

REVISIÓN DE LITERATURA

Estimación de la energía calórica en alimentos para ganado de leche según el modelo del NRC (2001)¹

Jorge Alberto Elizondo-Salazar²✉

RESUMEN

El contenido energético de los ingredientes o raciones no puede determinarse utilizando técnicas analíticas estándar, por lo que la mayoría de laboratorios le proveen al usuario valores de energía estimados y en general, el usuario desconoce la manera en que se determina la concentración energética de las materias primas o raciones utilizadas en la alimentación de vacas lecheras, por lo que el objetivo de este documento es presentar un extracto de la metodología que utiliza el modelo del NRC (2001) para estimar el contenido de energía en alimentos para ganado de leche. Dentro de los pasos, se requiere calcular los nutrientes digestibles totales (NDT) en los ingredientes o en la ración a un nivel de consumo de mantenimiento (NDT_{1x}), utilizando el aporte energético que brindan las fracciones químicas del alimento (carbohidratos fibrosos, carbohidratos no fibrosos, lípidos y proteína cruda) medidos o calculados a partir de análisis de laboratorio y a partir de su digestibilidad verdadera para luego, con ayuda de una serie de ecuaciones matemáticas, estimar su contenido energético. A pesar de que ya han pasado muchos años desde la publicación de los requerimientos nutricionales del ganado de leche, aún existe mucho desconocimiento por parte de técnicos, estudiantes del ramo y personas relacionadas con el sector agropecuario de la manera en que se obtiene este valor, por lo que se pretende hacer esta información más accesible a usuarios potenciales de Costa Rica y América Latina.

Palabras clave: Nutrientes digestibles totales, requerimientos, nutrición de rumiantes, balance de raciones, nutrimentos.

¹ Este trabajo formó parte de proyecto 737-B5-188, inscrito en Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.

² Universidad de Costa Rica. Facultad de Ciencias Agroalimentarias, Estación Experimental Alfredo Volio Mata. Cartago, Costa Rica. Autor para correspondencia: jorge.elizondosalazar@ucr.ac.cr (<https://orcid.org/0000-0003-2603-9635>).

Recibido: 30 abril 2020

Aceptado: 7 agosto 2020

Esta obra está bajo licencia internacional Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObrasDerivadas 4.0.



ABSTRACT

Estimation of caloric energy in feeds for dairy cattle according to the NRC model (2001). The energy content of ingredients or rations cannot be determined by using standard analytical techniques, so most laboratories provide the user with estimated energy values and the user is generally unaware of how the energy concentration of ingredients or rations is estimated. Thus, the objective of this document is to present an extract of the methodology used by the NRC (2001) model to determine the energy content in feed or rations for dairy cattle. Within the steps, it is required to calculate total digestible nutrients (TDN) in the ingredients or ration at a maintenance level (TDN_{ix}) using the energy contribution provided by the chemical fractions of the feed (fibrous carbohydrates, non-fibrous carbohydrates, lipids and crude protein) measured or calculated from laboratory analysis and from its true digestibility, and then with the help of a series of mathematical equations calculate its energy content. Despite the fact that many years have passed since the publication of the nutritional requirements of dairy cattle, there is still a lot of unawareness on the part of technicians and students in the field of how to obtain this value, so it is intended to make this information more accessible to potential users in Costa Rica and Latin America.

Key words: Total digestible nutrients, requirements, ruminant nutrition, ration balance, nutrients.

INTRODUCCIÓN

La energía es requerida por todos los animales para llevar a cabo un “trabajo” que, en este caso, no solamente se refiere a llevar una carga sobre el lomo o a arrastrar una carreta, sino que tiene que ver con ejecutar una serie de funciones metabólicas desde las más esenciales como lo son el respirar o digerir los alimentos, hasta aquellas más demandantes como crecer, reproducirse o producir leche.

Para satisfacer los requerimientos de energía de los animales, es preciso conocer las demandas energéticas que tienen las diferentes funciones metabólicas, el contenido de energía en los tejidos y la leche, y la eficiencia con la que se utiliza la energía. Igualmente se requiere conocer como estas necesidades son afectadas por la actividad física y otros agentes ambientales, como el frío o calor, y además de todo lo anterior, es también de gran relevancia determinar la disponibilidad energética de los ingredientes o de la ración que consumen los animales.

Es importante reconocer que la composición de los alimentos, su forma física y química, y el efecto que tiene el consumo de materia seca sobre la digestibilidad, afectan la concentración de energía disponible en los alimentos.

Términos energéticos

Tal como se explicaba anteriormente, energía se define como la capacidad para ejecutar un trabajo. Las células pueden realizar un trabajo al usar la energía química que se encuentra almacenada en los alimentos. Todas las formas de energía pueden ser convertidas cuantitativamente a calor. La unidad básica de la energía calórica es la caloría (cal) y se define como la cantidad de calor requerido para elevar la temperatura de un gramo de agua en un grado centígrado, pasando de 16,5 a 17,5 °C (Ferrel, 1988). Una kilocaloría (kcal) representa 1000 calorías y una megacaloría (Mcal) representa 1000 kilocalorías. El Julio o Joule (J) es la unidad aceptada internacionalmente y equivale a 4,185 calorías; sin embargo, en la mayoría de trabajos científicos publicados en el continente americano, la medida de energía utilizada continúa siendo la caloría.

En nutrición animal, el valor energético de los alimentos o las raciones y los requerimientos del ganado comúnmente se expresan como nutrientes digestibles totales (NDT), energía digestible (ED), energía metabolizable (EM), energía neta para mantenimiento (EN_m), energía neta para ganancia (EN_g) y energía neta para lactación (EN_l).

En el pasado, los NDT se empleaban con mayor frecuencia, pero paulatinamente su uso ha disminuido (Weiss, 1998), y se expresan en porcentaje, kilogramos o libras, en tanto que la energía calórica se expresa en calorías, además los NDT solo contemplan las pérdidas por digestión, ignorando la energía perdida por gases, orina, por producción de calor y por el trabajo que requiere transportar los alimentos a través del tracto gastrointestinal (Kellems y Church, 1998; Weiss et al., 1992; Weiss, 1998; NRC, 2001). Así por ejemplo, dependiendo del nivel de consumo del animal y la composición nutricional de la dieta, la energía perdida como metano puede representar de 2 a 12% de la energía bruta consumida (Johnson y Johnson, 1995).

En la actualidad, el sistema de energía calórica ha sido adoptado para identificar las necesidades energéticas de los rumiantes y en la Figura 1 se presenta, de manera simplificada, el desglose o fraccionamiento de la energía calórica.

Cuantificar la cantidad de energía total o energía bruta (EB) de los alimentos es una tarea relativamente simple con el uso de una bomba calorimétrica; sin embargo, existe una gran variabilidad en la digestibilidad y en el metabolismo de los animales que impide el uso de la EB para la formulación de raciones o para la comparación entre materias primas (Weiss, 1993).

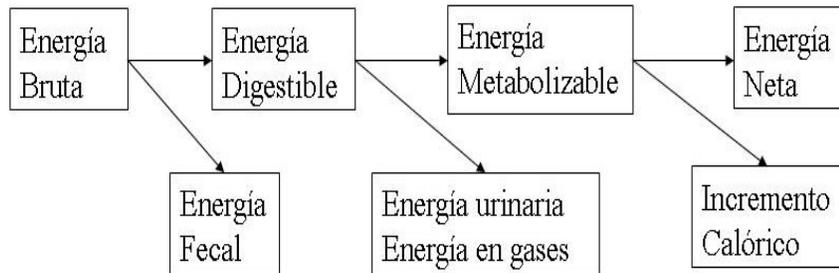


Figura 1. Desglose del sistema de energía (Kellems y Church, 1998).

De la energía total consumida por el bovino, no toda es utilizada por el animal, ya que parte del alimento no se digiere y se pierde en las heces. La energía bruta, menos la energía perdida en el alimento no digerido (energía fecal) se conoce como energía digestible (ED). La energía digestible no presenta muchas ventajas con relación al empleo de los NDT, pues solamente considera la pérdida de energía en las heces.

La digestibilidad de un ingrediente o una ración disminuye al incrementar el consumo de materia seca, por lo que el modelo del NRC (2001) utiliza un descuento en la digestibilidad basado en el consumo de energía sobre los requerimientos de mantenimiento, y se le refiere como factor de descuento. Por ejemplo, si una vaca lactante consume 30 Mcal de EN_L /día y solamente 10 Mcal de EN_L /d se requieren para mantenimiento, entonces el consumo de energía es 3 veces (3X) el requerimiento energético de mantenimiento. En este caso, se deberá considerar un factor de descuento en la energía que aporta la ración.

La energía digestible menos la energía perdida en la orina y en los gases como el metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), se conoce como energía metabolizable (EM). La EM no contempla las pérdidas de energía por el incremento de calor producido como resultado del metabolismo de los nutrientes (metabolismo intermediario) y por las fermentaciones microbianas que ocurren en el rumen y el resto del tracto gastrointestinal. Cuando estas últimas pérdidas de energía se toman en consideración, la energía restante se denomina energía neta (EN), que será empleada por el animal para mantenimiento (EN_m), ganancia de peso (EN_g) o producción de leche (EN_L).

La razón de este último fraccionamiento se debe a que la energía es utilizada con eficiencias diferentes, dependiendo de la especie y de la etapa fisiológica del animal. Para el ganado bovino adulto, tanto para mantenimiento como para producción de leche, solamente se utiliza la EN_L , ya que la eficiencia con que se utiliza la energía para mantenimiento (62%) es muy similar a la eficiencia con que se utiliza la energía para la producción de leche (64%) (Moe y Tyrell, 1972).

Ecuaciones para determinar el contenido energético en ingredientes o en raciones

El contenido energético en los ingredientes o raciones no puede determinarse utilizando técnicas analíticas estándar, por lo que la mayoría de laboratorios le proveen al usuario valores de energía calórica estimados.

El NRC (2001) ha hecho un análisis exhaustivo para calcular la concentración energética de los alimentos, basado en su composición química. Lo primero que se requiere es calcular los NDT en los ingredientes o en la ración a un nivel de consumo de mantenimiento (NDT_{1x}) y esto se calcula utilizando el aporte energético que brindan las fracciones químicas sumativas del alimento (carbohidratos fibrosos, carbohidratos no fibrosos, lípidos y proteína cruda) medidos o calculados a partir de análisis de laboratorio y a partir de su digestibilidad verdadera (de valores conocidos o calculados).

Los datos de calidad nutricional de las fracciones químicas que se requieren para determinar adecuadamente el contenido energético incluyen: cenizas, fibra detergente neutro (FDN), lignina en detergente ácido (ADL), proteína cruda (PC), ácidos grasos o extracto etéreo (AG o EE), proteína cruda ligada a la FDN (PCFDN) y proteína cruda ligada a la fibra detergente ácido (PCFDA).

La ecuación del NRC (2001) para calcular los NDT_{1x} (como porcentaje de la materia seca) se conoce como ecuación sumativa, que pretende cuantificar la cantidad de nutrientes “verdaderamente digestibles” o el aporte energético real que brindan los carbohidratos (como los carbohidratos no fibrosos y la FDN), la PC, y el EE en el alimento. La cantidad de energía digestible en el alimento será entonces calculada como la suma de la energía proveniente de la fracción verdaderamente digestible del alimento.

Para estimar el contenido de EN_{L1x} (energía neta de lactancia una vez mantenimiento) se estiman inicialmente los nutrientes totalmente digestibles (td) una vez mantenimiento (NDT_{1x}) a partir de la siguiente ecuación (la unidad de cada fracción es porcentaje de la MS):

$$NDT_{1x} (\%) = CNFtd + PCtd + (AGtd \times 2,25) + FDNtd - 7$$

Donde:

- CNFtd = carbohidratos no fibrosos totalmente digestibles, que se obtienen con la ecuación:

$$CNFtd = 0,98 \times (100 - [(FDN - PCFDN) + PC + EE + cenizas]) \times FAP$$

Donde:

FAP: factor de ajuste por procesamiento. Debido a que la disponibilidad del almidón puede verse afectada por el procesamiento tanto físico como químico. El FAP se toma en consideración para contabilizar por las diferencias en la digestibilidad del almidón y por ende el contenido energético del alimento. En otras palabras, este factor corrige el contenido energético por efectos del procesamiento mecánico (molienda) o procesamiento calórico en la disponibilidad de carbohidratos no fibrosos (almidón) y proteína de ciertos alimentos. Puede utilizarse 0,94 para ensilado de maíz y 1,0 para maíz molido y otros granos.

- PCtd = proteína cruda totalmente digestible, que se obtiene con las ecuaciones:

$$PCtd \text{ (para forrajes)} = PC \times e^{-1,2 \times (PCFDA / PC)}$$

$$PCtd \text{ (para alimentos balanceados)} = PC \times [1 - (0,4 \times (PCFDA / PC))]$$

- AGtd = Ácidos grasos totalmente digestibles, que se obtiene con la ecuación:

$$AGtd = 1,0 \times AG. \text{ Nota } (AG = EE - 1), \text{ entonces si } EE < 1, AG = 0$$

- FDNtd = fibra detergente neutro totalmente digestible, que se obtiene con la ecuación:

$$FDNtd = 0,75 \times ((FDN - PCFDN) - ADL) \times [1 - (ADL / (FDN - PCFDN))^{0,667}]$$

- El 7 es un factor de ajuste por los NDT metabólico fecales.

Conversión de NDT_{1x} a ED_{1x}

La concentración de ED, expresada como megacalorías de ED por kilogramo de MS de un alimento cuando se consume a una vez mantenimiento, se obtiene convirtiendo los gramos de NDT_{1x} a megacalorías, utilizando la energía de combustión de 4,2; 5,6 y 9,4 Mcal/kg cuando los carbohidratos digeridos, la PC digerida y la grasa digerida, respectivamente, son metabolizados en el cuerpo para brindar energía.

Por lo tanto:

ED_{1x} = energía digestible una vez mantenimiento (Mcal kg^{-1} de MS)

$$ED_{1x} = [(CNFtd / 100) \times 4,2] + [(FDNtd / 100) \times 4,2] + [(PCtd / 100) \times 5,6] + [(AG / 100) \times 9,4] - 0,3$$

Los valores de las fracciones totalmente digestibles se obtienen con las fórmulas anotadas anteriormente (expresadas como porcentaje) y el factor 0,3 fue calculado como $7 \times 0,044$ Mcal por 100 g de TND metabólico fecal.

Puede notarse que el coeficiente 4,2 se utiliza para convertir tanto CNFtd y FDNtd a valores de energía. Se utiliza el mismo valor ya que una vez que los carbohidratos han sido digeridos (o fermentados) brindarán $4,2$ Mcal kg^{-1} de MS, ya sea que provengan de carbohidratos fibrosos o no fibrosos.

Tal y como se calculó con la ecuación anterior, ED_{1x} representa la energía que estará disponible para una vaca asumiendo que su sistema digestivo tiene la capacidad y el tiempo requerido para extraer la energía del alimento. Sin embargo, en la realidad, conforme la vaca produce más leche y consume más alimento, la digestibilidad (y con ello el contenido energético) del alimento disminuye debido al incremento en la tasa de pasaje en el rumen (esto es menos tiempo para la fermentación ruminal).

Conversión de ED_{1x} a ED_P

En el NRC (2001), el consumo de MS sobre mantenimiento de la ración propuesta debe conocerse para calcular un factor de descuento que refleja la disminución en la digestibilidad de los NDT, debido a una mayor tasa de pasaje cuando las vacas producen más y consumen más.

La ED a un nivel productivo de consumo (ED_P) se calcula como:

$$ED_P \text{ (Mcal/kg)} = ED_{1x} \times \text{Factor de descuento}$$

Donde el factor de descuento se calcula como:

$$- \frac{[NDT_{1x} - ((0,18 \times NDT_{1x}) - 10,3) \times I]}{NDT_{1x}}$$

NDT_{1x} son calculados tal y como se explicó anteriormente, excepto que la energía proveniente de la grasa de la dieta por encima del 3% se excluye del cálculo de NDT_{1x} .

I es el nivel de consumo expresado como el incremento sobre mantenimiento (ej. Una vaca que consume 3x sobre mantenimiento, entonces $I = 3x - 1x = 2$). Con o sin descuento de digestibilidad, el NRC (2001) asume que los NDT descontados de la dieta, nunca sean menores a 60%, es decir, en raciones con $\leq 60\%$ NDT el factor de descuento es 1,0 y el descuento máximo es aquel que no permita que los NDT sea menores a 60%.

En el Cuadro 1, se muestra la magnitud del factor de descuento que se obtiene con diferentes porcentajes de NDT y con diferentes niveles de consumo de materia seca relativo al mantenimiento. Puede observarse como a mayor consumo, el efecto sobre la digestibilidad de los NDT es mayor y por ende habrá una menor disponibilidad porcentual de energía.

Cuadro 1. Efecto del consumo de materia seca (MS) sobre el factor de descuento (%), que implica una disminución en la digestibilidad de los nutrientes digestibles totales (NDT).

NDT (% MS)	Consumo de materia seca relativo a mantenimiento				
	Factor de descuento, %				
	1x	2x	3x	4x	5x
65,0	0,0	97,8	95,7	93,5	...
70,0	0,0	96,7	93,4	90,1	86,9
75,0	0,0	95,7	91,5	87,2	82,9
80,0	0,0	94,9	89,8	84,6	79,5

Conversión de ED_P a EM a nivel productivo (EM_P)

$$EM_P \text{ (Mcal/kg)} = [1,01 \times ED_P - 0,45] + [0,0046 \times (EE - 3)]$$

El segundo término de la ecuación es un ajuste aplicable solamente a alimentos que contienen más de 3% de EE. Este ajuste refleja una eficiencia incrementada de la ED a EM con elevadas concentraciones de grasa en la dieta (para suplementos grasos, $EM = ED$).

En alimentos con menos de 3 % de EE, se utiliza la siguiente ecuación:

$$EM_P \text{ (Mcal/kg)} = 1,01 \times ED_P - 0,45$$

Conversión de EM_P a EN_L a nivel productivo EN_{LP}

$$EN_{LP} \text{ (Mcal/kg)} = 0,703 \times EM_P - 0,19 + [(0,097 \times EM_P + 0,19) / 97] \times (EE - 3)$$

El segundo término de la ecuación es un ajuste aplicable solamente a alimentos que contienen más de 3% de EE. Este ajuste refleja una eficiencia incrementada de la conversión de EM a EN (para suplementos grasos, $EN_{LP} = 0,8 EM_P$).

En alimentos con menos de 3 % de EE, se utiliza la siguiente ecuación:

$$EN_{LP} \text{ (Mcal/kg)} = 0,703 \times EM_P - 0,19$$

Considérese la información presentada en el Cuadro 2 como insumos necesarios para estimar la EN_{L1x} de un forraje.

Cuadro 2. Composición nutricional de un forraje para estimar su concentración de EN_{L1x} .

Nutriente	Concentración, % de la MS
Proteína cruda (PC)	14,00
Fibra detergente neutro (FDN)	55,00
PCFDN (PC ligada a la FDN)	1,90
PCFAD (PC ligada a la FAD)	0,90
EE (Extracto etéreo)	2,80
Cenizas	4,60
ADL (Lignina en detergente ácido)	3,70
FAP (Factor de ajuste por procesamiento)	1,00

Ejemplo de cálculo de NDT_{1x} con la información del forraje presentada en el Cuadro 2

$$NDT_{1x} (\%) = CNFtd + PCtd + (AGtd \times 2,25) + FDNtd - 7$$

$$CNFtd = 0,98 \times [100 - (55,00 - 1,90) - 14,00 - 2,8 - 4,60] \times 1,0 = 24,99$$

$$PCtd (\text{para forrajes}) = 14,00 \times e^{[-1,2 \times (0,90/14,00)]} = 12,96$$

$$AGtd = 1,0 \times (2,8 - 1,0) = 1,80$$

$$FDNtd = 0,75 \times (55,00 - 1,90 - 3,70) \times [1 - (3,70 / (55,00 - 1,90))^{0,667}] = 30,78$$

$$NDT_{1x} (\%) = 24,99 + 12,96 + (1,80 \times 2,25) + 30,78 - 7 = 65,78\%$$

Conversión de NDT_{1x} a ED_{1x}

$$ED_{1x} = (0,042 \times 24,99) + (0,056 \times 12,96) + (0,094 \times 1,80) + (0,042 \times 30,78) - 0,3 = 2,94 \text{ Mcal kg}^{-1} \text{ de MS}$$

Conversión de ED_{1x} a EM_{1x}

$$EM_{1x} (\text{Mcal kg}^{-1} \text{ MS}) = 1,01 \times 2,94 - 0,45 = 2,52 \text{ Mcal kg}^{-1} \text{ de MS}$$

Nótese que debido a que el EE es menor a 3,0; no se utilizó el segundo factor de la ecuación.

Conversión de EM_{1x} a EN_{L1x}

$$EN_{L1x} \text{ (Mcal kg}^{-1} \text{ MS)} = 0,703 \times 2,52 - 0,19 = 1,58 \text{ Mcal kg}^{-1} \text{ de MS}$$

Nótese aquí también que debido a que el EE es menor a 3,0; no se utilizó el segundo factor de la ecuación.

Poder determinar adecuadamente la concentración de energía de los ingredientes o de la ración es de gran importancia, ya que animales que no llenan sus requerimientos de energía reducen la producción láctea, pueden tener pérdidas excesivas de peso, lo que conlleva a problemas reproductivos y además, puede ver disminuida su resistencia a enfermedades; mientras que, raciones con exceso de energía pueden incrementar los costos de producción, producir vacas sobre acondicionadas, lo que a su vez puede conducir a problemas metabólicos y reproductivos (Weiss, 1998; Esposito et al., 2014).

CONSIDERACIONES FINALES

El modelo del NRC (2001) utiliza la FDN, lignina, cenizas, EE o AG, PC, PCFDN y PCFDA para estimar adecuadamente la concentración de NDT y la EN_L para una cantidad muy diversa de ingredientes y materias primas utilizadas en la alimentación de ganado lechero. El poder estimar la concentración de energía en dichos materiales es de gran importancia debido a la cantidad de megacalorías que requieren las vacas lecheras. La utilización del modelo provee un medio para hacer comparaciones precisas del contenido energético que ayudarán a balancear raciones para suplir los requerimientos energéticos de los animales.

LITERATURA CITADA

- ESPOSITO, G., IRONS, P., WEBB, E., & CHAPWANYA, A. (2014). Interactions between negative energy balance, metabolic diseases, uterine health and immune response in transition dairy cows. *Anim. Reprod. Sci.* 144(3-4):60-71.
- FERRELL, C.L. (1988). Energy metabolism. In: *The ruminant animal. Digestive physiology and nutrition.* Church, D.C (ed). Prentice Hall, Inc. USA. 250-268 p.
- JOHNSON, K.A., & JOHNSON, D.E. (1995). Methane emissions from cattle. *J. Anim. Sci.* 73:2483-2492.
- KELLEMS, R.O., & CHURCH, D.C. (1998). *Livestock feeds and feeding.* 4th ed. Upper Saddle River, N. J., USA. Prentice-Hall, Inc. 546 p.
- MOE, P.W., & TYRRELL, H.F. (1972). The net energy value of feeds for lactation. *J. Dairy Sci.* 55:945-958.
- NRC (NATIONAL RESEARCH COUNCIL). (2001). *Nutrient requirements of dairy cattle.* 7th rev. ed. Washington, DC., USA. National Academy Press. 381 p.
- WEISS, W. P. (1993). Predicting energy value of feeds. *J. Dairy Sci.* 76:1802-811.
- WEISS, W. P. (1998). Estimating the available energy content of feeds for dairy cattle. *J. Dairy Sci.* 81:830-839.
- WEISS, W. P., CONRAD, H. R., & ST. PIERRE, N. R. (1992). A theoretically-based model for predicting total digestible nutrient values of forages and concentrates. *Anim. Feed Sci. Technol.* 39:95-110.