

NECESIDADES PROTEICAS Y APORTES DE PROTEÍNA EN EL GANADO VACUNO LECHERO

Vet. Andrés L. Martínez Marín. 2002. Mundo Ganadero, Eumedia S.A., Madrid, N° 145, 147 y 148.

www.produccion-animal.com.ar

Volver a: [Producción lechera](#)

NECESIDADES PROTEICAS

INTRODUCCIÓN

La mayor preocupación social actual sobre el impacto que la producción animal intensiva tiene en el medio ambiente, particularmente sobre la calidad de las aguas por los vertidos de nitrógeno y fósforo, ha determinado que se propongan entre otras medidas nuevos métodos de valoración del contenido proteico de los alimentos y de estimación de las necesidades nitrogenadas de los animales en general, y de los rumiantes en particular. El avance del conocimiento de los procesos digestivos y de las rutas metabólicas que conducen a la síntesis de los productos animales permite ajustar los aportes proteicos en las raciones de forma que se evite el exceso de nitrógeno que invariablemente sería eliminado por vía urinaria y fecal aumentando el potencial contaminante de los estiércoles y purines.

Las proteínas son compuestos nitrogenados (contenido medio en nitrógeno de 16%) integrantes fundamentales de los tejidos animales. Las proteínas representan una proporción variable del peso vivo del animal (10-20%) pero sin embargo el contenido en la masa corporal desengrasada es prácticamente constante (21%). La mayoría de las proteínas forman parte de la estructura de tejidos y órganos, no existiendo un tejido específico para el almacenamiento de la proteína excedentaria. Una pequeña fracción de la proteína corporal tiene un papel funcional en el organismo en forma de enzimas, hormonas, etc. Las proteínas están constituidas por moléculas más sencillas denominadas aminoácidos, cuyo número y distribución en cada proteína está codificado genéticamente. El número de aminoácidos es de veinte, de los cuales diez son esenciales porque la biosíntesis es insuficiente (arginina, histidina, isoleucina, leucina, metionina, fenilalanina, triptófano y valina) o imposible (lisina y treonina), por tanto su demanda debe cubrirse con aportes en la dieta. Los restantes diez aminoácidos (glicina, alanina, serina, tirosina, ácido aspártico, asparagina, ácido glutámico, glutamina, prolina y cistina) son no esenciales ya que pueden ser sintetizados desde compuestos intermediarios del metabolismo hidrocarbonado o desde otros aminoácidos. A diferencia de los monogástricos, en los rumiantes las necesidades de aminoácidos son cubiertas parcialmente a través de la proteína microbiana sintetizada en rumen ya que la flora ruminal es capaz de sintetizar todos los aminoácidos, incluyendo los esenciales, incluso desde compuestos nitrogenados sencillos.

Los animales sufren pérdidas de nitrógeno con las heces, la orina, a través de la piel y con la leche. Por otro lado, la masa de proteína corporal aumenta en los animales jóvenes en crecimiento y en las hembras en gestación. En todos los casos se generan unas necesidades de aminoácidos determinadas, al ser estos compuestos la única forma nitrogenada utilizable por el organismo animal.

LAS NECESIDADES PROTEICAS DEL GANADO VACUNO LECHERO

La principal diferencia entre los rumiantes y los animales monogástricos se refiere a los procesos digestivos, particularmente a la relación simbiótica establecida entre el rumiante y la microflora existente en el rumen e intestino grueso. Más del 60% de la energía (en forma de ácidos grasos volátiles) y del 50% de la proteína utilizada por el animal rumiante tiene su origen en la digestión microbiana de los alimentos en el rumen. La digestión que ocurre en intestino delgado es enzimática y similar a la de los animales monogástricos. En intestino grueso existe fermentación microbiana de los restos alimenticios no digeridos en las porciones anteriores del tubo digestivo pero aunque esto supone un aporte de energía importante, en torno a un 15%, la proteína aquí sintetizada no puede ser absorbida y se pierde en las heces.

La complejidad del proceso digestivo de los rumiantes es determinante a la hora de intentar valorar las necesidades y los aportes de proteína realmente utilizables por el organismo. Los compuestos nitrogenados presentes en los alimentos (proteína verdadera y compuestos nitrogenados no proteicos), son utilizados por los microorganismos del rumen para la síntesis de compuestos nitrogenados microbianos, principalmente proteína. Las células microbianas (mayoritariamente bacterias y protozoos) son arrastradas junto a partículas alimenticias no fermentadas y células epiteliales descamadas hacia las porciones posteriores del tramo digestivo donde ocurre digestión enzimática y absorción de los diferentes nutrientes. El conjunto de aminoácidos disponibles para su

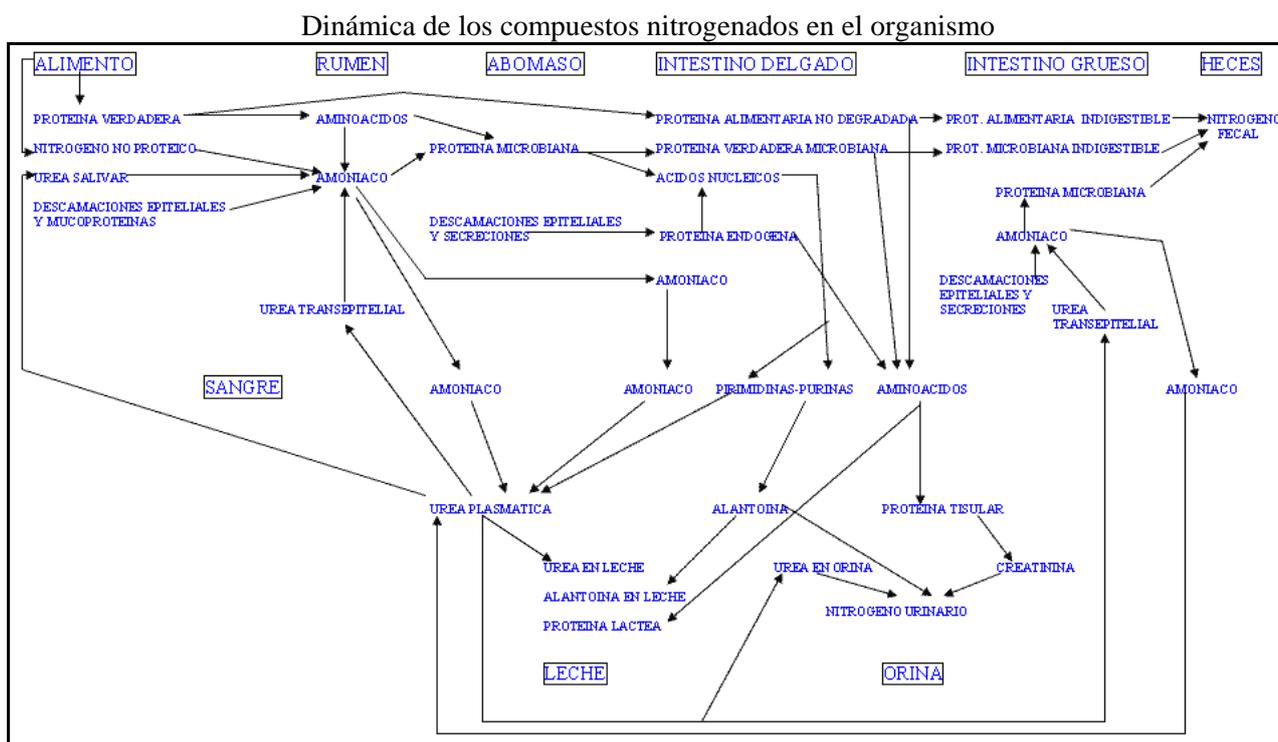
absorción en intestino (ver más adelante) constituye la denominada proteína "metabolizable" o "absorbible" que puede ser realmente utilizada por el organismo.

La utilización de la proteína metabolizable es diferente para cada proceso productivo en función principalmente de su composición en aminoácidos. La conversión de la proteína metabolizable en tejidos o proteína láctea conlleva unas pérdidas asociadas de nitrógeno en heces y orina debidas a los gastos inevitables de síntesis y a los desequilibrios entre los aminoácidos disponibles. Considerando esto, las necesidades de proteína neta corresponden a la proteína retenida realmente por el organismo para el mantenimiento, el crecimiento, la lactación o la gestación, y la proteína metabolizable es la suma de dichas necesidades proteicas y las pérdidas asociadas a su síntesis.

En esta primera exposición nos vamos a centrar en la estimación de las necesidades de proteína (y aminoácidos) y en la eficiencia de utilización para cada una de las funciones corporales.

DINÁMICA DEL NITRÓGENO EN EL ORGANISMO

- ◆ Absorción de compuestos nitrogenados (figura I).



Al intestino delgado llega proteína microbiana (proteína verdadera, paredes celulares y ácidos nucleicos), proteína alimentaria no degradada, proteínas de origen endógeno (células de descamación y secreciones) y amoníaco. La digestión enzimática es similar a los monogástricos con algunas diferencias:

- ◆ La cantidad de nitrógeno endógeno es importante en relación con el nitrógeno microbiano y alimentario.
- ◆ El ritmo de neutralización duodenal de la digesta es inferior a los monogástricos, lo que retrasa la actuación de las enzimas intestinales pero permite que la proteólisis debida a la pepsina abomasal se mantenga en duodeno.
- ◆ El punto de máxima actividad de las proteasas pancreáticas se retrasa hasta el yeyuno medio, situándose aquí el punto de mayor absorción de aminoácidos.

La proteína verdadera microbiana constituye aproximadamente el 85% de la proteína microbiana y un 75% es digestible. La digestibilidad media de la proteína alimentaria no degradada en rumen es de un 85%. Ambas fuentes proveen, en proporciones variables según el tipo de ración, el conjunto de aminoácidos disponibles para su absorción intestinal. La fracción no digestible se elimina con las heces. La absorción a través de la pared intestinal es diferencial, de forma que de media el 60% de los aminoácidos esenciales que atraviesan el píloro y el 43% de los no esenciales son absorbidos.

La alta actividad de las nucleasas del jugo pancreático en los rumiantes se justifica por el elevado contenido en ácidos nucleicos de las células microbianas (más del 15% de nitrógeno microbiano), y permite la liberación de fósforo que puede ser utilizado por el organismo. Por el contrario, los restantes productos liberados en la digestión de los ácidos nucleicos (purinas y pirimidinas) son inutilizables y contribuyen a los gastos de excreción.

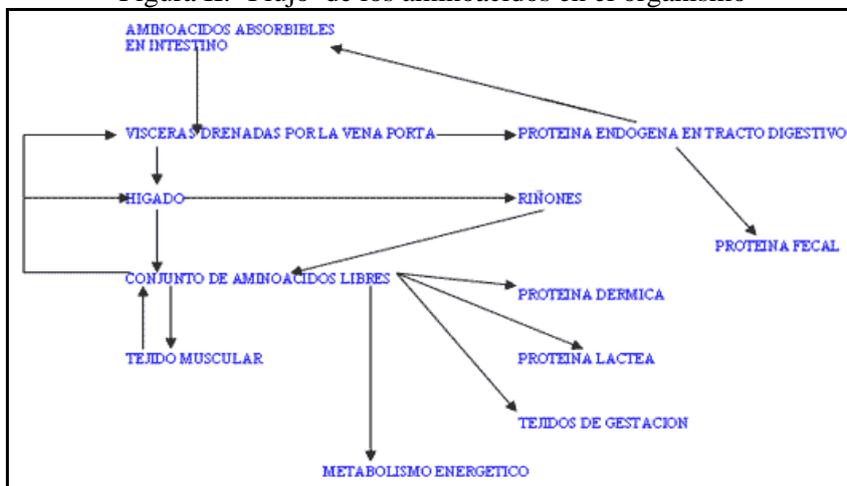
El amoníaco libre absorbido proviene de la degradación microbiana ruminal de los aminoácidos y los compuestos nitrogenados no proteicos y representa el exceso no utilizado para la síntesis de proteína. La absorción ocurre a través del epitelio ruminal, desde intestino delgado y también desde intestino grueso. La cantidad de nitrógeno absorbido como amoníaco es variable según el tipo de ración consumida pero puede alcanzar valores muy elevados en raciones ricas en nitrógeno no proteico.

◆ **Metabolismo tisular.**

Los aminoácidos absorbidos y los endógenos procedentes del proceso de renovación tisular (ver más adelante) constituyen un conjunto de aminoácidos libres que pueden utilizarse para procesos de síntesis de proteína, como precursores glucogénicos u oxidarse completamente para generar energía. La contribución de los aminoácidos al metabolismo energético corporal es muy importante en los rumiantes debido a la baja tasa de absorción de glucosa con relación a las necesidades totales diarias, sobre todo del tejido nervioso y de la ubre.

El metabolismo visceral y hepático es el determinante principal de la cantidad y proporciones de aminoácidos disponibles en la sangre (absorbidos y endógenos) (figura II). En los tejidos digestivos ocurre una intensa utilización de aminoácidos para la renovación celular y la provisión de energía. Debido a que la mayor proporción de tejidos no participa en la absorción de aminoácidos, se estima que en el conjunto de las vísceras drenadas por la vena porta en torno al 78% de los aminoácidos utilizados es de origen endógeno y el resto procede de los aminoácidos absorbidos de la luz intestinal.

Figura II.- Flujo de los aminoácidos en el organismo



En hígado ocurre catabolismo parcial (desaminación) de aminoácidos, absorbidos y endógenos para la síntesis de glucosa, de forma particularmente intensa durante períodos de subnutrición energética o de elevada demanda de glucosa (periparto y comienzo de la lactación), oxidación completa para generar energía, o conversión de unos aminoácidos en otros y síntesis de aminoácidos no esenciales desde oxoácidos (transaminación).

La ubre utiliza los aminoácidos extraídos de la sangre para la síntesis de proteína láctea y como fuente de energía o de glucosa. Los tejidos de gestación utilizan los aminoácidos absorbidos para la síntesis proteica y como fuente de energía por oxidación. Los riñones extraen aminoácidos posiblemente para su conversión a glucosa a la par que sus metabolitos contribuyen al control del equilibrio ácido-básico. El tejido muscular es el principal proveedor de aminoácidos endógenos a los restantes tejidos: glutamina como combustible para las vísceras del sistema porta y los riñones, y alanina como precursor glucogénico al hígado.

Los procesos de síntesis de proteína incluyen el crecimiento de la masa muscular en animales jóvenes, la síntesis de proteína de la leche, el crecimiento de los tejidos fetales y anejos, el desarrollo de la ubre y el mantenimiento de la integridad corporal (síntesis vs. degradación).

En conjunto existe una estrecha relación entre el metabolismo proteico de los diferentes tejidos (Figura II).

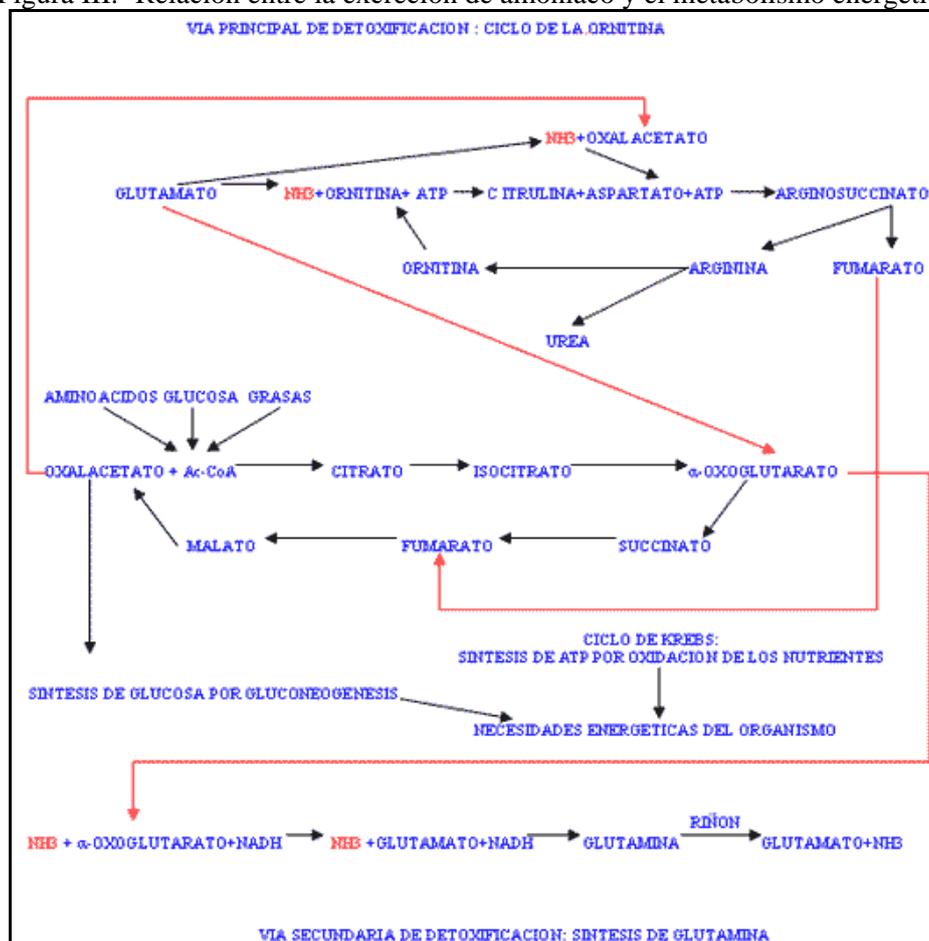
METABOLISMO DE LA UREA Y OTROS COMPUESTOS NITROGENADOS

El exceso de nitrógeno presente en el organismo debe ser detoxificado y eliminado. La principal vía de eliminación de los compuestos de detoxificación es la orina.

El amoníaco absorbido desde el tracto intestinal o generado en el catabolismo tisular de los aminoácidos y en la degradación de las pirimidinas, debe ser detoxificado mediante su conversión a urea, siendo éste el principal mecanismo de eliminación del nitrógeno en exceso presente en el organismo. Una fracción es detoxificada en forma de glutamina que actúa como transportador del amoníaco a los riñones donde es eliminado tal cual. También, parte del amoníaco libre es utilizado en las reacciones de transaminación para la síntesis de aminoácidos no esenciales desde los cetoácidos correspondientes. La síntesis de urea ocurre a través del denominado ciclo de

la ornitina (Figura III). En este proceso, los dos grupos amino necesarios son cedidos por el ácido glutámico, el primero directamente por desaminación oxidativa, y el segundo por transaminación del oxalacetato para rendir ácido aspártico, la ornitina necesaria procede de la arginina, se consume aspartato y se genera fumarato, la energía necesaria procede del adenosintrifosfato (ATP). Existe una estrecha relación entre este ciclo y el metabolismo energético (ver más abajo).

Figura III.- Relación entre la excreción de amoníaco y el metabolismo energético



Otros compuestos que sirven como vehículos para la eliminación de nitrógeno son la alantoína y el ácido úrico, originados en el catabolismo de las purinas, la creatinina y la metil-histidina, que se relacionan con la renovación de la masa muscular, y los ácidos hipúrico y fenacético que son conjugados de glicina con metabolitos microbianos.

Los ácidos nucleicos endógenos contribuyen mínimamente al conjunto de productos nitrogenados de desecho debido a que son estrictamente reciclados. Se calcula que un 90% de las purinas liberadas en la degradación de los ácidos nucleicos son reutilizadas.

La urea presente en el plasma puede seguir varios caminos:

- Reciclado ruminal: si existe un déficit de nitrógeno para el crecimiento microbiano, el organismo es capaz de reciclar urea sanguínea hacia el rumen. Esta urea llega principalmente por vía salivar y en menor medida por difusión a través del epitelio, aunque existen discrepancias. Algunos investigadores consideran que la prevalencia de cada vía es función del contenido en amoníaco del rumen, de forma que la entrada de urea vía salivar sería un mecanismo pasivo que depende principalmente de la concentración de urea plasmática y de la producción de saliva y por tanto del tipo de ración consumida. Sin embargo, la difusión a través del epitelio estaría controlada por la actividad ureolítica de las bacterias adheridas a la pared ruminal, esta actividad estaría regulada directamente por la concentración de amoníaco ruminal. El amoníaco liberado por hidrólisis de la urea puede ser utilizado normalmente por las bacterias ruminales. En vacas que reciban raciones bien diseñadas, la cantidad de nitrógeno reciclado equivale prácticamente al nitrógeno absorbido como amoníaco, con un balance próximo a cero. El reciclado adquiere mayor importancia en animales que reciben raciones no sincronizadas en energía fermentecible y nitrógeno degradable. En este caso, la urea de la sangre permite compensar momentáneamente el déficit ruminal de nitrógeno debido a su rápida disponibilidad.
- Extracción intestinal: la flora microbiana de los ciegos y colon utiliza para su crecimiento la urea sanguínea como principal fuente de nitrógeno (más del 50% del total utilizado), otras fuentes de nitrógeno son los restos

bacterianos ruminales no digeridos y las secreciones endógenas y las células epiteliales de descamación. La urea entra al intestino grueso por difusión pasiva a través del epitelio, es hidrolizada a amoníaco y se incorpora a la proteína microbiana. La extracción es tanto mayor cuanto más residuos alimenticios fermentables lleguen a intestino grueso. Esta vía es importante como pérdida de urea de la sangre, ya que sólo es reabsorbido como amoníaco el 8% del nitrógeno extraído. Como ya dijimos, a este nivel no ocurre absorción de otros compuestos nitrogenados.

- c) Eliminación renal: más del 60% de la urea plasmática es eliminada vía renal, y esta cantidad representa aproximadamente el 85% del nitrógeno urinario. La eliminación renal es también la vía principal de eliminación de los compuestos nitrogenados no ureicos. Aproximadamente el 98% de la alantoína presente en orina deriva del catabolismo de las purinas microbianas. La creatinina y la metil-histidina se encuentran en una concentración media de 6 y 0.7 mg por kg de peso vivo, respectivamente.

Los compuestos nitrogenados eliminados en los productos de excreción tienen una utilidad marcada como indicadores de diversos procesos metabólicos. Así, por su facilidad de difusión en los líquidos orgánicos, la urea aparece en la leche y su medida puede ser utilizada para conocer la relación --energía fermentecible/proteína degradable-- de la ración que reciben el ganado. Curiosamente la urea presente en leche se relaciona estadísticamente con la urea procedente del exceso de proteína degradable pero no con la urea de origen metabólico endógeno. Por otro lado, la alantoína es un indicador fiable de los ácidos nucleicos microbianos que llegan a intestino delgado y en consecuencia su medida en orina o en leche sirve para la estimación directa de la proteína microbiana digerida, debido a la relación constante purinas/proteína. En el caso de la creatinina y la metil-histidina presentes en la orina el nivel basal representa el equilibrio en la renovación continua de la masa muscular del animal y por tanto su valoración permite estimar cambios en la tasa de degradación de la proteína muscular debidos a variaciones en el estado nutritivo.

La síntesis de urea (y la excreción) supone un coste energético al organismo. Estoquiométricamente se calcula un consumo de 4 moles de ATP por mol de urea producida aunque posiblemente sea una sobreestimación ya que en el proceso se produce fumarato que es un intermediario del ciclo de Krebs. En cualquier caso, la necesidad de eliminar grandes cantidades de amoníaco supone un gasto extra de energía al organismo y puede tener una repercusión importante en el balance energético, sobre todo en situaciones de elevada demanda de energía como ocurre al comienzo de la lactación. Por otra parte, si ocurre función hepática disminuida (lipidosis hepática), la ureagénesis se ve inhibida. En estas circunstancias, el amoníaco en exceso es detoxificado alternativamente mediante la síntesis de glutamina desde ácido glutámico. La síntesis de ácido glutámico consume a su vez alfa-oxoglutarato que es un precursor glucogénico intermediario del ciclo de Krebs. El alfa-oxoglutarato es desplazado muy eficazmente del ciclo de Krebs ante una presencia excesiva de amoníaco.

Por tanto, la detoxificación del amoníaco puede repercutir doblemente de forma negativa en el metabolismo energético: consumo de ATP y menor disponibilidad de precursores glucogénicos. La capacidad de detoxificación orgánica del amoníaco es superada cuando su concentración ruminal es mayor de 80 mg/100 ml, entonces puede ocurrir intoxicación. El cuadro clínico es debido a la alteración del equilibrio ácido-básico y a la alteración del metabolismo energético celular por agotamiento del alfa-oxoglutarato, lo que es particularmente manifiesto en las células nerviosas. Otro efecto contraproducente del exceso de urea en sangre es el efecto negativo sobre el estado de salud del animal y sobre la reproducción.

NECESIDADES PROTEICAS PARA EL MANTENIMIENTO

Las necesidades proteicas para mantenimiento están compuestas por las pérdidas a través de la piel, las pérdidas ocurridas en la porción anterior del tracto digestivo, la pérdida obligada de nitrógeno en la orina y las pérdidas de proteínas endógenas en las heces.

Las pérdidas de nitrógeno dérmico incluyen la renovación de la capa (crecimiento de pelos y descamación epitelial) y otras pérdidas queratinosas, expresándose normalmente en función del peso vivo metabólico (peso vivo elevado a la potencia 0.75)

Las pérdidas de proteína endógena que acontecen en la porción anterior del tracto digestivo corresponden a mucoproteínas de la saliva, células epiteliales de tracto respiratorio, restos celulares procedentes de la abrasión del epitelio de la boca, esófago y retículo-rumen, restos similares de omaso y abomaso, y secreciones de abomaso. Probablemente, las tres primeras fracciones son degradadas por los microorganismos ruminales y no llegan a duodeno. La contribución de las restantes fracciones al conjunto de proteína presente en duodeno es importante y se expresa de forma proporcional al consumo de materia seca. Esta fracción proteica es una pérdida parcialmente compensada porque es redigerida en intestino delgado y se incorpora al conjunto de proteína metabolizable.

La pérdida de nitrógeno en la orina representa la diferencia entre la síntesis y la degradación de la proteína corporal. El continuo proceso de renovación de las proteínas es muy intenso (2-4% de la proteína corporal al día) de forma que, a cada instante, una parte de las mismas es degradada hasta aminoácidos y reemplazada por proteínas nuevamente sintetizadas. Aunque la masa proteica se mantiene, ocurre una pérdida inevitable de

nitrógeno debida al catabolismo de parte de los aminoácidos liberados. Esta pérdida se denomina nitrógeno endógeno basal. La velocidad de renovación es función de la edad (mayor en animales más jóvenes), del órgano considerado (más elevada en tracto gastrointestinal e hígado, seguidos por los riñones, la piel y la musculatura), y por el tipo de proteína (mayor para las proteínas funcionales). Las pérdidas de nitrógeno endógeno basal se expresan comúnmente en función del peso vivo metabólico. Indicar que la pérdida de energía asociada a la renovación proteica supone aproximadamente un 15% de las necesidades energéticas de mantenimiento.

Las pérdidas fecales de proteína endógena se consideran debidas a la descamación de la mucosa posterior a intestino delgado y a las secreciones digestivas no reabsorbidas. La estimación de estas pérdidas es compleja debido a que las heces contienen otras fracciones nitrogenadas como restos alimenticios no digeridos, residuos microbianos indigestibles y células microbianas intactas. Estas pérdidas se expresan en función del consumo de materia seca.

Debido a la dificultad práctica de mantener a los rumiantes en raciones libres de nitrógeno (reciclaje de urea plasmática a rumen y consumo disminuido de alimentos) y a la confusión entre las pérdidas urinarias y fecales de nitrógeno, la estimación de las necesidades proteicas de mantenimiento plantea amplias diferencias entre los diferentes grupos de investigación (CUADRO I). Para estimarla se siguen dos procedimientos:

Cuadro 1.- Comparación de la estimación de necesidades proteicas entre sistemas

	NRC-2001	INRA-1989	AFRC-1993
MANTENIMIENTO		$3.25 \cdot PV^{0.75}$	
Proteína dérmica	$0.2 \cdot PV^{0.6}$		$0.1125 \cdot PV^{0.75}$
Proteína endógena urinaria	$2.75 \cdot PV^{0.5}$		$2.1875 \cdot PV^{0.75}$
Proteína endógena fecal	$30 \cdot IMS (a)$		--
Eficiencia	0.67	1	1
CRECIMIENTO			
Proteína de la ganancia	$f(\text{energía retenida})$ (b)	200-150 (e)	$f(PV \text{ e } \Delta PV)$ (h)
Eficiencia	$83.4 - (0.114 \cdot PVE)/100$ (c)	0.68-0.4 (f)	0.59
LACTACION			
Proteína de la leche	$\% \cdot 0.95/1.03$	31 (g)	$\% \cdot 0.95/1.03$
Eficiencia	0.67	0.64	0.68
GESTACION			
Proteína de gestación	$((0.69 \cdot t) - 69.2) \cdot PT$ (d)	120	$0.025 \cdot PT \cdot 34.37 \cdot e^{-0.00262 \cdot t}$
Eficiencia	0.33	0.6	0.85
RESERVAS		(1)	
Movilización de reservas	83		138
Eficiencia	0.67		1
Recuperación de reservas	83		138
Eficiencia	0.492		0.59

Notas:

Los valores son de necesidades netas en gramos por kilo

Para convertir las necesidades netas en proteína metabolizable hay que dividir por la eficiencia correspondiente, que está expresada en tanto por uno. PV : PESO VIVO (kg)

IMS: INGESTA DE MATERIA SECA (kg)

PVE : PESO VIVO EQUIVALENTE = RELACIÓN ENTRE EL PESO VIVO ACTUAL Y EL PESO VIVO DE LA RAZA MODELO, CUYO PESO VIVO ADULTO ES 478 KG, LUEGO PVE= PESO ACTUAL $\cdot (478/\text{PESO VIVO ADULTO})$

DPV: INCREMENTO DE PESO VIVO (kg)

PT : PESO DEL TERNERO (kg)

t : DÍAS DE GESTACIÓN

(a) valor en proteína metabolizable, es corregido por la fracción fecal correspondiente a la proteína microbiana = $(30 \cdot IMS) - (0.5 \cdot ((\text{PROTEÍNA METABOLIZABLE MICROBIANA}/0.8) - \text{PROTEÍNA METABOLIZABLE MICROBIANA}))$. La proteína endógena que llega a duodeno supone un aporte de proteína metabolizable (=4.76 gramos \cdot IMS) que debe recuperarse y equivaldría a = (8.9 gramos \cdot IMS), por tanto el balance neto de proteína metabolizable endógena intestinal es de = -4.14 gramos \cdot IMS

(b) La retención de proteína en el crecimiento es función de la energía retenida por kilo de peso ganado, y dicha energía es función de la edad y de la velocidad de crecimiento.

(c) La eficiencia es función de la edad, cuando se alcanza el peso vivo adulto es constante = 0.29

(d) Válido a partir de los 190 días de gestación.

(e) Movilización de reservas: de 5 a 7 kilos de proteína metabolizable en 60 días, y deben recuperarse a lo largo de la lactación

(f) El contenido y la eficiencia disminuyen con la edad

(g) Leche estándar: 3.1%

(h) Disminuye al aumentar el peso vivo y la ganancia de peso $=0.8*((168.07-0.16869*PV+0.0001633*PV^2)*(1.12-0.1223*DPV))$

- ◆ Extrapolación a raciones libres de proteína: da valores muy bajos de nitrógeno urinario y mayores de nitrógeno endógeno fecal, aproximadamente 15% y 85% respectivamente para vacas en producción normalmente alimentadas.
- ◆ Mantener a los animales en raciones libres de nitrógeno pero adecuadas en los demás nutrientes que deben aportarse puros por infusión intragástrica, para evitar el reciclaje ruminal y a la extracción en intestino grueso. Los valores de nitrógeno endógeno urinario representan la mayor pérdida de nitrógeno (90-95%) frente a las pérdidas fecales.

Curiosamente cuando los animales reciben raciones de mantenimiento, la suma de las pérdidas urinarias y fecales calculadas por ambos procedimientos es muy similar. Sin embargo, al suministrar raciones de producción (mayor consumo de materia seca), las necesidades de mantenimiento son mayores para aquellos sistemas de alimentación que valoran el nitrógeno metabólico fecal en función del consumo. Como esta forma de cálculo es la que parece ajustarse más a los resultados productivos observados, la pregunta que se plantea es: ¿el incremento de las necesidades nitrogenadas en animales en producción es debido al incremento lineal de las necesidades de mantenimiento o a un incremento de la ineficacia de utilización de la proteína para los procesos productivos al aumentar el nivel de alimentación? En cualquier caso, la inclusión de las pérdidas fecales en el cálculo de las necesidades de mantenimiento supone que la estimación de las pérdidas urinarias debe reducirse en alguna medida.

En la estimación de la eficacia con que se usa la proteína metabolizable para el mantenimiento de la masa corporal también existen discrepancias entre los diferentes sistemas de alimentación (Cuadro I).

NECESIDADES PROTEICAS PARA EL CRECIMIENTO

Cuando un animal recibe una ración adecuada en energía, el porcentaje de proteína de la ganancia de peso disminuye y el contenido de grasa aumenta al aproximarse a la madurez. La madurez química se alcanza cuando la ganancia de peso contiene cantidades mínimas de proteína. En el caso del ganado vacuno de raza frisona esto ocurre en torno a los 5 años de edad. Por otro lado, cuanto mayor es la velocidad de crecimiento, más aumenta la fracción de la ganancia que se retiene en forma de grasa en detrimento de la deposición de proteína. Por tanto, la estimación de la retención de proteína durante el crecimiento se hace en función de la retención de energía, cuyo valor recoge ambos aspectos (peso vivo y velocidad de crecimiento).

Para ajustar las necesidades proteicas para el crecimiento debemos considerar dos períodos claramente diferenciados:

- a) Desde la primera concepción hasta que se alcanza el peso vivo adulto: la subalimentación nitrogenada durante la primera gestación y a lo largo de la primera lactación reduce la producción de leche en las lactaciones sucesivas (crecimiento diario de 0.69 y 0.104 kg/día, respectivamente). Sin embargo, las necesidades nitrogenadas para el crecimiento son cuantitativamente poco importantes en vacas lactantes a partir de la segunda lactación (crecimiento diario menor de 0.06 kg/día).
- b) Desde el nacimiento a la primera concepción: las necesidades de proteína para novillas en crecimiento se calculan de forma similar a los animales de engorde con la salvedad de que el ritmo de crecimiento no es máximo sino el adecuado para evitar engrasamiento corporal (crecimiento diario de 0.87 kg/día). Los aportes de proteína y energía durante la recría de novillas deben ser tales que el crecimiento de la masa corporal libre de grasa sea óptimo sin incremento del índice de estado de carnes. Además, la retención de energía en exceso provoca engrasamiento del parénquima mamario lo que reduce su funcionalidad posterior. Para conseguir este objetivo parece ser que la relación proteína/energía de la ración es más importante que simplemente la energía suministrada. Dicha relación debe ser adecuada y normalmente constante a lo largo del crecimiento, es decir, si se desea aumentar el ritmo de crecimiento, debe incrementarse el aporte de proteína.

La eficacia con que se utiliza la proteína metabolizable para la deposición de proteína es probablemente mayor en animales jóvenes (Cuadro I).

NECESIDADES PROTEICAS PARA LA PRODUCCION DE LECHE

La producción de proteína láctea es cuantitativamente el mayor gasto nitrogenado de la vaca lechera. La proteína láctea se compone de una fracción de proteína verdadera (aproximadamente 95%) y diversidad de compuestos nitrogenados no proteicos. La fracción proteica es principalmente caseína (más del 80%). El principal compuesto nitrogenado no proteico es urea.

La ubre extrae los aminoácidos de la sangre con elevada eficacia según sus necesidades. Los aminoácidos esenciales se pueden dividir en dos grandes grupos: aquellos en que la cantidad extraída es similar a su presencia en la proteína sintetizada (metionina, fenilalanina, histidina y triptófano), y los restantes aminoácidos esenciales

en que la extracción es mayor que su secreción en la leche. En conjunto, la extracción de aminoácidos esenciales es mayor que su presencia en la proteína láctea y lo contrario es cierto para los aminoácidos no esenciales. Los aminoácidos de cadena ramificada (isoleucina, leucina y valina) constituyen el 50% de los aminoácidos esenciales presentes en la proteína láctea.

La síntesis de proteína láctea se estima que consume el 11% del ATP generado en la ubre, si a esto le sumamos la síntesis de proteína endógena de la glándula mamaria (equivalente a 2.5 veces la síntesis de proteína láctea), el consumo total de energía para la síntesis de proteína en la ubre supone un 37% del ATP disponible a este nivel. Estos valores indican la influencia de la energía disponible en la síntesis de proteína láctea. De hecho la respuesta en proteína producida es mayor al incremento de energía consumida que al de proteína. Esta influencia ha sido recogida con gran sentido por los investigadores holandeses para expresar la eficacia de utilización de la proteína metabolizable para la síntesis de proteína láctea (Cuadro I).

NECESIDADES PROTEICAS PARA LA GESTACIÓN

Al progresar la gestación las necesidades proteicas son más importantes que las necesidades energéticas, de forma que las primeras aumentan en un factor de 2.5 frente a un factor 1.5 para las segundas. La retención de proteína en los productos de la concepción (feto, placenta, cotiledones, útero grávido y fluidos). En los 2/3 iniciales de la gestación, las necesidades proteicas son debidas al crecimiento de los tejidos anejos y el aumento de los fluidos uterinos, cuya composición en materia seca es mayoritariamente proteína. Estas necesidades aún en el momento de máxima deposición son muy pequeñas respecto a las necesidades totales del animal. El crecimiento fetal es cuantitativamente más importante en el último tercio de la gestación, donde su crecimiento es prácticamente exponencial, y representa la mayor fracción de nitrógeno retenida. La proteína retenida en la ubre representa un pequeño gasto que sólo es significativo al final de la gestación. El aumento del volumen plasmático debido a la gestación conlleva una retención adicional de nitrógeno mínima. Las cantidades totales de proteína depositada son aproximadamente: 0.6 kg en fluidos, 0.4 kg en placenta y cotiledones, 1 kg en útero, 7.5 kg en un feto de 40 kg al nacimiento y unos 0.6 kg en la ubre.

La peculiaridad del metabolismo fetal de los rumiantes estriba en la elevada demanda de aminoácidos para su oxidación, que equivale prácticamente a la cantidad utilizada para la síntesis de proteína. La importancia de esta oxidación es aún mayor en casos de subnutrición energética. Este fenómeno determina que la eficacia de utilización de la proteína para la gestación se considere muy baja en algunos sistemas (Cuadro I)

NECESIDADES DE AMINOÁCIDOS

Cuando falta un aminoácido para continuar la secuencia de la proteína que está siendo sintetizada, la síntesis se detiene ya que dicha secuencia está determinada genéticamente para cada proteína y no puede ser alterada. En este caso los aminoácidos sobrantes son catabolizados, ocurriendo pues un aprovechamiento subóptimo de los mismos y aumentando el amoníaco que debe ser eliminado. Por el contrario, si el perfil de los aminoácidos disponibles es similar al requerido por el animal, la eficiencia de utilización para la síntesis proteica es máxima, todos los aminoácidos son igualmente limitantes para la producción y el exceso de nitrógeno se minimiza.

Asumiendo una proporción constante entre los aminoácidos necesarios, los requerimientos pueden calcularse cuando se conocen las necesidades de un sólo aminoácido. Normalmente el perfil de aminoácidos se expresa referido a la lisina ya que suele ser el primer aminoácido limitante de la producción y no es usado para la síntesis de otros compuestos nitrogenados. Parece ser que el perfil de aminoácidos no esenciales tiene poca repercusión sobre la síntesis proteica. Las pruebas experimentales sugieren que cuando los aportes de aminoácidos totales se aproximan a las necesidades, los requerimientos de aminoácidos no esenciales se cubren antes que los de los aminoácidos esenciales, y si se absorben individualmente en menor cantidad de la necesaria, pueden ser sintetizados en cuantía suficiente sin que se afecte la producción. No obstante, se considera conveniente que el perfil de aminoácidos esenciales se exprese en porcentaje de las necesidades totales de proteína. Por tanto, conociendo las necesidades totales de nitrógeno pueden estimarse las necesidades de aminoácidos esenciales.

Con los conceptos anteriormente expuestos podemos definir la "proteína ideal" como la proporción perfecta entre los aminoácidos esenciales individuales y de éstos con el nitrógeno total requerido para una producción óptima.

Normalmente, se considera que la lisina es el primer aminoácido limitante de la producción en raciones donde predomina la proteína de los cereales y sus productos mientras que la metionina lo es en raciones basadas en soja. Es más probable que la metionina sea colimitante en la mayoría de las ocasiones ya que dicha estimación, al estar realizada sobre la base del aporte de aminoácidos de la fracción no degradable de las proteínas de los alimentos, no tiene en cuenta la diversidad de funciones metabólicas de la metionina. La isoleucina, la leucina, la histidina y la arginina serían los siguientes aminoácidos más frecuentemente limitantes.

A pesar de que no existen evidencias de que los aminoácidos no esenciales como grupo lleguen a ser limitantes, aún no se ha determinado el papel que pueden desempeñar algunos de ellos en determinados momentos

productivos. La prolina y la glutamina han recibido especial atención debido a tres hechos: se encuentran en la caseína en mayor proporción que la proteína microbiana, su captación por la ubre es menor que su secreción en la leche y ambos son sintetizados desde arginina. La prolina se ha relacionado con un incremento de la producción de proteína láctea en la segunda mitad de la lactación. La glutamina participa intensamente en el metabolismo energético visceral especialmente durante los períodos de subnutrición energética. Por otro lado, la fenilalanina y la metionina contribuyen en un 50% a cubrir las necesidades de tirosina y cistina respectivamente. Se deduce que el aporte de los aminoácidos no esenciales mencionados podría suponer una reducción de las necesidades de los aminoácidos esenciales que participan en su síntesis.

La estimación cuantitativa de las necesidades de aminoácidos se puede realizar por dos vías:

- a) Método factorial: con este método es necesario definir las necesidades netas de proteína para mantenimiento y cada una de las producciones, la composición en aminoácidos de los productos y la eficiencia de absorción y de utilización de los aminoácidos absorbidos. El principal problema de este método es que los errores cometidos en las estimaciones, particularmente en las eficiencias, son acumulativos y pueden generar resultados muy alejados de la realidad.
- b) Medida dosis-respuesta: aquí las necesidades son estimadas a partir de infusiones graduales del aminoácido a estudiar, de forma que se identifican respuestas productivas a las diferentes cantidades aportadas. Por este método, se ha calculado que la proporción óptima de lisina y metionina en la proteína metabolizable es aproximadamente de 7.3% y 2.5% respectivamente, expresado sobre aminoácidos esenciales las proporciones respectivas son 15% y 5%.

RESERVAS PROTEICAS

Las vacas lecheras disponen de una cierta cantidad de proteína de reserva para su utilización como fuente de aminoácidos en condiciones de subalimentación como la que ocurre la comienzo de la lactación. Estas reservas son cuantitativamente pequeñas en comparación con las reservas grasas y por tanto muy limitadas en el tiempo. Se calcula que la capacidad máxima de movilización de proteína corporal al comienzo de la lactación es de unos 15-20 kg y que dicha movilización se prolonga hasta unas cinco semanas posparto. Por comparación, la movilización de grasa puede ser mayor de 80 kg y prolongarse más de 70 días posparto.

Normalmente, si la movilización máxima de nitrógeno no supera los 30 gramos diarios, la producción de leche no se ve afectada; esto se traduce en unas pérdidas de 5 a 7 kg de proteína corporal. Se estima que un kilo de tejido corporal movilizado por una vaca en condición corporal media contiene 600 gramos de grasa y únicamente 83 gramos de proteína. La proteína movilizada procede principalmente del tejido muscular y se estima que se utiliza con una eficacia del 80% como fuente de aminoácidos para la síntesis de proteína láctea.

Si la subalimentación nitrogenada persiste al avanzar la lactación ocurre disminución de la producción láctea y depleción de las reservas totales de proteína en el organismo con consecuencias en el estado de salud del animal. Este hecho es aún más grave si ha ocurrido déficit de proteína o energía durante la fase final de la gestación precedente. La repleción de las reservas proteicas ocurre con una eficiencia similar a la del crecimiento.

Por otro lado, el conjunto de urea plasmática sirve como fuente de nitrógeno rápidamente disponible para los microorganismos ruminales ante situaciones de deficiencia de nitrógeno degradable frente a la disponibilidad de energía fermentecible. El valor de este reciclado es tal que ante el suministro de raciones libres de nitrógeno, la fermentación ruminal se mantiene a ritmo decreciente y sólo cesa completamente en el curso de varios días. La cantidad de nitrógeno reciclado se ha calculado en función del porcentaje de proteína ingerida, mediante la regresión de los valores para diferentes consumos de proteína y materia orgánica digestible. En cualquier caso, en condiciones normales de alimentación la importancia del reciclado ruminal de nitrógeno es mínima ya que el balance neto (entrada - salida de amoníaco) es prácticamente cero.

CONCLUSIÓN

Las necesidades de proteína de los animales se estiman de forma factorial incluyendo las necesidades para mantenimiento, crecimiento, lactación, gestación y recuperación de las reservas proteicas. Las necesidades de proteína disponible para su absorción intestinal son una función de la proteína retenida en cada uno de los procesos mencionados mayorada por los gastos inherentes al proceso de síntesis. Dichos gastos constituyen la ineficacia. Para conseguir la máxima eficiencia de utilización de la proteína absorbida es necesario que su perfil de aminoácidos y la relación entre los aminoácidos esenciales y no esenciales sea óptima en función de la producción deseada. Por tanto, se hace necesario valorar también las necesidades nitrogenadas de los rumiantes como aminoácidos metabolizables, indicando las relaciones más adecuadas entre ellos y de los esenciales frente a los no esenciales.

Si la estimación de las necesidades nitrogenadas es estrictamente ajustada dentro de los conocimientos actuales es posible reducir la proteína total aportada en las raciones lo que reduce el riesgo sanitario, evita incidencias sobre la reproducción, aumenta la eficacia de la producción y reduce los costes de alimentación. Como factor de

repercusión social hay que hacer hincapié en la posibilidad de reducir el nitrógeno presente en las excretas disminuyendo el impacto ambiental de este tipo de explotación.

APORTES DE PROTEÍNA

INTRODUCCIÓN

La proteína alimentaria sólo refleja parcialmente la proteína disponible para los rumiantes debido a que la población microbiana ruminal la utiliza en primer lugar para su propio crecimiento, dejando únicamente la fracción no degradada de la misma disponible para el hospedador. Las bacterias, los protozoos y los hongos residentes en rumen fermentan los constituyentes de los alimentos ingeridos por el rumiante para obtener la energía y el nitrógeno necesarios para su supervivencia.

Los productos finales de la fermentación microbiana que tienen valor nutritivo para el hospedador son ácidos grasos volátiles, que suponen más del 60% de las necesidades de energía metabolizable, y las propias células microbianas, que son arrastradas hasta intestino delgado aportando más del 50% de la proteína metabolizable necesaria. Esto determina que la correcta nutrición del ganado sea dependiente del mantenimiento de un ambiente ruminal adecuado con suficientes sustratos energéticos y nitrogenados que permitan el máximo crecimiento microbiano.

Las bacterias constituyen la mayor parte de la biomasa del rumen. En determinados momentos, cerca de la mitad de la biomasa microbiana puede estar constituida por protozoos, pero normalmente la fauna representa menos de un 10%, y su contribución a la proteína presente en intestino es aún menor. A pesar de ello, los protozoos pueden afectar a la producción de proteína bacteriana al actuar como predadores y competir por los sustratos. Los hongos también contribuyen al conjunto de la proteína microbiana pero su proporción es inferior al 8% de la biomasa.

Los microorganismos ruminales tienen la capacidad de sintetizar todos los aminoácidos esenciales y no esenciales desde compuestos nitrogenados sencillos, por lo que la calidad del nitrógeno degradable no es esencialmente importante, utilizándose por igual proteína verdadera, urea y otros compuestos nitrogenados no proteicos. De hecho los rumiantes pueden subsistir e incluso conseguir modestas producciones alimentadas con raciones que no contienen proteína verdadera, merced a la proteína microbiana que llega a intestino. Este fenómeno supone para el rumiante una ventaja nutricional extraordinaria pero además debe ser aprovechado en beneficio de la producción de proteína de elevada calidad (carne y leche) para los humanos, incluso desde recursos vegetales de escaso valor nutritivo.

Por otra parte, aunque la importancia de la proteína microbiana a la hora de satisfacer las necesidades de aminoácidos de los rumiantes es indiscutible, y a pesar de que el perfil de aminoácidos de aquella es muy similar al de la proteína sintetizada por el rumiante (CUADRO I), el aporte que podemos conseguir maximizando el crecimiento microbiano aún es insuficiente para cubrir las necesidades de aminoácidos de animales sometidos a elevadas producciones. Por ello, habremos de proveer proteína no degradable digestible con un perfil de aminoácidos adecuado que permita completar el aporte microbiano y cubrir las necesidades totales de los animales.

	GR / 100 GRS AMINOACIDOS										
	ARG	HIS	ILE	LEU	LYS	MET	PHE	THR	TRY	VAL	IAE(*)
PROT. LACTEA	3.7	2.7	6	10	8.3	2.7	5.3	4.6	1.4	6.7	100
PROT. TISULAR	6.8	3	5.5	7.2	8.2	2.7	4.6	4.6	1.2	5.2	
PROT. BACTERIANA	5.1	2	5.7	8.1	7.9	2.6	5.1	5.8	1.5	6.2	99

	GR / 100 GR PROTEINA BRUTA										
	ARG	HIS	ILE	LEU	LYS	MET	PHE	THR	TRY	VAL	IAE(*)
HENO ALFALFA	4.4	1.8	4.4	6.8	4.6	1.1	4.2	3.8	1.3	4.5	72
SILO MAIZ	1.7	0.8	2.8	6.5	1.8	0.8	3	2.5	--	3.7	29
CEBADA	3.9	1.8	3.2	6.2	4.1	1.4	4.8	2.8	1.3	4.8	68
MAIZ	5.1	1	3.7	9.9	2.2	1.7	4.4	3.4	0.9	4.2	65
HARINA SOJA	6.9	2.2	5.1	6.9	5.9	1.3	4.5	3.5	1.4	4.9	82
HARINA GIRASOL	7.7	2.2	4.6	5.8	3.8	3.3	4.9	3.3	1.1	5.1	84
DDGS	3.5	2.5	6.1	7.4	2.5	1.4	6.1	3.5	0.6	5.8	71
GLUTEN FEED	4.2	2.9	2.5	8	2.5	2.1	3.3	3.8	0.4	4.4	63

(*) ÍNDICE DE AMINOÁCIDOS ESENCIALES CALCULADO SEGÚN EL MÉTODO DE OSER. PARA EL CÁLCULO SÓLO SE HA TENIDO EN CUENTA LA PROPORCIÓN DE CADA UNO DE LOS AMINOÁCIDOS RESPECTO A LA PROPORCIÓN

DE ESE AMINOÁCIDO EN LA PROTEÍNA LÁCTEA, SEGÚN LA FORMULA GENERAL: $IAE = \text{ANTILOG}(1/10 * [(\text{LOG ARG ALIMENTO} * 100 / \text{ARG LECHE}) + (\text{LOG HIS ALIMENTO} * 100 / \text{HIS LECHE}) + \dots + \text{LOG}(\text{VAL ALIMENTO} * 100 / \text{VAL LECHE})]$

LA PROTEÍNA DE LOS ALIMENTOS

Los alimentos contienen varios tipos de proteínas y compuestos nitrogenados no proteicos, que en conjunto constituyen la fracción analítica denominada proteína bruta. Las proteínas son moléculas grandes que difieren en tamaño, estructura espacial, solubilidad y composición de aminoácidos. La clasificación tradicional que se hace de ellas es en dos grandes grupos en base a su estructura tridimensional y a su solubilidad: proteínas globulares y proteínas fibrosas. Las proteínas globulares son relativamente compactas debido a la gran cantidad de pliegues de la cadena polipeptídica e incluyen de mayor a menor solubilidad a las albúminas, globulinas, prolaminas y glutelinas. Las proteínas fibrosas son el colágeno, la elastina y la queratina, son insolubles, resistentes a la digestión enzimática y sólo se encuentran en los tejidos animales.

Las albúminas y globulinas tienen bajo peso molecular. Las prolaminas y glutelinas tienen alto peso molecular y abundantes puentes disulfuro que las hacen más insolubles. Generalmente todas aparecen en los tejidos vegetales pero en proporciones variables. Así, los granos de cereales y sus subproductos contienen más prolaminas y glutelinas, en tanto que las hojas y tallos son ricos en albúminas. Las proteínas globulares y los compuestos nitrogenados no proteicos constituyen más del 65% del nitrógeno total presente en los alimentos vegetales. El resto del nitrógeno está compuesto por proteínas fijadas a aleurona o a paredes celulares y proteínas desnaturizadas.

Los compuestos nitrogenados no proteicos presentes en los alimentos incluyen péptidos, aminoácidos libres, ácidos nucleicos, amidas, aminas, amoníaco y nitratos. Los forrajes contienen las mayores proporciones de nitrógeno no proteico (NNP) en la proteína bruta (de 15 a 65%). Los henos y ensilados contienen más cantidad que los mismos forrajes frescos debido a la proteólisis ocurrida durante el secado y la fermentación, siendo más abundantes los aminoácidos libres, el amoníaco y las aminas. En los forrajes frescos predominan los péptidos y aminoácidos y los nitratos. En los alimentos no forrajeros, el contenido medio de nitrógeno no proteico es inferior al 15%.

El hecho de que la proteína bruta de un alimento sea más o menos degradable en rumen depende de su composición (proporción NNP/proteína verdadera) y de la estructura química y física de la proteína verdadera. El NNP se degrada tan rápidamente que se asume que la degradabilidad alcanza el 100%. Por tanto, los alimentos cuya proteína bruta es rica en NNP contribuyen poco al aporte de proteína no degradable. Por otro lado, las diferencias en la estructura tridimensional de las proteínas verdaderas y las uniones de las cadenas proteicas entre sí, con otras proteínas y con los carbohidratos, también modifican la tasa de degradación, principalmente por dificultar el acceso de las enzimas proteolíticas y en menor medida por reducir la solubilidad. Así las proteínas con estructuras terciarias muy complejas, abundantes puentes disulfuro o ligadas a carbohidratos son lentamente degradadas o incluso completamente indegradables debido a la dificultad de las proteasas microbianas para atacar los enlaces peptídicos. Por este motivo, las albúminas y globulinas son más degradables que las prolaminas y glutelinas, lo que es infortunado porque las primeras tienen normalmente un mayor valor biológico (mejor perfil de aminoácidos) que las segundas. La degradabilidad se ve favorecida por el aumento del tiempo de permanencia en rumen. Salvo casos extremos, en la fracción de proteína verdadera no debe confundirse solubilidad con degradabilidad, de hecho el paso a intestino de proteínas muy solubles es mayor que el de proteínas insolubles, debido a que las primeras se asocian a la fase líquida ruminal que tiene mayor velocidad de tránsito, reduciendo la oportunidad para su degradación. Por otro lado, la medida de la solubilidad de la proteína bruta de diferentes muestras de un mismo alimento sí es un indicador fiable de su degradabilidad, pues señala variaciones en la proporción de cada una de las fracciones nitrogenadas.

Señalar que, a diferencia de lo que ocurre en la alimentación de los monogástricos, conocer la composición aminoacídica de la proteína bruta alimentaria sólo tiene una importancia relativa para estimar el valor nutritivo de esa proteína para el animal rumiante, como veremos más adelante.

LA POBLACIÓN MICROBIANA RUMINAL

Las condiciones que prevalecen en el rumen son particulares. El ambiente es altamente anaerobio con un potencial redox de -300 a -350 mV. La temperatura permanece relativamente constante entre $38-42^{\circ}\text{C}$, debido en parte al calor de fermentación pero principalmente por el mantenimiento de la homeotermia corporal. La capacidad tampón del medio ruminal proviene de la abundante entrada de saliva rica en sales de bicarbonato y fosfato que permite que el pH se mantenga entre 6 y 7 en condiciones normales. Las contracciones rítmicas de las paredes ruminales facilitan el mezclado del contenido y contribuyen a la reducción del tamaño de partícula. El paso de la digesta desde el rumen es selectivo y depende del flujo de líquido y del tamaño de partícula. El flujo de agua, solutos y pequeñas partículas, incluyendo células microbianas, a través del rumen requiere de 10 a 24 horas, en tanto que las partículas grandes y los microorganismos adheridos a ellas pueden ser retenidos de 2 a 3 días,

favoreciéndose de esta forma la degradabilidad de los constituyentes del alimento particularmente la fibra. A cambio del mantenimiento de un ambiente relativamente constante, donde los productos residuales de la fermentación son retirados y el aporte de sustrato es semicontinuo, los microorganismos proporcionan al rumiante fuentes de energía fácilmente utilizables (ácidos grasos volátiles) y una fuente de proteína en forma de biomasa microbiana.

La población microbiana del rumen está constituida por bacterias, protozoos y hongos, y puede localizarse en la fase líquida del contenido ruminal, asociada a partículas o sobre la línea del epitelio. La mayoría son anaerobios estrictos y no crecen en presencia de oxígeno. Algunas especies son anaerobias facultativas y utilizan el oxígeno que entra al rumen con el alimento o por difusión a través del epitelio, contribuyendo al mantenimiento de la anaerobiosis. La diversidad de especies y el tamaño y actividad de la población microbiana no es constante, sino que varía de acuerdo con los cambios en la composición y presentación física de la ración.

Las bacterias ruminales, más de 200 especies, pueden dividirse en dos grandes grupos, fibrolíticas y amilolíticas, de acuerdo con el sustrato principal sobre el que actúan, aunque esto no es del todo exacto ya que algunas bacterias están adaptadas a vivir sobre una variedad de sustratos. Las bacterias fibrolíticas degradan la celulosa y la hemicelulosa, por lo que confieren a los rumiantes la capacidad de sobrevivir a base de forrajes fibrosos de baja calidad, siendo por tanto muy importantes en el proceso digestivo. Este grupo de bacterias crece lentamente y utiliza el amoníaco prácticamente como única fuente de nitrógeno, aunque su ritmo de crecimiento se ve favorecido por la disponibilidad de ácidos grasos de cadena ramificada (isobutírico e isovalérico) que normalmente obtienen de la actividad fermentativa de otros microorganismos sobre los aminoácidos. Estas especies son muy sensibles a la reducción del pH, de forma que si desciende por debajo de 6.2 su crecimiento es inhibido con la consecuente reducción de la fermentación de la fibra. El efecto negativo de un bajo pH es debido a la acumulación de aniones intracelularmente lo que altera el metabolismo celular. La reducción marcada del pH tiene lugar cuando la velocidad de producción de ácidos grasos volátiles es tal que los mecanismos amortiguadores (entrada de tampones vía salivar, salida de ácidos por absorción o paso a intestino) no pueden compensarla. Esto es frecuente en raciones ricas en almidones o azúcares o excesivamente pobres en forrajes. Por otra parte, la velocidad del proceso de digestión de la fibra depende también del sustrato presente, independientemente del pH ruminal, así la fibra de algunos subproductos es digerida más lentamente que la de los forrajes. Las bacterias amilolíticas fermentan el almidón, los azúcares y las pectinas, crecen más rápidamente, pueden utilizar únicamente amoníaco como fuente de nitrógeno pero el crecimiento es mayor (hasta un 18%) cuando en el medio existen péptidos. En este caso la velocidad de captación de los mismos para su utilización es limitante del crecimiento. Este grupo es generalmente menos sensible a los cambios en el pH porque tienen la capacidad de disminuir su pH intracelular para evitar la acumulación de aniones, no obstante un pH inferior a 5.2 afecta a su crecimiento. La velocidad con que degradan el almidón depende del tipo y del procesado y la producción de ácidos grasos volátiles por unidad consumida es generalmente mayor que para la fibra. La mayoría de las bacterias ruminales, con excepción de las especies fibrolíticas más importantes, tienen actividad proteolítica que es más intensa cuando faltan carbohidratos para fermentar, pero las especies capaces de crecer exclusivamente utilizando aminoácidos como fuente de energía son escasas. La actividad proteolítica de las bacterias se centra principalmente en las proteínas solubles y el resultado es la producción de amoníaco que se incorpora al conjunto de amoníaco ruminal. Algunas especies de bacterias (p.ej. lácticas y metanógenas) utilizan como sustratos principales los productos residuales del metabolismo de las especies fermentadoras primarias. En el rumen no viven bacterias capaces de utilizar los ácidos grasos de los triglicéridos ingeridos como fuente de energía.

Los protozoos ruminales son menos importantes que las bacterias para el rumiante ya que su presencia no es estrictamente necesaria para los procesos de fermentación ruminal. Se conocen más de 100 especies que pueden dividirse en dos grupos: holotricos y entodiniomorfos. Viven adheridos a las partículas alimenticias de gran tamaño lo que garantiza su supervivencia ya que su tasa de reproducción es inferior al ritmo de dilución de la fase líquida. Aunque los protozoos son capaces utilizar una variedad de sustratos (almidón, azúcares solubles, celulosa, proteínas) su principal fuente de energía y nitrógeno proviene de la fagocitosis de otros microorganismos, principalmente bacterias. De hecho, cuando los protozoos son eliminados o inhibidos en el rumen, el número de bacterias suele aumentar. Los protozoos pueden contribuir al control del pH porque compiten por el almidón y los azúcares con las bacterias y su digestión es intracelular y por tanto más lenta. La actividad proteolítica de los protozoos es mayor que la de las bacterias y como no pueden utilizar el amoníaco como fuente de nitrógeno, son exportadores netos del mismo al medio ruminal, al que también incorporan péptidos y aminoácidos. En conjunto, se estima que los protozoos son responsables del 10 al 20% de la actividad proteolítica en rumen.

Los hongos anaerobios son el grupo menos estudiado. Se conocen 12 especies que son principalmente fibrolíticos y tienen actividad proteolítica. Los hongos se encuentran anclados al material fibroso del que extraen los nutrientes, actuando como agentes primarios sobre las partículas fibrosas independientemente del contenido en lignina lo que facilita el acceso a otros microbios. Cuando completan el ciclo de crecimiento liberan zoosporas que nadan en el fluido ruminal y colonizan nuevos fragmentos de alimentos. Durante la fase de máximo

crecimiento su actividad proteolítica está ligada a la célula y al declinar el crecimiento, las proteasas se localizan extracelularmente.

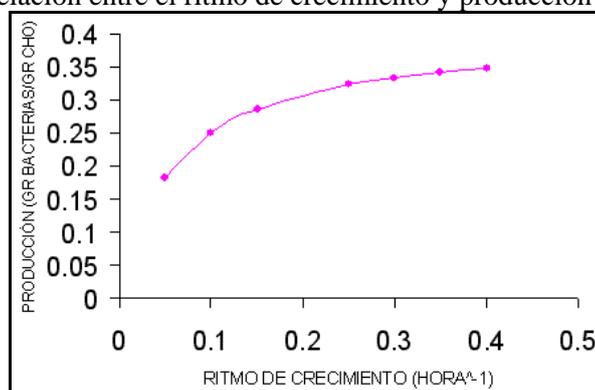
DINÁMICA DEL CRECIMIENTO MICROBIANO

La mayoría de los microorganismos ruminales utilizan la glucólisis y el ciclo de las pentosas fosfato para fermentar las hexosas y pentosas, resultantes de la degradación de los carbohidratos, hasta piruvato. El piruvato puede ser entonces metabolizado por diferentes vías hasta productos finales tales como formiato, acetato, propionato, butirato, lactato, succinato, metanol, etanol, dióxido de carbono e hidrógeno molecular. No obstante, en el ecosistema ruminal algunos de estos compuestos están presentes en pequeñísimas cantidades, ya que son utilizados a su vez como sustratos para el crecimiento de microorganismos secundarios. Algunos ejemplos son las bacterias que utilizan succinato y lactato para producir acetato o propionato, y las bacterias metanogénicas que utilizan hidrógeno y dióxido de carbono o formiato, acetato, metilamina y metanol para la producción de metano. Algunas bacterias son incapaces de utilizar los productos liberados en su fermentación de los carbohidratos, dejándolos disponibles para otras microbios que a su vez proveen al primero con vitaminas o cofactores esenciales para su crecimiento.

En cualquier caso, la fermentación de los carbohidratos tiene por objeto la obtención de energía en forma de ATP. El ATP es utilizado para el mantenimiento celular y para la síntesis de monómeros desde compuestos sencillos de carbono y nitrógeno y la polimerización de dichos monómeros hasta formar macromoléculas (polisacáridos, ácidos nucleicos, proteínas), durante el crecimiento.

Así pues, análogamente a las necesidades de los animales, las necesidades energéticas de las bacterias se reparten entre el mantenimiento y el crecimiento o multiplicación. Las necesidades de mantenimiento de las bacterias ruminales no han sido precisamente identificadas pero se considera probable que el transporte de iones a través de la membrana celular constituya su mayor fracción. Se calcula que las necesidades de mantenimiento de las bacterias fibrolíticas son tres veces menores que las de las bacterias amilolíticas (0.05 vs. 0.15 gr de carbohidrato/gr microorganismo/hora), aunque éstas crecen más rápido. El crecimiento no ocurre hasta que las necesidades de mantenimiento son cubiertas, existiendo un valor máximo (0.4 gr/gr carbohidrato fermentado) para unas necesidades dadas de mantenimiento (FIGURA I). Para el crecimiento además de energía en forma de ATP son necesarias fuentes de nitrógeno y minerales. La principal fuente de nitrógeno es el amoníaco, aunque también se utilizan péptidos y en menor medida, aminoácidos. Los péptidos son preferidos a los aminoácidos por su menor coste de transporte al interior de la célula microbiana.

Figura I.- Relación entre el ritmo de crecimiento y producción bacteriana



CURVA SEGÚN LA ECUACIÓN: $1/Y = m/K + 1/Y_{max}$

DONDE:

Y: PRODUCCIÓN BACTERIANA EN GRAMOS DE BACTERIAS POR GRAMO DE CARBOHIDRATOS FERMENTADOS
 m: NECESIDADES DE MANTENIMIENTO DE LAS BACTERIAS EN GRAMOS DE CARBOHIDRATOS NECESARIOS POR GRAMO DE BACTERIAS Y POR HORA

K: RITMO DE CRECIMIENTO EN TANTO POR UNO POR HORA

Y_{max} : CRECIMIENTO MÁXIMO DE LAS BACTERIAS EN GRAMOS DE BACTERIAS POR GRAMO DE CARBOHIDRATOS FERMENTADOS.

Como ya se ha dicho, las bacterias fibrolíticas utilizan el amoníaco como única fuente de nitrógeno. En el caso de las bacterias amilolíticas la utilización de amoníaco o péptidos es función de la disponibilidad de carbohidratos, cuando éstos no son limitantes, el 66% de la proteína que sintetizan proviene de péptidos y el 34% deriva del amoníaco. Se calcula que en función de la ración consumida por el rumiante, de un 40 a un 95% del nitrógeno bacteriano deriva del amoníaco. Cuando el nitrógeno u otro nutriente limita el crecimiento, las bacterias son capaces de almacenar polisacáridos que utilizarán al cesar el déficit.

En cuanto a los minerales, el azufre puede suponer hasta 8 gr/kg de materia seca de biomasa microbiana. El fósforo se calcula que supone un 2-6% de la materia seca microbiana. Cabe suponer que los microorganismos

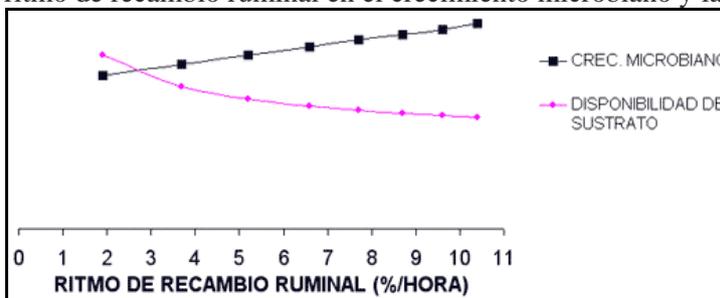
precisan de determinadas cantidades de otros minerales para su crecimiento. En este sentido se han identificado proporciones óptimas para la degradación de la celulosa in vitro para cobalto, cobre, yodo, hierro, manganeso, molibdeno, selenio y zinc.

Se ha podido determinar que la producción bacteriana es tanto mayor cuando la tasa de recambio ruminal aumenta. La justificación es que al aumentar la tasa de recambio disminuye proporcionalmente el porcentaje de energía destinada al mantenimiento porque la energía consumida para el crecimiento es mayor. Según esto lo ideal sería que la tasa de recambio ruminal fuera igual al ritmo de división de los microorganismos, lo que permitiría que la energía destinada al mantenimiento fuese mínima.

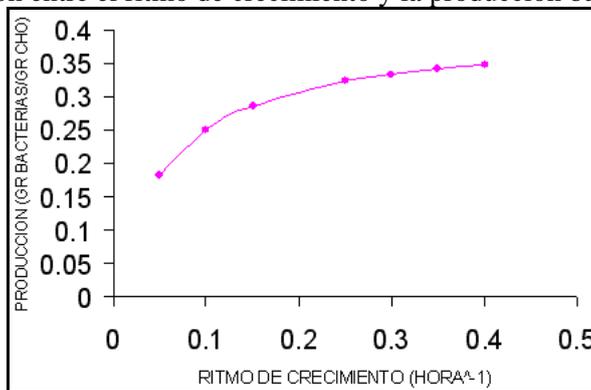
Lógicamente, debido a la diversidad de especies microbianas no existe una tasa de recambio óptima. Por otro lado, no puede utilizarse únicamente la tasa de dilución de la fase líquida para valorar el crecimiento microbiano ya que un número importante de microorganismos viven adheridos a las partículas alimenticias. Solamente las bacterias con elevada capacidad de multiplicación viven libres en el fluido ruminal. El caso opuesto son los protozoos cuyo tasa de multiplicación es tan baja que si vivieran libres en el líquido ruminal su supervivencia estaría gravemente amenazada con el consumo de determinados tipos de raciones.

Señalar que al aumentar la tasa de recambio se reduce el tiempo de contacto entre los microorganismos y las partículas muy pequeñas o en suspensión, lo que reduce la cantidad total de sustrato que es fermentado. Por tanto, al aumentar la tasa de recambio (lo que ocurre al aumentar el nivel de alimentación), se dan dos fenómenos contrapuestos, por un lado mejora el rendimiento microbiano por reducción proporcional de las necesidades de mantenimiento y, por otro, disminuye la cantidad de sustrato que queda disponible para ser fermentado (FIGURA II).

Figura II.- Influencia del ritmo de recambio ruminal en el crecimiento microbiano y la disponibilidad de sustrato



Relación entre el ritmo de crecimiento y la producción bacteriana



CURVA SEGÚN LA ECUACIÓN: $1/Y = m/K + 1/Y_{max}$

DONDE:

Y: PRODUCCIÓN BACTERIANA EN GRAMOS DE BACTERIAS POR GRAMO DE CARBOHIDRATOS FERMENTADOS

m: NECESIDADES DE MANTENIMIENTO DE LAS BACTERIAS EN GRAMOS DE CARBOHIDRATOS NECESARIOS POR GRAMO DE BACTERIAS Y POR HORA

K: RITMO DE CRECIMIENTO EN TANTO POR UNO POR HORA

Y_{max}: CRECIMIENTO MÁXIMO DE LAS BACTERIAS EN GRAMOS DE BACTERIAS POR GRAMO DE CARBOHIDRATOS FERMENTADOS

UTILIZACIÓN RUMINAL DE LA PROTEÍNA

Degradación de la proteína

El conjunto de la proteína bruta disponible para su digestión por los microorganismos ruminales proviene de:

- ◆ Proteína verdadera alimentaria
- ◆ Compuestos nitrogenados no proteicos (aminas, amidas, nitratos, urea, etc.)

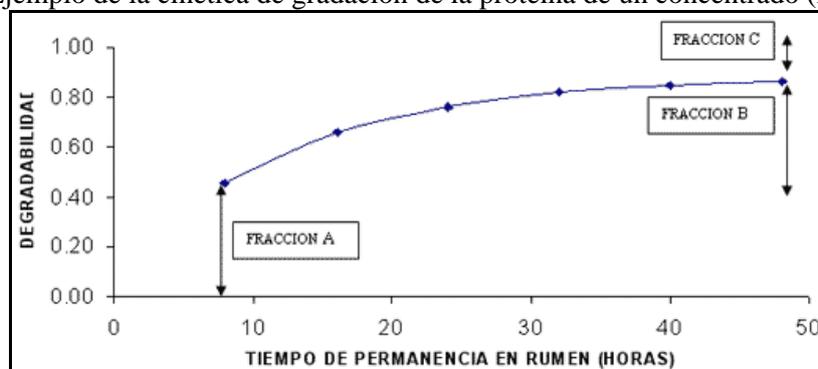
- ◆ Urea salivar y transepitelial
- ◆ Proteínas endógenas (mucoproteínas, células de descamación, etc.)
- ◆ Proteínas microbianas recicladas intraruminalmente (predación protozoaria, autólisis).

Toda la actividad enzimática ruminal es de origen microbiano. Las bacterias, protozoos y hongos elaboran proteasas, peptidasas y deaminasas. La mayoría de las proteasas bacterianas están ligadas a la pared celular, solamente el 10% de la actividad proteolítica es libre. Por tanto, para que ocurra la proteólisis es necesario que las bacterias se adhieran a las proteínas o viceversa según éstas sean insolubles o solubles. Los protozoos ingieren las partículas alimenticias (y hongos y bacterias) y realizan una digestión intracelular. Los hongos tienen proteasas ligadas a la pared y también extracelulares. En cualquier caso, la degradación microbiana de la proteína ocurre en tres pasos:

- 1) hidrólisis de los enlaces peptídicos para liberar péptidos
- 2) degradación de los anteriores hasta aminoácidos y péptidos de pequeño tamaño
- 3) utilización inmediata de estos para:
 - ◆ la síntesis de proteína microbiana
 - ◆ desaminación para liberar amoníaco y esqueletos carbonados
 - ◆ utilización del amoníaco para la resíntesis de aminoácidos (bacterias) o liberación del mismo al medio (protozoos)

A efectos de degradación ruminal, la proteína bruta de los alimentos se considera habitualmente dividida en tres fracciones según la velocidad con que es degradada (FIGURA III): proteína rápidamente degradable (fracción A), proteína lentamente degradable (fracción B) y proteína no degradable (fracción C). La fracción A está compuesta mayoritariamente por compuestos nitrogenados no proteicos y por pequeñas moléculas de proteína soluble, se considera que es inmediatamente degradada hasta amoníaco, por lo que no es afectada por la velocidad de tránsito, y es utilizada por los microorganismos con una eficacia inferior a la unidad. La fracción B es proteína verdadera de estructura compleja o ligada a fibra neutrodetergente y el porcentaje que es degradado hasta amoníaco o péptidos depende en gran medida del tiempo de permanencia en rumen. La eficacia de incorporación de esta fracción a la proteína microbiana se considera igual a uno. La fracción C es proteína asociada a lignina o taninos o desnaturalizada por el calor, no es disponible para los microorganismos y pasa intacta al intestino delgado.

Figura III.- Ejemplo de la cinética de gradación de la proteína de un concentrado (harina de soja)



La valoración de cada una de las fracciones se realiza normalmente por incubación ruminal en bolsas de nylon, de forma que la fracción rápidamente degradable se calcula a partir del nitrógeno de la muestra que es extraíble por lavado en agua fría, no correspondiéndose con la fracción de proteína soluble en soluciones tamponadas aunque existe correlación ($A \text{ en } \% \text{ de PB} = 0.06 + 0.61 * \text{solubilidad}$). La fracción lentamente degradable corresponde a la proteína desaparecida de la muestra tras un tiempo de incubación suficiente (48 horas para concentrados y 72 horas para forrajes). El residuo no degradado transcurrido ese tiempo corresponde a la fracción indegradable, que químicamente se identifica como nitrógeno insoluble en detergente ácido (NIDA), y representa de media un 20% del nitrógeno en los forrajes y un 5% en los concentrados, aunque puede ser más elevado en subproductos.

En cuanto a la urea reciclada a rumen ya se comentó que en animales correctamente alimentados el balance nitrogenado de esta fuente es prácticamente cero. No obstante en caso de utilización de urea endógena para compensar el déficit momentáneo de amoníaco, se considera que la eficacia de incorporación a la proteína microbiana es igual a la unidad.

La valoración de la contribución de las proteínas endógenas al conjunto de proteína degradable es difícil. En cualquier caso se estima que su degradabilidad es del 100%.

Señalar que el reciclaje de proteína microbiana intraruminalmente es muy importante debido a la actividad predatoria de los protozoos y a la destrucción de células microbianas por autólisis. Se estima que la cantidad de proteína microbiana que abandona el rumen es dos a tres veces menor que la cantidad total realmente sintetizada.

FACTORES RUMINALES QUE AFECTAN A LA DEGRADABILIDAD DE LA PROTEÍNA

Como ya se vio, la estructura química es el principal factor que determina la degradabilidad de la proteína verdadera, sin embargo, también existen factores ajenos que influyen en la degradabilidad de la misma. El principal factor externo que determina la cantidad de una determinada proteína que se degrada es el tiempo de permanencia en rumen, que se expresa normalmente como velocidad de tránsito. Este factor nos permite distinguir entre la proteína potencialmente degradable, que se ha calculado por incubación ruminal, y la proteína real o efectivamente degradable en una situación dada de alimentación.

La velocidad de tránsito depende del nivel de alimentación, de la presentación física de la ración y en menor medida de las condiciones ambientales, y al ir aumentado tiene un efecto progresivamente decreciente sobre la degradabilidad efectiva.

El nivel de alimentación representa la relación entre el consumo de total de materia seca por el animal y la materia seca necesaria para cubrir sus necesidades de mantenimiento. Al aumentar el nivel de alimentación, o lo que es lo mismo el consumo de alimentos, se incrementa la velocidad de tránsito, reduciéndose el tiempo de exposición de la proteína a la actividad microbiana ruminal.

La presentación física de la ración repercute en el tiempo de permanencia en rumen de las partículas pequeñas de forma que si la ración se compone de forrajes largos, la velocidad de tránsito de las partículas pequeñas es mucho mayor que al consumir raciones compuestas en su mayoría por partículas tamaño menor. Cuando predomina un ambiente térmico cálido, la velocidad de tránsito digestivo se reduce. Como puede deducirse, las proteínas compuestas por una amplia proporción de fracción B, son aquellas cuya degradabilidad se ve más afectada por la velocidad de tránsito.

Otros factores que repercuten en menor medida en la degradación de la proteína son: la cantidad de amoníaco presente en rumen, el pH y el consumo de antibióticos ionóforos. Parece ser que, en contra de lo que podría deducirse, un descenso en la concentración de amoníaco en rumen tiene una repercusión negativa sobre la proteólisis, probablemente debido a la reducción del crecimiento bacteriano total. El pH se relaciona con la degradabilidad en cuanto que las raciones que originan bajo pH ruminal normalmente se corresponden con altos niveles de alimentación. El valor de pH per se no ha podido asociarse claramente con la variaciones en la actividad proteolítica. Los ionóforos tienen un efecto bactericida selectivo y reducen el número de bacterias proteolíticas.

En definitiva, las proteínas potencialmente degradables que llegan al rumen son hidrolizadas hasta que salen del mismo, lo que ocurre en cualquier momento en función del tiempo de retención. Por tanto, el porcentaje que finalmente se degrada dependerá principalmente de la relación entre el ritmo de degradación de la proteína y la velocidad de tránsito.

La expresión que recoge los conceptos expuestos es:

$$\text{PROTEÍNA EFECTIVAMENTE DEGRADABLE} = (0.8 \cdot \text{PROTEÍNA RÁPIDAMENTE DEGRADABLE}) + (\text{PROTEÍNA LENTAMENTE DEGRADABLE} \cdot \text{Kd} / \text{Kd} + \text{Kp}),$$

DONDE:

PROTEÍNA LENTAMENTE DEGRADABLE ES LA FRACCIÓN POTENCIALMENTE DEGRADABLE MENOS LA PROTEÍNA RÁPIDAMENTE DEGRADABLE Kd ES LA CONSTANTE DE DEGRADACIÓN CARACTERÍSTICA DE LA PROTEÍNA LENTAMENTE DEGRADABLE (%/HORA) Y Kp ES LA VELOCIDAD DE TRÁNSITO (%/HORA)

ESTIMACIÓN DE LA SÍNTESIS DE PROTEÍNA MICROBIANA

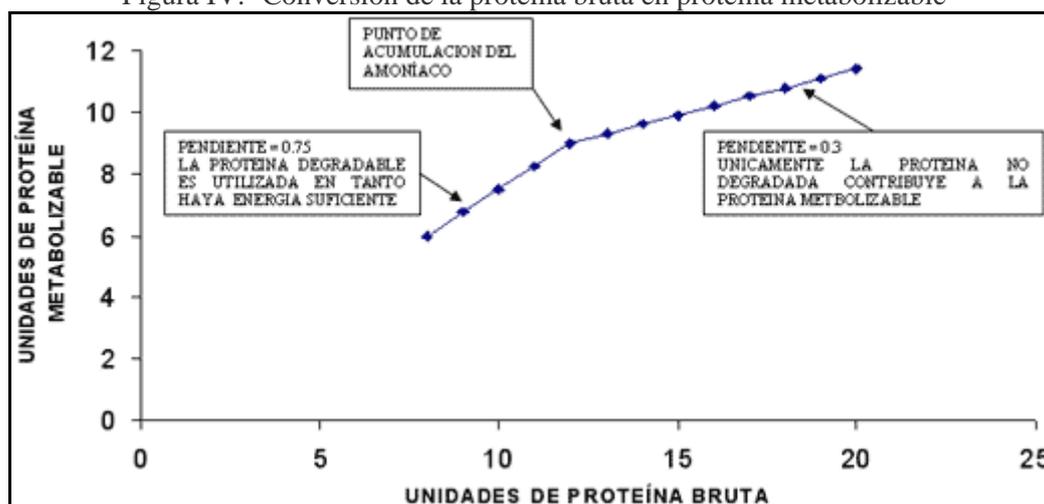
La síntesis de proteína microbiana requiere de la disponibilidad de energía en forma de ATP y de una fuente de nitrógeno. Como hemos visto, el ATP es obtenido principalmente por la fermentación de los carbohidratos, en tanto que las fuentes de nitrógeno son diversas. En condiciones normales, el balance de nitrógeno disponible en rumen oscila de +20% a -20% de necesidades según energía disponible, con una eficiencia de síntesis que oscila de 24 a 36 gramos de nitrógeno microbiano por cada kg de materia orgánica fermentada en rumen.

Se considera que la proteína microbiana sintetizada es igual a la proteína degradable efectiva cuando ésta es limitante del crecimiento. En condiciones normales, menos de un 30% de proteína degradable en la ración es insuficiente para el crecimiento microbiano. Si se aporta más de un 60% de proteína degradable, las pérdidas en forma de amoníaco son elevadas aún cuando la disponibilidad de carbohidratos sea también muy alta.

Por otro lado, la proporción de proteína rápidamente degradable en la proteína efectivamente degradable tampoco debe ser superior al 40% porque debido a que su utilización microbiana es únicamente del 80%, las pérdidas como amoníaco serían muy altas. De hecho, en cultivos mixtos de bacterias ruminales a los que se incorpora proteína degradable de forma progresiva sin que la energía sea limitante, se observa que la utilización del nitrógeno es prácticamente completa hasta que la concentración de amoníaco llega a 5 mg/dl (equivalente a 12-13% de proteína bruta), por encima de ese punto la proteína degradable que se añade es fermentada pero no ocurre utilización del amoníaco liberado y éste se acumula en el medio; si este fenómeno ocurre de forma similar

en vivo, resultaría en la incapacidad de transformación de una parte considerable de la proteína alimentaria en proteína metabolizable (FIGURA IV).

Figura IV.- Conversión de la proteína bruta en proteína metabolizable



Cuando las raciones son muy ricas en carbohidratos no estructurales, una relación elevada péptidos/amoníaco deprime la desaminación de los aminoácidos y en consecuencia el déficit de amoníaco limita el crecimiento de las bacterias fibrolíticas, de forma que la producción total de proteína microbiana se reduce.

Como en la mayoría de las circunstancias la energía es el factor limitante en rumen, es conveniente expresar el crecimiento microbiano en función de aquella. La cantidad de energía disponible depende de la cantidad de materia orgánica (principalmente carbohidratos) que puede ser fermentada. Al igual que en el caso de la proteína, la cantidad de materia orgánica fermentada en rumen es función de la relación entre su constante de degradación y la velocidad de tránsito. Por tanto al aumentar la velocidad de tránsito, la materia orgánica fermentada de una ración dada disminuye, y esta disminución es más acentuada para aquellas raciones con menor constante de degradación. Como ya dijimos, este fenómeno es contrapuesto al aumento de la eficacia del crecimiento microbiano al aumentar la tasa de recambio.

Los diferentes sistemas de alimentación (CUADRO II) utilizan distintos criterios para expresar la síntesis de proteína microbiana en función de la energía: gramos por materia orgánica fermentescible (INRA), gramos por nutrientes digestibles totales (NRC), gramos por megajulio de energía metabolizable fermentescible (AFRC), gramos por kg de carbohidratos fermentados en rumen (sistema nórdico). Los valores de proteína microbiana sintetizada por unidad de sustrato energético es muy similar entre sistemas e incluso por cálculo con ecuaciones múltiples derivadas de pruebas de alimentación. Únicamente AFRC da valores sustancialmente diferentes debido a como valora el incremento del rendimiento microbiano al aumentar el nivel de alimentación.

CUADRO II.- Estimación de los aportes proteicos según algunos sistemas

	REINO UNIDO	FRANCIA	EE.UU.	HOLANDA	DINAMARCA
EFICIENCIA DEL CRECIMIENTO MICROBIANO	2-11 GR/MJ EMF (F(NA))	145 GR/KG MOF	130 GR/KG NDT	130 GR/KG MOF	125 GR/KG CF
LIMITE DE USO DEL NITROGENO DEGRADABLE	0.8-1	0.9	0.9	1	VARIABLE
RECICLAJE DE UREA SANGUINEA	NO	F(NA)	F(%PB)	NO	F(NP)
PROT. VERDADERA/PROT. BRUTA MICROBIANA	0.7	0.8	0.8	0.75	0.7
DIGESTIBILIDAD DE LA PROT. MICROBIANA	0.85	0.8	0.8	0.85	0.85
DIGESTIBILIDAD DE LA PROT. NO DEGRADADA	VARIABLE	VARIABLE	VARIABLE	VARIABLE	0.82

F(NA): FUNCIÓN DEL NIVEL DE ALIMENTACIÓN
 F(%PB): FUNCIÓN DEL PORCENTAJE DE PROTEÍNA BRUTA
 F(NP): FUNCIÓN DEL NIVEL DE PRODUCCIÓN
 EMF: ENERGÍA METABOLIZABLE FERMENTESCIBLE
 MOF: MATERIA ORGÁNICA FERMENTESCIBLE
 NDT: NUTRIENTES DIGESTIBLES TOTALES
 CF: CARBOHIDRATOS FERMENTABLES.

Recientes comparaciones estadísticas entre aportes realmente medidos y predicciones de diversos sistemas demuestran que la precisión actual de las estimaciones aún es baja, lo que se achaca a la inadecuación de las ecuaciones de predicción del crecimiento microbiano, a la incorrecta estimación de la degradabilidad de la

proteína y a la incapacidad de los sistemas para valorar las interacciones entre alimentos. A pesar de los errores, las predicciones existentes son una herramienta útil para avanzar en los criterios de formulación de las raciones.

En teoría, la máxima utilización de la proteína y los carbohidratos disponibles en rumen ocurrirá cuando ambos sean fermentados simultáneamente. Sin embargo, varios estudios realizados con fuentes variadas de carbohidratos y proteína en la ración demuestran que no existe un beneficio apreciable en la producción lechera al aportar alimentos con fracciones de ambos nutrientes de cinética de degradación similar. Posiblemente para maximizar el crecimiento microbiano, más importante que la sincronización es un aporte sostenido de energía y también de nitrógeno a los microorganismos ruminales.

DIGESTIÓN INTESTINAL DE LA PROTEÍNA

El proceso digestivo que tiene lugar en el intestino delgado de los rumiantes es similar al de los monogástricos, salvando las diferencias mencionadas en la primera parte de esta exposición. En breve, las proteasas endógenas atacan a las proteínas que llegan a este nivel (proteína microbiana, proteína alimentaria no degradada y proteínas endógenas) ocurriendo la mayor actividad en los dos tercios finales del intestino delgado, debido al bajo tamponamiento duodenal de la digesta. Los aminoácidos resultantes son absorbidos mayoritariamente en íleo, existiendo absorción diferencial a favor de los aminoácidos esenciales.

La proteína microbiana que llega a intestino delgado está compuesta mayoritariamente por bacterias, y algunos protozoos. El aporte de los hongos se considera insignificante. El contenido en proteína bruta de las bacterias se estima en 62.5 % y engloba a las proteínas verdaderas, a los ácidos nucleicos y a los peptidoglicanos de la pared celular. La proporción de cada una de las fracciones es diferente para cada especie pero de media se estima que es 10% de ARN, 5% de ADN, 10% de pared celular, y 75% de proteína verdadera, la cual tiene una digestibilidad del 85%. Los protozoos contienen menos proteína que las bacterias y su contribución a la proteína microbiana total es menos de la tercera parte de aquellas.

Frente a la proteína de origen microbiano cuya digestibilidad se considera constante, la proteína alimentaria que llega intacta al intestino delgado tiene una digestibilidad variable, entre el 50% y el 95%, que puede ser incluso inferior al 30% en determinados tipos de alimentos. La proteína alimentaria no degradada está compuesta de dos fracciones diferentes: parte de la fracción B que ha escapado a la degradación ruminal y la fracción C completa. La proporción entre ambas fracciones en la proteína alimentaria intestinal determina la variabilidad en su digestibilidad, ya que la digestibilidad de la fracción B es mayor del 80% y puede considerarse prácticamente constante pero la fracción C tiene una digestibilidad nula. De aquí se calcula que $PROTEÍNA\ NO\ DEGRADABLE\ DIGESTIBLE = 0.9 * (PROTEÍNA\ NO\ DEGRADADA - 6.25 * NIDA)$.

No obstante, existen controversias en la valoración de la digestibilidad de la proteína alimentaria igualando la fracción C a NIDA. Esto es debido a que, aunque el NIDA de los forrajes representa convenientemente la fracción completamente indegradable e indigestible de la proteína de los mismos, no ocurre lo mismo con el NIDA de los alimentos concentrados y particularmente aquellos sometidos a procesos térmicos. El problema surge de que el análisis químico engloba como NIDA a diversas fracciones de nitrógeno cuyo comportamiento digestivo es probablemente distinto: nitrógeno verdaderamente ligado a fibra ácidodetergente, proteínas precipitadas por unión a taninos, y aminoácidos unidos a azúcares por reacción de Maillard en alimentos sometidos a altas temperaturas.

Se estima que el 60% del NIDA encontrado en los concentrados es realmente digestible, aunque no se ha podido aclarar con exactitud si dicha digestión ocurre en rumen o en intestino delgado. En caso de que su digestión fuese en rumen, si la valoración de la fracción B, en vez de hacerse por incubación ruminal, se estima como la diferencia entre la proteína bruta total y la suma de las fracciones A y C (más fáciles de determinar por métodos químicos), ocurrirá una grave subestimación de la proporción de proteína lentamente degradable. Si la digestión ocurriese en intestino delgado, se menospreciaría la digestibilidad de la proteína no degradada. En ambos casos se depreciaría el valor proteico del alimento en cuestión.

Son necesarias más pruebas experimentales bien para valorar directamente la digestibilidad intestinal de la proteína alimentaria, o bien para determinar por incubación ruminal las diferentes fracciones proteicas evitando las estimaciones por diferencia.

La proteína endógena que llega a intestino delgado se estima que contiene un 50% de proteína verdadera y que su digestibilidad es del 80%. El cálculo de su aporte se hace en función del consumo de materia seca. Como ya se dijo, esta fracción es simultáneamente un aporte y un gasto para el animal.

En definitiva, la proteína metabolizable está compuesta de la proporción digestible de tres fracciones: proteína microbiana, proteína alimentaria no degradada y proteína endógena. Las estimaciones necesarias para valorarlas hacen que la precisión de las predicciones sea relativamente baja. No obstante, hay que insistir en que poder identificar los factores que determinan en que sentido cambian los aportes proteicos a los rumiantes al modificar las raciones ha supuesto un gran avance y ha permitido la mejor utilización de los alimentos para cubrir sus necesidades de proteína.

APORTES DE AMINOÁCIDOS

La concentración de aminoácidos de los diferentes alimentos varía ampliamente entre sí. Una elevada concentración de un aminoácido concreto en un alimento no garantiza que una mayor proporción de ese aminoácido pase a intestino. El porcentaje de proteína y el contenido en aminoácidos de la fracción no degradada determinan la cantidad de un aminoácido de un alimento que llega a intestino delgado. Además la composición en aminoácidos de las fracciones soluble e insoluble de la proteína bruta son diferentes, y como ambas se degradan en diferente medida, el residuo no degradado debe tener un perfil distinto que la proteína bruta original aunque las diferencias no se han cuantificado.

No obstante, se ha sugerido que la cantidad de proteína que escapa a la degradación contribuye más a la variación en el flujo de aminoácidos a intestino que las diferencias en la composición de aminoácidos de la fracción degradada y no degradada. Por tanto, normalmente se estima que la llegada de un aminoácido a intestino es proporcional a su contenido en la proteína bruta multiplicado por el porcentaje de proteína no degradada (CUADRO III).

CUADRO III.- Estimación del aporte de lisina y metionina metabolizables en la fracción no degradada de algunos alimentos.

ALIMENTO	PB %MS	LISINA %PB	METIONINA %PB	PNDD (*) %PB	LISINAMETAB. GR/KG MS	METIONINAMETAB. GR/KG MS
HENO DE ALFALFA	18.	4.6	1.1	21.8	1.83	0.44
SILO DE MAIZ	9.8	1.8	0.8	14	0.24	0.11
MAIZ	10.2	2.2	1.7	62.7	1.4	1.08
CEBADA	12.9	4.1	1.4	14.7	0.77	0.26
HARINA DE GIRASOL	33.6	3.8	3.3	19.9	2.54	2.2
HARINA DE SOJA	49.7	5.9	1.3	38.8	11.3	2.5
GLUTEN FEED	20.7	2.5	2.1	14	0.72	0.6
DDGS	29.3	2.5	1.4	23.8	1.74	0.97

PB: PROTEÍNA BRUTA

MS: MATERIA SECA

PNDD: PROTEÍNA NO DEGRADABLE DIGESTIBLE EN INTESTINO

(*) ESTIMADO PARA UN NIVEL DE ALIMENTACIÓN MAYOR DE 3 (VELOCIDAD DE TRÁNSITO MAYOR DE 8%/HORA) CON VALORES DE AFRC 1993.

En los últimos años ha existido un interés creciente en reducir las pérdidas nitrogenadas debidas a la fermentación ruminal de las proteínas mediante técnicas químicas, para hacerlas indegradables manteniendo su digestibilidad en intestino, o utilizando alimentos ricos en proteína poco degradable. Sin embargo, los resultados han sido poco satisfactorios debido principalmente a dos motivos: en primer lugar, se ha incrementado el aporte de proteína no degradable a expensas de reducir el contenido en proteína degradable de la ración, con dos efectos negativos, se ha limitado el crecimiento microbiano por falta de nitrógeno, y se ha reducido la digestibilidad, principalmente de los forrajes, por tanto, el aporte de proteína y de energía al animal han sido negativamente afectados; en segundo lugar, aún respetando el aporte de proteína degradable, no se ha tenido en cuenta el equilibrio de aminoácidos de la proteína no degradable, lo que ha ocasionado desequilibrios en el perfil de aminoácidos de la proteína metabolizable con la consiguiente reducción en la eficacia de su utilización.

No hay que olvidar que la proteína microbiana es el mejor aporte de aminoácidos equilibrados para el rumiante y que la proteína no degradable debe cuidar atentamente el perfil de aminoácidos aportados. Por todo ello, hay que señalar que el primer objetivo en la nutrición proteica de los rumiantes es maximizar el aporte de proteína microbiana, completando el resto de aportes según necesidades con fuentes de proteína no degradable que permitan un adecuado perfil de aminoácidos en intestino. Esto último es particularmente importante al comienzo de la lactación debido a que la síntesis microbiana está limitada por el bajo consumo de materia seca. Una posibilidad de corregir deficiencias en el perfil de aminoácidos alimentarios es utilizar aminoácidos sintéticos aunque es necesaria su protección frente a la degradación ruminal. Las formas comunes de protección incluyen: cubierta de ácidos grasos o polímeros sensibles al pH o formación de quelatos con minerales. El grado de protección conseguido depende en gran medida de la tecnología empleada. También se utilizan compuestos hidroxianálogos como el ácido 2-hidroxi-4-metilbutanoico (MHBA) y sustitutos metabólicos (betaína) en el caso de la metionina. Estos compuestos pasan a intestino disueltos en la fase líquida y se estima que son un 40%

disponibles en intestino. En el caso del MHBA, la conversión a metionina ocurre en el sitio de absorción y se utiliza in situ. La betaína ahorra la metionina que el organismo utiliza en el ciclo de la transmetilación como donante de grupos metilo. En ambos casos queda más metionina libre para la síntesis de proteína.

La utilización aminoácidos protegidos y sustitutos de aminoácidos puede dar buenos resultados en raciones bien formuladas, tanto en porcentaje de proteína como en producción de leche.

También se ha propuesto el incremento del aporte de almidones no degradables para aumentar la disponibilidad intestinal de glucosa. Teóricamente, la mayor cantidad de glucosa disponible ahorraría aminoácidos del metabolismo oxidativo visceral y los dejaría disponibles para su utilización en la síntesis de proteína tisular y láctea. Sin embargo, parece que las respuestas observadas en proteína láctea ante el aumento del aporte de almidón digestible en intestino se deben más bien a un incremento de la insulinemia que al desvío de aminoácidos desde las vísceras mesentéricas ya que éstas utilizan preferentemente aminoácidos no esenciales, los cuales no se consideran limitantes de la producción.

CONCLUSIÓN

En la primera parte vimos que el aporte inadecuado de nitrógeno en las raciones de vacas lecheras conlleva un incremento en las pérdidas inevitables de nitrógeno en forma de urea en las excretas. En esta segunda exposición, hemos visto que los motivos principales por los que aumenta la eliminación de nitrógeno son el exceso de proteína degradable o el desequilibrio entre la energía y la proteína suministradas, aparte de un perfil inadecuado de aminoácidos en la proteína metabolizable. Para evitar estas situaciones es necesario diseñar raciones capaces de tener en cuenta simultáneamente el crecimiento de la microflora ruminal y las necesidades del rumiante hospedador.

La proteína de los alimentos (proteína verdadera y compuestos nitrogenados no proteicos) es degradada primeramente por los microorganismos residentes en el rumen, principalmente bacterias, pero también protozoos y hongos. Los microbios utilizan el amoníaco y los péptidos, obtenidos de la degradación de la proteína, junto con el ATP generado en la fermentación de los carbohidratos para el crecimiento, el cual ocurre cuando sus necesidades de mantenimiento están cubiertas. El resultado es la resíntesis de proteína microbiana que tiene un elevado valor nutricional. Dicha proteína junto con la proteína alimentaria no degradada y con la proteína de origen endógeno, llega a intestino delgado donde es digerida liberando aminoácidos que son absorbidos para su utilización metabólica. El contenido en aminoácidos esenciales de la proteína metabolizable depende en gran medida de la proporción relativa de la proteína no degradada y de su perfil aminoacídico.

El avance en el conocimiento del proceso digestivo de los rumiantes y la posibilidad de expresar las necesidades nitrogenadas en función de la energía disponible para los microorganismos ruminales y del contenido en aminoácidos de la proteína tisular y láctea, nos permite disponer de algunas herramientas realmente útiles para contribuir a reducir el impacto ambiental de la producción intensiva de vacuno lechero.

Volver a: [Producción lechera](#)