



# LA FERMENTACION DE LOS HIDRATOS DE CARBONO EN EL RUMEN, CUESTION DE ¿QUÍMICA? ¿FÍSICA? ¿MICROBIOLOGÍA?

Sergio Calsamiglia

Departamento de Patología y Producción Animal. Universidad Autónoma de Barcelona. 08193 – Bellaterra  
sergio.calsamiglia@uab.es

## 1. INTRODUCCION

La fibra es una entidad heterogénea formada por varios componentes químicos de composición conocida, pero cuya estructura tridimensional es variable y menos conocida. Desde el punto de vista químico, la fibra se compone de un entramado de celulosa, hemicelulosa y lignina, aunque incluye también moléculas más minoritarias como pectinas, beta-glucanos y ácidos fenólicos. A efectos prácticos, se ha definido en términos de Fibra Bruta (FB), Fibras Neutro Detergente (FND) y Fibra Acido Detergente (FAD), y se utiliza para la predicción de la calidad de los forrajes, la ingestibilidad de la materia seca, la digestibilidad, el valor energético de los alimentos y la capacidad de estimular la rumia y la secreción salivar. Desde el punto de vista de la nutrición de los rumiantes, la fibra puede definirse como el conjunto de componentes de los vegetales que tienen baja digestibilidad y promueven la rumia y el equilibrio ruminal.

La fibra (y particularmente los forrajes) constituye el componente fundamental de las raciones en la mayor parte de los sistemas productivos de rumiantes. Sin embargo, los niveles de incorporación en las raciones varían en márgenes muy superiores (25-50% FND) a los niveles recomendados de proteína (15-18%), grasa (4-6%) y cenizas (8-10%). La variabilidad asociada a la fibra refleja directamente la misma variabilidad en la concentración de hidratos de carbono no fibrosos (CNF), que se constituyen de almidones, azúcares y pectinas (que aunque técnicamente son parte de la fibra vegetal, su comportamiento fermentativo y analítico lo asocian más a los CNF). Por esta razón, es difícil separar los efectos de la FND de los de los CNF, ya que el aumento de uno siempre coincide con la disminución del otro.

En animales de producción baja o moderada, las recomendaciones tratan de establecer límites máximos de fibra. El exceso de fibra reduce la capacidad de ingestión de alimentos, la digestibilidad de la ración, la síntesis de proteína microbiana ruminal (por falta de CNF), y el aporte de energía. Por el contrario,

en animales de alta producción en los que la ración debe tener una elevada densidad energética, las recomendaciones se preocupan de establecer mínimos que garanticen la estabilidad funcional del rumen. La falta de fibra resulta en una depresión de la grasa en la leche, acidosis, laminitis y desplazamiento de abomaso, debido a desequilibrios físicos (falta de llenado ruminal) o fermentativos (reducción del pH ruminal; Allen, 1991). Los modelos nutricionales recomiendan mínimos de FND en la ración para evitar descensos del pH ruminal. Esta reducción del pH depende tanto de la reducción de la fibra (que reduce la secreción salivar y la producción de capacidad tamponante) como del exceso de producción de ácido derivado del aumento en los CNF. Cuando las estrategias de formulación se orientan a la reducción de los niveles de fibra (en particular de fibra forrajera) y a la utilización de subproductos, la composición, estructura, forma y comportamiento de la fibra en el rumen cobra una importancia adicional.

En el presente artículo se presentan algunos conceptos sobre a la utilización de la fibra y los carbohidratos no fibrosos (CNF) como criterio de formulación en el ganado vacuno lechero.

## 2. LA QUIMICA DE LOS HIDRATOS DE CARBONO

### 2.1. Aspectos analíticos

En la mayoría de los sistemas de alimentación, los hidratos de carbono se define con los siguientes parámetros:

**1. Fibra bruta:** Consiste en el residuo insoluble después de una incubación en una solución ácida, seguida por una alcalina. El residuo contiene celulosa, pero está contaminada con cantidades variables de hemicelulosa, lignina y compuestos nitrogenados. La magnitud de la contaminación de la FB depende mucho del tipo de vegetal y su estado de desarrollo fisiológico, lo que conduce a errores que dificultan su interpretación, por lo que debe evitarse el uso de la FB en los sistemas actuales de formulación



y valoración de alimentos.

**2. Fibra neutro detergente (FND):** Es el material insoluble en una solución detergente neutra, y se compone de celulosa, hemicelulosa y lignina. Además, existen otros componentes minoritarios como residuos de almidón, cenizas y nitrógeno. Las recomendaciones de Van Soest et al. (1991) para la determinación de FND sugieren la utilización de amilasas termoestables específicas (libres de actividad hemicelulasa, proteasa o glucanasa), especialmente en concentrados o ensilados de maíz, y la corrección por el contenido en cenizas. El uso de sulfito sódico dependerá del objetivo de análisis, considerando que su función es la eliminación de los residuos nitrogenados de la FND.

**3. Fibra ácido detergente (FAD):** Es el material insoluble en una solución detergente ácida, y está constituida fundamentalmente por celulosa y lignina, aunque suelen existir otros componentes minoritarios como nitrógeno y/o minerales. Como en el caso de la FND, debe corregirse por el contenido en nitrógeno y cenizas. La diferencia entre FND y FAD consiste fundamentalmente en hemicelulosa. Es necesario apuntar que la determinación secuencial de FAD y lignina permite un cálculo más preciso del contenido de celulosa y hemicelulosa, pero el método no secuencial es más adecuado para la determinación de cenizas ácidas insolubles, taninos, y nitrógeno insoluble en FAD.

**4. La lignina puede realizarse de dos formas:** la lignina ácido detergente (LAD) en su variante oxidativa (con permanganato potásico), o la lignina Klason, con una digestión en dos fases con ácido sulfúrico. La lignina determinada por el método Klason es de 2 a 4 veces mayor que la LAD en las gramíneas, y un 30% mayor en las leguminosas. El método Klason es la técnica de elección para la determinación de la lignina.

**5. Los carbohidratos no fibrosos (CNF)** son aquellos que desde el punto de vista del análisis químico no forman parte de la FND, y se componen de almidones, azúcares, pectinas (que se encuentran en cantidades considerables en pulpas, y leguminosas), otros hidratos de carbono de reserva, y ácidos orgánicos (en el caso de los ensilados). Los CNF se calculan como  $100 - (\text{FND} + \text{grasa} + \text{Cenizas} + \text{PB})$

## 2.2. La Degradación Ruminal de la Fibra

La fibra se fermenta en el rumen lentamente por la acción de las bacterias fibrolíticas. El proceso de degradación de la fibra se inicia con la adhesión de las bacterias a la pared vegetal, proceso que se realiza a una velocidad

inversamente proporcional al grado de lignificación de dicha pared. Una vez adheridas, la degradación de los componentes de la pared celular progresa por la acción de las celulasas y hemicelulasas, y varía en función de la composición, el entramado tridimensional de los componentes, y el grado de lignificación (Tabla 1). Las bacterias fibrolíticas producen glucosa o pentosas como productos intermedios, y utilizan mayoritariamente vías fermentativas que conducen a la producción de acetato y butirato como producto final. Durante el proceso fermentativo de la fibra se pierde un carbono en forma de metano, por lo que el proceso es energéticamente menos eficaz que la fermentación de otros nutrientes. Sin embargo, el acetato y butirato juegan un papel muy importante en el aporte de precursores para la síntesis de grasa en la glándula mamaria, y por lo tanto la producción de acetato y butirato (y en consecuencia el aporte de fibra y la supervivencia de las bacterias fibrolíticas) es imprescindible. La degradabilidad efectiva en el rumen de la fibra potencialmente degradable depende de la velocidad de tránsito ruminal y su velocidad de degradación, que a su vez, depende del tipo de vegetal y de su estado de madurez. Las gramíneas se digieren más lentamente que las leguminosas (a igualdad de estadios vegetativos), aunque la degradación total puede llegar a ser mayor que las leguminosas. El motivo de esta aparente discrepancia es que las gramíneas son más ricas que las leguminosas en hemicelulosa, y las leguminosas son más ricas en lignina que las gramíneas. La lignina es totalmente indigestible, y por ello las leguminas son menos digestibles. Pero, la hemicelulosa de las gramíneas presenta numerosas uniones con la lignina que hacen que su ritmo de fermentación sea muy lento, aunque su digestión potencial total sea mayor que en las leguminosas. Por lo tanto, en vacas de alta producción, a pesar que la digestibilidad potencial de las gramíneas sea mayor, el elevado ritmo de paso a través del rumen resulta en mayores digestibilidades efectivas en las leguminosas que en las gramíneas.

## 2.3 La Degradación de los Carbohidratos No Fibrosos

Existen tres tipos de CNF bien diferenciados en relación a sus características de fermentación en el rumen:

**A. Los almidones y azúcares solubles:** son fermentados extensamente a propionato sin pérdidas de carbono, lo que hace que el proceso sea más eficaz que la fermentación acética.



La degradación de los azúcares solubles es casi inmediata, mientras que la degradación del almidón depende del tipo de almidón y del procesado. La velocidad de fermentación de los almidones varía entre especies vegetales (siendo de mayor a menor, trigo > cebada > maíz > sorgo), y en función del procesado. (Tabla 1) En condiciones similares de cinética ruminal (misma velocidad de tránsito), a mayor la velocidad de degradación, mayor la degradabilidad efectiva de los nutrientes. Sin embargo, a mayor la fermentabilidad de la ración, mayor es el riesgo acidosis. La mayor degradabilidad ruminal junto a la reducción de las pérdidas energéticas en forma de metano, explican el mayor aporte de energía neta de los CNF en comparación con la fibra. Además, aportan energía para el crecimiento microbiano, que es la fuente principal de aminoácidos para el rumiante.

**B. Las pectinas:** son fermentadas rápidamente (elevado contenido energético), pero a diferencia de los azúcares solubles y los almidones, producen mayoritariamente acetato como producto de fermentación, lo que reduce el riesgo de acidosis y estimula la producción de grasa en la leche. Estos factores justifican los efectos positivos en la estabilidad del pH ruminal de los alimentos ricos en pectinas (leguminosas, pulpas,...). Por el contrario, la pérdida de carbono en forma de metano hace que este tipo de fermentación aporte menor energía para el animal respecto al almidón.

**C. Los ácidos orgánicos** son productos de la fermentación de los hidratos de carbono, y sólo son cuantitativamente importantes en los forrajes ensilados. Aunque forman parte de los CNF, aportan muy poca energía a los microorganismos ruminales, por lo que su presencia limita la síntesis de proteína microbiana.

**Tabla 1:** Velocidad de degradación estimada (%/h) de los almidones y FND (Adaptado de Sniffen y col. 1992)

Ingrediente	Almidón	FND
Maíz		
Entero	5 - 10	3 - 5
Partido	10 - 20	5 - 7
Harina	20 - 30	7 - 9
Copos	20 - 30	6 - 8
Sorgo, aplastado	5 - 15	4 - 5
Avena	30 - 40	4 - 6
Cebada	20 - 30	4 - 6
Trigo	35 - 45	8 - 10
Ensilado de maíz (<30% MS)		
Tamaño partícula grande	25 - 35	4 - 8
Tamaño partícula pequeño	35 - 40	8 - 10
Leguminosas		
Heno	25 - 35	3 - 6
Ensilado	30 - 40	4 - 7
Gramíneas		
Heno	25 - 35	2 - 4
Ensilado	35 - 40	3 - 5

### 3. LA FÍSICA DE LOS HIDRATOS DE CARBONO

#### 3.1 La Función Física de la Fibra

Cuando hablamos de la función física de los hidratos de carbono nos referimos principalmente a la función física de la fibra. El perfil fermentativo de la fibra lo convierte en un nutriente poco adecuado para el rumiante desde el punto de vista energético, porque su ingestibilidad es limitada (Allen, 2000), su degradabilidad es baja, y su perfil de fermentación poco eficiente energéticamente (pérdida de metano). Sin embargo, juega un papel físico fundamental para la estabilidad fisiológica de la función ruminal: estimula la rumia y la masticación, que a su vez estimula la secreción salivar que aporta la mayor cantidad de capacidad tamponante en el rumen. Esta capacidad de promover la capacidad tamponante del rumen es más importante a medida que su concentración disminuye, por dos factores: 1) hay menos fibra para estimular la rumia, y 2) hay más CNF para producir ácido. La fibra, como nutriente, contribuye al mantenimiento del funcionamiento ruminal (llenado ruminal y estímulo de las contracciones ruminales) y de las condiciones ruminales (pH, a través de la secreción salivar). Estas dos funciones dependen de la composición, la degradabilidad y la forma de presentación de la fibra. La formulación correcta de raciones debe buscar el equilibrio entre la ingestión máxima de materia seca (niveles bajos de FND y altos de CNF) y el



mantenimiento de las funciones y condiciones normales del rumen (aportando unos niveles significativos de FND y FAD).

### 3.2. El Equilibrio Ruminal: el Balance entre la Producción y el Control del Ácido

La pieza central del control del equilibrio ruminal es el pH, ya que de éste depende, directa o indirectamente, la supervivencia de las bacterias fibrolíticas, el equilibrio de la microflora ruminal y, en consecuencia, la concentración relativa de los principales ácidos grasos volátiles. El pH ruminal es la consecuencia del equilibrio entre la producción de ácido y la capacidad tampón del medio ruminal.

**A.** La producción de ácido depende de la fermentabilidad de la ración, que a su vez depende de la cantidad y de la velocidad de degradación de los CNF. El riesgo de acidosis es tanto mayor cuanto mayor sea la cantidad y la velocidad de degradación de los CNF. Asimismo, el riesgo de acidosis es mayor cuando el pienso se administra en una o dos tomas diarias, y disminuye en la administración de concentrado con collares magnéticos o en raciones TMR.

**B.** La capacidad tampón del medio ruminal depende de la cantidad de saliva segregada por el rumiante y de la capacidad tampón de los alimentos ingeridos. La cantidad de saliva segregada por minuto de masticación o rumia, permanece relativamente constante independientemente del tipo de alimento (Welch y Smith, 1970). Sin embargo, el tiempo empleado para la masticación y rumia depende del contenido en pared celular, de tal manera que a mayor el contenido en fibra, mayor el tiempo de masticación, y en consecuencia mayor la secreción de saliva (Welch y Smith, 1970). Además, la forma de presentación del forraje juega un papel fundamental en la cantidad de saliva segregada, siendo mayor en el heno, intermedio en el ensilado y el pasto, y bajo en forraje en forma de pellet (Bailey y Balch, 1959). Por último, el tamaño de partícula también afecta al tiempo de masticación y rumia, con el consecuente efecto sobre la secreción salivar. Estos factores juegan un papel fundamental en el mantenimiento de las condiciones ruminales, y repercuten en la incidencia del síndrome de acidosis ruminal, en el nivel graso de la leche y en la incidencia de desplazamientos de abomaso.

### 3.3. El Concepto e Importancia de la Fibra Efectiva

Las características nutricionales de la fibra no sólo dependen de su composición, sino de las interacciones entre sus componentes y de la forma cómo se presenta al animal. Por estas razones, no es suficiente con considerar únicamente el análisis químico como método de valoración de la calidad de un forraje, y es necesario observar el tamaño de partícula y el manejo de la ración. Estas consideraciones dificultan la formulación de raciones y la predicción de las respuesta de los animales a una ración determinada.

El uso de subproductos, el tipo de forraje y el procesado fino de algunos forrajes (para permitir un mejor ensilado, o los henos en forma de pellet) ha resultado en la aparición de síndromes típicamente asociados a la falta de fibra en la ración (acidosis, disfunción ruminal, desplazamientos de abomaso,...). Muchos subproductos comúnmente utilizados en el rumiante son ricos en fibra y pueden utilizarse para reemplazar parcialmente los forrajes de la ración. Aunque estos subproductos contienen fibra, existe acuerdo general en considerar que ésta fibra no tiene el mismo efecto a nivel ruminal (Firkins, 1992). Esta problemática ha dado lugar a la aparición del concepto de "fibra efectiva" o "fibra funcional" o "FND-efectiva = FNDe". La fibra efectiva puede definirse como la capacidad real de la fibra para estimular la rumia y la salivación, que resulta en el mantenimiento de las condiciones ruminal óptimas para la producción de leche, y depende del tipo, la forma y el tamaño de la fibra que estimula la rumia. En base a estos principios se han desarrollado índices de valor forraje (Sudweeks et al., 1981; Santini et al., 1983) que estiman el tiempo de masticación y/o rumia por kg de MS, y que han servido de base para estimar el valor de fibra efectiva (FND-e). Con el fin de mantener el llenado ruminal y las condiciones fermentativas adecuadas, se recomienda que la dieta contenga un mínimo del 21% de la MS en forma de FND-e. La implementación de estos conceptos a la práctica tiene tres problemas:

**A.** La disponibilidad de valores de FND-e de los alimentos es limitada. En la actualidad existen valoraciones establecidas por la Universidad de Michigan y por la Universidad de Cornell (Sniffen et al., 1992; Tablas 2 y 3).

**B.** La determinación del valor FND-e en función del tamaño de partícula a la práctica es difícil de estandarizar. La American Society of Agricultural Engineering (ANSI, 1988) ha establecido una normativa estándar para la determinación de la distribución del tamaño



de partículas en los forrajes. Sin embargo, esta metodología oficial es poco práctica, y sólo útil para forrajes.

**C.** En la actualidad, el uso del Separados de Partículas de Pennsylvania es la metodología más aceptada universalmente en bovino lechero (Lammers et al., 1996). Este sistema se basa en la separación de las partículas de forrajes o raciones TMR en tres tamaños (grande, mediano y pequeño) utilizando el llamado "Separador de Partículas de la Universidad Estatal de Pennsylvania". El sistema consiste en la separación de partículas y la representación de los resultados en un gráfico Weibull, a partir del cual se pueden extrapolar valores porcentuales de los tamaños de partícula. Los resultados preliminares de la utilización de dicho instrumento indican que es más importante la distribución (variación) en tamaño de partículas que la media en sí, y coincide con las observaciones de Bach et al. (2003). También parece evidente que las recomendaciones utilizadas hasta el presente eran conservadoras, y que tamaños de partícula más pequeños pueden mantener el funcionamiento ruminal adecuado. Utilizando este sistema, las recomendaciones sobre la distribución de las partículas de varios tamaños en una dieta TMR se presenta en la Tabla 4 (Heindrichs y Lammers, 1997).

**Tabla 2:** Valores de fibra efectiva (FND-e) según las recomendaciones de la Universidad de Michigan y las de la Universidad de Cornell (Sniffen et al., 1992).

Ingrediente	Michigan	Cornell
Leguminosas	100	92
Alfalfa deshidratada	100	6
Gramíneas	100	92
Ensilado de Maíz	100	81
Bagazo de Cerveza	25	18
Segundillas	25	2
Pulpa remolacha	25	33
Pulpa cítricos	25	33
Algodón	50	100
Cebada, molida	25	34
Trigo, molido	25	34
Avena, molida	25	34
Maíz, entero	25	100
Maíz troceado		56
Maíz, molido	25	60
Harina de Soja	25	23
Gluten Feed	25	36
Harina de pescado	25	9
Hominy feed	25	9
Granos de destilería	25	4
Harina de sangre	25	9
Gluten meal	25	36
Harina de carne y hueso	25	8

Poppi et al. (1985) sugirieron que las partículas de tamaño inferior a 1.18 mm abandonaban el rumen a un ritmo más elevado que aquéllas de tamaño superior. En una revisión bibliográfica, Mertens (1997) concluyó que para mantener el pH ruminal por encima de 6.0 y la grasa en leche por encima de 3.4% durante el principio de la lactación, era necesario aportar un 22% de la MS de la ración en forma de fibra físicamente efectiva (feFND). La feFND, en teoría, mide la capacidad de un ingrediente para estimular la secreción salivar y aumentar el pH ruminal. Se cree que la saliva representa el 30-40% del poder tamponante del rumen (Allen, 1997), y que la secreción salivar aumenta durante la rumia y la ingestión (Maekawa et al., 2002). La feFND de un ingrediente puede calcularse multiplicando la proporción de MS retenida en un cedazo de 1.18 mm por el contenido de FND del ingrediente. Sin embargo, la proporción de FND de un ingrediente no está uniformemente distribuida entre todos su tamaños de partículas, y por ello algunos nutrólogos determinan la feFND multiplicando por el valor real de FND de las partículas de más de 1.18 mm de un ingrediente. A pesar que el sistema de feFND es lógico, su aplicación y funcionalidad no han sido validadas, y la divergencia entre algunos artículos científicos demuestra que, además del tamaño de partícula, otros factores son probablemente relevantes y es necesario considerarlos. Por esta razón, el NRC (2001) no incluyó el sistema de feFND en su modelo, probablemente debido a la gran dificultad que presenta la estimación de los valores de feFND de los ingredientes, y terminó recomendando un mínimo de FND procedente de los forrajes (fFND). Por el contrario, el sistema CNCPS de Cornell sí utiliza el contenido de feFND como criterio de formulación.

**Tabla 3:** Valor de Fibra Efectiva (FND-e) de forrajes en función del tipo de forraje y el tamaño de partícula (Sniffen et al., 1992).

Forraje y Tamaño de Partícula	Fibra Efectiva, (%FND)
Leguminosas	
Largo	92
20% > 2,54 cm	82
< 0,635 cm	67
Gramíneas	
Largo	98
20% > 2,54 cm	88
< 0,635 cm	73
Ensilado de Maíz	
Normal	71
Pequeño	61

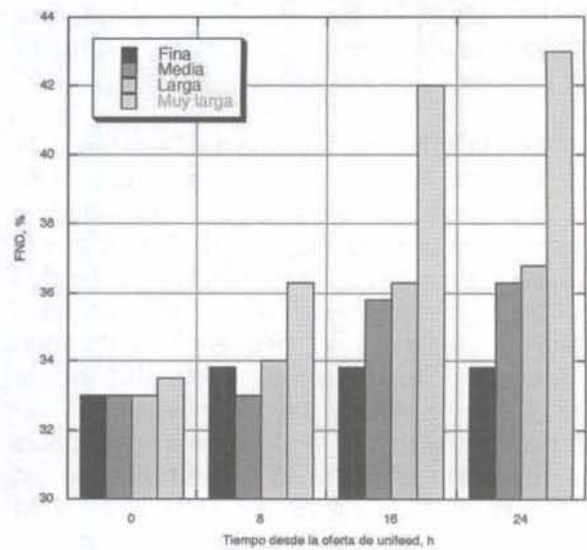


**Tabla 4:** Distribución de tamaños de partícula utilizando el separador de la Universidad Estatal de Pennsylvania.

Tamaño	Ensilado Maíz	Henolados	TMR
> 1.9 cm	2-4 % si no es el único forraje	10-15% en silo hermético	6-10% mínimo
1.9 - 0.8 cm	10-15% si contiene grano aplastado	15-25% en silo de zanja o muy húmedo	30-50%
< 0.8 cm	40-50%	40-50%	40-60%

Una posible causa de la falta de relación sea la capacidad de selección de partículas de la ración TMR por parte de la vaca lechera. Las vacas seleccionan en contra de las partículas de tamaño grande cuando están mezcladas en una ración TMR. Por lo tanto, un exceso de fibra larga puede resultar en bajadas de grasa en leche o en la acidosis subclínica consecuencia de una selección de partículas pequeñas por parte de las vacas.

Einarson et al. (2004) observaron un descenso de la grasa en leche y una mayor selección en contra de las partículas de gran tamaño al comparar una ración con heno de alfalfa molido fino (10 mm) o con heno de alfalfa molido de forma grosera (19 mm) y un alto nivel de concentrado (58% de la MS), pero no observaron diferencias cuando la ración era rica en forraje (59% de la MS). Los autores se sorprendieron por el aumento de grasa en leche al reducir el tamaño de partícula con la ración alta en concentrado, pues contradice el modelo de la feFND propuesto por Mertens (1997). Sin embargo, otros autores (Kononoff et al., 2003) también describieron incrementos en el contenido de grasa en leche con menores tamaños de partícula al comparar una ración base de ensilado de maíz con una media geométrica de las partícula de 8.8 o 7.8 mm. Estos autores describieron una mayor facilidad de las vacas por separar y selección contra las partículas de gran tamaño cuando las raciones son ricas en concentrado. Este aumento de la grasa, estuvo claramente relacionado con una menor selección de las distintas partículas de la ración. Irónicamente, las raciones molidas de forma grosera resultaron en un consumo de partículas pequeñas (< 1.18 mm) mayor que el consumo observado con las raciones con un tamaño medio de partícula más fino debido a la selección de partículas por parte de las vacas. Esta teoría quedó bien ilustrada en el estudio de Kononoff et al. (2003) que demostró como la selección de partículas finas y el rechazo de las partículas fibrosas aumentaban conforme el tamaño de partícula medio de la ración aumentaba (Figura 1).



**Figura 1.** Relación entre el tamaño de partícula medio de la ración y el contenido de FND en la ración del pesebre de las vacas conforme avanza el día. (Adaptado de Kononoff et al., 2003).

### 3.- LA MICROBIOLOGIA DE LA FERMENTACIÓN DE LOS HIDRATOS DE CARBONO

La microbiología ruminal de los hidratos de carbono se ha centrado tradicionalmente en estudiar las bacterias que digieren las diferentes fracciones de los hidratos de carbono (celulolíticas, hemicelulolíticas, amilolíticas,). Sin embargo, en esta sección nos centraremos no en la microbiología de la digestión de los hidratos de carbono, sino en aquella que prevalece en los diferentes contextos fermentativos (alto o bajo en concentrados/fibra, con o sin acidosis).

La acidosis, con frecuencia subclínica, es una patología frecuente en el vacuno lechero y de carne atribuida a un desequilibrio entre la producción de potencial acidogénico (protones) y la disponibilidad de elementos de control. La reducción del pH conlleva un cambio en el perfil de fermentación hacia la producción de más propiónico, primero, y ácido láctico después (Dirksen, 1969). Sin embargo, también está muy documentado en la literatura científica que la fermentación de almidones resulta en el desarrollo de un perfil de población bacteriana que fermenta la glucosa hacia propionico y láctico (France y Siddons, 1993). Si aceptamos estas dos observaciones está claro que cuando se administran dietas ricas en concentrado, se produce una reducción de la relación acético:propiónico, pero no está claro si este efecto se debe a una reducción del pH o a una modificación de la población microbiana. In vivo, estos dos eventos ocurren



de forma concomitante en el tiempo, por lo que los efectos observados están, técnicamente, confundidos. En estos casos, es legítimo y necesario cuestionarse si los efectos que se observan son derivados de los cambios en el pH o del tipo de ración. La pregunta no es irrelevante, porque si el efecto depende del pH, el desarrollo de aditivos y estrategias que controlen el pH (como el uso de tampones o alcalinizantes) resolverían el problema, pero si el efecto depende de la dieta, deberíamos escoger entre administrar concentrado y asumir las consecuencias, o limitar la ingestión de concentrado. De hecho, es sabido que la eficacia de las sustancias tampón es limitada, por lo que es necesario “diseccionar” la causalidad del problema de acidosis con el objetivo de diseñar estrategias que permitan aportar soluciones desde su causa, y no meramente sintomáticas.

La disección de los problemas de acidosis entre la causa de la reducción del pH o el tipo de dieta no es fácil de realizar in vivo, ya que ambos eventos ocurren al mismo tiempo. Mould y Orskov (1984) diseñaron un experimento in vivo en el que los animales se alimentaron con dietas ricas en forraje o concentrado, pero el pH ruminal se manipuló mediante la infusión de ácido o base con el objetivo de conseguir dietas ricas en forraje pero con pH ruminal bajo, y dietas ricas en concentrado pero con pH ruminal elevado. Este diseño permitió llegar a la conclusión de que algunos de los efectos observados en el rumen se debían a las modificaciones del pH, pero otros parecían independientes del pH y dependientes de tipo de sustrato fermentado. A este efecto pH-independiente le llamaron “efecto carbohidrato” y se le atribuyó parte de la responsabilidad derivada de la alimentación con dietas ricas en concentrado sobre la degradación de la fibra y el perfil de fermentación en el rumen. Russell (1998) utilizó un sistema in vitro sencillo para demostrar que las modificaciones de la relación acetato:propionato típicas de la situación de acidosis se debían a un efecto combinado de la reducción del pH y del sustrato de fermentación, siendo más importante éste último (75% de los efectos).

Calsamiglia y col. (2008) utilizaron un sistema de fermentación continua de flujo doble para comparar el efecto de dietas ricas en fibra (60% forraje; 40% concentrado) y dietas ricas en concentrado (10% paja; 90% concentrado) a pH crecientes entre 4.9 y 7.0 (a intervalos de 0.3 unidades de pH). El diseño experimental permitió comparar, para cada pH, las diferencias entre el tipo de dieta fermentada, pero al mismo

tiempo, cuando se comparaba la diferencia entre dietas a un mismo pH, dichas diferencias se podían atribuir al sustrato de fermentación. El análisis de los resultados permitió llegar a las siguientes conclusiones: La digestibilidad de la materia orgánica, la digestibilidad de la fibra y la concentración molar de acetato estaban asociadas fundamentalmente a la modificación del pH. Sin embargo, los cambios en la concentración molar de propionato y la producción total de ácidos grasos volátiles se asociaron al efecto combinado del pH y el tipo de dieta, mientras que los cambios asociados al metabolismo del N se asociaron principalmente al sustrato fermentado (Tabla 5). Estos resultados permitieron generar la propuesta que los efectos observados en la tradicionalmente llamada acidosis debían atribuirse, al menos parcialmente, a la fermentación del concentrado. La evidencia, además, permitió a los autores proponer un cambio de nomenclatura de la acidosis por “síndrome del concentrado” (Calsamiglia y col., 2008, 2012), ya que esta terminología parecería explicar mejor los efectos observados en la fermentación, incluyendo tanto la reducción del pH como el sustrato de fermentación en la definición. Esta modificación del nombre de la acidosis describe mejor las causas y centra las estrategias de modulación no sólo en la moderación del pH ruminal, sino en el perfil de fermentación derivado del sustrato, lo que abre puertas a la implementación de nuevas estrategias de control.

**Tabla 5.** Contribución del pH y tipo de dieta fermentada a los cambios en la digestión de nutrientes, perfil de fermentación y metabolismo nitrogenado en cultivos continuos de líquido ruminal de doble flujo (Adaptado de Calsamiglia y col., 2008)

Item	R <sup>2</sup> Global	pH, %	Diet, %
Digestibilidad verdadera de la MO, %	0.79	86	14
Digestibilidad de la FND, %	0.60	100	0
AGV totales <sup>1</sup> , mM	0.81	56	44
Acetato, mol/100mol	0.84	98	2
Propionato, mol/100mol	0.76	55	45
Acetato:Propionato	0.89	26	74
N Amónico, mg/dL	0.96	23	67
Flujo N dietario, g/d	0.82	27	63
Flujo N bacteriano, g/d	0.77	39	61
Degradación PB, %	0.86	35	65
ESPMP, g N/kg MOVD	0.71	22	78

<sup>1</sup> AGV, ácidos grasos volátiles

<sup>2</sup> Eficiencia de síntesis de proteína microbiana (g N bacteriano/ per kg MO fermentada)

pero ¿Qué es lo que hace el tipo de dieta para modificar la fermentación ruminal? Probablemente el tipo de dieta modifica la población microbiana, y existe mucha evidencia al respecto. Por ejemplo, y para reflejar el efecto que el tipo de fermentación puede tener en la microflora ruminal no relacionada





directamente con la degradación de los hidratos de carbono, en dietas ricas en concentrado se inhibe el proceso de biohidrogenación ruminal que conduce a la formación de trans 10-C18:1, considerado responsable de la reducción de síntesis de grasa en la glándula mamaria, y probablemente el factor más determinante de la depresión grasa asociada a lo que hasta ahora hemos denominado acidosis.

#### 4. SISTEMÁTICA PARA FORMULAR LOS HIDRATOS DE CARBONO

##### 4.1. Criterios de formulación para la fibra

La formulación correcta de raciones debe buscar el equilibrio entre la ingestión máxima de energía (reduciendo el aporte de FND) y el mantenimiento de las funciones y condiciones normales del rumen (aportando unos niveles mínimos de FND). La fibra bruta no debe utilizarse como criterio de formulación, ya que no representa al conjunto de elementos que constituyen la fibra vegetal. El uso de la FAD aún es frecuente, ya que su analítica está muy estandarizada, y es un indicador razonable de la degradabilidad de la fibra. El NRC (2001) ha revisado las recomendaciones de fibra (Tabla 8), y las ha disminuido considerablemente respecto a las recomendaciones del NRC (1989).

**Tabla 8:** Niveles recomendados (% materia seca) para las distintas fracciones de hidratos de carbono (NRC, 2001).

La aplicación de estas recomendaciones

NDF-forraje Mínimo	NDF total Mínimo	CNF Máximo	ADF total Mínimo
19	25	44	17
18	27	42	18
17	29	40	19
16	31	38	20
15	33	36	21

requiere hacer algunas consideraciones. En primer lugar, queda patente que el criterio más importante es el de la FND procedente de forrajes (FND-f). Esta opción es distinta a la adoptada por el Cornell Net Carbohydrate and Protein System (Sniffen y col., 1992) u otras recomendaciones que utilizan la FND-e y reconocen explícitamente el valor de la fibra efectiva no forrajera. Esta diferenciación es particularmente importante en los sistemas de producción en los que se sustituye fibra forrajera por subproductos fibrosos. Las recomendaciones del NRC (2001) suponen un cambio importante en la concepción de la formulación de raciones en base a las características funcionales de la

fibra. Por una parte, las recomendaciones se establecen respecto a la MS total de la ración (hasta ahora se establecían recomendaciones como porcentaje de la FND). En segundo lugar, establece un mínimo de FND-f, aunque permite valores inferiores si por cada unidad de porcentaje por debajo de la recomendación se incrementa en dos unidades de porcentaje en la FND total. Esta aproximación reconoce intrínsecamente un valor FND-e de la fibra no forrajera del 50% para todos los alimentos. La aceptación de un valor medio del 50% en la efectividad de la fibra no forrajera conlleva a una cierta imprecisión que debe afinarse, tanto en relación al algodón, cuyo valor se subestima, como con el resto de los suplementos, cuyo valor, al menos en algunos casos se sobreestima. Además, el NRC (2001) no aporta soluciones a la valoración numérica de la efectividad de la fibra en función del tamaño de partícula del forraje, por lo que, en cualquier caso, existe el riesgo de sobreestimación de la efectividad de la fibra cuando el tamaño de partícula del forraje es pequeño. Desde el punto de vista de la garantía y seguridad de la ración, la sobreestimación del valor de FND-e de los subproductos o forrajes picados es un riesgo que debe controlarse. El Cornell Net Carbohydrate and Protein System (Sniffen y col., 1992) aporta valores estimativos cuyo uso tiene un impacto importante en la valoración de la efectividad de la fibra de las raciones (Tabla 2 y 3). La dificultad de determinar un valor preciso para la FND-e es uno de los factores más limitantes en su aplicación práctica. Para la mayor parte de los casos, la utilización de valores tabulados es suficiente. En la actualidad existen recomendaciones establecidas por la Universidad de Michigan (Spartan 2.0, Universidad de Michigan) y por la Universidad de Cornell (Sniffen y col., 1992; Tablas 2 y 3), mientras que el NRC (2001) aplica un valor único (50%) para todos los subproductos. Cuando se valoran los forrajes picados, es posible determinar el valor de fibra efectiva en función de su tamaño utilizando un separador de partículas (como el Separador de Partículas de Pensilvania (Lammners y col., 1996).

**Tabla 6:** Factores alimentarios que afectan a las concentraciones de fibra en la ración necesarias para mantener el funcionamiento ruminal adecuado

Factor	Necesidades de Fibra en la Ración
Aumento en los niveles de CNF	Aumenta
Aumento en la fermentabilidad de los CNF	Aumenta
Distribución del pienso separado del forraje	Aumenta
Fuente de fibra	Variable
Disminución del tamaño de partícula	Aumenta
Aumento en la frecuencia de distribución de comidas	Disminuye
Suministro de tampones	Disminuye



**Tabla 7:** Niveles recomendados de ingestión de FND procedente de forrajes (FND-f)

FND-f, % peso vivo	Observaciones
0,75*	Mínimo si la ración contiene entre 1,3 y 1,4% del PV como FND total a través del uso de fibras de subproductos.
0,85*	Mínimo si la ración proporciona entre 1,1 y 1,2% del PV como FND total en raciones ricas en almidones
0,90	Niveles moderadamente bajos
0,95	Niveles normales
1,00	Niveles moderadamente altos
1,10-1,20	Máximo

Además de estos matices, las recomendaciones pueden modificarse si se consideran otros aspectos de la ración que pueden influir en el riesgo de desequilibrios de pH en el rumen (Tabla 6). Aunque estas recomendaciones son ambiguas, permiten hacer valoraciones de riesgos que requieren de cierto grado de experiencia, pero aportan flexibilidad y precisión en la selección de ingredientes, y frecuentemente la solución a problemas patológicos asociados a la alimentación.

#### 4.2. Criterios de formulación para los hidratos de carbono no fibrosos

Trabajos recientes in vitro (Hoover y Stokes, 1991) han demostrado que la mayor eficacia de síntesis de proteína microbiana ocurre cuando los CNF de la ración se encuentran entre el 35 y el 40% de la materia seca. Además, trabajos de producción también han demostrado que el mayor nivel productivo se obtiene con niveles de CNF entre el 36 y el 42 %, reduciéndose la producción a niveles inferiores al 30%. En consecuencia, es razonable establecer recomendaciones que limiten los niveles de CNF entre 35 y 40%.

Las recomendaciones de CNF dependen de varios factores, como:

**A.** El tipo de CNF: A medida que los niveles de CNF aumentan, la importancia del tipo de CNF aumenta. En este sentido, cuando los niveles se acercan al máximo (40%) debemos considerar un límite para los azúcares y almidones (35%), y utilizar pectinas (pulpas) para aumentar el nivel de CNF hasta el 40%.

**B.** La velocidad de fermentación de los almidones: Las recomendaciones para los CNF dependen de la velocidad de degradación de los CNF, y se pueden expresar en % del peso vivo del animal (Tabla 9). La velocidad de degradación de los hidratos de carbono (Tabla 1) nos permite valorar el riesgo de acidosis de una ración: A mayor velocidad de degradación, mayor el riesgo de acidosis.

**Tabla 9:** Recomendaciones para los CNF en raciones de alta producción en función de la velocidad de degradación de los almidones (Sniffen, 1988).

Velocidad de Degradación	Nivel de CNF (% Peso Vivo)	Alimentos (ejemplos)
Lenta	1,1 - 1,4	Maíz partido, Bagazo de cerveza
Media	1,0 - 1,1	Maíz molido, Pulpa de remolacha
Rápida	0,8 - 1,0	Trigo, Cebada, Gluten feed

**C.** La pauta de administración de concentrado: El aporte de cantidades elevadas de CNF (concentrados) en poco tiempo aumenta la carga ácida del rumen. Por esta razón se recomienda administrar los concentrados a lo largo del día (collares magnéticos) o mezclados con los forrajes (raciones TMR). En cualquier caso, las recomendaciones de CNF deben reducirse en 5-7% cuando el pienso se administra en 2 o menos tomas diarias.

**D.** El uso de sustancias tampón permite ajustar los niveles de CNF a los límites máximos recomendados, sobretodo el nivel de almidones fermentables. En general, se recomienda la incorporación de estas sustancias cuando los niveles de CNF superen el 33% (% de la MS) de la ración, y en mayor cantidad a medida que la proporción de pectinas en los CNF disminuya en favor de azúcares y almidones. La suplementación de tampones permite formular raciones con niveles de FND y FAD entre 1-2 unidades de porcentaje por debajo de las recomendaciones, sobretodo en dietas con heno seco. Los aditivos comúnmente recomendados son de 150 a 250 g/d de bicarbonato sódico (sustancia tampón) y/o de 50 a 60 g/d de óxido magnésico (sustancia alcalinizante). En ocasiones pueden mezclarse el bicarbonato sódico y el óxido magnésico para obtener un efecto sinérgico. La efectividad de los tampones es mayor en raciones a base de ensilado de maíz, y menor en henos y ensilados de leguminosas (Erdman, 1988), ya que las leguminosas tienen la capacidad intrínseca de neutralizar ácido. Los beneficios de la utilización de bicarbonato pueden manifestarse con un incremento en la producción de leche y en el contenido en grasa.

#### 6. CONCLUSIONES

Los hidratos de carbono son el componente más importante de la dieta. El equilibrio entre el contenido dietario de hidratos de carbono fibrosos y no fibrosos es esencial para el mantenimiento del equilibrio ruminal, principalmente en lo que respecta al pH. Los animales de alta producción requieren el aporte elevado de energía, y ese nivel de energía con



frecuencia está limitado por el riesgo asociado a la acidosis. Las consideraciones relativas a la velocidad de fermentación de los almidones y a la capacidad de la fibra para estimular la producción de saliva son esenciales en la formulación de raciones. Sin embargo, no debemos olvidar que este equilibrio entre fracciones de hidratos de carbono se refiere a lo que ingiere en animal, que no siempre coincide con lo que se ha formulado, por lo que la observación del manejo es esencial para garantizar el buen rendimiento de los animales

### BIBLIOGRAFÍA

- Allen, M. S. 1997. *J. Dairy Sci.* 80: 1447-1462.
- Allen, M. S., y R. J. Grant. 2000. *J. Dairy Sci.* 83: 322-331.
- Allen, M.S. 1991. *Vet. Clin. North Am.* 7:327.
- Allen, M. S. 2000. *J. Dairy Sci.* 83: 1598-1624.
- ANSI. 1988. ANSI/ASAE S424.
- Bach, A., A. Anglada, X. Puigvert, y Ll. Bosch. 2003. *J. Dairy Sci.* 86 (Supl. 1).
- Bailey, C.B.; Balch, C.C. 1959. *Br. J. Nutr.* 15:383.
- Beauchemin, K. A. y W. Z. Yang. 2005. *J. Dairy Sci.* 88: 2117-2129.
- Beauchemin, K. A., W. Z. Yang, y L. M. Rode. 2003. *J. Dairy Sci.* 86:630-643.
- Boddugari, K., R. J. Grant, R. Stock, y M. Lewis. 2001. *J. Dairy Sci.* 84:873-884.
- Calberry, J. M., J. C. Plaizier, M. S. Einarson, y B. W. McBride. 2003. *J. Dairy Sci.* 86:3611-3619.
- Calsamiglia, S., Cardozo, P.W., Ferret, A., Bach, A. 2008. *J. Anim. Sci.* 86:702-711.
- Calsamiglia, S., Blanch, M., Ferret, A., Moya, D. 2012. *Anim. Feed Sci. Technol.* 172: 42-50.
- Einarson, M. S., J. C. Plaizier, y K. M. Wittenberg. 2004. *J. Dairy Sci.* 87:2987-2996.
- France, J., Siddons, R.C. 1993. in: Forbes J.M., France, J. (eds.), CAB International, Wallingford, Oxford, England, pp. 107-121.
- Garret, E.F., Nordlund, K.V., Goodger, W.J., Oetzel, G.R. 1997. *J. Dairy Sci.* 80 (Suppl.1):169 (Abstract).
- Heinrichs, A.J. y Lammers B.P. 1997. *NRAS Publ.* 99, pg. 268.
- Kleen, J.L. 2004. PhD Thesis: Tierärztliche Hochschule Hannover, Germany.
- Kononoff, P. J. y A. J. Heinrichs. 2003a. *J. Dairy Sci.* 86:2438-2451.
- Kononoff, P. J., y A. J. Heinrichs. 2003b. *J. Dairy Sci.* 86:1445-1457.
- Krause, K. M., D. K. Combs, and K. A. Beauchemin. 2002. *J. Dairy Sci.* 85:1947-1957.
- Lames, B.P.; Buckmaster, D.R.; Heinrichs, A.J. 1996. *J. Dairy Sci.* 79:922.
- Linn, J. y Martin, N. 1991. *Minn. Dairy Conf.*, pg 9.
- Maekawa, M., K. A. Beauchemin, y D. A. Christensen. 2002. *J. Dairy Sci.* 85:1165-1175.
- Mertens, D. R. 1997. *J. Dairy Sci.* 80:1463-1482.
- Mertens, D.R. 1987. *J. Anim. Sci.* 64:1548.
- Mould, F.L., Orskov, E.R. 1984. *Anim. Feed Sci. Technol.* 10:15-30
- National Research Council. NRC. 2001. *Nutrient Requirements of Dairy Cattle.* 7th rev. ed. National Academy Press, Washington, DC.
- NRC. 1989. *Nutrient Requirements of Dairy Cattle.* 6th ed. NAC. Washington, DC.
- Oetzel, G. R., Nordlund, K. V., Garrett, E. F. 1999. *J. Dairy Sci.* 82 (Suppl. 1):38 (Abstract).
- Plaizier, J. C. 2004. *J. Dairy Sci.* 87:2495-2505.
- Poppi, D. P., R. E. Hendrickson, y D. J. Minson. 1985. *J. Agric. Sci.* 105:9-14.
- Russell, J.B. 1998. *J. Dairy Sci.* 81:3222-3230
- Santini, F.J.; Hardie, A.R.; Jorgensen, N.A.; Finner, M.F. 1983. *J. Dairy Sci.* 66:811.
- Schwartzkopf-Genswein, K.S., Beauchemin, K.A., Gibb, D.J., Crews, D.H., Hickman, D.D.Jr., Streeter, M., McAllister, T.A. 2003. *J. Anim. Sci.* 81:149-158.
- Sniffen, C.J.; O'Connors, J.D.; Van Soest, P.J.; Fox, D.G.; Russell J.B. 1992. *J. Anim. Sci.* 70:3562.
- Stone, W.C. 1999. in: *Proc. Corn. Nutr. Conf. Feed Manuf.*, Cornell University, Ithaca, NY, USA, pp. 40-46.
- Sudweeks, E.M.; Ely, L.O.; Mertens, D.R.; Siks L.R. 1981. *J. Anim. Sci.* 53:1406.
- Van Soest, P. J., J. B. Robertson, y B. A. Lewis. 1991. *J. Dairy Sci.* 74:3583-3597.
- Welch, B. y Smith, 1970. *J. Dairy Sci.* 73:797.
- Yang, W. Z. y K. A. Beauchemin. 2006. *J. Dairy Sci.* 89:217-228.