

CAPÍTULO 11

Evaluación de alimentos: contenido energético de los alimentos y partición de la energía

McDonald, P., Edwards, R. A., Greenhalgh, J. F. D., Morgan, C. A., Sinclair, L. A. y Wilkinson, R. G. (2022).

Animal Nutrition, 8.^a edición. Pearson Education.

Nota del traductor: Esta es una traducción fiel al español del Capítulo 11 de la obra original en inglés. Allí donde el texto original expresa valores de energía en Megajulios (MJ), se ha añadido entre corchetes en **rojo** el valor equivalente en Megacalorías (Mcal), empleando el factor de conversión: **1 MJ = 0,2389 Mcal**. Esta adición aparece tanto en el texto corrido como en tablas y cuadros de cálculo.

Contenido del capítulo

11.1 Demanda de energía

11.2 Suministro y partición de la energía

11.3 Calorimetría animal: métodos para medir la producción de calor y la retención de energía

11.4 Utilización de la energía metabolizable

Los principales compuestos orgánicos presentes en los alimentos son requeridos por los animales como bloques de construcción para la síntesis de productos animales como la leche y los huevos. También son requeridos como fuentes de energía para sostener el trabajo realizado. Una característica unificadora de estas diversas funciones es que todas implican una transferencia de energía. Esto se aplica cuando la energía química se convierte de una forma a otra (por ejemplo, cuando la grasa corporal se sintetiza a partir de carbohidratos de la dieta), y también cuando los nutrientes son oxidados y convertidos en energía mecánica o calorífica. La capacidad de un alimento para suministrar energía es, por tanto, de gran importancia para determinar su valor nutritivo. Este capítulo y el siguiente abordarán los factores que afectan el contenido energético de los alimentos, la partición de la energía alimentaria dentro del animal, la medición del metabolismo energético y los diferentes métodos utilizados para expresar el suministro de energía.

11.1 DEMANDA DE ENERGÍA

Antes de analizar los factores que afectan el suministro de energía procedente de los alimentos, puede resultar útil explicar brevemente los factores que afectan la demanda de energía, aunque estos factores se analizarán con mayor detalle en los Capítulos 14, 15 y 16. Un animal requiere energía tanto para el mantenimiento como para la producción. El requerimiento energético de mantenimiento representa la

energía necesaria para los procesos vitales del organismo que son esenciales para la vida — por ejemplo, el trabajo asociado con la actividad muscular esencial (por ejemplo, el latido del corazón), el trabajo asociado con el transporte activo (movimiento de sustancias disueltas en contra del gradiente de concentración) y la energía asociada con la síntesis de constituyentes corporales esenciales como enzimas y hormonas. Un animal privado de alimento continúa requiriendo energía para estos procesos, de lo contrario moriría. En un animal en inanición, la energía necesaria para los procesos vitales del organismo se deriva del catabolismo de las reservas corporales — inicialmente glucógeno, pero luego grasa corporal y proteína. En un animal alimentado, la demanda primaria de energía es satisfacer este requerimiento de mantenimiento y prevenir el catabolismo de los tejidos corporales.

Cuando la energía de los alimentos se utiliza para el mantenimiento, el animal no realiza trabajo sobre su entorno y toda la energía utilizada se convierte en calor, que, aunque es útil para mantener la temperatura corporal, se expende desde el cuerpo del animal. En un animal en ayuno, la cantidad de calor producido es igual a la energía derivada del catabolismo tisular, que, cuando se mide en condiciones específicas, se conoce como tasa metabólica basal o metabolismo en ayuno del animal. La forma en que las estimaciones del metabolismo basal se utilizan para evaluar el requerimiento energético de mantenimiento de los animales se explica en el Capítulo 14.

La energía suministrada por los alimentos en exceso del requerimiento de mantenimiento se utiliza para la producción. En animales jóvenes en crecimiento, la energía se almacena en tejidos nuevos principalmente como proteína. Sin embargo, a medida que los animales maduran, una proporción creciente se almacena como grasa. En animales gestantes y lactantes, la energía se almacena en los productos de la concepción (feto y placenta) y en los constituyentes de la leche, respectivamente. Otras formas de producción incluyen la energía requerida para la actividad o el ejercicio y la energía requerida para la síntesis de lana o huevos. Ningún proceso, ni siquiera el mantenimiento, tiene una prioridad absoluta sobre la energía alimentaria. Por ejemplo, un animal joven que recibe proteína adecuada pero energía insuficiente para el mantenimiento puede seguir depositando proteína corporal, mientras descompone la grasa corporal. De manera similar, el crecimiento de la lana continúa en animales con ingestas de energía por debajo del mantenimiento, e incluso en animales en ayuno.

11. SUMINISTRO Y PARTICIÓN DE LA ENERGÍA

2

Energía bruta (EB)

La energía se almacena en los componentes químicos de los alimentos como energía química. La cantidad de energía química en un alimento se mide convirtiéndola en calor y determinando la producción de calor durante la combustión. La cantidad de calor producido por la oxidación completa de una unidad de peso de un alimento se conoce como su valor de energía bruta (EB), o calor de combustión. La energía bruta se mide en un aparato denominado calorímetro de bomba, que en su forma más simple consiste en un recipiente de acero resistente (bomba) que descansa en un recipiente aislado de agua. La muestra de alimento se comprime en pastillas y se coloca en la bomba, que luego se presuriza a 25 atmósferas con oxígeno. Se registra la temperatura inicial del agua en el recipiente antes de que la muestra se encienda eléctricamente. La muestra de alimento arde vigorosamente en una atmósfera de oxígeno, y el calor producido durante la oxidación se disipa a través de la pared de la bomba, haciendo que la temperatura del agua en el recipiente aumente. Cuando se alcanza el equilibrio, se registra la temperatura final. La cantidad de calor producida se calcula a partir del peso de la muestra de alimento oxidado, el peso del agua, el aumento de temperatura del agua y las capacidades caloríficas específicas del agua y la bomba. La calorimetría de bomba se utiliza para medir el contenido de energía bruta de alimentos completos y sus componentes, y el contenido energético de tejidos animales y productos de

excreción.

En la Fig. 11.1 se presentan algunos valores típicos de EB para diversos alimentos. El principal determinante del contenido de EB de los compuestos orgánicos es su grado de oxidación, expresado como la relación de carbono más hidrógeno respecto al oxígeno. Todos los carbohidratos tienen relaciones similares y, por tanto, tienen aproximadamente el mismo contenido de EB (17,5 MJ/kg **[4.18 Mcal/kg]** MS). Sin embargo, las grasas triglicéridas típicamente tienen una relación más alta (contienen menos oxígeno) y, por tanto, tienen un valor de EB más alto (39,0 MJ/kg **[9.32 Mcal/kg]** MS). Los ácidos grasos individuales varían en su contenido de EB dependiendo de la longitud de su cadena de carbono y del grado de saturación, teniendo aquellos con cadenas más cortas (ácidos grasos volátiles) y un mayor número de dobles enlaces un menor contenido energético. Las proteínas tienen un contenido de EB más alto que los carbohidratos porque contienen los elementos oxidables adicionales nitrógeno y azufre. El metano tiene un contenido de EB muy alto porque consiste enteramente de carbono e hidrógeno.

A pesar de las diferencias en el contenido de EB entre los diferentes componentes alimentarios, el hecho de que los carbohidratos sean el componente predominante en la mayoría de los alimentos significa que los valores de EB varían muy poco. Solo los alimentos ricos en grasa, como la harina de soja entera con un extracto etéreo de 222 g/kg MS, tienen valores significativamente más altos. De manera similar, aquellos ricos en cenizas, que no tienen valor nutritivo, tienen valores significativamente más bajos. La mayoría de los alimentos comunes tienen un contenido de EB de aproximadamente 18,4 MJ/kg **[4.39 Mcal/kg]** MS.

No toda la EB de los alimentos está disponible para su uso por el animal. Parte se pierde del animal en varios productos de excreción sólidos, líquidos o gaseosos, y parte se pierde como calor. Estas pérdidas de energía se ilustran en la Fig. 11.2. La sustracción de estas pérdidas del contenido de EB del alimento produce medidas adicionales del suministro de energía alimentaria. Por ejemplo, restar la pérdida de EB en las heces de la EB en el alimento proporciona una medida de la energía digestible. Esta y otras medidas del suministro de energía se analizarán ahora con mayor detalle.

Figura 11.1. Algunos valores típicos de energía bruta (MJ/kg MS) con equivalentes en Mcal/kg MS.

Categoría	Componente / Alimento	EB (MJ/kg MS)	EB (Mcal/kg MS)
Constituyentes alimenticios	Glucosa	15,6	3.73
	Almidón	17,7	4.23
	Celulosa	17,5	4.18
	Caseína	24,5	5.85
	Grasa butírica (butterfat)	38,5	9.2
	Grasa (de semillas oleaginosas)	39,0	9.32
Productos de fermentación (AGV)	Ácido acético	14,6	3.49
	Ácido propiónico	20,8	4.97
	Ácido butírico	24,9	5.95
	Ácido láctico	15,2	3.63
Tejidos animales (sin cenizas)	Metano	55,0	13.14
	Músculo	23,6	5.64
	Grasa	39,3	9.39

Categoría	Componente / Alimento	EB (MJ/kg MS)	EB (Mcal/kg MS)
Alimentos	Grano de maíz	18,5	4.42
	Grano de avena	19,6	4.68
	Paja de avena	18,5	4.42
	Harina de linaza	21,4	5.11
	Heno de gramíneas	18,9	4.51
	Leche (400 g grasa/kg)	24,9	5.95

Figura 11.2. La partición de la energía alimentaria en los animales.

Energía bruta (= calor de combustión)
↓ Energía fecal → Energía digestible (= energía del alimento digerido)
↓ Energía urinaria + Energía del metano → Energía metabolizable (EM)
↓ Incremento calórico → Energía neta (EN)
↓ Usada para mantenimiento Usada para producción (retención de energía)

Energía digestible (ED)

La energía digestible representa la energía absorbida por el animal. La energía digestible aparente se calcula como la EB aportada por una unidad de alimento menos el contenido de EB de las heces resultante del consumo de esa unidad de alimento. Un ejemplo del cálculo de la energía digestible se presenta en el Cuadro 11.1. Como la pérdida de energía fecal representa con mucho la pérdida de energía más importante y variable de los alimentos animales, la ED es una medida mucho mejor de la energía disponible para sostener la producción animal que la EB. La energía digestible se usa a menudo como medida del suministro de energía para cerdos y caballos, donde las pérdidas adicionales de energía en orina y metano son relativamente pequeñas y consistentes.

Energía metabolizable (EM)

Además de las pérdidas de energía en las heces, la energía también se pierde como compuestos energéticos en la orina, y como gases combustibles como el metano producido por la fermentación microbiana en el rumen o en el intestino posterior. La energía metabolizable representa la energía que está disponible para uso por el animal y se calcula como ED menos la energía perdida en orina y gases combustibles (véase Cuadro 11.1). Típicamente, del 2 al 5 por ciento de la ingesta de EB se pierde en la orina en forma de compuestos nitrogenados como urea, ácido hipúrico, creatinina y alantoína, y en compuestos no nitrogenados como glucuronatos y ácido cítrico. Los gases combustibles producidos en el rumen e intestino posterior consisten casi enteramente en metano (CH₄). La producción de metano está estrechamente relacionada con la ingesta de alimentos, y a un nivel de alimentación de mantenimiento aproximadamente del 7 al 9 por ciento de la EB (del 11 al 13 por ciento de la ED) se pierde como metano. A niveles de alimentación más altos, la proporción cae al 6-7 por ciento de la EB, siendo la reducción más marcada para alimentos de alta digestibilidad. Con alimentos previamente fermentados, como el grano de cervecera, la producción de metano es baja (3 por ciento de la EB). Cuando la producción de metano no puede medirse fácilmente, puede estimarse como 8 por ciento de la ingesta de energía bruta. Otra aproximación permite calcular el valor de EM de los alimentos para rumiantes a partir de su valor de ED multiplicando por 0,81. Esto implica que, en promedio, alrededor del 19 por ciento de la energía aparentemente digerida se excreta en la orina y como metano.

CUADRO 11.1 | Cálculo

Cálculo de la energía digestible (ED) y la energía metabolizable (EM) del heno suministrado a ovejas

En el Cuadro 10.1 del Capítulo 10 se presentaron datos de un ensayo para determinar la digestibilidad de un heno en ovejas. Además de los datos presentados, muestras del alimento y las heces fueron analizadas en el laboratorio para energía bruta (EB) por calorimetría de bomba.

Alimento Heces

Ingesta de MS (kg/día) 1,63 ---

Producción de MS (kg/día) --- 0,76

EB (MJ/kg MS) [Mcal/kg MS] 18,0 [4.3] 18,7 [4.47]

EB (MJ/día) [Mcal/día] 29,3 [7.0] 14,2 [3.39]

Cálculo de la digestibilidad de la EB y la energía digestible (ED)

$$\text{Digestibilidad EB} = (29,3 - 14,2) / 29,3 = 0,515 \text{ (51,5\%)}$$

$$\text{Energía digestible (ED)} = 18,0 \times 0,515 = 9,27 \text{ MJ/kg MS [2.21 Mcal/kg MS]}$$

Cálculo de la metabolizabilidad de la EB (q) y la energía metabolizable (EM)

Además de las pérdidas fecales, asúmase que se pierden adicionalmente 0,90 MJ/día [0.21 Mcal/día] en orina y 1,25 MJ/día [0.3 Mcal/día] en gases:

$$\text{Metabolizabilidad EB (q)} = (29,3 - 14,2 - 0,90 - 1,25) / 29,3 = 0,411 \text{ (41,1\%)}$$

$$\text{EM} = 18,0 \times 0,411 = 7,39 \text{ MJ/kg MS [1.77 Mcal/kg MS]}$$

La EM también puede calcularse a partir de la ED como:

$$\text{EM} = 0,81 \times \text{ED}$$

$$\text{EM} = 0,81 \times 9,27 = 7,50 \text{ MJ/kg MS [1.79 Mcal/kg MS]}$$

El valor de EM de un alimento se determina en un ensayo de alimentación similar a un ensayo de digestibilidad, pero en el que también se recolectan la orina y el metano además de las heces. Las jaulas metabólicas para ovejas y cerdos generalmente incorporan un dispositivo para recolectar la orina. Con el ganado bovino, la orina se recolecta en urinales de caucho colocados debajo del abdomen en los machos y sobre la vulva en las hembras, y se conduce por gravedad o succión hasta un recipiente de recolección. Un método alternativo de recolección de orina de hembras, que se usa comúnmente en cerdas, es insertar un catéter de caucho en la vagina.

Cuando se mide la producción de metano para estimar las pérdidas de energía improductiva, el animal generalmente se mantiene en un contenedor hermético conocido como cámara de respiración (véase p. 279). Más recientemente, la importancia de la producción de metano de los rumiantes en relación con el calentamiento global ha estimulado el desarrollo de una técnica alternativa que permite medir el metano de animales individuales, ya sea confinados o no. En esta técnica, se inserta en el rumen un tubo de permeación calibrado que contiene hexafluoruro de azufre (SF₆) y libera SF₆ a través de una membrana permeable a una tasa controlada. Después de un período de adaptación de 5 días, se recolectan muestras de aire espirado cerca de la nariz de cada animal utilizando tuberías capilares durante un

período de 24 horas en recipientes previamente evacuados. Las concentraciones de SF₆ y CH₄ se miden por cromatografía de gases y la tasa de emisión de metano, corregida por los niveles de fondo, se calcula como:

$$Q_{\text{CH}_4} = Q_{\text{SF}_6} \times [\text{CH}_4] / [\text{SF}_6]$$

donde [CH₄] y [SF₆] son concentraciones medidas en exceso del fondo, y Q_{SF₆} es la tasa de liberación de SF₆ del tubo de permeación.

Para las aves de corral, la EM se mide más fácilmente que la ED porque las heces y la orina se eliminan juntas a través de la cloaca. Se ha desarrollado un método rápido estandarizado para determinar el valor de EM de los alimentos para aves de corral. Los gallos se someten a ayuno (o se les alimenta con una pequeña cantidad de solución de glucosa) durante 48 horas hasta que el tracto digestivo esté vacío, y luego se les fuerza a ingerir una sola comida (30-40 g) del alimento bajo investigación utilizando un embudo y émbolo de acero inoxidable insertados cuidadosamente por el esófago hasta el buche. Luego se recolectan las excretas hasta que se eliminan todos los residuos derivados de la comida única. Al mismo tiempo, se recolectan las pequeñas cantidades de excretas eliminadas por aves en ayuno (o alimentadas con glucosa), como medida de las pérdidas endógenas. La energía derivada de estas pérdidas endógenas se resta entonces de la energía derivada de las excretas de las aves alimentadas, por lo que la estimación de EM obtenida es un valor verdadero en lugar de aparente (véase p. 255). Esto se conoce como energía metabolizable verdadera (EMv) y no es directamente comparable con las medidas de EM obtenidas usando otras técnicas.

Factores que afectan el valor de energía metabolizable de los alimentos

Los valores de EM de varios piensos se presentan en la Tabla 11.1. Es evidente que, de las pérdidas de energía consideradas hasta ahora, las pérdidas fecales son con mucho las más importantes. Incluso para alimentos de alta digestibilidad como la cebada, se pierde el doble de energía en las heces que en la orina y el metano. Los principales factores que afectan el valor de EM de un alimento son, por tanto, los que influyen en su digestibilidad. Estos se han analizado anteriormente (véase Capítulo 10). El énfasis aquí se pone en las pérdidas de orina y metano.

El contenido de EM de un alimento variará dependiendo de la especie animal a la que se suministre o, más específicamente, del tipo de digestión al que se someta. La digestión fermentativa, ya sea en el rumen o en el intestino posterior, conlleva pérdidas de energía como metano. Un efecto menor de la intervención de microorganismos en la digestión es un aumento de las pérdidas de energía en la orina (a medida que se excretan los productos de degradación de los ácidos nucleicos microbianos) o en las heces (microbios sintetizados en el intestino posterior y excretados). En general, las pérdidas de energía en orina y metano son mayores en rumiantes que en no rumiantes. En consecuencia, los alimentos como los concentrados, que se digieren en la misma medida en rumiantes y no rumiantes, tendrán una EM más alta para los no rumiantes que para los rumiantes (véanse los valores de EM para la cebada en la Tabla 11.1). Sin embargo, los alimentos fibrosos suministrados a no rumiantes también incurrirán en pérdidas debidas a la digestión fermentativa en el intestino posterior. En los rumiantes, los alimentos como los ensilados, que ya han sido fermentados antes del consumo por el animal, incurrirán en menores pérdidas de energía durante la digestión, pero ya habrán incurrido en pérdidas de energía en el silo. Así, los ensilados contienen menos energía metabolizable fermentable (EMF) que alimentos comparables como los henos. Sin embargo, esta diferencia tiene mayor relevancia en la nutrición proteica que energética de los rumiantes (véanse Capítulos 8 y 13). Un comentario final sobre el efecto de la especie animal es que las diferencias entre el ganado bovino y ovino en las pérdidas de energía como orina y metano son pequeñas y no significativas.

El valor de EM de un alimento variará dependiendo de si los aminoácidos suministrados son retenidos por el animal para la síntesis de proteínas o desaminados y su nitrógeno excretado en la orina como urea. Por esta razón, los valores de EM a veces se corrigen a balance de nitrógeno cero deduciendo 28 kJ (cerdos), 31 kJ (rumiantes) o 34 kJ (aves de corral) por cada 1 g de nitrógeno retenido. El factor más apropiado para cada especie animal depende del grado en que el nitrógeno se excreta como urea (energía bruta 23 kJ/g de nitrógeno) u otros compuestos (por ejemplo, ácido úrico, 28 kJ/g de nitrógeno). Si un animal excreta más nitrógeno en su orina del que absorbe de su alimento (es decir, está en balance negativo de nitrógeno, véase Capítulo 13), entonces parte del nitrógeno urinario no se deriva del alimento, y en este caso el valor de EM debe someterse a una corrección positiva.

Tabla 11.1. Partición de la energía y valores de energía metabolizable para algunos alimentos típicos (MJ/kg MS) con equivalentes en Mcal/kg MS.

Animal	Alimento	EB MJ/kg MS [Mcal]	Pérd. Heces MJ [Mcal]	Pérd. Orina MJ [Mcal]	Metano MJ [Mcal]	EM MJ/kg MS [Mcal]
Aves (Gallina)	Maíz	18.4 [4.39]	2.2 [0.53]	–	–	16.2 [3.87]
	Trigo	18.1 [4.32]	2.8 [0.67]	–	–	15.3 [3.65]
	Cebada	18.2 [4.35]	4.9 [1.17]	–	–	13.3 [3.18]
Cerdo	Maíz	18.9 [4.51]	1.6 [0.38]	0.4 [0.1]	–	16.9 [4.04]
	Avena	19.4 [4.63]	5.5 [1.31]	0.6 [0.14]	–	13.3 [3.18]
	Cebada	17.5 [4.18]	2.8 [0.67]	0.5 [0.12]	–	14.2 [3.39]
	Harina de copra	19.0 [4.54]	6.4 [1.53]	2.6 [0.62]	–	10.0 [2.39]
Ovino	Cebada	18.5 [4.42]	3.0 [0.72]	0.6 [0.14]	2.0 [0.48]	12.9 [3.08]
	Ryegrass joven (seco)	19.5 [4.66]	3.4 [0.81]	1.5 [0.36]	1.6 [0.38]	13.0 [3.11]
	Ryegrass maduro (seco)	19.0 [4.54]	7.1 [1.7]	0.6 [0.14]	1.4 [0.33]	9.9 [2.36]
	Heno gramíneas joven	18.0 [4.3]	5.4 [1.29]	0.9 [0.21]	1.5 [0.36]	10.2 [2.44]
	Heno gramíneas maduro	17.9 [4.28]	7.6 [1.82]	0.5 [0.12]	1.4 [0.33]	8.4 [2.01]
	Ensilado de gramíneas	19.0 [4.54]	5.0 [1.19]	0.9 [0.21]	1.5 [0.36]	11.6 [2.77]
Bovino	Maíz	18.9 [4.51]	2.8 [0.67]	0.8 [0.19]	1.3 [0.31]	14.0 [3.34]
	Cebada	18.3 [4.37]	4.1 [0.98]	0.8 [0.19]	1.1 [0.26]	12.3 [2.94]
	Salvado de trigo	19.0 [4.54]	6.0 [1.43]	1.0 [0.24]	1.4 [0.33]	10.6 [2.53]
	Heno de alfalfa	18.3 [4.37]	8.2 [1.96]	1.0 [0.24]	1.3 [0.31]	7.8 [1.86]

Nota del traductor: Los valores entre corchetes [] en la columna de EM y en todas las columnas de pérdidas representan las conversiones a Mcal/kg MS, añadidas por el traductor. Recuerde: 1 MJ = 0,2389 Mcal.

En los rumiantes, aumentar el nivel de alimentación y la forma en que se procesa el alimento puede afectar su valor de EM. Como se analizó anteriormente (véase Capítulo 10), aumentar el nivel de alimentación, o la molienda y peletización de los forrajes, puede resultar en tasas más altas de paso y mayor pérdida de energía fecal (véase Tabla 10.3 en el Capítulo 10). Sin embargo, esto puede compensarse en parte por una reducción del tiempo de retención en el rumen y una disminución de las pérdidas de energía como metano. En general, se considera que el nivel de alimentación tiene solo un

efecto menor sobre el valor de EM de dietas de alta calidad, con valores de EM superiores a 11,5 MJ/kg **[2.75 Mcal/kg]** MS. En un estudio reciente realizado como parte del Proyecto Feed into Milk, donde se compararon los valores de EM de 59 dietas determinados en ovejas en mantenimiento (M), o en vacas de carne y leche a $4,8 \times M$, no se observó un efecto claro del nivel de alimentación. Se recomendó que solo se necesita un pequeño factor fijo para corregir los valores de EM utilizados a niveles de producción para valores determinados en ovejas en mantenimiento:

$$EM_{\text{producción}} = EM_{\text{mantenimiento}} \times 0,98$$

En las aves de corral, la molienda de cereales no tiene un efecto consistente sobre los valores de EM.

En teoría, debería ser posible prevenir la producción de metano en el rumen y, con ello, evitar perder del 8 al 12 por ciento de la ingesta de energía bruta en esta forma. La producción de metano puede suprimirse añadiendo agentes antimicrobianos a la dieta (por ejemplo, cloroformo), pero las consecuencias no son consistentemente favorables. La energía puede desviarse a otro subproducto gaseoso, el hidrógeno (véase Fig. 8.8, Capítulo 8). Además, los microorganismos del rumen pueden adaptarse a la presencia del agente y revertir a la síntesis de metano. El coccidiostático monensina, que se ha utilizado ampliamente como agente promotor del crecimiento en dietas para bovinos de carne, se considera un supresor del metano. Sin embargo, existe cierta evidencia de que los microorganismos metanogénicos pueden adaptarse a este agente. Desde la prohibición del uso de promotores de crecimiento antimicrobianos introducida por la UE en enero de 2006 y el reconocimiento de que el metano de los rumiantes es un importante gas de efecto invernadero, ha resurgido el interés en métodos alternativos para reducir la producción de metano mediante el uso de productos como cultivos de levaduras y extractos vegetales (véanse Capítulos 8 y 24).

Incremento calórico de los alimentos

Las pérdidas de energía que se producen con la ingestión de alimentos no solo están asociadas con la energía química perdida en las heces, la orina y el metano, sino también con el calor. Los animales producen continuamente calor y lo pierden hacia su entorno, ya sea directamente por radiación, conducción y convección, o indirectamente por la evaporación del agua. Si a un animal en ayuno se le suministra alimento, su producción de calor aumentará por encima del nivel representado por el metabolismo basal en pocas horas. Este aumento se conoce como el incremento calórico del alimento, que en los seres humanos es bastante marcado después de una comida abundante. El incremento calórico puede expresarse en términos absolutos (MJ/kg MS) o de forma relativa como proporción de la EB o la EM. A menos que el animal se encuentre en un ambiente particularmente frío, esta energía calorífica no tiene valor para el animal y debe considerarse una pérdida de energía, similar a las pérdidas en otros productos de excreción.

Las causas del incremento calórico se encuentran en los procesos asociados con la digestión de los alimentos y el metabolismo de los nutrientes derivados de ellos. El acto de comer, que incluye masticar, tragar y la secreción de saliva, requiere actividad muscular, para la cual la energía es suministrada por la oxidación de nutrientes. En rumiantes que mastican alimentos fibrosos, el costo energético de comer se estima en el 3-6 por ciento de la ingesta de EM. Sin embargo, el costo energético de la rumia es mucho menor y se estima en alrededor del 0,3 por ciento de la ingesta de EM. Los rumiantes también generan calor a través del metabolismo de sus microorganismos intestinales; esto se estima en aproximadamente el 7-8 por ciento de la ingesta de EM (o alternativamente 0,6 kJ por kJ de metano producido).

Se produce más calor cuando los nutrientes son metabolizados. Por ejemplo, como se mostró en el Capítulo 9, si la glucosa se oxida para la formación de ATP, la eficiencia de captura de energía libre es solo de aproximadamente 0,52, perdiéndose 0,48 como calor. Además, la eficiencia será aún menor si se requiere almacenamiento temporal de nutrientes (por ejemplo, glucosa almacenada como glucógeno)

porque se requieren más reacciones. Similar ineficiencia es aparente en la síntesis de los constituyentes estructurales del organismo. Por ejemplo, la unión de un aminoácido a otro requiere el gasto de cuatro enlaces de alta energía de pirofosfato, y si el ATP que los proporciona se obtiene a través de la oxidación de glucosa, entonces se liberarán aproximadamente 2,5 MJ **[0.6 Mcal]** de energía como calor por cada kilogramo de proteína formado. La síntesis de proteínas, cabe señalar, no solo ocurre en animales en crecimiento sino también en los mantenidos a nivel de mantenimiento, en los que la síntesis de proteínas es parte del proceso de renovación proteica (véase p. 227). El metabolismo de proteínas se estima que representa alrededor del 10 por ciento de la producción de calor del animal. El animal también gasta enlaces de fosfato de alta energía para realizar el trabajo de movimiento de sustancias (por ejemplo, iones Na^+ y K^+) en contra de los gradientes de concentración. Este llamado 'bombeo de iones' también puede contribuir con el 10 por ciento de la producción de calor del animal. El calor se produce dentro del cuerpo en las regiones con el metabolismo más activo. Así, se ha estimado que en los rumiantes, que tienen un tubo digestivo grande y metabólicamente activo, hasta la mitad de la producción total de calor se origina en el intestino y el hígado.

Como veremos más adelante, el incremento calórico de los alimentos varía considerablemente, dependiendo de la naturaleza del alimento, el tipo de animal que lo consume y los diversos procesos para los cuales se utilizan los nutrientes.

Energía neta (EN) y retención de energía

El valor de energía neta (EN) de un alimento se calcula restando el incremento calórico del valor de EM. El valor de EN representa la energía que está disponible para propósitos útiles, como el mantenimiento corporal y la producción (véase Fig. 11.2). La energía neta utilizada para el mantenimiento se usa principalmente para realizar trabajo dentro del organismo y sale del cuerpo como calor. La utilizada para la producción se almacena en el cuerpo del animal como grasa y proteína, o sale del cuerpo como energía química en la leche, los huevos o la lana. Esto se denomina frecuentemente 'retención de energía' del animal. Es importante entender que la producción total de calor de un animal representa la energía utilizada para el mantenimiento más el incremento calórico. Solo el incremento calórico es una pérdida real de energía. El calor resultante del uso de EM para el mantenimiento corporal se ha utilizado para realizar trabajo dentro del animal y se ha degradado a una forma inútil durante el proceso de utilización.

11.3 CALORIMETRÍA ANIMAL: MÉTODOS PARA MEDIR LA PRODUCCIÓN DE CALOR Y LA RETENCIÓN DE ENERGÍA

La calorimetría se define como la medición de la transferencia de calor. La partición de la energía alimentaria presentada en la Fig. 11.2 ilustra que si se conoce la ingesta de EM de un animal y también se mide la producción total de calor, la retención de energía puede calcularse por diferencia. Igualmente, si se mide la retención de energía, la producción total de calor también puede calcularse. En la práctica, los valores de EN de los alimentos se determinan midiendo la producción total de calor o la retención de energía.

Los métodos utilizados para medir la producción de calor y la retención de energía en los animales pueden ser bastante complejos, tanto en principio como en la práctica. Además, la complejidad y el costo del aparato requerido para la calorimetría de grandes animales limita su uso a un pequeño número de establecimientos de investigación nutricional. Como resultado, la calorimetría animal sigue siendo un tema especializado con el que pocos nutricionistas se involucran. No obstante, el estudio de la calorimetría animal es valioso para todos los estudiantes de nutrición porque refuerza los principios del metabolismo energético.

La producción de calor de los animales puede medirse físicamente usando una técnica conocida como calorimetría directa. Alternativamente, la producción de calor puede calcularse a partir del intercambio respiratorio de un animal. Para esto se usa una cámara de respiración y la técnica se denomina calorimetría indirecta. Las cámaras de respiración también pueden usarse para medir la retención de energía mediante la técnica de balance de carbono y nitrógeno.

Calorimetría directa

Los animales no almacenan calor, excepto por un período de tiempo relativamente corto, por lo que cuando las mediciones se realizan durante un período de 24 horas o más, generalmente es seguro asumir que la cantidad de calor perdido por un animal es igual a la cantidad producida.

Para determinar el incremento calórico de un alimento, los animales se alimentan a dos niveles de ingesta de EM y su producción total de calor se mide a cada nivel. El incremento calórico se calcula como se muestra en la Fig. 11.3. Se requieren dos niveles de alimentación porque parte de la producción total de calor del animal está asociada con su metabolismo basal. Un aumento en la ingesta de alimento hace que la producción total de calor aumente, pero se asume que el metabolismo basal permanece constante. El aumento en la producción de calor es, por tanto, el incremento calórico del alimento adicional suministrado. El cálculo del incremento calórico del alimento suministrado en la Fig. 11.3 se presenta en el Cuadro 11.2.

Figura 11.3. El método de la diferencia para estimar el incremento calórico de los alimentos: A es el metabolismo basal y B y C representan la producción de calor a ingestas de energía metabolizable de 40 MJ/día [9,55 Mcal/día] y 100 MJ/día [23,89 Mcal/día] respectivamente. Por simplicidad, la relación entre la producción de calor y la ingesta de energía metabolizable se muestra aquí como lineal (ABC es una línea recta); sin embargo, como se explica más adelante en el capítulo, esto generalmente no es el caso.

La calorimetría directa se lleva a cabo usando un calorímetro animal, que es esencialmente una cámara aislada y hermética. En la mayoría de los primeros calorímetros, las pérdidas de calor sensible del animal (es decir, las asociadas con la radiación, la conducción y la convección) eran absorbidas por agua que circulaba a través de serpentines dentro de las paredes de la cámara. La producción de calor se calculaba a partir de la tasa de flujo del agua y la diferencia entre sus temperaturas de entrada y salida. Las pérdidas de calor por evaporación se calculaban registrando el volumen de aire conducido a través de la cámara y su contenido de humedad a la entrada y salida. Más recientemente, se han desarrollado calorímetros de capa de gradiente. En estos, la producción de calor se mide eléctricamente a medida que pasa a través de la pared de la cámara. Este tipo de calorímetro se presta a la automatización, y tanto las pérdidas de calor sensible como por evaporación pueden registrarse automáticamente. Debido a que los calorímetros animales son costosos y difíciles de operar, la mayoría de la calorimetría se realiza usando la técnica indirecta descrita en la siguiente sección.

CUADRO 11.2 | Cálculo

Cálculo del incremento calórico de la alimentación para un alimento basado en calorimetría directa

En los experimentos de calorimetría presentados en la Fig. 11.3, el alimento se suministró a dos niveles para proporcionar una ingesta de EM de 40 o 100 MJ/día.

$$\text{Diferencia en ingesta de EM (BD)} = 100 - 40 = 60 \text{ MJ/día [14.33 Mcal/día]}$$

$$\text{Diferencia en producción de calor (CD)} = 64 - 40 = 24 \text{ MJ/día [5.73 Mcal/día]}$$

$$\text{Retención de energía (BD - CD)} = 60 - 24 = 36 \text{ MJ/día [8.6 Mcal/día]}$$

$$\text{Incremento calórico} = 24 / 60 = 0,40 \text{ (40\%)}$$

También es posible hacer que el nivel inferior de ingesta de EM sea cero, y estimar el incremento calórico como la diferencia en la producción de calor entre el metabolismo basal (en ayuno) y el producido en el animal alimentado.

$$\text{Diferencia en ingesta de EM (AE)} = 40 - 0 = 40 \text{ MJ/día [9.55 Mcal/día]}$$

$$\text{Diferencia en producción de calor (BE)} = 40 - 24 = 16 \text{ MJ/día [3.82 Mcal/día]}$$

$$\text{Retención de energía (AE - BE)} = 40 - 16 = 24 \text{ MJ/día [5.73 Mcal/día]}$$

$$\text{Incremento calórico} = 16 / 40 = 0,40 \text{ (40\%)}$$

Si se investiga un solo alimento, puede suministrarse a ambos niveles de ingesta de EM. Sin embargo, si el alimento es uno que normalmente no se suministraría solo, el nivel inferior puede derivarse de una ración basal y el nivel superior de la ración basal más el alimento bajo investigación. Por ejemplo, el incremento calórico de la cebada suministrada a ovejas podría derivarse alimentando a las ovejas con una ración basal de heno y luego con una cantidad igual de heno más algo de cebada.

Fin de la traducción del Capítulo 11 — McDonald et al. (2022), Animal Nutrition, 8.ª edición.

Nota del traductor: Conversión sistemática empleada: 1 MJ = 0,2389 Mcal (factor exacto: 1 MJ = 0,238845897 Mcal). Todos los valores en Mcal han sido redondeados a dos decimales. Los valores en Mcal NO forman parte del texto original de McDonald et al. (2022); han sido añadidos exclusivamente por el traductor para facilitar la interpretación de los datos en sistemas que emplean el sistema calórico (kcal/Mcal).