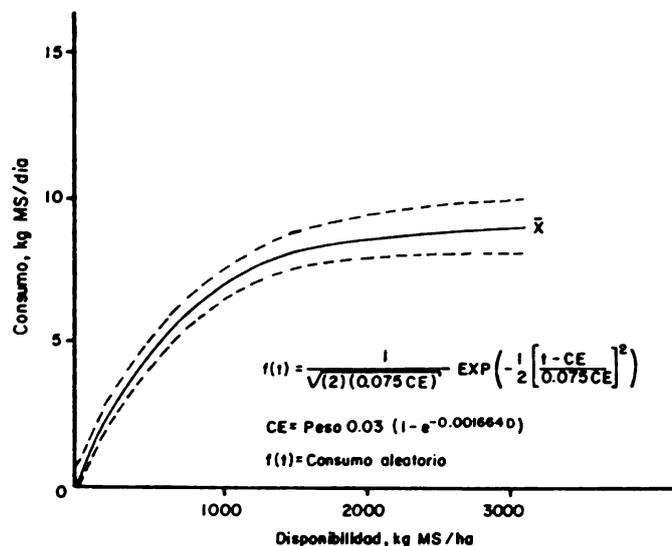


Fig. 10 Valor esperado del consumo de materia seca

$$f(t) = \frac{1}{\sqrt{2} (0.075 CE)} e^{-\frac{1}{2} \left[ \frac{t - CE}{0.075 CE} \right]^2} \quad [97]$$

donde:

- $f(t)$  = consumo, kg MS/día  
 $t$  = consumo aleatorio, kg/día  
 $CE$  = consumo esperado ( $\bar{Y}$ , en la ecuación [96])

## 7. REQUERIMIENTO DE ENERGÍA PARA COSTO DE COSECHA

Los animales en pastoreo requieren más energía para mantener un equilibrio energético corporal que la calculada a partir de su tamaño metabólico (Blaxter 1964), o la observada en animales similares pero mantenidos en confinamiento (Coop y Hill 1962; Coop 1962; Lambourne y Reardon 1963, Langlands *et al.* 1963a y b; todos citados por Paladines *et al.* 1987).

En animales bajo condiciones de pastoreo, el requerimiento energético total está compuesto por un requerimiento de mantención más un gasto energético adicional necesario para el trabajo de cosechar el alimento, el cual se ha definido como *costo de cosecha* (Cañas y Gastó 1974):

$$\begin{array}{l} \text{Requerimiento} \\ \text{energético de} \\ \text{mantención en} \\ \text{pastoreo} \end{array} = \begin{array}{l} \text{Requerimiento} \\ \text{energético de} \\ \text{mantención} \end{array} + \begin{array}{l} \text{Costo} \\ \text{de} \\ \text{cosecha} \end{array}$$

Según estos autores, existiría primero un costo energético de concentración de la energía, atribuido a la masa vegetal, con el propósito de aumentar la concentración energética que se compensaría con la mayor eficiencia y disponibilidad de ésta para el animal. En segundo lugar, está el costo de extracción de la cosecha y la concentración calórica de la cosecha. A mayor concentración calórica de la cosecha, menor será el costo de cosecha.

Desde el punto de vista de la termodinámica, el concepto de costo de cosecha es equivalente al de entropía ( $T\Delta S$ ), correspondiéndole  $\Delta F$  a la productividad neta del sistema.

Racionalmente, el costo de cosecha es función de las características intrínsecas y del comportamiento animal, de las características del forraje y del suelo, del valor nutritivo de la cosecha y de la interacción animal-planta.

Como una forma indirecta de determinar el costo de cosecha, se puede hacer un balance de la distribución de la energía consumida (EMC), de acuerdo a la siguiente expresión:

$$CEM = ENm + ICm + ENp + ICp + CC + RT \quad [98]$$

donde:

EMC	=	energía metabolizable consumida
ENm	=	energía neta de mantención
ICm	=	incremento calórico de mantención
ENp	=	energía neta de producción
ICp	=	incremento calórico de producción
CC	=	costo de cosecha
RT	=	energía de regulación térmica, con un 100% de eficiencia de transformación de energía a calor (IC=0)

El costo de cosecha (CC) en esta ecuación se ha independizado del requerimiento de energía neta de mantención, por ser un gasto adicional de energía cuando el animal está en libertad de moverse en la pradera.

A partir de esta función se puede despejar CC, como:

$$CC = EMC - (ENm + ICm + ENp + ICp + RT) \quad [99]$$

El consumo de energía metabolizable (CEM) es afectado por innumerables factores; sin embargo, Montgomery (1965), citado por Cañas y Gastó (1974), indicó que la concentración calórica es un buen estimador del consumo. En pastoreo, el concepto de concentración calórica puede entenderse como la cantidad de forraje (masa) que hay en una determinada superficie. Así, en un potrero puede haber 3000 kg MS/ha y el animal, para lograr su consumo, deberá gastar menos energía que en una pradera con disponibilidad de 1000 kg MS/ha.

Esta relación se corrobora con datos obtenidos a partir de animales sometidos a estabulación (CC=0), comparado con animales en pastoreo.

Al respecto, Blaxter (1974) indicó que los ovinos tenderían, en condiciones extremas, a aumentar su consumo en un 20% y habría un gasto mayor, por concepto de cosecha, que podría fluctuar entre 15% y 90% de requerimiento de mantención (Reid *et al.* 1980).

Cañas y Gastó (1974) estimaron que el costo de cosecha en ovinos y bovinos pastoreando una pradera de alfalfa era de 30% y 51% del total de la energía metabolizable consumida, respectivamente.

En condiciones extremas, se han detectado costos de cosecha que pueden superar el 100% del requerimiento de mantención (Lambourne y Reardon 1963); esto no puede explicarse únicamente por el trabajo muscular que implica esta actividad; existe evidencia de que en condiciones de pastoreo con escasez de forraje, los animales estarían sometidos a factores de tipo social o psicológicos relacionados con una situación de estrés por competencia; tal situación podría estimular el metabolismo animal e incrementar sustancialmente el gasto energético relacionado con el costo de cosecha (Salas 1988).

La variabilidad que se encuentra en una misma especie puede atribuirse principalmente a los distintos niveles de disponibilidad de forraje y a diferencias de peso de los animales.

Todo sistema ecológico es una unidad donde la energía producida por cada nivel trófico puede ser aprovechada en parte por los niveles superiores (Rozas *et al.* 1978). Cada nivel trófico representa entonces un costo energético de concentración y un costo energético de extracción de la cosecha desde los niveles tróficos inferiores. La magnitud del costo de extracción de la cosecha depende de la disponibilidad calórica de la cosecha y de características del animal, tales como tamaño, forma, sistema locomotor, etc.

En una determinada condición ecológica existen factores que afectan al animal tales como la disponibilidad de forraje y las condiciones ambientales (temperatura, velocidad del viento y humedad). Cuando al requerimiento de mantención (ENm) se le suma el gasto de regulación de temperatura y el costo de cosecha, se denomina *costo ecológico de mantención* (Cañas y Gastó 1974). A muy baja disponibilidad de energía, o muy baja temperatura, el balance energético es negativo; en este caso, el consumo de EM no alcanza a suplir el requerimiento ecológico de mantención, lo que provoca una movilización de energía del cuerpo del animal y, por consiguiente, una pérdida de peso.

Rozas *et al.* (1978) estudiaron una ecuación que permite predecir el costo ecológico de cosecha en ovinos conociendo la disponibilidad calórica de la cosecha y las características del animal. La función que mostró mejor ajuste para calcular el costo ecológico de cosecha en relación a la disponibilidad calórica de la pradera, es una ecuación potencial de pendiente negativa de la forma:

$$CC = 548.53 (DIS - 922.66)^{-0.400617} \quad [100]$$

$$r = 0.6936$$

donde:

CC = costo ecológico de cosecha, kcal/unidad de zoomasa/día  
DIS = disponibilidad calórica de la pradera, Mcal/ha

Esta ecuación presenta un buen ajuste para disponibilidades altas, incluyendo valores que tienen a infinito (Ortúzar 1979). Cuando la disponibilidad se aproxima a 922.66 Mcal EM/ha, el costo de cosecha se hace tan alto que es poco realista y en términos biológicos debería significar la muerte del animal. Además, con valores de disponibilidad menores o iguales a 922.66 la curva no existe y no es posible utilizarla. Es necesario destacar que en este punto el costo de cosecha es tan alto que al animal le resulta poco atractivo cosechar. Si se asume una concentración calórica de 2 Mcal/kg, la disponibilidad de forraje deberá ser de unos 450 kg MS/ha; cuando la disponibilidad se acerca a este valor, el animal deja de cosechar.

Teóricamente, es más cercano a la realidad plantear no sólo una aproximación de tipo exponencial asintótica del costo de cosecha cuando la disponibilidad aumenta, sino que también es realista el suponer que cuando se llega a un nivel de disponibilidad crítico, el animal deja de consumir y por consiguiente su costo de cosecha tiende a cero. El raciocinio que permite fundamentar esta aseveración es que el animal invertiría energía hasta aquel punto en que el gasto energético por energía cosechada le resulte insuficiente; es decir, que el consumo sea inferior a la suma del requerimiento de mantención, más el incremento calórico de producción y más el costo de regulación térmica, produciéndose un balance negativo. El animal asumiría un punto de desbalance límite, pasado el cual, o cercano a él, deja de invertir energía en cosechar. Con base en este razonamiento, Catrileo (1981) ajustó los datos experimentales en bovinos de Rozas *et al.* (1978) a una ecuación con racionalidad biológica; es decir, forzándola a una asíntota superior, que es función del peso del animal. La expresión de la ecuación es:

$$Y = 813.16 \ln(48-CC) - 311.79 \ln(CC-12) + 803.00 \quad [101]$$

donde:

- Y = disponibilidad de forraje, kg MS/ha  
 CC = costo de cosecha, kcal/unidad de zoomasa/día  
 48 y 12 = estimaciones de la asíntota superior e inferior, respectivamente, para bovinos en pastoreo

Cuando la concentración calórica del pasto resulta ser muy baja, el consumo diario de energía no alcanza para suplir el requerimiento de mantención más el costo de cosecha, regulación térmica e incremento calórico, generándose un balance negativo y el animal pierde peso ( $EN < 0$ ).

Si se trae a colación la ecuación [98], y despejando  $EN_p$ , se tiene:

$$EN_p = EMC - (EM_m + IC_p + CC + RT)$$

la  $EN_p$  puede, por lo tanto, tomar valores positivos o negativos en el animal en pastoreo, dependiendo de la concentración calórica de la pradera, que hará variar principalmente el costo de cosecha.

Por otra parte, el costo de cosecha no solamente corresponde a un aumento del gasto de energía, debido al caminar, sino también a una situación de estrés asociada con la competencia entre los animales por acceso al alimento.

El término *estrés*, en producción animal, comúnmente indica la existencia de condiciones en el entorno que son adversas para el bienestar animal (Scott 1981, citado por Paladines *et al.* 1987).

Se han definido dos mecanismos de respuesta al estrés. Uno que envuelve un sistema simpatoadrenal, donde existe una respuesta rápida de todo el cuerpo frente a un medio hostil y que se expresa por la secreción de catecolaminas ("Síndrome de emergencia" según Cannon 1932); y otro donde participa el sistema hipofiso-adrenal con secreción de ACTH y glucocorticoides y que ocurre cuando el animal se enfrenta gradual o prolongadamente a un estímulo causante de estrés (Selye 1955). Este último se conoce como "Síndrome general de adaptación". De acuerdo a Selye (1955), estrés es una respuesta no específica del cuerpo a cualquier fuerza del medio ambiente. Así, los mecanismos descritos por Cannon y por Selye enfatizan una respuesta endocrina, y la medida del estrés se realiza midiendo directa o indirectamente la secreción adrenal (Scott 1981; Vargas 1982; citados por Paladines *et al.* 1987).

En una serie de investigaciones en ratas, en donde la competencia por el acceso al alimento, fue usada como un estímulo que posiblemente causaría estrés, el nivel de glucosa sanguínea se empleó como medida indirecta de la actividad adrenal (Paladines *et al.* 1987). También se tomó el cambio de peso de las ratas como indicativo de estrés, bajo el supuesto de que éste causa un gasto de energía adicional (a los gastos de mantenimiento) debido a la hiperfunción glandular y al aumento del tono muscular. Adicionalmente, la competencia por el acceso al alimento ocasiona un mayor esfuerzo físico, que reduce aún más la energía disponible para ganancia de peso. Se encontró, además, que el nivel de glucosa en la sangre a los 30-45 minutos *postprandium* es un indicador fiel de la situación de estrés que sufren los animales sometidos a competencia y que el aumento de glucemia en la situación de estrés sigue una curva similar a la glucemia de la alimentación normal, pero a nivel significativamente superior entre los 10 y 60 minutos *postprandium*. El grado de competencia por acceso al alimento y el grado de competencia por la cantidad de alimento ofrecido, son aditivos en el efecto de estrés.

En condiciones de termoneutralidad y con dietas balanceadas, el costo energético de mantención dependerá del metabolismo basal y del nivel de actividad voluntaria. Este término adquiere importancia cuando el animal pastorea, especialmente cuando hay escasez de forraje. En esta situación, el esfuerzo físico del movimiento corresponde al trabajo invertido en la actividad de cosechar y representa el gasto energético que destina el animal para cubrir el esfuerzo total que le significa proveerse del alimento (Salas 1988).

El grado de actividad física de los ovinos en pastoreo varía con la condición de la pradera (Arnold 1981). En general, estos animales gastan más energía que cuando se mantienen en confinamiento y, en gran parte, ésta diferencia se debe a la mayor energía invertida en la actividad de comer, estar de pie y caminar por la pradera durante el pastoreo (Graham 1964; Osuji 1974; Osuji *et al.* 1975; citados por Salas 1988).

Según el NRC (1978), los requerimientos de mantención en pastoreo pueden aumentar entre 10% y 100% del requerimiento energético en condiciones de estabulación, y la cuantía de este mayor gasto dependerá de la disponibilidad de forraje, así como de las distancias recorridas, condiciones climáticas y topografía del terreno.

Torres *et al.* (1974) encontraron que los consumos máximos en novillos en pastoreo se obtenían con bajos niveles de disponibilidad. La explicación a este fenómeno sería que en la medida que disminuye la disponibilidad de forraje, se produce un incremento en el tiempo de pastoreo de los animales. Esto significa que en pastoreo continuo, los animales gastarán una mayor cantidad de energía en caminar para obtener su alimento. Torres *et al.* (1974) estimaron que la actividad física de bovinos en pastoreo puede incrementarse de un 30% a un 60% del requerimiento de mantención, cuando la disponibilidad de forraje permite ganancia de peso. Sin embargo, con niveles de disponibilidad de 200 kg de MS/ha, el gasto de mantenimiento debe ser aumentado en un 130% para explicar los altos niveles de consumo observados y las bajas ganancias de peso esperados con esas cantidades de forraje ofrecido (Cañas 1989).

Lógicamente, el costo de cosecha depende de las características intrínsecas del cosechador, del comportamiento animal, de las características físicas del forraje y del suelo, del valor nutritivo de la cosecha y de la interacción animal-planta (Cañas *et al.* 1983).

Las experiencias llevadas a cabo por Paladines (comunicación personal, 1966), señalaron que los animales en pastoreo rotativo presentan una capacidad de memoria tal que pueden recordar cuándo les corresponde un cambio de potrero. Este investigador observó que los animales en su último día de pastoreo, cuando se ven enfrentados a una baja disponibilidad de forraje, presentan consumos casi nulos y permanecen todo el día echados, esperando el ciclo siguiente. Estas observaciones llevaron a plantear la hipótesis de que los animales en pastoreo rotativo no se enfrentarían a una situación de estrés por competencia cuando el forraje escasea, debido a cierto sosiego en anticipación de la próxima rotación a un potrero con adecuada disponibilidad de forraje. Por el contrario, los animales en pastoreo continuo se verían enfrentados permanentemente a una situación de competencia cuando el forraje escasea, lo cual induciría a una situación de estrés que aumentaría el gasto energético relacionado con el costo de cosecha. Dicha hipótesis se probó con los siguientes resultados: los animales en pastoreo, con alta disponibilidad de forraje (5000 kg MS/ha), presentaron un costo de cosecha menor que aquellos en pastoreo con baja disponibilidad (884 kg MS/ha). En el sistema continuo, este costo fue 39.02% y 176.07% del requerimiento de mantención para alta y baja disponibilidad de forraje, respectivamente. En el sistema rotativo, el costo de cosecha fue de 25.35% para alta disponibilidad y de 84.64% cuando el forraje fue escaso. Además, se concluyó que en condiciones de alta disponibilidad de forraje, la mayor parte del costo de cosecha en los sistemas rotativo y continuo se puede explicar por el gasto energético de la actividad física del pastoreo. En condiciones de escasez, este costo no se podría explicar solamente por el trabajo muscular. En este caso, se presentó hipertrofia de las glándulas suprarrenales, aumento de la proporción de la corteza suprarrenal y lisis del timo, todo lo cual indica que en estas condiciones los animales estarían sometidos a estrés por competencia por el alimento.

Según lo anterior, se desprende que el costo energético que realiza el animal en la cosecha de forraje, es función de la disponibilidad de forraje y del sistema de pastoreo al que esté sujeto, ya que existe diferencia en el estrés que se produce en el animal cuando realiza un pastoreo continuo, comparado con un pastoreo rotativo cuando la presión de pastoreo es alta.

Es evidente que el costo de cosecha debe tener valores de EN e IC, valores que todavía no se han podido separar. Esta es la razón de que al tratar el tópico de costo de cosecha se incluyan los valores de ENcc e ICcc.

### a. Requerimiento ecológico de mantención

Se ha denominado *requerimiento ecológico de mantención (REM)* al nivel de consumo de energía metabolizable que satisface el requerimiento de mantención, el costo de regulación de temperatura y el costo de cosecha, sin pérdida ni ganancia de peso ( $ENp + ICp = 0$ ).

$$\frac{EM \text{ consumida}}{EMm + CC + RT} = 1 \quad [102]$$

En consecuencia, se tiene que:

$$REM = EMm + CC + RT \quad [103]$$

(en zona de termoneutralidad,  $REM = EMm + CC$ )

donde:

REM = requerimiento ecológico de mantención  
 EMm = energía metabolizable de mantención  
 CC = costo de cosecha  
 RT = regulación térmica

Catrileo (1981) encontró una relación entre la concentración calórica del forraje y la disponibilidad mínima para mantener un balance de energía igual a cero, en novillos en pastoreo (Fig. 11), expresada con la función:

$$Y = 3.129 - 0.0007X \quad [104]$$

donde:

Y = concentración calórica del forraje, Mcal EM/kg MS  
 X = disponibilidad del forraje, kg MS/ha

El área delimitada bajo la recta de la Fig. 11 indica condición de la pradera que produce pérdida de peso en los animales. Las líneas paralelas por encima y por debajo de la recta representan distintos niveles de ganancia o pérdida de peso, dependiendo de la relación entre X e Y.

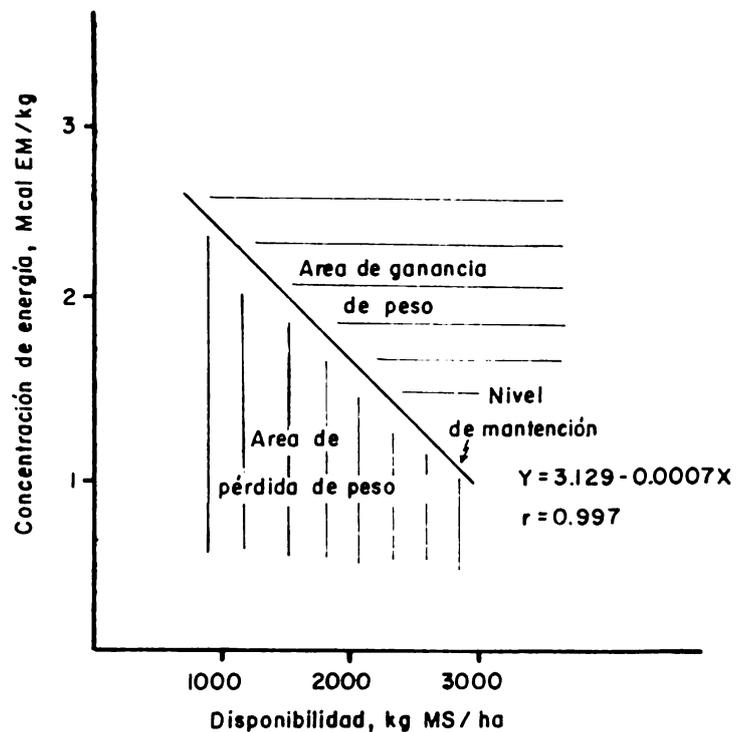


Fig. 11 Relación entre el contenido de energía y disponibilidad de forraje

De acuerdo a la ecuación [104] se puede entonces determinar la disponibilidad de MS, a una determinada [EM], necesaria para satisfacer el REM:

$$Disp (REM) = \frac{3.129 - [EM]}{0.0007} \quad [105]$$

donde:

Disp(REM) = disponibilidad de MS para suplir el requerimiento ecológico de mantención, kg S/ha  
 [EM] = concentración calórica de la pradera, Mcal EM/kg MS

Además, la ecuación [105] permite estimar la disponibilidad mínima para que se produzca cambio de peso positivo, a un determinado contenido de energía del forraje.

*Ejemplo:*

Determinar la ganancia de peso de novillos de 300 kg pastoreando una pradera mediterránea de 2.0 Mcal/kg MS y una disponibilidad de 3000 kg/ha.

$$Disp(REM) = \frac{3.129 - [EM]}{0.0007}$$

$$Disp(REM) = \frac{3.129 - 2.0}{0.0007}$$

$$Disp(REM) = 1612.8 \text{ kg MS/ha}$$

Para que se cumpla el requerimiento ecológico de mantención a 2.0 Mcal/kg, la disponibilidad de la pradera debería ser de 1612.8 kg/ha. Dado que se dispone de 3000 kg/ha:

$$3000 = \frac{3.129 - [EM]}{0.0007}$$

$$[EM] = 1.03$$

A 3000 kg MS/ha de disponibilidad, toda la energía que contenga la MS sobre 1.03 Mcal se destinará a ganancia de peso, es decir, en el caso particular del ejemplo, la energía disponible para ganancia de peso es de 0.97 Mcal.

#### b. Requerimiento de energía para regulación de temperatura corporal

Al igual que lo planteado al tratar el tópico de costo de cosecha, el consumo de EM se distribuye entre distintas funciones y tipos de producción del animal, donde está presente la EN y el IC para cada tipo de producción, según la fórmula [19]:

$$EMC = ENm + ICm + ENpl + ICpl + ENG + ICg + ENgp + ICgP + ENcc + ICcc + ENrt + ICrt$$

El bovino es un animal que se adapta a un amplio rango de termoneutralidad. Blaxter (1964) indica que la temperatura corporal de los mamíferos medida en el recto, muestra un margen de variación muy pequeño. La temperatura promedio es de 39°C, con una variación de  $\pm 2^\circ\text{C}$ . La pequeña variación térmica, indica la gran capacidad que poseen los mamíferos para regular su temperatura.

Cuando el animal se encuentra en un ambiente de temperatura baja, la sumatoria de incremento calórico se utiliza para regular la temperatura. Cuando la temperatura es más baja que la temperatura crítica mínima del rango de termoneutralidad, el animal debe incrementar su producción de calor, requiriendo energía para regulación de temperatura. La eficiencia de utilización de energía para regulación de temperatura es 100%, ya que la transformación de energía a calor tiene un 100% de eficiencia, por lo que el IC es cero.

Para disipar calor, el animal utiliza dos mecanismos. El primero es por convección, radiación y conducción, que en conjunto permiten la pérdida de calor sensible. El segundo, es a través de la pérdida de calor por vaporización; esto corresponde a la evaporación de agua de la piel y conductos respiratorios, cuando el calor requerido para tales efectos es suministrado por el animal.

La magnitud de la pérdida de calor sensible está determinada por los atributos físicos del medio ambiente; entre ellos se puede mencionar la temperatura, la radiación incidente y el movimiento del aire. El animal, en general, tiene una habilidad muy limitada para controlar estas pérdidas y lo hace a través de la regulación del flujo sanguíneo, erección del pelo y alteración de la superficie de exposición. En contraste, la pérdida de calor por vaporización puede ser gobernada por el animal en mejor forma, reduciendo a un mínimo el intercambio normal de oxígeno y anhídrido de carbono que ocurre como consecuencia de la respiración. Además, es capaz de lograr una vaso constricción completa.

El animal experimenta otra pérdida de calor que se llama calentamiento y corresponde al gasto de energía que realiza el individuo con el objeto de calentar el alimento hasta que éste logre su temperatura corporal.

Las pérdidas de calor, según lo indica Blaxter (1964), pueden ser enfocadas a través de dos formas: teórica y empírica. En el primer caso, puede considerarse al animal como un cilindro con una capa uniforme de pelo. El calor se produce por efectos del metabolismo en el volumen central de este cilindro, el cual tiene una temperatura que podría denominarse TB. Este calor debe ser evacuado, debiendo para ello, pasar la primera barrera que es la piel. A este nivel, una cierta cantidad de este calor es utilizada para evaporar agua de la piel. El vapor de agua se difunde a través de la capa de pelos, al aire. El remanente de calor progresa a través del pelo por un proceso de conducción hasta la superficie de esta capa. En esta etapa, que podría llamarse interfase, se pierde calor hacia el medio por convección y radiación (calor sensible).

De esta manera, conociendo las temperaturas corporal, de la superficie cutánea, de la capa pelífera y del aire, es posible establecer algunas relaciones. La más importante corresponde a la fórmula newtoniana de la pérdida de calor:

$$H_p = AB \cdot C(T) \cdot [T(B) - T(S)] \quad [106]$$

donde:

- H<sub>p</sub> = calor producido en el metabolismo, Mcal
- AB = área del animal, m<sup>2</sup>
- C(T) = conductancia del tejido, Mcal/m<sup>2</sup>/°C
- T(B) = temperatura corporal, °C
- T(S) = temperatura de la superficie corporal, °C

A partir de esta fórmula se puede seguir describiendo el intercambio calórico. Por ejemplo, si el animal no tuviese pelaje, la pérdida de calor sensible (HN) sería igual a:

$$H_N = AB \cdot C(A) \cdot [T(S) - T(A)] \quad [107]$$

donde:

- C(A) = conductancia térmica de la capa de aire que rodea el cuerpo del animal, Mcal/m<sup>2</sup>/°C
- T(A) = temperatura ambiental, °C

Sin embargo, en el caso de las vacas lecheras, éstas tiene una capa pelífera que tiene importancia en la regulación de la temperatura. La relación queda como sigue:

$$HN = A(F) \cdot C(A) \cdot [T(F) - T(A)]$$

donde:

A(F) = superficie del cuerpo más pelo, m<sup>2</sup>  
 T(F) = temperatura del pelo, °C

Del mismo modo, el calor por vaporización (HE) puede expresarse de la siguiente manera:

$$HE = AB \cdot D \cdot [P(S) - P(A)] \quad [109]$$

donde:

D = constante de difusión de vapor de agua de la superficie  
 P(S) = presión de la pérdida de vapor de agua de la superficie, kg/m<sup>2</sup>  
 P(A) = presión de vapor de agua en el medio ambiente, kg/m<sup>2</sup>

Las constantes de conductancia miden la cantidad de calor que fluye por unidad de gradiente de temperatura que se intercambia entre dos superficies. Su recíproca es lo que se denomina constante de aislamiento. Es decir, para el caso del animal existe una constante de aislamiento para los tejidos (CA), pelos (CF) e interfase del aire (CT). Dado que estas constantes constituyen resistencias, ellas se deben sumar para calcular el aislamiento térmico total (1/Kc).

El valor de Kc fue calculado por Blaxter (1977) a partir de una expresión matemática que considera el efecto del viento y del grosor de la capa pelífera. Su fórmula es la siguiente:

$$k_1 = \frac{Rr}{Rr + Gr} \cdot \frac{1}{0.115 + 0.099vv} \quad [110]$$

$$k_2 = (Rr) \ln \frac{Rr + Gr}{Rr} + 0.46 - 0.09vv \quad [111]$$

$$k_3 = \frac{1}{k_1 + k_2} \quad [112]$$

donde:

Rr = radio del animal, mm  
 Gr = grosor de capa pelífera, mm  
 vv = velocidad del viento, millas/hora

Si no se dispone del valor preciso de Rr, se recomienda usar Rr = 400 mm, que corresponde a un promedio. Del mismo modo, el valor de Gr, que corresponde al largo del pelo, sería de unos 10 mm en períodos de verano, pudiendo llegar a 40 mm o más en períodos de temperatura baja.

El área de un animal (A), según Blaxter (1977), se puede calcular:

$$A = 0.09 W^{0.66} \quad [113]$$

donde:

W = peso del animal, kg

Con estos valores de Kc y el intercambio de calor (DQ) entre la vaca y el medio ambiente queda como sigue:

$$DQ = (A)(Kc)(39 - TE) \quad [114]$$

donde:

39 = temperatura corporal del animal (constante), °C

TE = temperatura ambiental, °C

Aguilar (1983), basado en datos experimentales de Blaxter (1977), logró determinar una expresión matemática que permite calcular la máxima pérdida de calor (HE):

$$HE = 482.74 A (0.0376 TE) \quad [115]$$

La regulación térmica y, por lo tanto, el intercambio calórico con el medio, son procesos continuos. Se considera que todos los incrementos calóricos y el costo de cosecha constituyen un "pool" (PE). Su representación matemática es:

$$PE = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + CC \quad [116]$$

Si la energía contenida en PE no es suficiente para regular la temperatura del animal, este logrará su objetivo a expensas de una menor producción.

## 8. MÉTODO DE LA ENERGÍA NETA PARA LA FORMULACIÓN DE RACIONES

El método más sencillo para evaluar el contenido de energía de un alimento es la energía bruta. Por otra parte, el método más sencillo para evaluar los requerimientos de los animales es la energía neta, ya que esta representa la energía bruta de la producción. Sin embargo, para el cálculo de raciones, se debe usar el mismo método de evaluación tanto para el alimento como para el requerimiento. Es así como en la historia de la bioenergética han aparecido métodos que compatibilizan los requerimientos con la evaluación de los alimentos y constituyen una metodología. Tal vez el más profusamente usado, especialmente en América Latina, ha sido el método del ENDT (Elementos Nutritivos Digestibles Totales).

Posteriormente, se empezó a usar el método de cálculo de raciones basado, en la energía metabolizable, anteriormente descrito. Este método, todavía de gran uso en Inglaterra, tiene la ventaja de poder evaluar el alimento rápidamente. Se utiliza la digestibilidad *in vitro* que, multiplicada por 0.81, ofrece buena estimación del contenido de energía metabolizable del alimento. Por otra parte, tiene el problema que para determinar el requerimiento, se hace necesario conocer la energía neta producida y el factor de eficiencia (K) se estima con base en la concentración energética del alimento; es decir, los requerimientos se calculan con base en la calidad de la dicta.

Hace 30 años, Lofgreen (1963) planteó el Sistema de Energía Neta en el cual se separaba el valor nutritivo de los alimentos dependiendo de si estos eran utilizados para mantención, producción de leche o producción de

carne. Este sistema fue utilizado por una serie de empresas productoras de ganado y su aplicabilidad fue demostrada durante cinco años, después de lo cual Lofgreen y Garrett (1968) detallaron el método que se explica a continuación.

#### a. Desarrollo del método de la energía neta según Lofgreen y Garrett (1968)

La eficiencia parcial de la utilización de la energía para mantención es mayor que para producción (Kleiber 1961). La energía neta del alimento varía dependiendo del nivel de consumo, siendo mayor con consumos bajos y disminuyendo en la medida que aumenta el consumo; por consiguiente, es evidente que el sistema de EN debe incorporar diferentes eficiencias dependiendo del nivel de consumo. De esta forma se utiliza una eficiencia constante para mantención y otra para producción. Este método asume que el requerimiento de mantención es constante.

(1) *Determinación del requerimiento de energía neta para mantención.* Como ya se ha establecido en reiteradas oportunidades, el requerimiento de EN para mantención es la cantidad de calor que se produce cuando el animal está en estado post-absortivo (12 a 24 h de ayuno, en reposo y en zona de termoneutralidad). Para el caso de los novillos, este valor resultó ser:

$$ENm = 0.077 W^{0.75} \quad [117]$$

donde:

ENm = requerimiento de energía neta para mantención, Mcal/día  
W = peso del animal, kg

Con el objeto de comparar el requerimiento de EN de mantención de novillos y vaquillas, se hizo un experimento prolongado con distintos niveles de consumo y tipos de dieta y se concluyó que la ecuación antes mencionada podría utilizarse tanto para novillos como para vaquillas.

(2) *Determinación del valor de energía neta de una ración.* Para determinar la energía neta de una ración es necesario experimentar con animales; así por ejemplo, para lograr un balance de energía cero en un experimento determinado se encontró que se requirieron 131 kcal de energía por unidad de peso metabólico (Lofgreen y Garrett 1968). Si la dieta tiene una energía metabolizable de 2.04 kcal/g de alimento, indica que se requieren 64.2 g de ese alimento para lograr el balance cero. Esta cantidad de alimento tiene una energía neta de mantención por unidad de peso metabólico igual a la producción de calor en catabolismo de ayuno, que es de 77 kcal. Por consiguiente, la energía neta de mantención del alimento es de 77 kcal en 64.2 g o, lo que es lo mismo, 1.2 Mcal/kg.

(3) *Determinación del requerimiento de energía neta para ganancia de peso.* El requerimiento expresado en energía neta para ganancia de peso (ENgp) corresponde simplemente a la energía depositada en esa ganancia de peso. La energía de la ganancia de peso es función del sexo y del peso. Sin embargo, y en forma simplificada, se puede decir que la energía de la ganancia de peso es:

para novillos:

$$ENgp = (52.72 g + 6.84 g^2) W^{0.75} \quad [118]$$

para vaquillas:

$$ENgp = (56.03 g + 12.65 g^2) W^{0.75} \quad [119]$$

donde:

EN(gp) = energía neta para ganancia de peso, kcal  
 g = ganancia diaria, kg  
 W = peso corporal, kg

(4) *Determinación del valor de energía neta de ganancia de peso de una ración.* El valor de ENgp de un alimento es igual al valor de la energía depositada en la ganancia de peso producida por ese alimento. Para obtener este valor, es necesario hacer un experimento de alimentación al menos con dos niveles de consumo, y medir la energía neta depositada, que es lo que Garrett *et al.* (1959) llaman *experimento de diferencia* y se calcula como lo muestra el Cuadro 30.

Cuadro 30. Diferentes experimentos para determinar valores de ENgp		
Nivel de consumo	Consumo de alimento g/W <sup>0.75</sup>	Ganancia en energía kcal/W <sup>0.75</sup>
<i>Ad libitum</i>	146	41
<i>Equilibrium</i>	64	0
Diferencia	82	41
ENgp = 41/82 = 0.5 kcal/g = 0.5 Mcal/kg		

#### b. Tabla de requerimientos

Con el propósito de utilizar los conceptos antes explicados, se incluyen los Cuadros 31 y 32 que corresponden a las tablas de requerimientos de EN para crecimiento y engorda de novillos y vaquillas, respectivamente. Además, el Cuadro 33 muestra algunos valores de ENm y ENgp de algunos alimentos. Estas determinaciones fueron realizadas en la Universidad de California con alimentos locales. Para poder utilizar este método de energía neta en América Latina es necesario desarrollar tablas propias, con los alimentos típicos que se usan en la producción de carne y leche. Este es, a juicio de los autores, el mayor problema en la aplicación de este sistema en Latinoamérica. Sin embargo, se deben hacer esfuerzos por disponer de tablas latinoamericanas de valores de EN de alimentos y compararlas con las existentes en otras regiones.

Para estimar el valor de EN es posible basarse en el contenido de energía metabolizable. Ya que el contenido de ENm de un alimento está directamente relacionado con la cantidad que se requiere de ese alimento para mantener un equilibrio energético igual a cero, y dado que se sabe que se requiere una mayor cantidad de un alimento de calidad pobre que de uno de alta calidad, se puede calcular una relación entre la EM del alimento y del alimento requerido para lograr el equilibrio. Esta relación es la siguiente:

$$\text{Log } Y = 2.3030 - 0.2455 X \quad [120]$$

$$r^2 = 0.97; S_{y_x} = 2.0$$

donde:

Y = requerimiento de alimento para lograr el equilibrio de energía, g/día/W<sup>0.75</sup>  
 X = energía metabolizable del alimento, Mcal/kg tal como es ofrecido

Si se usa esta ecuación, básicamente se estaría usando el concepto de energía metabolizable.

Cuadro 31. Tabla de requerimientos de EN para novillos en crecimiento y terminación															
Ganancia de peso kg/día	Peso corporal, kg														
	150	175	200	225	250	275	300	325	350	375	400	425	450	475	500
<i>Requerimiento ENm, Mcal/día</i>															
0.00	3.30	3.70	4.10	4.48	4.84	5.22	5.55	5.89	6.24	6.56	6.89	7.21	7.52	7.83	8.14
<i>Requerimiento ENgp, Mcal/día</i>															
0.10	0.23	0.26	0.28	0.31	0.34	0.36	0.39	0.41	0.43	0.46	0.48	0.50	0.52	0.54	0.56
0.20	0.46	0.52	0.57	0.63	0.68	0.73	0.78	0.83	0.88	0.92	0.97	1.01	1.06	1.10	1.14
0.30	0.70	0.79	0.87	0.95	1.03	1.11	1.18	1.26	1.33	1.40	1.47	1.54	1.61	1.67	1.74
0.40	0.95	1.07	1.18	1.29	1.40	1.50	1.60	1.70	1.80	1.89	1.99	2.08	2.17	2.26	2.34
0.50	1.20	1.35	1.49	1.63	1.77	1.90	2.02	2.15	2.27	2.39	2.51	2.63	2.74	2.85	2.97
0.60	1.46	1.64	1.81	1.98	2.15	2.30	2.46	2.61	2.76	2.91	3.05	3.19	3.33	3.47	3.60
0.70	1.73	1.94	2.14	2.34	2.53	2.72	2.90	3.08	3.26	3.43	3.60	3.77	3.93	4.00	4.25
0.80	2.00	2.24	2.47	2.70	2.93	3.15	3.36	3.57	3.77	3.97	4.17	4.36	4.55	4.73	4.92
0.90	2.27	2.55	2.81	3.08	3.34	3.58	3.82	4.06	4.29	4.52	4.74	4.97	5.18	5.39	5.60
1.00	2.55	2.86	3.16	3.46	3.75	4.03	4.29	4.56	4.82	5.08	5.33	5.58	5.82	6.06	6.29
1.10	2.84	3.19	3.52	3.85	4.17	4.48	4.78	5.08	5.37	5.65	5.93	6.21	6.47	6.74	7.00
1.20	3.13	3.52	3.88	4.25	4.60	4.94	5.27	5.60	5.92	6.24	6.55	6.85	7.14	7.44	7.73
1.30	3.43	3.85	4.26	4.65	5.04	5.41	5.77	6.14	6.49	6.83	7.17	7.51	7.82	8.15	8.46
1.40	3.74	4.19	4.63	5.07	5.49	5.89	6.29	6.68	7.06	7.44	7.81	8.17	8.52	8.87	9.22
1.50	4.05	4.54	5.02	5.49	5.95	6.39	6.81	7.24	7.65	8.06	8.46	8.85	9.23	9.61	9.98

Cuadro 32. Tabla de requerimientos de EN para vaquillas en crecimiento y terminación

Ganancia de peso kg/día	Peso corporal, kg														
	150	175	200	225	250	275	300	325	350	375	400	425	450	475	500
<i>Requerimiento ENm, Mcal/día</i>															
0.00	3.30	3.70	4.10	4.48	4.84	5.22	5.55	5.89	6.24	6.56	6.89	7.21	7.52	7.83	8.14
<i>Requerimiento ENgp, Mcal/día</i>															
0.10	0.25	0.28	0.30	0.33	0.36	0.39	0.41	0.44	0.46	0.49	0.51	0.54	0.56	0.58	0.61
0.20	0.50	0.56	0.62	0.68	0.74	0.79	0.84	0.90	0.95	1.00	1.05	1.10	1.14	1.19	1.24
0.30	0.77	0.86	0.95	1.04	1.13	1.21	1.29	1.37	1.45	1.53	1.60	1.68	1.75	1.83	1.90
0.40	1.05	1.18	1.30	1.42	1.54	1.65	1.76	1.87	1.98	2.08	2.18	2.29	2.39	2.49	2.58
0.50	1.34	1.50	1.66	1.81	1.96	2.11	2.25	2.39	2.53	2.66	2.79	2.92	3.05	3.17	3.30
0.60	1.64	1.84	2.03	2.22	2.40	2.58	2.75	2.92	3.09	3.26	3.41	3.58	3.73	3.88	4.04
0.70	1.95	2.18	2.42	2.64	2.85	3.07	3.27	3.48	3.68	3.87	4.06	4.26	4.44	4.62	4.80
0.80	2.28	2.55	2.81	3.07	3.33	3.58	3.82	4.05	4.28	4.51	4.73	4.96	5.17	5.38	5.59
0.90	2.60	2.92	3.23	3.52	3.81	4.10	4.37	4.65	4.91	5.18	5.43	5.68	5.93	6.17	6.41
1.00	2.94	3.30	3.65	3.99	4.32	4.64	4.95	5.26	5.56	5.86	6.14	6.44	6.71	6.99	7.26
1.10	3.30	3.70	4.09	4.47	4.84	5.20	5.55	5.89	6.23	6.56	6.88	7.21	7.52	7.83	8.13
1.20	3.66	4.11	4.55	4.96	5.37	5.78	6.16	6.55	6.92	7.29	7.64	8.01	8.35	8.69	9.03
1.30	4.04	4.53	5.01	5.47	5.92	6.37	6.79	7.22	7.63	8.04	8.42	8.83	9.21	9.58	9.96
1.40	4.42	4.96	5.49	6.00	6.49	6.98	7.44	7.91	8.36	8.81	9.23	9.67	10.09	10.50	10.91
1.50	4.82	5.41	5.98	6.54	7.07	7.61	8.11	8.62	9.11	9.60	10.06	10.54	11.00	11.44	11.90

Cuadro 33. Valores de EN para algunos alimentos		
Alimento	EN para mantención (EN gp)	EN para producción (ENgp)
	Mcal/kg	
<i>Forrajes secos (90% MS)</i>		
Alfalfa, heno, 21% fibra	1.23	0.70
Alfalfa, heno, 24% fibra	1.12	0.54
Alfalfa, heno, 29% fibra	1.01	0.30
Cebada, heno	1.11	0.47
Maíz, coronta molida	0.91	0.14
Maíz, forraje seco	1.27	0.75
Maíz, rastrojo	1.10	0.52
Cáscara semilla de algodón	0.93	0.20
Avena, heno	1.03	0.36
Timothy, heno, antes de la floración	1.23	0.70
Timothy, heno, después de la floración	1.03	0.38
Trigo, paja	0.91	0.14
<i>Ensilajes (30% MS)</i>		
Alfalfa, marchita, buena calidad	0.39	0.21
Maíz, dentado, bien maduro	0.49	0.29
Sorgo, dulce o doble propósito	0.44	0.20
<i>Concentrados (90% MS)</i>		
Avena, grano	1.93	1.27
Remolacha, pulpa, melaza, seca	1.83	1.21
Brote de malta seco	1.28	0.77
Harina de coco, solvente	1.51	1.00

Continuación del Cuadro 33 ...

Cuadro 33. Valores de EN para algunos alimentos		
Alimento	EN para mantención (EN gp)	EN para producción (ENgp)
	Mcal/kg	
Maíz, grano dentado No. 2	2.03	1.32
Harina de maíz con mazorca	1.78	1.19
Harina de semilla de algodón 41%, extracción con solvente	1.40	0.90
Grasa (89% MS)	4.46	2.80
Harina de linaza, extracción con solvente	1.61	1.08
Milo, grano	1.93	1.27
Melaza de caña de azúcar (71% MS)	1.43	0.90
Avena, grano	1.66	1.12
Arroz, afecho	1.50	1.00
Harina de soya, "expeller" o extracción hidráulica	1.85	1.23
Harina de soya, extracción con solvente	1.72	1.15
Trigo, grano	1.98	1.30
Trigo, afrecho	1.52	1.01
Trigo, afrechillo	1.72	0.98

El Cuadro 34 indica la relación entre energía metabolizable y la cantidad de alimento requerido para mantención. En la medida que la concentración calórica del alimento aumenta, el animal requiere una menor cantidad de alimento para su mantención. Al conocer la cantidad de alimento, se puede estimar la energía neta de mantención del alimento, valor que aumenta en la medida que aumenta la concentración de energía metabolizable. Al calcular la relación entre la energía neta de mantención del alimento y su energía metabolizable, se observa que se hace constante entre valores de concentración calórica de 1.5 y de 2.2, para luego aumentar con concentraciones mayores. Este valor, que corresponde conceptualmente al Km del método de energía metabolizable, tiene un valor de la constante de 59, en vez de 55, y una tasa de crecimiento de 2 por cada unidad de aumento de la concentración calórica, en vez de 6.

Cuadro 34. Relación entre la concentración calórica [EM] y la cantidad de alimento requerido para mantención

[EM] Mcal/kg	Alimento requerido para mantención g/W <sup>0.75</sup> /día	Consumo de EM para mantención Mcal	Estimación de ENm Mcal /kg	Relación ENm/EM
1.5	86.05	129.0	0.89	0.59
1.7	76.85	130.6	1.00	0.59
2.0	65.86	129.7	1.18	0.59
2.2	57.93	127.7	1.33	0.59
2.4	51.74	124.0	1.49	0.62
2.6	46.21	120.1	1.67	0.64
2.8	41.23	115.0	1.87	0.67

Una forma igualmente rápida de hacer esta transformación es utilizando la concentración calórica multiplicada por un Km, de acuerdo a la siguiente regla:

- si la concentración calórica es menor que 2.2, se usa Km = 0.59. Este valor es el que normalmente corresponde a los alimentos utilizados para la producción de carne en América Latina.

- si la concentración calórica es mayor a 2.2, el Km se aumenta en 0.15 unidades por cada Mcal.

Dado que los forrajes tienen concentraciones calóricas que son inferiores a 2.5 Mcal/kg., el usar un Km constante de 0.6 parece razonable.

Es necesario recordar, como se estableció en secciones anteriores, que el requerimiento de mantención no sólo es función del peso metabólico, sino también de su nivel de consumo y del tipo de dieta.

Por otra parte los autores del método de energía neta (Garrett *et al.* 1959) realizaron un ensayo en donde se relacionó el consumo a equilibrio de energía, que se obtiene de la ecuación [120], con la ENgp; se encontró la ecuación siguiente:

$$Y = 2.29 - 0.0254 X \quad [121]$$

donde:

Y = requerimiento de alimento para lograr equilibrio de energía, g/día/W<sup>0.75</sup>  
 X = energía neta para ganancia de peso (ENgp), kcal/g del alimento

Con base en las dos relaciones anteriores es factible transformar la energía metabolizable (Mcal/kg) en EN para mantención y ganancia de peso (Mcal/kg).

Por ejemplo, si se tiene un alimento con EM = 1.9 Mcal/kg, significa que contendrá 1.13 y 0.55 Mcal/kg de ENm y ENgp, respectivamente. Esto es debido a que el antilogaritmo de la ecuación [120] es de 68.16, lo que corresponde a la cantidad (en gramos) de alimento requerido para lograr un equilibrio de energía por W<sup>0.75</sup> (peso metabólico). Dado que el requerimiento de ENm es de 77 kcal, por simple división (77/68.16 = 1.13) se calcula

el valor de EN de ese alimento (que es de 1.13 Mcal/kg). Para estimar el valor de EN<sub>gp</sub> se utiliza la ecuación [120] determinándose los 68.16 g de consumo para lograr el equilibrio energético que, incorporados a la ecuación [121] da una EN<sub>gp</sub> de 0.55.

### c. Usos del sistema de energía neta

Su uso no se recomienda en condiciones de mantención, porque tiende a subestimar los forrajes, en relación a los concentrados, para mantención. Por lo tanto, en estas condiciones se recomienda el uso de energía digestible o energía metabolizable.

El sistema de energía neta propuesto estima valores de EN<sub>m</sub> para grano de maíz y paja de trigo de 2.03 y 0.91 Mcal/kg, respectivamente; y valores de EN<sub>gp</sub> de 1.32 y 0.14 Mcal/kg, respectivamente. Es así que, para propósitos de mantención, la paja de trigo tiene un valor del 45% del valor del grano maíz; mientras que para producción este valor disminuye a un 10% del valor del maíz. Por otra parte, esto indicaría la ventaja de evaluar los alimentos por el sistema de EN.

Del Cuadro 31 se puede determinar que un novillo de 350 kg requiere 6.24 Mcal de EN<sub>m</sub> por día. Si consume una dieta con una concentración de EN<sub>m</sub> de 1.62 Mcal/kg requerirá de 3.85 kg de alimento para mantención. Si su consumo total fuese de 8.8 kg, le quedaría disponible para ganancia de peso, 4.95 kg que, a una concentración de EN<sub>gp</sub> de 0.97 Mcal/kg, corresponde a 4.8 Mcal de ganancia de peso, lo que equivale, según la ecuación [118], a 1 kg diario de ganancia de peso. Por otra parte, si se desea determinar cuál habría sido la ganancia de peso en vaquillas, se encontraría que ésta sería de 0.88 kg/día.

Otra ilustración del uso de las tablas es en la determinación de la cantidad de heno de alfalfa para novillos de 250 kg ganando 0.5 kg/día. Del Cuadro 31 se determina que el animal requiere de 4.84 Mcal de energía para mantención y de 1.77 Mcal para producción. Del Cuadro 33 se seleccionan el heno de alfalfa, con 24% de fibra, 1.12 Mcal de EN<sub>m</sub> y 0.54 EN<sub>gp</sub> por kg. Se requiere por consiguiente, 4.32 kg de esta alfalfa para mantención y 3.28 kg para 0.5 kg de ganancia de peso, dando un total de consumo diario de 7.6 kg, lo que correspondería aproximadamente a un 3% de su peso. Si este consumo lo hicieran vaquillas, la ganancia esperada sería de 0.45 kg.

Otra aplicación importante es en la evaluación de un programa de alimentación. Un estudio realizado por Clanton y Wood (1966), mostró una disminución significativa en el consumo y la ganancia de peso de novillos alimentados con maíz "peletizado" comparado con maíz machacado; la conclusión dada por ellos fue que la disminución en el consumo era la causa de la disminución en la ganancia de peso. Mediante el método de la EN es posible hacer una evaluación de este trabajo (Cuadro 35).

En ambos casos la ganancia observada es 5% mayor que la calculada por el sistema de EN. Con base en la ganancia teórica, posiblemente se esperaba una disminución de 0.12 kg de peso en aquellos animales alimentados con "pellets"; la disminución observada fue realmente de 0.13 kg. Parece, por consiguiente, que la disminución en el consumo explica exactamente la disminución en ganancia de peso; sin embargo, no existe una disminución en la eficiencia de utilización de energía.

Otro uso interesante del sistema es para la evaluación de algunos experimentos tales como el de Thompson *et al.* (1967), que se muestra en el Cuadro 36. El experimento tuvo como objetivo el determinar la respuesta de novillos alimentados con dietas que contenían grasa más urea; las tres dietas fueron formuladas para ser isocalóricas en términos de energía digestible. Se pudo observar una disminución significativa en la ganancia de peso en los animales que recibieron tratamientos que contenían grasa más urea, sin observarse una disminución en el consumo de la ración. Basado en el requerimiento de EN y en el consumo, se esperaba que los novillos alimentados con grasa ganaran 17% menos que los alimentados con urea. La disminución observada fue de 13%.

<b>Cuadro 35. Evaluación de un experimento comparativo entre maíz machacado y maíz "peletizado"<sup>1</sup></b>			
		<b>Preparación del maíz</b>	
<b>Item</b>		<b>Machacado</b>	<b>Peletizado</b>
No. de novillos		36	54
Peso corporal promedio, kg		420	411
Ganancia de peso diaria, kg		1.36	1.23
<b>Consumo diario, kg</b>			
	Maíz, grano	7.79	6.89
	Alfalfa, heno	2.18	2.38
	Suplemento	0.45	0.45
	<b>Total</b>	<b>10.47</b>	<b>9.72</b>
<b>Contenido de EN de la ración:</b>			
	ENm, Mcal/kg	1.82	1.79
	ENgp, Mcal/kg	1.14	1.12
	$W^{0.75}$	92.80	91.30
	Req. ENm, Mcal/día <sup>2</sup>	7.15	7.03
	Req. de alimento para mantención, kg/día	3.93	3.93
	Alimento destinable a ganancia, kg/día	6.49	5.79
	ENgp destinable a ganancia, Mcal/día	7.40	6.48
	Ganancia esperada, kg/día <sup>3</sup>	1.29	1.17
	Razón de ganancia observada sobre la esperada	1.05	1.05

<sup>1</sup> Según los datos de Clanton y Wood (1966).

<sup>2</sup> Calculado de la ecuación [117] o interpolado del Cuadro 31.

<sup>3</sup> Calculado de la ecuación [118] o interpolado del Cuadro 31.

La disminución esperada por el sistema de EN de aquellos tratamientos alimentados con grasa más urea predecían una disminución del 26% en la ganancia de peso, observándose en la realidad una disminución de 23%. Todo esto fue debido a que las raciones fueron isocalóricas en términos de EN y las disminuciones resultantes en la ganancia de peso, por la adición de grasa y de urea más grasa, fueron predichas por los requerimientos de EN y su consumo.

Cuadro 36. Análisis de un experimento <sup>1</sup> en raciones de novillos con urea y grasa			
Item	Ración		
	Urea	Grasa	Urea + Grasa
No. de novillos	20	20	20
Peso corporal, kg	396	389	382
Ganancia diaria, kg	0.87	0.76	0.67
Consumo diario, kg	10.3	9.9	9.8
Cálculo del contenido de EN de la ración:			
ENm, Mcal/kg	1.63	1.57	1.48
ENgp, Mcal/kg	0.96	0.84	0.77
$W^{0.75}$	88.8	87.6	86.4
Req. ENm, Mcal/día <sup>2</sup>	6.84	6.75	6.65
Req. alimento mantención, kg/día	4.20	4.30	4.49
Alimento destinable a ganancia, kg/día	6.10	5.60	5.31
ENgp destinable a ganancia, Mcal/día	5.86	4.70	4.09
Ganancia esperada, kg/día <sup>3</sup>	1.10	0.91	0.81
Disminución esperada en ganancia, %		17	26
Disminución observada en ganancia, %		13	23

<sup>1</sup> Thompson et al. (1967).

<sup>2</sup> Calculado de la ecuación [117] o interpolado del Cuadro 31.

<sup>3</sup> Calculado de la ecuación [118] o interpolado del Cuadro 31.

#### Ejemplo:

Se dispone de un concentrado con las características que se muestran en el cuadro que sigue a continuación. Calcule la ganancia de peso que se obtendría si el alimento se ofrece a animales de 400 kg de peso vivo, con un consumo diario de 10 kg y en condiciones de confinamiento en corral.

Ingrediente	% ración	ENm, Mcal		ENgp, Mcal		MS %
		Contenido	Aportado	Contenido	Aportado	
Melaza + urea	10	1.91	0.191	1.27	0.127	78
Pelón de almendra	50	1.14	0.570	0.58	0.290	90
Scbo animal	3	4.75	0.142	3.51	0.105	99
Afrecho raps	20	1.60	0.320	1.00	0.200	90
Avena	7	1.30	0.091	1.22	0.085	90
Harinilla de trigo	10	1.63	0.163	1.03	0.103	90
<b>Total</b>	<b>100</b>		<b>1.477</b>		<b>0.910</b>	

-Requerimiento	= (77) 400 <sup>0.75</sup>	= 6887 kcal	= 6.89 Mcal
-Consumo de alimento destinable a mantención	= 6.89/1.477	= 4.66 kg	
-Consumo total	= 10 kg		
-Consumo destinable a ganancia de peso	= 10 - 4.66	= 5.34 kg	
-ENgp	= 5.34 · 0.91	= 4.86 Mcal	

Del Cuadro 31 o de la fórmula [118], se obtiene que la ganancia de peso de los novillos, con un peso corporal de 400 kg, sería de 0.97 kg/día y para vaquillas del mismo peso, la ganancia sería de 0.84 kg/día.

#### d. Método de la energía neta variable

Este sistema se basa en los principios planteados por McHardy (1965). En este sistema se calcula la energía neta para cada alimento al nivel de producción del animal en estudio. Así, haciendo este sistema aditivo, se puede usar programación lineal. Las tasas de reemplazo pueden calcularse para cualquier situación y es de gran valor para la formulación de raciones con muchos ingredientes, sin usar programación lineal o las ecuaciones descritas anteriormente.

Este sistema de EN se basa en dos conceptos, el nivel de producción animal y la energía neta para mantención y producción. Para un nivel determinado de producción del animal, el alimento tiene una energía neta dependiente de la energía metabolizable.

(1) *Nivel de producción animal (NPA)*. Este nivel se define como el cociente entre la EN total requerida y la energía requerida para mantención:

$$NPA = \frac{ENm + ENgp}{ENm} = 1 + \frac{ENgp}{ENm} \quad [122]$$

Sabiendo que la energía neta de mantención o metabolismo de ayuno es igual a  $80 W^{0.75}$  y que la energía neta de la ganancia de peso es igual a:

$$ENgp = \frac{\text{Ganancia de peso} (1.5 + 0.0045 W)}{(1 - 0.30 \text{ ganancia de peso})} \quad [123]$$

entonces, para este sistema de energía, el nivel de producción animal será igual a:

$$NPA = 1 + \frac{\text{Ganancia peso } (1.5 + 0.0045 W)}{(1 - 0.30 \text{ ganancia peso}) (80 W^{0.75})} \quad [124]$$

Los valores del nivel de producción animal, para diferentes pesos y diferentes ganancias de peso, están tabulados en el Cuadro 37.

Cuadro 37. Niveles de producción animal según el peso y la ganancia diaria <sup>1</sup>						
Peso, kg	Ganancia de peso, kg/día					
	0.30	0.50	0.80	1.00	1.30	1.50
100	1.0003	1.0005	1.0008	1.0011	1.0016	1.0021
150	1.0002	1.0004	1.0007	1.0009	1.0014	1.0017
200	1.0002	1.0003	1.0006	1.0008	1.0012	1.0015
300	1.0002	1.0003	1.0005	1.0007	1.0011	1.0013
400	1.0002	1.0003	1.0005	1.0007	1.0010	1.0013
500	1.0001	1.0003	1.0005	1.0006	1.0009	1.0012
600	1.0001	1.0003	1.0005	1.0006	1.0009	1.0012

<sup>1</sup> Basado en la ecuación [124]

(2) *Energía neta para mantención y producción.* En el sistema de EM para animales de carne, la eficiencia de utilización de la energía metabolizable para mantención (Km) se ha fijado en 0.72 y la eficiencia para engorda (Kgp) es dependiente de la concentración calórica de la ración.

La eficiencia total del uso de la energía metabolizable para mantención y producción (Kmp) es, por lo tanto, variable y depende de la proporción de energía metabolizable utilizada para mantención o para engorda. Se puede definir como la razón entre el requerimiento de energía neta para mantención y producción y el requerimiento total de EM (EMmp):

$$Kmp = \frac{ENm + ENgp}{EMmp} \quad [125]$$

dado que:

$$EMmp = EMm + EMgp$$

entonces,

$$Kmp = \frac{ENm + ENgp}{EMm + EMgp} \quad [126]$$

El requerimiento de EM para mantención (EMm) es igual a la energía neta de mantención dividida por Km:

$$Kmp = \frac{ENm}{0.72} \cdot 1.05 \quad [127]$$

además, según [122]:

$$NPA = \frac{ENm + ENgp}{ENm}$$

entonces:

$$ENgp = ENm (NPA - 1) \quad [128]$$

La energía metabolizable para producción quedará expresada como:

$$EMgp = \frac{ENm (NPA - 1) 1.05}{0.18 [EM]} \quad [129]$$

Sustituyendo en Kmp los valores de ENgp, ENm, EMgp y EMm por las ecuaciones que los definen, se obtiene:

$$Kmp = \frac{NPA [EM]}{1.46 [EM] + 5.83 (NPA - 1)} \quad [130]$$

Así, la eficiencia total de uso de la energía metabolizable se puede calcular para cualquier nivel de producción animal (NPA) y concentración calórica de la ración [EM], como se observa en el Cuadro 38.

Cuadro 38. Eficiencia total de la EM utilizada (Kmp) <sup>1</sup>							
Nivel de producción animal	Concentración calórica, Mcal/kg MS						
	1.91	2.15	2.39	2.63	2.87	3.10	3.35
1.00	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68
1.25	0.56	0.58	0.60	0.62	0.64	0.65	0.66
1.50	0.50	0.53	0.56	0.58	0.61	0.62	0.64
1.75	0.47	0.50	0.53	0.56	0.59	0.61	0.63
2.00	0.44	0.48	0.51	0.54	0.57	0.60	0.62
2.25	0.43	0.46	0.50	0.53	0.56	0.59	0.62

<sup>1</sup> Según ecuación [130]

La energía neta para mantención y producción, tanto de una ración como de un alimento, puede obtenerse por medio de la multiplicación del contenido de EM en la materia seca por la eficiencia del uso de la energía metabolizable total (Kmp):

$$ENmp = (EM \text{ alimento})(Kmp)$$

$$ENmp = \frac{[EM]^2}{1.46 [EM] + 5.83 (NPA - 1)} \quad [131]$$

donde:

ENmp = energía neta para mantenimiento y producción, Mcal/kg MS

A estos valores debe incluirse un 5% de margen de seguridad.

En el Cuadro 39 aparecen los diferentes niveles de EN para mantención y producción, de acuerdo al nivel de producción animal y la concentración calórica del alimento.

Cuadro 39. Valores de energía neta para mantención y producción (ENmp) <sup>1</sup> , Mcal/kg MS							
Nivel de producción animal	Concentración calórica, Mcal/kg MS						
	1.91	2.15	2.39	2.63	2.87	3.10	3.35
1.00	1.31	1.47	1.64	1.80	1.97	2.12	2.29
1.25	1.07	1.26	1.44	1.63	1.82	2.01	2.21
1.50	0.96	1.15	1.34	1.54	1.74	1.94	2.16
1.75	0.89	1.08	1.27	1.47	1.68	1.89	2.12
2.00	0.85	1.03	1.23	1.43	1.64	1.86	2.09
2.25	0.81	1.00	1.19	1.40	1.61	1.83	2.07

<sup>1</sup> Según ecuación [131]

El valor relativo de los alimentos es importante cuando se requiere tomar decisiones de compra o sustitución en raciones para animales de carne estabulados, especialmente cuando el nivel de producción está definido.

*Ejemplo:*

Como ejemplo de reemplazo de dos alimentos, se tiene un nivel de producción animal de 1.25. Los animales se alimentan con dos ingredientes: A (2.39 Mcal EN/kg y EN total 1.44 Mcal/kg) y B (3.35 Mcal EM/kg y EN total 2.21 Mcal/kg). Los valores de EN total se obtuvieron del Cuadro 39.

El cociente entre B y A es:

$$\frac{2.21}{1.44} = 1.53 \text{ kg}$$

Este cociente indica que 1.53 kg de MS del alimento A pueden reemplazar a 1 kg de materia seca del alimento B, en una ración de engorda para un nivel de producción animal de 1.25.

Debe destacarse que en este sistema de EN no se puede predecir el rendimiento animal dado que la ganancia de peso debe ser conocida para poder calcular el nivel de producción animal y, por ende, los niveles de EN de producción y mantención.

## 9. LITERATURA CITADA

- ABRAMS, J.T. 1950. Linton's animal nutrition and veterinary dietetics. 3ed. Edinburgh, U.K. W. Green and Sons.
- ABREU, M. P. 1975. Simulación de crecimiento y performance reproductiva en vaquillonas de primero y segundo entore. In *Sistemas de Producción Pecuaria: Principios y Aplicación de Investigación y Extensión*. H. Caballero D. (Ed.). Montevideo. IICA. Informes de Conferencias, Cursos y Reuniones No. 63. p. 39-48.
- AGUILAR, G.C. 1983. Regulación de temperatura en bovinos. In *Seminario de Postgrado*. Departamento de Zootecnia, Facultad de Agronomía, Pontificia Universidad Católica de Chile. 8 p. (Mimeografiado).
- ALDERMAN, G. 1979. Application of practical rationing systems. In *Standardization of analytical methodology for feeds*. W.J. Pigden, C.C. Balch, M. Graham (Eds.). Ottawa, Canada. IDRC Publication IDRC-134e. p. 29-35.
- ARC (AGRICULTURAL RESEARCH COUNCIL). 1980. The nutrient requirements of ruminant livestock. Commonwealth Agricultural Bureaux, Farnham Royal, England. Gresham Press. 351 p.
- ARMSBY, H.P. 1917. The nutrition of farm animals. New York. MacMillan Co. 493 p.
- ARMSTRONG, D.G. 1964. Evaluation of artificially dried grass as a source of energy for sheep. 2. The energy value of cocksfoot, timothy and two strains of rye-grass at varying stages of maturity. *Journal of Agricultural Science, Camb.* 62:399-416.
- ARNOLD, G.W. 1981. Grazing behavior. In *Grazing animals*. F.H.W. Morley (Ed.). Amsterdam, Elsevier. World Animal Science B1. p. 79-104.
- ATWATER, W.O.; BRYANT, A.P. 1899. The availability and fuel value of food materials. Storrs Agricultural Experiment Station Annual Reports. p. 73-110.
- BALDWIN, R.L. 1968. Estimation of theoretical calorific relationships as a teaching technique: A review. *Journal of Dairy Science* 51:104.
- BALDWIN, R.L.; SMITH, N.E.; TAYLOR, J.; SHARP, M. 1980. Manipulating metabolic parameters to improve growth rate and milk secretion. *Journal of Animal Science* 51(6):1416-1428.
- BARNES, R.F. 1973. Laboratory methods of evaluating feeding value of herbage. London, Academy Press. p. 179-214.
- BLAXTER, K.L. 1962. The energy metabolism of ruminants. London, Hutchinson Publishing Group. 329 p.

- BLAXTER, K.L.; WILSON, R.S. 1963. The voluntary intake of roughage by steers. *Animal Production* 4(3):351-358.
- BLAXTER, K.L. 1964. Metabolizable energy and feeding systems for ruminants. *Proceedings of the Nutrition Conference for Feed Manufacturers*. London, Butterworth.
- BLAXTER, K.L. 1974. Metabolizable energy and feeding systems for ruminants. *Proceedings of the Nutrition Conference for Feed Manufacturers*. London, Butterworth. p. 3-25.
- BLAXTER, K.L. 1977. Environmental factors and their influence on the nutrition of farm livestock. In *Nutrition and the climatic environment*. W. Haresign, H. Swan, D. Lewis (Eds.). London, Butterworths.
- BRODY, S. 1968. *Bioenergetics and growth*. New York, Hafner. 1023 p.
- CANNON, W.B. 1932. *The wisdom of the body*. New York, W.W. Norton and Co. 1962 p.
- CAÑAS, R. 1974. The lactational efficiency complex in rats Ph.D. Thesis. Dept. of Animal Science, University of California at Davis. 175 p.
- CAÑAS, R.; GASTO C., J. 1974. Costo de cosecha y eficiencia de producción de ecosistemas ganaderos. *Ciencia e Investigación Agraria (Chile)* 1(4):179.
- CAÑAS, R.C.; AGUILAR, C.G.; GASMAN, M. 1983. Relaciones bioenergéticas en sistemas de producción de bovinos. *Sistemas en Agricultura (Chile)* 4(5):1-102.
- CAÑAS, R.C. 1989. Alimentación de bovinos a pastoreo. In *Seminario Técnico Económico de la Ganadería Bovina de la Zona Sur de Chile*. Depto. de Economía Agraria, Facultad de Agronomía, Universidad Católica de Chile. 104 p.
- CAÑAS, R.C.; NAVARRO, R. 1991. Efecto del nivel de consumo y tipo de dieta sobre el requerimiento de mantención. *Ciencia e Investigación Agraria (Chile)*. En prensa.
- CATRILEO, A. 1981. Modelo de simulación para predecir el consumo y ganancia de peso de novillos a pastoreo. Tesis Mag. Sc. Facultad de Agronomía, Pontificia Universidad Católica de Chile. 79 p.
- CLANTON, D.C.; WOOD, W. 1966. Performance of steers and rumen fermentation as influenced by physical form of ingredients and alfalfa:corn ratio. *Journal of Animal Science* 25:102-106.
- CONRAD, H.R. 1966. Symposium on factors influencing the voluntary intake of herbage by ruminants: Physiological and physical factors limiting feed intake. *Journal of Animal Science* 25:227-235.
- DICKERSON, R.E.; GRAY, H.B.; HAIGHT, G.P. 1974. *Chemical principles*. 2 ed. California, Benjamin. 650 p.
- DONEFER, E.; NIEMANN, P.J.; CRAMPTON, E.W.; LOYD, L.E. 1963. Dry matter disappearance by enzyme and aqueous solutions to predict the nutritive value of forages. *Journal of Dairy Science* 46:965-970.
- FARID, M.; BALDWIN, R.L.; YANG, Y.T.; OSBORNE, E.; GRITCHING, G. 1978. Effects of age, diet and lactation on lipogenesis in rat adipose, liver and mammary tissue. *Journal of Nutrition* 108:514-524.
- GANONG, W.F. 1981. *Review of medical physiology*. 10 ed. Los Altos, California, Lange Medical Publication. 628 p.

- GARCIA, G.F. 1987. Efecto del medio ambiente en el comportamiento de vacas lecheras. In Seminario de Producción de Leche. Temuco, Chile. Departamento de Zootecnia, Facultad de Agronomía, Pontificia Universidad Católica de Chile. 172 p.
- GARCIA, G.F.; AGUILAR, C.; CAÑAS, R. 1990. Formulación de dietas para rumiantes. In Curso de Extensión, Facultad de Agronomía, Pontificia Universidad Católica de Chile.
- GARRETT, W.N.; MEYER, J.H.; LOFGREEN, G.P. 1959. The comparative energy requirements of sheep and cattle for maintenance and gain. *Journal of Animal Science* 18:528-547.
- GEIGER, L.W.; CANOLTY, N.L. 1978. Influence of dietary protein concentration upon energy utilization of fat and carbohydrate. *Journal of Nutrition* 108:1540-1545.
- GOERING, H.K.; VAN SOEST, P.J. 1970. Forage fiber analyses (apparatus, reagents, procedures and some applications). *Agricultural Handbook No. 379*. Washington, D.C., ARS, USDA. 20 p.
- GOTO, I.; MENSON, D.J. 1977. Prediction of the dry matter digestibility of tropical grasses using a pepsin-cellulase bioassay. *Animal Feed Science and Technology* 2:247-253.
- GOUGH, H.C. 1975. Energy allowances and feeding systems for ruminants. London, Her Majesty's Stationery Office Government Bookshop. 79 p.
- GUYTON, A.C. 1981. *Textbook of medical physiology*. 6 ed. Philadelphia, PA, W.B. Saunders Co. 1074 p.
- HARPER, H.A. 1976. *Manual de química fisiológica*. 5 ed. México, El Manual Moderno. 653 p.
- HARTLEY, R.D.; JONES, E.C.; FENLON, J.S. 1974. Prediction of the digestibility of forages by treatment of their cell walls with cellulolytic enzymes. *Journal of the Science of Food and Agriculture (England)* 25:947-954.
- HMSO (HER MAJESTY'S STATIONERY OFFICE). 1975. Energy allowances and feeding systems for ruminants. London, Ministry of Agriculture, Fisheries and Food. *Technical Bulletin* 33.
- JARRIGE, R.; THIVOND, P.; DEMARQUILLY, C. 1970. Development of cellulolytic enzyme digestion for predicting the nutritive value of forages. In *Proceedings of the 11th International Grassland Congress, Surfers Paradise, Australia*. p. 762-766.
- JONES, D.I.H.; HAYWARD, M.V. 1973. A cellulase digestion technique for predicting the dry matter digestibility of grasses. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 24:1419-1426.
- JONES, D.I.H.; HAYWARD, M.V. 1975. The effect of pepsin-pretreatment of herbage on the prediction of dry matter digestibility from solubility in fungal cellulase solution. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 26:711-718.
- KLEIBER, M. 1961. *The fire of life: An introduction to animal energetics*. New York, N.Y. Wiley and Sons. 454 p.
- KLEIBER, M. 1972. *Bioenergética animal: El fuego de la vida*. E. Sánchez, A. Smith (Trad.). Zaragoza, Acribia. 428 p.
- KOONG, L.J.; FERRELL, C.L.; WIENABER, J.A. 1982. Effects of plane of nutrition on organ size and fasting heat production in swine and sheep. In *Energy metabolism of farm animals*. EAAP Publication No. 29:245.

- LAMBOURNE, L.J.; REARDON, T.F. 1963. Effect of environment on the maintenance requirements of Merino wethers. *Australian Journal of Agricultural Research* 14:272-292.
- LEHNINGER, A.L. 1985. *Bioquímica*. 2 ed. J. Bozal Fes; F. Calvet Prats (Trads.). Barcelona, Ediciones Omega. 447 p.
- LOFGREEN, G.P. 1963. Net energy - the new way to reckon rations. *Western Livestock Journal* 41:40.
- LOFGREEN, G.P.; GARRETT, W.N. 1968. A system for expressing net energy requirements and feed values for growing and finishing beef cattle. *Journal of Animal Science* 27:793-806.
- MARCHI, A. 1973. Principios generales para la suplementación de ganado. *Información Técnica* No. 100. San Luis, Argentina. INTA.
- MARTEN, G.C.; BARNES, R.F. 1979. Prediction of energy digestibility of forages with *in vitro* rumen fermentation and fungal enzyme systems. In *Standardization of Analytical Methodology for Feeds*. W.J. Pigthen, C.C. Bach, M. Graham (Eds.). Ottawa, Canada. *Proceedings of a Workshop*. p. 61-71.
- MAYNARD, L.A. 1947. *Animal nutrition*. 3 ed. New York, McGraw Hill. 474 p.
- MAYNARD, L.A.; LOOSLI, J.K. 1969. *Animal nutrition*. 6 ed. New York, McGraw-Hill. 613 p.
- McDONALD, P. 1973. *Animal nutrition*. 2 ed. Edinburgh, England, Oliver and Boyd. 320 p.
- McHARDY, 1965. Abstracts 9th International Congress of Animal Production. *Animal Production* 19:141.
- McQUEEN, R.; VAN SOEST, P.J. 1975. Fungal cellulase and hemicellulase prediction of forages digestibility. *Journal of Dairy Science* 58:1482-1491.
- MINSON, D.J. 1979. Relationships of conventional and preferred fractions to determine energy values. In *Standardization of Analytical Methodology for Feeds*. *Proceedings of a Workshop*. W.J. Pigden; C.C. Baech; M. Graham (Eds.). Ottawa, Canada. p. 72.
- MORGAN, D.E. 1974. Development of laboratory methods of estimating the digestibility and energy value of forages. London, Her Majesty's Stationery Office. *Agricultural Development and Advisory Service. Annual Report (Science Arm Annual Report 1972)*. p. 94-103.
- NRC (NATIONAL RESEARCH COUNCIL). 1978. Nutrient requirements of beef cattle. 6 ed. National Academy of Science. Washington, D.C., National Academy Press. 95 p.
- ORTUZAR, J.S. 1979. Un modelo de simulación por computación para predecir el cambio de peso y producción de lana en ovinos a pastoreo. Tesis Ing. Agr. Facultad de Agronomía, Universidad Católica de Chile. 64 p.
- PALADINES, O.; TORRES, A.; SCARPA, P. 1987. Estrés por competencia de alimento. 1. Dificultad de acceso al alimento. *Ciencia e Investigación Agraria (Chile)* 14(2):127-136.
- PULIDO, R. 1988. Efecto del nivel de consumo y tipo de dieta sobre el requerimiento de mantención de ratas en crecimiento. Tesis Mag. Sci. Facultad de Agronomía, Universidad Católica de Chile. 67 p.
- RAYMOND, W.F. 1966. Aplicación de las técnicas de digestibilidad *in vitro*. In *Métodos in vitro para determinar el valor nutritivo de los forrajes*. O. L. Paladines (Ed.). Montevideo, IICA, Serie Miscelánea No. 4. p. 1-29.

- REID, J.T.; WHITE, O.D.; ANRIQUE, R.; FORTIN, A. 1980. Nutritional energetics of livestock: Some present boundaries of knowledge and future research needs. *Journal of Animal Science* 51(6):1393.
- ROMPALA, R.E.; HOAGLAND, T.A. 1987. Effect of level of alimentation on visceral organ mass and the morphology and Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup> adenosinetriphosphatase activity of intestinal mucosa in lambs. *Journal of Animal Science* 65:1058-1063.
- ROZAS, R.; CAÑAS C., R.; GASTO, J.; AGUILAR, C.; FRIEDLY, C. 1978. Costo ecológico de cosecha de alimento por ovinos a pastoreo. In IV Conferencia Mundial de Producción Animal. Memorias. L.S. Verde, A. Fernández (Eds.). Buenos Aires, Argentina. V. 4, p. 136.
- SALAS, D.R. 1988. Costo de cosecha y estrés por competencia en ovinos a pastoreo continuo y rotativo. Tesis Mag. Sci. Facultad de Agronomía, Pontificia Universidad Católica de Chile. 88 p.
- SCHNEIDER, B.H. 1954. The total digestible nutrient system of measuring nutritive energy. 100 Jahre Moeckern. Die bewertung der futterstoffe und andere probleme der tierenaehrung. K. Nehring (Ed.). Berlin, Deutscher Bauernverlag 2:233.
- SCHNEIDER, B.H.; FLATT, W.P. 1975. The evaluation of feeds through digestibility experiments. Athens, The University of Georgia Press. 423 p.
- SCHMID, A.R.; GODRICH, R.D.; MARTEN, G.C.; MEISKE, J.C.; JORDAN, R.M.; HALGERSON, J.L. 1975. Evaluation laboratory methods for determining quality of corn and sorghum silages. I. Biological methods for predicting *in vivo* digestibility. *Agronomy Journal* 67:243-251.
- SELYE, H. 1955. The stress concept. Part I. Fifth Annual Report on Stress, 1955-56. New York, M.D. Pub. Inc.
- SMITH, N.W. 1970. Quantitative simulation analyses of ruminant metabolic functions: Basal; lactation; milk fat depression. Ph.D. Dissertation. Davis, University of California. 367 p.
- THOMPSON, J.T.; BRADLEY, N.W.; LITTLE, C.O. 1967. Utilization of urea and fat in meal and pelleted rations for steers. *Journal of Animal Science* 26:830-835.
- TILLEY, J.M.A.; TERRY, R.A. 1963. A two-stage technique for the *in vitro* digestion of forage crops. *Journal of the British Grassland Society* 18:104-111.
- TORRES, F.; CHIFFLET DE VERDE; OTERO, J.; LOPEZ, C. 1974. Disponibilidad y consumo en pastoreo. III. Efecto simulado de la disponibilidad sobre el mantenimiento y la ganancia de peso en novillos a pastoreo. *Producción Animal* 5:85-90.
- VAN ES, A.J.H. 1975. Feed evaluation for dairy cows. *Livestock Production Science* 2:95.
- VAN SOEST, P.J.; WINE, R.H.; MOORE, L.A. 1966. Estimation of the true digestibility of forages by the *in vitro* digestion of cell walls. In 10th International Grassland Congress. Proceedings. Helsinki, Finland. p. 438-441.
- VAN SOEST, P.J.; MERTENS, D.R. 1977. Analytical parameters as guides to forage quality. In International Meeting of Animal Production. Proceedings. Dublin, Eire, Temperate Grasslands. 50 p.
- WINCHESTER, C.F.; HENDRICKS, W.A. 1953. Energy requirements of beef cows for maintenance and growth. Washington, D.C., U.S. Department of Agriculture, Technical Bulletin 1071. 18 p.

# CAPÍTULO II

## REQUERIMIENTO DE PROTEÍNA EN GANADO LECHERO

*Fernando García Gómez*

*Departamento de Zootecnia, Facultad de Agronomía  
Pontificia Universidad Católica de Chile*

## CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN .....	105
2. PROTEÍNA DEL ALIMENTO .....	106
3. FACTORES QUE AFECTAN LA DIGESTIBILIDAD DE LA PROTEÍNA .....	107
4. DESTINO DE LA PROTEÍNA CRUDA DEL ALIMENTO (NP+NNP) .....	108
a. Ciclo del nitrógeno en rumiantes .....	108
b. Nitrógeno metabólico fecal .....	110
c. Nitrógeno urinario .....	112
d. Síntesis de proteína superficial .....	112
e. Síntesis de proteína para ganancia de peso .....	113
f. Síntesis de proteína láctea .....	116
g. Requerimientos proteicos para microorganismos ruminales .....	117
5. PROTEÍNA PARA REPRODUCCIÓN .....	119
6. CÁLCULO DE REQUERIMIENTOS PROTEICOS .....	120
a. Criterios para la formación de grupos de alimentación .....	121
b. Antecedentes previos al cálculo .....	121
c. Requerimiento para mantención del animal .....	122
d. Requerimiento para crecimiento .....	123
e. Requerimiento para producción de leche .....	123
f. Requerimientos totales .....	124
g. Requerimiento de proteína para el período seco .....	125
7. USO DE ANÁLISIS SANGUÍNEOS, FECALES Y URINARIOS PARA DETERMINAR EL ESTADO NUTRICIONAL DEL ANIMAL .....	127
a. Proteínas plasmáticas .....	128
b. Nitrógeno ureico .....	129
c. Transaminasas .....	129
d. Colesterol .....	129
8. LITERATURA CITADA .....	130

## CAPÍTULO II

# REQUERIMIENTO DE PROTEÍNA EN GANADO LECHERO

*Fernando García Gómez*

*Departamento de Zootecnia, Facultad de Agronomía  
Pontificia Universidad Católica de Chile*

### 1. INTRODUCCIÓN

El término proteína agrupa una serie de compuestos con algunas características comunes. La mayoría de las moléculas proteicas son de tamaño grande, existiendo una alta variabilidad en el largo de la cadena peptídica. Todas las proteínas están constituidas por la unidad básica conocida como amino ácido, a su vez están presentes en cantidades y proporciones variables. Muchas proteínas contienen otras sustancias en sus moléculas, como por ejemplo lípidos, carbohidratos o minerales (tales como hierro y fósforo), que les confieren funciones y propiedades específicas.

Frecuentemente, las proteínas se caracterizan de acuerdo a su forma y composición que pueden ser de:

- a. *Estructura primaria* es la estructura de una cadena simple de amino ácidos.
- b. *Estructura secundaria* se refiere a la estructura en forma de hélice de una cadena aminoacídica.
- c. *Estructura terciaria* resulta del doblamiento de una estructura helical produciendo distintas formas: globular como la mioglobina, linear como el fibrinógeno, etc.
- d. *Estructura cuaternaria* se refiere a la combinación de dos o más monómeros que individualmente se pueden clasificar como estructura terciaria.

Por otra parte, las proteínas se pueden clasificar de acuerdo a su composición química:

- a. *Proteínas simples*, que contienen los elementos básicos de los amino ácidos: C, H, O, N y S.
- b. *Proteínas conjugadas*, son aquellas unidas a elementos, grupos prostéticos u otros compuestos:
  - metaloproteínas (ejemplo, ferritín (Fe))
  - fosfoproteínas (ejemplo, caseína (fosfato))
  - lipoproteínas (ejemplo, HDLP)
  - glicoproteínas (ejemplo, glicohemoglobina)
  - nucleoproteínas (ejemplo proteínas ribosomales)

Por último, las proteínas también se clasifican según sus propiedades físicas: grado de solubilidad, densidad o por peso molecular.

Dado que la unidad fundamental de toda proteína son los amino ácidos, se les ha dado gran importancia. Existen alrededor de 25 amino ácidos diferentes, los que se clasifican desde el punto de vista nutricional, en esenciales y en no-esenciales. Los primeros tienen que ser absorbidos por el organismo para su uso posterior mientras que los no-esenciales se sintetizan dentro del organismo del animal. Según Maynard *et al.* (1979), alrededor del 60% del total de amino ácidos del organismo animal corresponde a los amino ácidos esenciales y el 40% a los no-esenciales. Esta clasificación cobra gran importancia para la nutrición de las especies no-rumiantes; en el caso de las especies rumiantes esos amino ácidos son sintetizados por las bacterias ruminales. Sin embargo, los microorganismos ruminales, en algunas ocasiones no son capaces de producir suficiente proteína para satisfacer las necesidades de animales de alta producción. En tales casos, la productividad del animal depende en gran medida de la máxima productividad proteica bacteriana y también de aquella proteína que escapa de la acción ruminal y llega intacta al abomaso y a los sitios de absorción del intestino delgado.

## 2. PROTEÍNA DEL ALIMENTO

Para determinar la proteína total de un alimento se realiza la determinación del total de nitrógeno (N) presente en la muestra el que posteriormente se multiplica por el factor 6.25, suponiendo un contenido del 16% de nitrógeno en la proteína. Por consiguiente, la proteína total o cruda de un alimento estará compuesta por proteína verdadera y por sustancias nitrogenadas no-proteicas.

Es bien sabido que los forrajes cambian su composición química conforme maduran. Es así como los forrajes tiernos poseen un alto valor nutritivo y a medida que maduran se produce una reducción en su contenido proteico y un aumento en su contenido de fibra. De esta manera, y en forma paralela, disminuye la digestibilidad de la materia seca afectando el consumo voluntario por parte de los animales.

Al disminuir la relación hoja:tallo disminuye el contenido proteico de la planta y también disminuye la digestibilidad de la proteína, al adquirir una mayor importancia como componente de la materia seca total de la planta el nitrógeno asociado con la fracción de lignina de la pared celular.

El nitrógeno total determinado como componente de la materia seca de los forrajes, puede clasificarse como nitrógeno proteico (NP) y como nitrógeno no-proteico (NNP). Este último es soluble y se convierte a  $\text{NH}_3$  por acción de las bacterias ruminales. El grado de solubilidad del NP es variable según la especie y el tipo y calidad del método de conservación que se utilice.

Ultimamente, con el objetivo de cuantificar en mejor forma los requerimientos proteicos de los animales de alta producción, ha adquirido mayor importancia el conocimiento del grado de solubilidad y degradabilidad de la proteína del alimento a nivel ruminal. Sin embargo, antecedentes sobre este aspecto, que denotan un interés por caracterizar mejor la proteína del alimento se remiten a varios años atrás (Little *et al.* 1963; Whitelaw y Preston 1963; Wohlt *et al.* 1973).

A pesar del esfuerzo desarrollado para la caracterización de la proteína de los alimentos, todavía falta estandarización de los métodos analíticos (Kass 1990). Esto ha impedido contar con valores fidedignos de la amplia gama de recursos alimenticios para el ganado y de ser más precisos en la cuantificación de la nutrición proteica del ganado. Por lo tanto, parece importante seguir con los esfuerzos en este aspecto, el que constituye una parte importante para determinar requerimientos proteicos en animales rumiantes, tendientes a optimizar los sistemas productivos durante los estados fisiológicos de los animales.

### 3. FACTORES QUE AFECTAN LA DIGESTIBILIDAD DE LA PROTEÍNA

Una de las medidas del grado de aprovechamiento de la proteína de la dieta es el coeficiente de digestibilidad aparente. Diversos métodos se han descrito, pudiendo diferenciarse métodos *in vivo* y métodos *in vitro*.

La evaluación de la digestibilidad de un nutriente en particular involucra la determinación de la cantidad del nutriente consumido que aparece en las heces, obteniendo por diferencia la cantidad del nutriente que desaparece en el aparato digestivo y que aparentemente habría sido absorbido.

La utilidad de la determinación del coeficiente de digestibilidad de un nutriente o de un alimento es que permite evaluar la utilización por el animal de ese nutriente, alimento o ración que se le ofreció y para cuantificar el consumo de nutrientes digestibles. Puede agregarse otros objetivos, como por ejemplo, la identificación de factores que afectan la digestibilidad. Entre esos factores, se ha podido identificar los siguientes:

#### Plano nutricional

Al aumentar el nivel de consumo se obtiene una disminución de la digestibilidad de aquellos nutrientes que aportan energía. Es decir, un aumento en el consumo de alimentos disminuye la digestibilidad de la energía del alimento aumentando la energía en las heces. El efecto del aumento de consumo sobre la digestibilidad de otros nutrientes es menos clara. Tyrrell y Moe (1975) encontraron que la digestibilidad de la energía disminuye en un 4% por aumento del consumo por múltiplo de mantención en vacas en lactancia. Esto significa que una vaca lactante que aumente su consumo de energía en cuatro veces su requerimiento de mantención producirá una disminución en la digestibilidad de ese nutriente en 12% relativo a los resultados a nivel de mantención. Sin embargo, esto es variable dependiendo del alimento; Tyrrell *et al.* (1981) encontraron que la depresión de la digestibilidad se reduce al aumentar el contenido proteico de la dieta y que esta reducción es mayor a medida que aumenta la insolubilidad de la proteína.

#### Contenido de fibra o de lignina en el alimento

Como regla general, la digestibilidad del alimento disminuye conforme aumenta el contenido de fibra en la dieta.

#### Grado de finura o tamaño de partícula

Este aspecto se relaciona con la velocidad de pasaje de la digesta y con el grado de colonización de las partículas por las bacterias ruminales.

#### Especie animal

Se ha encontrado diferencias en el grado de utilización del alimento entre distintas especies; por ejemplo, al comparar bovinos con ovinos y caprinos. Estas dos últimas especies son capaces de un mayor aprovechamiento de forraje tosco con un bajo contenido proteico que bovinos. Por otra parte, Hungate (1966) ha informado que existiría una notoria diferencia entre *Bos taurus* y *Bos indicus* en lo referente a velocidad de fermentación ruminal.

#### Deficiencias nutricionales

Aparentemente, cualquier deficiencia que afecte el metabolismo de los microorganismos ruminales afectará el grado de aprovechamiento del alimento. En este sentido, un desbalance mineral puede afectar significativamente el paso de nutrientes al interior de la célula bacteriana afectando su crecimiento y su función.

### Frecuencia de consumo

Posiblemente el mayor efecto de la frecuencia de consumo está en la retención más que en la digestibilidad. Este mismo hecho en que con una baja frecuencia de consumo exista una tendencia al mayor depósito de tejido adiposo causa una menor retención de proteína en el organismo debido a que parte del nutriente también será utilizado para lipogénesis.

### Pre-tratamiento del alimento

Cuando el alimento se trata con calor puede ocurrir un efecto muy marcado en el grado de aprovechamiento de la proteína, especialmente en especies rumiantes. En estas, por efecto del tratamiento con calor la proteína se hace menos degradable a nivel ruminal, lográndose un mayor aprovechamiento (digestión + absorción) a nivel de intestino. Por otra parte, tratamientos con exceso de temperatura puede afectar la digestibilidad de la proteína en forma negativa.

### Adaptación a cambios de dieta

Cambios bruscos en la dieta producen un significativo cambio en la población bacteriana ruminal. Esto mismo hace que la digestibilidad de la materia seca, y de los nutrientes que la componen, se vea afectada hasta que la tasa de multiplicación de los microorganismos alcance el equilibrio y se haya normalizado el consumo voluntario de alimentos.

### Asociación entre ingredientes de la dieta

Este aspecto es bastante claro en especies no-rumiantes en que existe una complementación entre grupos de nutrientes; por ejemplo, grasa y carbohidratos con proteína. En especies rumiantes, esta misma asociación puede tener un efecto marcado en el metabolismo de los microorganismos ruminales. De hecho, se consigue una mejor respuesta al alimentar vacas lecheras de alta producción cuando se usan todos los ingredientes alimenticios en una sola mezcla cada vez que se alimenta al ganado comparado con el suministro de los ingredientes por separado. Este hecho sugiere que se produce un mayor y más homogéneo crecimiento bacteriano y un consiguiente efecto sobre la materia seca de la dieta.

## 4. DESTINO DE LA PROTEÍNA CRUDA DEL ALIMENTO (NP+NNP)

### a. Ciclo del nitrógeno en rumiantes

Para mayor claridad de la explicación sobre el destino de la proteína de la dieta es más

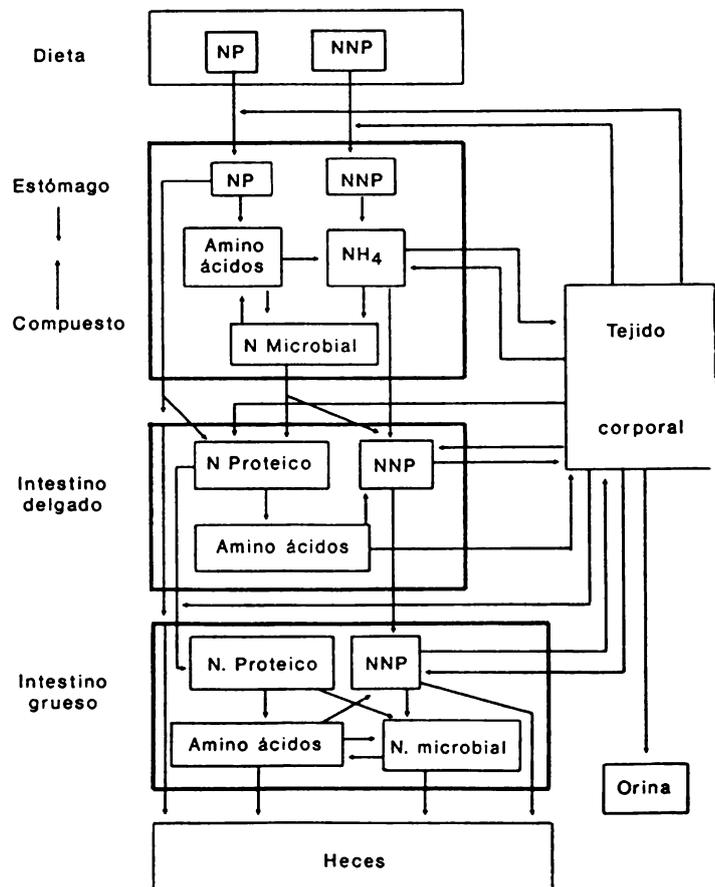


Fig. 1 Ciclo del nitrógeno en rumiantes

conveniente referirse genéricamente a su componente básico, el N, y dado que existe intercambio de N entre diversos compartimentos del organismo animal es preferible denominar a esta sección como el *ciclo del nitrógeno*.

En la Fig. 1 aparece representado el paso del N de la ingesta por los compartimentos del organismo animal hasta que es excretado en heces y orina. Esto permite comprender los varios cambios que se producen en los compuestos nitrogenados consumidos por el animal, la forma en que el animal puede adaptarse a variaciones en el suministro de compuestos nitrogenados y las funciones del animal que se verían afectadas.

Se aprecia en la Fig. 1 que el N consumido corresponde al N contenido en las proteínas y en moléculas nitrogenadas no-proteicas. Estas últimas corresponden a ácidos nucleicos, amino ácidos libres, aminas contenidas en el alimento y a la urea contenida en la saliva o aportada como parte de la dieta.

En la cavidad retículo-ruminal, parte de las proteínas escapan a la acción bacteriana y continúan su tránsito hacia el abomaso e intestino delgado. Aquellas proteínas que son atacadas por los microorganismos ruminales se hidrolizan a sus amino ácidos constituyentes; éstos a su vez son desaminados e incorporados a la célula de la bacteria y usados por ésta como fuente de energía y como base para la síntesis de proteína microbial en combinación con el  $\text{NH}_4^+$ , el que también es captado. El  $\text{NH}_4^+$  proviene de los amino ácidos contenidos en la proteína de la dieta, del NNP ingerido y del  $\text{NH}_4^+$  que traspasa el epitelio ruminal desde la sangre. Esta última fracción nitrogenada es producto del intercambio de N entre la sangre y el lumen de la cavidad ruminal, siendo de gran importancia para mantener relativamente constante los niveles de N en el rumen en condiciones de déficit o de exceso de proteína de la dieta.

En condiciones de déficit proteico, la cantidad de N no dietético que llega al rumen aumenta al activarse los mecanismos de ahorro de N (disminuye la cantidad de N excretado vía orina) que conllevan un aumento de N hacia el rumen, vía saliva y vía epitelio ruminal.

Otro aporte de N al ambiente ruminal está constituido por el N proveniente de la descamación del epitelio ruminal. El grado de descamación se ve afectado por el consumo de materia seca, siendo mayor cuando se incrementa la porción indigestible de la dieta. Esta última porción variará por la velocidad de pasaje de la digesta y por el contenido de materia seca indigestible de la dieta. La descamación celular no sólo afecta a la cavidad retículo-ruminal, sino que también a la totalidad del aparato digestivo y, junto con otras secreciones que no son re-absorbidas, constituye el nitrógeno metabólico fecal (NMF) o proteína metabólica fecal (PMF). En la Fig. 1, esta fracción aparece como ingreso de N desde el organismo al lumen del aparato digestivo.

Ya en el intestino delgado, se distinguen, como fracciones nitrogenadas, la proteína bacteriana sintetizada en el rumen, la proteína de la dieta que no fue degradada ruminalmente y otra fracción nitrogenada que corresponde básicamente al NNP, encontrándose las bases nitrogenadas de los ácidos nucleicos, algunas aminas y  $\text{NH}_4^+$ , derivados tanto de las bacterias como de las secreciones de la mucosa intestinal y del paso de  $\text{NH}_4^+$  desde el rumen. En el intestino se realiza la digestión de la proteína, en forma similar a lo que ocurre en los no-rumiantes, absorbiéndose posteriormente los amino ácidos y algunos compuestos nitrogenados no proteicos.

En el intestino grueso, a pesar de existir una flora bacteriana similar a la del rumen, no ocurre un aporte proteico de importancia para el animal, dado que el grado de absorción es significativamente menor al que ocurre en el intestino delgado. Por consiguiente, aquella proteína que no fue digerida anteriormente se excretará en las heces. Parte de esa proteína, especialmente la proteína microbial que no alcanzó a digerirse en el intestino delgado, se hidrolizará a amino ácidos; éstos se desaminarán en forma parcial y, como resultado, existirá una nueva síntesis de bacterias que se excretarán en las heces. Existe, sin embargo, cierta capacidad para absorber algunos compuestos nitrogenados en esta porción del aparato digestivo.

### b. Nitrógeno metabólico fecal

El nitrógeno metabólico fecal (NMF) corresponde al N absorbido previamente y que es vaciado al lumen del aparato digestivo, ya sea en las secreciones o como parte de las descamaciones del epitelio ruminal y de la mucosa intestinal. Dentro de esta fracción también se considera el N de la proteína sintetizada por las bacterias en el intestino grueso y que aparecen en las heces. En especies rumiantes es muy difícil determinar con exactitud el NMF y no existe un método fidedigno para separar el NMF del N indigestible del alimento. Por ello, se usan estimaciones para cuantificar esta fracción nitrogenada. Un método, al que se ha recurrido en diversas ocasiones, es determinar el N de las heces cuando se suministra una dieta libre de N. Sin embargo, en animales rumiantes este método presenta inexactitudes causadas por la disminución en el consumo voluntario de alimentos cuando estos carecen de N. Otro método, que también se ha usado, se basa en el uso de ecuaciones de regresión del contenido de N en las heces *vs.* varias dietas con diferente contenido proteico. Las limitaciones de este método están dadas por la imposibilidad de calcular el período de espera ("lag time") que usualmente acompaña a toda función de orden biológico y es posible que el NMF a cero consumo de N sea sub-estimado. En este sentido, cualquiera de estos dos métodos que se usen para estimar el NMF, estaría dando como resultado una cantidad constante de NMF a cualquier nivel de consumo proteico y de materia seca, lo cual aparentemente no sería cierto. En esta forma, al determinar los coeficientes de digestibilidad aparente de la proteína, éstos aumentan al incrementar el nivel de consumo de proteína. Esta relación aparentemente es lineal (NRC 1978). Por esa razón, parece más conveniente expresar los requerimientos de animales rumiantes en términos de proteína cruda y no como proteína digestible.

Swanson (1977) ha sugerido una relación directa entre el NMF y la ingestión de materia seca, sugiriendo la siguiente fórmula para la proteína metabólica fecal (PMF):

$$PMF = 0.03 CMS \text{ (g/día)}$$

donde:

PMF = proteína fecal, g/día  
 CMS = consumo de materia seca, g/día

Sin embargo, se ha logrado determinar que alrededor de 2/3 de la PF corresponde a la proteína de origen microbiano y que la PMF, relacionada al consumo de materia seca alimenticia, sería entonces equivalente a 0.01 CMS g/día (Chalupa 1980).

Existen otras formas para estimar el NMF o la PMF. Entre éstas está la proposición del NRC (1978) que estima la PMF en función del consumo de materia seca indigestible (CMSI), haciéndola equivalente a  $PMF = 0.068 \text{ CMSI}$ , en g/día. Por lo tanto, en este caso habría que conocer el coeficiente de digestibilidad de la dieta de los animales antes de calcular sus requerimientos proteicos. Cuando los animales consumen la misma ración por un período determinado de tiempo y la indigestibilidad de ésta es conocida, este método parece práctico. Sin embargo, cuando se trata de animales que pastorean una pradera cuya composición y digestibilidad varía cada día, este método presenta limitaciones por la frecuente variación de la dieta, las que pueden ser mayores que las que presentaría un método basado en el consumo de los animales.

Considerando los tres casos anteriores, se puede presentar un ejemplo para una vaca de 500 kg de peso que consume el 3.0% de su peso en materia seca y que ésta tenga una digestibilidad del 60%:

Parámetro	Chalupa (0.01 CMS)	Swanson (0.03 CMS)	NRC (0.068 CMSI)
CMS, g/día	15000	15000	15000
CMSI, g/día			6000
PMF, g/día	150	450	408

Los cálculos anteriores consideran que la PMF representa a la proteína endógena perdida a través del aparato digestivo como resultado del consumo de materia seca.

En especies de animales no-rumiantes que usualmente consumen dietas con bajo contenido de fibra cruda, la PMF se correlaciona bastante bien con el consumo de materia seca. Sin embargo en rumiantes, los que se alimentan con dietas con contenidos variables de fibra, la PMF aparentemente estaría mejor correlacionada con la materia seca excretada que con la materia seca consumida.

Según el NRC (1985) la PMF de ovinos y de bovinos comprende del 6% al 8% de la materia seca excretada. Swanson (1977) ha estimado que la PMF corresponde al 6.8% de la materia seca fecal, lo que se aproxima a la relación  $PMF = 0.03 \text{ CMS (g/día)}$ . Así, suponiendo un consumo de 15 kg de MS y una digestibilidad del 60%, se tendría lo siguiente:

$$a) PMF = 0.03 \cdot 15000 = 450 \text{ g/día}$$

$$b) PMF = 0.068 \cdot 15000 \cdot 0.40 = 408 \text{ g/día}$$

A pesar de lo anterior, la variabilidad en la información que aparece en la literatura con respecto a la PMF es grande por una serie de factores difíciles de medir con exactitud. Por lo tanto, al considerar la PMF para determinar requerimientos proteicos para mantención de animales rumiantes, habrá que tener en cuenta la inexactitud de la estimación de la PMF al depender de la composición química de la dieta (niveles de proteína, de fibra y de materia orgánica), del nivel de consumo y de la cantidad y proporción de algunos elementos inorgánicos.

Parecería más lógico estimar la PMF en relación a la materia seca indigestible de la dieta. Por otra parte, se deberá considerar también que la vaca en lactancia aumenta significativamente el consumo de materia seca y que la digestibilidad de la dieta disminuye proporcionalmente al aumentar el nivel de consumo. En consecuencia, al emplear los valores usuales de digestibilidad, se estaría sobrestimando los valores para vacas en lactancia en alrededor del 8%; esto significa que valores promedios de digestibilidad del 60%, indicados anteriormente, debieran ser ajustados, resultando en valores equivalentes a:  $0.92 \cdot 60 = 55.2\%$ .

De acuerdo a lo anterior, el valor de 408 g/día, obtenido anteriormente, se convierte a 457 g/día ( $0.068 \cdot 15.000 \cdot (1 - 0.6 \cdot 0.92)$ ).

La PMF así calculada corresponde a la proteína absorbida por el animal, la que debe expresarse en términos de proteína cruda. De acuerdo a la literatura (NRC 1978; Chalupa 1975, 1980; Van Soest *et al.* 1982; ARC 1980), la eficiencia de transformación varía entre 60% y 75%, con un promedio de 67.5%, lo que daría un requerimiento, para satisfacer la PMF, de 677 g/día ( $457/0.675 = 677$ ) para una vaca de 500 kg de peso vivo.

### c. Nitrógeno urinario

También llamado nitrógeno endógeno urinario (NEU), corresponde al N excretado en la orina y es producto de la oxidación de los amino ácidos y de aquel N absorbido desde el aparato digestivo y que no es reciclado a través de la saliva ni difundido al rumen. Está constituido principalmente por urea, además de creatina, amonía, alantoína, ácido úrico, ácido hipúrico y pequeñas cantidades de amino ácidos.

La cantidad basal de NEU, o aquel NEU obligatoriamente perdido, corresponde al N urinario que se excreta cuando el animal consume una dieta aprotéica. En rumiantes es prácticamente imposible detener totalmente la absorción de N, por lo que el suministro de una dieta sin proteínas no necesariamente significa que no exista absorción de N desde el aparato digestivo. Al ser limitante el N en la dieta, ocurre un reciclaje de N a través de la saliva el que junto con el N proveniente de la descamación celular constituye un aporte para el crecimiento bacteriano ruminal. Esto hace que exista entonces N disponible para absorción.

Ørskov (1982) determinó que el N perdido en la orina de rumiantes con infusiones intragástricas de ácidos grasos volátiles equivale a 300-400 mg de N/W<sup>0.75</sup>, de donde se puede obtener el equivalente en proteína al multiplicar esa cantidad por 6.25 y obtener así la proteína endógena urinaria (PEU):

$$PEU = 0.4 \cdot 6.25 \cdot W^{0.75}$$

$$PEU = 2.4 \cdot W^{0.75}$$

donde:

PEU = proteína endógena urinaria, g/día  
W = peso de animal, kg

Dicha cantidad habrá que dividirla por la eficiencia para expresarla en términos de proteína cruda de la dieta, utilizando el mismo factor (0.675) que para el caso de la PMF.

En el caso de una vaca de 500 kg de peso:

$$PEU = 2.4 \cdot 105.7 = 253.7, \text{ g/día}$$

El requerimiento de proteína cruda de la dieta para satisfacer la PEU deberá ser igual a:

$$\frac{253.7}{0.675} = 375.8 \text{ g/día}$$

El hecho de expresar la PEU en relación al peso metabólico parece razonable, dado que desde hace varios años (Elliot y Topps 1963b; Reid *et al.* 1966) se reconoce que los requerimientos proteicos de animales están marcadamente influenciados por el consumo energético y por la relación energía:proteína.

### d. Síntesis de proteína superficial

La PMF y la PEU corresponden a la proteína gastada por el recambio celular y el suministro correspondiente, ajustado por la eficiencia de utilización de la proteína de la dieta. Ambos constituyen una parte importante de los requerimientos de mantenimiento del animal. Sin embargo, existen otros requerimientos que deberán agregarse para estimar los requerimientos para mantenimiento del animal. Estos se refieren a aquellos que consideran la síntesis de proteína superficial (pelo, pezuñas, descamación dérmica, glándulas sebáceas).

Para el caso de la proteína superficial, hay diversos autores que la consideran como mínima o igual a cero (Burroughs 1971, 1974, 1975a, 1975b; Van Soest 1982). El NRC (1978) la estima equivalente a  $0.2 W^{0.6}$ . Por su parte, el ARC (1980) la estima equivalente a  $0.1125 W^{0.75}$ , y un grupo francés (Vérité *et al.* 1979) la estima en  $3.25 W^{0.75}$ . Para el caso de una vaca de 600 kg de peso vivo, de acuerdo a los tres últimos datos, la proteína superficial sería igual a:

NRC	$0.2 \cdot 46.44$	=	9.29 g/día
ARC	$0.1125 \cdot 121$	=	13.61 g/día
Vérité	$3.25 \cdot 121$	=	393.25 g/día

La estimación de Vérité *et al.* (1979), considera la proteína superficial como la proteína retenida para igualar las pérdidas de pelo y de otras proteínas superficiales y de ahí que propongan un valor tan alto relativo a las otras dos estimaciones, el que correspondería a más del 30% del requerimiento para satisfacer la PMF y la PEU. Sin duda, este valor aparece como demasiado alto si se considera que la proteína superficial está parcialmente considerada en el peso, o en el cambio de peso del animal.

Por lo tanto, para decidir qué valor usar para el caso de la proteína superficial parecería lógico suponer que ésta depende del peso del animal, de su ganancia diaria y de las condiciones ambientales; y que podría representar un porcentaje del requerimiento de mantención más ganancia de peso. Para este efecto, se ha considerado en este trabajo que la proteína superficial haría aumentar dichos requerimientos en un 5%, aunque sería más exacto para animales de alta producción (y con un alto consumo de materia seca), usar la cifra sugerida por ARC de  $0.1125 W^{0.75}$ .

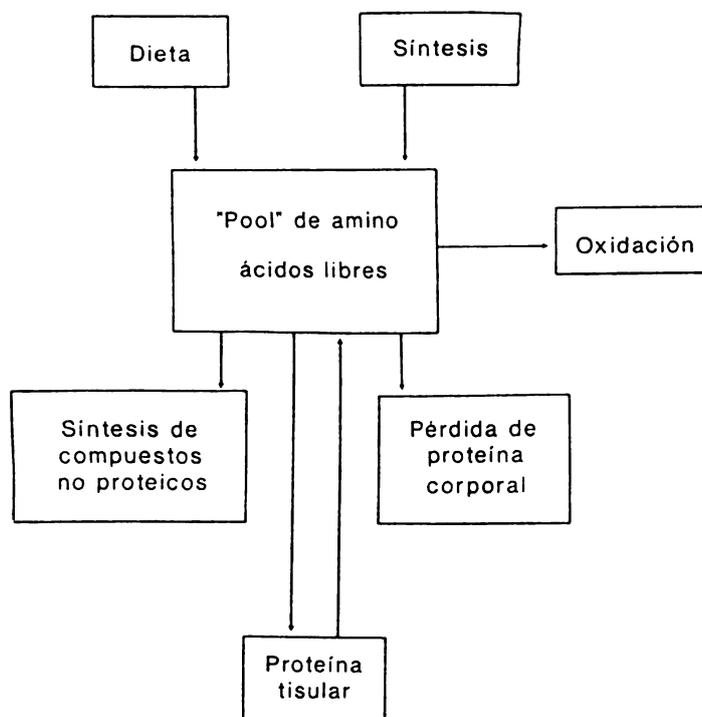


Fig. 2 Metabolismo de aminoácidos en mamíferos

#### e. Síntesis de proteína para ganancia de peso

Para el caso del ganado lechero, parece conveniente considerar este requerimiento dado que, en todo plantel lechero, se trabaja con animales desde el nacimiento hasta pasada su madurez fisiológica. Por consiguiente, en la mayoría de los animales existirá crecimiento, además de cambios de peso causados por variaciones en el consumo voluntario de materia seca durante la lactancia.

En la Fig. 2, se describe en forma general el destino de la proteína consumida en la dieta.

De acuerdo a Miller (1979) el contenido proteico de la ternera al nacimiento es de 19%, disminuyendo a 18% a los 100 kg de peso, a 17% a los 200 kg de peso y a 16% a los 400 kg de peso, a partir de los cuales permanece constante. En consecuencia, la ganancia de peso a los pesos respectivos tendrá la misma composición proteica. De los antecedentes anteriores, de las curvas de crecimiento promedios de tres razas (Holandés

Americano, Holandés Europeo y Hereford) y de la eficiencia de transformación de proteína cruda de la dieta a proteína neta de depósito, se confeccionaron los Cuadros 1 al 4.

El Cuadro 1 muestra los pesos a distintas edades de las hembras. Para las tres razas, a los 15 meses se alcanza el peso de monta adecuado, lo que permite pariciones a los 24 meses de edad.

<b>Cuadro 1. Pesos promedios a distintas edades de las razas Holandés Americano, Holandés Europeo y Hereford, kg</b>			
<b>Edad</b>	<b>H. Americano</b>	<b>H. Europeo</b>	<b>Hereford</b>
Nacimiento	40	35.5	28.5
15 meses	360	320	256
24 meses	440	390	313
36 meses	500	444	356
48 meses	550	488	392
60 meses	590	523	420
72 meses	620	550	442

Con los datos del Cuadro 1, se puede demostrar que existe una relación entre el peso al nacimiento y el peso a distintas edades, independiente de la raza. Esta relación se indica en el Cuadro 2.

<b>Cuadro 2. Relación entre el peso a distintas edades y el peso al nacimiento de hembras de las razas Holandés Americano, Holandés Europeo y Hereford</b>	
<b>Si se desea estimar el peso a la edad de</b>	<b>Multiplicar peso al nacimiento por el factor que se indica</b>
6 meses	4.25
12 meses	7.40
15 meses	9.00
24 meses	11.00
36 meses	12.50
48 meses	13.75
60 meses	14.75
72 meses	15.50

Fuente: Cañas, R.; García, F. 1990. Departamento de Zootecnia, Universidad Católica de Chile. Datos no publicados.

Cuadro 3. Masa proteica de hembras de distintas razas

Edad	% proteína	Masa proteica, kg		
		Holstein Americano	Holstein Europeo	Hereford
Nacimiento	19	7.6	6.7	5.4
15 meses	17	61.2	54.4	43.5
24 meses	16	70.4	62.5	50.1
36 meses	16	80.0	71.0	57.0
48 meses	16	88.0	78.1	62.7
60 meses	16	94.4	83.7	67.2
72 meses	16	99.2	88.0	70.7

Cuadro 4. Depósito diario de proteína en hembras de tres razas a diferentes edades

Edad	Proteína depositada, kg/día		
	Holstein Americano	Holstein Europeo	Hereford
Nacimiento	-	-	-
15 meses	0.120	0.106	0.085
24 meses	0.034	0.030	0.029
36 meses	0.026	0.023	0.019
48 meses	0.022	0.019	0.016
60 meses	0.016	0.015	0.012
72 meses	0.014	0.012	0.009

Cuadro 5. Proteína de la dieta para satisfacer<sup>1</sup> los requerimientos proteicos para crecimiento de hembras lecheras de tres razas distintas

Edad	Proteína que debe proveer la dieta, g/día		
	Holstein Americano	Holstein Europeo	Hereford
15 meses	263	232	186
24 meses	74	66	63
36 meses	57	50	42
48 meses	48	42	35
60 meses	35	33	26
72 meses	31	26	20

<sup>1</sup> Eficiencia = 0.4564

## f. Síntesis de proteína láctea

El proceso de síntesis de la leche involucra la síntesis de proteína, grasa y lactosa, los que corresponden a sus macrocomponentes. Este proceso productivo representa el mayor drenaje de nutrientes desde el organismo (Figs. 3, 4, 5 y 6).

La totalidad de la lactosa, alrededor del 50% de los ácidos grasos y más del 90% de las proteínas que componen la leche se sintetizan en la glándula mamaria de precursores presentes en la sangre. El resto de los ácidos grasos y de la proteína pasan directamente desde la sangre a la glándula.

Los precursores principales de los macronutrientes lácteos son ácido acético, ácido propiónico, ácido  $\beta$ -hidroxibutírico, glucosa, ácidos grasos de cadena larga y amino ácidos esenciales y no esenciales. Estos precursores provienen parcialmente como una consecuencia de su producción en el aparato digestivo, parcialmente como un resultado de modificaciones que sufren los productos de la digestión durante su absorción y paso a través del hígado y parcialmente de procesos metabólicos que ocurren en el tejido extra hepático.

Uno de los precursores que interesa desde el punto de vista de la síntesis proteica láctea es el ácido propiónico. Este se absorbe en el rumen (sufriendo ya una transformación parcial en la pared ruminal), pasa al hígado y se transforma en glucosa y posiblemente a otros productos, incluyendo algunos amino ácidos no esenciales. Sólo una parte muy pequeña del ácido propiónico absorbido llega al tejido extra hepático. La glucosa, los amino ácidos y los ácidos grasos de cadena corta (con menos de 10 átomos de carbono) se transportan al hígado a través de la vena porta. La glucosa que se forma a partir del ácido propiónico y aquella absorbida desde el intestino delgado y que llegan al hígado, estimulan procesos sintéticos. En este sentido, en el hepatocito, además de sintetizarse glucógeno se activa la enzima glucosa-6-fosfatodeshidrogenasa dando origen a monosacáridos con cinco átomos de carbono en su molécula (pentosas), componentes de los ácidos nucleicos, e iniciando la síntesis proteica. En la glándula mamaria, la glucosa absorbida inicia un proceso similar. Por lo tanto, mientras mayor sea la cantidad y proporción de ácido propiónico que exista, mayor será la posibilidad de sintetizar proteína y lactosa en la glándula mamaria y mayor será la producción de leche. Sin embargo, hay que tener presente que los amino ácidos esenciales deben provenir directamente de la absorción intestinal y que su presencia, y proporción relativa entre ellos mismos, conjuntamente con la energía disponible, determinarán finalmente la posibilidad de alcanzar la potencialidad productiva de la vaca lechera.

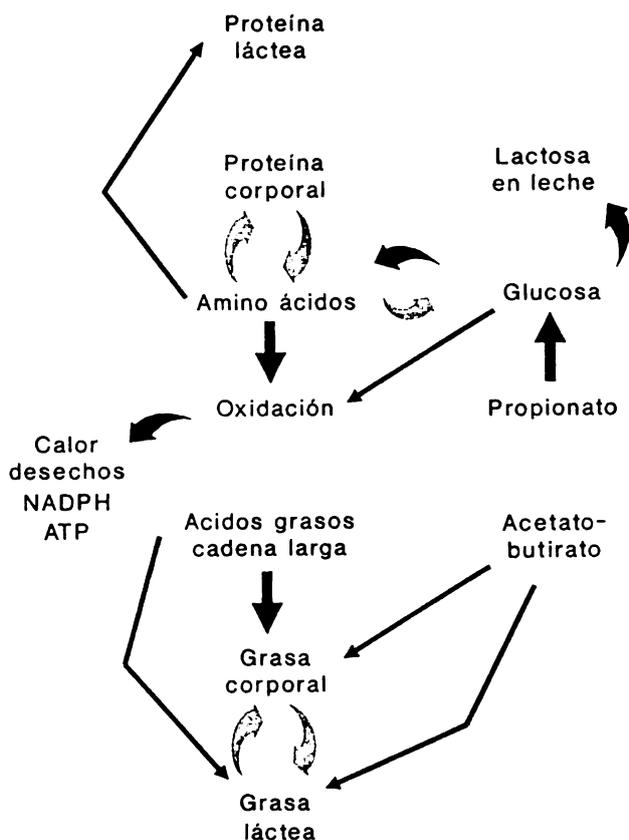


Fig. 3 Síntesis de componentes lácteos

En consecuencia, la síntesis de la proteína láctea estará limitada por el suministro de amino ácidos esenciales a la glándula y por la cantidad de energía (glucosa y ácido acético) disponible (ver Figs. 3, 4 y 5).

#### g. Requerimientos proteicos para microorganismos ruminales

Los microorganismos ruminales, componentes esenciales del sistema ruminal, necesitan de una serie de nutrientes para crecer y multiplicarse. Algunos nutrientes los obtienen del alimento que consume el animal y otros los sintetizan ellos mismos. La característica de estos organismos unicelulares es que son capaces de digerir y aprovechar la energía de la celulosa del alimento, de fijar el N amoniacal para producir amino ácidos esenciales (que el animal es incapaz de sintetizar o que sintetiza a tasas menores a las requeridas) y de sintetizar vitaminas (K, C y del complejo B).

En relación a la proteína del alimento, y dependiendo de su grado de degradabilidad ruminal, los microorganismos la desaminan total o parcialmente. En consecuencia, el requerimiento de los microorganismos sería por N y no por proteína preformada. Es así entonces, que reaminando las cadenas carbonadas (provenientes de los mismos amino ácidos, de carbohidratos, y de ácidos grasos), sintetizan sus propios amino ácidos y proteínas celulares.

Lo anterior sugiere que los microorganismos crecerán y digerirán el alimento que llega al rumen dependiendo de la cantidad de N amoniacal y de energía de que puedan disponer. En otras palabras, la cantidad de N disponible ruminalmente para las bacterias y protozoos debe estar en relación a la materia seca digestible que consuma el rumiante, para que así exista un máximo aprovechamiento del alimento.

Es bien sabido, a través de una serie de ensayos, que los rumiantes pueden vivir con dietas que contienen urea como la única fuente de N. Esa urea es desdoblada por acción de la ureasa contenida dentro de las células de los microorganismos, obteniéndose amoníaco. El dilema que se presenta entonces es, si la amoníaco puede suplir todo el N requerido por las bacterias o si éstas requieren, además, de amino ácidos preformados. En este sentido, debe recordarse que la lisis bacteriana dentro de la cavidad ruminal es un proceso natural y constante; por lo que, si realmente existe un requerimiento por amino ácidos, éstos serían aportados por los mismos microorganismos lisados intraruminalmente y que serán digeridos y utilizados por otros en crecimiento.

Maeng y Baldwin (1976) demostraron que la masa microbiana se incrementó en un 100% cuando el 25% de la urea fue reemplazada por una mezcla de amino ácidos y que el tiempo promedio de división microbiana se redujo a la mitad. Este hecho sugiere que los microorganismos ruminales sí requieren de ciertas moléculas preformadas y que éstas pueden ser de ciertos amino ácidos o de algunas moléculas de ácidos grasos de cadena ramificada (Hume 1970). A pesar de lo anterior, en un sistema ruminal estabilizado bastaría seguir alimentando el sistema con NNP dado que con la muerte de una porción de los microorganismos se obtendrían aquellas moléculas preformadas requeridas para el crecimiento de la biomasa bacteriana.

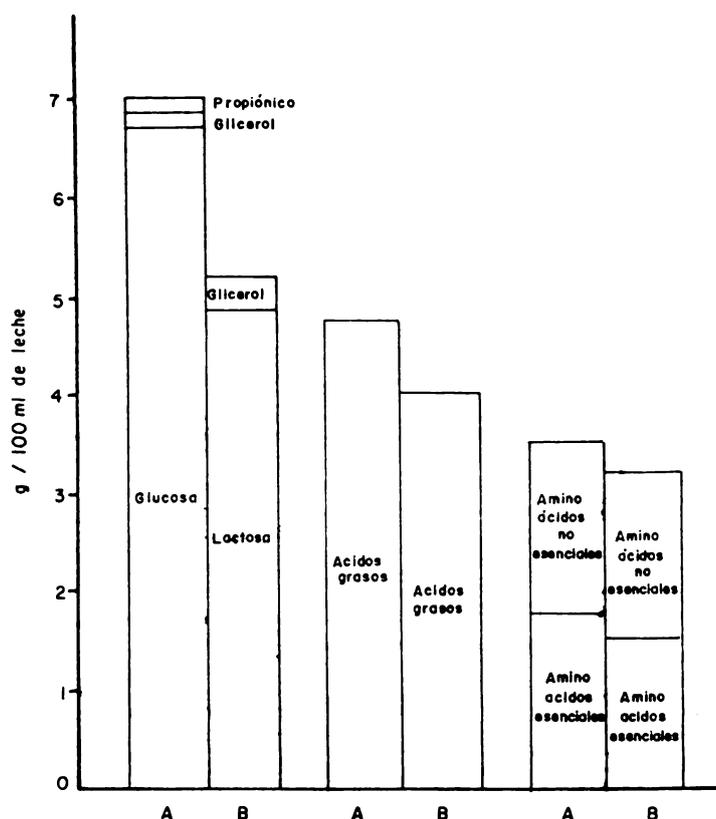


Fig. 4 Precusores de la leche (A - Entradas; B - Salidas), según Thomas (1975) para la raza Jersey

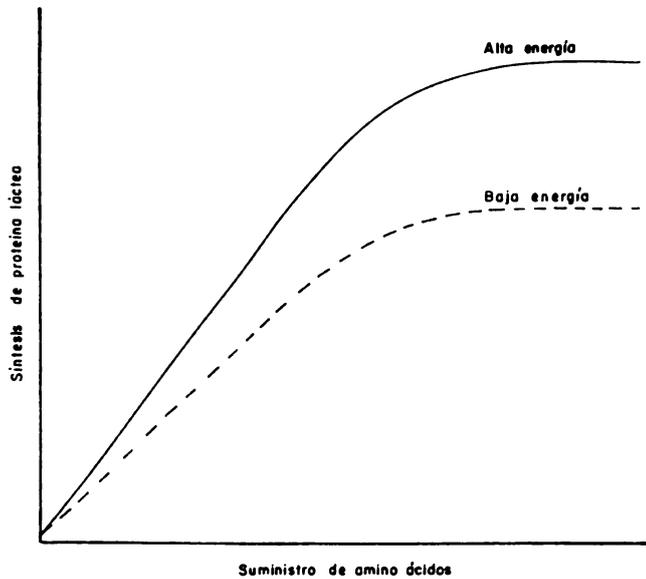


Fig. 5 Efecto del suministro de aminoácidos y energía sobre la síntesis de proteína láctea. (Fuente: Thomas 1975)

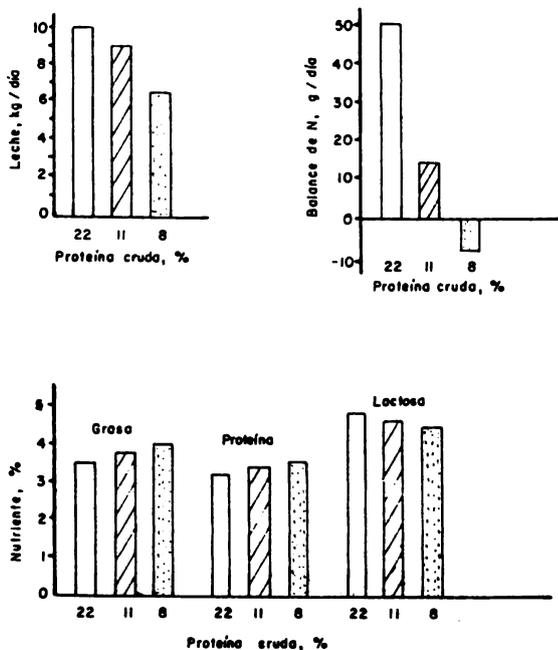


Fig. 6 Efecto del nivel proteico sobre la producción de leche. (Fuente: NRC 1985)

Lo anterior implica que el NNP requerido por los microbios ruminales deberá tener una relación con la energía, con la materia orgánica o con la materia seca del alimento que llega al rumen (Fig. 7). En otras palabras, deberá existir una cierta relación energía:nitrógeno, materia orgánica:nitrógeno o materia seca:nitrógeno, en el alimento, para un máximo crecimiento bacteriano ruminal. La energía disponible para el crecimiento microbiano dependerá de la digestibilidad del alimento, de su contenido en carbohidratos y lípidos y de la velocidad de paso de la ingesta. El nitrógeno disponible intraruminalmente dependerá del contenido en proteína total (NP+NNP) del alimento, de su degradabilidad a nivel ruminal y también de la velocidad de paso de la ingesta. La caracterización de cada alimento, en consecuencia, parece impracticable dados los factores que introducen variabilidad en el sistema; por consiguiente, debe encontrarse una mejor forma de expresar los requerimientos de las bacterias ruminales, que sea fácil de aplicar en la práctica.

Ørskov (1982) propuso una relación entre la concentración energética en los alimentos y el N requerido para satisfacer los requerimientos de los microbios ruminales, que depende del grado de la degradabilidad proteica. Una adaptación de la proposición de este autor se muestra en la Fig. 7. En ella se observa que conforme disminuye la degradabilidad de la proteína y aumenta la concentración energética en la dieta la proteína de la materia seca de la dieta debe aumentar para satisfacer los requerimientos de los microorganismos ruminales. En condiciones prácticas, la proteína de las dietas para vacas lecheras posee una degradabilidad entre el 70% y el 90%. En condiciones de pastoreo de praderas en período vegetativo temprano (crecimiento activo), la degradabilidad de la proteína se acerca al 90% y la densidad calórica se sitúa alrededor de las 2.4 Mcal/kg de materia seca. Extrapolando en la Fig. 7 se obtiene que la proteína de la materia seca debe ser del orden del 7.2%. Sin embargo, para mantención, la densidad calórica de la dieta es bastante menor a 2.4 Mcal/kg de materia seca, siendo usual un valor cercano a 1.6-1.8 Mcal/kg de materia seca, correspondiendo en ese caso un tenor proteico de aproximadamente 6.2%. En consecuencia, en forma teórica se puede asumir que para mantención, la proteína de la materia seca de la dieta debe situarse entre el 6% y el 7%, con un promedio de 6.5%. Con esta cantidad se estarían satisfaciendo los requerimientos de los microorganismos ruminales.

## 5. PROTEÍNA PARA REPRODUCCIÓN

El suministro de proteína en cantidades adecuadas en la dieta de vacas lecheras es, desde luego, fundamental debido a las varias funciones que desempeña. En este sentido, se puede enfatizar que las enzimas son proteínas que regulan los procesos bioquímicos que se llevan a cabo en el organismo del animal.

La severidad de los síntomas de deficiencia proteica dependen del grado de la deficiencia. En vacas en lactancia, una deficiencia proteica disminuye la producción de leche. Si la deficiencia es severa al comienzo de la lactancia, la vaca pierde peso en forma significativa y difícilmente lo recuperará al final de la lactancia.

Por otra parte, un suministro inadecuado de proteína durante la gestación reduce la tasa de crecimiento fetal obteniéndose crías de menor tamaño al nacimiento. Si la deficiencia es más severa la gestación puede no llegar a término.

Una deficiencia en proteínas puede reducir el contenido proteico en sangre y en otros tejidos. Esto significa que existirá una disminución en las proteínas transportadoras de nutrientes, en las proteínas inmunes e incluso existirá una menor secreción de hormonas. De acuerdo a ello, el animal tendrá una menor resistencia a enfermedades infecciosas y presentará un aspecto sub-normal.

Desde el momento de la concepción, comienza la retención de proteína para el crecimiento fetal. Esta se hace significativa a partir de aproximadamente la vigésima semana de gestación, con variaciones que se indican en el Cuadro 6. De la semana 20 a la semana 30, la vaca se encuentra en el último tercio de su lactancia y la tasa de retención diaria aumenta casi cuatro veces. El ajuste del suministro de proteína a tal variación diaria sería bastante engorroso para hacerlo en forma práctica; parecería más conveniente basarse en la retención promedio del período, la que corresponde a 35.2 g/día. Sin embargo, ésta corresponde al 67% de la retención a la semana 30. Esto podría ajustarse si a la retención promedio se le agrega un 5%, lo que daría una nueva retención promedio para el último tercio de lactancia de 37 g/día. Hasta aproximadamente la semana 27 de gestación, la vaca estará recibiendo un pequeño exceso de proteína por este concepto, la que podrá destinar para un mayor crecimiento fetal durante ese período o para producir una mayor cantidad de leche. En vacas de alta producción (más de 7000 litros por lactancia de 305 días), es más probable que el pequeño exceso de proteína se destine a una mayor persistencia productiva, mientras que en vacas de doble propósito, o de menor productividad, ese pequeño exceso se destinaría al mayor crecimiento fetal, al existir las condiciones corporales adecuadas de la vaca. En condiciones de campo, no serán notorias estas diferencias dado que la deficiencia de proteína que se podría producir al usar 37 g/día, en vez de 52.2 g/día, equivalen a aproximadamente 200 ml de leche/día, lo que en el período de tres semanas equivaldrán a 4.2 litros de leche. Por otra parte, si la alimentación del animal ha sido adecuada durante toda la lactancia, la vaca será capaz de mantener su productividad láctea.

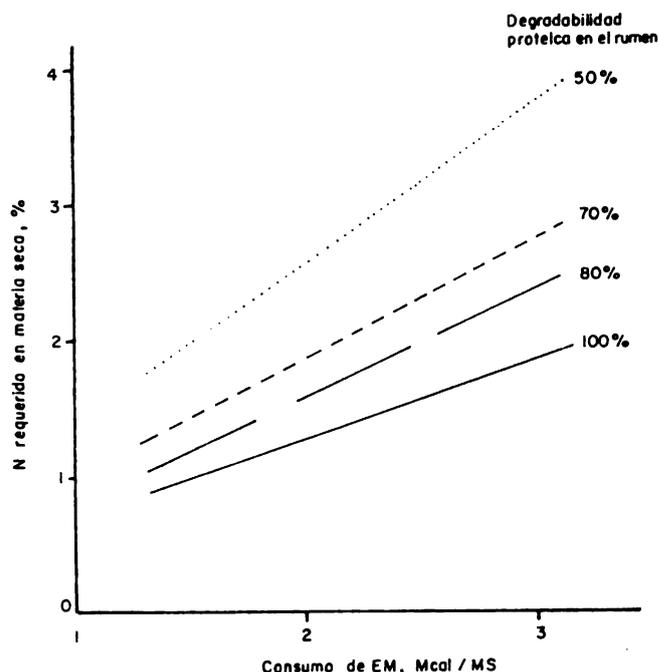


Fig. 7 Influencia de la concentración energética de la dieta y la degradabilidad ruminal de la proteína sobre el requerimiento teórico de N por los microorganismos ruminales. (Fuente: Ørskov 1982)

Cuadro 6. Retención de proteína durante la preñez	
Semana	Retención de N, g/día
20	13.7
22	18.3
24	24.2
26	31.6
28	40.8
30	52.2
32	66.1
34	82.8
36	102.8
38	126.6

Fuente: NRC (1985)

A partir de la semana 30-32, la vaca deberá encontrarse en su período seco, el que durará por 45 a 60 días. Es en este período cuando existe la mayor tasa de retención proteica, comenzando con 66 g/día y finalizando con 127 g/día, con un promedio de 94.6 g/día el que, corregido por el 5% de aumento se transforma en 99 g/día.

La eficiencia de transformación de proteína del alimento a proteína del conceptus se ha estimado igual que para la síntesis de proteína láctea, siendo igual al 45.64%. De acuerdo a ello, la proteína del alimento destinada a la producción fetal será de 81 g/día de proteína cruda durante el último tercio de la lactancia de la vaca (semana 20 a 30 de gestación) y de 217 g/día durante el período seco.

Si se deseara determinar el costo de producción de una cría desde la concepción al nacimiento, en término de litros de leche, usando la proteína requerida como base, se puede hacer el siguiente cálculo:

11 semanas · 7 días · 81 g =	6 237 g de proteína cruda
9 semanas · 7 días · 217 g =	<u>13 671</u> g de proteína cruda
TOTAL	19 908 g de proteína cruda

Asumiendo que por cada litro de leche se requieren 70.11 g de proteína cruda:

$$19\ 908 / 70.11 = 283.9 \text{ litros de leche}$$

## 6. CÁLCULO DE REQUERIMIENTOS PROTEICOS

De acuerdo a los antecedentes entregados anteriormente, se puede establecer un sistema para calcular los requerimientos proteicos de vacas lecheras.

Según las normas de manejo empleadas para explotaciones lecheras intensivas, es recomendable establecer el sistema de alimentación por grupo de animales que tengan requerimientos similares, o bien, que estén en estado fisiológico similar. Estos sistemas de alimentación por grupos se aplican tanto para animales en confinamiento como para animales a pastoreo, cuya alimentación incluya el uso de concentrados.

#### a. Criterios para la formación de grupos de alimentación

Existen diversos criterios para la formación de grupos. Algunos sistemas consideran la producción de leche como el factor primordial para la separación de las vacas lecheras; otros incluyen, además, la edad y el estado reproductivo. Lo importante en estos casos es formar grupos lo más homogéneos posibles para disminuir a un mínimo la variabilidad entre animales y evitar factores de estrés producidos, entre otros, por la dominancia de algunos animales. En este sentido se trata de que todos los animales tengan iguales alternativas para expresar su máximo potencial productivo.

Se pueden formar tantos grupos como lo permitan las condiciones imperantes en el predio lechero, tendiendo hacia la alimentación individual. En esta forma, se puede considerar establecer grupos para vacas de primer parto y grupos para vacas de más partos, tomando en cuenta los períodos críticos durante la lactancia. Así entonces, podrían conformarse grupos por tercios de lactancia, dado que, durante los primeros 100 días post parto, la vaca está en una fase ascendente de producción de leche y de consumo de alimentos; durante los segundos 100 días, la vaca alcanza su máxima capacidad de consumo de materia seca, se encuentra en la fase descendente de su curva de lactancia y debiera estar preñada; finalmente, durante el último tercio la vaca está en el final de su lactancia, con una gestación avanzada y con una menor producción de leche. En cuanto a las vacas en su primera lactancia, hay que tomar en cuenta que la máxima producción diaria se obtiene más tarde que en el caso de vacas mayores.

Como ejemplo, se considerará una vaca de 36 meses de edad al parto, con un peso de 500 kg y cuyo potencial productivo es de 6000 l en 305 días de lactancia.

#### b. Antecedentes previos al cálculo

##### a. Producción promedio diaria durante cada tercio de lactancia:

$$1/3 = 6000 \cdot 0.45/100 = 27.0 \text{ l/día}$$

$$2/3 = 6000 \cdot 0.32/100 = 19.2 \text{ l/día}$$

$$3/3 = 6000 \cdot 0.23/100 = 13.8 \text{ l/día}$$

##### b. Concepción a los 95 días post parto

##### c. Crecimiento:

$$50 \text{ kg en } 365 \text{ días} = 0.137 \text{ kg/día}$$

##### d. Peso corporal promedio en cada tercio:

$$1/3 = 506.8 \text{ kg}$$

$$2/3 = 520.5 \text{ kg}$$

$$3/3 = 534.2 \text{ kg}$$

e. Peso metabólico para cada tercio:

$$1/3 = 106.8$$

$$2/3 = 109.0$$

$$3/3 = 111.1$$

f. Peso promedio por tercio elevado a 0.6:

$$1/3 = 42.0$$

$$2/3 = 42.6$$

$$3/3 = 43.3$$

g. Consumo voluntario de materia seca:

$$1/3 = 0.036 \cdot PV = 18.2 \text{ kg/día}$$

$$2/3 = 0.032 \cdot PV = 16.7 \text{ kg/día}$$

$$3/3 = 0.028 \cdot PV = 15.0 \text{ kg/día}$$

Otra forma de estimar el consumo voluntario de materia seca en vacas en pastoreo es usar la siguiente fórmula, independiente del estado de lactancia:

$$CV = 0.028 \cdot PV + 0.1 \cdot \text{kg de leche producida en el día}$$

donde:

CV = consumo voluntario de materia seca, kg/día

PV = peso vivo del animal, kg

h. Digestibilidad promedio de la dieta: 65%.

i. Degradabilidad promedio de la proteína de la dieta a nivel de rumen: 85%.

### c. Requerimiento para mantención del animal

Para mantención se considerará la PMF, la PEU y la proteína superficial (PS). Luego, la fórmula para calcular la cantidad de proteína cruda de la dieta que deberá consumir el animal es la siguiente:

$$PC_m = A + B + C$$

donde:

$PC_m$  = proteína cruda para mantención, kg/día

A = PMF/eficiencia

B = PEU/eficiencia

C = PS/eficiencia

Para el primer tercio de la lactancia:

$$\begin{aligned}
 A &= 0.03 \cdot 18.2/0.675 \\
 A &= 0.546/0.675 \\
 A &= 0.809 \text{ kg/día} \\
 B &= 2.4 W^{0.75}/1000/0.675 \\
 B &= 2.4 \cdot 106.8/1000/0.675 \\
 B &= 0.379 \text{ kg/día} \\
 C &= 5\% \text{ de } A + B = 0.059 \\
 C &= 0.2 W^{0.6}/1000 = 0.2 \cdot 42/1000 = 0.008 \\
 C &= 0.1125 W^{0.75}/1000 = 0.1125 \cdot 0.1068 = 0.012
 \end{aligned}$$

Luego:

$$\begin{aligned}
 PC_m^1 &= 0.809 + 0.379 + 0.059 = 1.247 \text{ kg/día} \\
 PC_m^2 &= 0.809 + 0.379 + 0.008 = 1.196 \text{ kg/día} \\
 PC_m^3 &= 0.809 + 0.379 + 0.012 = 1.200 \text{ kg/día}
 \end{aligned}$$

donde:

$$\begin{aligned}
 PC_m^1 &= \text{el } PC_m \text{ según la recomendación del autor para el cálculo de PS} \\
 PC_m^2 &= \text{el } PC_m \text{ según la recomendación del NRC (1978) para el cálculo de PS} \\
 PC_m^3 &= \text{el } PC_m \text{ según la recomendación del ARC (1980) para el cálculo de PS}
 \end{aligned}$$

De acuerdo a lo que se indicara en el acápite sobre *Síntesis de proteína superficial*, sería recomendable usar el valor de 1.247 kg/día. Sin embargo, la diferencia entre el mayor y el menor valor calculado para la  $PC_m$  es de sólo 4 por ciento.

#### d. Requerimiento para crecimiento

En los Cuadros 3 y 4, en el acápite sobre la *Síntesis de proteína para ganancia de peso*, se estipuló que a los 36 meses de edad, la hembra de la raza Holando Americana deposita un promedio de 0.026 kg de proteína diariamente, lo que, corregido por el valor de eficiencia para crecimiento, resulta en un valor igual a 0.057 kg/día de proteína cruda de la dieta que se destinará para la síntesis de tejido corporal.

#### e. Requerimiento para producción de leche

Durante los primeros 100 días de lactancia, la vaca, referida en el ejemplo, estará produciendo un promedio de 27 l/día. Dependiendo de la raza, la leche variará en su composición y especialmente en su contenido graso. Un ejemplo de composición de leche de ganado Holandés Americano es la siguiente:

Agua	87.5%
Sólidos	12.5%
Grasa	3.5%
Proteína	3.2%
Lactosa	4.9%
Cenizas	0.9%

Por lo tanto, la vaca estará secretando  $(27 \cdot 0.032) = 0.864$  kg de proteína dietética diariamente. Dado que la eficiencia de transformación de la proteína dietética en proteína de la leche es 45.64%, deberá corregirse por dicho factor para determinar la proteína que deberá consumir. Luego, la cantidad de proteína cruda en la dieta para satisfacer los requerimientos para producción de leche será:

$$PC_p = 27 \cdot 0.032 / 0.4564 = 1.893$$

donde:

$$PC_p = \text{proteína cruda para producción de leche, kg/día}$$

#### f. Requerimientos totales

Primer tercio:

Para el primer tercio de la lactancia, el requerimiento de proteína cruda de la dieta será la sumatoria de la requerida para mantención, crecimiento y producción de leche:

$$PC_m = 1.247 \text{ kg/día}$$

$$PC_c = 0.057 \text{ kg/día}$$

$$PC_l = 1.893 \text{ kg/día}$$

$$PC_t = 3.197 \text{ kg/día}$$

Dado que la vaca consume un promedio de 18.2 kg de materia seca por día, el contenido proteico de ésta será de 17.6 por ciento.

Es importante, durante la primera fase de la lactancia, mantener niveles adecuados de proteína. Estos usualmente se consideran altos. Sin embargo, es quizás el suministro de esas cantidades de proteína la que no sólo incide en la producción de leche durante ese período sino que durante toda la lactancia (Fig. 8).

Siguiendo con el ejemplo de la misma vaca, para los siguientes tercios de la lactancia, los requerimientos serán los siguientes:

Segundo tercio:

$$PC_m = A + B + C$$

$$\begin{aligned} PC_m &= (0.03 \cdot 16.7 / 0.675) &&= 0.742 \\ &+ (2.4 \cdot 109 / 1000 / 0.675) &&= 0.388 \\ &+ (A + B) \cdot 0.05 &&= 0.056 \end{aligned}$$

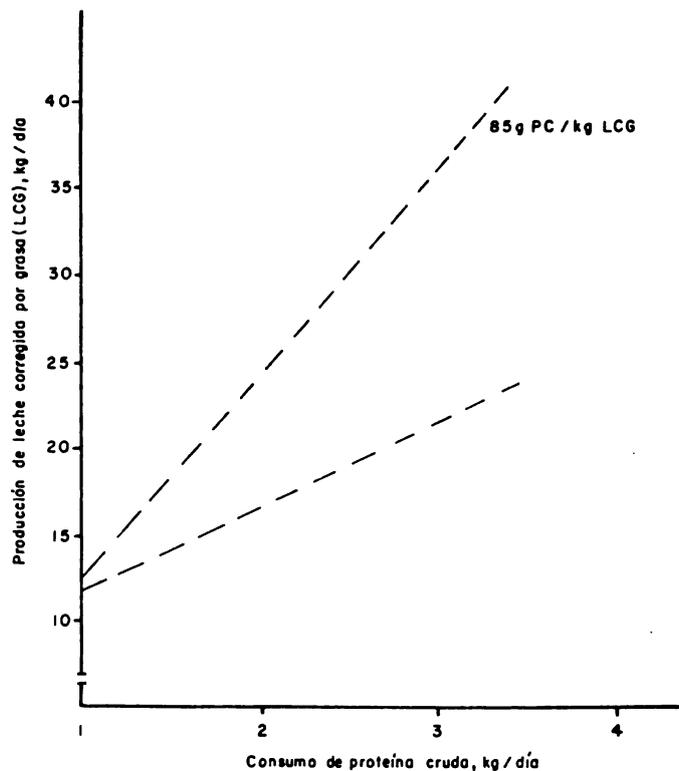


Fig. 8 Relación entre el consumo de proteína cruda y la producción de leche (Rango de 23 ensayos al inicio de lactancia. Entre las dos líneas se ubican los resultados de los experimentos individuales). Fuente: Oldham (1984)

$$\begin{aligned}
 PC_c &= 0.057 \\
 PC_1 &= (19.2 \cdot 0.032)/0.4564 = 1.346 \\
 PC_k &= 2.540 \text{ kg/día}
 \end{aligned}$$

lo que representa el 15.2% de la materia seca consumida.

*Tercer tercio:*

$$\begin{aligned}
 PC_m &= (0.03 \cdot 15.0/0.675) = 0.667 \\
 &+ (2.4 \cdot 111.1/1000/0.675) = 0.395 \\
 &+ (A + B) \cdot 0.05 = 0.053 \\
 PC_c &= 0.057 \\
 PC_1 &= (13.8 \cdot 0.032)/0.4564 = 0.967 \\
 PC_r &= 0.081 \\
 PC_k &= 2.144
 \end{aligned}$$

lo que representa el 14.3% de la materia seca de la dieta.

#### g. Requerimiento de proteína para el período seco

En este caso, la vaca deberá consumir el equivalente al 2% de su peso corporal en materia seca del alimento. Esta cifra es un estándar que considera el peso de la vaca más el peso del feto y del conceptus. Por lo tanto, al peso que resulte al final de la lactancia más el promedio de la ganancia de peso por el crecimiento de la hembra de tres años deberá agregarse el peso promedio del feto más el conceptus, lo que se estima en 45 kg. En esta forma, resulta un peso, durante el período seco, similar al peso que la vaca tendría a los 48 meses de edad, por lo que podrá usarse este valor como una estimación adecuada para calcular el consumo de materia seca, el que sería entonces de 11.0 kg/día.

Con base en esta última cifra y condierando la retención proteica promedio durante la fase final de la gestación se puede calcular la cantidad de proteína cruda a suministrar a la vaca.

$$\begin{aligned}
 PC_m &= (0.03 \cdot 11.0)/0.675 = 0.489 \\
 &+(2.4 \cdot 113.6)/1000/0.675 = 0.404 \\
 &+(A + B) \cdot 0.05 = 0.045 \\
 PC_c &= 0.057 \\
 PC_r &= 0.217 \\
 \text{Total} &= 1.212 \text{ kg/día}
 \end{aligned}$$

lo cual equivale al 11% de la materia seca de la dieta.

Resumiendo lo anterior, se tiene que el contenido proteico de la dieta, durante el tercer año de vida de la vaca, varía en los diversos estados fisiológicos de acuerdo a lo siguiente:

Primer tercio de lactancia	= 17.6%
Segundo tercio de lactancia	= 15.2%
Tercer tercio de lactancia	= 14.3%
Período seco	= 11.0%

En todos los cálculos se ha supuesto que la degradabilidad promedio de la proteína del alimento era del 85% y que para satisfacer los requerimientos de los microorganismos ruminales se necesita el equivalente al 6.5% de la materia seca consumida, de lo cual se desprende lo siguiente:

Tercio de lactancia	Proteína para los microorganismos kg	Proteína degradable aportada en la dieta kg
1	1.18	2.72
2	1.01	2.54
3	0.86	2.13
Período seco	0.71	1.02

Con lo anterior, es evidente que no existirá limitaciones en el consumo voluntario de alimento por causa de una actividad microbiana sub-óptima y que la vaca estará capacitada para expresar plenamente su potencial genético, de no existir limitaciones de otro tipo. La duda que puede presentarse se refiere a que algunos amino ácidos pudieran ser limitantes para producir la proteína láctea, dada la gran cantidad de amino ácidos que son removidos por la glándula mamaria desde el plasma.

De acuerdo a información del NRC (1985) los cinco amino ácidos esenciales que se extraen en mayor proporción hacia la glándula mamaria son, en orden descendente, lisina, metionina, arginina, leucina y tirosina, por lo que éstos serían los más limitantes para la síntesis de la proteína láctea.

Parece razonable pensar que arginina será el amino ácido menos limitante, dado que junto con histidina es considerado como un amino ácido "semi-esencial" al no ser necesario para mantener el balance de nitrógeno, sino que más bien es necesario sólo para crecimiento. En consecuencia, lisina, metionina, leucina y tirosina serán los más limitantes y su disponibilidad para la síntesis de la proteína láctea dependerá de su presencia a nivel intestinal. Esto significa que para máxima producción de leche se necesita que una parte importante de la proteína de la dieta pase a través del rumen sin degradarse y que la hidrólisis de la proteína, se produzca post-ruminalmente. Por otra parte, la proteína no degradada y la proteína microbial deberán tener una proporción adecuada de los amino ácidos aparentemente más limitantes para la síntesis láctea.

Leucina, cuya fórmula,  $(CH_3)_2-CH_2-CH(NH_2)-COOH$ , indica que es un amino ácido ramificado, es sintetizado por los microorganismos a partir de ácidos grasos ramificados, los que ocurren normalmente en los alimentos comunes de los rumiantes. Esto sugiere que este amino ácido podría no ser limitante si el crecimiento bacteriano ruminal es adecuado.

Metionina, cuya fórmula,  $\text{CH}_3\text{-S-(CH}_2\text{)-CH(NH}_2\text{)-COOH}$ , indica que es un amino ácido azufrado, requiere para su síntesis de suficiente cantidad de S (por lo general en forma de sulfatos) a nivel de bacterias y de protozoos ruminales. Por otra parte, éste es un amino ácido ampliamente distribuido en la proteína de origen animal, lo que sugiere que ésta sería una buena fuente. Por otra parte, existen proteínas de origen animal que son resistentes a la acción ruminal, escapando a la degradación en el rumen y que constituyen una excelente fuente de este amino ácido.

Lisina, cuya fórmula,  $(\text{NH}_2)\text{-(CH}_2\text{)}_4\text{-CH(NH}_2\text{)-COOH}$ , indica que es un amino ácido básico, con seis carbonos en la molécula, pudiendo en consecuencia, ser sintetizado a partir de un ácido graso de igual número de carbonos.

Por último, se tiene la tirosina, la que es un amino ácido aromático, cuya fórmula "estilizada" es  $\text{HO-}\langle\text{---}\rangle\text{-CH}_2\text{-CH(NH}_2\text{)-COOH}$ , la que indica la necesidad de contar con grupos bencenos. Este amino ácido es importante para la síntesis de la hormona tiroxina, que contiene yodo en su molécula.

El requerimiento de amino ácidos en proporción y cantidad adecuada a nivel intestinal, para llegar a niveles productivos altos en vacas lecheras, ha hecho que se haya pensado en proteger a la proteína del alimento para que no sufra degradación total a nivel de rumen y pueda así aportar amino ácidos intactos a nivel intestinal. Esto, más el hecho de usar alimentos proteicos de baja degradabilidad ruminal, que no interfieran con el crecimiento y metabolismo microbiano ruminal, son condiciones a considerar con animales de alta productividad.

## 7. USO DE ANÁLISIS SANGUÍNEOS, FECALES Y URINARIOS PARA DETERMINAR EL ESTADO NUTRICIONAL DEL ANIMAL

Hace varios años se ha estado tratado relacionar algunos metabolitos sanguíneos con el estado nutricional de los animales. El poder contar con información de ese tipo facilitaría significativamente el trabajo de los nutricionistas. Los esfuerzos han sido enormes, existiendo una gran variedad de publicaciones de investigaciones que apuntan en esa dirección. Sin embargo, los éxitos han sido escasos cuando se trata de animales normales. Cuando se trata de enfermedades, ya sean éstas metabólicas o infecto contagiosas, el uso de análisis sanguíneos demuestra una gran utilidad.

Los análisis de heces, se han usado ampliamente para la determinación de coeficientes de digestibilidad, empleados en la evaluación de alimentos y dietas. Aparentemente, los análisis de orina, presentarían una mayor potencialidad para los nutricionistas, especialmente referido a nutrición mineral.

El hecho que metabolitos sanguíneos no sean un buen parámetro para determinar el estado nutricional de animales, se debe a los controles homeostáticos imperantes en el organismo. En este sentido, existen controles hormonales que facilitan el ingreso y egreso de una serie de metabolitos a la sangre y a otros tejidos del organismo animal. Se puede dar como ejemplo, el caso de la glucosa sanguínea, en el que cuando existe un alto ingreso de glucosa al sistema sanguíneo producto de la absorción intestinal, comienza la secreción de insulina la que facilita el ingreso de glucosa a las células, produciéndose una disminución de la glicemia. Es así entonces, que la hiperglicemia produce una mayor remoción de glucosa desde la sangre (efecto insulínico) y la hipoglicemia, por el contrario, produce una mayor movilización de glucosa desde los hepatocitos hacia la sangre (efecto glucagón).

En el caso de las proteínas tisulares y plasmáticas, éstas están en constante degradación a sus amino ácidos constitutivos. Estos a su vez constituyen una fuente de energía, de carbohidratos y de lípidos. Los carnívoros obtienen entre el 40% y el 50% de sus requerimientos energéticos de los amino ácidos, mientras que omnívoros

y herbívoros, obtienen desde menos del 10% hasta un 20% de sus requerimientos energéticos de esta fuente. Esto indica que, previo a la utilización de los amino ácidos como fuente de energía, éstos tienen que ser desaminados, liberándose amoníaco, la que es transportada por la sangre al hígado para ser captada por los hepatocitos e introducida a la mitocondria para iniciar el proceso de síntesis ureica. La urea así producida se transporta a los riñones, para su eliminación, y a las glándulas salivales, para su re-circulación en aquellos casos de déficit proteico.

### a. Proteínas plasmáticas

Una de las determinaciones que se pueden realizar para estudiar el estado nutricional de los animales se refiere a las proteínas plasmáticas. Sin embargo, hay que considerar diversos factores que la afectan, como también es necesario tener presente que no debería usarse como parámetro único, sino que es recomendable la complementación con otras mediciones.

#### Factores que afectan a las proteínas plasmáticas:

1. **Edad.** Al nacimiento, las proteínas plasmáticas se encuentran en un nivel muy bajo y esto ocurre en la mayoría de las especies. El que la proteinemia sea baja en ese momento, se debe a las mínimas cantidades de inmunoglobulinas y a la baja cantidad de albúminas con que nace el animal. A medida que el animal consume calostro, se produce un rápido aumento de la proteinemia como resultado de la absorción de las inmunoglobulinas contenidas en el calostro. A medida que los anticuerpos calostrales disminuyen, el recién nacido comienza la síntesis autógena de estas proteínas inmunes. En el ternero, la inmunocompetencia se alcanza aproximadamente a partir de las dos semanas de vida. Ya en la pubertad, se alcanzan los niveles "normales" o niveles de animal adulto. Sin embargo, al aumentar la edad las proteínas plasmáticas comienzan a superar los niveles "normales" como resultado de una pequeña disminución en las albúminas y de un progresivo aumento de las globulinas.
2. **Hormonas, preñez y lactancia.** Durante la gestación, las proteínas plasmáticas totales disminuyen debido a una disminución de las albúminas, a pesar de que paralelamente se produce un incremento en las globulinas. Hacia el final de la preñez existe un rápido aumento de las Ó-albúminas con un correspondiente aumento en la proteinemia. Durante la lactancia, nuevamente se produce una disminución de la proteinemia debido a un descenso de las albúminas

Algunas hormonas que tienen efectos anabólicos, tales como la testosterona, estrógenos y hormona del crecimiento, producen un aumento de la proteinemia. Otras hormonas, tales como la tiroxina y el cortisol, tienden a producir una disminución de la proteinemia debido a sus efectos catabólicos.

En términos generales, se podría concluir que una proteinemia es el resultado de la suma de las albúminas y de las globulinas y que una proteinemia elevada puede indicar un buen estado nutricional.

Por otra parte, un aumento de los niveles de albúmina puede estar indicando un estado de deshidratación, mientras que una disminución indicaría malnutrición, o bien enfermedades que afecten al hígado, riñón o aparato digestivo.

Las globulinas aumentan durante la preñez, enfermedades inflamatorias, enfermedades pulmonares, hepáticas, anemias y enfermedades infecciosas en general. Una globulinemia baja es característica en mamíferos recién nacidos antes de que consuman calostro.

### b. Nitrógeno ureico

El N-ureico, tal como se mencionó en la Sección 4 de éste capítulo, depende de la cantidad de N absorbido desde el rumen, el que depende, a su vez, de la degradabilidad de la proteína y del NNP consumido. Sus niveles sanguíneos, en general, serán máximos a altos consumos de proteína a no ser que ésta sea poco degradable.

Por otra parte, una desnutrición puede elevar los niveles de N-ureico al existir una gran movilización de proteína corporal. Por lo tanto, este parámetro tampoco puede usarse como única medición, siendo recomendable usarlo con la proteinemia y con otras que se indican a continuación.

### c. Transaminasas

Estas se refieren a dos enzimas comunmente empleadas para la detección de enfermedades hepáticas. La más específica del hígado es la alanina-aminotransferasa (ALT), también llamada glutámico-piruvico-transaminasa (GPT); la otra transaminasa, es la aspartato-aminotransferasa (AST), también conocida como glutámico-oxaloacético-transaminasa (GOT), la que es menos específica del hígado, pudiendo también servir para detectar problemas musculares. Esta última enzima se eleva en aquellos casos en que se está degradando proteína corporal para suministrar energía en momentos de deficiencia energética.

### d. Colesterol

Este metabolito, precursor de las hormonas sexuales, es un excelente indicador del grado de alimentación energética de las vacas lecheras, dado que disminuye en aquellos casos de sub-alimentación, o cuando el balance energético es negativo.

Los parámetros anteriores pueden usarse para determinar el estado nutricional de los animales, aunque su utilidad será mayor cuando se usan en conjunto y durante cierto período de tiempo, durante el cual se desea determinar el efecto de algún tratamiento alimenticio. Estas mediciones presentan una gran importancia en la investigación con ganado lechero y se complementan excelentemente con las mediciones rutinarias de análisis de alimentos, heces y orina.

A continuación se presentan algunos datos de valores normales de parámetros sanguíneos en vacas lecheras:

Parámetro	Unidad	Valor en vacas
ALT o GPT	U/litro	14 - 38
AST o GOT	U/litro	78 - 132
Colesterol	mg/100 ml	80 - 120
Proteínas	g/litro	67 - 75
Globulinas	g/litro	30 - 35
N-ureico	mg/100 ml	20 - 30

Entre los parámetros urinarios se pueden mencionar los siguientes:

Parámetro	Unidad	Valor en vacas
N-ureico	mg/kg/día	23 - 28
N-total	mg/kg/día	40 - 450
N-amoniaco	mg/kg/día	1 - 17
Volúmen de orina	ml/kg/día	17 - 45

## 8. LITERATURA CITADA

- ARC (AGRICULTURAL RESEARCH COUNCIL). 1980. The nutrient requirements of livestock. Commonwealth Agricultural Bureaux. Farnham Royal, England, Gresham Press. 351 p.
- BURROUGHS, W.; TRENKLE, A.H.; VETTER, R.L. 1971. Some concepts of protein nutrition of feedlot cattle. *Veterinary Medicine and Small Animal Clinic* 66:238.
- BURROUGHS, W.; TRENKLE, A.; VETTER, R.L. 1974. A system of protein evaluation for cattle and sheep involving metabolizable protein (amino acids) and urea fermentation potential of feedstuffs. *Veterinary Medicine and Small Animal Clinics* 69:713.
- BURROUGHS, W.; NELSON, D.K.; MERTENS, D.B. 1975a. Evaluation of protein nutrition by metabolizable protein and urea fermentation potential. *Journal of Dairy Science* 58:611-619.
- BURROUGHS, W.; NELSON, D.K.; MERTENS, D.B. 1975b. Protein physiology and its application in the lactating cow: The metabolizable protein feeding standard. *Journal of Animal Science* 41:933-944.
- CHALUPA, W. 1975. Rumen bypass and protection of protein and amino acids. *Journal of Dairy Science* 58:1198.
- CHALUPA, W. 1980. Methods for estimating protein requirements and feed protein values for ruminants. *Feedstuffs* 52(26):18-20.
- ELLIOTT, R.C.; TOPPS, J.H. 1963a. Studies of protein requirements of ruminants. 1. Nitrogen balance trials on two breeds of African cattle given diets adequate in energy and low in protein. *British Journal of Nutrition* 17(4):539-547.
- ELLIOTT, R.C.; TOPPS, J.H. 1963b. Studies on protein requirements of ruminants. 2. Protein requirement for maintenance of three breeds of cattle. *British Journal of Nutrition* 17(4):549-568.
- HUME, I.D. 1970. Synthesis of microbial protein in the rumen. III. The effect of dietary protein. *Australian Journal of Agricultural Research* 21(2):305-314.
- HUNGATE, R.E. 1966. The rumen and its microbes. New York, Academic Press. 533 p.
- KASS, MARIA L. 1990. Determinación del nitrógeno en los alimentos. In *Nutrición de rumiantes: Guía metodológica de investigación*. M.E. Ruiz, A. Ruiz (Eds.). San José, Costa Rica, IICA. ALPA-RISPAL. p. 49-58.

- LITTLE, C.O.; BURROUGHS, W.; WOODS, W. 1963. Nutritional significance of soluble nitrogen in dietary proteins for ruminants. *Journal of Animal Science* 22:358-363.
- MAENG, W.J.; BALDWIN, R.L. 1976. Factors influencing rumen microbial growth rates and yields: Effects of urea and amino acids over time. *Journal of Dairy Science* 59:643-647.
- MAYNARD, L.A.; LOOSLI, J.K.; HINTZ, H.F.; WARNER, R.G. 1979. *Animal Nutrition*. 7 ed. New York, McGraw Hill. 602 p.
- MILLER, W.J. 1979. Dairy cattle feeding and nutrition. T.J. Cunha (ed.). New York, Academic Press. 441 p.
- NRC (NATIONAL RESEARCH COUNCIL). 1978. Nutrient requirements of dairy cattle. 5 ed. Washington, D.C., National Academy of Sciences. 108 p.
- NRC (NATIONAL RESEARCH COUNCIL). 1985. Ruminant nitrogen usage. Washington, D.C., National Academy Press. 138 p.
- OLDHAM, J.D. 1984. Protein-energy interrelationships in dairy cattle. *Journal of Dairy Science* 67:1090-114.
- ØRSKOV, E.R. 1982. Protein nutrition of ruminants. London, England, Academic Press. 160 p.
- PAQUAY, R.; GODEAU, J.M.; DeBAERE, R.; LOUSSE, A. 1973. The effects of the protein content of the diet on the performance of lactating cows. *Journal of Dairy Research* 40:93-103.
- REID, J.T.; MOE, P.W.; TYRRELL, H.F. 1966. Energy and protein requirements of milk production. *Journal of Dairy Science* 49:215-223.
- SWANSON, E.W.. 1977. Factors for computing requirements of protein for maintenance of cattle. *Journal of Dairy Science* 60:1583-1593.
- THOMAS, P.C. 1975. Diet and milk secretion in the ruminant. *World Review of Animal Production* 11(4):33-44.
- TYRRELL, H.F.; MOE, P.W. 1975. Symposium: Production efficiency in the high producing cow: Effect of intake on digestive efficiency. *Journal of Dairy Science* 58:1151-1163.
- TYRRELL, H.F.; HAALAND, G.L.; MOE, P.W.; BROWN, A.C.G. 1981. effect of level and solubility of protein on energy value of corn silage based rations fed to Holstein cows. *Journal of Dairy Science* 64(Suppl.1):123-124. (Compendio).
- VAN SOEST, P.J. 1982. Nutritional ecology of the ruminant. Corvallis, Oregon, O & B Books. 374 p.
- VERITE, R.; JOURNET, R.; JARRIEGE, R. 1979. A new system for the protein feeding of ruminants: The PDI system. *Livestock Production Science* 6:349.
- WHITELAW, F.G.; PRESTON, T.R. 1963. The nutrition of the early-weaned calf. III. Protein solubility and amino acid composition as factors affecting protein utilization. *Animal Production* 5:131-145.
- WOHLT, J.E.; SNIFFEN, C.J.; HOOVER, W.H. 1973. Measurement of protein solubility in common feedstuffs. *Journal of Dairy Science* 56:1052-1057.

# CAPÍTULO III

## REQUERIMIENTO DE CALCIO, FÓSFORO, POTASIO Y MAGNESIO EN RUMIANTES

*Fernando García Gómez*

*Departamento de Zootecnia, Facultad de Agronomía,  
Pontificia Universidad Católica de Chile*

## CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN .....	137
2. FUENTES DE MINERALES .....	138
3. DETECCIÓN DE DEFICIENCIAS MINERALES .....	139
4. DETERMINACIÓN DEL REQUERIMIENTO MINERAL EN RUMIANTES .....	141
a. Requerimiento de calcio .....	141
b. Requerimiento de fósforo .....	142
c. Requerimiento de magnesio .....	143
d. Requerimiento de potasio .....	144
5. EJEMPLOS PARA ESTIMAR REQUERIMIENTOS DE MINERALES .....	146
a. Cálculo de la productividad de leche promedio diaria .....	147
b. Cálculo del peso corporal de la vaca .....	147
c. Cálculo del peso y retención mineral del feto .....	147
d. Composición promedio de la leche de vaca .....	148
e. Composición de la ganancia peso .....	148
f. Cálculo de requerimientos de la vaca del ejemplo .....	149
6. LITERATURA CITADA .....	150

# REQUERIMIENTO DE CALCIO, FÓSFORO, POTASIO Y MAGNESIO EN RUMIANTES

*Fernando García Gómez*

*Departamento de Zootecnia, Facultad de Agronomía,  
Pontificia Universidad Católica de Chile*

## 1. INTRODUCCIÓN

Los tejidos animales contienen minerales o elementos inorgánicos en cantidades y proporciones variables, comprendidos en las cenizas obtenidas después de la calcinación de las respectivas muestras (Underwood 1981).

Los minerales se pueden clasificar en:

**a. Elementos esenciales.** Son aquellos cuya carencia en la dieta producen síntomas de deficiencia (enfermedad carencial), haciendo imposible que el animal exprese su potencia productiva.

**b. Elementos probablemente esenciales.** Serían aquellos que se encuentran presentes en los alimentos y en los tejidos animales y cuya función no ha sido descrita todavía.

**c. Elementos no-esenciales.** Corresponden a aquellos no requeridos por el animal.

Entre los esenciales y los no-esenciales se puede, además, distinguir aquellos elementos que son tóxicos.

Al presente, se piensa que 22 elementos inorgánicos son esenciales para los animales superiores. Entre éstos se distinguen siete elementos mayores o macro elementos: calcio, fósforo, potasio, sodio, cloro, magnesio y azufre; y 15 micro elementos o elementos trazas: hierro, yodo, zinc, cobre, manganeso, cobalto, molibdeno, selenio, cromo, estaño, vanadio, fluor, sílice, níquel y arsénico. La esencialidad de los seis últimos, según Underwood (1981), está basada casi exclusivamente en efectos sobre el crecimiento de animales en condiciones altamente especializadas.

En general, en las raciones alimenticias para rumiantes, que se calculan en condiciones prácticas, se busca satisfacer los requerimientos para los macronutrientes *proteína cruda, energía metabolizable y fibra cruda*, balanceando, eventualmente los niveles de calcio y fósforo y de algún otro elemento inorgánico. Sin embargo, teniendo en cuenta que para animales de alta producción, o en condiciones especiales en que se esté trabajando (en zonas donde existe algún tipo de deficiencia en el suelo y, por consiguiente, en el forraje), se hace necesario tomar en cuenta los requerimientos de otros elementos. Por otra parte, al variar la composición de la dieta para lograr la satisfacción de requerimientos de los macronutrientes, se establece una alteración en la proporción de algunos nutrientes que compondrán las dietas de los animales.

Entre las principales funciones generales que cumplen los elementos inorgánicos, se distinguen las siguientes:

- a. Son componentes estructurales de órganos y tejidos corporales. En este sentido está clara la participación del calcio, fósforo, magnesio, fluor y sílice como componentes esenciales de huesos y dientes, como también la participación del fósforo y del azufre en los tejidos blandos.
- b. Están presentes en los fluidos corporales y tejidos donde cumplen funciones tales como la mantención de la presión osmótica, del equilibrio ácido:base, de la permeabilidad de las membranas y de la irritabilidad tisular. En este sentido, está clara la participación del sodio y del potasio en el transporte activo a través de la membrana celular, el rol que juegan el calcio y el magnesio en las transmisiones nerviosas, la participación del cloro en las secreciones gástricas, etc.
- c. Son catalizadores enzimáticos, formando parte de metalo-enzimas o componentes o activadores específicos de hormonas. Hay muchos ejemplos relacionados a esta función general: el hierro y el cobre juegan un papel fundamental a nivel de citocromos para el transporte de electrones; el zinc participa activamente en la formación de CO<sub>2</sub> y en el metabolismo del alcohol etílico, al ser componente de los sistemas enzimáticos que involucran a las enzimas anhidrasa carbónica y deshidrogenasa alcohólica; el manganeso es un activador de la enzima carboxilasa pirúvica; el magnesio actúa como activador en varias decenas de reacciones relacionadas con el metabolismo de carbohidratos; el cobalto es un componente de la vitamina B<sub>12</sub>, la que funciona como co-enzima; el yodo es componente de la hormona tiroxina, etc.

## 2. FUENTES DE MINERALES

Por lo general, los animales rumiantes obtienen los minerales a través de la dieta, la que está compuesta en su mayoría por forrajes y a veces por concentrados. Por consiguiente, el suministro de elementos inorgánicos dependerá de la presencia y de la disponibilidad de ellos en el alimento que consumen.

La presencia y disponibilidad de minerales en los forrajes y granos que consumen los rumiantes es variable y depende de la riqueza del suelo y del programa de fertilización del mismo, de la especie de la planta y de su estado vegetativo, y de las condiciones ambientales al momento de la cosecha.

El efecto del suelo en el contenido mineral de la planta es extraordinario. Esta reacciona ya sea limitando su crecimiento o desarrollando su potencial genético al máximo cuando encuentra los nutrientes en forma limitada o en cantidades adecuadas, respectivamente. Cuando se enmiendan y se fertilizan los suelos con cantidades adecuadas de elementos inorgánicos y existen las condiciones climáticas requeridas, la planta responde con un mayor crecimiento, pudiendo además aumentar la concentración de el o los elementos aplicados.

Desde el punto de vista de la nutrición del animal, el estado vegetativo de las plantas que éste consume, determina el nivel de ingestión de los elementos inorgánicos disponibles. Estos varían según el estado vegetativo de la planta, y muchos de ellos disminuyen conforme la planta madura, como es el caso del fósforo y del potasio. Otros elementos, tales como el magnesio, manganeso, cobalto, hierro y cobre disminuyen, pero lo hacen en un menor grado. Existen ejemplos, como son el caso del calcio y del sílice, que pueden aumentar con la madurez de la planta. Estos hechos, hacen que con cambios de estación y, por consiguiente, con cambios en el estado vegetativo de las plantas, se produzcan alteraciones en la nutrición mineral de los animales y eventualmente se obtenga una menor producción animal e incluso síntomas de deficiencias. En zonas templadas, es conocido el problema causado por la hipomagnesemia o "tetania de los pastos", la que ocurre preferentemente en vacas lecheras adultas y de alta producción al terminar el invierno o al iniciarse la primavera, cuando están consumiendo forrajes tiernos y suculentos que han sido fertilizados fuertemente con nitrógeno y con potasio previo a la estación de máximo crecimiento de los forrajes. Este último ejemplo demuestra la interacción entre diversos nutrientes y la atención que hay que prestar cuando se alimentan rumiantes para una alta producción.

Por otra parte, al profundizar los estudios de la nutrición mineral en rumiantes, se tiene que considerar la disponibilidad de los diversos elementos inorgánicos. De esta manera, a medida que los animales alcanzan la madurez fisiológica, la capacidad para absorber los elementos disminuye, o estos se hacen menos disponibles para ser absorbidos. Se ha dado el caso de que la disponibilidad del magnesio puede disminuir de un 70% a un 40% en terneros lactantes al compararlos con novillos. Además, existen diferencias entre la disponibilidad de un elemento cuando este se encuentra en el forraje o en el grano.

El determinar la disponibilidad mineral en los alimentos para el ganado es difícil, dado los factores que intervienen. La investigación con minerales debe hacerse durante períodos bastante largos o con controles a diversos niveles. Los ensayos corrientes de digestibilidad presentan ciertos resultados que no pueden generalizarse con mucha facilidad. Esto es debido a que las heces constituyen una vía de excreción de minerales variable, pero importante. Los elementos que se encuentran en ella representan aquellos que no fueron absorbidos y aquellos que fueron absorbidos y metabolizados posteriormente.

### 3. DETECCIÓN DE DEFICIENCIAS MINERALES

Una deficiencia mineral produce ciertos síntomas que se pueden identificar. Estos se refieren a síntomas clínicos, cuya característica está dada por anomalías producidas donde el elemento cumple funciones primordiales. Por lo general, los síntomas clínicos se vienen a detectar cuando la deficiencia ha sido severa o prolongada, a diferencia de los síntomas sub-clínicos, que son más difíciles o imposibles de detectar a simple vista y usualmente requieren de otro tipo de análisis que se usa complementariamente a la observación de la menor producción que se puede obtener.

En la actualidad, en aquellos rebaños manejados de acuerdo a estándares de sistemas productivos, es difícil que se presenten síntomas clínicos. Sin embargo, con la mayor productividad animal, o al trabajar con animales de alta producción o de alto potencial genético, es posible que se produzcan deficiencias sub-clínicas. En estos casos, si las condiciones económicas lo permitieran, el productor debería basarse no sólo en el rendimiento animal para detectar deficiencias sub-clínicas sino que podría hacer uso de análisis fecales, urinarios y sanguíneos.

Debido a la homeostasis de un gran número de elementos, se hace difícil basarse solamente en los análisis sanguíneos, aunque éstos son de gran ayuda para interpretar resultados experimentales, especialmente cuando entre los parámetros analizados se incluyen los propios elementos inorgánicos, además de metabolitos sanguíneos y enzimas.

El uso de análisis de orina presenta ciertas ventajas para algunos elementos inorgánicos, especialmente para el caso del fósforo, que tiende a no ser excretado por la orina cuando el animal está consumiendo dietas deficientes en este elemento.

A continuación, en el Cuadro 1, se presentan algunos valores normales de ciertos metabolitos en sangre y en orina de trabajos realizados en el Departamento de Zootecnia, Universidad Católica de Chile (Proyecto FONDECYT 0213-88), los que se han complementado con información obtenida por Kaneko (1989).

Valores menores a los señalados en el Cuadro 1 indicarán una nutrición deficiente en el elemento inorgánico respectivo u otro problema patológico digno de estudiar para mantener en una buena situación el sistema productivo.

<b>Cuadro 1. Valores normales de metabolitos sanguíneos y urinarios en rumiantes</b>			
<b>Metabolito</b>	<b>Ovinos</b>	<b>Bovinos</b>	<b>Unidad</b>
<b>En sangre</b>			
Aspartato aminotransferasa (GOT)	93-245	78-132	mU/l
Calcio	11.5-12.8	9.7-12.4	mg/100ml
Colesterol total	52-76	80-120	mg/100ml
Fosfatasa alcalina	68-387	0-488	U/l
Fosforo inorgánico	5.0-7.3	5.6-6.5	mg/100ml
Glucosa	50-80	45-75	mg/100ml
LDH	238-440	692-1445	U/l
Magnesio	2.2-2.8	1.8-2.3	mEq/l
N ureico	8-20	20-30	mg/100ml
Potasio	3.9-5.4	3.9-5.8	mEq/l
Proteína total	60-79	67.4-74.6	g/l
<b>En orina</b>			
Calcio	2.0	0.1-1.4	mg/kg/d
Fósforo	0-0.2		mg/kg/d
Magnesio	4-7	3.7	mg/kg/d
N ureico	98	23-28	mg/kg/d
N total	98	23-28	mg/kg/d
Potasio	120-350	40-450	mg/kg/d
Sodio	3-91	4.6-23.0	mg/kg/d

Fuente: Kaneko (1989).

Proyecto FONDECYT 0213-88, Universidad Católica de Chile.

#### 4. DETERMINACIÓN DEL REQUERIMIENTO MINERAL EN RUMIANTES

Posiblemente los métodos que han dado los mejores resultados para estimar los requerimientos de minerales en rumiantes, son aquellos que incluyen balances minerales. Es decir, la diferencia entre el mineral consumido y la excreción total de éste, en heces y en orina.

Para estimar los requerimientos para mantención se han extrapolado, a cero consumo del nutriente, los resultados obtenidos al alimentar los animales con dietas con diversos niveles del elemento. El uso de esta técnica, sin determinar el punto donde se producen balances negativos, induce a errores y sub-estima el requerimiento. Por lo tanto, lo correcto será designar como requerimiento de mantención a aquel valor que produzca un balance igual a cero.

Al requerimiento de mantención se le agregará lo que se necesite para crecimiento y producción. La cantidad neta del elemento que se deposite en la ganancia de peso (tejidos duros y blandos) o en el producto (leche, lana) determinará la cantidad del elemento requerida para crecimiento y producción.

Para expresar la cantidad total del elemento inorgánico que debiera tener la dieta, es necesario corregir por la disponibilidad de cada elemento para así tener un aporte adecuado.

##### a. Requerimiento de calcio

Alrededor del 99% del calcio se encuentra en el esqueleto y dientes y el resto se distribuye en los fluidos y tejidos blandos del organismo donde cumple diversas funciones esenciales.

El calcio está presente como ión libre, ligado a proteínas séricas y formando parte de ácidos orgánicos e inorgánicos. El calcio iónico cumple funciones fisiológicas, tales como conducción nerviosa y mantención de la contracción y relajación muscular. Actúa, además, como un co-factor enzimático y juega un papel en la coagulación sanguínea.

Este es uno de los elementos críticos en la dieta de rumiantes, especialmente en el ganado lechero. Por una parte, cuando se usan sistemas de crianza artificial de terneros con restricción de leche o de sustituto, el preocuparse de este nutriente es fundamental. Por otra parte, cuando se trabaja con vacas lecheras de alta producción, donde existe una excreción diaria de calcio en la leche en cantidades apreciables, la nutrición de los animales con calcio es vital. Por lo tanto, existen dos etapas críticas, una de ellas durante el período de crianza y la otra durante la fase de mayor productividad de la lactancia en la que el aporte de nutrientes de la dieta es menor a los requerimientos del animal.

Para determinar las necesidades de los animales existen diversas tablas de requerimientos, las que se han basado en resultados de una larga serie de ensayos nutricionales empleando diversas técnicas experimentales. La mayoría de ellas indican la relación que existe en la nutrición del calcio con la del fósforo y la vitamina D.

De acuerdo a Underwood (1981), el calcio no es un problema regional, como lo es el fósforo, en animales en pastoreo. Esto se debe a que, por lo general, la mayoría de los pastos y forrajes contienen más calcio que fósforo, dado que suelos pobres en calcio son menos comunes que suelos pobres en fósforo y a que, cuando la planta avanza hacia la madurez, los niveles de calcio no disminuyen tan dramáticamente como los de fósforo. Sin embargo, puede ocurrir una deficiencia de calcio en animales altamente productivos; por ejemplo, cuando pastorean praderas en regiones húmedas, sobre suelos arenosos y cuando el forraje contiene cantidades inferiores a 0.2% de calcio (en base a materia seca).

Los síntomas aparentes de cantidades insuficientes de calcio en la dieta de animales incluyen un menor crecimiento o productividad (carne o leche). Un manejo inadecuado de la dieta con respecto al calcio puede producir fiebre de leche o hipocalcemia en vacas al inicio de su lactancia. Si la deficiencia de este nutriente es prolongada, se afectará el crecimiento normal del tejido óseo. Algunos de estos síntomas no son característicos de una deficiencia de calcio por lo que al desear identificar exactamente el tipo de problema deberá recurrirse al análisis de cambios que se producen en otros tejidos (sangre) y excreciones (orina).

**Ensayo con ovinos.** Se realizó un ensayo con corderos (Proyecto FONDECYT 0213-88, Universidad Católica de Chile) de aproximadamente 1 año de edad, mantenidos en jaulas metabólicas. Estos se alimentaron, durante diversos períodos, con diferentes cantidades de calcio, las que variaron entre 7 y 60 mg/kg de peso vivo. Al determinar los respectivos balances de calcio, se observó que estos fueron negativos cuando el suministro del nutriente fue de 52 mg/kg de peso vivo. De acuerdo a estos resultados, ese sería el requerimiento de mantención para calcio en la dieta (Fig. 1).

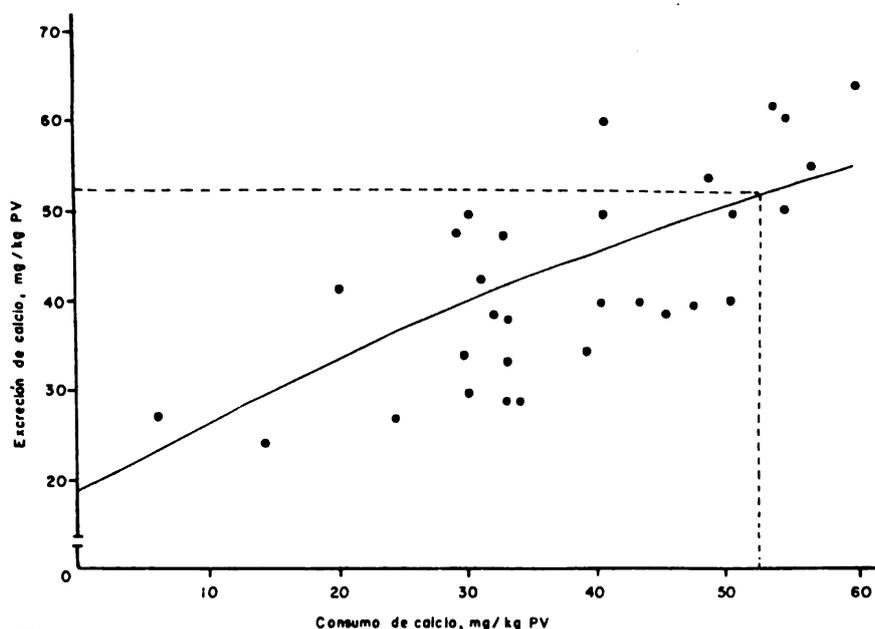


Fig. 1 Determinación del requerimiento de calcio en corderos (datos no publicados del autor)

Church (1971), basado en varias publicaciones del National Research Council, indica que el requerimiento de calcio para ovejas en mantención se sitúa alrededor de 0.2% de la materia seca. Si se considera un consumo de materia seca para mantención equivalente a 2.5%-2.8% del peso vivo, se concluye que la recomendación de calcio está alrededor de los 50 mg/kg de peso vivo para ambas especies. Sin embargo, en la publicación del NRC (1978) para vacas lecheras, la recomendación para vacas en mantención varía entre 34 a 40 mg/kg de peso vivo y entre 59 a 66 mg/kg de peso vivo para el período seco. Variaciones entre estas recomendaciones son explicables dados los métodos usados y las explicaciones del NRC son claras al afirmar que los valores para el caso de los minerales son sólo guías y no debieran ser usadas como "una base legal o regulatoria".

Para el caso de querer establecer requerimientos de minerales dentro del contexto del presente trabajo, relacionado con los sistemas de producción, parece adecuado considerar los resultados del trabajo del autor (Proyecto FONDECYT 0213-88), que establecen en 52 mg/kg de peso vivo el requerimiento de calcio para mantención. A esta cantidad habrá que agregarse los requerimientos para crecimiento, reproducción y/o lactancia, cuando corresponda.

#### b. Requerimiento de fósforo

Alrededor del 80% del fósforo está presente en huesos y dientes, mientras que el 20% restante se distribuye en el resto de los tejidos del organismo animal.

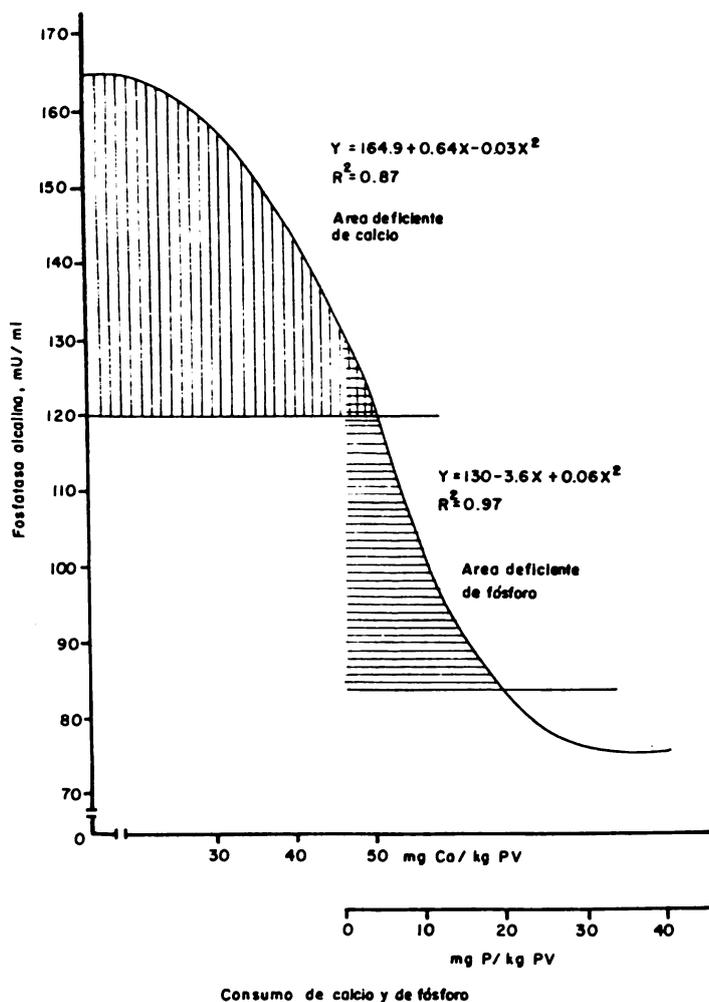


Fig. 2 Fosfatasa alcalina vs. estatus de calcio y fósforo

**Relación fosfatasa alcalina y estado nutricional de calcio y fósforo.** Con los resultados obtenidos con los corderos del Proyecto FONDECYT 0213-88, se correlacionó la actividad de la enzima fosfatasa alcalina sérica con los datos usados para determinar los balances de calcio y de fósforo (Fig. 2). En ésta, se observa que los coeficientes de determinación ( $R^2$ ) para el caso del calcio y del fósforo fueron de 0.82 y 0.97, respectivamente. Estos resultados indican el valor de la determinación de esta enzima para evaluar el estado nutricional de ambos minerales. Cuando la actividad de la enzima está en niveles entre 85 y 130 mU/ml de suero, estaría indicando una posible deficiencia de fósforo, dado que los balances negativos para este elemento se ubicaron dentro de ese rango, donde los consumos de fósforo fueron de 0 a 28 mg/kg de peso vivo. Cuando la actividad de la enzima sobrepasa los 120 mU/ml de suero es probable que se esté ante una deficiencia de calcio; los consumos de calcio para obtener esa actividad de la fosfatasa alcalina fueron menores a 52 mg/kg de peso vivo.

### c. Requerimiento de magnesio

El magnesio es otro macroelemento inorgánico esencial en la nutrición animal. Se encuentra en una proporción de aproximadamente 0.05% del cuerpo del animal, del cual entre el 60% y el 70% está en el esqueleto y solamente un 1% en el fluido extracelular; el resto se encuentra en los tejidos blandos (García *et al.* 1990b). Este elemento participa en aproximadamente 80 reacciones enzimáticas, siendo particularmente importante en el metabolismo de carbohidratos y lípidos.

El papel del fósforo es vital, no tan sólo por ser un componente de huesos y dientes, sino también por ser un componente de ácidos nucleicos, por ayudar en la síntesis de amino ácidos y proteínas, por ser primordial en la mantención de la presión osmótica y del equilibrio ácido:base, por ser un componente de los fosfolípidos y por ser vital para la utilización y transferencia de la energía (formación de ATP y de compuestos ricos en energía). Por consiguiente, una deficiencia de fósforo en la dieta de los animales causa una serie de trastornos, incluyendo disminuciones del apetito, del crecimiento de los microorganismos ruminales, del aprovechamiento de la dieta y de la productividad animal.

En forma similar que para el caso del calcio, se realizó una serie de pruebas con ovinos (Proyecto FONDECYT 0213-88) en la que se determinó que el requerimiento mínimo de fósforo para mantención era de 28.5 mg/kg de peso vivo. La información para vacas lecheras (NRC 1978) indica que el requerimiento mínimo de fósforo para mantención varía entre 26.2 y 32.5 mg/kg de peso vivo. De acuerdo a lo anterior, aparentemente se pueden extrapolar para vacas lecheras resultados obtenidos para el caso de ovinos, especialmente si se considera que el promedio de las sugerencias del NRC es de 29.5 mg/kg de peso vivo.

Por lo tanto, al igual que lo explicado anteriormente, al desear establecer requerimientos para fósforo en cualquier estado fisiológico del animal, al requerimiento mínimo establecido para mantención se le deberá agregar el requerimiento para aquella función que corresponda.

Son muchos los factores que afectan los requerimientos de magnesio. Aparentemente, altos niveles de potasio en la dieta de rumiantes afectan el metabolismo del magnesio, produciendo síntomas de deficiencia de este nutriente. Además, se han descrito condiciones de hipomagnesemia en animales de alta productividad consumiendo forrajes tiernos al inicio de la primavera. Otros nutrientes, tales como sodio, nitrógeno, calcio, fósforo, aluminio y carbohidratos solubles, también estarían interactuando con el metabolismo del magnesio (Chicco *et al.* 1973; Fontenot *et al.* 1973; Giduk y Fontenot 1984). Es interesante el hecho de que un exceso de potasio pueda causar tetania nutricional, particularmente cuando el contenido de potasio es alto en comparación con el contenido de magnesio. La dieta de rumiantes generalmente contiene cantidades suficientes de esos nutrientes para cubrir sus requerimientos, por lo que el

problema parecería radicar, más bien, en la relación entre estos dos nutrientes en la materia seca consumida. De acuerdo a Wise *et al.* (1963) y Chicco *et al.* (1973), el consumo de fósforo tiene sólo un pequeño efecto sobre el metabolismo del magnesio. Este efecto se observaría en dietas con bajos niveles de calcio y altos niveles de fósforo, donde disminuiría el magnesio sérico.

De acuerdo al NRC (1978) consumos de 12 a 16 mg de magnesio por kg de peso vivo serían suficientes para mantener niveles normales de magnesio sérico en terneros lactantes. El requerimiento para mantención de vacas lecheras lo sitúan en alrededor de 4 mg de magnesio disponible por kg de peso vivo. Ya que la disponibilidad del magnesio para vacas lecheras se sitúa en alrededor del 20%, el requerimiento de magnesio total estaría en alrededor de 20 mg/kg de peso vivo. En terneros lactantes, la disponibilidad del magnesio de la dieta es de aproximadamente 40%.

En los ensayos del Proyecto FONDECYT 0213-88, realizados con corderos, se obtuvo un requerimiento para mantención de 28 mg/kg de peso vivo como magnesio total, tal como se muestra en la Fig. 3.

#### d. Requerimiento de potasio

El potasio es uno de los elementos relacionados con la irritabilidad nerviosa y junto con el sodio está directamente relacionado con el transporte activo a través de las membranas. Cuando un nervio es estimulado, se difunde rápidamente, regresando a la fibra nerviosa durante el descanso posterior.

Se sabe de varias enzimas relacionadas con el metabolismo de carbohidratos que son dependientes del potasio.

Con respecto a requerimientos de potasio en rumiantes a nivel de mantención, no existen datos exactos aunque sí trabajos en los que se ha intentado definirlos alimentando animales rumiantes con cantidades variables de K en la dieta. En el libro de Church (1971) aparecen valores de 56 a 64 mg/kg de peso vivo para corderos y de 80 a 133 mg/kg de peso vivo para bovinos. En los ensayos del Proyecto FONDECYT 0213-88 se encontró que se produjeron balances negativos cuando los corderos consumieron menos de 80 mg/kg de peso vivo (Fig. 4).

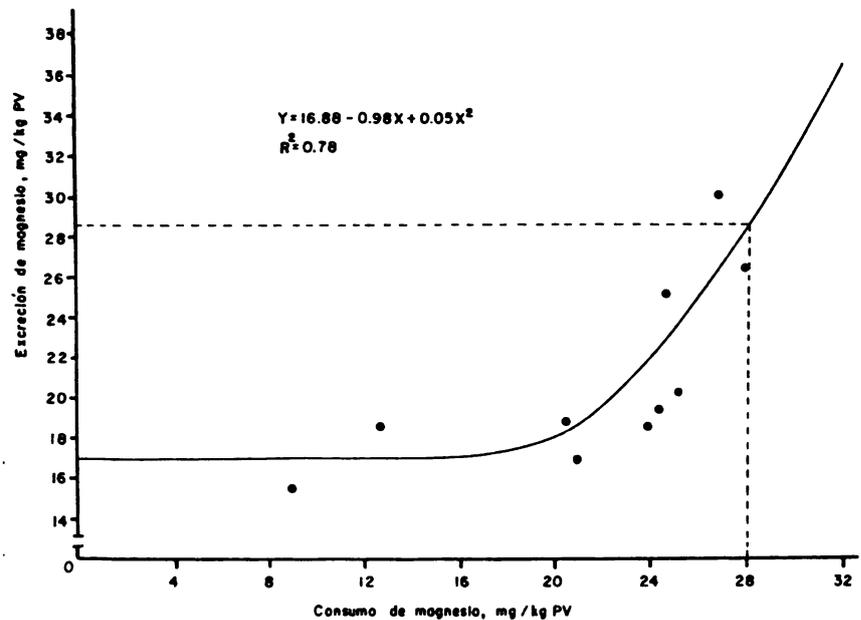


Fig. 3 Determinación del requerimiento de magnesio en corderos (Proyecto FONDECYT 0213-88, Chile)

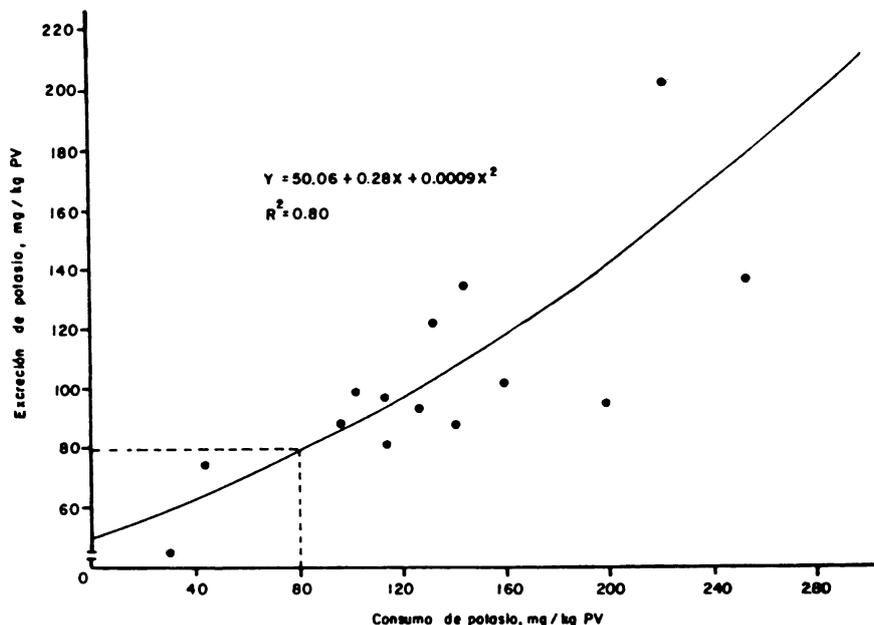


Fig. 4 Determinación del requerimiento de potasio en corderos (Proyecto FONDECYT 0213-88, Chile)

**Relación entre magnesio, potasio, sodio y urea.** En un ensayo reciente realizado en el Departamento de Zootecnia de la Universidad Católica de Chile (García *et al.* 1992), se alimentaron corderos mantenidos en jaulas de metabolismo con una dieta base similar a las descritas para otros ensayos (García *et al.* 1990a, 1990b). Se usaron dos niveles de magnesio: 20 y 50 mg/kg de peso vivo y niveles variables de potasio que fueron desde 50 mg/kg hasta 450 mg/kg de peso vivo. Los resultados se muestran la Fig. 5.

Se observó que se produjeron balances negativos de magnesio al suministrar 50 mg/kg de peso vivo de potasio y niveles de 20 mg/kg de peso vivo de magnesio. Este resultado se esperaba dado que se suministró una cantidad menor a los 28 mg de magnesio requeridos para

mantención. Sin embargo, al adicionar urea a la dieta, con 20 mg/kg de peso vivo de magnesio, o urea más NaCl, se obtuvieron balances negativos de magnesio con 240 y con 350 mg/kg de peso vivo de potasio, respectivamente. Por otra parte, al aumentar el nivel de magnesio a 50 mg/kg de peso vivo, se produjo un balance negativo de magnesio con 175 mg/kg de potasio. Al adicionar, además, urea más NaCl, el balance negativo de magnesio se produjo con 400 mg/kg de potasio.

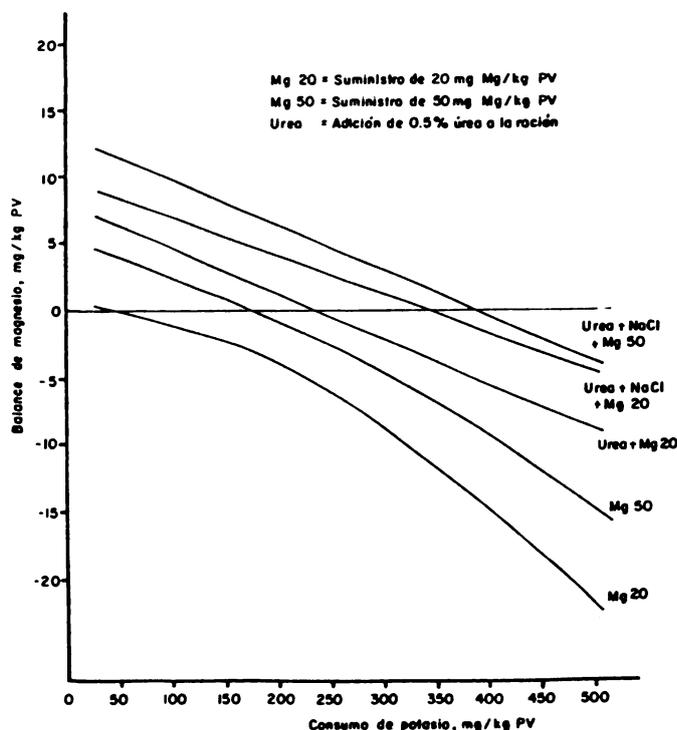


Fig. 5 Interacción entre el consumo de K, aditivo de la dieta y el balance de magnesio

Lo anterior sugiere una interrelación entre Mg, K, Na y N que harán variar los requerimientos minerales para mantención y, probablemente, también los de producción. Por consiguiente, al establecer dietas para los sistemas productivos que se deseen desarrollar, es necesario tomar en cuenta estas interrelaciones, además de otras que puedan existir.

Cuando se estableció el requerimiento de mantención para magnesio y potasio en corderos, se obtuvo 28 mg/kg PV para el primero y 80 mg/kg PV para el segundo, lo que determinó una relación magnesio:potasio de 1:2.9. Al aumentar el suministro de magnesio a 50 mg/kg de peso, la relación fue de 1:3.5. Al agregar 0.5% de urea a la ración con 20 mg de magnesio, la relación Mg a K fue de 1:12, lo que

sugiere un mejor aprovechamiento del magnesio cuando se incrementa el contenido de proteína cruda de la dieta de 4.7% a 7.2%, aproximadamente. Esto, posiblemente se debe al mayor uso de magnesio por el aumento en el crecimiento microbiano ruminal producido al aumentar la cantidad de nitrógeno total de la dieta.

Con la adición de urea más NaCl a dietas que contenían 20 mg de magnesio, la relación Mg a K fue de 1:17.5. Y cuando se adicionó urea más NaCl a dietas con 50 mg de magnesio, la relación fue de 1:8.

De lo anterior se desprende que con niveles normales de proteína cruda en la dieta y a bajos consumos de magnesio (cerca de los 28 mg/kg de peso vivo), la cantidad de potasio de la dieta no debe ser superior a 12 veces el contenido de magnesio. Por otra parte, a cantidades mayores de magnesio (alrededor de 50 mg/kg) en la dieta, la cantidad de potasio no debe ser superior a 8 veces la cantidad de magnesio. Para efectos prácticos, se puede sugerir mantener una relación no superior de 1:10. En el caso de que la cantidad de potasio sea mayor, por el tipo de alimentos que se deban utilizar, se sugiere la adición de sales de magnesio, y/o de NaCl, y de nitrógeno soluble a nivel ruminal, para que el efecto del potasio sobre el metabolismo del magnesio se atenúe.

## 5. EJEMPLOS PARA ESTIMAR REQUERIMIENTOS DE MINERALES

A continuación, se darán algunos ejemplos de estimación de requerimientos, siguiendo una secuencia lógica para conformar un algoritmo que puede incluirse en un modelo general.

Para esto, se necesita saber el estado fisiológico del animal, en este caso, una vaca lechera. Esto significa que se necesita saber la edad del animal, su producción diaria de leche y su estado reproductivo. Con la edad, se determinará el crecimiento que le corresponde en ese momento y el contenido mineral en los tejidos corporales que determinan el crecimiento, lo que permite calcular la cantidad del mineral retenido para el crecimiento. Con la producción diaria de leche, se determina la cantidad del nutriente que se secreta diariamente; y con el estado de gestación se puede estimar la cantidad del mineral retenido en el feto. Todo lo anterior identifica la cantidad neta del elemento inorgánico requerido por el animal para sus funciones productivas, por sobre las necesidades de mantención. Ahora bien, para estimar la cantidad del nutriente a aportar en la dieta, se deberá corregir por su grado de disponibilidad en el alimento.

Se sabe que la disponibilidad de los elementos inorgánicos, en términos generales, es menor en los forrajes que en los concentrados y que la disponibilidad también se ve afectada por la edad del animal, disminuyendo conforme el animal avanza hacia su madurez fisiológica. Estos antecedentes deberán ser tomados en cuenta para la estimación total de requerimientos.

El ejemplo se hará tomando el caso de una vaca de la raza Holandés Americano, con 31 meses de edad, cuyo parto se produjo a los 24 meses de edad, que quedó preñada a los 90 días post parto y cuya potencialidad a la primera lactancia es de 6800 l con 3.5% de materia grasa.

### a. Cálculo de la productividad de leche promedio diaria

Para este cálculo, se puede tomar en cuenta que dicha vaca producirá el 45% del total de leche durante el primer tercio de la lactancia, el 32% durante el segundo tercio y el 23% durante el tercer tercio de la lactancia. Esto significa que el promedio diario durante cada tercio es el siguiente:

Primer tercio: 30.60 litros  
 Segundo tercio: 21.76 litros  
 Tercer tercio: 15.64 litros

Por otra parte, se sabe que el promedio de disminución mensual de leche es alrededor del 10% de la producción del mes anterior, medidos después de la máxima productividad diaria. Por lo tanto al séptimo mes de lactancia, la producción promedio diaria será aproximadamente de 17.25 l/día.

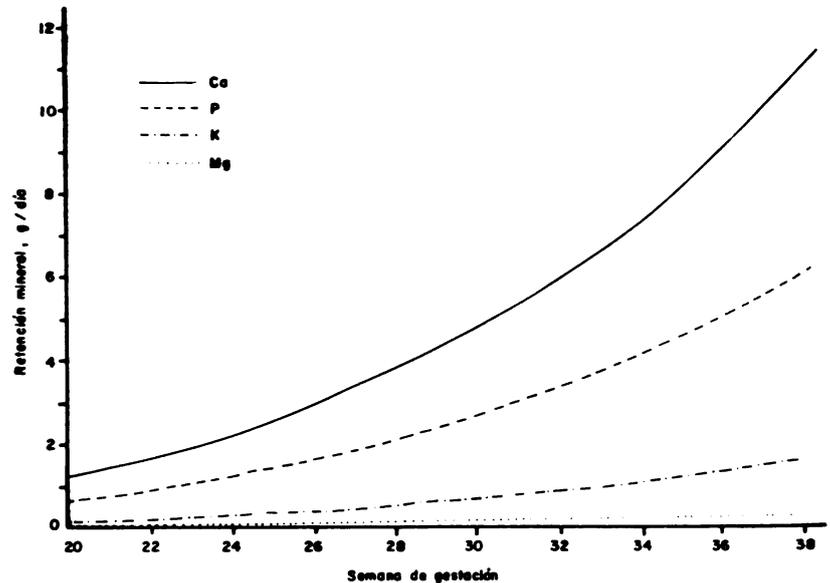


Fig. 6 Retención mineral durante la gestación

Lo anterior también puede calcularse usando la curva de lactancia de la vaca.

### b. Cálculo del peso corporal de la vaca

Haciendo uso de los datos del Cuadro 1 del Capítulo Requerimiento de Proteína en Ganado Lechero, donde aparecen los pesos promedio de hembras de la raza Holandés Americano, se puede calcular que la tasa de crecimiento, entre 24 y 36 meses, es de 164.38 g/día, por lo que a los 31 meses de edad la vaca pesará alrededor de 475 kg, manteniendo la misma ganancia diaria.

La composición mineral promedio de la ganancia de peso es, según el NRC (1978), aproximadamente la siguiente:

Calcio	2.88%
Fósforo	1.51%
Potasio	0.39%
Magnesio	0.34%

### c. Cálculo del peso y retención mineral del feto

Partiendo de los datos de retención de proteína durante la preñez, que aparecen en el Cuadro 6 del Capítulo Requerimiento de Proteína en Ganado Lechero, se estimó el crecimiento fetal diario a partir de la semana 20 de gestación. Se asume que el peso promedio al nacimiento para las crías de la raza Holandés Americano es de 40 kg.

Tomando en cuenta la composición mineral del feto a término (el que contiene 1.75% de calcio, 0.97% de fósforo, 0.25% de potasio y 0.05% de magnesio), se estimó la retención de esos minerales durante la segunda mitad de la gestación (Fig. 6).

**d. Composición promedio de la leche de vaca**

Se pueden usar los siguientes datos para tomar en cuenta los diversos componentes de la leche en el eventual cálculo de requerimientos de los animales:

Componentes de la leche	%	mg
Agua	87.50	-
Materia seca	12.50	-
Lactosa	5.00	-
Materia grasa	3.50	-
Proteína	3.20	-
Minerales	0.80	-
Calcio	-	125.00
Fósforo	-	100.00
Potasio	-	138.00
Magnesio	-	12.00

Con los antecedentes anteriores, se puede proceder a estimar los requerimientos totales para la vaca del ejemplo. Para ello, puede suponerse una disponibilidad para el calcio y fósforo del 30% y para magnesio y potasio del orden del 50%. En este sentido, todavía se necesita mayor información sobre la disponibilidad mineral para cada uno de estos casos, dado a que existen muchos factores que afectarán la disponibilidad de los elementos inorgánicos, tales como edad de los animales, especie y estado vegetativo de las plantas, relación forraje:concentrado en la dieta, tipo de suplemento mineral (orgánico o inorgánico), relación entre los diversos elementos, etc.

**e. Composición de la ganancia peso**

De acuerdo a la literatura, la composición mineral promedio de la ganancia de peso es aproximadamente la siguiente:

Calcio	2.88%
Fósforo	1.51%
Potasio	0.39%
Magnesio	0.34%

**f. Cálculo de requerimientos de la vaca del ejemplo***Ejemplo A***Mantención:**

$$\begin{aligned} \text{Req. Ca} &= 0.052 \text{ (g/kg PV)} \cdot 475 \text{ (kg)} / 0.3 = 82.3 \text{ g/d} \\ \text{Req. P} &= 0.0285 \text{ (g/kg PV)} \cdot 475 \text{ (kg)} / 0.3 = 45.1 \text{ g/d} \\ \text{Req. K} &= 0.08 \text{ (g/kg PV)} \cdot 475 \text{ (kg)} / 0.5 = 76.0 \text{ g/d} \\ \text{Req. Mg} &= 0.028 \text{ (g/kg PV)} \cdot 475 \text{ (kg)} / 0.5 = 26.6 \text{ g/d} \end{aligned}$$

**Producción de leche:**

$$\begin{aligned} \text{Req. Ca} &= 0.125 \text{ (g/l)} \cdot 17.25 \text{ (l)} / 0.3 = 7.19 \text{ g/d} \\ \text{Req. P} &= 0.100 \text{ (g/l)} \cdot 17.25 \text{ (l)} / 0.3 = 5.75 \text{ g/d} \\ \text{Req. K} &= 0.138 \text{ (g/l)} \cdot 17.25 \text{ (l)} / 0.5 = 4.76 \text{ g/d} \\ \text{Req. Mg} &= 0.012 \text{ (g/l)} \cdot 17.25 \text{ (l)} / 0.5 = 0.41 \text{ g/d} \end{aligned}$$

**Crecimiento:**

$$\begin{aligned} \text{Req. Ca} &= 0.0288 \cdot 164.4 \text{ (g/d)} / 0.3 = 15.8 \text{ g/d} \\ \text{Req. P} &= 0.0151 \cdot 164.4 \text{ (g/d)} / 0.3 = 8.3 \text{ g/d} \\ \text{Req. K} &= 0.0039 \cdot 164.4 \text{ (g/d)} / 0.5 = 1.3 \text{ g/d} \\ \text{Req. Mg} &= 0.0034 \cdot 164.4 \text{ (g/d)} / 0.5 = 1.1 \text{ g/d} \end{aligned}$$

**Requerimiento total:**

$$\begin{aligned} \text{Calcio} &= 105.3 \text{ g/d} \\ \text{Fósforo} &= 59.1 \text{ g/d} \\ \text{Potasio} &= 82.1 \text{ g/d} \\ \text{Magnesio} &= 28.1 \text{ g/d} \end{aligned}$$

*Ejemplo B*

Si se utiliza la misma vaca del ejemplo, pero ahora con 5.5 meses de gestación o sea con 32.5 meses de edad, los requerimientos son los siguientes:

**Mantención:**

$$\begin{aligned} \text{Req. Ca} &= 0.052 \text{ (g/kg PV)} \cdot 482 \text{ (kg)} / 0.3 = 83.5 \text{ g/d} \\ \text{Req. P} &= 0.0285 \text{ (g/kg PV)} \cdot 482 \text{ (kg)} / 0.3 = 45.8 \text{ g/d} \\ \text{Req. K} &= 0.08 \text{ (g/kg PV)} \cdot 482 \text{ (kg)} / 0.5 = 77.1 \text{ g/d} \\ \text{Req. Mg} &= 0.028 \text{ (g/kg PV)} \cdot 482 \text{ (kg)} / 0.5 = 27.0 \text{ g/d} \end{aligned}$$

**Producción de leche:**

$$\begin{aligned} \text{Req. Ca} &= 0.125 \text{ (g/l)} \cdot 15.64 \text{ (l)} / 0.3 = 6.52 \text{ g/d} \\ \text{Req. P} &= 0.100 \text{ (g/l)} \cdot 15.64 \text{ (l)} / 0.3 = 5.21 \text{ g/d} \\ \text{Req. K} &= 0.138 \text{ (g/l)} \cdot 15.64 \text{ (l)} / 0.5 = 4.32 \text{ g/d} \\ \text{Req. Mg} &= 0.012 \text{ (g/l)} \cdot 15.64 \text{ (l)} / 0.5 = 0.38 \text{ g/d} \end{aligned}$$

Crecimiento: (igual al ejemplo A)

Req. Ca = 15.8 g/d  
Req. P = 8.3 g/d  
Req. K = 1.3 g/d  
Req. Mg = 1.1 g/d

Reproducción:

Req. Ca = 1.7 (g/d) / 0.3 = 5.7 g/d  
Req. P = 0.9 (g/d) / 0.3 = 3.0 g/d  
Req. K = 0.2 (g/d) / 0.5 = 0.4 g/d  
Req. Mg = 0.05 (g/d) / 0.5 = 0.1 g/d

Requerimiento total:

Calcio = 111.5 g/d  
Fósforo = 62.3 g/d  
Potasio = 83.1 g/d  
Magnesio = 28.6 g/d

## 6. LITERATURA CITADA

- CHICCO, C.G.; AMMERMAN, C.B.; FEASTER, J.P.; DUNAVANT, B.C. 1973. Nutritional interrelationship of dietary calcium, phosphorus and magnesium in sheep. *Journal of Animal Science* 36:986-993.
- CHURCH, D.C. 1971. Digestive physiology and nutrition of ruminants. Vol. 2 - Nutrition. Corvallis, Oregon, O.S.U. Book Stores. 801 p.
- FONTENOT, J.P.; WISS, M.B.; WEBB, K.E. 1973. Interrelationship of potassium, nitrogen and magnesium in ruminants. *Federation Proceedings* 32:1925-1928.
- GARCIA, F.; CAMPOS, R.; GRIJALVA, J. 1990a. Efectos de la adición de NaCl, urea y ambos a dietas deficientes en calcio, fósforo y nitrógeno sobre el aprovechamiento de la dieta y metabolismo del magnesio. *Ciencia e Investigación Agrícola (Chile)* 17:55-64.
- GARCIA, F.; CAMPOS, R.; GRIJALVA, J. 1990b. Efecto del consumo de potasio sobre la digestibilidad de la dieta y metabolismo del magnesio en corderos. *Ciencia e Investigación Agrícola (Chile)* 17:97-106.
- GARCIA, F.; CAMPOS, R.; GRIJALVA, J.; MEDEL, MARCIA. 1992. Niveles de potasio en dietas con y sin adiciones de urea y de urea más NaCl sobre el aprovechamiento de macronutrientes y metabolismo mineral en corderos. *Ciencia e Investigación Agraria (Chile)*. 19: En prensa.
- GIDUK, S.A.; FONTENOT, J.P. 1984. Influence of readily available carbohydrates on magnesium excretion in man. *Journal of Applied Physiology* 22:136-143.
- KANEKO, J.J. 1989. *Clinical biochemistry of domestic animals*. 4 ed. New York, Academic Press. 932 p.

- NRC (NATIONAL RESEARCH COUNCIL). 1978. Nutrient requirements of dairy cattle. 5 ed. Washington D.C. National Academy of Sciences. 108 p.
- UNDERWOOD, E.J. 1981. 2 ed. The mineral nutrition of livestock. London, Commonwealth Agricultural Bureaux. 176 p.
- WISE, M.B.; ORDOVEZA, L.L.; BARRICK, E.R. 1963. Influence of variations in dietary calcium:phosphorus ratio on performance and blood constituents of calves. *Journal of Nutrition* 79:79-85.

# CAPÍTULO IV

## APUNTES SOBRE MODELOS MATEMÁTICOS EN PROBLEMAS GANADEROS

*Roberto A. Quiroz*

*Instituto Boliviano de Tecnología Agropecuaria, La Paz, Bolivia*

## CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN .....	157
2. INTRODUCCIÓN A MATRICES .....	158
a. Definiciones básicas .....	158
b. Tipos especiales de matrices .....	158
c. Operaciones con matrices .....	160
3. REGRESIÓN MÚLTIPLE EN NOTACIÓN DE MATRICES .....	163
a. El modelo .....	163
b. Las ecuaciones normales y su solución .....	165
c. Vector $\hat{Y}$ y el vector residual .....	167
d. Precisión de los estimados .....	169
e. Distribución de las funciones lineales de las variables normales .....	173
4. MODELOS PARA DESCRIBIR LA CINÉTICA DE DEGRADACIÓN DE ALIMENTOS EN EL RUMEN .....	174
a. Ecuaciones que describen el fraccionamiento de partículas .....	174
b. Ecuaciones que describen la cinética de degradación de fracciones de alimentos .....	175
(1) Ecuación exponencial .....	175
(2) Ecuación bi-exponencial .....	175
(3) Ecuación para describir la degradabilidad acumulativa .....	176
5. MODELOS PARA DESCRIBIR LA TASA DE PASAJE DE LOS ALIMENTOS .....	176
6. FUNCIONES DE CRECIMIENTO .....	178
a. Modelo conceptual .....	179
b. La ecuación monomolecular .....	180
c. La ecuación logística .....	180
d. La ecuación de Gompertz .....	181
e. La ecuación de Richards .....	182
f. La ecuación inversa .....	182
7. MODELOS PARA DESCRIBIR LA CURVA DE LACTANCIA .....	183
8. LITERATURA CITADA .....	186

# APUNTES SOBRE MODELOS MATEMÁTICOS EN PROBLEMAS GANADEROS

*Roberto A. Quiroz*

*Instituto Boliviano de Tecnología Agropecuaria, La Paz, Bolivia*

## 1. INTRODUCCIÓN

La presentación de un fenómeno biológico, en forma de una ecuación matemática, indica que el investigador posee un conocimiento dominado de éste. Las ecuaciones matemáticas permiten hacer una síntesis objetiva de los datos de investigación y constituyen el lenguaje de los hombres de ciencia.

En este documento se pretende dar una guía a los investigadores en ganadería para poder sistematizar los resultados de investigación y presentarlos en forma de ecuaciones matemáticas, las cuales son requisito indispensable para la construcción de modelos de simulación.

En el presente, el ajuste de modelos matemáticos a datos de investigación, se realiza por medio de paquetes estadísticos en computadores. En la mayoría de los casos se ajustan modelos lineales o intrínsecamente lineales (que pueden ser linearizados mediante transformaciones). El ajuste de estos modelos se hace, generalmente, buscando soluciones que minimicen la suma de cuadrados residuales, usando álgebra de matrices.

En la primera sección se presenta una breve descripción de conceptos y operaciones con matrices, que posteriormente se utilizan en el ajuste de modelos lineales a datos de investigación. El objetivo de esta sección es relacionar al investigador con los procesos computarizados para el ajuste de modelos lineales, de tal modo que se pueda obtener más provecho de los paquetes estadísticos y saber cuándo el análisis de regresión está de acuerdo con el objetivo del investigador. Si el lector desea profundizar más sobre este tópico, se recomienda la lectura de libros de análisis de regresión (e.g. Draper y Smith 1981; Rawlings 1988).

En la segunda parte se presentan algunos modelos matemáticos útiles para describir fenómenos que se estudian con frecuencia en la investigación en ganadería. La mayoría de estos modelos matemáticos son intrínsecamente lineales; es decir, pueden ser transformados a modelos lineales. Una vez linearizados, se pueden utilizar los conceptos sobre regresión lineal vertidos en la primera sección. El factor limitante en la linearización de modelos es que la ponderación de los datos puede ser diferente en los puntos extremos de la función, comparados con los puntos medios. Esto puede producir una disminución en la precisión de las estimaciones. Para eliminar este problema, es preferible utilizar métodos de solución numérica, cuya aplicación escapa al alcance de este documento.

Se espera que los temas tratados sean de utilidad práctica a los investigadores de América Latina.

## 2. INTRODUCCIÓN A MATRICES

### a. Definiciones básicas

Una matriz es un arreglo rectangular de números colocados en filas y columnas, por ejemplo:

$$Y = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 7 \\ 5 & 3 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 3 & -1 & 4 & 8 \\ 2 & -3 & 5 & 7 \end{bmatrix} \quad Z = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 1 & 5 \\ 1 & 3 \\ 1 & 7 \\ 1 & 9 \end{bmatrix}$$

Los números que forman una matriz se llaman *elementos* de la matriz. Una matriz general se puede denotar como:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix}$$

Los subíndices denotan las filas y las columnas. Por ejemplo,  $a_{35}$  es el elemento encontrado en la tercera fila y la quinta columna. Nótese que la fila siempre se indica primero.

El *orden* de una matriz es su tamaño, dado por el número de filas y columnas. La matriz Y es de orden (3,2) ó  $3 \cdot 2$ , ya que tiene tres filas y dos columnas. La matriz A es una matriz  $m \cdot n$ .

El *rango* de una matriz se define como el número de columnas linealmente independientes de una matriz. Por ejemplo:

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 4 \\ 3 & 0 & 6 \\ 5 & 3 & 13 \end{bmatrix}$$

Si se multiplica la primera columna por dos y se añade la segunda, se produce la tercera. La tercera columna es, por tanto, una combinación lineal de las dos primeras, dejando sólo dos columnas independientes; entonces, el rango de la matriz A, denotado como  $r(A)$ , es dos. Si no hay independencia lineal entre las columnas de una matriz, se dice que la matriz es de *rango completo*. Si una matriz no es de rango completo, se dice que es *singular*.

### b. Tipos especiales de matrices

Un *vector* es una matriz que tiene sólo una fila o una columna.

$$V = \begin{bmatrix} 1 \\ 3 \\ 4 \\ 2 \end{bmatrix} \quad \text{Vector } 4 \cdot 1$$

Una *matriz cuadrada* es una matriz en la cual el número de filas es igual al número de columnas.

$$C = \begin{bmatrix} 2 & 5 \\ 3 & 6 \end{bmatrix} \quad \text{Matriz Cuadrada } 2 \cdot 2$$

Una *matriz diagonal* es una matriz cuadrada en la cual todos los elementos son cero, excepto los de la diagonal principal.

$$A = \begin{bmatrix} 3 & 0 & 0 \\ 0 & 5 & 0 \\ 0 & 0 & 7 \end{bmatrix} \quad \text{Matriz Diagonal } 3 \cdot 3$$

Una *matriz identidad* es una matriz diagonal donde todos los elementos son igual a uno, y se denota por  $I_n$ . El subíndice denota el orden de la matriz.

$$I_3 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{Matriz Identidad } 3 \cdot 3$$

Una *matriz simétrica* es una matriz cuadrada cuyo elemento  $a_{ij}$  es igual al elemento  $a_{ji}$ , para todos los  $i$  y  $j$ . Como resultado los elementos forman un patrón simétrico alrededor de la diagonal de la matriz.

$$A = \begin{bmatrix} 5 & -2 & 4 \\ -2 & 3 & 0 \\ 4 & 0 & 7 \end{bmatrix} \quad \text{Matriz Simétrica } 3 \cdot 3$$

Nótese que la primera columna es idéntica a la primera fila, la segunda columna es idéntica a la segunda fila, etc.

Una *matriz idempotente* es aquella matriz que al multiplicarse por sí misma, produce la matriz original. Es decir,  $A^2 = A \cdot A = A$ . El rango de una matriz idempotente es igual a la suma de los elementos de la diagonal. Esta suma de los elementos de la diagonal de la matriz se conoce como la traza de la matriz.

La *transpuesta* de una matriz, designada  $A'$ , es la matriz obtenida usando las filas de  $A$  como las columnas de  $A'$ . Por ejemplo, si

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 4 \\ 5 & 7 \\ 7 & 8 \end{bmatrix} \left. \vphantom{\begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 3 & 4 \\ 5 & 7 \\ 7 & 8 \end{bmatrix}} \right\} \text{ la transpuesta de } A \text{ es } = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 5 & 7 \\ 2 & 4 & 6 & 8 \end{bmatrix}$$

Nótese que el orden de  $A'$  es el reverso del orden de  $A$ . Una matriz simétrica es igual a su transpuesta,  $A' = A$ .

### c. Operaciones con matrices

La *adición o sustracción* de matrices es posible sólo si las dos matrices son del mismo orden. Estas operaciones consisten en adicionar o sustraer el elemento correspondiente de las dos matrices:

$$\begin{bmatrix} 2 & 4 \\ 6 & 8 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 3 & 6 \\ 9 & 2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 5 & 10 \\ 15 & 10 \end{bmatrix}$$

Nótese que la adición es conmutativa, i.e.  $A + B = B + A$ .

Dos matrices pueden ser *multiplicadas* sí, y sólo sí, el número de columnas en la primera matriz es igual al número de filas de la segunda matriz. Considérese la multiplicación de dos vectores.

Sea,  $a = (a_1 \ a_2 \ a_3)$  y  $b' = (b_1 \ b_2 \ b_3)$ , entonces el producto de  $a$  y  $b$  es:

$$a \cdot b = (a_1 \ a_2 \ a_3) \cdot \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix} = a_1 b_1 + a_2 b_2 + a_3 b_3$$

El resultado es la suma de productos de los elementos correspondientes y será un sólo número, un escalar o una matriz  $1 \cdot 1$ . Esta fue la multiplicación de una matriz  $1 \cdot 3$  por una de  $3 \cdot 1$ . Las dimensiones internas (3) deben ser iguales, e indican el número de productos en suma. Las dimensiones externas (1), definen el orden de la matriz resultante. Si el producto de dos vectores es igual a cero, estos vectores son ortogonales entre sí.

$$\text{sea } A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \end{bmatrix} \text{ y } B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \\ b_{31} & b_{32} \end{bmatrix}$$

el producto de  $A$  y  $B$  es:

$$AB = C = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix}$$

donde:

$$C_{11} = \sum_{j=1}^3 a_{1j} b_{j1} = a_{11} b_{11} + a_{12} b_{21} + a_{13} b_{31}$$

$$C_{12} = \sum_{j=1}^3 a_{1j} b_{j2} = a_{11} b_{12} + a_{12} b_{22} + a_{13} b_{32}$$

$$C_{21} = \sum_{j=1}^3 a_{2j} b_{j1} = a_{21} b_{11} + a_{22} b_{21} + a_{23} b_{31}$$

$$C_{22} = \sum_{j=1}^3 a_{2j} b_{j2} = a_{21} b_{12} + a_{22} b_{22} + a_{23} b_{32}$$

Nótese que la matriz  $C$  tiene el número de filas igual que el número de filas en  $A$  y el número de columnas igual al número de columnas en  $B$ . Para multiplicar una matriz por una constante se multiplica cada elemento de la matriz por el escalar.

Ejemplos:

$$(1) A = [ 1 \quad 0 \quad -5 ] \cdot B = 4 = C = [ 4 \quad 0 \quad -20 ]$$

$$(2) A = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 4 & 5 \\ 3 & 0 \end{bmatrix} \cdot B = 3 = C = \begin{bmatrix} 3 & 6 \\ 12 & 15 \\ 9 & 0 \end{bmatrix}$$

La multiplicación de matrices *no es conmutativa*. Es decir,  $AB \neq BA$ . El primer paso en multiplicación de matrices es verificar si el orden es correcto, para poder proceder a multiplicar.

La *transpuesta de un producto* es el producto de las transpuestas de las dos matrices en orden reverso; es decir,

$$(AB)' = B'A'$$

Sea

$$C' = [ 5 \quad 11 \quad -3 ], \quad A = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 4 & 5 \\ 3 & 0 \end{bmatrix} \quad \text{y} \quad B = \begin{bmatrix} -1 \\ 3 \end{bmatrix}$$

Verificar si  $C = B'A$ ,

$$B' = [ -1 \quad 3 ] \cdot A' = \begin{bmatrix} 1 & 4 & 3 \\ 2 & 5 & 0 \end{bmatrix} = [ 5 \quad 11 \quad -3 ] = C'$$

Dos vectores son ortogonales si  $V_1 \cdot V_2 = 0$

Sea

$$V_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \\ 4 \end{bmatrix} \quad y \quad V_2 = \begin{bmatrix} 3 \\ 4 \\ -1 \\ -1 \end{bmatrix}$$

$$V_1' V_2 = 3 + 0 + 1 - 4 = 0$$

$\therefore V_1$  y  $V_2$  son ortogonales

El *determinante* de una matriz es un escalar computado a partir de los elementos de la matriz. El determinante de una matriz  $2 \cdot 2$ :

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}$$

se computa  $(a_{11} \cdot a_{22}) - (a_{12} \cdot a_{21})$

si

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 6 \\ -2 & 10 \end{bmatrix}$$

El determinante de  $A$ , se designa por  $|A|$  y es igual a  $(1)(10) - (6)(-2) = 22$ . Los determinantes de matrices más grandes son más difíciles y se requiere del uso de computadoras. Se utiliza el determinante de una matriz para indicar si la matriz es o no singular. Si el determinante de una matriz es cero, la matriz es singular (no es de rango completo). Si no es así, se dice que la matriz es no-singular.

La *división* en el sentido usual no existe en álgebra de matrices. El concepto es reemplazado por la multiplicación de una matriz por su *inversa*. La inversa de una matriz  $A$ , designado por  $A^{-1}$ , es una matriz tal que,

$$A^{-1}A = AA^{-1} = I$$

Para que una matriz tenga un inverso único, la matriz debe ser cuadrada y no-singular. Así que, un inverso único existe sí, y solo sí, su determinante no es cero. El inverso de una matriz se computa fácilmente.

Si

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}$$

entonces

$$A^{-1} = \frac{1}{|A|} \begin{bmatrix} a_{22} & -a_{12} \\ -a_{21} & a_{11} \end{bmatrix}$$

Nótese el rearrreglo de los elementos y el uso del determinante de A como el escalar.

Por ejemplo,

$$A = \begin{bmatrix} 4 & 3 \\ 1 & 2 \end{bmatrix}$$

$$A^{-1} = \frac{1}{5} \begin{bmatrix} 2 & -3 \\ -1 & 4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{5} & \frac{-3}{5} \\ \frac{-1}{5} & \frac{4}{5} \end{bmatrix}$$

El hecho de que este es el inverso, se puede verificar fácilmente, multiplicando  $A \cdot A^{-1} = I$

$$\begin{bmatrix} 4 & 3 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{2}{5} & \frac{-3}{5} \\ \frac{-1}{5} & \frac{4}{5} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

### 3. REGRESIÓN MULTIPLE EN NOTACIÓN DE MATRICES

#### a. El modelo

El modelo lineal aditivo para relacionar una variable dependiente a "P" variables independientes es:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{i1} + \beta_2 X_{i2} + \dots + \beta_p X_{ip} + \epsilon_i$$

El subíndice i denota la unidad observacional de la cual se tomaron las observaciones de Y y las P variables independientes. El segundo subíndice designa la variable independiente. Si se utiliza n para indicar el tamaño total de la muestra,  $i = 1, 2, \dots, n$ , y p para denotar el número de variables independientes envueltas, habrá p + 1 parámetros  $\beta_j$ ,  $j = 0, \dots, p$ , a ser estimados cuando el modelo lineal incluye el intercepto  $\beta_0$ .

Para expresar el modelo lineal en notación matricial, se definen cuatro matrices:

Y = El vector en columna  $n \cdot 1$  de las observaciones en la variable dependiente,  $Y_i$ ,

X = La matriz  $n \cdot p'$ ;  $p' = p + 1$ , que consiste en una columna de unos, seguido de p vectores en columnas de las variables independientes,

$\beta$  = El vector  $p' \cdot 1$  de los parámetros a ser estimados, y

E = el vector  $n \cdot 1$  de errores aleatorios.

Con estas definiciones, el modelo lineal descrito arriba se puede escribir como:

$$\begin{array}{c} \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ Y_n \end{bmatrix} \\ (n \cdot 1) \end{array} = \begin{array}{c} \begin{bmatrix} 1 & X_{11} & X_{12} & X_{13} & \dots & X_{1p} \\ 1 & X_{21} & X_{22} & X_{23} & & X_{2p} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & & \cdot \\ 1 & X_{n1} & X_{n2} & X_{n3} & & X_{np} \end{bmatrix} \\ (n \cdot p) \end{array} \begin{array}{c} \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \beta_p \end{bmatrix} \\ (p \cdot 1) \end{array} + \begin{array}{c} \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \epsilon_n \end{bmatrix} \\ (n \cdot 1) \end{array}$$

es decir,  $\hat{Y} = X\beta + \epsilon$

Los vectores  $Y$  y  $E$  son vectores aleatorios. Es decir, los elementos de los vectores son variables aleatorias.

La matriz  $X$  es considerada como una matriz de constantes desconocidas. El vector  $\beta$  es un vector de constantes desconocidas a ser estimadas a partir de los datos. El elemento  $\beta_i$ , es el coeficiente de regresión parcial que refleja el cambio en la variable dependiente por unidad de cambio en la  $i$ ésima variable independiente, *suponiendo que todas las otras variables independientes se mantienen constantes*. En general, el valor del coeficiente parcial de regresión es dependiente del juego de variables independientes en el modelo.

El supuesto usual acerca de  $\epsilon$ , se expresa ahora en términos del vector aleatorio  $\epsilon$ . Se dice que  $\epsilon$  tiene una distribución multivariada normal con un vector promedio 0 (de orden  $n \cdot 1$ ) y una matriz de varianza-covarianza  $I\sigma^2$ .  $I$  es una matriz identidad  $n \cdot n$  y  $\sigma^2$  es la varianza común de todos los  $\epsilon_i$ . En forma abreviada la notación es:

$$\epsilon \sim MN(0, I\sigma^2)$$

La matriz de varianza-covarianza de un vector de  $n$  elementos aleatorios se define como la matriz cuadrada simétrica  $n \cdot n$ , donde los elementos de la diagonal principal son las varianzas de las variables aleatorias y los elementos fuera de la diagonal son las covarianzas. Si  $Z$  es un vector  $3 \cdot 1$  de variables aleatorias  $Z_1, Z_2$  y  $Z_3$ , entonces:

$$\text{Var}(Z) = \begin{bmatrix} \sigma^2(Z_1) & \text{Cov}(Z_1, Z_2) & \text{Cov}(Z_1, Z_3) \\ \text{Cov}(Z_1, Z_2) & \sigma^2(Z_2) & \text{Cov}(Z_2, Z_3) \\ \text{Cov}(Z_1, Z_3) & \text{Cov}(Z_2, Z_3) & \sigma^2(Z_3) \end{bmatrix}$$

Así que la aseveración de que la matriz de varianza-covarianza de  $\epsilon$ ,  $\text{Var}(E)$ , es  $\sigma^2$  incluye los dos supuestos usuales:

1. los  $\epsilon_i$  tienen una varianza común  $\sigma^2$ , y
2. ellos son estadísticamente independientes (la independencia es reflejada con covarianzas cero, cuando existe normalidad).

En vista de que los elementos de  $X$  y  $\beta$  son constantes, el término  $X\beta$  en el modelo es la adición de constantes a un vector de errores aleatorios,  $\epsilon$ . Así que,  $Y$  es un vector aleatorio con esperanza  $X\beta$  y una matriz de varianza-covarianza  $I\sigma^2$ :

$$E(Y) = E [ X\beta + \epsilon ] = E(X\beta) + E(\epsilon) = X\beta$$

$$VAR(Y) = VAR(\epsilon) = I\sigma^2$$

La última ecuación se basa en el concepto de que la adición de una constante a una variable aleatoria, no cambia su varianza. Cuando  $\epsilon$  tiene una distribución normal,  $Y$  también es multivariada y normalmente distribuida.

Así que:

$$Y \sim MN(X\beta, I\sigma^2)$$

Se debe resaltar que este resultado supone que el modelo lineal usado es el correcto. Si se omiten algunas variables independientes importantes, o si la forma funcional del modelo no es correcta, entonces  $X\beta$  no es la esperanza de  $Y$ .

#### b. Las ecuaciones normales y su solución

Las ecuaciones normales serían:

$$X'X \beta = X'Y$$

Y la solución única a las ecuaciones normales, si ésta existe, es:

$$\hat{\beta} = (X'X)^{-1} X'Y$$

La multiplicación  $X'X$  genera una matriz  $p' \cdot p'$ , donde los elementos de la diagonal son la suma de cuadrados de cada una de las variables independientes y los elementos fuera de la diagonal son las sumas de productos entre las variables independientes. La forma general de  $X'X$  es:

$$X'X = \begin{bmatrix} n & \sum x_1 & \sum x_2 & \dots & \sum x_p \\ \sum x_1 & \sum x_1^2 & \sum x_1 x_2 & \dots & \sum x_1 x_p \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ \sum x_p & \sum x_1 x_p & \sum x_2 x_p & \dots & \sum x_p^2 \end{bmatrix}$$

Si sólo una variable independiente está envuelta,  $X'X$  consistiría sólo en la matriz  $2 \cdot 2$  de la parte superior izquierda.

Los elementos de la matriz producto de  $X'Y$  son las sumas de los productos de las variables independientes y las variables dependientes:

$$X'Y = \begin{bmatrix} \sum Y \\ \sum X_1 Y \\ \sum X_2 Y \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \sum X_p Y \end{bmatrix}$$

El primer elemento,  $\sum Y$ , es la suma de los productos entre el vector de unos (la primera columna de X) y Y.

La solución única de las ecuaciones normales existe sólo si el inverso de  $X'X$  existe. Esto, a su vez, requiere que la matriz X sea de rango completo; es decir, no pueden haber dependencias lineales entre las variables independientes. La implicación práctica es que no puede haber redundancia en la información contenida en la matriz X.

*Ejemplo:*

Para mostrar el uso de la regresión con matrices se utilizan los datos de Quiroz (1986), donde la variable dependiente (Y) es el logaritmo natural de la concentración de lignina Klason en la pared celular de alfalfa, mientras que la variable independiente (X) es el tiempo de tratamiento de la pared celular de alfalfa con NaOH 2N.

$$X = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 3 \\ 1 & 6 \\ 1 & 9 \\ 1 & 12 \\ 1 & 18 \\ 1 & 24 \\ 1 & 30 \end{bmatrix} \quad Y = \begin{bmatrix} 1.86 \\ 1.61 \\ 1.10 \\ 1.10 \\ 0.92 \\ 0.74 \\ 0.47 \\ 0.26 \end{bmatrix}$$

$$X'X = \begin{bmatrix} 8 & 102 \\ 102 & 2070 \end{bmatrix} \quad X'Y = \begin{bmatrix} 8.06 \\ 64.77 \end{bmatrix}$$

$$(X'X)^{-1} = \begin{bmatrix} 0.3363 & -0.0166 \\ -0.0166 & 0.0013 \end{bmatrix}$$

$$\hat{\beta} = \begin{bmatrix} 1.6370 \\ -0.0494 \end{bmatrix}$$

### c. Vector $\hat{Y}$ y el vector residual

El vector de medias estimadas de la variable dependiente  $Y$ , para los valores de las variables independientes en el conjunto de datos, se computa como:

$$\begin{aligned}\hat{Y} &= X\beta \\ &= [X(X'X)^{-1} X']Y \\ &= PY\end{aligned}$$

La primera de las ecuaciones da la forma computacional para obtener  $\hat{Y}$ . Las dos líneas siguientes definen la matriz  $P$ , una matriz  $n \cdot n$  determinada totalmente por las  $X$ 's. Esta matriz juega un papel importante en el análisis de regresión. Es una matriz simétrica,  $P' = P$ , la cual también es idempotente,  $P'P = P$ . Esta forma también ilustra que  $\hat{Y}$  es una función lineal de  $Y$  con coeficientes dados por  $P$ . De aquí que el valor esperado de  $\hat{Y}$  es:

$$E(\hat{Y}) = P E(Y) = PX\beta = X\beta$$

El hecho es que  $PX = X$  puede verificarse usando la definición de  $P$ :

$$PX = [X(X'X)^{-1} X']X = X[(X'X)^{-1} (X'X)] = X$$

Rearreglando el paréntesis de  $\hat{\beta} = (X'X)^{-1} (X'Y)$  a  $\hat{\beta} [(X'X)^{-1} X']Y$  se muestra que los estimados de los coeficientes de regresión son funciones lineales de la variable dependiente  $Y$ , con los coeficientes dados por  $[(X'X)^{-1} X']$ . Debido a que las  $X$ 's son constantes, las esperanzas de los estimados de los coeficientes de regresión involucran solamente la esperanza de  $Y$ :

$$\begin{aligned}E(\hat{\beta}) &= [(X'X)^{-1} X'] E(Y) \\ &= [(X'X)^{-1} X'] [X\beta] \\ &= [(X'X)^{-1} X'X] \beta \\ &= \beta\end{aligned}$$

Esto se basa en el hecho de que  $E(Y)$  es  $X\beta$ . Por lo tanto,  $\hat{\beta}$  es un estimado no sesgado de  $\beta$  *sí y sólo sí* el modelo seleccionado es correcto.

En el ejemplo que se venía desarrollando:

$$\hat{Y} = X\hat{\beta} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 3 \\ 1 & 6 \\ 1 & 9 \\ 1 & 12 \\ 1 & 18 \\ 1 & 24 \\ 1 & 30 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1.6370 \\ -0.0494 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.637047 \\ 1.488918 \\ 1.340789 \\ 1.192661 \\ 0.192661 \\ 0.748275 \\ 0.452018 \\ 0.155760 \end{bmatrix}$$

y los residuales son:

$$Y - \hat{Y} = \begin{bmatrix} 0.222953 \\ 0.121082 \\ -0.240789 \\ -0.092661 \\ -0.124532 \\ -0.008275 \\ -0.017982 \\ 0.10424 \end{bmatrix}$$

El cuadro resumen de los resultados es:

$X_i$	$Y_i$	$\hat{Y}_i$	$e_i$
0	1.86	1.637047	0.222953
3	1.61	1.488918	0.121082
6	1.10	1.340789	-0.240789
9	1.10	1.192661	-0.092661
12	0.92	1.044532	-0.124532
18	0.74	0.748275	-0.008275
24	0.47	0.452018	0.017982
30	0.26	0.155760	0.104240

El vector residual,  $e$ , refleja la falta de acuerdo entre los valores observados  $Y$  y los estimados  $\hat{Y}$

$$e = Y - \hat{Y} = Y - PY = (I - P) Y$$

Se trae a colación que la estimación de cuadrados mínimos minimiza la suma de cuadrados de los residuales;  $\hat{\beta}$  ha sido seleccionada de tal modo que  $e$  sea mínimo.  $(I-P)$ , al igual que  $P$ , es simétrica e idempotente.

La esperanza del error residual es:

$$\begin{aligned} E(e) &= (I - P) E(Y) = (I - P) \rightarrow X\beta \\ &= (X - PX) \rightarrow \beta \\ &= (X - X) \rightarrow \beta = \phi \end{aligned}$$

donde  $\phi$  es un vector  $n \cdot 1$  de ceros.

Es posible reescribir  $e = Y - \hat{Y}$  a  $Y = \hat{Y} + e$ . Esta última expresión muestra la partición de  $Y$  en dos: aquella parte explicada por el modelo  $\hat{Y}$ , y aquella compuesta por los residuales,  $e$ . Como verificación de esta partición, se tiene que:

$$\hat{Y} + e = PY + (I - P) Y = (P + I - P)Y = Y$$

#### d. Precisión de los estimados

En las secciones anteriores se mostró que  $\hat{\beta}$ ,  $\hat{Y}$ , y  $e$  son funciones lineales del vector aleatorio  $Y$ ; por lo tanto, ellos son vectores aleatorios con esperanzas  $E(\hat{\beta}) = \beta$ ,  $E(\hat{Y}) = X\beta$  y  $E(e) = \emptyset$ . En esta sección se derivará la matriz varianza-covarianza para cada uno de estos vectores aleatorios, utilizando las reglas para las varianzas de las funciones lineales.

Sea  $Y$  un vector aleatorio con una matriz de varianza-covarianza  $\text{Var}(Y)$ , y sea  $U = a'Y$  cualquier función lineal del vector  $Y$ , donde  $a'$  es el vector-fila de los coeficientes que definen la función lineal. Entonces, la varianza de  $U$  está dada por:

$$\sigma^2(U) = a' \text{Var}(Y) a$$

Si  $\text{Var}(Y) = I\sigma^2$ , tal como se asume en cuadrados mínimos ordinarios,

$$\sigma^2 = a'(I\sigma^2)a = a'a\sigma^2$$

Nótese que  $a'a$  es la suma de cuadrados de los coeficientes de la función lineal.

Se pueden considerar  $K$  funciones lineales simultáneamente, expandiendo  $a'$  a una matriz  $K \cdot n$  de coeficientes donde cada fila proporciona los coeficientes para cada función lineal. Entonces,  $U = AY$  es un vector columna que contiene  $K$  variables aleatorias obtenidas de las funciones lineales en un vector aleatorio  $Y$ . La matriz varianza-covarianza  $K \cdot K$ , para  $U$ , es dada por:

$$\text{Var}(U) = A \text{Var}(Y)A' = AA'\sigma^2,$$

cuando  $\text{Var}(Y) = I\sigma^2$

El  $i$ ésimo elemento de la diagonal de  $AA'$  es la suma de cuadrados de los coeficientes de la  $i$ ésima función lineal. El elemento  $ij$  fuera de la diagonal es la suma de productos de los coeficientes de las funciones lineales  $i$  y  $j$ .

Por definición, la matriz varianza-covarianza de un vector aleatorio  $Y$  es:

$$\text{Var}(Y) = E\{[Y - E(Y)][Y - E(Y)]'\}$$

donde  $E$  denota el esperado de los elementos de la matriz que sigue. La multiplicación de los vectores entre las llaves,  $\{ \}$ , da una matriz  $n \cdot n$  con los términos  $[Y_i - E(Y_i)]^2$  en la diagonal  $[Y_i - E(Y_i)][Y_j - E(Y_j)]$  en las posiciones fuera de la diagonal. Las esperanzas de estos elementos son, por definición, las varianzas y covarianzas, respectivamente. Usando esta definición, se deriva la varianza de  $U = AY$ . Por definición:

$$\text{Var}(U) = E\{[U - E(U)][U - E(U)]'\}$$

Sustituyendo  $AY$  por  $U$  se tiene:

$$\begin{aligned} \text{Var}(U) &= E\{[AY - E(AY)][AY - E(AY)]'\} \\ &= E\{A[Y - E(Y)][Y - E(Y)]'A'\} \\ &= AE\{[Y - E(Y)][Y - E(Y)]'\}A' \\ &= A \text{Var}(Y) A' \end{aligned}$$

La factorización de una multiplicación de matrices debe realizarse con cautela, recordando que la multiplicación no es conmutativa. Por lo tanto,  $A$  se factoriza a ambos lados; a la izquierda (del primer paréntesis cuadrado) y a la derecha (en la transpuesta, en el segundo paréntesis cuadrado). Se debe recordar que la transposición de un producto invierte el orden de multiplicación. Debido a que  $A$  es una matriz de constantes, se puede factorizar fuera del operador de esperanzas ( $E$ ). Este deja una matriz interna que por definición es  $\text{Var}(Y)$ .

A continuación se ofrecen dos ejemplos para ilustrar el uso de las varianzas de las funciones lineales.

*Ejemplo 1 (Una función lineal):*

Se derivará la varianza de la media, usando las matrices correspondientes. Se recuerda que  $\bar{Y} = \sum Y_i/n$ , que en notación matricial se escribe como:

$$\bar{Y} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ n & n & \dots & n \end{pmatrix} Y$$

De modo que  $\bar{Y}$  es una función lineal de  $Y$  con el vector de coeficientes  $a' = (1/n \ 1/n \ \dots \ 1/n)$ . Entonces, si  $\text{Var}(Y) = I\sigma^2$ :

$$\begin{aligned} \text{Var}(\bar{Y}) &= a' \text{Var}(Y)a = a'(I\sigma^2)a \\ &= \begin{pmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ n & n & \dots & n \end{pmatrix} [I\sigma^2] \begin{bmatrix} 1/n \\ 1/n \\ \cdot \\ \cdot \\ 1/n \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{n} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix} \sigma^2 = \frac{\sigma^2}{n} \end{aligned}$$

*Ejemplo 2 (Dos funciones lineales):*

En el segundo ejemplo se consideran dos constantes lineales de un juego de medias de cuatro tratamientos. Si las medias incluyen diferentes juegos de números aleatorios, éstas serán independientes, todas las covarianzas entre las medias serán cero y  $\text{Var}(\bar{Y}) = I(\sigma^2/n)$ . Se desea conocer las varianzas (y covarianzas) de los dos contrastes lineales:

$$C_1 = \bar{Y}_1 - \bar{Y}_2$$

$$C_2 = \bar{Y}_1 - 2\bar{Y}_2 + \bar{Y}_3$$

Nótese que no se incluyó  $Y_4$  en estos contrastes. Los contrastes pueden escribirse como  $C = AY$ , donde:

$$C = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & -2 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Así que,

$$\begin{aligned} \text{Var}(C) &= A \text{Var}(\tilde{Y})A' = A [I(\sigma^2/n)]A' \\ &= AA' (\sigma^2/n) = \begin{bmatrix} 2 & 3 \\ 3 & 6 \end{bmatrix} \left( \frac{\sigma^2}{n} \right) \end{aligned}$$

Es decir, la varianza de  $C_1$  es  $2\sigma^2/n$ , la varianza de  $C_2$  es  $6\sigma^2/n$  y la covarianza entre los contrastes es  $3\sigma^2/n$ .

El resultado general de las varianzas de las funciones lineales puede aplicarse a las funciones obtenidas a partir del análisis de regresión usando cuadrados mínimos ordinarios. Previamente se mostró que la matriz de coeficientes para  $\beta$  es  $A = [(X'X)^{-1} X']$ . Así que:

$$\begin{aligned} \text{Var}(\beta) &= [(X'X)^{-1}] \text{Var}(\hat{Y}) [(X'X)^{-1} X'] \\ &= [(X'X)^{-1} X'] [(X'X)^{-1} X'] \sigma^2 \end{aligned}$$

ya que se asume que la  $\text{Var}(Y)$  es  $I\sigma^2$ . Se ha establecido que la transpuesta de un producto es el producto de las transpuestas y que  $X'X$  es simétrico, se tiene que:

$$\text{Var}(\beta) = (X'X)^{-1} (X'X) (X'X)^{-1} \sigma^2$$

$$\text{Var}(\beta) = (X'X)^{-1} \sigma^2$$

Por lo tanto, las varianzas y la covarianzas de los estimados de los coeficientes de regresión están dados por los elementos de  $(X'X)^{-1}$  multiplicado por  $\sigma^2$ . Los elementos en la diagonal dan las varianzas en el orden en el cual los coeficientes de regresión están listados en  $\beta$ , y los elementos fuera de la diagonal, las covarianzas. En el ejemplo que se está tratando,

$$(X'X)^{-1} = \begin{bmatrix} 0.3363 & -0.0160 \\ -0.0166 & 0.0013 \end{bmatrix}$$

Así que,  $\sigma^2(b_0) = 0.3363\sigma^2$  y  $\sigma^2(b_1) = 0.0013\sigma^2$ . La covarianza entre  $b_0$  y  $b_1$  es  $\text{Cov}(b_0, b_1) = -0.0166\sigma^2$ .

La matriz varianza-covarianza de  $Y$  se puede derivar usando cualquiera de las dos relaciones:  $Y = X\beta$  ó  $\hat{Y} = PY$  (recuérdese que  $P = [X(X'X)^{-1}X']$ ). Aplicando las reglas para varianzas de funciones lineales, la primera relación dará

$$\begin{aligned} \text{Var}(\hat{Y}) &= X \text{Var}(\beta) X' \\ &= X (X'X)^{-1} X' \sigma^2 \\ &= P\sigma^2 \end{aligned}$$

La derivación usando la segunda relación resulta en:

$$\begin{aligned} \text{Var}(\hat{Y}) &= P \text{Var}(Y) P' \\ &= P P' \sigma^2 \\ &= P \sigma^2 \end{aligned}$$

ya que  $P$  es simétrica e idempotente. Por lo tanto, la matriz  $P$  multiplicada por  $\sigma^2$  produce las varianzas y covarianzas para todos los  $\hat{Y}_i$ .

Las varianzas de cualquier subgrupo de  $\hat{Y}_i$  pueden determinarse usando solamente las filas de  $X$  que corresponden a los puntos de interés y aplicando la primera derivación.

Las varianzas dadas por  $P \sigma^2$  son las varianzas apropiadas cuando los  $\hat{Y}_i$  se usan para estimar los modelos de  $Y$ , para un nivel dado de las variables independientes. Para predicción de futuras observaciones aleatorias, a niveles dados de variables independientes, cada una de las variables tiene que ser incrementada por  $\sigma^2$  para considerar la varianza de la cantidad a ser predicha. Por ello, la matriz varianza-covarianza para predicción es:

$$\text{Var}(\hat{Y}_{pred}) = (I + P) \sigma^2$$

La varianza del vector de residuales  $e = (I-P)Y$  es:

$$\begin{aligned} \text{Var}(e) &= (I - P) \text{Var}(Y) (I - P)' \\ &= (I - P) \sigma^2 \end{aligned}$$

en vista que  $(I-P)$  es una matriz simétrica e idempotente.

Volviendo al ejemplo que se sigue,

$$\text{Var}(\hat{Y}) = X(X'X)^{-1} X' \sigma^2$$

$$\text{Var}(\hat{Y}) = P \sigma^2$$

$$\text{VAR}(\hat{Y}) = \begin{bmatrix} 0.3363 & 0.2866 & 0.2368 & 0.1871 & 0.1374 & 0.0380 & -0.0614 & -0.1608 \\ 0.2866 & 0.2485 & 0.2105 & 0.1725 & 0.1345 & 0.0585 & -0.0175 & -0.1608 \\ 0.2368 & 0.2105 & 0.1842 & 0.1579 & 0.1316 & 0.0789 & 0.0263 & -0.0263 \\ 0.1871 & 0.1725 & 0.1579 & 0.1433 & 0.1287 & 0.0994 & 0.0702 & 0.0409 \\ 0.1374 & 0.1345 & 0.1316 & 0.1287 & 0.1257 & 0.1199 & 0.1140 & 0.1082 \\ 0.0380 & 0.0585 & 0.0789 & 0.0994 & 0.1199 & 0.1608 & 0.2017 & 0.2427 \\ -0.0614 & -0.0175 & 0.0263 & 0.0702 & 0.1140 & 0.2017 & 0.2895 & 0.3772 \\ -0.1608 & -0.0936 & -0.0263 & 0.0409 & 0.1082 & 0.2427 & 0.3772 & 0.5117 \end{bmatrix} \sigma^2$$

$$\text{VAR}(\hat{Y}) = \begin{bmatrix} 0.0088 & 0.0075 & 0.0062 & 0.0049 & 0.0036 & 0.0010 & -0.0016 & -0.0042 \\ 0.0075 & 0.0065 & 0.0055 & 0.0049 & 0.0035 & 0.0015 & -0.0005 & -0.0025 \\ 0.0062 & 0.0005 & 0.0048 & 0.0041 & 0.0035 & 0.0021 & 0.0007 & -0.0007 \\ 0.0049 & 0.0045 & 0.0041 & 0.0038 & 0.0034 & 0.0026 & 0.0018 & 0.0011 \\ 0.0036 & 0.0035 & 0.0035 & 0.0034 & 0.0033 & 0.0032 & 0.0030 & 0.0028 \\ 0.0010 & 0.0015 & 0.0021 & 0.0026 & 0.0032 & 0.0042 & 0.0053 & 0.0064 \\ -0.0016 & 0.0005 & 0.0007 & 0.0018 & 0.0030 & 0.0053 & 0.0076 & 0.0099 \\ -0.0042 & 0.0025 & 0.0007 & 0.0011 & 0.0028 & 0.0064 & 0.0099 & 0.0134 \end{bmatrix}$$

Entonces, la varianza del estimado de la media de  $Y$ , cuando el tiempo de tratamiento es de 3 min., es  $0.2485 \sigma^2$ ; para 24 min.,  $0.2895 \sigma^2$ . Si los valores ajustados se usan para predicción de observaciones futuras, las dos varianzas para predicción serían  $1.2485 \sigma^2$  y  $1.2895 \sigma^2$ , respectivamente.

La matriz varianza-covarianza de los residuales se obtiene de  $\text{Var}(e) = (I-P)\sigma^2$ . Así que,  $\sigma^2(e_i) = (1 - 0.741) \sigma^2$ . Los términos de covarianza cambian de signo. Es importante notar que las varianzas de los residuales observados no son iguales a  $\sigma^2$  ni las covarianzas son cero; los supuestos de igual varianza y cero covarianza aplica a los  $e_i$ .

Nótese que la varianza de cualquier  $\hat{Y}_i$  y la correspondiente varianza  $e_i$  siempre sumará  $\sigma^2$ :

$$P \sigma^2 + (I - P)\sigma^2 = I \sigma^2$$

Aquellos puntos que tienen alta precisión en  $\hat{Y}_i$  tendrán baja precisión en  $e_i$  y viceversa. Además, se puede mostrar que los elementos de la diagonal de la matriz  $P$  son medidas de la "distancia" entre el punto y el centro del espacio de  $X$  (de  $\bar{X}$  en el caso de una variable independiente). De modo que los puntos que están "lejos" del centro del espacio de  $X$ , tendrán (relativamente) baja precisión en  $\hat{Y}_i$  y alta precisión en  $e_i$ . Las pequeñas varianzas de los residuales para los puntos lejos del "centro de los datos", indica que la línea de regresión (superficie) tiende a acercarse a los valores observados de estos puntos.

El hecho de que la varianza de cualquier  $\hat{Y}_i$  es siempre menor que  $\sigma^2$ , enfatiza la ventaja de ajustar un modelo de respuesta continua, suponiendo que el modelo es correcto. Una alternativa para estimar la media de  $\hat{Y}$  (para el nivel particular de  $X$ ) será el valor observado  $Y_i$ .

De acuerdo al modelo presentado,  $Y_i$  tiene varianza  $\sigma^2$ .  $\hat{Y}_i$  siempre proveerá un mejor estimado (en términos de menor varianza) de la media de  $Y$ , que el valor observado  $Y_i$ . El ajuste de un modelo de respuesta utiliza información de los puntos en el entorno, para la estimación de cada punto. Esto produce una ganancia en precisión considerable. En el ejemplo, la precisión obtenida en los tiempos 3 y 24 minutos, ajustando un modelo lineal,  $0.25 \sigma^2$  y  $0.29 \sigma^2$ , requerirán 3 a 4 observaciones en cada punto, para obtener el mismo grado de precisión, sin ajustar una curva de respuesta. Se debe enfatizar que esta comparación es válida sólo si el modelo es (razonablemente) correcto.

Todas las varianzas (y covarianzas) se expresan como múltiplos de  $\sigma^2$ . Los coeficientes están enteramente determinados por la matriz  $X$ , una matriz de constantes que depende del modelo que se ajusta y de los niveles de las variables independientes en el estudio. En los experimentos diseñados, los niveles de las variables independientes están bajo el control del investigador. Así que, a excepción de la magnitud de  $\sigma^2$ , la precisión del experimento está enteramente bajo el control del investigador y puede ser conocido por él *antes* de conducir el experimento. Las eficiencias de las alternativas del diseño experimental pueden ser comparados computando  $(X'X)^{-1}$  ó  $P$ , dependiendo del objetivo del estudio, para cada diseño. El diseño que proporcione las varianzas menores, para las cantidades de interés, será el preferido.

#### e. Distribución de las funciones lineales de las variables normales

El supuesto de que los errores aleatorios  $e_i$  están normalmente distribuidos, implica que los  $Y_i$  también están distribuidos normalmente. Los coeficientes de regresión estimados, los valores ajustados (predichos), y los residuales observados son todos funciones lineales de las observaciones originales de la variable dependiente consecuentemente, el supuesto de normalidad de  $e$ , también implica que los vectores aleatorios  $Y$ ,  $\beta$ ,  $\hat{Y}$  y  $e$  sean multivariados y normalmente distribuidos. Se puede resumir que si  $e \sim MN(0, I \sigma^2)$ , entonces:

$$Y \sim MN (X\beta, I\sigma^2)$$

$$\hat{\beta} \sim MN (\beta, (X'X)^{-1} \sigma^2)$$

$$\hat{Y} \sim MN (\beta X, P\sigma^2)$$

$$e \sim MN (0, (I - P)\sigma^2)$$

En general, las variables aleatorias, dentro de cualquiera de los tres últimos vectores, no son independientes entre sí; las covarianzas no son cero.

Las pruebas de hipótesis y los intervalos de confianza de los parámetros, son todos dependientes de que los estimados de los parámetros sean normalmente distribuidos. Es decir, el supuesto de normalidad de  $\epsilon$ , es crítico para este propósito. Sin embargo, no se requiere de normalidad para la estimación por cuadrados mínimos. Aún en la ausencia de normalidad, los estimados por cuadrados mínimos son los mejores estimados lineales no sesgados. Son los mejores, en el sentido de tener mínima varianza entre todos los estimadores lineales no sesgados.

#### 4. MODELOS PARA DESCRIBIR LA CINÉTICA DE DEGRADACIÓN DE ALIMENTOS EN EL RUMEN

Los alimentos que ingieren los rumiantes se acumulan en el rumen, donde se fraccionan por mecanismos físicos como la remasticación, y la degradación por los microorganismos que existen en el rumen y luego de un período de residencia, salen del rumen a través del orificio retículo-omasal. El aprovechamiento de los nutrientes del alimento por el rumiante, especialmente en el caso de pastos y forrajes, se da en función de estos procesos. Entender la dinámica de la cinética de la digestión ruminal y del paso de los alimentos a través del rumen puede ayudar a establecer estrategias de manejo de la alimentación, de tal modo que se pueda mejorar la producción de los rumiantes.

Existen varios modelos matemáticos utilizados para describir los procesos mencionados arriba. En esta sección se describen aquellos que se consideran más relevantes.

##### a. Ecuaciones que describen el fraccionamiento de partículas

Existen tres ecuaciones que se han utilizado ampliamente en la descripción de este fenómeno: (1) la curva log-normal (Lofgreen 1969; ADSA 1970), (2) la curva exponencial sugerida por Pond *et al.* (1984) y (3) la curva exponencial con un parámetro como exponente (Fisher *et al.* 1988). La primera ecuación fue sugerida para el caso de partículas esféricas o cúbicas, lo que limita su aplicación a partículas de forraje. Además, existen distribuciones que declinan como una curva sigmoideal cuyo ajuste con la ecuación de Pond *et al.* no es apropiada. La ecuación de Fisher *et al.* declina como una curva sigmoideal, para algunos parámetros estimados y como exponencial para otros; debido a esta flexibilidad, se recomienda su uso y se utiliza ahora con un ejemplo:

$$R = 100 e^{-a - bs^2}$$

donde:

- R = porcentaje de peso acumulativo sobre los tamices
- s = tamaño del tamiz, mm
- a y b = parámetros estimados

Debido a que no existen soluciones analíticas para estimar el promedio y la mediana de los tamaños de partículas, éstos deben ser estimados usando la primera derivada con respecto a  $s$  (Fisher *et al.* 1988):

$$R' = 100 e^{(a-s)^2} (b - as^{(a-1)})$$

Para dar un ejemplo, se usan los datos del Proyecto PISA (no publicados) de partículas provenientes de masticación ingestiva de Llachú (*Elodea potamogeton*) por bovinos criollos, muestreados a nivel del cardia (animales fistulados al rumen). El promedio y la mediana para esta muestra fueron de 1.564 mm y 1.388 mm, respectivamente. El  $R$ , estimado como el cociente entre la suma de cuadrados de la regresión y la suma de cuadrados totales no corregida, que proporciona una idea del grado de ajuste, fue de 0.998 (Fig. 1).

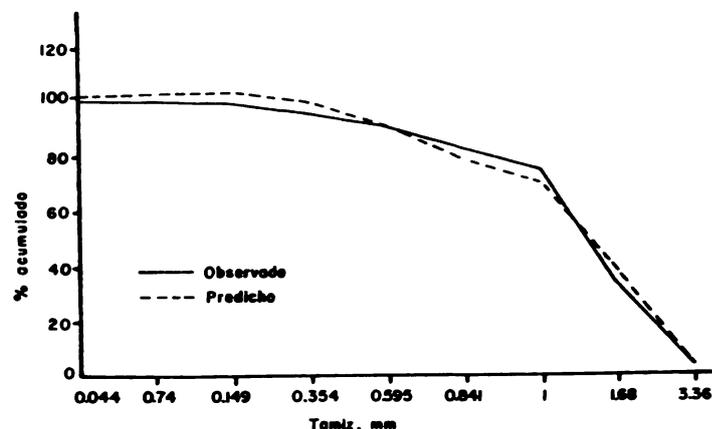


Fig. 1 Distribución de los tamaños de partículas de Llachú después de la masticación ingestiva por bovinos

#### b. Ecuaciones que describen la cinética de degradación de fracciones de alimentos

Este tipo de trabajo puede realizarse tanto *in situ* como *in vitro*. Comparaciones de estos dos métodos han sido ampliamente discutidos por Ruiz y Ruiz (1990).

Se describen tres ecuaciones que son fundamentalmente funciones exponenciales, o exponenciales inversa, que asumen cinética de desaparición o acumulación de primer orden. El primer orden indica que una proporción estimada ( $k$ ) de la fracción remanente total, que se está modelando, decae en cada hora (Fisher *et al.* 1989).

##### (1) Ecuación exponencial (Fisher *et al.* 1989)

$$C = C_d e^{-k(t-L)} + C_i$$

donde,

- $C$  = concentración de la fracción modelada ( $g\ kg^{-1}$ ) a cualquier tiempo dado,  $t$
- $C_d$  = concentración de la porción digestible de la fracción modelada,  $g\ kg^{-1}$
- $C_i$  = concentración de la porción indigestible de la fracción modelada,  $g\ kg^{-1}$
- $k$  = constante de decaimiento proporcional que estima la tasa de degradación,  $h^{-1}$
- $t$  = tiempo de fermentación,  $h$
- $L$  = largo del período pre-fermentativo,  $h$

##### (2) Ecuación bi-exponencial (Mertens y Ely 1982)

$$C = F e^{-k_1(t-L)} + S e^{-k_2(t-L)} + C_i$$

donde:

- $F$  = porción rápidamente degradable,  $g\ kg^{-1}$
- $S$  = porción lentamente degradable,  $g\ kg^{-1}$
- $k_1$  = tasa de degradación de  $F$ ,  $h^{-1}$
- $k_2$  = tasa de degradación de  $S$ ,  $h^{-1}$

Los otros parámetros de la ecuación tienen igual definición que la ecuación anterior.

(3) Ecuación para describir la degradabilidad acumulativa (Pezo y Vohnout 1977)

$$D = \frac{1}{A + Be^{-kt}}$$

donde:

D	= Degradabilidad acumulativa de la fracción modelada, al tiempo t, g kg <sup>-1</sup>
1/A	= Degradabilidad potencial de la fracción modelada, g kg <sup>-1</sup>
1/(A+B)	= Degradabilidad inicial de la fracción modelada, g kg <sup>-1</sup>
k	= Tasa de degradación, h <sup>-1</sup>
t	= Tiempo de fermentación, h

Para ilustrar el uso de estos modelos se emplean los datos del Proyecto PISA (no publicados) sobre degradación *in situ* de Llachu (*Elodea potamogeton*) por bovinos criollos. El ajuste de los modelos propuestos (Figs. 2A y 2B), a los datos de desaparición de la materia seca, se muestra en el Cuadro 1.

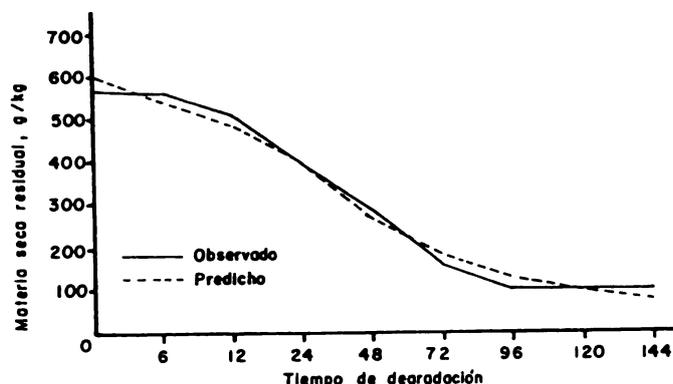
Cuadro 1. Comparación de dos modelos para describir la cinética de degradación del Llachu en el rumen					
Modelo	Degradación			Período pre-fermentativo	R <sup>2</sup>
	Inicial	Potencial	Tasa		
	g kg <sup>-1</sup>	g kg <sup>-1</sup>	h <sup>-1</sup>	h	
Fisher <i>et al.</i> (1989)	440	961	0.019	6	0.9965
Pezo y Vohnout (1972)	413	926	0.033	—	0.9995

El ajuste de los datos, usando el modelo de Mertens y Ely (1979), fue inadecuado debido a que el Llachu, por ser un forraje acuático, presenta una sola fracción, la cual es rápidamente degradable.

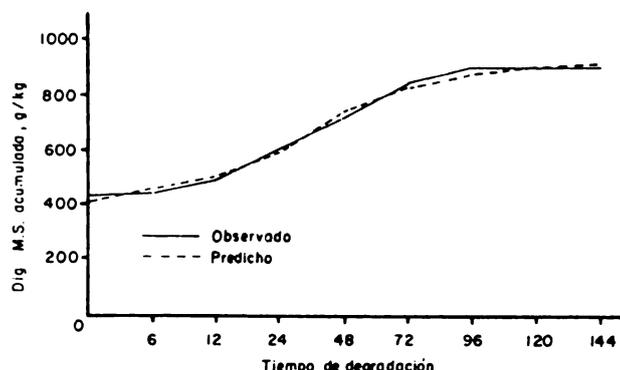
## 5. MODELOS PARA DESCRIBIR LA TASA DE PASAJE DE LOS ALIMENTOS

Los cambios en la capacidad digestiva y la tasa de pasaje de los residuos no digeridos, especialmente en alimentos de baja digestibilidad, tienen un impacto importante en el comportamiento productivo del rumiante. El entendimiento de la relación que existe entre tasas de pasaje, tasas de degradación, capacidad ruminal, y consumo, es muy relevante en la toma de decisiones sobre prácticas de manejo de la alimentación y nutrición.

Durante los últimos 20 años se ha enfatizado en la cuantificación de estas relaciones y se han propuesto diversos modelos conceptuales y matemáticos para su descripción. Los modelos más comunes para describir la dinámica de la digestión en rumiantes, han sido ampliamente discutidos por Lascano y Quiroz (1990) y Pond *et al.* (1988).



**Fig. 2A** Degradación de la materia seca del Llachu, usando el modelo de Fisher *et al.* (1989)



**Fig. 2B** Degradación de la materia seca del Llachu, usando el modelo de Pezo y Vohnout (1977)

De los modelos matemáticos propuestos para describir el flujo de la digesta en rumiantes, el más flexible parece ser el gama-2 de dos compartimientos, donde uno de los compartimientos es dependiente de la edad de la partícula (Quiroz *et al.* 1988). Este modelo se ajusta bien a los datos de curva de excreción de marcadores asociados con la fase sólida de la digesta. Además, el ajuste para datos de excreción de marcadores asociados con la fase líquida, es también adecuado. Si el estudio se realiza sólo con la fase líquida, se recomienda usar el modelo biexponencial de Grovum y Williams (1973).

Debido a que en la mayoría de los casos el investigador desea estimar los parámetros de las tasas de pasaje, tanto de la fase líquida como de la fase sólida, se presenta el modelo gama-2 de dos compartimientos. Si el lector desea información sobre otros modelos, éstos son explicados por Quiroz *et al.* (1988) y Lascano y Quiroz (1990).

La ecuación que describe el modelo gama-2 es:

$$Y = k_0[S^2 e^{-k_2(t-\tau)} - e^{-x_1(t-\tau)}(S^2 + SX_1(t-\tau))]$$

donde:

- Y = concentración del marcador en las heces,  $\mu\text{g g}^{-1}$
- t = tiempo luego de administrar el marcador, h
- $k_0$  = concentración inicial del marcador en el tracto gastrointestinal (se asume mezclado instantáneo),  $\mu\text{g g}^{-1}$
- $x_1$  = tasa de cambio en el primer compartimiento (dependiente de la edad de la partícula en el compartimiento),  $\text{h}^{-1}$
- $k_2$  = tasa de cambio en el segundo compartimiento (independiente del tiempo),  $\text{h}^{-1}$
- S =  $X_1/(X_1 - k_2)$
- $\tau$  = tiempo transcurrido entre la administración del marcador y su primera aparición en las heces, h

Las características de la dinámica de la digestión que se pueden estimar a partir de este modelo son:

(a) la tasa de pasaje ( $k_p$ ,  $\text{h}^{-1}$ )

$$k_p = k_2$$

(b) el tiempo medio de retención de la fracción marcada (TMR, h)

$$TMR = 2/X_1 + 1/k_2 + \tau$$

(c) el llenado del tracto o volumen de la digesta (V, g)

$$V = \text{Dosis de marcador } (\mu\text{g}) / k_o (\mu\text{s g}^{-1})$$

(d) la producción fecal (H, gd<sup>-1</sup>)

$$H = (V)(K_2)(24(\text{hd}^{-1}))$$

Para ilustrar el uso del modelo, se aplicó el mismo a los datos de partículas de henos de Orchardgrass (*Dactylis glomerata*) con Alfalfa (*Medicago sativa*) y Bermuda de la Costa (*Cynodon dactylon*), marcadas con iterbio y dosificadas a cabras con un peso promedio de 42 ± 6 kg (Quiroz 1984).

Los parámetros que describen la curva, se muestra en la Fig. 3. Las características de la curva de excreción se indican en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Parámetros de la curva de excreción en cabras alimentadas con heno				
Heno	Parámetros			
	k <sub>p</sub>	TMR	V	H
Orchardgrass y Alfalfa	0.072	55.5	237.4	410
Bermuda	0.107	82.7	244.4	628

## 6. FUNCIONES DE CRECIMIENTO

Las funciones de crecimiento son útiles para resumir matemáticamente el curso del crecimiento, en el tiempo, de un organismo o parte de éste. Para denotar esta relación se usa una función analítica que puede ser representada por una relación simple.

$$W = f(t)$$

donde:

W = peso  
f = denota alguna relación funcional  
t = tiempo

La forma de la función f puede tener un alto grado de empirismo, ya que en muchos casos ésta se

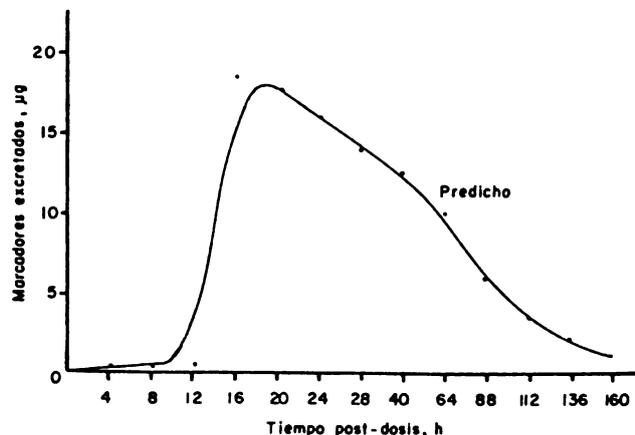


Fig. 3

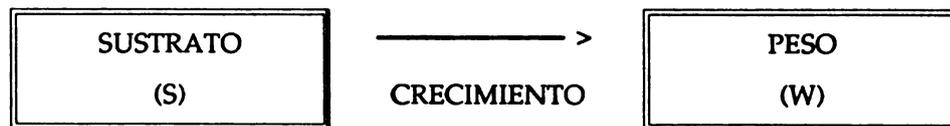
Concentración de marcadores en las heces, a diferentes tiempos post-dosis, en cabras alimentadas con heno

selecciona luego de inspeccionar los datos y hacer una adivinanza informada. Sin embargo, es preferible que tenga significancia biológica y cuyos parámetros sean significativos.

Existen varias ecuaciones propuestas para explicar el fenómeno de crecimiento de un organismo en función del tiempo. En este documento se discuten cinco de estas ecuaciones. Una revisión exhaustiva sobre este tópico es presentada por France y Thornley (1984). Además, estas ecuaciones se utilizarán para describir el crecimiento de alpacas bajo pastoreo en pasturas mejoradas en La Raya, Puno (datos del Instituto de Investigación y Promoción de los Camélidos Sudamericanos de la Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú).

### a. Modelo conceptual

El punto de partida para proponer una ecuación que describa el crecimiento en el tiempo será un modelo cerrado de dos compartimientos sin entradas ni salidas. El proceso de crecimiento consiste en la transferencia de material del compartimiento 1 (substrato) al compartimiento 2 (peso), sin pérdida.



La ganancia de peso en el tiempo es igual a la desaparición de sustrato. Esto se expresa como:

$$\frac{dW}{dt} = - \frac{dS}{dt}$$

6

$$\frac{dW}{dt} + \frac{dS}{dt} = \frac{d(W+S)}{dt} = 0$$

de tal forma que:

$$W + S = \text{Constante}, W_0 + S_0 = W_f + S_f$$

donde:

$W_0$  y  $S_0$  son los valores de  $W$  y  $S$  cuando  $t = 0$

$W_f$  y  $S_f$  son los valores de  $W$  y  $S$  cuando  $t \rightarrow \infty$

Re-escribiendo la tasa de crecimiento como una función de  $W$  y  $S$ ,  $V(W,S)$ , entonces:

$$\frac{dW}{dt} = V(W, S)$$

Ya que  $S = C - W$ , donde  $C$  es una constante, se puede expresar la tasa de crecimiento también sólo en función del peso ( $h(W)$ ).

$$\frac{dW}{dt} = V(W, C - W) = h(W)$$

El paso crucial es determinar el tipo de función  $V(W,S)$ , la cual determinará la forma de la ecuación  $h(W)$  y, por lo tanto, la ecuación misma de crecimiento. Esto es lo que determina las diferentes ecuaciones de crecimiento, de las cuales, en lo sucesivo, se van a describir cinco.

### b. La ecuación monomolecular

En este caso se asume que el crecimiento es constante e independiente del peso. Esta maquinaria trabaja a una tasa proporcional al nivel del sustrato (S) y el crecimiento es irreversible (no considera situaciones donde el organismo pierde peso debido a penurias nutricionales, enfermedades, etc.). La ecuación diferencial se puede escribir como:

$$\frac{dW}{dt} = KS$$

donde, K es constante.

Como  $S_f = 0$ , entonces  $S = W_f - W$  y la ecuación diferencial se puede representar en función del peso.

$$\frac{dW}{dt} = K(W_f - W)$$

Luego de integrar, la ecuación se puede representar como:

$$W = W_f - (W_f - W_0) e^{-kt}$$

Si la unidad de la variable peso es kilogramo (kg) y la del tiempo, días, las unidades de  $W_f$  y  $W_0$  son kg y la de K es  $d^{-1}$ .

### c. La ecuación logística

Aquí se asume que el proceso de crecimiento es proporcional al peso. Esta maquinaria de crecimiento es proporcional a la cantidad de sustrato S y el crecimiento considerado es irreversible. La ecuación diferencial para este caso sería:

$$\frac{dW}{dt} = KWS$$

donde K es una constante.

Como  $S = W_f - W$ , entonces

$$\frac{dW}{dt} = KW(W_f - W)$$

Es conveniente trabajar con una constante  $\mu$  que sea una función del peso asintótico,  $W_f$

$$K = \frac{\mu}{W_f}$$

Por lo tanto,

$$\frac{dW}{dt} = \mu W \left( 1 - \frac{W}{W_f} \right)$$

Luego de la integración y el re-arreglo de los componentes, la ecuación sería:

$$W = \frac{W_0 W_f}{W_0 + (W_f - W_0) e^{-\mu t}}$$

Si la unidad de  $W$ ,  $W_0$  y  $W_f$  es kg y la de  $t$  es d, entonces la unidad de  $\mu$  es  $d^{-1}$ .

#### d. La ecuación de Gompertz

En esta ecuación se asume que el sustrato no es limitante. La maquinaria de crecimiento está siempre saturada con sustrato. La cantidad de la maquinaria de crecimiento es proporcional al peso  $W$ , con una constante de proporcionalidad  $\mu$ . La efectividad de la maquinaria de crecimiento decae con el tiempo, siguiendo una cinética de primer orden, lo cual produce una caída exponencial. Esta caída puede estar asociada a degradación (posiblemente enzimas), senescencia, o desarrollo y diferenciación.

La ecuación diferencial sería:

$$\frac{dW}{dt} = \mu W$$

El parámetro tasa de crecimiento específico,  $\mu$ , no es constante, sino que está gobernado por:

$$\frac{d\mu}{dt} = -D\mu$$

donde  $D$  es un parámetro que describe la caída de la tasa de crecimiento específico  $\mu$ ; que luego de la integración resulta en:

$$\mu = \mu_0 e^{-Dt}$$

donde  $\mu = \mu_0$  cuando  $t = 0$ .

Entonces,

$$\frac{dW}{dt} = \mu_0 W e^{-Dt}$$

Luego de la integración, la ecuación se puede escribir como:

$$W = W_0 e^{(\mu_0(1-e^{-Dt}))/D}$$

Como en los casos anteriores, si  $W$  y  $W_0$  se expresan en kilogramos y  $t$  en días, la unidad de  $\mu_0$  y  $D$  sería  $d^{-1}$ .

#### e. La ecuación de Richards

Se conoce como ecuación de Richards a la aplicación de una ecuación, desarrollada por Von Bertalanffy (1957) para describir el crecimiento de animales, o plantas. Esta es una curva de construcción empírica que tiene una generalidad que podría ser de importancia: para valores particulares de un parámetro adicional "n", esta ecuación contiene las tres ecuaciones descritas previamente, es decir la monomolecular ( $n = -1$ ), la logística ( $n = 1$ ) y la de Gompertz ( $n=0$ ).

La ecuación diferencial puede escribirse como:

$$\frac{dW}{dt} = \frac{kW (W_f^n - W^n)}{n W_f^n}$$

Donde  $k$ ,  $n$  y  $W_f$  son constantes. Los términos  $k$  y  $W_f$  son positivos. La constante  $n$  debe ser  $\geq -1$ , ya que valores de  $n < -1$  no son fisiológicos, debido a que dan tasas de crecimiento infinitas a medida que  $W$  se aproxime a 0.

El producto de la integración es:

$$W = \frac{W_0 W_f}{[W_0^n + (W_f^n - W_0^n)e^{-kt}]^{\frac{1}{n}}}$$

Las unidades de las constantes son iguales a las descritas para las ecuaciones anteriores.

#### f. La ecuación inversa

En esta ecuación, Aguilar *et al.* (1983) proponen que la variable dependiente sea el tiempo ( $t$ ), y la independiente, el peso ( $W$ ).

$$t = f(W)$$

Entre las ventajas dadas por los autores para utilizar una función inversa, están:

- 1) La función inversa asegura monotonidad.
- 2) No parece haber una forma más simple para combinar, en una sola expresión, el comportamiento exponencial asintótico a medida que el tiempo va desde menos a más infinito.
- 3) Es una función fácil de usar en cálculos numéricos prácticos.
- 4) Los parámetros son interpretables biológicamente.

La ecuación diferencial es:

$$\frac{dt}{dW} = \frac{a}{W} + \frac{b}{W_f - W}$$

La expresión analítica sugerida es:

$$t = a[\ln(W)] - b[\ln(W_f - W)] + P(W)$$

donde, a y b son constantes positivas, y

$$P(W) = C_0 + C_1W + \dots + C_n W^n$$

es un polinomio de corrección central de grado n, que debe acomodar cualquier peculiaridad dentro de la fase intermedia o transición de la curva de crecimiento. Los autores aseguran que en la mayoría de los casos prácticos es suficiente tomar  $P(W) = C = \text{constante}$  que conjuntamente con  $W_f$ , a y b forman una ecuación de sólo cuatro parámetros.

Los parámetros que describen la curva de crecimiento de alpacas en pastos mejorados, para cada ecuación descrita arriba, se muestran en el Cuadro 3. Las correspondientes curvas se muestran en la Fig. 4.

Cuadro 3. Parámetros que describen la curva de crecimiento de alpacas, usando diferentes ecuaciones matemáticas										
Ecuación	$W_0$ , kg			$W_f$ , kg			Tasas de crec., $g\ d^{-1}$			$R^2$
	Error estimado	Error estándar	CV, %	Error estimado	Error estándar	CV, %	Error estimado	Error estándar	CV, %	(SS región/SS total)
Monomolecular	6.2	4.2	68	96.1	3.7	4	242.0	0.03	0	99.50
Logística	15.5	2.6	17	89.1	2.1	2	572.0	0.07	0	99.46
Gompertz	12.1	2.8	23	93.6 <sup>a</sup>	4.1	4	$\mu^b=0.009$	$e^{-0.0044t}$	0	99.51
Richards	9.5	4.9	52	92.6	3.8	4	326.3	110.17	34	99.52

<sup>a</sup>  $W_f = W_0 e^{\mu \cdot D}$   
<sup>b</sup> Ver Fig. 5

## 7. MODELOS PARA DESCRIBIR LA CURVA DE LACTANCIA

Conocer el comportamiento de la producción de leche, a través del tiempo en que transcurre la lactancia, es importante para mejorar la planificación del manejo del hato. Prácticas de alimentación y selección genética, así como descripción matemática de un sistema ganadero, son áreas que se benefician directamente de la descripción matemática de las curvas de lactancia en diferentes especies animales.

Se señalan dos ecuaciones ampliamente usadas en la descripción de curvas de lactancia en bovinos de leche y bovinos de carne: la de Wood (1967) y la de Jenkins y Ferrel (1984). Como ejemplo, se usarán los datos de Bustinza (datos no publicados del Instituto de Investigación y Promoción de los Camélidos Sudamericanos, Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú) de producción de leche en alpacas (*Lama pacus*) Suri.

La ecuación propuesta por Wood (1967), es la función gama incompleta:

$$Y(n) = an^b e^{-cn}$$

donde:

- Y(n) = rendimiento en el estado de lactancia n, kg d<sup>-1</sup>
- n = tiempo de lactancia, período (semana o mes)
- a, b y c = parámetros de la función
- e = función exponencial

En términos biológicos, la constante "a" representa la escala de producción del animal a través del período de lactancia; es decir, animales con mayores valores de "a" tendrán un nivel productivo más alto. El coeficiente "b" está directamente relacionado con la fase de desarrollo; mientras mayor sea su valor, más rápido se alcanzará el pico de producción. El parámetro "c" es la pendiente de la curva en la fase de recuperación o última fase de la lactancia; si el valor absoluto de este parámetro es pequeño, se origina una ligera disminución en la producción, por lo que la curva declinará suavemente.

A partir de los parámetros de la función, se pueden estimar algunas características de la curva de lactancia, que son útiles en la selección de prácticas de manejo de alimentación y genético:

- (a) La persistencia S. Es una estimación de la magnitud de la tendencia a mantener las máximas producciones de forma constante. Se puede estimar como la tasa de declinación relativa en el punto intermedio entre el tiempo en el cual se registra el rendimiento máximo (N) y el tiempo cuando termina la lactancia (t<sub>f</sub>):

$$S = C \frac{N - t_f}{N + t_f}$$

- (b) El momento en que se produce el pico de la lactancia

$$N = \frac{b}{c}$$

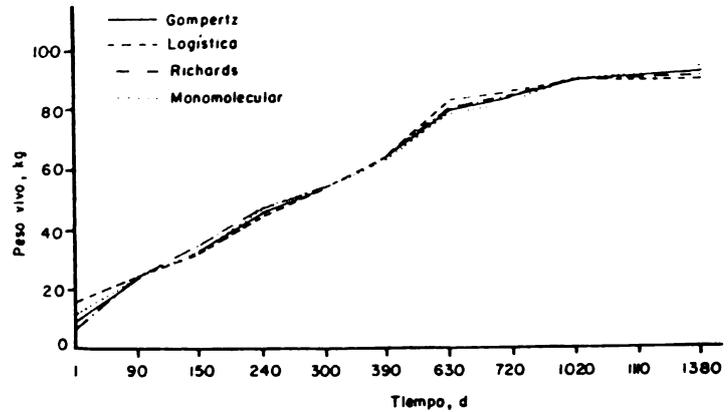


Fig. 4 Curva de crecimiento de la alpaca, usando diferentes ecuaciones matemáticas

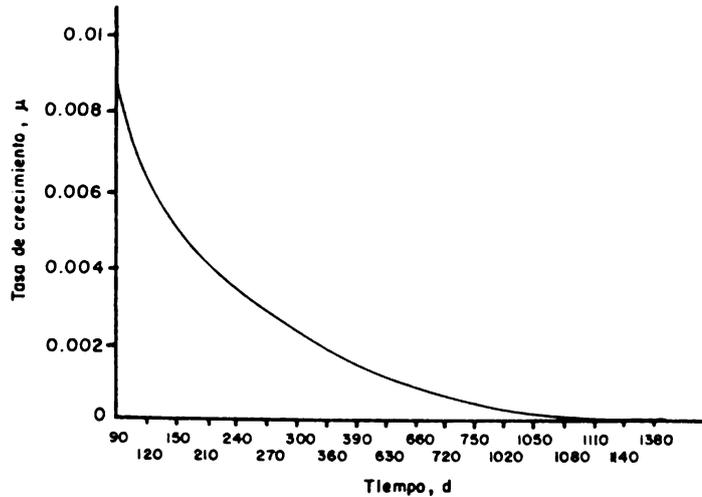


Fig. 5 Estimación de la tasa de crecimiento según el modelo de Gompertz

(c) La producción máxima en el pico de la lactancia

$$Y_{m\acute{a}x} = a \left( \frac{b}{c} \right)^b e^{-b}$$

(d) La producción total por lactancia

$$Y_{total} = \sum_{i=1}^n Y_i$$

donde:

$i = 1, 2, 3, \dots, n$  días de lactancia.

Jenkins y Ferrell (1984) proponen la siguiente ecuación empírica:

$$Y_{(n)} = \frac{n}{ae^{kn}}$$

donde:

$Y_n$  = producción diaria de leche a la semana  $n$ ,  $\text{kg d}^{-1}$   
 $n$  = tiempo de lactancia, semanas  
 $a$  y  $k$  = parámetros de la función  
 $e$  = función exponencial

La interpretación biológica para los parámetros de esta función no ha sido desarrollada. El parámetro "k" afecta la forma general de la curva y, por lo tanto, puede usarse como una medida muy indirecta de la persistencia de la lactancia. Las otras características estimables con esta ecuación son:

(a) El momento en que se produce el pico de la lactancia

$$N = \frac{1}{k}$$

(b) La producción máxima en el pico de la lactancia

$$Y_{m\acute{a}x} = \frac{1}{ake}$$

(c) La producción total por lactancia

$$Y_{total} = \sum_{i=1}^n Y_i$$

donde:

$$i = 1,2,3,\dots, n \text{ días de lactancia.}$$

En vista de que esta función tiene integral propia, se puede encontrar el área total de la curva como:

$$Y_{total} = 7 \left( \frac{Y_i \sum^n}{ae^{kn}} \right)$$

donde:

$n_f$  es la última semana de lactancia.

La solución de esta integral es:

$$Y_{total} = \frac{7}{ak^2} (-n_f ke^{-nfk} - e^{-nfk} + ke^{-k} + e^{-k})$$

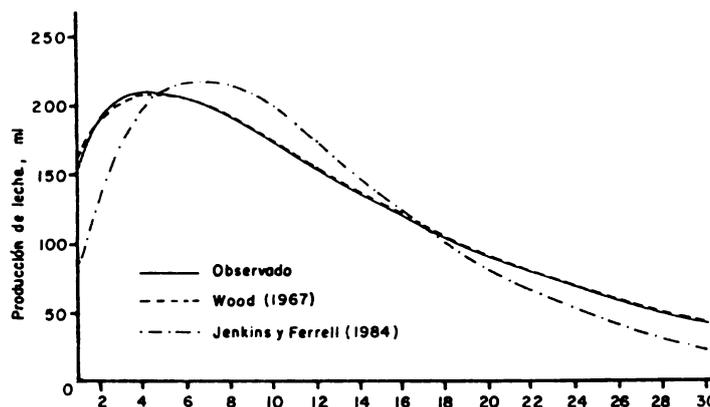


Fig. 6 Curva de lactancia de la alpaca

Los parámetros que describen la curva de lactancia, usando los dos modelos descritos arriba, se muestra en la Fig. 6. Las características de estas curvas, estimada por las dos ecuaciones se indican en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Características de la curva de lactancia de alpacas Suri según dos modelos					
Modelo	S h <sup>-1</sup>	N semanas	Y <sub>máx</sub> ml	Y <sub>total</sub> ml	R <sup>2</sup>
Wood (1967)	0.07	4.2	205	26207	0.9998
Jenkins y Ferrel (1984)	0.2	6.4	217	27537	0.9695

## 8. LITERATURA CITADA

- AGUILAR, C.; FRIEDLI, C.; CAÑAS, R. 1983. The growth curve of animals. *Agricultural Systems* 10:133.
- AMERICAN DAIRY SCIENCE ASSOCIATION. 1970. A report: Committee on classification of particle size in feedstuffs. *Journal of Dairy Science* 53: 589.
- DRAPER, N.R.; SMITH, H. 1981. *Applied regression analysis*. 2 ed. New York, John Wiley & Sons. 709 p.
- FISHER, D.S.; J.C. BURNS; POND, K.R. 1988. Estimation of mean and median particle size of ruminant digesta. *Journal of Dairy Science* 71:518.
- FISHER, D.S.; BURNS, J.C.; POND, K.R. 1989. Kinetics of *in vitro* cell-wall disappearance and *in vivo* digestion. *Agronomy Journal* 81:25.

- FRANCE, J.; THORNLEY, J.H.M. 1984. Mathematical models in agriculture. London, Butterworths. 335 p.
- GROVUM, W.L.; WILLIAMS, V.J. 1973. Rate of passage of digesta in sheep. IV. Passage of marker through the alimentary tract and the biological relevance of rate-constants derived from the changes in concentration of markers in faeces. *British Journal of Nutrition* 30:313.
- JENKINS, T.G.; FERRELL, C.L. 1984. A note on lactation curves of crossbred cows. *Animal Production* 39:479.
- LASCANO, C.; QUIROZ, R. 1990. Metodología para estimar la dinámica de la digestión en rumiantes. In *Nutrición de rumiantes: Guía metodológica de investigación*. M.E. Ruiz, A. Ruiz (Eds.). San José, Costa Rica. ALPA, RISPAL. p. 89-104.
- LOFGREEN, G.P. 1969. Summary of the minutes of the 61st business meeting of the American Society of Animal Science. *Journal of Animal Science* 29:1017-1025.
- MERTENS, D.R.; ELY, L.O. 1982. Relationship of rate and extent of digestion to forage utilization - A dynamic model of evaluation. *Journal of Animal Science* 54:895-905.
- PEZO, D.; VOHNOUT, K. 1977. Tasas de digestión *in vitro* en seis gramíneas tropicales. *Turrialba* 27:47-53.
- POND, K.R.; TOLLEY, E.A.; ELLIS, W.C.; MATIS, J.H. 1984. A method for describing the weight distribution of particles from sieved forage. In *Techniques in Particle Size Analysis of Feed and Digesta in Ruminants: Proceedings of a Workshop Held at the Banff Centre*. E.M. Kennedy (Ed.). Edmonton, Alta, Canada. Society of Animal Science, Occasional Publication 1. p. 123.
- POND, K.R.; ELLIS, W.C.; MATIS, J.H.; FERREIRO, M.H.; SUTTON, J.D. 1988. Compartment models for estimating attributes of digesta flow in cattle. *British Journal of Nutrition* 60:571.
- QUIROZ, R.A. 1984. Particle size of forage masticate and its effect on digestion, rate of passage and intake by goats. M.S. Thesis. Raleigh, North Carolina State University. 76 p.
- QUIROZ, R.A. 1986. Forage lignins: Isolation, characterization and degradation in the gastrointestinal tract of ruminants. Ph. D. dissertation. Raleigh, North Carolina State University. 141 p.
- QUIROZ, R.A.; POND, K.R.; TOLLEY, E.A.; JOHNSON, W.L. 1988. Selection among nonlinear models for rate of passage studies in ruminants. *Journal of Animal Science* 66:2977-2986.
- RAWLINGS, J.O. 1988. Applied regression analysis: A research tool. California, Wadsworth & Brooks. 553 p.
- RUIZ, M.E.; RUIZ, A. (Eds.) 1990. *Nutrición de rumiantes: Guía metodológica de investigación*. San José, Costa Rica. ALPA, RISPAL. 344 p.
- VON BERTALANFFY, L. 1957. Quantitative laws for metabolism and growth. *Quarterly Reviews of Biology* 32:217.
- WOOD, P.D.P. 1967. Algebraic model of the lactation curve in cattle. *Nature (London)* 216:164.

# CAPÍTULO V

## SIMULACIÓN DE SISTEMAS: APLICACIONES EN PRODUCCIÓN ANIMAL

*Claudio Aguilar González y Raúl Cañas Cruchaga*

*Departamento de Zootecnia, Facultad de Agronomía,  
Pontificia Universidad Católica de Chile*

# CONTENIDO

1. FUNDAMENTOS DE LA MODELACIÓN .....	195
a. Los modelos .....	195
b. Clasificación de los modelos .....	196
c. Modelación y teoría general de sistemas .....	197
2. LOS MODELOS DE SIMULACION .....	199
a. Simulación .....	199
b. Estructura de los modelos de simulación .....	201
c. Etapas en la elaboración de un modelo de simulación .....	202
d. Clasificación de los modelos de simulación .....	204
3. GENERACIÓN DE VALORES DE VARIABLE ESTOCÁSTICA EN MODELOS DE SIMULACIÓN .....	206
a. Introducción .....	206
b. Generación de números aleatorios .....	207
(1) Números aleatorios con distribución uniforme .....	209
(2) Método de congruencia lineal .....	209
(3) Prueba de aleatoridad .....	210
(4) Prueba de uniformidad .....	211
c. Métodos de generación de variables estocásticas .....	211
(1) Método de la inversa .....	212
(2) Método del rechazo .....	213
(3) Método de la composición .....	214
(4) Método de las convoluciones .....	215
d. Distribuciones continuas de probabilidad .....	216
(1) La distribución normal .....	216
(2) La distribución uniforme .....	218
(3) La distribución exponencial .....	219
e. Distribuciones discretas de probabilidad .....	220
(1) La distribución geométrica .....	220
(2) La distribución binomial .....	221
(3) La distribución uniforme discreta .....	222
(4) La distribución empírica discreta .....	222
4. ANÁLISIS DEL SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE CARNE DE BOVINOS EN LA ZONA CIRCUNLACUSTRE DE CARATA (PUNO, PERÚ) .....	223
a. Introducción .....	223
b. Materiales y métodos .....	224
(1) Análisis del sistema .....	224
(2) Consumo .....	225
(3) Requerimiento de mantención .....	226
(4) Requerimiento de energía para regulación de temperatura corporal .....	227
(5) Costo de cosecha .....	230
(6) Requerimientos de proteína .....	230
(7) Requerimiento de calcio y fósforo .....	232
(8) Determinación de la ganancia de peso .....	232
c. Resultados y discusión .....	235
(1) Validación .....	235
(2) Restricciones del modelo .....	237

5. ANÁLISIS DEL SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE LECHE EN LA ZONA CIRCUNLACUSTRE DE CARATA (PUNO, PERÚ) .....	237
a. Introducción .....	237
b. Materiales y métodos .....	238
(1) Análisis del sistema .....	238
(2) Consumo .....	238
(3) Producción potencial de leche .....	239
(4) Partición de la energía .....	240
(5) Componentes considerados en la partición de la energía .....	242
(6) Relaciones en la partición de la energía .....	245
(7) Costo energético del catabolismo de ayuno y requerimiento de mantención .....	245
(8) Costo energético para producción de leche .....	247
(9) Costo energético del incremento de peso .....	248
c. Resultados y discusión .....	248
(1) Validación .....	248
(2) Restricciones del modelo .....	249
6. MODELO DE CONSUMO DE VACAS LECHERAS A PASTOREO .....	249
a. Introducción .....	249
b. Factores que afectan el consumo .....	250
c. Relaciones cuantitativas entre los factores .....	252
(1) Tamaño corporal .....	252
(2) Rendimiento potencial de leche .....	252
(3) Calidad de la dieta .....	253
(4) Etapa de lactancia .....	253
(5) Disponibilidad de forraje .....	254
(6) Consumo potencial de forraje .....	254
(7) Consumo de forraje corregido por disponibilidad .....	255
(8) Relación entre consumo de forraje y concentrado .....	255
(9) Consumo con disponibilidad limitante .....	255
(10) Consumo con disponibilidad no limitante .....	256
d. Validación del modelo .....	256
(1) Análisis de regresión .....	257
(2) Comparación de medias .....	257
(3) Error porcentual de estimación .....	257
e. Análisis de sensibilidad .....	258
f. Conclusiones .....	259
7. INDICE DE SELECCIÓN EN UN MODELO DE CONSUMO DE BOVINOS EN PASTOREO .....	260
a. Introducción .....	260
b. Características de la selectividad .....	260
(1) Palatabilidad y preferencia por una planta .....	261
(2) Características de la pradera en la selectividad .....	262
c. Determinación del índice de selección .....	263
d. Determinación del consumo .....	263
(1) Consumo potencial .....	264
(2) Consumo voluntario .....	265
(3) Factor de corrección por disponibilidad .....	266
(4) Factor de corrección por digestibilidad .....	266
(5) Índice de selectividad .....	267
(6) Corrección de la selectividad por digestibilidad .....	267
(7) Corrección de la selectividad por disponibilidad .....	267

e. Restricciones y constricciones del modelo .....	268
f. Evaluación del modelo .....	268
g. Experimentación con el modelo .....	269
h. Análisis de sensibilidad del modelo .....	270
i. Conclusiones .....	270
<b>8. LITERATURA CITADA .....</b>	<b>270</b>

## SIMULACIÓN DE SISTEMAS: APLICACIONES EN PRODUCCIÓN ANIMAL

*Claudio Aguilar González y Raúl Cañas Cruchaga*

*Departamento de Zootecnia, Facultad de Agronomía,  
Pontificia Universidad Católica de Chile*

### 1. FUNDAMENTOS DE LA MODELACIÓN

#### **a. Los modelos**

El término modelo tiene en el lenguaje común una infinidad de interpretaciones. Para propósitos de este libro, se tomará por modelo algo que representa una cosa. De este modo, modelo será la representación de un objeto, concepto o sistema de tal forma que, aún siendo distinto a la entidad que representa, puede homologar su funcionamiento y/o uno o varios atributos de ella.

En estos términos, existe una gran gama y variedad de modelos. Incluso, puede afirmarse que todos los mecanismos que se usan para la comunicación son, con diferencias en cuanto a mayor o menor complejidad, alguna clase de modelos. Visto de esta forma, los modelos no son una invención muy nueva. Se han usado desde tiempos inmemoriales para representar continentes o ciudades (mediante mapas), e incluso para representar ideas como son las pinturas rupestres, que datan, las más antiguas, de la época de transición del paleolítico al neolítico.

Un modelo se diseña y construye, generalmente, con el propósito de entender, explicar o mejorar el funcionamiento del sistema real u objeto que está representando. Lo esencial de un modelo será entonces que alcance el objetivo para el cual se construyó, pasando a ser su estructura un aspecto secundario. De este modo, se observa que un modelo puede ser una réplica exacta del objeto que representa, cambiando la escala o el material con el que se construye, o bien, tener algún grado de abstracción del objeto que representa, considerando solamente sus variables más relevantes. Para distinguir estos dos tipos de modelos se usan los adjetivos de isomórfico y homomórfico, que denotan el grado de semejanza y uniformidad del modelo con el objeto o cosa que representa.

Un modelo isomórfico, que sería aquel que es idéntico o muy parecido a la cosa que representa, cumple dos propiedades. En primer lugar, existe una correspondencia uno a uno entre los componentes del modelo y los componentes de lo que representa. En segundo lugar, el modelo contiene todas las relaciones entre componentes de la cosa que representa, preservando la proporcionalidad o calidad de ellas. Son ejemplos de esta categoría de modelos, las parcelas de ensayo en agronomía, los modelos a escala para estudios de propiedades aerodinámicas o los modelos a escala de embalses hidráulicos en ingeniería y los prototipos de hornos de reducción o de fundición en ingeniería mecánica.

Un modelo homomórfico, que sería aquel que solamente es muy parecido a lo que representa, cumple solamente una propiedad : su funcionamiento global o producto es igual al del objeto o cosa que representa. Ello implica que en la elaboración del modelo se han hecho, en mayor o menor medida, simplificaciones y abstracciones con los aspectos más relevantes. De este modo, la estructura del modelo puede ser radicalmente diferente a la del objeto o cosa que representa, cambiando los componentes por otros análogos, o bien, no considerando todas las relaciones entre componentes, sino aquellas más importantes y suficientes para la precisión que se desea. Son ejemplos de modelos homomórficos un riñón artificial (que realiza la misma operación que un riñón natural siendo estructuralmente muy diferente a éste) y un sistema de ecuaciones que represente un sistema real, y es el nivel más alto de abstracción que se puede lograr con un modelo.

## b. Clasificación de los modelos

Los modelos pueden clasificarse de muy diversas maneras, de acuerdo a alguna propiedad que desee destacarse. La separación entre modelos isomórficos y homomórficos denota el límite en el que comienza a jugar un papel importante la abstracción, en detrimento de la similitud y uniformidad entre el modelo y el objeto representado. Este límite denota una clasificación binaria de los modelos, pero no lleva en sí los matices que hay dentro de cada grupo. En general, puede decirse que a mayor nivel de abstracción hay menor grado de similitud y uniformidad entre modelo y objeto representado y, viceversa, un mayor grado de similitud implica un menor nivel de abstracción.

De acuerdo al grado de abstracción puede hacerse una clasificación (Shannon 1975) demarcando los principales tipos de modelos. De esta forma, partiendo desde el menor grado de abstracción hasta el más alto, se pueden distinguir:

- Modelos físicos
- Modelos a escala
- Modelos análogos
- Modelos de educación o juego
- Modelos de simulación
- Modelos matemáticos

Los dos primeros tipos de modelos pueden considerarse isomórficos, y todos los demás, homomórficos. Esta misma proporción se aprecia en cuanto a cantidad de modelos desarrollados. En general, la mayoría de los modelos son homomórficos, existiendo una clara tendencia hacia el uso de aquellos con niveles altos de abstracción.

Los *modelos físicos* son isomórficos, por consiguiente tienen gran semejanza en componentes y relaciones con el objeto que representan; se parecen mucho físicamente. Este tipo de modelo recibe también el nombre de icónico. Si se encuentra a escala real se dice que es un modelo físico; en cambio, si hay alguna reducción o aumento de escala se refieren como *modelos a escala*, donde existe algún nivel de abstracción o simplificación.

Los *modelos análogos* son aquellos en los cuales uno o varios elementos del objeto real, componentes o relaciones, son sustituidos por otros diferentes, de tal modo que permite al modelo funcionar de modo similar. Se llaman análogos debido a que existe una analogía, relación de semejanza entre cosas distintas, entre los elementos sustituidos del objeto real con el que lo representa en el modelo. Un gráfico de coordenadas XY es el ejemplo más común de modelo análogo, donde una distancia en el gráfico representa tiempo, producción u otra variable del objeto real.

Los *modelos de educación o juego* son aquellos en que explícitamente está incluido, como componente del modelo, un factor humano que permite la interacción con el funcionamiento del modelo. Se acostumbra también

llamarles de juegos, por su flexibilidad para que una persona se ejercite con distintos escenarios simulados, probando su habilidad para tomar decisiones. Ejemplos de este tipo de modelos hay en administración de empresas, tácticas de guerra, planificación, y agronomía. Un ejemplo es el modelo PRESIM que permite el entrenamiento de alumnos en el manejo de un predio de producción de carne (Aguilar *et al.* 1983, 1984).

El nivel de abstracción en un modelo de educación es similar al de un *modelo de simulación*; sin embargo, se acostumbra diferenciarlos por dos motivos. Primero, tienen objetivos diferentes; el modelo de educación está pensado para dar respuesta frente a decisiones y seguir funcionando indefinidamente de esta forma, en el intercambio de respuestas frente a decisiones. Un modelo de simulación puede también tener dicha estructura, pero su objetivo está más bien apuntando hacia la comparación de diferentes estrategias o tácticas, es decir, para hacer inferencias. El segundo motivo por el cual se diferencian, es por la dupla fidelidad-precisión que presentan. Un modelo de educación requiere una alta fidelidad del modelo con el sistema que representa, pasando la precisión a un plano casi secundario. En cambio, un modelo de simulación requiere ambas, equiparadas según los objetivos para los cuales se construye el modelo. En este sentido, entonces, puede suponerse que un modelo de simulación requiere de un nivel más alto de abstracción.

Se hace la diferenciación entre fidelidad y precisión para separar conceptos distintos. Por fidelidad se entiende el grado de homologación que un modelo tiene con el objeto que representa. En cambio, por precisión se entiende número de decimales o número de repeticiones necesarias para lograr un nivel dado de confianza. Algunos autores usan también exactitud como sinónimo de fidelidad (Chapra y Canale 1987), pero haciendo la misma diferenciación de los conceptos.

El nivel más alto de abstracción corresponde a los *modelos matemáticos*. En ellos sólo los símbolos, en vez de algún elemento físico, se usan para representar los componentes y relaciones del objeto real. La gran mayoría de los modelos de docencia y de simulación, diseñados para funcionar en un computador, se clasifican también dentro de los modelos matemáticos. Se hace la salvedad de aquellos que, en la práctica, podrían prescindir de un computador, como sería el caso de un sistema de ecuaciones diferenciales que represente un sistema, donde podría obtenerse una solución analítica.

Se hace de este modo la diferencia con un modelo de simulación o un modelo de docencia, que se debe ejecutar para obtener un resultado. En contraste, un modelo matemático puede resolverse para obtener la información deseada o resultado.

Cuando un investigador se enfrenta al problema de modelar un sistema complejo, tiene la posibilidad de mezclar las características de los modelos que se han esquematizado, generalmente tomando las de los modelos adyacentes en la jerarquización realizada. Ello significa que los tipos de modelos mencionados no denotan una clase cerrada o pura, sino más bien líneas generales con algunas características más marcadas.

### c. Modelación y teoría general de sistemas

La modelación, entendida como el proceso mediante el cual un ingeniero de sistemas o un investigador diseña y construye un modelo que representa un objeto o sistema real, es una metodología para resolver problemas y no una teoría en sí. Como metodología que es, se debe hacer una equiparación entre el marco teórico que aporta la metodología y la estructura del problema a resolver, lo que entre otras cosas determinará el tipo de modelo más adecuado al problema.

El marco teórico de la metodología en cuestión lo provee la llamada *Teoría General de Sistemas*, disciplina dentro del campo lógico matemático, cuyo principal precursor ha sido Von Bertalanffy (1968). Este autor planteó la existencia de modelos, principios y leyes aplicables a sistemas generalizados o subsistemas, así como también a los atributos de los componentes y a las relaciones que existen entre ellos. Tal planteamiento condujo a proponer

una metodología consistente en hacer abstracción del sistema real en un modelo que refleje todo lo fundamental y relevante.

Dicha metodología, en apariencia tan simple, no es de aplicación única e inmediata, ya que está directamente relacionada a la definición de los límites y niveles jerárquicos del sistema que se está modelando. Se ha señalado entonces la existencia de todo un espectro de modelos (Orchard 1972; Aguilar y Cañas 1980), si se considera el nivel de generalización adoptado en el proceso de modelación. Pueden distinguirse consecuentemente cuatro tipos diferentes de modelos.

**Tipo I.** Categoría consistente en teorías específicas que dan lugar a modelos particulares. En general ignora lo determinante que hace que el sistema en estudio se manifieste en virtud del hecho de ser sistema. Un ejemplo son las funciones de respuesta polinomiales, como la mostrada por Azyare y Watkin (1967), que plantea una relación entre área foliar y porcentaje de luz interceptada, por medio de la función de segundo grado

$$Y = 25.54 + 53.71X - 0.12X^2 \quad (R^2 = 0.6508)$$

donde:

Y = porcentaje de luz interceptada  
X = área foliar, cm<sup>2</sup>

Este modelo tiene la ventaja de ser muy simple de usar y de fácil cálculo. Predice el porcentaje de luz interceptada conociendo el área foliar con una precisión aceptable. Sin embargo, está restringida al rango de área foliar que se tuvo experimentalmente. Además, no responde a razones teóricas, ya que los extremos de la curva, en el primer cuadrante, no tienen explicación física. Así, a índice de área foliar cero debería corresponder un porcentaje de intercepción cero y además, cuando el índice de área foliar es muy alto el porcentaje de intercepción debería ser asintótico a cien.

**Tipo II.** Esta categoría consiste en teorías generalizadas que dan origen a modelos más racionalistas y menos particulares. Un ejemplo es el caso del modelo de Crowther y Yates (1942), de gran difusión y uso para determinar la dosis óptima de fertilizante en el Reino Unido durante la Segunda Guerra Mundial. El modelo es una ecuación del tipo

$$Y = Y_0 + C (1 - 10^{-kX})$$

donde:

Y = rendimiento  
X = nivel de fertilización

Este modelo tiene un alto nivel de generalización en el componente del sistema que estudia. Ello se expresa en que considera un rendimiento inicial sin aplicación de fertilizante y además, tiene una asíntota para niveles normalmente altos de fertilización. Sus limitaciones, en cuanto a generalidad, está en suponer que todos los otros componentes no son limitantes, en no considerar que el rendimiento inicial sin aplicación de fertilizante es función de la composición inicial del suelo y por último, en no tomar en cuenta el concepto de catástrofe planteado por Thom (1975) que correspondería, en este caso, a la brusca disminución de rendimiento producida por una sobredosis de fertilizantes.

Por lo tanto, deben de analizarse los tres elementos mencionados que aumentarían la generalidad del modelo. Si se incluyesen, seguramente el modelo sería mucho más complejo, de más difícil uso y tal vez de una aplicabilidad práctica limitada. Ello indica que hay un conocimiento implícito, no declarado en el modelo, que

construye su uso en áreas más particulares, obligando a quien lo aplique a usar su conocimiento previo, experiencia y buen criterio, para usarlo en forma adecuada y exitosa. En consecuencia, un modelo de este tipo es muy adecuado, pero con las restricciones que se han señalado.

**Tipo III.** Esta categoría consiste en teorías generales que dan origen a modelos caracterizados por satisfacer tres propiedades bien definidas. Son aplicables hasta los límites del sistema, reflejan un tratamiento fundamentalmente sistemático común a todos los sistemas y contienen principios metodológicos generales. Se distingue esta categoría por ser un fino balance entre generalidad con contenido útil y metodología.

Existen muchas teorías que dan lugar a modelos con un alto nivel de generalización que no satisfacen los tres requerimientos anotados, pero dan resultados de naturaleza sistemática generalizada y se encuentran en la categoría de tipo II.

Un ejemplo de modelo en la categoría tipo III es el simulador de ecosistemas mediterráneos propuesto por Miller (1977). Este modelo satisface las tres propiedades mencionadas, ya que tiende a representar cualquier ecosistema mediterráneo con un conjunto de principios o leyes generales de funcionamiento, mediante la aplicación de una metodología general de simulación. No obstante, esto no quiere decir que todos los modelos de simulación deben clasificarse en el tipo III; existen muchos modelos de simulación que carecen del grado de generalización que requiere la categoría y son, por lo tanto, sólo un conjunto de ecuaciones particulares para resolver un caso específico en una circunstancia determinada.

**Tipo IV.** Esta categoría tiene un alto nivel de generalización; constituye una teoría matemática de sistemas abstractos. Son demasiado generales como para producir metodologías utilizables directamente en la resolución de problemas aplicables al área silvoagropecuaria. Un ejemplo lo constituyen las definiciones para un marco conceptual de Teoría General de Sistemas hechos por Mesarovic y Takahara (1975) en su teoría axiomática.

La definición de estos diferentes tipos de teoría para modelar, en el marco de la Teoría General de Sistemas, da una orientación global en la cual debe enmarcarse el estudio de sistemas agropecuarios, que corresponde al desarrollo de modelos en las teorías de tipo III, aplicables al problema agrícola y, en alguna medida, dentro de teorías de tipo II, que sean muy generales y adecuadas para la solución del problema en estudio.

Considerando la complejidad y las características que presentan los sistemas agrícolas, la posibilidad de uso de modelos de simulación se ve, en el marco de lo que se ha llamado *análisis de sistemas*, como la mejor alternativa en las ciencias agrícolas, ya que puede satisfacer las condiciones para modelos en la categoría tipo III.

## 2. LOS MODELOS DE SIMULACION

### a. Simulación

En las últimas décadas se ha puesto en boga, en numerosas disciplinas científicas, el uso del término *simulación* para denotar la acción de representar una cosa mediante algún modelo con cierto grado de abstracción. Incluso, se acepta usar el verbo *simular* para describir la acción de construir modelos (Naylor 1973), lo que implica que cualquier modelo o representación de algo es una forma de simulación. Sin embargo, esta aceptación desde el término vulgar, en que simular es fingir lo que no es, ha experimentado una evolución al aplicarse mediante el método científico en la ciencia.

El primer cambio de la palabra se observa a comienzos de la década de los años cuarenta, con los trabajos de von Neumann y Ulam, en donde, además de usar la palabra simulación en un sentido más específico, se le asocia con el análisis de Monte Carlo. El análisis de Monte Carlo era una técnica matemática usada para resolver problemas matemáticos no probabilísticos, mediante la simulación de procesos estocásticos cuyos momentos o distribuciones de probabilidad satisfacen o representan las relaciones matemáticas del problema. De este modo, la acepción de la palabra simular indicaba que había técnicas matemáticas o numéricas involucradas en el desarrollo y solución de un modelo.

Los siguientes cambios han tenido que ver con el advenimiento de los computadores de gran velocidad y, en especial, de los computadores personales, donde el hecho de simular adquirió otro significado más, cual es el de experimentar con modelos matemáticos en un computador.

El uso moderno de la palabra simular ha recogido esta rápida evolución, incorporándola a la metodología del análisis de sistemas. Su significado incluye tanto la construcción de un modelo de un sistema real, con uso de técnicas matemáticas o numéricas para la ejecución y desarrollo del modelo, como la experimentación con dicho modelo.

De este modo, hoy se entiende por simulación al proceso de diseñar y conducir experimentos con un modelo de un sistema real, con apoyo de elementos matemáticos o numéricos, con el propósito de entender el funcionamiento o evaluar estrategias de operación del sistema.

En este contexto, se consideran dentro del campo de la simulación las siguientes variantes de modelos:

- Modelos de educación o juego
- Modelos de simulación propiamente dichos
- Modelos de análisis de Monte Carlo

Los *modelos de educación o juego* se caracterizan, como ya se mencionó, por permitir en forma explícita la interacción humana con el funcionamiento del modelo. Esta forma de operar se adapta muy bien para entrenar profesionales en la toma de decisiones, evaluar la calidad de las decisiones tomadas e incluso probar hipótesis de conjunto de decisiones, lo cual haría perfectamente posible clasificar tal modelo dentro de los modelos de simulación propiamente dichos. En general, los modelos de docencia hacen la representación de un escenario imaginario donde se colocan los jugadores. En este ambiente simulado, deben tomar de vez en cuando decisiones de algún tipo, que afectarán las condiciones ambientales en que deberán basarse sus posteriores decisiones.

Los modelos de educación más difundidos son los juegos militares y los juegos de gerencia. Los juegos militares son una herramienta de entrenamiento de dirigentes militares, que permiten evaluar diferentes estrategias en condiciones simuladas de conflicto o guerra. Los juegos de gerencia se diseñan con el mismo objetivo educativo, pero las alternativas de estrategias que se prueban se refieren a condiciones de producción, mercado o finanzas, generalmente delimitadas a una industria cualquiera en competencia con otras.

Los juegos de gerencia se concibieron originalmente para directivos de empresa, pero rápidamente fueron adoptados en las universidades como herramienta docente, fundamentalmente en las carreras relacionadas con ingeniería y administración, por las ventajas de costo y tiempo que proveen para entrenar alumnos en escenarios simulados, evaluando y autoevaluando la calidad de las decisiones que se toman.

En el área de agronomía, específicamente en producción animal, la Universidad Católica fue pionera, en los inicios de la década de los años ochenta, en el desarrollo y uso de modelos de docencia, fundamentalmente como apoyo a las cátedras tradicionales de producción (Cañas y Aguilar 1982; Aguilar *et al.* 1983, 1984).

El modelo PRESIM, denominado así por "predio simulado", se diseñó para apoyar la cátedra de producción de carne. Se reconocía que en la gestión y administración de un predio, así como en cualquier industria, hay tres tipos de decisiones : estratégicas, tácticas y operacionales. Las decisiones estratégicas tienen que ver con los objetivos de la empresa y la planificación a largo y mediano plazo. Las decisiones tácticas tienen que ver con el uso eficiente y eficaz de los recursos disponibles, con un horizonte de mediano y corto plazo. Las decisiones operacionales son las relacionadas con el correcto y buen uso de la tecnología disponible en las labores cotidianas. Las decisiones incluidas en el modelo PRESIM son de tipo estratégico y táctico, característica común a casi todos los modelos de juegos gerenciales. Con leves matices, la mayoría se centra en decisiones estratégicas incorporando algunas de tipo táctico.

Los *modelos de simulación propiamente dichos* se dirigen fundamentalmente a la solución o estudio de un problema específico. Se observan dos variantes en esta clase de modelos, una dirigida hacia aspectos de investigación y otra hacia factores productivos, administrativos o financieros. Se denomina de investigación cuando hay predominio del estudio acerca del funcionamiento del sistema. En los otros casos, el modelo se diseña fundamentalmente para evaluar estrategias de operación del sistema. En la práctica, ambas características, estudio del funcionamiento y evaluación de estrategias de operación, se encuentran presentes en mayor o menor grado.

El *análisis de Monte Carlo* es una técnica de simulación para resolver problemas que tienen una base estocástica o probabilística. Existen también dos variantes o tipos de problemas donde es aplicable esta técnica. Primero, aquellos problemas que tienen procesos por naturaleza estocásticos, que pueden ser simulados con esta técnica y, segundo, problemas matemáticos completamente determinísticos, que no tienen fácil solución por métodos estrictamente determinísticos, y que pueden ser abordados con soluciones aproximadas, simulando procesos estocásticos con momentos, funciones de densidad o de distribución acumulativa que satisfagan las relaciones funcionales o los requisitos relativos a la solución del problema determinístico.

## **b. Estructura de los modelos de simulación**

Se entiende que un modelo es de simulación si presenta las características que se han asociado con simulación. Directamente relacionado con la estructura particular que presente tal modelo está el área desde donde se ha adoptado su nombre: el análisis de sistemas. Un modelo de simulación es la representación, utilizando la metodología del análisis de sistemas, de un objeto concepto o sistema de tal forma que, aún siendo distinto a la entidad que representa, puede homologar su funcionamiento y/o uno o varios atributos de ella.

Cuando se habla de análisis, se quiere denotar que se está haciendo una distinción y separación de las partes de un todo hasta llegar a conocer sus principios o sus elementos. Es decir, análisis lleva implícito el separar en partes un todo.

Por otro lado, cuando se habla de sistemas se quiere recalcar que un todo se ha dividido en partes, se han determinado las relaciones entre las partes y éstas se han vuelto a integrar con vista a un objetivo general. Es decir, para entender cabalmente un sistema se hace la diferencia entre colección (las partes de un todo), ensamble (las partes de un todo relacionadas) y sistema (un ensamble con un objetivo definido). Un sistema es entonces un conjunto o grupo de objetos o elementos unidos por alguna clase de interacción regular o interdependencia, para realizar una función específica. En consecuencia, se puede decir que un modelo de simulación es analítico, relativo al análisis, ya que procede por vía de análisis, y representa un sistema, ya que se divide y compone con miras a un objetivo específico.

En este marco general, provisto por la metodología del análisis de sistemas, se puede entonces, enumerar los elementos que conformarán la estructura de un modelo de simulación. Un modelo de simulación consiste en alguna combinación de los siguientes elementos:

- a. Componentes
- b. Variables
- c. Parámetros
- d. Relaciones funcionales
- e. Constricciones y restricciones
- f. Criterios de funcionamiento

Por *componentes* se entiende las partes que constituyen el todo y que, una vez reunidas de alguna forma regular, representan el sistema de interés. La forma de juntar componentes mediante relaciones regulares no es única y, por lo tanto, los mismos componentes relacionados de manera distinta, con otro fin específico, pueden conformar sistemas distintos. A su vez, la descomposición de un todo en componentes es recursiva: un componente puede a su vez ser descompuesto en elementos constituyentes formando también un sistema, o subsistema.

Una *variable* es la medida de un atributo de un componente. Generalmente estará en una función matemática, que le impondrá la forma de su variación relativa. Las variables pueden clasificarse en exógenas y endógenas.

Las variables exógenas son aquellas independientes del sistema, y se les denomina también variables de entrada. Puede considerarse que las variables exógenas actúan sobre el sistema, pero el sistema no actúa sobre ellas. Son entonces variables que se originan fuera del sistema.

Las variables endógenas son aquellas dependientes o generadas por el sistema. Las variables endógenas pueden recibir también el nombre de variables de estado, cuando indican algún estado particular de la misma variable, de un componente o del sistema. También pueden recibir el nombre de variables de salida, cuando salen del sistema o cuando explícitamente se les da dicha denominación con algún objetivo específico de control.

Los *parámetros* son valores de variable que se hacen constantes de acuerdo a un criterio u objetivo específico, o bien, pueden considerarse valores que el operador del modelo asigna en forma arbitraria.

Las *relaciones funcionales* son aquellas funciones matemáticas que juntan variables y parámetros de tal forma que pueden describir el funcionamiento dentro de un componente o entre componentes del sistema.

Las *constricciones* son las limitaciones que imponen los valores de las variables de tal forma que demarcan el límite del sistema. Las constricciones están generalmente impuestas por la naturaleza del sistema y características de los elementos del modelo.

Las *restricciones* son las limitaciones de operación que impone una variable, en un sólo sentido, sin afectar los límites del sistema. Una restricción puede ser impuesta por el propio diseñador del sistema o estar dada por la naturaleza de la variable.

El *criterio de funcionamiento* es una sentencia explícita de los objetivos o fines del sistema, además de la forma en que será evaluada la consecución de ellos.

### c. Etapas en la elaboración de un modelo de simulación

Los procesos involucrados en la vida útil de un modelo de simulación, desde su diseño hasta la experimentación y puesta en marcha de las conclusiones obtenidas, requieren del uso de técnicas de diferentes disciplinas como estadística, diseño experimental, análisis numérico, econometría y programación en computadoras. De hecho, la mayoría de los problemas inherentes al desarrollo y finalización del modelo de simulación, son propios de algunas de las disciplinas mencionadas. Esta característica global tiene como consecuencia práctica que el desarrollo del modelo corre el riesgo de dirigirse con predominancia hacia una

disciplina en particular, la que mejor domine el diseñador, en detrimento del equilibrio para la consecución del objetivo específico de desarrollo del modelo. El mismo riesgo está inherente en la aplicación del conocimiento al análisis del sistema, asociado en general a las ciencias básicas o los profesionales técnicos de ellas.

Las características mencionadas hacen adecuado el tener un esquema básico (Fig. 1) para el desarrollo de un modelo de simulación, de tal forma que denote explícitamente puntos de control. Si se asume que se modela las propiedades de un sistema real, se pueden distinguir las siguientes etapas:

- Definición de objetivos
- Análisis del sistema
- Síntesis del sistema
- Verificación
- Validación
- Experimentación
- Documentación

La *definición de objetivos* se refiere a tener una definición previa del propósito que persigue el estudio. El objetivo permitirá delinear algunos elementos como:

- los componentes que deberán formar parte del modelo
- límites del sistema a estudiar
- medidas de efectividad a usarse en la evaluación del modelo

El *análisis del sistema* comprende la tarea de entender las partes del sistema real y sus relaciones. En este pueden detectarse aquellos factores más relevantes que afectan al problema bajo estudio, y que influyen en el objetivo especificado.

La *síntesis del sistema* se refiere a la organización o abstracción de los componentes relevantes del sistema en un sistema lógico. Formarán parte de la síntesis, en mayor o menor medida, algunas de las siguientes actividades:

- elaboración de diagramas de flujo o algoritmos de los componentes del sistema
- declaración de hipótesis relativas al funcionamiento de componentes o del sistema
- identificación y preparación de los datos necesarios para el desarrollo del modelo, y su reducción a una forma apropiada
- especificación de la forma en que las variables y componentes del sistema se relacionan, expresado en forma cuantitativa
- transcripción del sistema lógico diseñado para el modelo a un lenguaje de programación, adecuado para el problema y computador que se usará

Para establecer la forma específica de las relaciones entre variables y componentes, quien elabora el modelo deberá recurrir a la información relevante, a resultados de investigación vinculada a los aspectos en

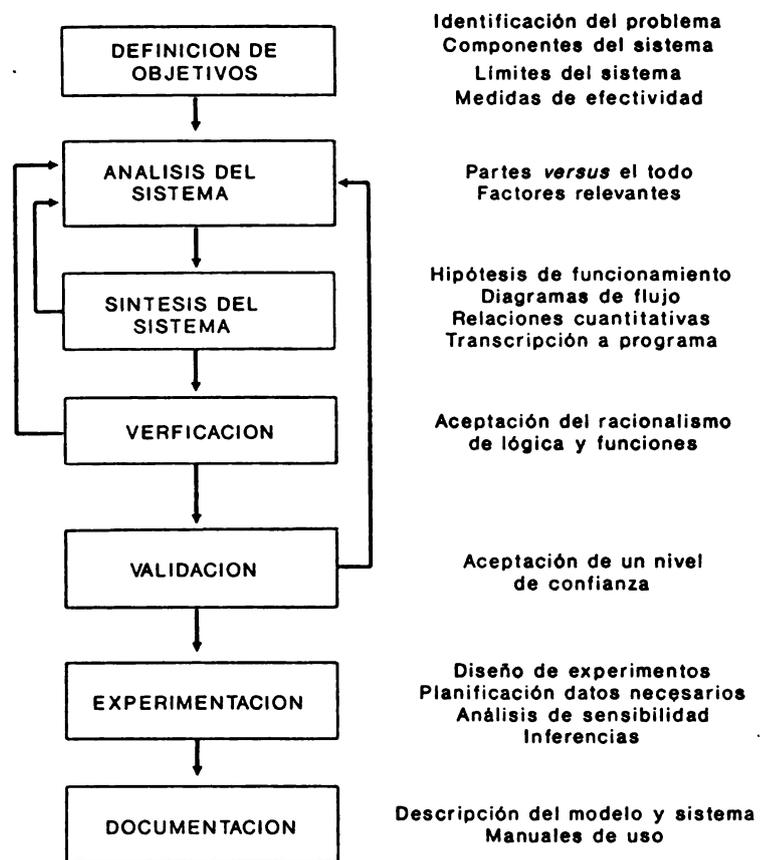


Fig. 1 Etapas en la elaboración de un modelo de simulación

estudio y a procedimientos estadísticos adecuados. El carácter representativo del modelo elaborado dependerá, en última instancia, de la medida en que se han incorporado las variables relevantes, de la validez de los supuestos realizados, de la correcta formulación lógica y matemática y estimación adecuada de parámetros.

La *verificación* es una etapa esencialmente racional, en que se da interpretación a las funciones matemáticas calculadas, de acuerdo al fenómeno real investigado. La aceptación de una función estará basada en el conocimiento y racionalismo que tiene sobre la materia el grupo que está haciendo la modelación además de los procedimientos estadísticos adecuados.

La *validación* es la aceptación, a través de procedimientos estadísticos adecuados, de un nivel aceptable de confianza (en concordancia con el objetivo inicial planteado) de tal modo que sean correctas las extrapolaciones al sistema real hechas desde las inferencias obtenidas con el modelo.

La *experimentación* es la ejecución del modelo de simulación para generar la información deseada. La etapa de experimentación comprende varias actividades:

- diseño y planificación de los experimentos que proporcionarán la información que se desea
- planeamiento táctico de la información y características necesarias para ejecutar el modelo con el diseño experimental apropiado
- análisis de sensibilidad, entendido como la cuantificación de la variación producida en los datos de salida frente a cambios en los datos de entrada o en los parámetros del modelo
- inferencias

La *documentación* se refiere a la constancia escrita de todas las etapas del proyecto, de tal modo que un usuario que no intervino en su desarrollo pueda entender, teniendo a la vista los objetivos del estudio, la lógica del modelo, validaciones e inferencias. Si el modelo se traspassa a otros grupos, debería contar con un manual de operación y uso, anexo a la información anterior.

#### d. Clasificación de los modelos de simulación

Si se toma en consideración lo que se entiende por simulación, las características estructurales del modelo que se necesita y las etapas más adecuadas para obtenerlo, es obvio que se ha restringido el dominio de lo que se entiende por simulación y modelos. Así, simulación es ahora el diseño de un modelo matemático o lógico de un sistema real, con el objeto de realizar experimentación (hecha generalmente en un computador) con dicho modelo, para estudiar, explicar y predecir el funcionamiento del sistema real.

Esta idea, más precisa de lo que se podría llamar análisis de simulación, sugiere algunos aspectos que se deben tener en consideración:

- a. Se requiere desarrollar en forma explícita un modelo matemático o lógico del sistema real
- b. Tal modelo debe ser, de acuerdo a los objetivos planteados, una adecuada representación del sistema real bajo estudio
- c. Debe ser posible representar el modelo lógico o matemático en un programa computacional, de tal forma que se pueda realizar la verificación, validación y experimentación deseada en forma eficaz y eficiente.

De especial importancia es el hecho de que es necesario diseñar un modelo lógico o matemático, en cuyo proceso se deben elegir las variables más adecuadas de los componentes así como la estructura del modelo. El clasificar los modelos de simulación ayuda a recalcar dichas características, en especial si dicha clasificación se hace en torno a propiedades de las variables o estructura del modelo. Se han realizado, de este modo, algunas

clasificaciones dicotómicas (Naylor 1973; Hoover 1989), que sirven adecuadamente a este propósito, donde los modelos de simulación pueden clasificarse como:

- . discretos o continuos
- . probabilísticos o determinísticos
- . estáticos o dinámicos
- . con o sin realimentación

Si se hace la clasificación de modelos *discretos o continuos*, ello se refiere al tipo de variable que se usa en el modelo. Una variable continua es aquella que puede tomar como valor cualquier número real. En cambio, una variable discreta es aquella que está limitada a sólo algunos valores especificados.

Sin embargo, en los modelos de simulación se reserva esta dicotomía para los cambios de los valores de las variables del modelo en relación a la variable tiempo que se utiliza. De este modo, si las alteraciones en los valores de las funciones ocurren en forma continua, a una tasa constante, a medida que el tiempo varía, se clasifica el modelo como continuo. Por otro lado, si los cambios ocurren en puntos discretos del tiempo, el modelo se dice que es discreto.

Debe notarse que un modelo llamado continuo puede tratar el tiempo en forma discreta. Por ejemplo, un modelo con avance de tiempo de períodos fijos de un día, con cambios de los valores de las variables todos los días, se clasifica como modelo continuo. Esta estructura de avance de tiempo, con un modelo que se llamará continuo, es muy utilizada en los modelos de simulación de producción animal, debido fundamentalmente al tipo de información disponible y a como se ha desarrollado el conocimiento en el área, tomando como base períodos de un día.

Cuando se diferencia entre modelos *probabilísticos y determinísticos* también se está haciendo referencia a las variables del modelo. De este modo, si cualquiera de las variables del modelo es aleatoria, se clasifica el modelo como probabilístico. Un ejemplo de modelo de simulación en producción animal, clasificado como probabilístico, es un modelo para el estudio de producción de carne y fibra de alpacas, donde la variable consumo se describe con una adecuada función de probabilidad (Arce 1989).

En cambio, si las variables matemáticas del modelo, cuyos valores se determinan con certeza absoluta, son suficientes para representar el funcionamiento del sistema, se está frente a un modelo que se clasifica como determinístico. Ejemplo de un modelo de esta naturaleza es el modelo desarrollado por Silva (1983), donde en un estado de régimen de un predio dedicado a producción ovina, se estudió la respuesta de producción de ovejas de cría frente a diferentes esquemas de manejo de animales y sistemas de pastoreo.

También en referencia a las variables del modelo, se encuentra la dicotomía estático-dinámico. Se dice que un modelo es *dinámico* si los valores de sus variables cambian con el tiempo. Se acostumbra también decir que un modelo es dinámico si tiene incorporada la variable tiempo en su estructura, lo cual presupone que debe estar relacionada con otras variables y, por ende, estas varían en función del tiempo. Por otro lado, un modelo será *estático* si los valores de sus variables no cambian con el tiempo.

El concepto de realimentación en un modelo está determinado por su estructura más que por características de sus variables. Un modelo *sin realimentación* es aquel que no tiene previsto que un valor de salida del modelo vuelva como valor de entrada, modificando de dicha forma las futuras salidas. En cambio, un modelo *con realimentación* tiene previsto poner el valor de salida como nueva entrada, comparando algún nivel u objetivo, de modo que altere el sistema para mantenerlo en un rango deseado o aproximarlos a un valor determinado.

Un ejemplo típico de modelo de simulación con realimentación, en producción animal, es un modelo de producción de carne a pastoreo, donde los cambios de potrero se realizan automáticamente para mantener un nivel de rezago, buscando el potrero al cual se cambia con algún criterio preestablecido (Durán 1983; Sampedro 1989).

### 3. GENERACIÓN DE VALORES DE VARIABLE ESTOCÁSTICA EN MODELOS DE SIMULACIÓN

#### a. Introducción

Se ha mencionado que puede hacerse una diferencia entre modelos probabilísticos y determinísticos, haciendo referencia al tipo de variable del modelo. Así, si cualquiera de las variables del modelo es estocástica, se clasifica el modelo como probabilístico. En contraposición, si las variables matemáticas del modelo, cuyos valores se determinan con certeza absoluta, son suficientes para representar el funcionamiento del sistema modelado, se está frente a un modelo clasificado como determinístico.

Por lo tanto, un modelo determinístico está formado exclusivamente por variables determinísticas. En un modelo, una variable es la medida de un atributo de un componente y, generalmente, dicho atributo es una actividad o proceso del componente. Se dice que una actividad o proceso es determinístico cuando su salida puede ser descrita con certeza y completamente en términos de su entrada. En cambio, cuando la salida de una actividad o proceso es probabilístico, se está frente a una actividad o proceso de naturaleza estocástica, que puede ser representado con una variable de la misma naturaleza.

En términos formales, se define un proceso estocástico como la formación de un conjunto ordenado de variables aleatorias, en que el orden del conjunto está usualmente dado respecto al tiempo (Gordon 1978). En los modelos de simulación, las actividades o procesos estocásticos dan origen a variables estocásticas, que se representan con una secuencia de números aleatorios que ocurren en el tiempo.

Un proceso estocástico se define, entonces, como un conjunto  $\{x(t), t \in T\}$  de variables aleatorias donde el símbolo  $\in$  puede leerse como "pertenece a" o bien, "varía en".

El conjunto  $T$  recibe el nombre de conjunto índice del proceso, sin ninguna restricción a su naturaleza o pertenencia. Sin embargo, se reconocen dos casos importantes (Parzen 1972):

1) cuando  $T$  está formado por alguno de los dos siguientes conjuntos:

$$T = \{ 0, 1, 2, \dots \} \text{ ó}$$

$$T = \{ 0, 1, 2, \dots \}$$

se dice que el proceso estocástico es un proceso de parámetro discreto.

2) cuando  $T$  está formado por alguno de los dos siguientes conjuntos:

$$T = \{ t : -\infty < t < \infty \} \text{ ó}$$

$$T = \{ t : t \geq 0 \}$$

se dice que el proceso estocástico es un proceso de parámetro continuo.

Los métodos que existen para generar valores de variables estocásticas en un computador, permiten resolver dos tipos de problemas divergentes: determinísticos (es decir, no probabilísticos) y estocásticos.

Algunos de los problemas determinísticos que típicamente se resuelven con simulación estocástica son la evaluación de integrales múltiples, la solución de ecuaciones de diferencias de orden superior y problemas complejos relacionados con fenómenos de espera. A pesar de que existen métodos analíticos para resolverlos, en algunos casos las soluciones no son fáciles de obtener, o los métodos de simulación son más eficientes, por lo cual se usa en ellos la simulación estocástica. Sin embargo, las soluciones que se obtienen con la simulación estocástica no aportan más ventajas que alguna de las dos anotadas (obtención más fácil de una solución o mayor eficiencia en el cálculo); consecuentemente, para los casos de problemas determinísticos, la simulación estocástica es una técnica de análisis numérico que se puede preferir frente a otros métodos de resolución numérica por una mejor eficiencia o facilidad de uso.

Los problemas estocásticos que se resuelven con simulación estocástica, son generalmente, aquellos en que se requiere algún método de muestreo estocástico, pero la toma de una muestra resulta imposible o económicamente impracticable. En tales casos, debe disponerse de algún conocimiento respecto a la población en la que se originan los datos estadísticos, de modo que pueda construirse un modelo probabilístico del proceso bajo estudio.

Son ejemplos de problemas estocásticos, en producción agrícola, los muestreos estocásticos para determinar consumo de un hato en pastoreo, la determinación de tasas de preñez y tasas de parto de un hato bajo estudio, la determinación de días de lluvias y agua caída, determinación de temperaturas máximas y mínimas diarias, determinación de velocidad de viento y otros. La característica de este muestreo estocástico con simulación es que requiere de la construcción de un modelo probabilístico del proceso que se estudia. En cambio, el experimento con muestreo en el sentido clásico opera, en general, directamente sobre los datos.

Para generar estadísticas simuladas, es decir, valores de las variables aleatorias, se emplean métodos numéricos basados en la generación de números aleatorios, números que a veces reciben el nombre de pseudoaleatorios, por la naturaleza de los procesos con que son generados. El proceso de simulación estocástica consiste en el reemplazo del universo estadístico de elementos que se emplean en el sistema por su contraparte teórica, es decir, un universo descrito por una distribución probabilística supuesta, seguido de un muestreo efectuado sobre dicha población teórica, con la ayuda de algún generador de números aleatorios.

Existen muchos casos en que es difícil encontrar una distribución teórica convencional (como sería una distribución exponencial, uniforme o normal) para describir adecuadamente un proceso estocástico en particular, o alguno de los componentes de tal proceso. Si ese es el caso, se puede simular mediante un muestreo aplicado sobre las distribuciones empíricas, en vez de postular alguna de las distribuciones teóricas conocidas. El uso de una distribución empírica presupone que se dispone de datos empíricos. A pesar de esto, es aconsejable comenzar tratando de describir los procesos estocásticos mediante las distribuciones teóricas convencionales. Si ninguna de ellas puede describir adecuadamente el comportamiento del proceso, entonces se recurre a las distribuciones empíricas.

## **b. Generación de números aleatorios**

El prerequisite para poder generar valores de variable estocástica es la generación de números aleatorios y, en forma más precisa, números aleatorios uniformemente distribuidos, generalmente con distribución uniforme entre cero y uno. De este modo, sólo una vez que se han podido generar números aleatorios con distribución uniforme, se está en condiciones de realizar un muestreo estocástico de simulación, es decir, generar valores de variable estocástica. De aquí la importancia de contar con una adecuada generación de números aleatorios con distribución uniforme.

La mayoría de los lenguajes, tanto específicos de simulación como de propósitos generales, proveen una función que genera números aleatorios con distribución uniforme. Sin embargo, es conveniente tener una idea global de la forma en que se pueden generar, así como de los controles y pruebas que deben pasar, de modo que el generador que se use sea estadísticamente adecuado.

Existen dos métodos generales de generación de números aleatorios:

- Métodos físicos
- Métodos aritméticos

Los métodos físicos son aquellos gobernados por leyes de cambio físico (métodos de computación analógica, decaimiento de materiales radiactivos, ruido térmico en un circuito de válvulas electrónicas, etc.). Por ejemplo, el comportamiento de una corriente eléctrica, que es un proceso físico aleatorio, es utilizado por computadoras analógicas para producir números aleatorios (Rand Corporation 1955). Se considera que tales métodos de computación analógica generan verdaderos números aleatorios. Sin embargo, comparten el impedimento común a todos los métodos manuales de generación de números aleatorios: son sucesiones de números aleatorios no reproducibles.

Los métodos aritméticos se basan en algún algoritmo matemático. Los números aleatorios generados con estos métodos reciben el nombre de números pseudoaleatorios. Tal apelativo obedece a que se genera una sucesión (supuestamente aleatoria) de dígitos, mediante una regla puramente determinística, lo cual es la antítesis directa de lo que podría llamarse una sucesión aleatoria. Sin embargo, ello se supera, en alguna medida, si se considera que una sucesión de dígitos es aleatoria si satisface un cierto conjunto de pruebas estadísticas de aleatoriedad, previamente determinadas. Visto de este modo, el método utilizado para generar sucesiones de números aleatorios se independiza del resultado obtenido.

El primer método aritmético utilizado para generar números pseudoaleatorios en computador fue el de los cuadrados centrales, propuesto por Von Neumann y Metropolis en 1946 (Von Neumann 1951). En el método de los cuadrados centrales se obtiene cada número de la sucesión tomando los dígitos centrales del cuadrado del número precedente. En la actualidad se utilizan métodos de congruencia, que han resultado más eficientes en el cálculo y estadísticamente más satisfactorios. Los primeros métodos de congruencia los propuso Lehmer (1951), surgiendo posteriormente muchas variantes de ellos. Los algoritmos de los métodos de congruencia son de gran simpleza de cálculo y consisten sólo de una operación de multiplicación y, opcionalmente, de operaciones de suma o división.

En forma práctica, el método que se utilice para generar números aleatorios, en modelos probabilísticos de simulación, debería tener las siguientes propiedades (Hoover y Perry 1989):

- ser estadísticamente equivalente a un muestreo con una población de distribución uniforme;
- ser capaz de generar una secuencia de números aleatorios que pueda reproducirse;
- ser computacionalmente eficiente.

Se desea que los números aleatorios generados exhiban al menos las mismas propiedades estadísticas que los números aleatorios reales. Estas propiedades son dos: independencia de cada número de la serie con los otros y completa uniformidad a través del intervalo (0,1). Existe una serie de pruebas estadísticas para determinar si estas propiedades están presentes (Naylor *et al.* 1973; Shannon 1975; Gordon 1978).

La propiedad de que la serie de números aleatorios sea reproducible se transforma en una poderosa ayuda en la fase de experimentación con el modelo. Así por ejemplo, si se desea evaluar el efecto del cambio de una variable de decisión del modelo, se puede hacer una serie de corridas del modelo con diferentes valores de la variable que se estudia, usando la misma serie de números aleatorios. De tal forma, se estará completamente

seguro de que las mediciones de cambios en el sistema se deben a los cambios hechos en la variable de decisión y no podrían atribuirse a los cambios probabilísticos de las variables estocásticas consideradas en el modelo.

Por último, es importante que el generador de números aleatorios tenga una alta eficiencia computacional debido a la gran cantidad de dichos números que deben generarse cuando se experimenta con el modelo de simulación. En este punto, los métodos físicos de generación de números aleatorios no son adecuados por su lentitud y dificultad para operar simultáneamente con el computador, además de no poder cumplir la propiedad anterior de ser reproducibles.

(1) *Números aleatorios con distribución uniforme.* Los números aleatorios que se generan se consideran verdaderos números aleatorios si son variables aleatorias con función de densidad de probabilidad de la forma:

$$\begin{aligned} f(x) &= 1 && \text{con } 0 \leq x \leq 1 \\ f(x) &= 0 && \text{en caso contrario} \end{aligned} \quad [1]$$

Si se genera una muestra de  $n$  números aleatorios,  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , cada  $x_i$  debe ser independiente de los otros números de la muestra. Esta propiedad y el alcance de uniformidad a través del intervalo  $(0,1)$  son las propiedades estadísticas que debe cumplir la muestra.

Pueden hacerse algunos análisis simples para verificar el funcionamiento de un generador de números aleatorios, tomando en cuenta algunas características que los  $x_i$  generados deben presentar. Si su distribución está de acuerdo a la función de densidad de probabilidad antes descrita, entonces el valor esperado y la variancia son:

$$E(x) = \frac{1}{2} \quad [2]$$

$$Var(x) = \frac{1}{12} \quad [3]$$

Además, si  $x_i$  y  $x_{i+1}$  son independientes, el valor esperado del factor de autocorrelación  $(x_i, x_{i+1})$  está dado por:

$$\begin{aligned} E_{x_i, x_{i+1}} &= E_{x_i} E_{x_{i+1}} \\ &= \frac{1}{4} \end{aligned} \quad [4]$$

Los valores teóricos descritos pueden ponerse en forma tal que pueda hacerse una declaración de hipótesis nula y alternativa. De este modo, si se genera una muestra grande de números aleatorios, las estimaciones de media, variancia y factor de autocorrelación obtenidos pueden compararse con los valores teóricos.

(2) *Método de congruencia lineal.* El método de congruencia lineal usa la siguiente fórmula recursiva:

$$n_{i+1} = An_i + C \quad \text{módulo } M \quad [5]$$

donde  $n_i$ ,  $A$ ,  $C$  y  $M$  son enteros no negativos. Una vez que  $n_{i+1}$  se ha generado, puede normalizarse sobre el intervalo  $(0,1)$  utilizando:

$$U_{i+1} = \frac{n_{i+1}}{M} \quad [6]$$

En general, los métodos de congruencia han demostrado ser capaces de producir secuencias de números aleatorios satisfactorios (presentan características estadísticas de verdaderos números aleatorios) si se eligen en forma adecuada los coeficientes A y C.

Puede demostrarse, si se desarrolla la ecuación recursiva del método de congruencia lineal para  $i = 0, 1, 2, \dots$  que:

$$n_i = A^i n_0 + \frac{C(A^i - 1)}{A - 1} \quad \text{módulo } M \quad [7]$$

De dicha ecuación puede concluirse que cuando  $n_i$  sea igual a  $n_0$  la secuencia de números aleatorios comenzará a repetirse. La longitud de esta secuencia recibe el nombre de período y teóricamente la longitud máxima está dada por M. A pesar de que pueden darse restricciones a los valores de C y M (Hoover y Perry 1989) para obtener un período máximo, ello no asegura que los números generados serán estadísticamente aleatorios. Por ello, no existe una recomendación general para la mejor selección de A, M y C, y existen en la actualidad una gran variedad de generadores de números aleatorios de método de congruencia lineal, que difieren en los valores de dichos parámetros.

(3) *Prueba de aleatoridad.* Existen varias pruebas para verificar aleatoridad o independencia entre números de una serie (Naylor *et al.* 1973; Shannon 1975). Sin embargo, una prueba de cálculo y uso relativamente fáciles es el Test de Correlación de Serie. El coeficiente de correlación de serie está definido por:

$$C = \frac{[\sum_{i=1}^{n-1} x_i x_{i+1} - (\sum_{i=1}^n x_i)^2]}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \quad [8]$$

Si las variables aleatorias generadas son independientes, el valor esperado de su coeficiente de correlación será cero. Sin embargo, se debe notar que en el caso de los métodos de congruencia, los términos adyacentes de la serie generada no se han definido en forma independiente, ya que en dos productos sucesivos, como son  $x_i x_{i+1}$  y  $x_{i+1} x_{i+2}$ , existe un término común.

Puede demostrarse que, si en un conjunto de variación normal existe independencia de serie, entonces:

$$E(C) = \frac{-1}{(n-1)} \quad [9]$$

$$\sigma^2(C) = \frac{\sqrt{\frac{n(n-3)}{(n+1)}}}{n-1} \quad [10]$$

donde:

C = coeficiente de correlación de serie

Para números aleatorios con distribución uniforme la anterior aproximación es apropiada si n es un número suficientemente grande (Knuth 1968).

(4) *Prueba de uniformidad.* Cuando los números aleatorios que se utilizan están generados por métodos de congruencia lineal, la longitud del período de estos generadores es muy grande y, por lo tanto, en la práctica sólo se está usando una porción muy pequeña del ciclo en la simulación. De ahí la importancia de verificar, con series más pequeñas, si los números aleatorios generados se distribuyen uniformemente a través del intervalo (0,1).

Las pruebas de uniformidad más comunes son la prueba de bondad de ajuste de Chi- cuadrado y la prueba de Kolmogorov Smirnov.

La prueba de Chi- cuadrado requiere dividir el intervalo unitario (0,1) en k subintervalos iguales de ancho igual 1/k. El ancho de cada intervalo debe ser tal que se cumpla  $n/k > 5$ , donde n es la longitud de la secuencia de números aleatorios que se desea verificar. El estadígrafo que se utiliza es:

$$\chi^2(gl = k - 1) = \frac{\sum_{i=1}^k (o_i - \frac{n}{k})^2}{\frac{n}{k}} \quad [11]$$

donde:

- $o_i$  = cantidad de números aleatorios en el intervalo i
- $gl$  = grados de libertad

Cuando los grados de libertad exceden a 100, se acostumbra a aproximar  $\chi^2$  con la distribución normal, utilizando:

$$\chi^2(1 - \alpha, gl) = gl + Z(1 - \alpha) \sqrt{2 gl} \quad [12]$$

### c. Métodos de generación de variables estocásticas

Para estudiar los procesos estocásticos que involucren variables de tipo aleatorio, ya sean continuas o discretas, se define una función F(x) llamada función de distribución acumulativa de x. Esta función denota la probabilidad de que una variable aleatoria X tome un valor menor o igual a x.

Si la variable aleatoria considerada es discreta, entonces x sólo tomará un conjunto de valores específicos y F(x) será una función escalonada.

En cambio, si la variable aleatoria es continua, entonces F(x) es también continua en el dominio de x. En este caso F(x) se puede diferenciar, lo que da lugar a:

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx} \quad [13]$$

La derivada f(x) recibe el nombre de función de densidad de probabilidad.

En el caso de una variable aleatoria continua, la función de distribución acumulativa se puede expresar de la forma:

$$F(x) = P(X \leq x) = \int_{-\infty}^x f(t) dt \quad [14]$$

donde  $F(x)$  se encuentra definida en el intervalo  $0 \leq F(x) \leq 1$ ,  $f(t)$  representa el valor de la función de densidad de probabilidad de la variable aleatoria  $X$ , cuando  $x = t$ .

Con base en las propiedades matemáticas de la función de distribución acumulativa y de la función de densidad de probabilidad, y asumiendo que se está en condiciones de generar números aleatorios, se puede abordar el problema de generar muestreos aleatorios de alguna distribución de probabilidad cualquiera, para un modelo de simulación.

Existen cuatro métodos para generar valores de variable aleatoria a partir de alguna distribución de probabilidad. Estos métodos son:

- Método de la inversa
- Método del rechazo
- Método de la composición
- Método de las convoluciones

En el presente documento se usa la convención de denotar con letras mayúsculas las variables estocásticas y con minúscula los valores de las variables estocásticas. Se denota también con  $r$  a los valores de variables aleatorias con distribución uniforme, con  $0 \leq r \leq 1$  y  $F(r) = r$ .

(1) *Método de la inversa.* Si se desea generar los valores  $x_i$  de las variables aleatorias a partir de cierta estadística de población cuya función de distribución acumulativa sea  $F(x)$ , se puede realizar el siguiente proceso:

- generar números aleatorios distribuidos uniformemente en el intervalo  $(0,1)$ ; es decir,  $0 \leq r \leq 1$
- dado que  $F(x)$  se define también en el intervalo  $(0,1)$ , es decir  $0 \leq F(x) \leq 1$ , se iguala

$$F(x) = r \quad [15]$$

- dicha relación determina a  $x$  en forma unívoca, y si la función inversa de  $F$  es conocida, se puede encontrar el valor de  $x$  mediante

$$x = F^{-1}(r) \quad [16]$$

donde  $F^{-1}(r)$  indica la transformación inversa desde  $r$  en el intervalo unitario al dominio de  $x$ .

El valor correspondiente de  $x$  se toma como el valor de la variable aleatoria. Indudablemente, la utilidad de este método descansa en la facilidad con que pueda expresarse la función inversa  $F^{-1}(r)$ .

*Ejemplo:*

Se desea generar valores de variable aleatoria con una función de densidad de probabilidad definida por:

$$f(x) = 2x, \quad 0 \leq x \leq 1$$

Para esta función de densidad de probabilidad, la función de distribución acumulativa está dada por:

$$F(X) = \int_0^x 2t \, dt = x^2, \quad 0 \leq x \leq 1$$

Al aplicar el método, la función inversa estará dada por:

$$x = F^{-1}(r)$$

$$x = \sqrt{r}$$

De donde, al generar un número aleatorio con distribución uniforme (0,1) se obtiene, aplicando la última relación, el valor de variable aleatoria  $x$ .

(2) *Método del rechazo*. El método del rechazo recibe también el nombre de método de aceptación-rechazo. Fue propuesto por Von Neumann (1951) y consiste en un simple algoritmo de donde se extrae una muestra de una función de densidad de probabilidad  $h(x)$ , y  $x$  es aceptado o rechazado como muestra de  $f(x)$ , basado en un segundo muestreo de una función de distribución uniforme (0,1).

Para aplicar este método, se deben seguir los siguientes pasos:

- Normalizar el rango de  $f$  mediante un factor de escala  $c$ , de tal forma que

$$c f(x) \leq 1, \quad a < x < b \quad [17]$$

- Definir  $x$  como una función lineal de  $r$ , es decir:

$$h(x): \quad x = a + (b - a) r \quad [18]$$

- Generar parejas de números aleatorios con distribución uniforme (0,1); por ejemplo:

$$r_1, r_2$$

- Cuando se encuentre una pareja de números aleatorios que satisfaga

$$r_2 \leq c f[a + (b-a) r_1] \quad [19]$$

dicho par será aceptado y se utilizará:

$$x = a + (b-a) r_1 \quad [20]$$

como el valor generado de variable aleatoria.

Se ha demostrado que la esperanza matemática del número de intentos que se realicen antes de encontrar una pareja de números aleatorios que sea aceptada, es igual a  $E = 1/C$  (Tocher 1963). Puede deducirse que habrá algunas funciones de densidad de probabilidad para las cuales este procedimiento puede resultar lento.

Este método se basa en el hecho de que la probabilidad de que  $r$  sea menor o igual a  $c f(x)$  es:

$$P(r \leq c f(x)) = c f(x) \quad [21]$$

Por lo tanto, si se elige al azar dentro del rango  $(a,b)$ , de acuerdo a  $x = a+(b-a)r$ , la función de densidad de probabilidad de los valores de  $x$  aceptados deberá ser igual a  $f(x)$ .

*Ejemplo:*

Supóngase que se desean generar valores de variable aleatoria, con el método del rechazo, con una función de densidad de probabilidad definida con:

$$f(x) = 2x, \quad 0 \leq x \leq 1$$

Se tiene que:

$$\frac{1}{2} f(x) \leq 1, \quad 0 \leq x \leq 1$$

Además, como  $x$  ha sido definida en el intervalo  $(0,1)$  se tiene que:

$$x = r$$

Si se genera una pareja de números aleatorios con distribución uniforme,  $r_1$  y  $r_2$ , se tendrá que:

- si  $r_2 > r_1$  se rechaza la pareja, y se debe volver a generar otro par de números aleatorios.
- si  $r_2 \leq r_1$  se acepta  $r_1$  tomándolo como un valor  $x$  de la función de densidad de probabilidad  $f(x)$ .

(3) *Método de la composición.* El método de la composición, llamado también método de mezclas, puede utilizarse cuando la función de densidad de probabilidad  $f(x)$  puede descomponerse como la suma de  $k$  distribuciones de probabilidad, de la forma:

$$f(x) = P_1 f_1(x) + P_2 f_2(x) + \dots + P_k f_k(x) \quad [22]$$

Este método funciona generando un número aleatorio  $r$ , que es usado para seleccionar alguna de las  $k$  funciones de densidad de probabilidad sobre la cual se hará un muestreo, utilizando algún método como el de la inversa o del rechazo.

El método está basado en el siguiente hecho: si se define una variable binaria  $U(i,j)$  de tal modo que:

$$U(i,j) = 1 \quad [23]$$

si la distribución  $i$  es seleccionada en el muestreo  $j$ ; en caso contrario,  $U(i,j) = 0$

entonces:

$$P(X \leq x) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^k U(i,j) P(X_i < x)}{n} \quad [24]$$

$$P(X \leq x) = \sum_{i=1}^k P_i F(x_i) \quad [25]$$

(4) *Método de las convoluciones.* El método de las convoluciones se usa cuando la variable aleatoria  $x$  puede expresarse exacta o aproximadamente como la suma lineal de otras variables aleatorias. Ello se expresa de la forma:

$$x = b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_k x_k \quad [26]$$

Para aplicar el método se deben generar  $k$  números aleatorios independientes, que son usados para generar los  $k$  valores de cada una de las variables aleatorias que conforman  $x$ , utilizando algunos de los métodos vistos anteriormente.

Existen varias distribuciones conocidas de probabilidad, como son la normal, binomial, Poisson, Gamma, Erlang y Chi-cuadrado, que pueden expresarse exacta o aproximadamente como la suma lineal de otras variables aleatorias.

*Ejemplo:*

Se desea generar valores de variable aleatoria, utilizando el método de la composición, desde una distribución triangular con función de densidad de probabilidad definida con:

$$\begin{aligned} f(x) &= x, & 0 \leq x \leq 1 \\ f(x) &= 2-x, & 1 \leq x \leq 2 \\ f(x) &= 0, & \text{en otro caso} \end{aligned}$$

Para utilizar el método de la composición se expresa  $f(x)$  como suma de dos distribuciones, mediante la expresión:

$$f(x) = 0.5 g(x) + 0.5 h(x)$$

donde:

$$g(x) = 2x, \quad 0 \leq x \leq 1$$

$$h(x) = 4 - 2x, \quad 1 \leq x \leq 2$$

Las funciones de distribución acumulativa de estas dos distribuciones son:

$$G(x) = x^2, \quad 0 \leq x \leq 1$$

$$H(x) = 4x - x^2 - 3, \quad 1 \leq x \leq 2$$

Las funciones inversas están dadas por:

$$G^{-1}(r) = \sqrt{r}$$

$$H^{-1}(r) = 2 - \sqrt{4 - r}$$

Para muestrear sobre  $f(x)$  se debe generar dos números aleatorios ( $k = 2$ ) con distribución uniforme. Si estos números son  $r_1$  y  $r_2$ , entonces se tendrá que:

- si  $r_1 \leq 0.5$  se debe muestrear desde  $g(x)$  y el valor de  $x$  estará dado por:

$$x = \sqrt{r_2}$$

- si  $r_1 > 0.5$  se debe muestrear desde  $h(x)$  y el valor de  $x$  estará dado por:

$$x = 2 - \sqrt{1 - r_2}$$

#### d. Distribuciones continuas de probabilidad

(1) *La distribución normal.* La distribución normal es la más importante distribución de probabilidad, dada su importancia teórica y el gran uso que se hace de ella para representar procesos estocásticos. Cuenta además con una infinidad de métodos sugeridos para generar valores de variable aleatoria con esta distribución.

El uso de la distribución normal en una gran cantidad de procesos estocásticos se basa en la aplicación del teorema del límite central. Dicho teorema postula que la distribución de probabilidad de la suma de  $N$  valores de variable aleatoria  $x_i$  independientes, pero idénticamente distribuidos, con medias  $\mu_i$  y varianzas  $\sigma_i^2$ , se aproxima asintóticamente a una distribución normal, a medida que  $N$  se hace muy grande. Dicha distribución tendrá:

$$\text{media } \mu = \sum \mu_i \quad [27]$$

$$\text{varianza } \sigma^2 = \sum \sigma_i^2 \quad [28]$$

La aplicación del teorema del límite central permite el empleo de distribuciones normales para representar medidas globales tomadas sobre los efectos de causas aditivas distribuidas en forma independiente, sin importar la distribución de probabilidad de las mediciones de cada efecto. Específicamente, en problemas de producción animal, el teorema del límite central se aplica en mediciones globales como el consumo y la selectividad en una pradera (Catrileo 1981; Arce 1989), que presentan tales características.

Los algoritmos desarrollados generan un valor de variable aleatoria  $x(0)$  de una distribución normal estándar ( $\mu=0, \sigma=1$ ) que luego se escala a una normal cualquiera, de media  $u$  y varianza  $t$ , usando:

$$x = u + t_{x(0)} \quad [29]$$

Un método muy difundido, por su facilidad de cálculo, se obtiene expresando la distribución acumulativa en coordenadas polares. Fue originalmente planteado por Box y Muller (Box y Muller 1958; Muller 1959) utilizando el método de la inversa. El algoritmo es muy simple:

- se generan dos valores de variable aleatoria independientes, con distribución uniforme, definidos en el intervalo (0,1):  $r_1$  y  $r_2$
- los valores de:

$$x_1 = \sqrt{-2 \ln r_1} \cos 2 \pi r_2 \quad [30]$$

$$x_2 = \sqrt{-2 \ln r_1} \operatorname{sen} 2 \pi r_2 \quad [31]$$

donde:

$\ln$  = logaritmo natural

son dos valores de variable aleatoria obtenidos a partir de una distribución normal.

El procedimiento tiene una leve mejora en exactitud utilizando el siguiente algoritmo (Marsaglia y Bray 1964):

- se generan dos números aleatorios con distribución uniforme en el intervalo (0,1):  $r_1$  y  $r_2$
- se calculan las variables

$$v = 2 r_1 - 1 \quad [32]$$

$$w = 2 r_2 - 1 \quad [33]$$

- si  $v^2 + w^2 < 1$  [34]

entonces:

$$x_1 = \frac{-2 \ln(v^2 + w^2)}{v^2 + w^2} r_1 \quad [35]$$

$$x_2 = \frac{-2 \ln(v^2 + w^2)}{v^2 + w^2} r_2 \quad [36]$$

son dos valores de variable aleatoria obtenidos de una distribución normal.

- si  $v_1 + w_2 \geq 1$ , se debe volver al primer paso.

Un procedimiento clásico, utilizando el método de las convoluciones, usa el siguiente algoritmo:

- se generan  $k$  valores de variable aleatoria con distribución uniforme en el rango (0,1), y se suman:

$$\Sigma r_i$$

- el valor de variable aleatoria con distribución normal se genera con:

$$x = \sigma_x \sqrt{\frac{12}{k}} \left( \sum r_i - \frac{k}{2} \right) + \mu_x \quad [37]$$

donde:

$\sigma_x$  es la varianza de la distribución normal a muestrear

$\mu_x$  es la media de la distribución normal a muestrear

Dada la convergencia asintótica que implica el teorema del límite central, es deseable que  $k$  sea un número muy grande. Sin embargo, con  $k=12$  se logra una ventaja de cálculo, ya que se evita una multiplicación constante. Pero tal valor de  $k$  trunca la distribución a  $+6$  en los extremos. Se recomienda, para mejorar la precisión, usar valores mayores de  $k$ , como  $k=24$ , y en ningún caso menores a 10.

A pesar de las dificultades anotadas, el algoritmo tiene una rapidez razonable en un programa de simulación.

(2) *La distribución uniforme.* La distribución uniforme se usa para describir procesos estocásticos caracterizados por tener una probabilidad de ocurrencia constante e igual en un intervalo  $(a,b)$ , e igual a cero fuera de dicho intervalo. La función de densidad de probabilidad está dada por:

$$f(x) = \frac{1}{(b-a)}, \quad a < x < b \quad [38]$$

$$f(x) = 0, \quad \text{fuera del intervalo } (a,b)$$

El valor esperado y la varianza de una variable aleatoria uniformemente distribuída están dados por:

$$EX = \frac{(b+a)}{2} \quad [39]$$

$$VX = \frac{(b-a)^2}{12} \quad [40]$$

y su función de distribución acumulativa,  $F(x)$ , está determinada por:

$$F(x) = \frac{(x-a)}{(b-a)} \quad 0 \leq F(x) \leq 1 \quad [41]$$

El método de la transformación inversa es el método más simple y más corrientemente utilizado para simular valores de variable aleatoria sobre un intervalo conocido  $(a,b)$ . Aplicando dicho método se tiene que:

$$F(x) = r$$

de donde:

$$x = a + (b-a)r \quad 0 \leq r \leq 1 \quad [42]$$

Cada número aleatorio  $r$  determina, de manera única, un valor de la variable aleatoria  $x$ , distribuída uniformemente en el intervalo  $(a,b)$ .

Por lo tanto, el procedimiento para generar valores de variable aleatoria con distribución uniforme en el intervalo  $(a,b)$  es directo y simple:

- se genera un número aleatorio  $r$  con distribución uniforme en  $(0,1)$
- se determina el valor de la variable aleatoria con distribución uniforme en  $(a,b)$ , mediante:

$$x = a+(b-a)r$$

(3) *La distribución exponencial.* La distribución exponencial tiene su mayor aplicación en la descripción de intervalos de tiempo definidos entre ocurrencias de eventos estocásticos distintos, que son completamente independientes del tiempo.

Se dice que los intervalos de tiempo entre ocurrencias estocásticas están distribuidos en forma exponencial si la probabilidad de que ocurra un evento en un intervalo corto de tiempo es muy pequeña y, además, si la ocurrencia de dicho evento es estadísticamente independiente de otros eventos. En consecuencia, las suposiciones que debe satisfacer un valor de variable aleatoria exponencial son las siguientes (Naylor *et al.* 1973):

- la probabilidad de que ocurra un evento en el intervalo  $[t,(t + dt)]$  es  $\propto dt$
- $\propto$  es una constante no dependiente del tiempo u otro factor
- la probabilidad de que ocurra más de un evento en el intervalo  $[t,(t + dt)]$  tiende a cero, a medida que  $dt$  tiende a cero, y es menor que  $\propto At$

La función de densidad de probabilidad de la distribución exponencial está dada por:

$$f(x) = \propto e^{-\propto x}, \quad \propto > 0 \quad x \geq 0 \quad [43]$$

La media y variancia están dadas por:

$$EX = \frac{1}{\propto} \quad [44]$$

$$VX = \frac{1}{\propto^2} = (EX)^2 \quad [45]$$

El valor  $1/\propto$  es entonces el valor de la tasa de ocurrencia del evento, por unidad de tiempo.

La función de distribución acumulativa tiene la forma:

$$F(x) = \int_0^x \propto e^{-\propto t} dt = 1 - e^{-\propto x}, \quad x \geq 0 \quad [46]$$

Se pueden generar valores de variable aleatoria con distribución exponencial utilizando el método de la inversa. Se tiene entonces que:

$$F(x) = r$$

de donde:

$$r = 1 - e^{-\alpha x} \quad [47]$$

$$x = -\left(\frac{1}{\alpha}\right) \ln(1 - r) \quad [48]$$

pero  $(1 - r)$  es también un número aleatorio, por lo cual se puede dejar:

$$x = -\frac{1}{\alpha} \ln(r) \quad [49]$$

El procedimiento para generar valores de variable aleatoria con distribución exponencial, puede resumirse así:

- se genera un número aleatorio  $r$  con distribución uniforme  $(0,1)$
- se determina el valor de la variable aleatoria con distribución exponencial mediante

$$x = -\frac{1}{\alpha} \ln(r) \quad [50]$$

#### e. Distribuciones discretas de probabilidad

(1) *La distribución geométrica.* La distribución geométrica recibe también el nombre de ensayos de Bernoulli. La distribución geométrica describe el proceso estocástico de ensayos o experimentos al azar, independientes entre sí, en los que el resultado de cada experimento queda registrado como un éxito o un fracaso.

La probabilidad de éxito en cada experimento es constante e igual a  $p$ , con  $0 \leq p \leq 1$ . La probabilidad de fracaso está dada por  $q = 1 - p$ .

Los valores de variable aleatoria generados al contar el número de fracasos en una sucesión de experimentos, antes de que ocurra el primer éxito, son valores de variable aleatoria que se ajustan a una distribución geométrica.

La función de probabilidad de la distribución geométrica está descrita mediante:

$$f(x) = p q^x, \quad x = 0, 1, 2, \dots \quad [51]$$

La función de distribución acumulativa está definida por:

$$F(x) = \sum_{x=0}^x p q^x, \quad x = 0, 1, 2, \dots, x \quad [52]$$

El valor esperado y la variancia se encuentran determinados por:

$$EX = \frac{g}{p} \quad [53]$$

$$VX = \frac{g}{p^2} = \frac{EX}{p} \quad [54]$$

Para generar en una computadora valores de variable aleatoria con distribución geométrica se emplea el método de la inversa. El valor de variable aleatoria se determina mediante la relación:

$$x = \frac{\log r}{\log q} \quad [55]$$

donde el valor de x obtenido se trunca al entero que sea menor.

El procedimiento para generar valores de variable aleatoria con distribución geométrica se resume, entonces, en los siguientes dos pasos:

- se genera un número aleatorio r con distribución uniforme (0,1)
- se determina el valor de variable aleatoria mediante la relación:  $x = \frac{\log r}{\log q}$ .

(2) *La distribución binomial.* La distribución binomial define el proceso estocástico de valores de variable aleatoria obtenidas de la cuenta del número de eventos exitosos en una sucesión de n experimentos de Bernoulli, en que la probabilidad de éxito de cada experimento es constante e igual a p.

Consecuentemente, la distribución binomial proporciona la probabilidad de que un evento sea exitoso x veces, en un conjunto de n ensayos, con probabilidad de éxito independiente e igual a p. La función de probabilidad se expresa mediante:

$$f(x) = C(n,x) p^x q^{(n-x)} \quad [56]$$

donde:

$C(n,x)$  indica combinatoria de n sobre x

El valor esperado y la variancia están dados por:

$$EX = np \quad [57]$$

$$VX = npq \quad [58]$$

El método más simple para generar valores de variable aleatoria con distribución binomial, se basa en la reproducción de n ensayos de Bernoulli y en la utilización del método del rechazo. Si se conocen los valores de n y p, el método consiste en generar n números aleatorios y, mediante una prueba al valor generado, contar el número de éxitos.

El procedimiento se resume en los siguientes pasos:

- suponiendo conocidos los valores de  $n$  y  $p$ , se da a un contador  $x(0)$  el valor inicial de cero:

$$x(0) = 0$$

- se generan  $n$  números aleatorios con distribución uniforme  $(0,1)$
- para cada número aleatorio  $r_i$  generado, en que  $1 \leq i \leq n$ , se realiza la prueba:  
si  $r_i \leq p$  se incrementa  $x(0)$  a  $x(0) + 1$
- una vez realizada la prueba sobre los  $n$  números aleatorios generados, el valor  $x = x(0)$  será un valor de variable aleatoria con distribución binomial.

(3) *La distribución uniforme discreta.* La distribución uniforme discreta se usa para describir procesos estocásticos en que el valor de la variable aleatoria tiene la misma probabilidad de ocurrir en el intervalo  $(a,b)$ , pero en puntos discretos de dicho intervalo. Su distribución de probabilidad es igual a:

$$f(x) = \frac{1}{(b - a + 1)}, \quad x = a, a+1, \dots, b \quad [59]$$

El procedimiento para generar valores de variable aleatoria con distribución uniforme discreta consta de dos pasos:

- se genera un número aleatorio  $r$  con distribución uniforme  $(0,1)$
- se estima el valor de  $x$  truncando el valor obtenido al entero menor, de la siguiente relación:

$$x = a + (b - a + 1)r$$

(4) *La distribución empírica discreta.* Cuando la distribución de probabilidades de una variable aleatoria discreta está representada por un conjunto de valores empíricos, el método más utilizado para generar valores de variable aleatoria de dicha distribución de probabilidad es el método de la inversa.

Para aplicar el método, debe construirse una tabla con los valores de  $x$ ,  $f(x)$  y  $F(x)$ , de la siguiente forma:

$x_i$	$f(x_i)$	$F(x_i)$
$x_1$	$f(x_1)$	$f(x_1)$
$x_2$	$f(x_2)$	$f(x_1)+f(x_2)$
$x_3$	$f(x_3)$	$f(x_1)+f(x_2)+f(x_3)$
...		$\Sigma f(x_i) = 1$

El procedimiento para obtener un valor de variable aleatoria de la distribución empírica discreta, será el siguiente:

- se genera un número aleatorio  $r$  con distribución uniforme (0,1)
- se busca en la columna de los  $F(x_i)$ , función de distribución acumulativa, la fila en cuyo rango se encuentra el número  $r$  generado. El valor  $x_i$  de dicha fila será el valor de variable aleatoria generado.

#### 4. ANÁLISIS DEL SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE CARNE DE BOVINOS EN LA ZONA CIRCUNLACUSTRE DE CARATA (PUNO, PERÚ)

##### a. Introducción

Los sistemas de producción de carne y leche en la zona circunlacustre de Carata, Puno, Perú, están basados fundamentalmente en la utilización del Llacho (*Helodea potamojetum*) y Totora (*Scirpus totora*), extraídos del lago Titicaca.

El estudio del complejo sistema planta-animal, se ha orientado a obtener un mayor conocimiento de las especies forrajeras en cuanto a sus características, formas óptimas de cosecha, normas de manejo, resistencia a enfermedades y plagas, rendimientos, etc., con el fin de optimizar la extracción de estas plantas que son la base de la producción de carne y leche del área lacustre en comunidades tales como Carata.

Por otra parte, los estudios en nutrición animal, han permitido conocer mejor la eficiencia con que se usan estos recursos para satisfacer los requerimientos nutritivos.

Hay dos formas en que se pueden integrar los conocimientos disponibles en producción de carne. Una de ellas, ha sido las investigaciones en sistemas de producción de carne, entendiéndose bajo esta denominación, el estudio de diferentes formas de producción y manejo que permitan un uso eficiente de los recursos.

La otra alternativa metodológica para el estudio cuantitativo del sistema de producción de carne, o de las partes que lo componen, es definirlo mediante el uso del análisis de sistemas, es decir, la aplicación de la Teoría General de Sistemas en producción animal, usando para ello modelos matemáticos. Dichos modelos permiten simular diferentes situaciones, que en la práctica pueden ser imposibles de realizar porque demandan demasiado tiempo para ver los resultados o por ser muy costosas, o bien para hacer estudios *ex-ante* que permiten tomar decisiones de lo que debe hacerse en la zona.

Por otra parte, es necesario recordar que en los sistemas reales de producción de carne en Carata, Perú, es difícil analizar y cuantificar los cambios de sus componentes bajo distintas condiciones, ya que los sistemas participan e interaccionan a través de múltiples factores. Frecuentemente, la respuesta a dichos cambios no es clara hasta después de períodos de tiempo prolongados, sujetos, además, a condiciones estocásticas que pueden reproducirse con gran eficiencia en un modelo de simulación.

El modelo que se presenta se basa en la premisa de que la energía es el componente que explica en mayor medida la producción, aunque guarda una relación con otros factores que alteran su producción, distribución y rendimiento. Se consideran, sin embargo, factores adicionales que pueden alterar drásticamente el equilibrio supuesto, pasando a ser ellos los que gobiernen las relaciones de producción. Tal paradigma ya se ha investigado (Catrileo 1981; Silva 1983; Hazard 1984; Cañas *et al.* 1986; Arce 1989), con adecuados resultados descriptivos y predictivos, y aplicado en modelos de simulación con fines docentes (Aguilar y Cañas 1983; Aguilar *et al.* 1984).

Los objetivos del presente trabajo son:

- Desarrollar un modelo de simulación que permita predecir la ganancia diaria de peso de novillos alimentados con alimentos colocados en un comedero, frente a diferentes situaciones de disponibilidad y valor nutritivo de los alimentos y peso de los animales.

- Realizar experimentaciones *ex-ante* que, una vez desarrollado y validado el modelo, ayuden a determinar los caminos que deben seguirse en la investigación.

Debido a que no se dispone de una adecuada investigación sobre el efecto del clima en el comportamiento animal en Carata, la validación se realizó con animales en estado de termoneutralidad; por consiguiente, se debe decir que los resultados obtenidos en zonas fuera de la termoneutralidad corresponden a extrapolaciones del modelo, basados en las leyes físicas que regulan estos procesos. Este es un aspecto que debe ser mayormente investigado para mejorar la precisión del modelo.

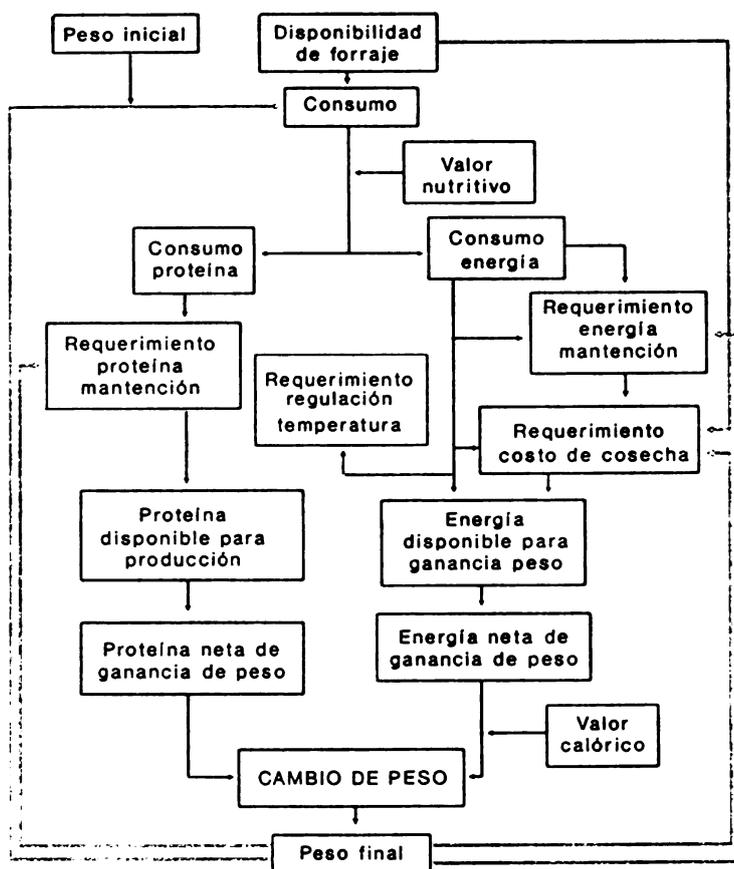


Fig. 2 Diagrama de flujo del sistema y sus componentes más importantes

## b. Materiales y métodos

Para desarrollar un modelo del comportamiento de un novillo en diferentes sistemas de alimentación, y su respuesta frente a determinadas condiciones, es necesario hacer una abstracción del sistema real y tomar en cuenta todos aquellos parámetros que se supone afectan al sistema. Para ello, se ha desarrollado un algoritmo con factores que afectan la ganancia de peso, para luego analizar y cuantificar cada uno de los componentes incluidos en el sistema. La estructura general de este algoritmo se muestra en el diagrama de flujo de la Fig. 2.

(1) *Análisis del sistema.* Entre los elementos esenciales de un modelo matemático están las variables, las cuales relacionan los componentes considerados por el modelo. La descripción del modelo, de acuerdo a la clasificación de variables propuesta por Naylor *et al.* (1966), se realiza considerando las siguientes variables:

- *Variables de estado:* Consumo, requerimiento de mantención de energía, proteína, calcio y fósforo; regulación térmica; y costo de cosecha. Este último, dado que los animales están a sogueo\*, se considera igual a cero.
- *Variables exógenas:* Peso inicial, disponibilidad de forraje, valor nutritivo del forraje, temperatura ambiental, viento y lluvia.
- *Variables de salida:* Peso final y ganancia de peso (cambio de peso).

\* A sogueo: condición en la que el alimento se lleva a los animales, que se encuentran a la intemperie.

Las variables de estado son variables endógenas (generadas dentro del sistema) que permiten describir la situación actual de un sistema o de uno de sus componentes.

(2) *Consumo*. La ingestión de alimento, según Blaxter (1964), es un proceso voluntario que estaría gobernado a nivel del sistema nervioso central, el cual, en el corto plazo, actuaría en la regulación del apetito. Distintas zonas del hipotálamo estarían influyendo en la regulación de la ingesta a través de sensaciones como la saciedad o el deseo de comer. Esto ha sido probado lesionando estas zonas del hipotálamo, llegándose a establecer que la zona ventro-media corresponde al centro de la saciedad y la zona ventro-lateral, al apetito. Aunque se han podido establecer estas áreas de acción sobre la regulación del consumo, no es claro aún el o los mecanismos específicos según los cuales actuarían estos centros. Ello ha dado origen a una serie de teorías de regulación del consumo que han tratado de responder a esta incógnita.

Dentro de estas teorías destacan la teoría termostática propuesta por Strominger y Brobeck (1953), la teoría quimostática por Kennedy (1953) y la glucostática impulsada por Mayer (1953). Sin embargo, ninguna de estas teorías ha podido, por sí sola, resolver el problema y cada una de ellas tendría, quizás, una contribución a solucionarlo en su conjunto.

Es necesario, sin embargo, distinguir que el concepto de saciedad en el animal es diferente al de consumo máximo, ya que en este último participan otra serie de factores ajenos al animal y que son propios del alimento, como es el caso de la digestibilidad del forraje ofrecido y su disponibilidad.

El consumo está afectado también por factores como la raza, el sexo y el peso. El efecto de la raza se atribuye principalmente a las diferentes curvas de crecimiento características de cada raza. Blaxter (1964) y Kleiber (1961) señalan que existe una estrecha relación entre la cantidad y calidad del forraje que consume un animal y su peso.

Adicionalmente, Marchi (1973) indica que los factores que afectan el consumo son múltiples, pero que para efectos prácticos y en condiciones de pastoreo, pueden reducirse a dos: digestibilidad y disponibilidad de forraje. Generalizando, Conrad (1966) sostiene que el consumo no es limitado por la digestibilidad cuando ésta tiene valores de 67% o superiores.

En general, las ecuaciones para determinar consumo tienen una fuerte restricción en el sentido de que limitan el consumo a un máximo de un 3% del peso vivo, que se alcanza cuando hay una disponibilidad de 3000 kg de materia seca por hectárea en animales a pastoreo. En general no se toma en cuenta el efecto del valor nutritivo del forraje sobre el consumo, estabilizándolo en 3%; sin embargo, existe evidencia (Cañas 1989) de que el consumo es función del peso o edad del animal, siendo de 2.5% de su peso a los 150 kg y llegando a 3.2% de su peso en animales de 500 kg.

Dado que los factores que afectan el consumo son múltiples, a los que hay que añadir la influencia del medio y la individualidad de los animales, en este modelo se desarrolló un sistema que permite que animales de igual peso puedan consumir diferentes cantidades de materia seca, con el propósito de generar variabilidad entre individuos. Según Blaxter y Wilson (1963), la variabilidad en el consumo puede llegar a valores de 7.5% de la media. Para este propósito, se simuló la variabilidad del consumo entre individuos mediante una curva estocástica de distribución gaussiana (Meyer 1970). En esta curva de distribución probabilística, el consumo esperado corresponde a un 3% del peso del animal como máximo para animales criollos de Puno, con un peso máximo de 400 kg, y la varianza es de un 7.5% del valor medio.

De esta forma el modelo, a disponibilidad máxima, calcula consumos aleatorios que fluctúan entre un 2.78% y un 3.23% del peso vivo, en animales de igual peso. Posteriormente, el consumo de materia seca calculado se multiplica por el valor nutritivo del forraje, lo cual permite calcular los consumos de energía metabolizable y proteína por animal.

(3) *Requerimiento de mantención.* Se entiende por requerimiento de mantención de energía, a aquel nivel de consumo con el cual el animal logra un balance de energía igual a cero. Si el consumo se expresa en términos de energía metabolizable, como es el caso de este modelo, el requerimiento de mantención es igual al catabolismo de ayuno o de energía neta de mantención más el incremento calórico de mantención. Según Brody (1968), el catabolismo de ayuno corresponde a:

$$CA = 70.5 PV^{0.75} \quad [60]$$

donde:

CA = catabolismo de ayuno, kcal EN  
PV = peso vivo, kg

Kleiber (1947), citado por Maynard y Loosli (1969), indica que el catabolismo de ayuno tiene la misma función; sin embargo, la constante la reemplaza por 67.6, y Lofgreen y Garret (1968) por 77.0.

En animales estabulados, Gough (1975) propone que el catabolismo de ayuno (Mcal EM) corresponde a:

$$CAM = 1.36 + 0.0145 PV \quad [61]$$

donde:

CAM = catabolismo de ayuno, Mcal EM

que, expresado en términos de unidades de peso metabólico, correspondería a una constante de 79.0.

En todos los casos, se considera que los animales se encuentran a 12-18 h post-absorción, en zona de termoneutralidad y sanos.

Para calcular el requerimiento de mantención se suman la energía neta de mantención y el incremento calórico de mantención. Brody (1968) determinó que las necesidades de mantención se pueden satisfacer con un consumo de energía digestible igual a dos veces el catabolismo de ayuno. Con ello, se están considerando las pérdidas de energía que sufre el animal por actividad y aquella presente en la orina y los gases producidos en el rumen. Esto indicaría que el incremento calórico sería de aproximadamente un 50%, valor semejante al 57% encontrado por Cañas (1974) en un experimento en ratas y al 55% encontrado por Kleiber (1945) en experimentos con vacas lecheras. Consecuentemente, se puede estimar que el incremento calórico de novillos en pastoreo es del orden de 50%, y el requerimiento de mantención sería:

$$RM = 2 \cdot 70.5 \cdot PV^{0.75} \quad [62]$$

donde:

RM = requerimiento de mantención, kcal/día

Al transformarlo a energía metabolizable (81% de ED), se obtienen valores de 114 kcal EM / PV<sup>0.75</sup>/día.

Los conceptos anteriores indican, en todos los casos, que el requerimiento de mantención es constante y sólo depende del peso del animal. Sin embargo, Garrett (1974), citado por Cañas (1974), planteó que la energía neta de mantención o catabolismo de ayuno, en animales mantenidos en ayuno por 7 días, bajó a 40 kcal / PV<sup>0.75</sup>, lo cual estaría indicando que el requerimiento de energía se ve afectado por el nivel de consumo previo. Similarmente, Cañas (1974) ha señalado que el requerimiento de mantención no es constante y que es función

del consumo de energía metabolizable de la dieta y del peso del animal; esto se debe a que los animales tienen una adaptación del tamaño de algunos órganos como el hígado, corazón y estómago, frente a cambios en el consumo de alimento; la función que propuso es:

$$RM = \frac{126.11}{(1 + 2.00262 e^{0.036x})} \quad [63]$$

donde:

RM = requerimiento de mantención, kcal EM/PV<sup>0.75</sup>  
 X = consumo de energía, kcal EM/PV<sup>0.75</sup>  
 e = 2.718282

El modelo de Carata usa esta función debido a que en ella se está tomando en cuenta el consumo de energía que previamente ha realizado el animal. Es así que, si con esta función se calcula el requerimiento de mantención a un nivel de consumo igual a cero (ayuno) por un período previo de 7 días, el requerimiento resulta igual a 42 kcal EM por unidad de peso metabólico (PV<sup>0.75</sup>), lo cual coincide exactamente con lo obtenido por Garrett (1974), citado por Cañas (1974), en animales mantenidos en ayuno. Por otra parte, el requerimiento de mantención se hace asintótico a un consumo voluntario, que sólo se obtiene durante la lactancia, de 126 kcal EM/PV<sup>0.75</sup>, comparable al estimado por Brody (1945), de 114 kcal EM/PV<sup>0.75</sup>.

(4) *Requerimiento de energía para regulación de temperatura corporal.* El bovino es un animal adaptado a un amplio rango de termoneutralidad. La temperatura crítica, es decir, aquella temperatura ambiente por debajo de la cual un animal tiene que incrementar su producción de calor y donde la vasoconstricción general es casi completa, ha sido calculada por Blaxter(1964).

Blaxter (1964) indicó que la temperatura corporal de los mamíferos, medida en el recto, muestra un margen de variación muy pequeño. La temperatura promedio es de alrededor de 39 grados Celsius con una variación  $\pm 2^\circ\text{C}$ . La pequeña variación térmica que presentan los diferentes mamíferos, indica la gran capacidad que poseen de regular su temperatura.

El animal disipa calor a través de dos mecanismos. El primero es por convección, radiación y conducción, que en conjunto contiene la pérdida de calor sensible. La segunda forma de disipar calor es a través de la pérdida de calor por vaporización; esto corresponde a la evaporación de agua de la piel y conductos respiratorios, cuando el calor requerido para tales efectos es suministrado por el mismo animal.

La magnitud de la pérdida de calor sensible está determinada por los atributos físicos del medio ambiente, entre ellos, se puede mencionar la temperatura, la radiación incidente y el movimiento del aire. En general, el animal tiene una habilidad muy limitada para gobernar estas pérdidas, pudiendo hacerlo a través de la regulación del flujo sanguíneo, erección de los pelos y alteración de la superficie de exposición.

El animal puede gobernar la pérdida de calor por vaporización en mejor forma que la anterior. Esto lo logra reduciendo a un mínimo el intercambio normal de oxígeno y anhídrido carbónico que ocurre como consecuencia de la respiración. Además, es capaz de lograr una vasoconstricción completa.

Existe otra pérdida de calor que experimenta el animal y que se llama calentamiento. Corresponde al gasto de energía que realiza el individuo con el objeto de calentar el alimento hasta que logre su temperatura corporal.

Desde un punto de vista teórico, las pérdidas de calor pueden ser estudiadas considerando al animal como un cilindro con una capa uniforme de pelos. El calor se produce por efecto del metabolismo en el volumen central de este cilindro, el cual tiene una temperatura que podría denominarse TB. Este calor debe ser evacuado, debiendo

para ello, pasar la primera barrera que es la piel. A este nivel, una cierta cantidad de este calor se utiliza para evaporar agua de la piel, al aire. El vapor de agua se difunde, a través de la capa de pelos. El remanente de calor progresa a través del pelo por un proceso de conducción hasta la superficie de esta capa. En esta etapa, que podría llamarse interfase, se pierde calor hacia el medio por convección y radiación (calor sensible).

De esta manera, conociendo la temperatura corporal, de la superficie cutánea, de la capa pelífera y del aire, es posible establecer algunas relaciones:

$$Hp = A \cdot C_T \cdot (T_B - T_S) \quad [64]$$

donde:

- Hp = calor producido en el metabolismo
- A = área del animal
- C<sub>T</sub> = conductancia del tejido
- T<sub>B</sub> = temperatura corporal
- T<sub>S</sub> = temperatura de la superficie corporal

A partir de esta fórmula se puede seguir describiendo el intercambio calórico. Por ejemplo, si el animal no tuviese pelos, la pérdida de calor sensible (HN) sería igual a:

$$HN = A \cdot C_A \cdot (T_S - T_A) \quad [65]$$

donde:

- C<sub>A</sub> = conductancia térmica de la capa de aire que rodea el cuerpo del animal
- T<sub>A</sub> = temperatura ambiental

Sin embargo, en el caso de las vacas lecheras, éstas tienen una capa pelífera que tiene importancia en la regulación de la temperatura. La relación queda como sigue:

$$HN = A_F \cdot C_A \cdot (T_F - T_A) \quad [66]$$

donde:

- A<sub>F</sub> = superficie del cuerpo más pelo
- T<sub>F</sub> = temperatura del pelo

Del mismo modo, el calor por vaporización (HE) puede expresarse de la siguiente manera:

$$HE = A \cdot D \cdot (P_S - P_A) \quad [67]$$

en la cual:

- D = constante de difusión de vapor de agua de la superficie
- P<sub>S</sub> = presión de pérdida de vapor de agua de la superficie
- P<sub>A</sub> = presión de vapor de agua en el medio ambiente

Las constantes de conductancia miden la cantidad de calor que fluye por unidad de gradiente de temperatura que se intercambia entre dos superficies. Su recíproca es lo que se denomina constante de aislamiento para los tejidos (C<sub>A</sub>), pelos (C<sub>F</sub>) e interfase del aire (C<sub>T</sub>). Dado que estas constantes constituyen resistencias,

pueden calcularse en forma análoga a una resistencia en serie. Para estimar el aislamiento térmico total se usará la inversa de dicho valor.

Para el caso del modelo Carata, el valor de  $K_c$  fue calculado a partir de una expresión matemática planteada por Blaxter (1977) y que considera el efecto del viento y grosor de la capa pelífera. Su fórmula es la siguiente:

$$K_1 = \frac{R_r}{(R_r + G_r)} \cdot \frac{1}{(0.115 + 0.099 \sqrt{vv})} \quad [68]$$

$$K_2 = R_r \cdot \ln \frac{(R_r + G_r)}{R_r} + 0.46 - 0.09 \sqrt{vv} \quad [69]$$

$$K_3 = \frac{1}{(K_1 + K_2)} \quad [70]$$

donde:

- Rr = radio del animal, mm
- Gr = grosor de capa pelífera, mm
- vv = velocidad del viento, millas/hora

El área de un animal (A) según Blaxter (1977), se puede calcular mediante la fórmula:

$$A = 0.09 \cdot PV^{0.66} \quad [71]$$

Con estos valores de  $K_c$ , área del animal y reemplazando en la ecuación [6], el intercambio de calor (DQ) entre el animal y el medio ambiente, queda como sigue:

$$DQ = A \cdot K_c \cdot (39 - TE) \quad [72]$$

donde:

- 39 = temperatura corporal del animal (constante), °C
- TE = temperatura ambiental, °C

Por otro lado, este intercambio de calor del animal con el medio ambiente tiene un límite, determinado por características del animal y la temperatura ambiente. Con base en los datos experimentales de Blaxter (1977) se determinó la máxima pérdida de calor (HE) en función de la temperatura ambiente. Reemplazando la expresión encontrada en la fórmula [13], se deriva lo siguiente:

$$HE = A \cdot 482.74 e^{0.0376 TE} \quad [73]$$

La regulación de la temperatura y, por lo tanto, el intercambio calórico con el medio, son procesos continuos. Para el caso del modelo se consideró que todos los incrementos calóricos y costo de cosecha constituyen un fondo común (PE), desde donde se realiza el intercambio. Su representación matemática es:

$$PE = I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + CC \quad [74]$$

En el modelo se consideró que si la energía contenida en PE no es suficiente para regular su temperatura, el animal logrará dicho objetivo a expensas de una menor producción de leche o de las reservas de su cuerpo.

(5) *Costo de cosecha.* Este concepto fue planteado por Cañas y Gastó (1974) y corresponde al gasto de energía que hace el animal al procurar su alimento. Se ha planteado, con algunas relaciones que lo cuantifican (Rozas *et al.* 1978; Catrileo 1981), que este gasto depende de la densidad calórica del forraje y de la densidad calórica del cosechador. Sin embargo, dado que el sistema de producción de Carata es a sogueo, el costo de cosecha tiende a cero, por lo cual en el modelo de simulación se considera igual a cero.

(6) *Requerimientos de proteína.* La proteína destinada a mantención debe satisfacer o suplir las pérdidas originadas en el animal, tales como el nitrógeno urinario endógeno (NUE), el nitrógeno metabólico fecal y el crecimiento adulto (pelos, cuernos, pezuñas, etc.).

Este requerimiento será función del peso metabólico, del valor biológico, de la digestibilidad y de las pérdidas corporales. Brody (1968) calculó que el requerimiento de nitrógeno urinario endógeno corresponde a:

$$NUE = 0.146 PV^{0.72} \quad [75]$$

donde:

NUE = nitrógeno urinario endógeno, g/día

Por otra parte, NRC (1976) plantea que el NUE es igual a  $0.12 PV^{0.75}$ . Por lo tanto, las pérdidas de nitrógeno debido a crecimiento adulto serían igual a  $0.02 PV^{0.75}$  g/día y el nitrógeno metabólico fecal (NMF), corresponde a 4 g N/kg de materia seca consumida. Dichos valores son semejantes a los citados por Maynard y Loosli (1969).

NRC (1976) plantea también que el requerimiento de proteína se obtiene al convertir el requerimiento total de nitrógeno por el factor 6.25, dado que la mayoría de las proteínas contienen un 16% de nitrógeno.

Maynard y Loosli (1969) señalan que el requerimiento de proteína verdadera digestible para mantención, se puede calcular de la siguiente forma:

$$PD = (NUE + S + NMF) \cdot 6.25 \cdot \frac{100}{VB} \quad [76]$$

donde:

PD = proteína verdadera digestible, g/día  
 S = pérdidas por crecimiento adulto, que en bovinos corresponde a  $0.02 PV^{0.73}$  g/día  
 VB = valor biológico de la proteína

Los mismos autores indican que la proteína disponible para mantención puede determinarse de la siguiente forma:

$$PM = (NUE + S) \cdot 6.25 \cdot \frac{100}{VB} \quad [77]$$

donde:

PM = proteína disponible para mantención, g/día

NRC (1976) sugiere un valor biológico de la proteína en el caso de bovinos de 0.775; Maynard y Loosli (1969) señalan un valor de 0.70.

En el desarrollo del presente modelo, el requerimiento de proteína para mantención se calculó con la siguiente fórmula:

$$PM = NUE \cdot DP \cdot 6.25 PV^{0.75} \quad [78]$$

donde:

DP = digestibilidad de la proteína, %

Ya que  $NUE = 0.146$ , la proteína urinaria endógena es  $0.146 \cdot 6.25$ . Asumiendo un valor biológico = 2.6 y digestibilidad de 55%, entonces, el requerimiento de proteína para mantención es igual a:

$$PM = 3.3 PV^{0.75} \quad [79]$$

Según Crampton (1961), la media del valor biológico efectivo de la proteína de las raciones para animales es cercana al 50%. Para este trabajo se asumió un valor biológico de un 50%. El mismo autor indica que hay gran variabilidad en la digestibilidad de la proteína de los forrajes, alcanzando valores de media y desviación estándar de  $63 \pm 8.5\%$ . En el modelo se usó una digestibilidad mínima de 55%.

La proteína requerida para producción se calculó a partir de la cantidad de proteína resultante una vez cumplido el requerimiento de mantención.

Anrique (1976) analizó la composición del cuerpo y la eficiencia en novillos, relacionando estos parámetros con la raza, el tamaño y el sexo. Así, para novillos holandeses, calculó ecuaciones por las cuales se puede determinar la cantidad de proteína depositada en el cuerpo, en función del peso del animal:

$$Y = -1.2345 + 0.215745W - 0.0001W^2 \quad r=0.98 \quad [80]$$

donde:

Y = proteína, kg  
W = peso vacío, kg

Para novillos Aberdeen Angus, la ecuación es:

$$Y = 24.6231 - 0.06138W - 0.00008055W^2 \quad r=0.96 \quad [81]$$

Parece evidente que es necesario conocer mejor el animal criollo de Puno, especialmente en lo relacionado a tamaño máximo, composición de la ganancia de peso del cuerpo y características reproductivas.

De acuerdo con la ecuación que corresponde a ganado Holando, que es lo más parecido al criollo, el modelo calcula la proteína del cuerpo a un determinado peso. Al consumir forraje, el animal consume una cantidad de proteína que genera un balance negativo o positivo, pero orientado prioritariamente a satisfacer el requerimiento de mantención. Si el balance, después de realizado el consumo, es negativo (es decir, la cantidad de proteína consumida no alcanza a cubrir los requerimientos de mantención), entonces el animal pierde peso. Por el contrario, si el balance es positivo, el animal cubre sus requerimientos proteicos de mantención y el resto lo utiliza en producción o como fuente de energía, eliminando el exceso de nitrógeno en forma de urea.

Si la cantidad de proteína disponible no es suficiente para alcanzar el potencial genético de ganancia de peso determinado por el consumo de energía, se debe calcular la ganancia de peso límite que puede lograr el animal con el consumo realizado. En el modelo, este cálculo se hace despejando la variable peso de la ecuación obtenida por Anrique (1976), de donde:

$$PE = \frac{-0.215745 + \sqrt{0.215745^2 - 4(0.0001)(1.2345 + D)}}{0.0002} \quad [82]$$

en la cual:

PE = peso vacío esperado con el consumo de proteína, kg  
D = proteína del cuerpo al peso inicial más proteína disponible para ganancia de peso, kg

El cálculo anterior se resuelve determinando, primero, la cantidad de proteína que tiene el animal a un peso inicial. Luego, se agrega a ella la cantidad de proteína disponible para ganancia de peso y se calcula el peso esperado con el consumo de proteína.

(7) *Requerimiento de calcio y fósforo.* Si se analizan los requerimientos de Ca y P presentados en las tablas del NRC, se puede observar que el requerimiento de ambos elementos cambia en proporción a los pesos y ganancias de peso de los animales.

Es necesario destacar que en el modelo la eficiencia de uso del fósforo, aumenta a medida que su disponibilidad se hace menor que el nivel de requerido. De esta manera, si el requerimiento es igual a la disponibilidad su eficiencia de uso es 100%; y si el fósforo consumido apenas suple el 50% del requerimiento, la eficiencia de uso aumenta hasta llegar a 200%. Esto es posible gracias a un mayor reciclaje del fósforo a nivel ruminal.

Por otra parte, si una ración es deficiente en calcio y fósforo, su efecto no se observaría inmediatamente que se produce la deficiencia. Sin embargo, el modelo muestra inmediatamente su efecto, de modo que sirva de aviso del problema que está ocurriendo.

De los experimentos realizados con este modelo, se puede observar que animales consumiendo Llacho y Totorá *ad libitum*, no tienen problemas de energía, proteína ni calcio; sin embargo, sí tienen problemas de fósforo para lograr una máxima ganancia de peso.

Las ecuaciones consideradas para estimar el requerimiento de calcio y fósforo, son las siguientes:

$$REQCA = 7.35 - 0.003W + 17.08xg \quad [83]$$

$$REQP = 4.39 + 0.021W + 11.72xg \quad [84]$$

donde:

REQCA = requerimiento de calcio, g/día  
REQP = requerimiento de fósforo, g/día  
W = peso del animal, kg  
g = ganancia de peso, kg/día

(8) *Determinación de la ganancia de peso.* Una vez que se determina el consumo de energía metabolizable, se calcula el requerimiento de mantención, el de costo de cosecha y el de regulación de temperatura. La diferencia entre el consumo de energía y la suma de los requerimientos es la energía disponible para ganancia de peso. La energía metabolizable requerida para ganancia de peso es el contenido de energía de la ganancia (energía neta de

ganancia de peso, EG), que es el producto entre el peso de la ganancia y su valor calórico, más el incremento calórico de la ganancia de peso.

McDonald (1973) señala que la energía retenida por unidad de ganancia aumenta a medida que el animal madura; así mismo en animales en engorda rápida, a un peso dado se retiene más energía por unidad de ganancia que aquellos que crecen a ritmo más lento. Esto es debido a que la cantidad de agua corporal decrece, mientras la grasa aumenta.

Winchester y Hendricks (1953), a partir de estudios de crecimiento de novillos, desarrollaron la siguiente ecuación que combina el requerimiento de mantención con el de producción:

$$F = 0.0553W^{0.66} (1 + 0.805G) \quad [85]$$

donde:

F = TDN, lb  
W = peso, lb  
G = ganancia diaria, lb

La expresión  $0.0553W^{0.66}$ , representa el requerimiento de mantención y la expresión entre paréntesis es el requerimiento de producción a una ganancia específica. Ha sido probada para ganancias diarias entre 0.5 y 2.0 lb (0.23 y 0.91 kg).

Por otra parte, Garrett *et al.* (1959) estudiaron y determinaron los requerimientos en ovinos y bovinos a partir de ensayos de alimentación. Estos autores desarrollaron las siguientes ecuaciones para determinar los requerimientos de energía en novillos:

$$TDN = 0.036W^{0.75} (1 + 0.57G) \quad [86]$$

$$DE = 76W^{0.75} (1 + 0.58G) \quad [87]$$

$$ME = 62W^{0.75} (1 + 0.60G) \quad [88]$$

$$NE = 35W^{0.75} (1 + 0.45G) \quad [89]$$

donde:

TDN = nutrientes digestibles totales, lb  
W = peso del animal, lb  
G = ganancia diaria, lb  
DE = energía digestible, kcal  
ME = energía metabolizable, kcal  
NE = energía neta, kcal

Gough (1975) desarrolló una metodología de cálculo de la energía de la ganancia de peso en novillos estabulados, con base en la determinación de las siguientes ecuaciones:

$$VC = 1.5 + 0.3EG + 0.0045N \quad [90]$$

$$EG = G \cdot VC \quad [91]$$

$$EG = G \frac{(1.5 + 0.0045W)}{(1 - 0.3G)} \quad [92]$$

donde:

VC = valor calórico de la ganancia, Mcal  
 G = ganancia de peso, kg  
 EG = energía de la ganancia, Mcal  
 W = peso del animal, kg

También Lofgreen y Garrett (1968) indican que la energía neta requerida para cualquier ganancia de peso, puede calcularse según la ecuación:

$$Y = (57.72G + 6.84G^2) W^{0.75} \quad [93]$$

donde:

Y = energía neta requerida, Mcal  
 G = ganancia de peso, kg  
 W = peso del animal, kg

Aún cuando los antecedentes mencionados indican diferentes ecuaciones para determinar la energía requerida para cualquier ganancia de peso, se puede observar que los valores que se obtienen son bastante distintos, según la fuente empleada (Cuadro 1). Si a ello se agrega el requerimiento de energía neta para mantención, las diferencias se hacen mayores. Sin embargo, los valores son semejantes a los calculados por Gough (1975) y Lofgreen y Garrett (1968).

Cuadro 1. Valores de energía neta requerida para distintas ganancias de peso, según diferentes autores				
Energía neta *, Mcal				
Peso, kg:	300		500	
Ganancia de peso, kg:	0.3	1.0	0.3	1.0
Winchester y Hendricks (1953)	1.26	2.15	1.26	2.15
Garrett (1959)	1.13	1.76	1.13	1.76
Gough (1975)	0.98	4.07	1.23	5.35
Lofgreen y Garrett (1968)	0.98	3.61	1.70	6.29

\* EN = 0.45 ED (Maynard y Loosli 1969)

1kg TDN = 4.04 Mcal ED (Crampton 1961)

Debido a la variabilidad en los valores presentados, en el desarrollo del modelo se calculó, a partir de los datos presentados por McDonald (1973), una ecuación que permitiera relacionar el valor calórico de la ganancia de peso con el peso del animal y el nivel de ganancia de peso.

Para determinar la energía metabolizable sobre mantención requerida para ganancia de peso, se debe agregar a la energía neta de ganancia de peso (EG), el incremento calórico (ICGP), lo cual corresponde a una eficiencia de (1 - ICGP).

La eficiencia de utilización de la energía metabolizable puede variar en un rango dependiendo de la naturaleza de la ración o de la concentración de energía (MD). La ecuación propuesta por Blaxter (1956) es la siguiente:

$$Kp = 18.4 MD + 3.0 \quad [94]$$

donde:

Kp = eficiencia de utilización, %  
MD = concentración de energía de la ración, Mcal/kg

En el modelo se usó esta relación debido a que ella permite cuantificar el efecto del valor nutritivo del forraje, el cual depende de la energía de éste ya que en forrajes resulta ser el nutriente más limitante.

De acuerdo a los antecedentes hasta aquí presentados, se programaron los pasos a seguir para determinar la ganancia de peso en el sistema de producción de carne a sogueo. Para ello se calcula primero la energía destinable a ganancia de peso (EDPG), y aplicando la eficiencia (1-ICGP), se determinó la energía de la ganancia (EG). Posteriormente, el modelo determina por iteración la ganancia de peso.

El modelo calcula paralelamente el cambio de peso esperado por el consumo de energía, por consumo de proteína, y por consumo de calcio y fósforo, dejando como real la más restrictiva, según la Ley del Mínimo. De esta forma, se cuantifica la ganancia de peso de acuerdo a los cambios que sufren las variables de estado como resultado de su interacción con las variables exógenas del modelo.

### c. Resultados y discusión

(1) *Validación.* La etapa de validación consideró pruebas estadísticas de los resultados presentados en diferentes investigaciones realizadas en Chile y los calculados por el modelo. Además, se realizaron ensayos específicos en la Estación Experimental de Pirque, de la Universidad Católica de Chile, que permitieron la verificación de partes del modelo.

Es necesario destacar que muchos de los datos bibliográficos utilizados para la validación, no permitieron verificar cada una de las etapas de este modelo ya que la mayoría de las investigaciones no indican algunos parámetros, como el consumo, valor nutritivo del forraje y otros.

Caballero *et al.* (1976), al referirse a un estudio de engorda de novillos, encontraron que en cuanto a calidad de los forrajes, hay gran disparidad de valores, lo cual se hace especialmente palpable en ensayos con ensilajes de pasto, cuyos resultados son variables y erráticos. Lo mismo puede observarse al usar el modelo.

Corrientemente se encuentran limitaciones y/o falta de información completa en algunos de los ensayos en aspectos tales como la edad de los animales y la clase y tipo de praderas. Generalmente se habla de ellas como praderas mixtas (leguminosas y gramíneas), sin especificar la composición botánica y, por ende, no se conoce el valor nutritivo, lo cual hace difícil, si no imposible generalizar las conclusiones.

Tomando en cuenta las limitaciones que pueden presentarse, el modelo se validó en varias formas. Aquí se presentan solamente aquellas semejantes a condiciones de sogueo.

La primera validación se hizo con los resultados presentados por Caballero *et al.* (1976) y que provienen de ensayos con novillos a corral, lo que es semejante a novillos a sogueo. En estos ensayos es conocida la naturaleza y cuantía del consumo, aunque como ya se indicó, existen variaciones y limitaciones.

En la mayoría de estos ensayos los alimentos ofrecidos correspondían a heno de leguminosas, heno mixto, ensilaje de leguminosas y de gramíneas. El período experimental fue de alrededor de 120 días, se usaron ocho animales cuyo peso, inicial era de 450 kilogramos. Estos ensayos se realizaron en época de otoño e invierno en la Zona Sur de Chile. La validación se efectuó con nueve ensayos en los que se supuso que los animales se encontraban en zona de termoneutralidad.

Usando el método desarrollado por Cañas (1974) en el análisis de la varianza de una regresión lineal simple, forzada a tener intercepto cero y pendiente 1.0, se validaron los resultados obtenidos por Caballero *et al.* (1976), para ensayos a corral, obteniéndose los resultados que se presentan en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Resultados de la validación del modelo contra nueve ensayos			
Ensayo	No. animales	Ganancia de peso real kg/día	Ganancia de peso según el modelo kg/día
284	9	0.440	0.401
283	9	0.395	0.475
285	9	0.446	0.287
286	6	0.485	0.347
289	6	0.660	0.474
273	6	0.757	0.357
263	6	0.521	0.628
268	6	0.563	0.667
287	9	0.474	0.456

Para estimar el ajuste del modelo, se calculó el factor de corrección,  $F_{cm}$ , según la fórmula:

$$F_{cm} = \sqrt{\frac{\frac{\sum Ym^2 - \sum Xm^2 + (\sum Ym)(\sum Xm)}{n}}{(n-1)}} \quad [95]$$

La variación porcentual se calculó de la siguiente forma:

$$\text{Variación (\%)} = 100 (F_{cm} - 1.0)$$

Con la aplicación de este método de validación se obtuvo una variación porcentual del modelo, frente al total de los ensayos analizados, de 10%, mientras que en el caso de los ensayos en pastoreo, la variación porcentual fue de 4%.

Del análisis de los resultados se pudo observar que no existe un error sistemático de predicción, dado que los puntos se distribuyen alrededor de la línea de mejor ajuste. Es necesario enfatizar que todas las validaciones

utilizadas en este modelo fueron realizadas en zona de termoneutralidad. Por ello, para aumentar la precisión de éste se requieren ensayos apropiados en Carata, con parámetros propios de la zona.

(2) *Restricciones del modelo.* Aunque las restricciones que tiene el modelo ya se han tratado previamente, es necesario destacar aquellas más importantes.

En primer lugar, se debe tener presente que la función de consumo genera valores aleatorios alrededor del 3% del peso del animal, basado en las variaciones normales de consumo de los animales. Esto implica que si se corre el modelo dos veces, bajo las mismas condiciones, en periodos cortos de tiempo, se podrían obtener resultados diferentes, lo cual se aproxima a la realidad si se realizaran físicamente dichos ensayos.

El valor nutritivo del forraje, expresado en Mcal EM/kg, está restringido a un rango de valores normales de forrajes, que en el caso de la energía es del orden de 1.3 a 2.5 Mcal/kg MS.

Se debe tener presente que el modelo está extrapolando el efecto del medio ambiente.

El modelo usa características de ganado Holando Europeo, dado que no fue posible utilizar las características propias del ganado criollo de Carata, por no disponer de la información. Sin embargo, se espera que las desviaciones que esto causa en el modelo no sean importantes.

## 5. ANÁLISIS DEL SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE LECHE EN LA ZONA CIRCUNLACUSTRE DE CARATA (PUNO, PERÚ)

### a. Introducción

Dadas las condiciones de producción de leche en Carata, el modelo desarrollado describe un sistema con características externas semejantes al sistema de producción de carne de Carata, presentado en el capítulo anterior. Es decir, en condiciones de sogueo donde el alimento se lleva a los animales, los que se encuentran a la intemperie y se consideran factores ambientales pero no toma en cuenta sistemas de pastoreo. Las características mencionadas definen tanto el objetivo como las partes a considerar en el sistema.

Los objetivos del estudio son:

- Desarrollar un modelo de simulación que permita estudiar y predecir la producción de leche y cambio de peso de vacas alimentadas en comedero, con alimentos de diferente disponibilidad y valor nutritivo y animales de diferente peso y etapa de lactancia.
- Realizar experimentaciones *ex-ante* que ayuden a priorizar las investigaciones en el área.

Una vez definido el objetivo, debe emprenderse la tarea de entender las partes del sistema real y la relación existente entre sus diferentes componentes (Aguilar y Cañas 1980). Esto permitirá detectar los factores relevantes que afectan el problema a estudiar y que influyen en los objetivos especificados.

El modelo que se presenta es una primera aproximación al problema y puede decirse que se encuentra en estado de prototipo de investigación. Como tal, tiene simplificaciones del problema y extrapolaciones de procesos no cuantificados en la zona de Carata, que pueden ser afinados para mejorar la precisión global del modelo. Dichas simplificaciones y extrapolaciones se describen en detalle. No obstante, las validaciones muestran un comportamiento aceptable del modelo, con un error porcentual de cinco por ciento.

## b. Materiales y métodos

(1) *Análisis del sistema.* Según Bywater (1976), dada la filosofía del modelo y el concepto general de sistemas, el enfoque que debe tener este tipo de modelo es considerar la síntesis de leche como el propósito central, siendo la vaca solamente un mero vehículo que lleve a la consecución de este fin. Brown (1969), citado por Bywater (1976), señala al respecto "..... nosotros quizás podríamos considerar a la vaca como un apéndice de la ubre más que a la inversa". Este es un concepto extremadamente atractivo para los propósitos de modelación, sin embargo, es esencial reconocer que el suministro de nutrientes de la ubre tiene un costo. Más aún, bajo ciertas condiciones, algunos procesos como lo es la gestación, tienen prioridad sobre la síntesis de leche. A pesar de esto, el actual modelo no toma en cuenta la gestación de la vaca, dado que es poco común encontrar en las condiciones de Carata, animales que se encuentren lactando y preñadas. Ello es una simplificación en este estudio, con el objeto de plantear un modelo muy simple.

Esta situación hace que para el presente modelo de producción de leche, se considera sólo la vaca en producción. En consecuencia, su uso se ha restringido a simular la producción de leche, considerando raciones ya calculadas como datos externos al modelo, y que son ingresados para su operación.

La leche que produce una vaca en un día cualquiera y en un predio determinado es el resultado de una combinación de factores tales como la vaca y su alimentación, el manejo, el medio ambiente, y otros. Todos estos factores operan dentro de un ciclo productivo, el cual está regulado por una serie de mecanismos (Broster 1971, 1972, 1974; Bywater 1976; Broster *et al.* 1979; Broster y Thomas 1981; García 1987).

Para los efectos del modelo, el animal permanece en lactancia durante un máximo de 305 días. Si existe alguna restricción de energía, calcio o fósforo por un período máximo de tres días, el modelo se detiene automáticamente para resaltar dicha anomalía. Esto, tomando en cuenta que durante los primeros 100 días de lactancia el animal puede perder hasta el 4% de su peso.

De este modo, el modelo considera solamente las vacas en lactancia. La razón por la cual se incluye solamente esta categoría, es que para efectos del uso del modelo en estudios *ex-ante*, es donde en forma muy rápida se puede detectar acciones que causen impactos fuertes en la producción.

(2) *Consumo.* El consumo de alimento está muy relacionado al rendimiento potencial de leche. Diversos autores han señalado la relación significativa entre ambas variables (Forbes 1970; Coppock *et al.* 1974; Grieve *et al.* 1976), bajo diferentes condiciones de alimentación como praderas, henos, pastos, "pellets", concentrados y dietas completas basadas en ensilajes y concentrados.

Por otro lado, la lactancia provoca un aumento considerable en el consumo de alimentos (Forbes 1971), aun cuando la proporcionalidad de los resultados es variable.

Como lo han señalado Forbes (1970) y Bines (1976), la mayor parte de la información que relaciona consumo voluntario y rendimiento de leche es difícil de interpretar. Esto se debe en gran parte a que los experimentos que ellos revisaron no fueron diseñados con el objetivo específico de cuantificar esta relación, sino más bien con el objeto de detectar diferencias significativas entre distintos sistemas de alimentación. Otros trabajos proveen información un tanto distorsionada, a efectos de cuantificar la relación, por el hecho de suministrar concentrados a las vacas en relación al rendimiento de leche y suministra por otro lado forraje *ad libitum*. Esto sería una fuente de error si se desea aislar la relación consumo-rendimiento de leche, ya que si se varía la relación forraje: concentrado se influye el consumo voluntario de los animales (Bines 1979).

Esta situación hace que sea difícil, con la información disponible, diseñar una relación cuantitativa general que relacione ambas variables. Broster y Alderman (1977) y ARC (1980) han discutido el tema en detalle.

Dada la situación de Carata, en donde los animales no son de alto potencial genético y el consumo de concentrado no es una práctica común, en el modelo el consumo se estima en función del peso. Sin embargo, considerando que el peso es sólo uno de los factores y que existen otros, como los mencionados anteriormente, que pueden asumirse como causas aditivas e independientes que afectan la medida global del consumo, en el modelo el consumo se estima con una función de distribución normal. Los datos de consumo diario son entonces muestreados desde dicha función teórica, cuyos parámetros se han estimado en función del peso.

(3) *Producción potencial de leche.* El concepto de potencial de producción se refiere a la capacidad que tiene un animal de manifestar su habilidad de producir el máximo nivel de leche al ser alimentado con cantidades suficientes de alimentos, cuya composición satisfaga los requerimientos (NRC 1978; ARC 1980; INRA 1980).

El término rendimiento potencial es fundamental cuando se pretende establecer relaciones insumo-producto, con fines de producción de rendimiento de leche frente a cambios en el suministro de alimentos (Broster 1974; Forbes 1977b).

La curva de lactancia se caracteriza por ser una curva de tipo gamma (Wood 1980), la cual tiene un punto máximo después del cual declina. Su representación matemática es:

$$Y_n = AN^b e^{-cN} \quad [96]$$

donde:

$Y_n$	=	rendimiento de leche en la semana N
$N$	=	semana de la lactancia
$A$	=	constante
$b$	=	tasa de incremento de la curva
$c$	=	tasa de decrecimiento de la curva

Una ventaja de esta función es que puede ser linealizada, de modo que la estimación de sus parámetros resulta muy fácil, si se acepta el grado de error que dicho método puede presentar. Sin embargo, lo más importante en el modelo, independiente del método que se utilice para estimar los parámetros, es que se ha parametrizado la curva de lactancia, simplificando el cálculo, de modo que el rendimiento diario potencial de leche se estima como porcentaje del rendimiento total, calculado a los 305 días de lactancia. La relación matemática, usada en el modelo, es la siguiente:

$$POTDIA = 0.00318POT(NLAC)^{0.1027} e^{-0.003NLAC} \quad [97]$$

donde:

$POTDIA$	=	producción potencial del día, kg
$POT$	=	producción potencial total, kg
$NLAC$	=	día de la lactancia

La cantidad y calidad del alimento que se consume antes que se alcance el máximo de producción de leche es un factor crítico y determinante para alcanzar el rendimiento potencial de las vacas de alta producción (Clark y Davis 1980). Además, afecta la persistencia de la lactancia. Cualquier cambio drástico de alimentación que sufra la vaca va a afectar la producción, cambiando la pendiente de la curva.

En el primer tercio de la lactancia, las vacas de alta producción deben consumir una alta cantidad de energía para tratar de cubrir los requerimientos y de esta forma alcanzar el rendimiento potencial de leche y minimizar la pérdida de peso. Sin embargo, en muchas ocasiones los animales no son capaces de lograr un alto

consumo (García 1981). Esto podría deberse a inapetencia post parto, capacidad física del animal, o debido a la inhabilidad de la microflora ruminal y/o del tejido del animal para producir suficiente cantidad de precursores, de tal forma de satisfacer la demanda de nutrientes para lograr una máxima síntesis de leche.

Respecto a la inapetencia post parto existen muchas hipótesis que tratan de explicarlo. Bines (1976) señala que al nacer la cría, la eliminación de la placenta debería permitir que hubiese un llenado abdominal mayor, sin embargo, para que ello ocurra, primero debe movilizarse la grasa intraabdominal. Además, señala que es posible que exista una hipertrofia gradual del tracto digestivo después del parto. Otra posibilidad es que la tasa metabólica no sea capaz de aumentar con el objeto de adaptarse a una alta demanda de nutrientes por parte de la ubre después del parto. Según García (1979), la inapetencia del animal persiste por alrededor de 30 días.

Con el objeto de tratar de cubrir los requerimientos en el primer tercio de la lactancia, algunos investigadores han aumentado la densidad calórica de la dieta. Palmquist y Conrad (1978, 1980), Palmquist (1979), Palmquist y Jenkins (1980) y Ozores (1983) han logrado adicionar con éxito grasa a niveles de hasta un 10 % del total de la MS consumida, con buenos resultados. Se ha logrado utilizar con éxito diferentes tipos de grasas y en diferentes proporciones en la dieta, cuyos resultados son coincidentes con los anteriores. En general, se obtienen buenos resultados excepto con aquellos casos en que las vacas han pasado su punto máximo de producción de leche.

Como ya se ha señalado, el consumo varía a través de la lactancia y esta es una característica intrínseca del animal. Sin embargo, interesa determinar en qué medida la calidad y/o composición de la dieta influyen sobre la magnitud del aumento del consumo, así como el tiempo que se demora en alcanzar el máximo consumo.

Es posible observar que existe una gran variabilidad en el porcentaje de aumento en el consumo como en el tiempo que demore en alcanzar el máximo valor. Los resultados obtenidos por Ronning y Laben (1966), Coppock *et al.* (1974) y Bines (1979) demuestran que el punto de máximo consumo se alcanza en menor tiempo cuando se aumenta la proporción de concentrado en la dieta total.

(4) *Partición de la energía.* Para el desarrollo de cualquier modelo de simulación que implique procesos biológicos, fisiológicos, químicos y bioquímicos, es necesario conocer lo más acertadamente posible lo que sucede con los diferentes nutrientes que el animal normalmente consume.

Los nutrientes más importantes para el animal son la energía, la proteína, los minerales y las vitaminas.

Para el caso de Carata, parece que el nivel de fósforo es tan importante como el nivel de energía. También, es importante reconocer el efecto del medio ambiente sobre el requerimiento de energía. Por esta razón, el modelo está restringido a energía, calcio y fósforo.

La información existente respecto al valor energético de los diferentes forrajes y gramíneas es bastante amplia, no así la de las plantas acuáticas o de zonas lacustre. Por otra parte, los requerimientos de los animales y en particular de las vacas lecheras son igualmente conocidas. Aún cuando existen algunos aspectos del mismo que muchas veces se prestan para controversia, existe en ambos temas bastante información (MAFF 1975; Van Es 1975, 1976; NRC 1978; Blaxter 1980; ARC 1980).

Dado que los alimentos tienen diferente concentración energética es necesario analizar brevemente la razón de esta variación. El contenido energético de los alimentos depende básicamente de la proporción de grasas, proteínas y carbohidratos. Según señalan MAFF (1975) y ARC (1980), en las praderas (ya sean gramíneas o leguminosas), el contenido de grasa es menor al 5% y la proteína fluctúa entre 10% y 20%. En otras palabras, entre el 80% y el 85% de la energía de la pradera estaría dada por los carbohidratos. Esto explica por qué el contenido de energía bruta de los forrajes es bastante constante y se acepta un valor de 4.4 Mcal/kg de MS (MAFF 1975; ARC 1980).

Otra característica de la energía es que su disponibilidad es variable. La forma de estimarla es midiendo su digestibilidad que puede hacerse por diversos métodos (Tilley y Terry 1963; Barnes 1973; Van Soest 1975). Algunos de estos métodos separan el contenido celular de la pared celular para tratar de lograr una mejor aproximación de la digestibilidad. Otros en cambio, se refieren a la digestibilidad sin realizar separación entre los componentes celulares. Ambos métodos son igualmente buenos y sus resultados no difieren en forma significativa. En última instancia, el método que se utilice va a depender de la exactitud con que se desee trabajar y del costo que ello signifique.

La proteína es necesaria para una serie de procesos tales como formación de tejidos, producción de leche, y otros. Puede ser usada por el animal para obtener energía, sin embargo, su utilización es ineficiente en tal sentido, ya que debe sufrir un proceso de desaminación.

La información sobre el contenido proteico de las praderas es algo más limitada. En términos generales se podría señalar que el contenido de proteína cruda (PC) de las praderas de zona templada y forrajes de zona lacustre, está por sobre el 10% de la materia seca.

En vacas de alta producción se ha experimentado la protección de las proteínas contra la actividad microbiana ruminal. En este sentido, Journett y Demarquilly (1979) y Kaufman y Luppig (1982) han demostrado la conveniencia de esta práctica. Por otra parte, ARC (1980) y Ørskov y Macleod (1982), señalan que tanto los factores que afectan la disponibilidad de proteína a nivel intestinal, como la cuantía de ellos, no es completamente conocida.

La energía proporcionada por los diferentes alimentos se utiliza para una serie de procesos de tipo fisiológico, productivo y reproductivo. Sin embargo, no toda la energía es aprovechada en estos procesos y parte de ella se pierde. De aquí nacen los conceptos de energía digestible y energía metabolizable.

Moe (1981) define energía digestible (ED) como la energía bruta consumida menos la energía perdida en las heces. Por su parte, la energía metabolizable (EM) se define como la energía digestible menos las pérdidas en forma de metano y orina.

Por otro lado, la energía metabolizable de los alimentos es utilizada con eficiencias diferentes para una serie de funciones como mantención, lactancia, ganancia de proteína, ganancia de grasa y ganancia de tejido total. Las eficiencias para estos casos se designan como Km, Kl, Kp, Kf y Kgl, respectivamente. De aquí nace también el concepto de incremento calórico (IC) el cual define Moe (1981) como el incremento en la producción de calor asociado con un incremento en el consumo de alimentos; en otras palabras, el IC es la ineficiencia en la utilización de la energía (Cañas 1983). Otros factores que afectan la utilización de la energía son la densidad calórica de la dieta y el tipo de alimento.

El NRC (1978), INRA (1980) y ARC (1980) han incorporado los conceptos dados anteriormente en los sistemas de alimentación y por encima de los componentes estequiométricos presentan tres componentes básicos:

- Estimación de la EM de los alimentos
- Estimación de la eficiencia de utilización de la energía para las diferentes funciones
- Estimación de los requerimientos de los animales en términos de energía neta

Con esta información, y dado un cierto nivel de producción del animal, es posible establecer sus requerimientos. De esta forma, se puede formular una ración tendiente a satisfacer las necesidades de la vaca. Esto significa, por ejemplo, que en el caso de animales estabulados, donde se tienen prácticamente controladas las condiciones, el hecho de lograr una cierta producción se transforma en un proceso simple de suministrar los insumos que permiten obtener el producto.

El proceso inverso es posible realizarlo, es decir, dado un cierto consumo de EM y conociendo los requerimientos es posible predecir la producción de leche que tendrá un animal y las fluctuaciones que es dable esperar. Sin embargo, esto significa que debe existir un cierto criterio de partición de la energía que el animal consume, ya que el depósito de la energía en leche o peso varía, en la medida que progresa la lactancia (Broster 1972, 1974; Broster y Alderman 1976).

Además, la partición de la energía entre producción y leche y ganancia de peso puede ser influenciada por factores nutricionales. Al respecto, Moe *et al.* (1971) suministró diferentes relaciones de forraje:concentrado, encontrando que las vacas que reciben una relación 60:40 produjeron más leche que con una relación 20:80 y la energía almacenada en el cuerpo fue más baja.

Por otro lado, Forbes (1977a) desarrolló un modelo para predecir consumo voluntario y partición de la energía. Concluyó que las interrelaciones entre producción de leche, cambio de peso y cantidad y calidad de la dieta son complejas. El control del consumo voluntario de consumo y la partición de la energía entre secreción de leche y reservas corporales están medianamente entendidos.

Burt (1957) y Broster (1974) llevaron a cabo ensayos en alimentación de vacas lecheras a las cuales se les variaba el plano nutritivo y midieron la incidencia que éste tenía en la producción de leche; concluyeron que los factores que influyen en la partición de la energía durante la lactancia son muy limitados; sin embargo, para los efectos de simulación interesa conocer lo más acertadamente posible estos factores. Broster (1972, 1974) y Broster y Alderman (1976) señalan que la producción de leche de un día cualquiera del ciclo no sólo es el resultado del balance de energía y los requerimientos nutritivos, sino que esto está muy influenciado por el potencial individual, las reservas corporales y la nutrición previa.

Para entender el problema de la partición de la energía, y el metabolismo de los nutrientes específicos y de los tejidos en forma individual, son necesarias técnicas matemáticas más adecuadas para integrar la información en la descripción de la energía (Moe 1981). La simulación y modelación pueden ser una poderosa herramienta para dilucidar el problema de la partición de la energía.

Para los efectos de la subrutina de la partición de la energía se puso especial énfasis en tratar de identificar y cuantificar<sup>1</sup> las variables y la relación existente entre ellas. En general se podría señalar que se siguió la nomenclatura y procedimientos de especificación de nutrientes propuestos por el ARC (1980).

(5) *Componentes considerados en la partición de la energía.* Los componentes considerados en la partición de la energía se muestran en la Fig. 3. Como se puede observar, primero se debe calcular el consumo de materia seca total (CS).

El consumo de energía digestible total se calcula a partir de la energía bruta del forraje; como se conoce la digestibilidad de éste a través de todo el año, es posible calcular el consumo de energía digestible. Descontándole las pérdidas por gases y orinas que ascienden a alrededor del 18% se tiene el consumo total de energía metabolizable total proveniente del forraje. A éste se le puede agregar, si es el caso, la energía metabolizable del concentrado, de tal forma de obtener el consumo total de energía metabolizable (CE).

La energía total consumida puede seguir varios caminos. Si bien es cierto que las diferentes actividades o funciones productivas se desarrollan en forma simultánea, para los efectos del modelo se consideran como procesos secuenciales. Asimismo, se asignaron diferentes prioridades en el uso de la energía metabolizable consumida. Este procedimiento es congruente con el seguido por Bywater (1976). Este investigador aseveró que el requerimiento de mantención y desarrollo fetal constituyen un costo absolutamente necesario y que debe ser deducido del "pool" (conjunto) de nutrientes antes de realizar los cálculos siguientes. El remanente de metabolitos quedaría disponible para producción de leche y ganancia de peso en términos del recambio normal y crecimiento absoluto.

El metabolismo basal, como lo indica el ARC (1980), es la energía para mantener las funciones vitales; esto implica energía para el funcionamiento de los diversos órganos y actividades tales como echarse, pararse, caminar, etc. El costo total de energía para los efectos de mantención, está relacionado con la eficiencia Km con que se utilice la energía. A su vez, ésta está influenciada por la metabolizabilidad de la energía. Esta última se encuentra afectada por la digestibilidad de la MS.

Posteriormente se deduce de la energía consumida el costo de cosecha (CC) que, en este caso por estar los animales a sogueo, se ha considerado igual a cero. El requerimiento de mantención más el costo de cosecha y la energía gastada en regulación de temperatura constituyen lo que se llama *requerimiento ecológico de mantención* (Cañas et al. 1983). La información respecto a la magnitud de este gasto es bastante controvertido. Según Broster (1972) y Osuji (1974) el requerimiento de mantención de animales a pastoreo no está del todo claro. No obstante, las determinaciones bajo estas condiciones presentan valores más elevados que aquellos que se logran con animales confinados y en donde todas las condiciones están bien controladas.

En el caso que el consumo de energía metabolizable sea inferior que las necesidades para mantención y costo de cosecha, el modelo considera que el animal puede hacer uso de sus reservas para cubrir tales requerimientos, lo que implica que el animal perderá peso.

Una vez cubierto el requerimiento de mantención, costo de cosecha y regulación de temperatura, queda un remanente de energía, el cual puede denominarse "pool" de energía. Este "pool" puede ser utilizado en actividades productivas como la síntesis de leche y el incremento de peso. Ambos procesos pueden ocurrir simultáneamente en gran parte del ciclo de la lactancia. Sin embargo, la movilización preponderante de la energía hacia producción de leche o cambio de peso depende de la etapa de la lactancia en que se encuentre el animal.

Los animales en el primer tercio de la lactancia tienen una gran demanda de energía ya que la curva de lactancia está en su parte ascendente. Especial relevancia alcanza esta situación en vacas de mediana o alta producción; en estos animales la producción de leche tiene prioridad absoluta en el uso de la energía frente a la ganancia de peso. Por ello, en esta etapa el animal pierde peso en una magnitud que va a depender del plan nutritivo. Pasada esta etapa, el animal, normalmente comienza a ganar peso. Esto implica que la prioridad en el uso de la energía se invierte (Swan 1976). Sin embargo, si disminuye el consumo de energía en la lactancia media se reduce tanto la producción de leche como el aumento de peso, produciéndose incluso pérdidas de peso, hasta que se alcanza un nuevo equilibrio entre ambas variables (Broster 1974; Swan 1976). En este caso, una realimentación posterior provoca un aumento tanto de leche como de peso. Sin embargo, si la restricción alimenticia se produce en el primer tercio de la lactancia se afecta el pico de la misma y no se recupera el nivel

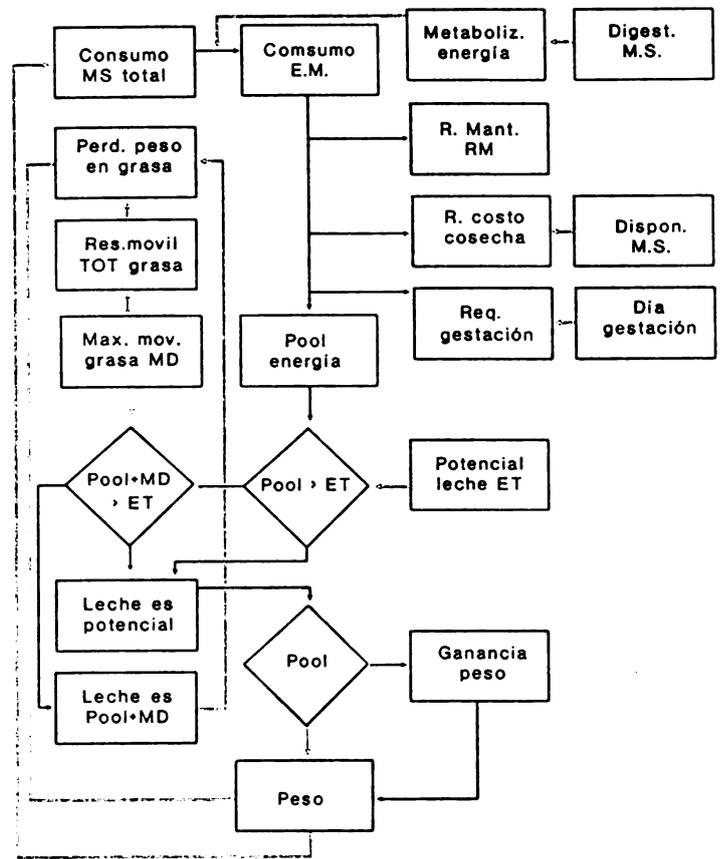


Fig. 3 Partición de la energía

original. Si continúa la subnutrición se afecta la pendiente de la curva en la parte descendente y con ello la persistencia de la lactancia.

El pico de producción de leche se encuentra desfasado respecto al consumo. Además, la producción de leche disminuye a una tasa más rápida que el consumo, con lo cual se produce un aumento creciente de energía metabolizable que queda disponible para ganancia de peso.

De acuerdo a las proposiciones planteadas y a las prioridades en el uso de la energía entre leche y peso, puede considerarse que durante la lactancia la ganancia de peso tiene una importancia secundaria respecto a la producción de leche. Por lo tanto, en el modelo de Carata se utilizó el mismo criterio.

El rendimiento potencial de leche (POTDIA) corresponde a la leche que es capaz de producir el animal con un manejo óptimo del hato. Este rendimiento puede ser modificado de acuerdo a la producción que registre la vaca durante las primeras 12 semanas de lactancia. Por otra parte, es posible aumentar el rendimiento potencial del rebaño como consecuencia de la selección.

La vaca, una vez que cubre el requerimiento ecológico de mantención, tiende a producir la leche potencial (POTDIA). Esta producción está determinada por el potencial (POT) y el día de lactancia (NLAC). Si se conoce la leche potencial que el animal es capaz de producir se calcula según el día de la lactancia, el contenido de energía metabolizable necesaria para producir la leche potencial (REQDIA).

Con estos antecedentes se compara si el remanente de energía metabolizable es igual, mayor o menor que la energía necesaria para producir la leche potencial. Si se da el primero de los casos, el animal producirá el rendimiento potencial. La energía que gastará el animal en tal función dependerá de la eficiencia con que se utilice; esto constituye el Kpl. Esta eficiencia depende de la metabolizabilidad de la energía, la cual, al igual que las otras eficiencias, está influenciada por la digestibilidad de la materia seca.

En caso que la energía remanente fuese menor que la energía necesaria para producir el rendimiento potencial, el animal tiene la capacidad, como se señaló, de movilizar grasa (eficiencia constante de 82%) a una cierta tasa diaria. Aquí el modelo compara si con la energía de la grasa movilizada se alcanza a reunir la energía total (REQDIA) que se requiere para producir el rendimiento potencial. De ser así, se producirá la leche potencial. El Kpl actúa influenciado por los mismos factores que se señalaron anteriormente. Por otra parte, dado que se movilizó una cierta cantidad de grasa, el peso del animal disminuye y con ello se afectan las reservas movilizables totales.

Si por el contrario, el remanente de energía que quedó después de descontar el requerimiento del costo ecológico de mantención, más la movilización de grasa no son suficientes para producir el rendimiento potencial, el animal solamente producirá una cantidad determinada de leche. Esta se obtendrá sumando la energía remanente del consumo más la energía que proporcionan las grasas y dividiendo por el valor calórico de la leche (VC) considerando el correspondiente Kpl.

Es necesario señalar que dado el peso postparto y las variaciones de peso durante el período interparto, el animal tiene una cierta cantidad porcentual del mismo que puede movilizar durante todo el período de la lactancia. Esta cantidad está constituida por la reserva movilizable de grasa y el animal es capaz de movilizar una cierta cantidad diaria de ella. La máxima movilización diaria (LIMITE). En el modelo, con vacas de baja producción, como es el caso de Carata, se considera un valor constante de 4% del peso al inicio de la lactancia, como cota superior de pérdida de peso total, a través de este proceso de movilización de reservas, en el primer tercio de la lactancia. Este valor se ha planteado como una hipótesis plausible y debe ser estudiado en posteriores investigaciones realizadas en la región.

En caso que el consumo de energía metabolizable exceda la demanda para producir la leche potencial, la vaca incrementará de peso en función del Kgl y, dado que son animales adultos, nuevamente comenzarán a almacenar grasa.

Debe señalarse que de acuerdo a la leche producida durante los primeros 100 días de lactancia se puede afectar el rendimiento potencial de leche y con ello la partición de la energía, asumiendo que el pico de la lactancia se logra, en las vacas de Carata, a los 100 días, valor que también debe ser estudiado.

Finalmente, de acuerdo al algoritmo de partición de la energía (Fig. 3), la energía utilizada para sintetizar leche o para el incremento de peso, es el resultado del proceso de simulación.

(6) *Relaciones en la partición de la energía.* De acuerdo a la identificación de las diferentes variables que afectan la partición de la energía y las relaciones existentes en ellas, se hace necesario, para desarrollar un modelo de simulación, lograr su cuantificación.

Previamente, es menester definir la metabolizabilidad de la energía. Esta puede definirse según lo señalado por ARC (1980) como la concentración de EM del alimento expresado como porcentaje de la energía bruta (EB) del mismo.

La EB de la MS es relativamente constante en las praderas. Según el ARC (1980) el valor medio que mejor representaría esta relación es 4.4 Mcal/kg de MS.

Por otra parte, según el MAFF (1975) las pérdidas de energía en gases y orina son relativamente constantes y del orden del 18%. Esto permite estimar la metabolizabilidad de la energía conociendo la digestibilidad de la materia seca. Sin embargo, en este sistema, la energía metabolizable es un valor de entrada, ya que se utiliza una tabla de alimentos y una ración como dato de entrada. Si no se logra la máxima producción lechera, el modelo determina la máxima producción con la ración ingresada. Esto sólo puede hacerse debido a que no están en condiciones de pastoreo.

(7) *Costo energético del catabolismo de ayuno y requerimiento de mantención.* En el humano, el metabolismo basal se refiere al cambio químico que ocurre en la célula disipando calor (producto de la oxidación de tejidos) cuando éste se encuentra en ayuno y bajo condiciones basales; esto implica ambiente de termoneutralidad, estado post absortivo, estado consciente, tranquilidad y reposo sexual (Cañas *et al.* 1983). Dado que en rumiantes es difícil determinar el estado post absortivo, se habla de catabolismo de ayuno. Para su determinación se deja al animal en ayuno por un período de 48 o 72 horas hasta que el cociente respiratorio no proteico sea equivalente a la catabolización de las grasas (0.7).

El catabolismo de ayuno está directamente relacionado con el tamaño metabólico, el cual corresponde al peso del animal elevado a un cierto exponente. Según Reid *et al.* (1980), la literatura cita exponentes en un rango entre 0.5 y 1.0. Moe (1981) sugiere un valor de 0.734 para novillos en crecimiento, lo que concuerda con el valor 0.73 del NRC (1978).

Por otra parte, en el Simposium de Metabolismo de la Energía de 1964 se adoptó el valor de 0.75 como base de referencia para comparar el metabolismo de diversos animales. Este valor es el que presenta un mejor ajuste. Al relacionar el calor desprendido con el oxígeno consumido, el pulso y el volumen sanguíneo llevó a Kleiber a postular que "si el tamaño corporal y el metabolismo están relacionados al transporte de oxígeno y si la relación volumen/latido es proporcional al peso, y el pulso es exactamente proporcional a la potencia  $1/4$  de peso, entonces la intensidad del flujo sanguíneo será proporcional a la potencia  $3/4$  del peso".

Para estimar el catabolismo de ayuno, el ARC (1980) utiliza un exponente de 0.67. Broster y Broster (1932), citado por Moe (1981), emplearon un valor de 0.734.

Para el caso del modelo de Carata, se decidió utilizar el valor de Kleiber (0.75), que parece ser el más aceptado universalmente.

Conociendo el tamaño es posible calcular el catabolismo de ayuno y con ello se puede estimar el requerimiento de mantención.

Dada la relación encontrada por Kleiber (1932), citado por Cañas *et al.* (1983), entre flujo sanguíneo y metabolismo basal se obtuvo que el calor que se desprende durante el metabolismo basal es proporcional a la superficie corporal, o sea el peso elevado a la potencia 0.75. La ecuación que representa en forma general esta relación es:

$$Y = aW^{0.75} \quad [98]$$

donde:

Y = metabolismo basal  
W = peso  
a = constante

La constante "a" también ha sido motivo de controversia respecto a su valor. Al respecto, Brody (1945), citado por Cañas *et al.* (1983), señala que el catabolismo de ayuno sería igual a:

$$ENm = 70.5W^{0.75} \quad [99]$$

donde:

ENm = energía neta de mantención, kcal/día

Para Kleiber (1947), citado por Cañas *et al.* (1983), el término libre tiene un valor de 67.5.

Posteriormente, Lofgreen y Garrett (1968) encontraron que el valor de la constante es de 77 kcal/W<sup>0.75</sup>. Agregándole algo menos de 4% como margen de seguridad, la ecuación encontrada es:

$$ENm = 80W^{0.75} \quad [100]$$

Esta expresión corresponde a la energía neta de mantención calculado en novillos, que corresponde también al de vacas secas. Sin embargo, numerosas investigaciones han demostrado que la energía neta de mantención aumenta con la lactancia. Así, García (1981) demostró que la energía neta de mantención en vacas lecheras llegaba a valores de 180 kcal/W<sup>0.75</sup>, valor semejante al encontrado por Cañas (1974).

La eficiencia de mantención (Km), es función de la densidad calórica de la ración, y se calcula mediante la siguiente función:

$$Km = 54.6 + 6.818C \quad [101]$$

donde:

C = concentración calórica de la ración, Mcal EM/kg MS

Es por lo anterior que el modelo usa dos requerimientos de mantención, dependiendo si la vaca está en leche o seca. Las ecuaciones son las siguientes:

$$RM(\text{vacas en leche}) = (180W^{0.75})/Km \quad [102]$$

$$RM(\text{vacas secas}) = (120W^{0.75})/Km \quad [103]$$

(8) *Costo energético para producción de leche.* Este costo está en relación directa al valor calórico de la leche (VC) el cual, a su vez, depende del contenido de grasa y sólidos no grasos, los cuales varían a través de la lactancia.

Para los efectos del modelo, y de acuerdo a la literatura, se consideraron tres períodos, en los cuales se produce una variación en el VC de la leche. Los valores de energía neta (EN) considerados fueron:

Período de la lactancia, días	VC, Mcal EN/kg
1 a 28	0.725
29 a 140	0.703
141 a 305	0.730

La eficiencia con que la energía metabolizable proveniente del alimento se utiliza para producir leche es variable, según varios autores. Wood (1979) en un modelo de simulación para vacas lecheras, utilizó un valor constante de 0.62. Por otra parte, Van Es (1976), citado por Wangsness y Müller (1981), indica que la eficiencia fluctúa entre 0.60 y 0.65. Este valor es coincidente con el señalado por Moe (1981) y que corresponde a un valor entre 0.6 y 0.64. Sin embargo, Van Es y Nijkamp (1976), citados por Moe (1981), calcularon valores más bajos y que fluctuarían entre 0.54 y 0.58.

El ARC (1980) señala que la variación en la eficiencia de utilización de la energía para leche (Kpl) se encontraría afectada por la metabolizabilidad de la dieta. Esta situación llevó a calcular el Kpl en el modelo como sigue:

$$Kpl = \frac{0.35C}{4.4} + 0.420 \quad [104]$$

Conociendo el Kpl es posible calcular el requerimiento de EM necesario para producir un litro de leche según la siguiente expresión:

$$EL = \frac{VC}{Kpl} \quad [105]$$

donde:

EL = energía metabolizable para producir un litro de leche

Este valor (EL) podría usarse como una constante, equivalente a 1.2 kcal de EM por cada litro de leche producido.

Para calcular la energía necesaria para producir una cantidad dada de leche, se debe multiplicar (EL) por la producción de leche.

Respecto a la eficiencia con que las reservas corporales se utilizan para producir leche, los valores utilizados fluctúan entre 80% y 85%. Wood (1979) utiliza en su modelo un valor de 0.80. Van Es (1976), citado por

Wangsness y Müller (1981), y el ARC (1980) dan un valor de 0.84. Finalmente, Romero *et al.* (1976) concluyeron que el valor de esta constante es 0.85.

Para efectos del modelo se tomó el valor que más se repite, y que también refleja un promedio, cual es de 0.82. Esto significa que de cada 100 Mcal de energía proveniente de pérdida corporal, 82 Mcal se depositan como leche. Dado que en el modelo se trabaja con vacas adultas, se consideró que éstas movilizan grasa.

(9) *Costo energético del incremento de peso.* Este costo depende de la energía bruta del kilo de peso y de la eficiencia con que se deposite. La eficiencia con que se deposita la energía (ARC 1980), depende si la vaca está lactando o si está seca y de la metabolizabilidad de la energía. La ecuación utilizada fue:

$$\text{Kgl} = 0.95 \text{ Kpl} \quad [106]$$

La preñez tiene un efecto marcado sobre la eficiencia de utilización de la energía. Se ha encontrado que la preñez, simultáneamente con lactancia, permite una eficiencia de 74.7%; en cambio, para vacas secas este valor es de 60%. Esta mayor eficiencia, debido al anabolismo de gestación, no se considera en el modelo de Carata, debido a que en esta región es poco común encontrar animales que se encuentren lactando y preñadas.

### c. Resultados y discusión

(1) *Validación.* La etapa de validación consideró pruebas estadísticas con los resultados presentados en diferentes investigaciones realizadas en distintos países. Además, algunos componentes del modelo se verificaron con información bibliográfica existente.

La primera verificación se hizo con las investigaciones de Leaver *et al.* (1969), donde las vacas pesaban 500 kg en promedio (8 vacas, utilizando seis períodos de 25 días cada tratamiento) y se encontraban pastando praderas en crecimiento, en Inglaterra. De los resultados obtenidos se estimó un error porcentual de 2.6% para el consumo de MS/vaca/día.

La validación total del modelo se realizó con un experimento en la Pontificia Universidad Católica de Chile (Ozores 1983), donde los resultados fueron los siguientes (Cuadro 3):

Cuadro 3. Validación del modelo de Carata, por tercio de lactancia, usando los datos de Ozores (1983)			
Tratamiento	Observación real	Predicción del modelo	Error porcentual del modelo
Producción de leche, l/día			
I	23.0	24.0	4.8
II	24.1	24.2	0.2
III	23.6	24.0	1.7
Peso corporal, kg			
I	559.2	560.0	0.143
II	526.8	529.0	0.434
III	521.8	508.0	-2.850

Cada tratamiento corresponde al resultado de seis vacas por un período de 100 días, siendo la producción real indicada en el cuadro anterior, el promedio de estas producciones.

En general, los resultados indican que el modelo es un buen estimador para los efectos de estudios de rendimiento y producción del rebaño lechero. Esto se debe a que el error porcentual, utilizando el método de Cañas (1974), es inferior a 4.8%.

Se hace necesario validar el modelo en las condiciones de Carata, donde es posible que existan otras deficiencias (además de la energía), que el potencial de las vacas criollas no sea tan alto como el estimado o que el efecto de la temperatura sea diferente al estimado (y que no se ha validado aún).

(2) *Restricciones del modelo.* Aunque las restricciones de los modelos han sido abordadas en los párrafos anteriores, es necesario destacar aquí aquellas más importantes.

La función de consumo del modelo estima valores máximos aleatorios alrededor del 3% del peso. Esto resulta perfectamente válido para ganancia de peso en novillos, pero no es igualmente cierto para las vacas. A pesar de esto, el modelo utiliza esta función dado que el potencial lechero de las vacas de Carata resulta ser muy bajo.

El valor nutritivo de los forrajes, expresado en Mcal de EM/kg MS, está restringido a un rango de valores normales de forrajes, que en el caso de la energía es semejante al de los novillos, fluctuando entre 1.3 y 2.5 Mcal/kg de materia seca.

Este modelo acepta que existe un efecto del medio ambiente, factor que no ha sido verificado experimentalmente. Faltaría una adecuada investigación al respecto.

El modelo usa características de la raza Holando Europea, modificadas a menor producción, ello con objeto de asemejarse en mejor forma a las vacas criollas de Carata. Es evidente que esto requiere mayor investigación.

El largo de la lactancia se ha restringido a 300 días, ya que se está utilizando la ecuación de Wood, que al extrapolarla puede producir resultados erráticos.

Cuando en el modelo se produce un balance de energía negativo, la producción del día puede ser igual a cero. El modelo se detiene si ello sucede durante tres días consecutivos, para recalcar tal situación.

El modelo supone que al inicio de la lactancia los animales tienen un peso adecuado. Por consiguiente, durante los primeros 100 días de lactancia pueden perder hasta el 4% de su peso inicial. Este valor corresponde a vacas de baja producción, sin embargo, debería afinarse con resultados de investigación en Carata.

## 6. MODELO DE CONSUMO DE VACAS LECHERAS A PASTOREO

### a. Introducción

Cuando la producción de leche se realiza en forma intensiva y tecnificada, se hace más necesaria la planificación en el mediano y largo plazo del uso de los recursos. En tal esquema, un factor de importancia es la estimación adecuada de la capacidad de consumo de las vacas, a lo largo del ciclo de lactación-gestación, de tal modo que sean factibles y confiables las estimaciones de las diferencias en producción que pueden existir entre distintas pasturas y sistemas de manejo.

El consumo puede estimarse por diferentes métodos y con variados grados de exactitud. Los modelos usados con mayor frecuencia para predecir el consumo en vacas lecheras consisten en ecuaciones de predicción. El desarrollo de éstas está basado en un conjunto de datos experimentales y procedimientos matemáticos, como el de mínimos cuadrados, para calcular los coeficientes que relacionan las variables independientes con el consumo, ya sea de materia seca (MS), energía digestible (ED) o energía neta (EN), considerado como variable dependiente.

Bines (1979), Broster *et al.* (1979) y Brown *et al.* (1981) han presentado un conjunto numeroso de modelos de este tipo, en los cuales se plantea detalladamente las ventajas e inconvenientes de los mismos cuando son usados para fines de predicción.

En general, los modelos desarrollados mediante técnicas de regresión son muy adecuados para describir cuantitativamente las relaciones que presentan un cierto número de variables, seleccionadas a partir de un conjunto de datos. El valor predictivo de estos modelos puede ser muy alto cuando se aplica sobre un conjunto de datos obtenidos en condiciones similares a las originales; pero, su empleo en un contexto más general es riesgoso y no resultan adecuados para el tratamiento de variables interrelacionadas. Esto sucede en el caso de consumo, cuando el supuesto de que éste estaría regulado por la demanda general de energía de la vaca (mantenimiento, producción, etc.) no es válido, como ocurre al comienzo de la lactancia. Lo mismo puede decirse cuando está regulado por factores físicos, como ocurre en general en condiciones de pastoreo (Hogdson 1977; Bines 1979; Durán *et al.* 1984).

Si bien existen procedimientos que permiten neutralizar artificialmente algunas de estas limitaciones en los modelos de regresión (Montero 1972), el empleo de modelos de simulación basados en algoritmos computacionales presenta ventajas considerables, puesto que permiten mayor flexibilidad para analizar y representar un conjunto amplio de variables interrelacionadas. Además permiten hacer uso de un mayor volumen de información, utilizando ecuaciones racionales y, por lo tanto, generalizables.

Este último enfoque se ha empleado satisfactoriamente para estimar el consumo en ovinos en condiciones de pastoreo (Freer *et al.* 1970; Arnold y Campbell 1972; Vera *et al.* 1977; Sibbald *et al.* 1979), de novillos en crecimiento (Wright *et al.* 1975; Catrileo 1981) y de vacas lecheras a pastoreo (Durán 1983; Hazard 1984).

Así mismo, Forbes (1977a) ha desarrollado un modelo para vacas lecheras que tiene por finalidad analizar las interrelaciones entre los mecanismos físicos y metabólicos de control de consumo durante la lactancia. Por otra parte, el trabajo de Bywater (1981) representa un análisis y simulación detallada de los factores que afectan el consumo, relacionados con la composición de la dieta y procesos de digestión.

La información disponible sobre los factores que afectan el consumo de vacas lecheras es considerable, con conocimientos y descripciones cuantitativas de los mismos, pero que en general se encuentran dispersos y considerados como parte de un problema muy específico. Su integración a un modelo permitiría no sólo ganar una mayor comprensión del problema global, sino, además, obtener un instrumento que permita estudiar simultáneamente las variables relacionadas con el animal, características de la dieta y decisiones de manejo.

El modelo que se describe a continuación tiene como objetivo integrar en forma simplificada los conocimientos relativos al consumo de vacas lecheras, con la suficiente precisión y facilidad de operación como para ser utilizado en la planificación del uso de pasturas y concentrados en vacas lecheras.

#### **b. Factores que afectan el consumo**

Los distintos factores que influyen sobre el consumo voluntario en ruminantes, particularmente en vacas lecheras, pueden agruparse de acuerdo a su relación con características intrínsecas del animal, de la dieta ofrecida,

del manejo, o del clima (Broster *et al.* 1979; Freer 1981). Los dos primeros son los más importantes y sobre los que existe mayor información.

Los factores asociados al manejo se refieren básicamente al tiempo de acceso a los alimentos, frecuencia de las comidas y formas de presentación de las mismas (Bines 1979). Bajo condiciones de pastoreo, estas características tienen escasa o nula relevancia. Sin embargo, son muy importantes ciertas decisiones de manejo de los animales y pasturas, porque afectan la cantidad y calidad de la dieta disponible. Estos dos últimos elementos determinan la efectividad de las decisiones de manejo relativas a rotaciones, sistemas de pastoreo y estrategias de uso de concentrados, como se analizará más adelante.

Respecto al clima, es conocido el efecto negativo de las temperaturas superiores a 27-30°C sobre el consumo de materia seca en vacas de razas de climas templados. Por otra parte, las temperaturas bajas generalmente no son limitantes, excepto por debajo de -10°C (Bines 1979). Debido a que existe un rango amplio de temperaturas que no tienen un efecto medible sobre el consumo, este factor no ha sido considerado en el desarrollo del modelo.

Por consiguiente, los principales factores que se toman en cuenta y se discuten en detalle son aquellos relacionados a características propias del animal y de la dieta ofrecida. En la Fig. 4 se presenta un algoritmo con las variables consideradas, así como sus principales interacciones.

El procedimiento utilizado para el desarrollo del modelo supone que es posible estimar el consumo potencial de forraje de las vacas (COPOFO) expresado en kilogramos de materia seca por día, en cualquier día del ciclo de lactación-gestación, que se inicia con un parto y finaliza el día antes del parto siguiente. La duración del ciclo está definida, por consiguiente, por el período de parto-concepción y por la duración de la gestación. Se consideró valores medios de 85 y 280 días, respectivamente, para ambas variables, de manera de simular un ciclo normal de 365 días.

El consumo potencial de forraje está definido por cuatro características que definen el tipo de animal, el estado fisiológico en que se encuentra y la calidad y cantidad del forraje disponible para consumir. Estas características son:

- el tamaño normal de la vaca expresado por su peso vivo normal (generalmente el peso que representa la vaca entre el sexto y séptimo mes de lactancia);
- el rendimiento potencial de leche por lactancia (RENDIPO), referido a una lactancia estándar de 305 días y expresada en kilogramos totales de leche corregida al 4% de grasa (LCG);

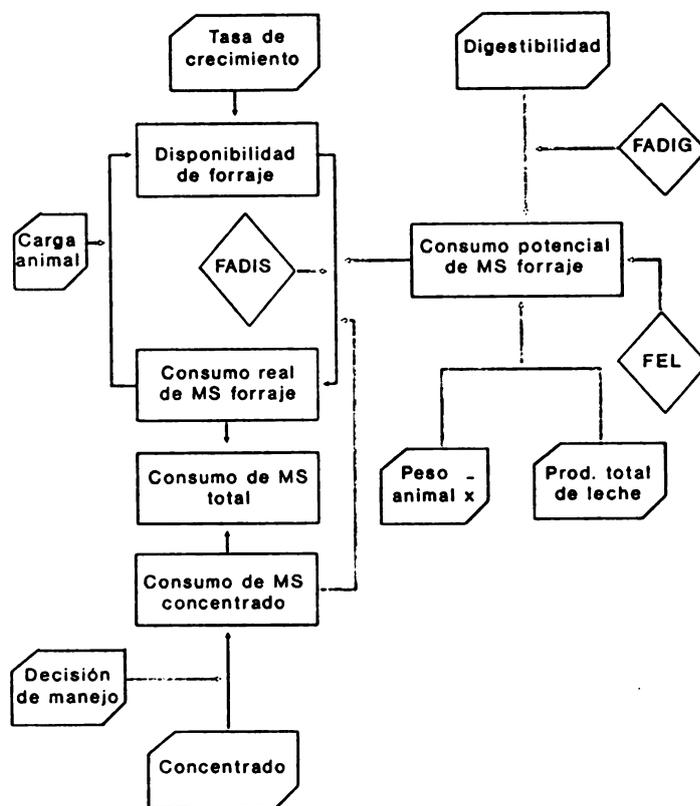


Fig. 4 Diagrama de flujo del consumo (ver definiciones de FADIG, FADIS y FEL en el acápite 6b en el texto)

- el estado fisiológico, en función de la etapa de la lactancia (FEL), indicada por el día o días específicos que se desea estimar el consumo, contando como 1 el día del parto, y así sucesivamente, hasta el fin del ciclo de 365 días;
- la calidad del forraje, indicado por su digestibilidad.

De manera que el consumo potencial del forraje varía en función de estas cuatro variables, que por ser externas al modelo deben ser ingresadas.

El consumo real del forraje es en función del consumo potencial estimado (COPOFO), de la cantidad de forraje disponible por hectárea (cuyo efecto se expresa por medio de un factor de ajuste por disponibilidad (FADIS)) y del consumo de materia seca de concentrado (cuyo efecto se indica por un factor de ajuste por consumo de concentrado).

El consumo total de materia seca (MS) corresponde entonces a la sumatoria del consumo de concentrado y de forraje. Si se toma en cuenta la digestibilidad del forraje y del concentrado, se puede calcular directamente la energía digestible (ED) consumida, suponiendo que no hay interacciones entre la digestión del forraje y del concentrado.

La cantidad de concentrado a suministrar es una decisión de manejo que debe ingresarse al modelo, al igual que la disponibilidad de forraje. Esta última se puede calcular en función de la tasa de crecimiento diario de la pastura y la dotación de vacas por hectárea, como lo indica la Fig. 4.

### c. Relaciones cuantitativas entre los factores

Una vez establecidas las variables exógenas al modelo que tienen relación con el consumo, se define el conjunto de ecuaciones matemáticas que caracterizan dichas relaciones.

(1) *Tamaño corporal.* El tamaño del animal es una de las variables que tienen mayor efecto en el consumo de MS, ED o EN (Bines 1979; ARC 1980). Sin embargo, es difícil determinar la expresión cuantitativa que relaciona ambas variables con independencia del rendimiento de leche y de la calidad de la dieta consumida. Por esta razón se tomó como base el valor de 135 gramos de MS, por unidad de peso metabólico, calculado por ARC (1980), como consumo medio representativo de vacas con rendimientos de 5200 kg de LCG (16 kg/día) corregida a 305 días y dietas con una metabolización media de 0.6. Estos valores equivalen a 28.5 g MS/kg de peso, para vacas de 500 kg, con una digestibilidad media de la MS de 73 por ciento.

Las estimaciones de consumo, en el modelo, se refieren al consumo de kilos de MS por kilo de peso vivo. Una vez realizada esta primera estimación, se calcula un consumo total del animal en función de su tamaño corporal, valor que se corrige posteriormente por factores de rendimiento potencial de la lactancia, digestibilidad de la MS, etapa de la lactancia y disponibilidad de MS por hectárea.

(2) *Rendimiento potencial de leche.* Es difícil establecer la relación cuantitativa general que relaciona el rendimiento potencial con el consumo. Broster y Alderman (1977) y ARC (1980) presentan una discusión detallada del tema. Los valores experimentales difieren según si las determinaciones se han realizado en períodos parciales de la lactancia o durante el ciclo completo de lactancia. También están influenciados por las dietas usadas, pero, como el efecto de este último factor no está bien conocido, se prefirió usar un valor general de 0.4 kg extra de MS consumida por kg extra producido sobre los 5200 kg de leche, o que se deja de producir por debajo de este valor. El factor de corrección del consumo por rendimiento de leche (FRP), estará representado por la ecuación:

$$FRP = 0.4 \frac{RENDIPO - 5200}{305} \quad [107]$$

donde:

FRP = factor de corrección del consumo por rendimiento de leche  
 RENDIPO = rendimiento total de la lactancia, kg

(3) *Calidad de la dieta.* La relación entre el consumo y la calidad del forraje es compleja. Cuando se utiliza una única medición en el forraje para obtener una estimación del consumo, los parámetros que más se correlacionan con el consumo son el contenido de pared celular y la digestibilidad de la MS. Ecuaciones más complejas que incluyen, además de los dos parámetros anteriores, otras determinaciones tales como porcentaje de proteína cruda, porcentaje de celulosa, porcentaje de lignina, etc., no mejoran sustancialmente esta estimación.

En general, el valor predictivo del contenido de pared celular es más alto que el de digestibilidad, principalmente cuando se utiliza una única relación para forrajes de diferentes especies y variedades. Sin embargo, la información disponible sobre contenido de pared celular y su variación con la edad de los rebrotes o a través del ciclo de crecimiento, es bastante más limitada que la información sobre digestibilidad disponible para las especies de clima templado más comunes. Por esta razón se prefirió usar la relación entre el consumo de materia orgánica (MO) y la digestibilidad del forraje, basada en una revisión de experimentos de pastoreo realizados con vacas lecheras (Durán *et al.* 1984). El factor de corrección de consumo por digestibilidad (FADIG) está representado por la siguiente ecuación:

$$FADIG = 0.504DD - 7.67 \quad [108]$$

donde:

FADIG = factor de corrección de consumo por digestibilidad  
 DD = digestibilidad de la MS, %

Para una digestibilidad de 73%, la ecuación da un valor de 29 g MS/kg de peso, es decir, un valor similar al recomendado por ARC (1980) para vacas con rendimientos de 5200 kg de LCG.

(4) *Etapa de lactancia.* El consumo de materia seca a lo largo del ciclo de lactación-gestación presenta un patrón de variación bastante similar al de una curva de lactancia, excepto que los puntos máximos se encuentran desfasados, de manera que el máximo rendimiento de leche se produce varias semanas antes que el máximo consumo de MS (ARC 1980).

No existe aún una hipótesis racional y con base fisiológica que permita explicar este retraso del consumo, respecto a los requerimientos de producción. Por esta razón se prefirió utilizar un factor de corrección multiplicativo (FEL), calculado a partir de una curva promedio de variación de consumo, tal como la presentada por ARC (1980). Este criterio es similar al adoptado por Vera *et al.* (1977) para presentar adecuadamente la variación de consumo en ovejas lactantes.

La ecuación utilizada prevee que el máximo consumo ocurre entre las semanas 14 y 15 post-parto y representa un valor aproximadamente 60% mayor que el consumo medio de la primera semana post-parto. La ecuación es la siguiente:

$$FEL = e^{-1.9526+0.5121 \ln(X+20)-0.00397X} \quad [109]$$

donde:

X = día de la lactancia

(5) *Disponibilidad de forraje.* En pasturas de clima templado, la disponibilidad de forraje, es decir, la cantidad de MS de forraje presente en un instante dado de tiempo por unidad de área, afecta el consumo voluntario de los animales. Aunque no todo lo que está encima del suelo sea efectivamente disponible al animal y habiendo otros factores como la longitud de hoja, relación tallo/hoja, etc., que también tienen efecto sobre el consumo, existe evidencia de estrecha relación entre disponibilidad de forraje y consumo.

La relación entre consumo y disponibilidad generalmente se representa por una función de tipo exponencial asintótico, de la forma:

$$Y = C (1 - De^{Kx}) \quad [110]$$

donde:

Y = consumo  
X = disponibilidad de forraje por hectárea  
C, D, K son parámetros

El valor asintótico de C no es obviamente único, debido a que día a día puede cambiar el estado fisiológico de la vaca y la digestibilidad de la pastura. Por esta razón, C se calcula diariamente y toma el valor de COPOFO. Los otros dos factores que afectan el consumo, es decir, el tamaño corporal y el rendimiento de leche, se consideran constantes a través de la lactancia. Esto no significa que las reservas corporales, determinadas básicamente por la grasa visceral y subcutánea no sufra variaciones, con las consiguientes variaciones de peso vivo de la vaca. Más bien es el tamaño corporal, en cuanto a las medidas lineales del animal, el que realmente afecta el consumo (Bines 1979), medidas que no varían si el animal no está en crecimiento.

El parámetro D puede tomarse como 1.0, para forzar la curva a que pase por el origen.

El parámetro K determina la pendiente de la curva y refleja la interacción entre el animal y la pastura. Por lo tanto, es probable que este valor no sea único, sino que, para una determinada categoría animal, el valor de K varía con determinadas características del forraje. Sin embargo, hasta el presente no se dispone de información a este respecto. Se utilizó el valor de K sugerido por Abreu (1975) de -0.001664 para vacunos pastoreando especies de clima templado.

En consecuencia, el factor de corrección por disponibilidad (FADIS), está dado por la relación:

$$FADIS = 1 - e^{-0.001664DM} \quad [111]$$

donde:

FADIS = factor de corrección por disponibilidad  
DM = disponibilidad de MS, kg/ha

(6) *Consumo potencial de forraje.* Dadas las relaciones anteriores es posible ahora estimar el consumo potencial de forraje, que estará dado por la relación:

$$COPOFO = FEL \left[ \frac{KG(FADIG) + FRP}{1000} \right] \quad [112]$$

donde:

KG = peso vivo, kg

(7) *Consumo de forraje corregido por disponibilidad.* Una vez estimado el consumo potencial de forraje, se calcula el consumo de forraje corregido por disponibilidad (COREFO) mediante la ecuación:

$$\text{COREFO} = (\text{COPOFO})(\text{FADIS}) \quad [113]$$

(8) *Relación entre consumo de forraje y concentrado.* La información disponible sobre el efecto del consumo de concentrado sobre el consumo de forraje en animales a pastoreo, muestra que a disponibilidades de forraje que no limitan el consumo, inevitablemente se produce sustitución de MS del forraje por MS del concentrado, de manera que el efecto esperado de la suplementación no es totalmente aditivo (Durán *et al.* 1984).

El grado de sustitución es aparentemente proporcional a la digestibilidad del forraje. La ecuación que mejor representaría la relación sería aquella desarrollada por Holmes y Jones (1964):

$$\text{CF} = 1.27 - \text{DD}(0.0154) \quad [114]$$

donde:

CF = efecto aditivo neto en consumo de MS por kg de consumo de concentrado  
 DD = digestibilidad del forraje, %

Se planteó una hipótesis sobre el comportamiento de consumo cuando se suministra concentrados en condiciones de restricción moderada en el consumo de forraje, debido a insuficiente disponibilidad. Para estos casos se adoptó el supuesto que el concentrado actúa en forma sinérgica hasta que el animal alcanza un nivel de consumo potencial (COPOFO), determinado por la calidad del forraje. Si después de consumir todo el concentrado, el consumo de materia seca es mayor que COPOFO, el exceso de concentrado es ponderado por la ecuación anterior, a los efectos de determinar el efecto aditivo neto real. Si el consumo real del forraje sumado al consumo de concentrado es inferior al COPOFO, entonces el consumo total de MS es la sumatoria de ambos consumos.

(9) *Consumo con disponibilidad limitante.* Para efectos del modelo se considera disponibilidad limitante cuando FADIS es menor que 0.984. En este caso se tiene que:

$$\text{DI} = \text{COPOFO} - \text{COREFO} \quad [115]$$

donde:

DI = efecto complementario del concentrado

Si se toma MC como los kilos de MS de concentrado suministrado por día, se distinguen dos casos cuando la disponibilidad sea limitante:

- Si  $\text{DI} < \text{MC}$  se tienen las siguientes relaciones:

$$\text{EA} = (\text{MC} - \text{DI}) \text{CF} \quad [116]$$

$$\text{ES} = (\text{MC} - \text{DI})(1 - \text{CF}) \quad [117]$$

$$\text{CR} = \text{COREFO} - \text{ES} \quad [118]$$

$$\text{CM} = \text{COREFO} + \text{DI} + \text{EA} \quad [119]$$

donde:

EA = efecto aditivo del concentrado  
 ES = efecto sustitutivo del concentrado  
 CR = consumo real MS forraje  
 CM = consumo total de MS

- Si  $DI \geq MC$  las relaciones serán las siguientes:

$$EA = ES = 0 \quad [120]$$

$$CR = COREFO \quad [121]$$

$$CM = COREFO + MC \quad [122]$$

$$DI = MC \quad [123]$$

En ambos casos se tiene que el consumo total, como porcentaje del peso (CX), estará dado por:

$$CX = (CM/kg)100 \quad [124]$$

(10) *Consumo con disponibilidad no limitante.* Se considera disponibilidad no limitante cuando FADIS es mayor o igual a 0.984. En este caso, las relaciones que describen el proceso son las siguientes:

$$DI = 0 \quad [125]$$

$$EA = (FADIS)(MC) \quad [126]$$

$$ES = MC (1 - FADIS) \quad [127]$$

$$COREFO = COPOFO \quad [128]$$

$$CR = COPOFO - ES \quad [129]$$

$$CM = COPOFO + (MC)(FADIS) \quad [130]$$

El consumo total de MS, como porcentaje del peso (CX), se estima igual que en el párrafo anterior, mediante la ecuación [124].

#### d. Validación del modelo

El requisito para validar el algoritmo de cálculo propuesto es contar con los datos experimentales adecuados, de tal modo que caractericen la información que es de ingreso al modelo. Así, podría ejecutarse el modelo homologando las condiciones experimentales. La información que el modelo requiere es la única condición necesaria para la validación. Debe tenerse también en los trabajos experimentales estimaciones de consumo en condiciones de pastoreo, realizadas en tratamientos con igual manejo de la pastura, pero incluyendo niveles de concentrados.

A pesar de la amplia gama de requisitos que requeriría un trabajo experimental como el mencionado, si se desea validar con información de la literatura, existe uno que reúne las características señaladas: el presentado

por Leaver *et al.* (1969). Estos autores proveen 18 estimaciones de consumo, que corresponden a medias de ocho vacas, en tres tratamientos y durante seis períodos de aproximadamente 25 días, durante la estación de crecimiento. Uno de los tratamientos incluye 4 kg de concentrado por vaca, al día.

La validación del modelo se realizó, en consecuencia, con el trabajo presentado por dichos autores. La comparación de los datos experimentales con los estimados por el modelo al suministrarle los insumos correspondientes: peso de vaca igual a 500 kg, rendimiento de leche igual a 4200 kg/lactancia, y los valores de digestibilidad, consumo de concentrado y etapa de la lactancia, correspondientes a cada período, se realizó mediante diferentes métodos que se indican a continuación.

(1) *Análisis de regresión.* Se ajustó una ecuación de regresión del tipo:

$$y = a + bx$$

considerando en las abscisas los valores experimentales y en las ordenadas, los valores estimados del modelo. Puesto que la regresión resultó significativa estadísticamente ( $P < 0.01$ ) se comparó, mediante pruebas de t de Student, los parámetros de la misma con los de la recta de ajuste perfecto, es decir, pendiente igual a 1 e intersección con el eje e igual a cero. Este análisis mostró que los parámetros no difieren significativamente ( $P < 0.001$ ).

(2) *Comparación de medias.* El análisis de comparación de variancias mediante la prueba F de Snedecor, indicó que las variancias de ambas muestras (datos experimentales y estimados) son homogéneas. Se comparó entonces las medias mediante una prueba de t, no obteniéndose diferencias significativas ( $P < 0.01$ ) (experimental = 13.92 y estimada = 14.29 kg MS/vaca/día).

(3) *Error porcentual de estimación.* Es conveniente estimar cuantitativamente el error que se comete en la estimación. Para ello se utilizó el error porcentual (EP) calculado como:

$$EP = \frac{E - R}{(n)(Xr)} 100 \quad [131]$$

donde:

E	=	valor estimado por el modelo
R	=	valor real (experimental)
n	=	número de observaciones
Xr	=	media de los valores reales

EP da una idea del error cometido al estimar una media de diversos valores individuales; por lo tanto, se calculó el coeficiente de variación (CV) del EP, para dar una idea más adecuada de la variabilidad esperada en las estimaciones.

Los valores obtenidos fueron de  $2.6 \pm 7.0\%$  para EP y su CV, respectivamente. Esto indicaría que en 66 casos de cada 100, el modelo sobrestima como máximo en un 9.6% el valor real, o lo subestima en - 4.4%.

Aunque existe una tendencia a la sobrestimación de los valores reales, los errores no son mayores que las variaciones normalmente obtenidas en experimentos bien controlados, que generalmente oscilan de 7% a 15%.

### e. Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad se realizó con dos objetivos. En primer lugar, estudiar en qué medida afectan determinadas variaciones de algunos parámetros de las funciones consideradas más importantes del modelo, en los resultados del modelo. En segundo lugar, interesa determinar en qué medida las variaciones en algunos de los valores, que se ingresaron como insumos, y cuyas estimaciones normalmente están sujetas a error (como el caso de digestibilidad del forraje, el rendimiento potencial de leche y el tamaño de los animales), afectan los resultados.

Los resultados del análisis de sensibilidad se presentan en el Cuadro 4.

<b>Cuadro 4. Resultado del análisis de sensibilidad a parámetros y datos de ingreso del modelo</b>				
	<b>Error porcentual ± CV</b>			
	<b>Modificación de los parámetros</b>			
	<b>+ 10</b>	<b>+ 5</b>	<b>- 5</b>	<b>-10</b>
<b><u>Parámetros:</u></b>				
<b>FADIG</b>				
<b>b<sub>1</sub></b>	13.4 ± 1.4	6.8 ± 0.7	-6.6 ± 0.6	-13.3 ± 1.4
<b>b<sub>0</sub></b>	-2.6 ± 0.5	-1.3 ± 0.2	1.3 ± 0.2	2.6 ± 0.5
<b>Consumo de concentrado</b>				
<b>b<sub>1</sub></b>	-1.3 ± 1.2	-0.6 ± 0.6	0.6 ± 0.6	-1.3 ± 1.2
<b>b<sub>0</sub></b>	2.6 ± 5	1.3 ± 2.6	-1.3 ± 2.5	-2.6 ± 5
<b><u>Datos:</u></b>				
<b>Digestibilidad</b>		6.6 ± 1	-6.6 ± 1	
<b><u>Datos:</u></b>				
	<b>Error porcentual ± CV</b>			
	<b>Modificación de los datos de ingreso</b>			
	<b>+ 20</b>	<b>+ 10</b>	<b>- 10</b>	<b>-20</b>
<b>Tamaño corporal</b>	25.0 ± 10	12.2 ± 5	-12.2 ± 5	-25.0 ± 10
<b>Requerimiento de leche</b>	8.2 ± 1	4.1 ± 1	-4.0 ± 1	-8.1 ± 2

El efecto de la digestibilidad sobre el consumo por kilogramo de peso (FADIG) está indicado por una relación lineal y los datos de literatura revisados (Durán *et al.* 1984) presentan variaciones en ambos parámetros ( $b_0$  y  $b_1$ ); por lo tanto, se consideró la sensibilidad a los dos. Interesa señalar la importancia de obtener mayor precisión en el  $b_1$ , debido a que su efecto en la variación de consumo es considerablemente mayor que la del  $b_0$ , aún cuando desviaciones de 10% no generan errores porcentuales mayores a 14 por ciento.

En el caso de la relación entre consumo de forraje y de concentrados, la situación es inversa a la del FADIG, y resulta más importante el efecto de  $b_0$  que el de  $b_1$ . En ambos casos, desviaciones de hasta 10% sólo provocan pequeños errores en la estimación del consumo total, lo que sugiere que el suministro de concentrados tiene escasa significación sobre el consumo de MS, en condiciones de disponibilidad no limitante como las probadas en cuatro de los seis períodos experimentales. Sin embargo, los valores relativamente altos del CV indican el inicio de limitaciones de consumo por cantidad de forraje (períodos 5 y 6). Las variaciones de  $b_0$  cercanas a 10% pueden afectar las estimaciones de consumo hasta en un 8 por ciento.

Respecto a digestibilidad, se considera un error normal de aproximadamente 5% en su estimación por métodos de laboratorio (Osborn y González 1973). Se observa en el Cuadro 4 que las variaciones de este dato presentan un efecto similar al de FADIG.

Estimaciones del tamaño de las vacas con errores del orden de 10% parecen poco probables; no obstante, en estos casos el consumo estaría sujeto a un error de 12%. Obviamente, diferencias de 20% en tamaño es posible que indiquen diferencias reales más que estimaciones sesgadas y, en este caso, el efecto sobre el consumo es considerable, como es lógico esperar.

En general, se critica la inclusión de estimaciones de rendimiento potencial de leche como variable para estimar el consumo, debido a la dificultad de estimarlo con precisión, principalmente en hatos de productores, aunque se reconoce la importancia de este factor. Los resultados del análisis de sensibilidad indican que aún un error de estimación de 20% del dato no generaría desvíos muy importantes del consumo esperado. Por otra parte, un 20% de error en la estimación del potencial de un hato que oscila entre 4000 y 5000 kg, es de ocurrencia poco probable. Este factor cobra importancia al considerar estimaciones para hatos con diferencias importantes de potencial genético; por ejemplo, en el caso de 2000 o más kg/lactancia.

#### f. Conclusiones

Los resultados de la validación del modelo con un grupo limitado de observaciones experimentales obtenidas en condiciones controladas y confiables, como el experimento de Leaver *et al.* (1969), sugieren un comportamiento adecuado. Este proceso permitió obtener estimaciones con errores porcentuales bajos comparados con otras estimaciones realizadas con modelos de regresión (Broster *et al.* 1978; Bines 1979).

El análisis de sensibilidad indica que la obtención de parámetros de funciones racionales, con base en datos de la literatura, permite obtener valores razonables y resulta de suma utilidad para indicar aquellos aspectos donde debe ponerse mayor atención a nivel experimental así como para el perfeccionamiento del modelo.

El empleo del algoritmo computacional desarrollado resulta simple de utilizar en minicomputadores de fácil acceso y no requiere conocimientos especiales ni plantea dificultades de manejo, puesto que está desarrollado en una herramienta computacional de gran difusión y uso.

## 7. INDICE DE SELECCIÓN EN UN MODELO DE CONSUMO DE BOVINOS EN PASTOREO

### a. Introducción

En investigación de praderas, los tópicos que frecuentemente presentan mayor interés es la calidad y cantidad de forraje consumido por los animales en pastoreo. La eficiencia con que los rumiantes usan la pradera para convertir el forraje en producto animal, puede variar mucho a causa de la cantidad consumida y del valor nutritivo de la misma.

Cuando se simula la producción animal bajo pastoreo, los factores que afectan el consumo de forraje son de gran importancia porque, una vez determinado el consumo de forraje y su valor nutritivo, se puede estimar la producción animal.

Se han desarrollado varios métodos para determinar la calidad y cantidad de forraje consumido. Sin embargo, la mayor parte de ellos no pueden representar la dieta real consumida por los animales porque no consideran la habilidad que los animales tienen para seleccionar forraje. El método más frecuente para determinar la selectividad es mediante el empleo de la fístula esofágica, por la confiabilidad y representatividad del forraje consumido por los animales en pastoreo lo que permite establecer una comparación de la composición del forraje ofrecido y el consumido.

El objetivo de este estudio es cuantificar la selectividad de bovinos en pastoreo con diferentes tipos de praderas y niveles de disponibilidad y digestibilidad, con base en un modelo de simulación del consumo.

Se plantean las siguientes hipótesis:

(1) La selectividad de bovinos en pastoreo es cuantificable si se conoce la disponibilidad y digestibilidad del forraje ofrecido.

(2) La selectividad de bovinos en pastoreo es la diferencia entre la digestibilidad de la materia seca ofrecida y la digestibilidad de la materia seca consumida.

### b. Características de la selectividad

La selección que un animal ejerce en pastoreo está determinada por un conjunto de factores que interactúan; según Arnold (1981) estos factores son:

- de los animales, sus reflejos de atención, aproximación, examen y posterior consumo o rechazo determinado por sus mecanismos sensitivos (visión, olfato, tacto y gusto)
- de las plantas, especies de plantas y sus características físicas y químicas y la disponibilidad presente
- del medio ambiente físico, la topografía y distancia de la planta al agua y al camino
- del animal en conjunto, lo que incluye la especie animal, condiciones fisiológicas y comportamiento social
- experiencias previas

Tanto el clima como el suelo, y topografía en general, forman parte de un sistema total en el cual el forraje es producido y consumido, por lo cual tienen un efecto directo en el comportamiento animal. De este modo influyen en la preferencia por un alimento dado. Por ejemplo, animales en pastoreo cambian sus preferencias con cambios en la temperatura o lluvia.

La definición y discusión de todos los factores que afectan en una forma directa o indirecta la selectividad de forraje por los rumiantes es un tarea compleja. Por esto, y sin desconocer los efectos que tienen sobre el consumo de forraje la temperatura ambiental, la salud del animal, la raza, palatabilidad relativa de las plantas, etc., se centra este estudio en tres factores que, de manera general, se consideran como los más conocidos y estudiados: disponibilidad de forraje, composición físico-química del forraje y los requerimientos de nutrientes del animal.

La selectividad puede expresarse de dos formas:

- selectividad entre especies de plantas ✓
- selectividad entre partes de una misma planta ✓

Mulhan (1966), citado por Bedell (1968), encontró en sus experimentos que en algunos períodos del año las ovejas obtenían el 80% de su alimento de plantas que contribuían solamente con el 1% del total disponible. Valores semejantes de selectividad se han descrito donde hay especies disponibles en forma abundante. De estos trabajos se concluye que la selectividad es extremadamente marcada cuando el alimento es abundante, independiente de la cantidad de especies de plantas disponibles.

(1) *Palatabilidad y preferencia por una planta.* La palatabilidad la define Heady (1964) como una característica o condición de una planta que estimula una respuesta selectiva por los animales. En cambio, la preferencia es un término usado en selectividad que se refiere esencialmente al comportamiento o preferencia relativa, e indica la elección o proporcionalidad entre dos o más alimentos consumidos.

Se han presentado muchos trabajos donde se ha estudiado la relación entre composición química de la planta y su palatabilidad. Hay una alta correlación entre contenido proteico y preferencia, en el consumo de bovinos y ovinos (Hardison *et al.* 1954; Cook *et al.* 1963).

Algunos investigadores plantean que el total del valor nutritivo de las plantas es el mejor indicador de la palatabilidad (Cook *et al.* 1963). La preferencia está probablemente relacionada con la presencia de espinas, pelos, posición de las hojas, viscosidad y textura (Heady y Torell 1959).

Los factores que influyen sobre la preferencia de sitios de pastoreo y sobre la preferencia entre alternativas de plantas, o componentes de la planta dentro de sitios, son complejos y dificultan la cuantificación de ellos con el presente conocimiento (Hodgson 1982).

Los animales difieren marcadamente en sus hábitos de consumo; cada especie sigue sus preferencias innatas por cierto tipo de plantas, partes de una planta o plantas en determinado estado de crecimiento. Frente a una reducción en la disponibilidad el animal puede cambiar sus preferencias.

La forma cómo los rumiantes son capaces de seleccionar sus alimentos es un tema frecuentemente debatido. Se han realizado pocos experimentos mediante los cuales esta pregunta puede ser contestada; pero se sabe que los animales desarrollan mecanismos sensitivos que le permiten seleccionar una dieta adecuada, maximizando la selección de los constituyentes de la pradera que son más apropiados.

En relación al plano nutricional, la selección de un forraje verde frente a forraje maduro, que siempre ocurre, es ventajoso porque el contenido de nutrientes y digestibilidad son generalmente más altos en el forraje verde. En praderas mejoradas, la selección de puntas de hojas jóvenes resulta en una dieta rica en proteína que es nutricionalmente deseable.

Los animales en pastoreo utilizan la visión, tacto en los labios y lengua, gusto y olfato en la selección de sus dietas. En ovejas estaría actuando el gusto, tacto y olfato, más que la vista, como lo demuestran en sus experimentos Krueger *et al.* (1974).

(2) *Características de la pradera en la selectividad.* La composición botánica y morfológica vegetal puede ejercer un marcado efecto sobre la selectividad de los animales en pastoreo. Las variaciones en la estructura de la pradera y la distribución de componentes dentro de la cubierta de la pradera, influyen en la oportunidad de selección.

La dieta de los animales en pastoreo consistentemente contiene más hojas y menos tallos, más material vivo y menos material muerto, que el promedio de la vegetación (Van Dyne y Heady 1964; Arnold 1981). Esto refleja en parte el uso preferencial de áreas que contienen forraje verde y comunidades de plantas en fase de crecimiento activo. La selección de hojas verdes dentro de la cubierta vegetal es bien reconocida y puede ser importante. Sin embargo, la razón de este comportamiento no es fácil de determinar, a pesar de que puede estar asociado con diferencias entre el vigor estructural de hojas y tallos, tejidos foliar tierno y maduro, las características superficiales y la turgidez del tejido vivo y muerto (Heady 1975).

La morfología o arquitectura de una pradera puede ejercer un marcado efecto sobre la selectividad y consumo de forraje en pastoreo. Las variaciones en la estructura de la pradera y la distribución de los componentes dentro de la misma ejercen una influencia en el grado de selección.

Cada especie de planta tiene una distribución en el espacio y esto probablemente determina el grado de selectividad. Arnold (1964) define el proceso de pastoreo como "movimiento en un plano horizontal y la selección en un plano vertical"; éste envolvería "sitios o áreas de selección" y "bocado de selección". Estos sitios pueden variar en pocos metros o varios kilómetros. La preferencia de sitios de pastoreo puede estar determinada por la distribución de áreas verdes, diferencias entre las especies constituyentes y fase de crecimiento de diferentes comunidades, distribución de heces y orina, y contaminación del suelo (Hodgson 1982).

La estructura de la cubierta vegetal es importante. La estructura abierta de la mayor parte de comunidades de gramíneas anuales permiten un acceso relativamente fácil a todos los niveles dentro de la pradera, en contraste con la cubierta cerrada de comunidades de gramíneas perennes de zonas templadas que no lo permiten.

La disponibilidad y distribución dentro de la cubierta afecta la selección. La densidad de forraje dentro de la pradera puede ejercer una influencia sobre el consumo por bocado, y de ahí sobre el consumo diario de forraje.

En relación a la altura, hay respuestas diferentes en el consumo o selectividad de forraje cuando varía la altura de la pradera. La distribución de los componentes de la planta dentro de la cubierta vegetal, y particularmente su asociación con medidas del comportamiento mecánico de la ingestión de una estrata específica de la pradera, proveen respuestas inconsistentes de consumo (Hodgson 1982). La selección de forraje aumenta progresivamente con un aumento en la altura de la superficie pastoreada, y llega a ser insensible a la variación en la densidad de forraje, dentro del horizonte pastoreado.

La altura de la superficie de la pradera puede ser sustancialmente mayor y la densidad de forraje sustancialmente menor en praderas tropicales que en praderas templadas (Stobbs 1973b). En estas circunstancias,

la variación en la altura aparentemente tiene un pequeño efecto en el consumo y la variación en la densidad un efecto mayor.

Minson y McLeod (1972) plantean que existen también diferencias físicas entre diferentes partes de una planta. Estudios de fracciones separadas de hojas y tallos muestran que las hojas son consumidas en mayor cantidad que los tallos a una digestibilidad similar de la materia seca. El mayor consumo de hojas se asocia con el menor tiempo de retención en el rumen, cuando es comparado con tallos. La razón más probable del mayor tiempo de retención del tallo en el rumen es que éste está conformado con más partículas de mayor tamaño, lo que impone una diferencia de resistencia para romperse (Minson y McLeod 1972).

Minson y McLeod (1972) encontraron mayor consumo y selectividad a medida que se incrementaba el porcentaje de hojas y se mantenía constante la digestibilidad, encontrándose una diferencia de 42% en el consumo entre hojas y tallos (Poppi *et al.* 1981) con una diferencia de digestibilidad de 1% entre las dos fracciones.

Las diferencias morfológicas y fisiológicas entre las especies de plantas, cada una con su debido crecimiento, tipo de pradera (perenne y anual), proporción y distribución de hojas y tallos y comportamiento de floración, afectan la calidad y cantidad de forraje disponible para el animal en pastoreo.

Por otra parte, el grado de madurez es quizás el factor que más afecta la cantidad y composición de la fibra ya que a medida que las plantas crecen, aumenta los tejidos de sostén y con ellos los carbohidratos estructurales y lignina. Asociado a lo anterior, se encuentra el contenido de proteína. Ambos factores afectan la selectividad.

### c. Determinación del índice de selección

La selección de la dieta puede ser vista como una función de la preferencia, la que se manifestaría en los componentes individuales de una pradera, y está regulada por las características de la cubierta vegetal.

La preferencia relativa de algunas especies o variedades de plantas están frecuentemente descritas en términos de tasa o proporción de un componente en la dieta o en la pradera. Esto es estrictamente una medida de selección y se describe mejor como un índice de selección.

El modelo que se plantea estima la diferencia entre la digestibilidad de la materia seca ofrecida y la digestibilidad de la materia seca consumida, con base en un índice de selección calculado en función de la disponibilidad y digestibilidad del forraje ofrecido a los animales. Tal esquema ha sido probado con buenos resultados en ovejas (Silva 1983). Se asume que la diferencia de digestibilidad entre lo ofrecido y lo consumido se debe a la selectividad que hace el animal en pastoreo. Para ello, se establece la siguiente relación:

$$DGC = (DGO)(IS) \quad [132]$$

donde:

DGC = digestibilidad de la MS consumida, %  
 DGO = digestibilidad de la MS ofrecida en el potrero, %  
 IS = índice de selección

### d. Determinación del consumo

Se han realizado numerosos estudios para determinar los factores que explican el consumo de alimentos en rumiantes. Entre los factores considerados se han incluido:

- características del animal, como la especie, peso y estado fisiológico
- características del alimento, como valor energético y métodos de conservación o procesamiento
- factores del clima, como largo del día y temperatura

Freer (1981) señala que el consumo también puede ser afectado por el tiempo gastado o el requerimiento de energía para cosechar el forraje.

El control fisiológico del consumo de alimentos es muy importante cuando el animal dispone de una gran cantidad de alimento y un valor nutritivo muy alto (Brown *et al.* 1980; Freer 1981).

Existe muy poca información respecto a cómo la temperatura ambiental afecta al consumo. En todo caso, es conocido el efecto negativo de las temperaturas superiores a 27-30°C sobre el consumo de MS. Las temperaturas bajas generalmente no son limitantes, excepto por debajo de -10°C (Bines 1980). En el modelo no se incluye el efecto de la temperatura en la determinación del consumo, asumiendo que se está en zona de termoneutralidad. Esta es una restricción razonable dado que, si bien es cierto habría un efecto detrimento de la temperatura en la estación de verano, en el resto del año los animales estarían en zona de termoneutralidad.

El esquema de la Fig. 5 muestra los factores que se consideran que afectan el consumo y la selectividad de bovinos en pastoreo. Puede verse en el esquema que primero se estima el consumo potencial y luego, se corrige con factores de disponibilidad y digestibilidad, dando lugar al consumo voluntario.

(1) *Consumo potencial.* El consumo es función del tamaño del animal porque está relacionado con la capacidad de rumen. Varios grupos de investigadores han estudiado la relación entre el peso vivo y el consumo en animales en pastoreo. En algunos casos se ha encontrado que el consumo de forraje es proporcional al peso elevado a 0.73 (Corbett 1960). Hodgson y Wilkinson (1967) encontraron que el exponente que mejor se ajustaba, cuando la información provenía de animales de diferentes edades era 0.61; cuando se excluían las vacas el exponente aumentaba a 0.71.

Blaxter (1962), Kleiber (1961) y Klasterman *et al.* (1979) señalan que existe una estrecha relación entre la cantidad y calidad del forraje que consume el animal y su peso. Con alimentos cuyo consumo está limitado por mecanismos físicos, y por consiguiente por la capacidad de rumen, es razonable que la relación entre el consumo y el peso de los animales sea directa.

Por otra parte, Abreu (1975) propuso, para praderas de zona templada, una ecuación que predice el consumo en función del peso y disponibilidad de forraje:

$$Y = 0.03W (1 - e^{-0.001664X}) \quad [133]$$

donde:

- Y = consumo de forraje, kg MS/animal/día
- W = peso del animal, kg
- X = disponibilidad de forraje, kg MS/ha

Según esta ecuación, cuando la disponibilidad no es limitante, el consumo tiende al 3% del peso vivo. En teoría, puede considerarse que esta ecuación considera un consumo máximo o potencial (3% del peso vivo), corregido por la disponibilidad.

En el modelo se usa el mismo criterio. Se calcula el máximo consumo de forraje a partir del consumo determinado por Abreu (1975), a máxima disponibilidad de forraje. La ecuación que expresa el máximo consumo, es decir, consumo potencial, es entonces:

$$CP = 0.03W \quad [134]$$

donde:

CP = consumo potencial, kg MS/animal/día

(2) *Consumo voluntario.* Freer (1981) definió el consumo voluntario como la cantidad de alimento consumido cuando el animal dispone libremente del alimento sin estar sujeto a restricciones de manejo. Esto sucede cuando el animal está en pastoreo y el área del potrero es suficientemente grande.

El consumo voluntario de forraje también se ve afectado por las características de la cubierta vegetal donde los animales pastorean. El consumo total de forraje en un día puede ser considerado como un producto del tiempo gastado para pastorear y la tasa de consumo de forraje por unidad de tiempo de pastoreo (Chacón y Stobbs 1976). La tasa de consumo es por sí misma el producto de la cantidad de alimento ingerido por bocado y la tasa de bocado durante el pastoreo.

Marchi (1973), Hodgson (1982) y Weston (1982) señalan que los factores ajenos a los animales que afectan el consumo de forraje son muchos, pero que para efectos prácticos y en condiciones de pastoreo, pueden reducirse a dos: disponibilidad y digestibilidad del forraje disponible para el animal.

En el modelo, entonces, el consumo voluntario de forraje (CVO) se calcula a partir del consumo máximo o potencial, corregido por factores de disponibilidad y digestibilidad:

$$CVO = (CP)(FCD)(FCG) \quad [135]$$

donde:

CVO = consumo voluntario de forraje, kg MS/animal/día  
 FCD = factor de corrección del consumo potencial por la disponibilidad  
 FCG = factor de corrección del consumo potencial por la digestibilidad  
 CP = consumo potencial, kg MS/animal/día

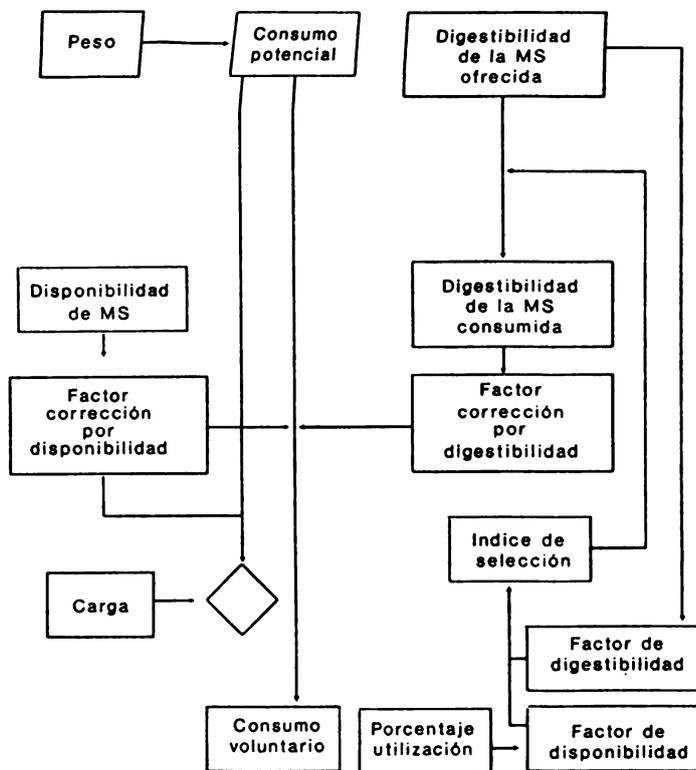


Fig. 5 Diagrama de selectividad y consumo

(3) *Factor de corrección por disponibilidad.* El consumo voluntario de forraje de los animales en pastoreo está altamente afectado por la disponibilidad, expresada como peso de forraje por unidad de área, como señalan Arnold y Dudzinsky (1966, 1967), Silva (1977) y Trigg y Marsh (1979).

Jamieson y Hodgson (1979a) concluyeron que el consumo disminuye aproximadamente en 18% cuando la disponibilidad de forraje disminuye de 90 a 30 gramos de materia seca por unidad de peso vivo del animal. Cuando la disponibilidad resulta en un cambio de sólo 10% en el consumo del animal, pero cuando la disponibilidad es muy baja, este cambio no tiene la misma respuesta en el animal (Hodgson 1979).

Los resultados experimentales son consistentes en demostrar que el consumo de forraje se incrementa hacia una asíntota a medida que la cantidad de forraje disponible aumenta. Esta asíntota corresponde al consumo potencial (CP) que se corrige por la disponibilidad de forraje con base en un factor de corrección, calculado a partir de la ecuación de Abreu (1975):

$$FCD = 1 - e^{-0.001664DD} \quad [136]$$

donde:

DD = disponibilidad de forraje en el potrero, kg MS/ha

El factor de corrección FCD tiende a la unidad a medida que la disponibilidad aumenta, con lo que el consumo voluntario sería igual al consumo potencial si la digestibilidad no fuera limitante. Por otro lado, se aproxima a cero cuando la disponibilidad tiende a cero, es decir, el consumo voluntario disminuye, desde el consumo potencial, a medida que la disponibilidad disminuye.

(4) *Factor de corrección por digestibilidad.* La relación entre digestibilidad y consumo de forraje es una relación lineal tanto con animales estabulados como aquellos en pastoreo. Varios autores, citados por Freer (1981), afirman que hay aumento lineal del consumo voluntario cuando la digestibilidad aumenta hasta un valor de 80%. Hodgson y Maxwell (1979) han encontrado valores similares.

Minson *et al.* (1964), citado por Minson (1982), señalan que hay un aumento de 20 a 25 g de MS por unidad de aumento de la digestibilidad, asociada con el nivel de nitrógeno para la actividad microbiana en el rumen. Hodgson y Maxwell (1979) indican que el consumo de forraje es máximo cuando la digestibilidad del forraje es alta (alrededor de 75%) y cuando la digestibilidad es de 60% el consumo disminuye aproximadamente a 2.4% del peso vivo.

En el modelo se utiliza, para representar la corrección por digestibilidad, la función usada por Silva (1983). En esta ecuación se ajusta linealmente un factor de corrección para un rango de digestibilidad entre 40 y 80 por ciento:

$$FCG = 1.675DGC - 0.34 \quad [137]$$

donde:

FCG = factor de corrección del consumo potencial por digestibilidad  
DGC = digestibilidad de la MS consumida, %

Como este es uno de los factores que corrigen el consumo potencial, su interpretación en forma aislada puede hacerse suponiendo que el factor de corrección por disponibilidad (FCD) es igual a uno, es decir, la disponibilidad no es limitante. De este modo, si la digestibilidad de lo consumido es de 80% el factor FCG es igual a uno y el consumo potencial podría ser igual al consumo voluntario, si la disponibilidad no es limitante. Por otro

lado, si la digestibilidad de lo consumido se aproxima al 40%, el factor FCG se hace igual 0.33, lo que estaría indicando que el consumo potencial podría ser igual al 33% del consumo potencial, si la disponibilidad no es limitante.

(5) *Indice de selectividad.* La determinación del índice de selección (IS) está basada en el concepto que el animal selecciona de acuerdo a la diversidad y disponibilidad del tapiz. Se supone, entonces, que si no hay diversidad no es posible la selección. Del mismo modo, si el animal debe consumir gran parte de lo ofrecido, no es posible que seleccione por mayor digestibilidad, aún existiendo diversidad. En estos casos, sin selección, el índice IS será igual a uno y por lo tanto la digestibilidad de lo consumido es igual a la digestibilidad de lo ofrecido.

Según los datos de Jamieson y Hodgson (1979), la diferencia entre la digestibilidad consumida y la digestibilidad ofrecida tiene un valor máximo de 25%. Esta diferencia se produce cuando la digestibilidad promedio de la pradera es muy baja. Se puede asumir entonces que el animal puede tener máxima capacidad de selección cuando la digestibilidad promedio es muy baja (de acuerdo a los datos bibliográficos, alrededor de 40%). Se genera así el índice de selección IS igual a 1.25 (25%) cuando la digestibilidad es 40%. Por el contrario, si la digestibilidad es muy alta (80%), la selección será mínima alcanzando 0% cuando IS = 1.0.

Como puede verse, el índice de selección IS debería corregir la digestibilidad de lo ofrecido, entre 0% y 25%, para estimar la digestibilidad de lo consumido. Como es un factor multiplicativo su rango es entre 1.0 y 1.25. Tal rango estará determinado en función de la digestibilidad y de la disponibilidad del tapiz; según las características señaladas, la expresión puede ser de la forma:

$$IS = 1 + (SD)(SC) \quad [138]$$

donde:

SD = corrección de la selectividad por digestibilidad  
SC = corrección de la selectividad por disponibilidad

(6) *Corrección de la selectividad por digestibilidad.* La corrección del índice de selectividad por digestibilidad se estima considerando los dos puntos extremos de selección por digestibilidad. Aún cuando dicha relación debería ser curvilínea, una aproximación lineal del factor representa adecuadamente el efecto:

$$SD = 0.5 - 0.625DGO, \quad 0.4 < DGO < 0.8 \quad [139]$$

$$SD = 0, \quad DGO > 0.8 \quad [140]$$

Las funciones anteriores permiten entonces relacionar la digestibilidad del material ofrecido con la digestibilidad del material consumido (ecuación [132]).

(7) *Corrección de la selectividad por disponibilidad.* La relación entre selectividad y disponibilidad de forraje se hizo tomando en cuenta el efecto de la disponibilidad del pastizal por hectárea y la carga animal diaria. Ello se puede estimar con base en el porcentaje de utilización de la pradera (PU), calculado de la siguiente forma:

$$PU = \frac{(CP)(FCD)(CA)}{DD} \quad [141]$$

donde:

DD = disponibilidad diaria de forraje, kg MS

En razón de los datos presentados por Petersen *et al.* (1965), Hodgson y Wilkinson (1967) y Trigg y Marsh (1979), se asume que la selectividad es máxima cuando el porcentaje de utilización es menor que 0.1 (utilización del 10%). Por otro lado, no es posible seleccionar con mayor digestibilidad cuando PU es mayor de 0.5 (utilización del 50%). Entre ambos puntos extremos se puede corregir linealmente el índice de selección, según las ecuaciones:

$$SC = 1.25 - 2.5PU \quad 0.1 < PU < 0.5 \quad [142]$$

$$SC = 1 \quad PU < 0.1 \quad [143]$$

$$SC = 0 \quad PU > 0.5 \quad [144]$$

Con la combinación de los dos factores (SD y SC) se estima el índice de selección. El efecto conjunto de los factores denotará, por ejemplo, que cuando no hay heterogeneidad (SD=0) ó la disponibilidad de la pradera es escasa (SC=0), el índice de selección IS es igual a uno, lo que indicará que no hay selectividad y, por consecuencia, tampoco un aumento en la digestibilidad de lo consumido.

Puede observarse que en pastoreo, animales en iguales condiciones consumen diferentes cantidades de MS. Por lo tanto, existe una variabilidad entre individuos y también a través del tiempo en un mismo individuo. Según Blaxter y Wilson (1963) ésta puede llegar a 7.5% de la media.

Por lo tanto, el consumo depende de muchos factores independientes y puede ser considerado como una medida global del efecto aditivo de todos esos factores. Esta interpretación es de gran importancia por cuanto provee la justificación matemática para aplicar el teorema del límite central y usar, en consecuencia, una función probabilística de distribución normal para describir el consumo. En el modelo, el consumo voluntario es muestreado según una distribución normal, en que CVO representa la media.

#### e. Restricciones y constricciones del modelo

Como se ha visto, sobre el consumo y la selección actúa una serie de factores. El modelo ha simplificado tales factores dando preponderancia a la disponibilidad y digestibilidad. Ello excluye en forma implícita los casos en que otros factores comienzan a ser preponderantes. Por tal motivo, es aconsejable recalcar aquellas condiciones y supuestos que se han tenido en cuenta en el desarrollo. Ellos se pueden resumir en que:

- el modelo no toma en cuenta las características de la pradera en que los animales pastoreaban anteriormente
- el modelo se diseñó para animales rumiantes de la especie bovina
- no se considera en el modelo el área de rechazo de la pradera por contaminación con heces
- no se considera en el modelo el efecto de temperaturas ambientales extremas sobre el consumo

#### f. Evaluación del modelo

El proceso de evaluación de un modelo de simulación se divide en dos etapas: verificación y validación. La verificación es un proceso continuo y paralelo al desarrollo, en que se comprueba la racionalidad y consistencia de las funciones para estimar los parámetros del modelo y las relaciones entre los componentes considerados. Tal etapa puede considerarse cubierta con la explicación racional del desarrollo, realizada en los párrafos anteriores.

La validación estadística usada en este modelo fue un análisis de regresión lineal entre los datos de salida del modelo y los experimentales. Con este procedimiento se examinó las propiedades del modelo lineal

$$Y = a + bX$$

donde:

Y representa los datos del modelo

X representa los datos experimentales

La hipótesis nula es que el parámetro "a" es igual a cero y la pendiente "b" es igual a uno.

En el Cuadro 5 se presentan los valores del índice de selectividad presentados por Jamieson y Hodgson (1979) y los predichos por el modelo. Estos valores representan un promedio de siete días de pastoreo. El error porcentual de predicción fue de - 2.19171%, con una desviación de 2.69 por ciento.

Observación	Valores experimentales	Valores del modelo
1	1.052	1.045
2	1.113	1.100
3	1.162	1.222
4	1.160	1.177
5	1.250	1.194
6	1.280	1.220
7	1.227	1.224

En el caso analizado se aceptó la hipótesis nula, con base en una prueba de t. Estadísticamente se puede decir que el modelo es predictor de la selectividad con 86.11% de seguridad, con un nivel de significancia de 5 por ciento.

#### **g. Experimentación con el modelo**

El modelo se corrió para evaluar la digestibilidad de la materia seca consumida por bovinos en pastoreo en praderas de trébol subterráneo de la región ecológica de secano de la precordillera andina. La pradera natural de la zona se caracteriza por una producción estacional, resultante de las condiciones climáticas adversas como son las bajas temperaturas invernales y la sequía estival.

El índice de selectividad en cada una de las fechas de muestreo es:

Fecha de muestreo	Índice de selectividad
10.08.76	1.247
15.09.76	1.213
06.10.76	1.160
27.10.76	1.134
12.11.76	1.160
24.11.76	1.160
22.12.76	1.220
17.01.77	1.230

#### h. Análisis de sensibilidad del modelo

El parámetro que presentó mayor sensibilidad fue el porcentaje de utilización de la pradera. Cuando la disponibilidad de forraje es tal que el animal debe consumir una gran parte de lo que está disponible, el porcentaje de utilización de la pradera es muy alto; pero, con cambios considerados pequeños en relación a la disponibilidad de forraje existente en la pradera, el cambio provocado en la utilización de la pradera es de gran magnitud. Esto sucede porque el remanente considerado en el modelo no es variable de acuerdo al tipo de pradera en que están pastoreando los animales.

El remanente de la pradera está afectado principalmente por su arquitectura. Los factores que determinan la arquitectura de la pradera son las especies de plantas que la constituyen, la relación hoja/tallo, el hábito de crecimiento de las especies, la densidad de la pradera, etc. Estos datos no se consideran en el modelo.

#### i. Conclusiones

(1) La selectividad en bovinos en pastoreo puede representarse por un índice que relacione la digestibilidad de forraje ofrecida a los animales y la digestibilidad consumida.

(2) Es posible predecir la selectividad de bovinos en pastoreo mediante un modelo de simulación, tomando en cuenta la disponibilidad y digestibilidad de materia seca.

(3) Uno de los factores que debe estudiarse con más profundidad es aquel relacionado con la utilización de la pradera.

## 8. LITERATURA CITADA

- ABREU, M.P. 1975. Simulación del crecimiento y performance reproductiva en vaquillonas de primer y segundo entore. In *Sistemas de Producción Pecuaria: Principios y Aplicación en Investigación y Extensión*. H. Caballero D. (Ed.). Montevideo, Uruguay. IICA-OEA, Zona Sur. Informes de Conferencias, Cursos y Reuniones No. 63. p. 39-48.

- AGUILAR, C.; CAÑAS, R. 1980. Algunas consideraciones del uso de análisis de sistemas en ciencias agrícolas. *Ciencia Interamericana* 20(1-2):8-12.
- AGUILAR, C.; CAÑAS, R.; GASMAN, M. 1983. Simulación matemática del manejo empresarial de un predio de producción de ganado de carne, con fines docentes. In *Boletín Programa de Pedagogía Universitaria Académica* (Ed.) Santiago, Pontificia Universidad Católica de Chile. p. 15-34.
- AGUILAR, C.; CAÑAS, R.; GASMAN, M. 1984. Juego de empresas en producción de carne bovina. Santiago, Pontificia Universidad Católica de Chile. *Sistemas en Agricultura* 3(9):1-74.
- ANRIQUE, R. 1976. Body composition and efficiency of cattle as related to body size, type and sex. Ph.D. Thesis. Ithaca, N.Y., Cornell University. 232 p.
- ARC (AGRICULTURAL RESEARCH COUNCIL). 1980. The nutrient requirements of ruminant livestock. London, Commonwealth Agricultural Bureaux, Farnham Royal, Slough, Gresham Press. 351p.
- ARCE, B.B. 1989. Análisis del sistema de producción de alpacas en pequeños productores de Puno, Perú, mediante un modelo de simulación. Tesis Mag. Sc. en Producción Animal. Santiago, Pontificia Universidad Católica de Chile. 222 p.
- ARNOLD, G.W. 1964. Factors within plant association affecting the behavior and performance of grazing animals. In *Grazing in terrestrial and marine environments*. Dorking, Adlard and Sons Ltda. p. 133-154.
- ARNOLD, G.W.; DUDZINSKY, M.L. 1966. The behavioural responses controlling the food intake of grazing sheep. In *X International Grassland Congress, Proceedings*. (Ed.). Helsinki, Finland, Valtroneuroston Kirjapaino. p. 367-370.
- ARNOLD, G.W.; DUDZINSKY, M.L. 1967. Studies on the diet of the grazing animal. II. The effect of physiological status in ewes and pasture availability on herbage intake. *Australian Journal of Agricultural Research* 18:349-359.
- ARNOLD, G.W.; CAMPBELL, N.A. 1972. A model of a ley farming system with particular reference to a submodel for animal production. *Proceedings of the Australian Society of Animal Production* 9:23-30.
- ARNOLD, G.W. 1981. Grazing behavior. In *Grazing animals*. F.H.W. Morley (Ed.). Amsterdam, Elsevier. *World Animal Science*, B1. p. 79-104
- AZYARE, J.A.; WATKIN, B.R. 1967. Some effects of grazing management on the yield and its components of some pasture grasses. *Journal of the British Grassland Society* 22(3):182-191.
- BARNES, R.F. 1973. Laboratory methods of evaluating feeding value of herbage. In *Chemistry and biochemistry of herbage*, v. 3. G.W. Butler, R.W. Bailey (Eds.) Academic Press. p. 179-214.
- BEDSELL, T.E. 1968. Seasonal forage preferences of grazing cattle and sheep in Western Oregon. *Journal of Range Management* 21(5):291-297.
- BINES, J.A. 1976. Regulations of food intake in dairy cows in relation to milk production. *Livestock Production Science* 3:115-128.
- BINES, J.A. 1979. Voluntary food intake. In *Feeding strategies for the high yielding dairy cow*. W.H. Broster, H. Swan (Eds.). EAAP Publication No. 25. St. Albans, Granada, Granada Publishing Co. p. 23-40.

- BLAXTER, K.L. 1956. The nutritive value of feeds as sources of energy: A review. *Journal of Dairy Science* 39:1396.
- BLAXTER, K.L. 1962. The energy metabolism of ruminants. London, Hutchinson Publishing Group Ltd. 329 p.
- BLAXTER, K.L.; WILSON, R.S. 1963. The voluntary intake of roughage by steers. *Animal Production* 4(3): 351-358.
- BLAXTER, K.L. 1964. Metabolismo energético de los rumiantes. G. González y González (Trad.). Zaragoza, España. Ed. Acribia. 314 p.
- BLAXTER, K.L. 1977. Nutrition and the climatic environment. Boston, Butterworths.
- BLAXTER, K.L. 1980. Feeds as sources of energy for ruminant animals. The Massey-Ferguson Paper. Massey-Ferguson (United Kingdom) Limited. 62 p.
- BOX, G.E.P.; MULLER, M.E. 1958. A note on the generation of random normal deviates. *Annals of Mathematical Statistics* 29:610-611.
- BRODY, S. 1945. Bioenergetics and growth with special reference to the efficiency complex in domestic animals. New York, Reinhold Publishing Co. 1023 p.
- BROSTER, W.H. 1971. The effects on milk yield of the cow of the level of feeding before calving. *Dairy Science Abstracts* 33:253-270.
- BROSTER, W.H. 1972. The effect on milk yield of the cow of the level of feeding during lactation. *Dairy Science Abstracts* 34(4):265-288.
- BROSTER, W.H. 1974. Response of the dairy cow to level of feeding. *Biennial Review of the National Institute of Research in Dairying*. 1974. p. 13-34.
- BROSTER, W.H.; ALDERMAN, G. 1977. Nutrient requirements of the high yielding cow. *Livestock Production Science* 4:263-275.
- BROSTER, W.H., SUTTON, J.D.; BINES, J.A. 1979. Concentrate: forage ratios for high-yielding dairy cows. In *Recent Advances in Animal Nutrition-1978*. W. Haresign, D. Lewis (Eds.). London, Butterworth Scientific. p. 99-126.
- BROSTER, W.H.; THOMAS, C. 1981. The influence of level and pattern of concentrate input on milk output. In *Recent Advances in Animal Nutrition*. W. Haresign (Ed.). London, Butterworths. p. 71.
- BROWN, C.A.; STALLINGS, C.C.; TELEGA, S.W. 1981. Nutritional modelling and its impact on managerial goals in dairy production. *Journal of Dairy Science* 64 (10): 2083.
- BURT, A.W.A. 1957. The influence of level of feeding during lactation upon yield and composition of milk. *Dairy Science Abstracts* 19:436.
- BYWATER, A.C. 1976. Simulation of the intake and partition of nutrients by the dairy cow: Part 2. The yield and composition of milk. *Agricultural Systems* 1(4):261-279.
- BYWATER, A.C.; DENT, J.B. 1976. Simulation of the intake and partition of nutrients by the dairy cow: Part 1. Management control in the dairy enterprise: Philosophy and general model construction. *Agricultural Systems* 1(4):245-260.

- BYWATER, A.C. 1981. Development of integrated management information system for dairy production. *Journal of Dairy Science* 64 (10):2120.
- CABALLERO, H.; GOLDENBERG, T.; BENEDETTI, H.; CUBILLOS, G. 1976. Sistemas de producción de carne bovina con razas de doble propósito en Chile: Aspectos técnicos y económicos. IICA-OEA (Zona Sur), INIA, Universidad Católica de Chile. Publicación Miscelánea No. 137. 149 p.
- CAÑAS, R.C. 1974. The lactational efficiency complex in rats. Ph.D. Thesis. Department of Animal Science, University of California at Davis. 175 p.
- CAÑAS, R.; GASTO, J. 1974. Costo de cosecha y eficiencia de producción de ecosistemas ganaderos. *Ciencia e Investigación Agraria (Chile)* 1(4):177-185.
- CAÑAS, R.; AGUILAR, C. 1982. Análisis de sistemas en ciencias agropecuarias. In *Diálogo III: Seminario sobre Sistemas en Investigación Agropecuaria*. Montevideo, Uruguay. Convenio IICA Cono Sur/BID. p. 153-163.
- CAÑAS, C.R.; AGUILAR, C.G.; GASMAN, M. 1983. Relaciones bioenergéticas en sistemas de producción de bovinos. Departamento de Zootecnia, Pontificia Universidad Católica de Chile, *Sistemas en Agricultura* 4(5):1-102.
- CAÑAS, R.; AGUILAR, C.; SILVA, J. 1986. Modelo de simulación para el estudio del manejo de sistemas pastoriles de cría ovina: Validación del modelo. *Ciencia e Investigación Agraria (Chile)* 13(1):53-64.
- CAÑAS, R. 1989. Alimentación de bovinos a pastoreo. In *Seminario Técnico Económico de la Ganadería Bovina de la Zona Sur de Chile*. Depto. Economía Agraria, Facultad de Agronomía, Pontificia Universidad Católica de Chile. p.
- CATRILEO, A. 1981. Desarrollo de un modelo de simulación para el estudio del cambio de peso en novillos a pastoreo. Tesis Mag. Sc. Santiago, Chile. Pontificia Universidad Católica de Chile. 79 p.
- CHACON, E.; STOBBS, T.H. 1976. Influence of progressive defoliation of grass sward on the eating behaviour of cattle. *Australian Agriculture Research* 27:709-727.
- CHAPRA, S.C.; CANALE, R.P. 1987. Métodos numéricos para ingenieros, con aplicaciones en computadores personales. C. Zapata, A. Cortés (Trads.), México, McGraw-Hill. 641 p.
- CLARK, H.J.; DAVIS, L.C. 1980. Some aspects of feeding high producing dairy cows. *Journal of Dairy Science* 63:873-885.
- CONRAD, H.R. 1966. Symposium on factors influencing the voluntary intake of herbage by ruminants: Physiological and physical factors limiting feed intake. *Journal of Animal Science* 22:227-235.
- COOK, W.C.; BLAKE, J.T.; CALL, W.J. 1963. Use of esophageal fistula cannulae for collecting forage samples from both sheep and cattle grazing in common. *Journal of Animal Science* 22(3):579-581.
- COPPOCK, C.E.; NOLLER, C.H.; WOLFE, S.A. 1974. Effect of forage-concentrate ratio in complete feeds fed *ad libitum* on energy intake in relation to requirements by dairy cows. *Journal of Dairy Science* 57:1371-1380
- CORBETT, J.C. 1969. The nutritional value of grassland herbage. In *International encyclopedia of food and nutrition*, Vol 17: Nutrition of animals of agricultural importance. Part 2. D. Cuthbertson (Ed.). New York, Pergamon Press. p. 593-644.

- CRAMPTON, W.E. 1961. Nutrición animal aplicada. A.M. Barrado, M.A. Gavin (Eds.). Zaragoza, España. Ed. Acibia. 415 p.
- CROWTHER, E.M.; YATES, F. 1942. Fertilizer policy in wartime: The fertilizer requirements of arable crops. *Empire Journal of Experimental Agriculture* 9:77-98.
- DURAN, H.O. 1983. Modelo de simulación para el estudio del manejo de sistemas pastoriles de producción de leche. Tesis Mag. Sc. en Producción Animal. Santiago, Pontificia Universidad Católica de Chile. 200 p.
- DURAN, H.; CAÑAS, R.; AGUILAR, C. 1984. Estimación del consumo de vacas lecheras a pastoreo mediante un modelo de simulación. Santiago, Chile. Departamento de Zootecnia, Pontificia Universidad Católica de Chile. *Sistemas en Agricultura* 3(8):1-29.
- FORBES, J.M. 1970. The voluntary food intake of pregant and lactating animals: a review. *The British Veterinary Journal* 126:1.
- FORBES, J.M. 1971. Physiological changes affecting voluntary food intake in ruminants. *Proceedings of the Nutrition Society* 30:135-142.
- FORBES, J.M. 1977a. Development of a model of voluntary food intake and energy balance in lactating cows. *Animal Production* 24:203-214.
- FORBES, J.M. 1977b. Interrelationships between physical and metabolic control of voluntary food intake in fattening, pregnant and lactating mature sheep: A model. *Animal Production* 24:91-101.
- FREER, M.; DAVIDSON, J.L.; ARMSTRONG, J.S.; DONNELLY, J.R. 1970. Simulation of summer grazing. In 11th International Grassland Congress, Surfers Paradise. *Proceedings*. Canberra, Australia, CSIRO. p. 913-917.
- FREER, M. 1981. The control of food intake by grazing animals. In *Grazing animals*. F.W.H. Morley (Ed.). Amsterdam, Elsevier. *World Animal Science*. B.1. p. 105-124.
- GARCIA, F. 1979. Nutrición de vacas lecheras. Manejo reproductivo e inseminación artificial en bovinos de Chile. Curso de Extensión, Departamento de Zootecnia. Facultad de Agronomía, Pontificia Universidad Católica de Chile. p.
- GARCIA, F. 1981. Forraje y concentrado en vacas lecheras. *Simposium Producción Lechera*. Departamento de Zootecnia, Facultad de Agronomía, Pontificia Universidad Católica de Chile. 146 p.
- GARCIA, G.F. 1987. Efecto del medio ambiente en el comportamiento de vacas lecheras. In *Seminario de Producción de Leche*. Temuco, Chile. Departamento de Zootecnia, Pontificia Universidad Católica de Chile. 172 p.
- GARRETT, W.N.; MEYER, J.H.; LOFGREEN, G.P. 1959. The comparative energy requirements of sheep and cattle for maintenance and gain. *Journal of Animal Science* 18:528-547.
- GORDON, G. 1978. *System simulation*. Englewood Cliffs, New Jersey. Prentice-Hall. 324 p.
- GOUGH, H.C. 1975. *Energy allowances and feeding systems for ruminants*. London, Her Majesty's Stationery Office Government Bookshops. 79 p.

- GRIEVE, D.G.; MacLEOD, G.K.; BATRA, T.R.; BURNSIDE, E.B.; STONE, J.B. 1976. Relationship of feed intake and ration digestibility to estimate transmitting ability, body weight and efficiency in first lactation. *Journal of Dairy Science* 59:1312-1318.
- HARDISON, W.A.; REID, J.T.; MARTIN, C.M.; WOOLFOLK, P.G. 1954. Degree of herbage selection by grazing cattle. *Journal of Dairy Science* 37(1):89-101.
- HAZARD, S. 1984. Desarrollo de un modelo de simulación para la transferencia tecnológica en producción de leche. Tesis Mag. Sc. en Producción Animal. Santiago, Chile. Departamento de Zootecnia, Pontificia Universidad Católica de Chile. 273 p.
- HEADY, H.F.; TORELL, D.T. 1959. Forage preferences exhibited by sheep with esophageal fistulas. *Journal of Range Management* 12(1):28-33.
- HEADY, H.F. 1964. Palatability of herbage and animal preference. *Journal of Range Management* 17(2):76-82.
- HEADY, H.F. 1975. Rangeland management. New York, McGraw Hill. 460 p.
- HODGSON, J.; WILKINSON, J.M. 1967. The relationship between live-weight and herbage intake in grazing cattle. *Animal Production* 9:365-376.
- HODGSON, J. 1977. Factors limiting herbage intake by the grazing animal. In *International Meeting on Animal Production from Temperate Grassland, Proceedings*. Tuam, Irish Republic. Irish Grassland and Animal Production Association p. 70-75.
- HODGSON, J.; MAXWELL, T.J. 1979. Grazing research and grazing management. Bush Estate, Penicuik, Midlothian, U.K. The Hill Farming Research Organization. Biennial Report. p. 169-187.
- HODGSON, J. 1979. Nomenclature and definitions in grazing studies. *Grass and Forage Science* 34:11-18.
- HODGSON, J. 1982. Influence of sward characteristics on diet selection and herbage intake by the grazing animal. In *Nutritional limits to animal production from pastures*. J.B. Hacker (Ed.). London, Commonwealth Agricultural Bureaux. p. 153-166.
- HOLMES, W.; JONES, J.G.M. 1964. The efficiency of utilization of fresh grass. *Proceedings of the Nutrition Society* 23:88.
- HOOVER, S. V.; PERRY, R. F. 1989. Simulation: A problem-solving approach. Reading, Massachusetts. Addison-Wesley Publishing Co. 400 p.
- INRA (INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE). 1980. Alimentation des ruminants. INRA Publications, Paris, France. 585 p.
- JAMIESON, W.S.; HODGSON, J. 1979a. The effects of variation in sward characteristics upon the ingestive behaviour and herbage intake of calves and lambs under a continuous stocking management. *Grass and Forage Science* 34:273-282.
- JAMIESON, W.S.; HODGSON, J. 1979b. The effect of daily herbage allowance and sward characteristics upon the ingestive behaviour and herbage intake of calves under strip grazing management. *Grass and Forage Science* 34:261-271.

- JOURNET, M.; DEMARQUILLY, C. 1979. Grazing. In Feeding strategy for the high yielding dairy cow. W.H. Broster (Ed.). EAAP Publication No. 25. Granada Publishing Co. p.135.
- KAUFFMAN, W.; LUPPING, W. 1982. Protected proteins and protected aminoacids for ruminants. In Protein contribution of feedstuffs for ruminants. E.L. Miller, I.H. Pike, A.J.H. Van Es (Eds.). London, Butterworth Scientific. p. 36-75.
- KENNEDY, G.C. 1952. The role of depot fat in the hypothalamic control of food intake in the rat. Proceedings of the Royal Society of London (Series B) 140:578.
- KLEIBER, M. 1961. The fire of life: An introduction to animal energetics. New York, John Wiley and Sons. 454 p.
- KLEIBER, M. 1945. Body size and lactation rate. Journal of Dairy Science 27:593-594.
- KLOSTERMAN, E.W.; BYERS, F.M.; PARKER, C.F. 1979. Voluntary feed intake of mature cows as related to breed type, condition and forage quality: Beef cows and calves. A Summary of Research. Wooster, Ohio. Ohio Agricultural Research and Development Center. Circular 251:21-23.
- KNUTH, D.E. 1968. The art of computer programming. Vol.2. Seminumerical algorithms. Reading, Massachusetts, Addison- Wesley Pub. Co. 624 p.
- KRUEGER, W.C.; LAYCOCK, W.A.; PRICE, D.A. 1974. Relationship of taste, smell, sight and touch to forage selection. Journal of Range Management 27(4):258-262.
- LEAVER, J.D.; CAMPLING, R.C.; HOLMES, W. 1969. The influence of flexible and rigid grazing management and of supplementary feed on output per hectare and per cow. Animal Production 11:161-172.
- LEHMER, D.H. 1951. Mathematical methods in large scale computing units. Annals Computer Laboratory, Harvard University 26:141-146.
- LOFGREEN, G.P.; GARRETT, W.N. 1968. A system for expressing net energy requirements and feed values for growing and finishing beef cattle. Journal of Animal Science 27:793-806.
- MAFF (MINISTRY OF AGRICULTURE, FISHERIES AND FOOD). 1975. Energy allowances and feeding systems for ruminants. Department of Agriculture and Fisheries for Scotland, Department of Agriculture for Northern Ireland. Technical Bulletin No. 33. London, Her Majesty's Stationery Office. 79 p.
- MARCHI, A. 1973. Principios generales para la suplementación de ganado. San Luis, Argentina, INTA. Información Técnica No. 100.
- MARSAGLIA, G.; BRAY, T.A. 1964. A convenient method for generating normal variates. SIAM Review 6:620-624.
- MAYER, J. 1953. Genetic, traumatic and environmental factors in the etiology of obesity. Physiological Reviews 33:472-508.
- MAYNARD, L.A.; LOOSLI, J.K. 1969. Animal nutrition. 6 ed. New York, McGraw Hill Book. 613 p.
- McDONALD, P. 1973. Animal nutrition. 2 ed. London, Oliver and Boyd. 479 p.

- MESAROVIC, M.D.; TAKAHARA, Y. 1975. General systems theory: Mathematical foundations. New York, Academic Press. 268 p.
- MEYER, P.L. 1973. Probabilidad y aplicaciones estadísticas. México, Fondo Educativo Interamericano, S.A. 372 p.
- MILLER, P.C. 1977. Proposal to the National Science Foundation for Research entitled "Community organization and resource utilization by vegetation in convergent ecosystems". Submitted to the National Science Foundation, March 1977. 339 p.
- MINSON, D.J.; McLEOD, M.N. 1972. The *in vitro* technique: Its modification for estimating digestibility of large number of tropical pasture samples. Queensland, Australia. Division of Tropical Pastures, CSIRO, Technical Paper No 8. 15 p.
- MINSON, D.J. 1982. Effects of chemical and physical composition of herbage eaten upon intake. In Nutritional limits to animal production from pastures. J.B. Hacker (Ed.). London, Commonwealth Agricultural Bureaux. p. 167-182.
- MOE, P.W., TYRRELL, H.F.; FLATT, W.P. 1971. Energetics of body tissue mobilization. Journal of Dairy Science 54(4):548-553.
- MOE, P.W. 1981. Energy metabolism of dairy cattle. Journal of Dairy Science 64:1120-1139.
- MONTERO, L.S. 1972. The control of appetite in lactating cows. Animal Production 14:263.
- MULLER, M. 1959. A comparison of methods for generating normal deviates on digital computers. Journal of the Association for Computing Machinery 6:376-383.
- NAYLOR, T.H.; BALINTFY, J.L.; BURDICK, O.S.; CHU, K. 1966. Computer simulation techniques. New York, John Wiley and Sons. 352 p.
- NAYLOR, T.H.; BALINTFY, J.L.; BURDICK, D.S.; CHU, K. 1973. Técnicas de simulación en computadoras. M. Sunderland; L. Karp (trads.). México, Editorial Limusa. 390 p.
- NRC (NATIONAL RESEARCH COUNCIL). 1976. Nutrient requirements of beef cattle. 6 ed. National Academy of Science. Washington, D.C., National Academy Press. 95 p.
- NRC (NATIONAL RESEARCH COUNCIL). 1978. Nutrient requirements of domestic animals. No. 3. Nutrient requirements of dairy cattle. 5 rev. ed. National Academy of Science. Washington, D.C., National Academy Press. 108 p.
- ORCHARD, R.A. 1972. On an approach to general systems theory. In Trends in general systems theory. G.J. Klir (Ed.). New York, Van Nostrand Reinhold. 462 p.
- ØRSKOV, E.R.; MacLEOD, N.A. 1982. Validation and application of new principles of protein evaluation for ruminants. In Protein contribution of feedstuffs for ruminants. E.L. Miller, I.H. Pike, A.J.H. Van Es (Eds.). London, Butterworth Scientific. p. 76-85.
- OSBOURN, O.F.; GONZALEZ, V. 1973. Nuevas técnicas para la valoración de la hierba y los forrajes para los rumiantes. Pastos (España) 3(1):s/p.

- OSUJI, P.O. 1974. The physiology of eating and the energy expenditure of the ruminant at pasture. *Journal of Range Management* 27:437-443.
- OZORES, A.P. 1983. Distintas relaciones concentrado:forraje con inclusión de ácidos grasos sobre parámetros productivos de vacas lecheras durante la primera mitad de lactancia. Tesis de Grado. Santiago, Chile, Departamento de Zootecnia, Pontificia Universidad Católica de Chile. 105 p.
- PALMQUIST, D.L.; CONRAD, H.R. 1971. High levels of raw soybeans for dairy cows. *Journal of Animal Science* 33:295 (Abstr).
- PARZEN, E. 1972. Procesos estocásticos. Madrid, España, Editorial Paraninfo. 370 p.
- PALMQUIST, D.L.; CONRAD, H.R. 1978. High rations for dairy cows: Effects on feed intake, milk and fat production, and plasma metabolites. *Journal of Dairy Science* 61:890-901.
- PALMQUIST, D.L. 1979. High fat rations for lactating dairy cows. *Feedstuffs* 51(18):28.
- PALMQUIST, D.L.; JENKINS, T.C. 1980. Fat in lactation rations: Review. *Journal of Dairy Science* 63:1-14.
- PALMQUIST, D.L.; CONRAD, H.R. 1980. High fat rations for dairy cows: Tallow and hydrolyzed blended fat at two intakes. *Journal of Dairy Science* 63:391-395.
- POPPI, D.P.; MINSON, D.J.; TERNOUTH, J.H. 1981. Studies of cattle and sheep eating leaf stem fractions of grasses. I. The voluntary intake, digestibility and retention time in the reticulo-rumen. *Australian Journal of Agricultural Research* 32:99-108.
- RAND CORPORATION. 1955. A million random digits with 100,000 normal deviates. Glencoe, Illinois, Free Press. 200 p.
- REID, J.T.; WHITE, O.D.; ANRIQUE, R.; FORTIN, A. 1980. Nutritional energetics of livestock: Some present boundaries of knowledge and future research needs. *Journal of Animal Science* 51(6):1393-1415.
- ROMERO, J.J.; CAÑAS, R.; BALDWIN, R.L.; KOONG, L.J. 1976. Lactational efficiency complex of rats: Provisional model for interpretation of energy balance data. *Journal of Dairy Science* 59(1):57-67.
- RONNING, M.; LABEN, R.C. 1966. Response of lactating cows to free-choice feeding of milled diets containing 10 to 100 % concentrates. *Journal of Dairy Science* 49:1080-1085.
- ROZAS, R.; CAÑAS, R.; GASTO, J.; AGUILAR, C.; FRIEDLI, C. 1978. Costo ecológico de cosecha de alimento por ovinos a pastoreo. In IV Conferencia Mundial de Producción Animal. Memorias. L.S. Verde, A. Fernández (Eds.). Buenos Aires. Vol. 4. p. 136.
- SAMPEDRO, D.F. 1989. Desarrollo de un modelo matemático para la planificación del manejo y utilización de pasturas. Tesis Mag. Sc. en Producción Animal. Santiago, Pontificia Universidad Católica de Chile. 89 p.
- SHANNON, R.E. 1975. Systems simulation: The art and science. Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice-Hall, Inc. 387 p.
- SIBBALD, A.R.; MAXWELL, T.J.; EADIE, J. 1979. A conceptual approach to the modelling of herbage intake by hill sheep. *Agricultural Systems* 4:119.

- SILVA, M. 1977. La pradera como alimento. In Producción de carne bovina. E. Porte (Ed.). Santiago, Editorial Universitaria. p. 45-65.
- SILVA, J.A.R. 1983. Modelo de simulación para el estudio del manejo de sistemas pastoriles de cría ovina. Tesis Mag. Sc. en Producción Animal. Santiago, Pontificia Universidad Católica de Chile. 181 p.
- STOBBS, T.H. 1973. The effect of plant structure on the intake of tropical pasture. II. Differences in sward structure, nutritive value and bite size in animals grazing *Setaria anceps* and *Chloris gayana* at various stages of growth. Australian Journal of Agricultural Research 24:821-829.
- STROMINGER, J.L.; BROBECK, J.R. 1953. A mechanism of regulation of food intake. Yale Journal of Biology and Medicine 25:383.
- SWAN, H. 1976. The physiological interrelationship of reproduction, lactation and nutrition in the cow. In Principles of cattle production. H. Swan, W.H. Broster (Eds.). London, Butterworths. p. 85.
- THOM, R. 1975. Structural stability and morphogenesis. Massachusetts, W.A. Benjamin. 339 p.
- TILLEY, J.M.A.; TERRY, R.A. 1963. A two-stage technique for *in vitro* digestion of forage crops. Journal of British Grassland Society 18:104-111.
- TOCHER, K.D. 1963. The art of simulation. Princeton, New Jersey, Van Nostrand. 184 p.
- TRIGG, T.E.; MARSH, R. 1979. Effect of herbage allowances on intake and utilization of pasture by cattle of different ages. New Zealand Society of Animal Production 39:260-267.
- VAN ES, A.J.H. 1975. Feed evaluation for dairy cows. Livestock Production Science 2:95-107.
- VAN ES, A.J.H. 1976. Factors influencing the efficiency of energy utilization in beef and dairy cattle. In Principles of cattle production. H. Swan, W.H. Broster (Eds.). London, Butterworths. p. 237.
- VAN SOEST, P.J. 1975. Physico-chemical aspects of fiber digestion. In IV International Symposium on Ruminant Physiology, Proceedings. I.W. McDonald, A.C.I. Warner, (Eds.). Sidney, Australia, New England University Publishing Unit. p. 351.
- VAN DYNE, G.M.; HEADY, H.F. 1964. Botanical composition of sheep and cattle diets on a mature annual range. Hilgardia 36(13):465-491.
- VERA, R.R.; MORRIS, J.G.; KOONG, L.J. 1977. A quantitative model of energy intake and partition in grazing sheep in various physiological states. Agricultural Systems 2:133.
- VON NEUMANN, J. 1951. Various techniques used in connection with random digits. U.S. National Bureau of Standards, Applied Mathematics Series 12:36-38.
- VON BERTALANFFY, L. 1968. General systems theory foundations, development, applications. George Brazillier. Nueva York.
- WANGSNES, P.J.; MÜLLER, L.D. 1981. Maximum forage for dairy cows: Review. Journal of Dairy Science 64:1-13.

- WESTON, R.H. 1982. Animal factors affecting feed intake. In *Nutritional limits to animal production from pasture*. J.B. Hacker (Ed.). London, Commonwealth Agricultural Bureaux. p. 183-189.
- WINCHESTER, C.F.; HENDRICKS, W.A. 1953. Energy requirement of beef calves for maintenance and growth. U.S. Department of Agriculture. Technical Bulletin No. 1071. 18 p.
- WOOD, P.D.P. 1979. A simple model of lactation curves for milk yield, food requirement and body weight. *Animal Production* 28:55-63.
- WOOD, P.D.P. 1980. Relationships between size, live-weight change and milk production characters in early lactation in dairy cattle. *Animal Production* 31:143-151.
- WRIGHT, A.; BAARS, J.A.; BRYANT, A.; REARDON, W.M.; SAUNDERS, W.M.; WILSON, D.A. 1975. An evaluation of the role of systems modelling in an agricultural research programme. *New Zealand Society of Animal Production* 36:15-60.

## **ANEXOS**

## ANEXO A

Diagrama de cálculo para planilla electrónica de la estimación de consumo de vacas lecheras en pastoreo. Las letras (A..Z) indican posición columna y los números enteros (1...) posición fila.

A	B
A1	Disponibilidad de MS/ha [ dato ]
A2	Digestibilidad MS [ dato ]
A3	Peso vivo, kg [ dato ]
A4	Rendimiento por lactancia [ dato ]
A5	Día de la lactancia [ dato ]
A6	Concentrado ofrecido, kg MS [ dato ]
A8	Factor de ajuste por rendimiento potencial [ cálculo B8 ]
A9	Factor de ajuste de consumo por digestibilidad de MS [ cálculo B9 ]
A10	Factor de ajuste de consumo por lactancia [ cálculo B10 ]
A11	Factor de ajuste por disponibilidad [ cálculo B11 ]
A12	Consumo potencial [ cálculo B12 ]
A13	Consumo de forraje corregido por disponibilidad [ cálculo B13 ]
A14	Factor de ajuste por consumo de concentrado [ cálculo B14 ]
A16	Efecto complementario del concentrado [ cálculo B16 ]
A17	Efecto aditivo del concentrado [ cálculo B17 ]
A18	Efecto sustitutivo del concentrado [ cálculo B18 ]
A19	Consumo real de MS de forraje [ cálculo B19 ]
A20	Consumo total de MS [ cálculo B20 ]
B8	$((B4-5200)/305)*0.4$
B9	$0.504*B2-7.67$
B10	$@EXP(-1.9526+0.5121*@LN(B5+20)-0.00397*B5)$
B11	$1-@EXP(-0.001664*B1)$
B12	$(B3/1000*B9+B8)*B10$
B13	$+B12*B11$
B14	$1.27-0.0154*B2$
B16	$@IF(B11<0.984,@IF(B12-B13<B6,B12-B13,B6),0)$
B17	$@IF(B11<0.984,@IF(B12-B13<B6,(B6-B12+B13)*B14,0),+B6*B14)$
B18	$@IF(B11<0.984,@IF(B12-B13<B6,(B6-B12+B13)*(1-B14),0),B6*(1-B14))$
B19	$@IF(B11<0.984,@IF(B12-B13<B6,B13-B18,B13),+B12-B18)$
B20	$@IF(B11<0.984,@IF(B12-B13<B6,B13+B12-B13+B17,B13+B6),B12+B6* B14)$

## ANEXO B

Diagrama de cálculo para planilla electrónica de la estimación de consumo de bovinos en pastoreo, considerando un índice de selección. Las letras (A..Z) indican posición columna y los números enteros (1...) posición fila.

A	B
A1	Peso vivo [ dato ]
A2	Disponibilidad, kg MS/ha [ dato ]
A3	Digestibilidad MS (0...1) [ dato ]
A4	Carga animal [ dato ]
A6	Consumo potencial [ cálculo B6 ]
A7	Factor de corrección por disponibilidad [ cálculo B7 ]
A8	Corrección del IS por digestibilidad [ cálculo B8 ]
A9	Porcentaje de utilización [ cálculo B9 ]
A10	Corrección del IS por disponibilidad [ cálculo B10 ]
A11	Índice de selectividad del IS [ cálculo B11 ]
A12	Digestibilidad de lo consumido [ cálculo B12 ]
A13	Factor corrección por digestibilidad [ cálculo B13 ]
A15	Consumo voluntario [ cálculo B15 ]
B6	$0.03*B1$
B7	$1-@EXP(-0.001664*B2)$
B8	$@IF(B3>0.8,0,@IF(B3>0.4,0.5-0.625*B3,0))$
B9	$+B6*B7*B4/B2$
B10	$@IF(B9<0.1,1,@IF(B9<0.5,1.25-2.5*B9,0))$
B11	$1+B8*B10$
B12	$+B3*B11$
B13	$1.675*B12-0.34$
B15	$+B6*B7*B13$

## OTRAS PUBLICACIONES DE RISPAL

Cartas de RISPAL, Nos. 1 al 25: Secretaría Ejecutiva

Boletines Bibliográficos ISAPLAC de Sistemas de Producción Animal, Vol. 1, Nos. 1-3; Vol. 2, No. 1-2: Secretaría Ejecutiva.

- Informe del II Taller de Trabajo sobre Sistemas de Producción Tropical: H. Li Pun y H. Zandstra (eds.)
- Report of the II Workshop on Tropical Animal Production systems: H. Li Pun y H. Zandstra (eds.)
- Informe de la III Reunión de Trabajo sobre Sistemas de Producción Animal Tropical: M.E. Ruiz y H.H. Li Pun (eds.)
- Report of the III Workshop Meeting on Tropical Animal Production Systems: M.E. Ruiz y H. H. Li Pun (eds.)
- Informe de la IV Reunión de Trabajo sobre Sistemas de Producción Animal: B. Quijandría, H.H. Li Pun y R. Borel (eds.)
- Informe de la V Reunión de Trabajo sobre Sistemas de Producción Animal: H.H. Li Pun y V.M. Mares (eds.)
- Informe de la VI Reunión de Trabajo sobre Sistemas de Producción Animal: H.H. Li Pun y N. Gutiérrez (eds.)
- Informe de la VII Reunión Anual de RISPAL: M.E. Ruiz y A. Vargas (eds.)
- Informe de la VIII Reunión General de RISPAL: M.E. Ruiz y A. Vargas (eds.)
- Informe de la IX Reunión General de RISPAL: M.E. Ruiz y A. Ruiz (eds.)
- Ciencias Sociales y Enfoque de Sistemas Agropecuarios: E. Nolte y M.E. Ruiz (eds.)
- El Sondeo: Actualización de su Metodología para Caracterizar Sistemas Agropecuarios de Producción: S. Ruano.
- Nutrición de Rumiantes: Guía Metodológica de Investigación: M.E. Ruiz y A. Ruiz (eds.)
- Ruminant Nutrition Research: A Methodological Guideline: M.E. Ruiz y S.E. Ruiz (eds.).
- Aspectos Metodológicos del Análisis Social en el Enfoque de Sistemas de Producción: B. Quijandría y M.E. Ruiz (eds.)
- \*\* Memorias de la Conferencia Internacional sobre Sistemas y Estrategias de Mejoramiento Bovino en el Trópico: A. Tewolde, D. Salgado y F. Mujica (eds.)

---

\* Publicaciones realizadas por el CIID, Ottawa, Canadá, antes de la creación formal de RISPAL.

\*\* En conjunto con el CATIE y la Universidad de San Carlos, Guatemala.