

**EFECTOS DEL PROCESADO SOBRE LA DEGRADABILIDAD RUMINAL DE
PROTEÍNA Y ALMIDÓN**

J.A. Guada

Departamento de Producción Animal y Ciencia de los Alimentos

Facultad de Veterinaria de Zaragoza

1. INTRODUCCIÓN

El almidón y la proteína constituyen los nutrientes básicos de los piensos utilizados en la producción intensiva de rumiantes, cuyos ingredientes mayoritarios, los cereales y los concentrados proteicos de origen vegetal o animal, son sus principales fuentes. Tanto los granos de cereales como los concentrados proteicos son, generalmente, sometidos a diversos tipos de tratamientos durante el proceso de fabricación, bien de la materia prima o del propio pienso. En ocasiones, el tratamiento forma parte obligada del proceso de obtención de la materia prima, como ocurre con los turtós y harinas de semillas oleaginosas, o bien es necesario para la conservación y esterilización de productos perecederos, como en el caso de las harinas de carne o pescado. Cuando el tratamiento se lleva a cabo durante la fabricación del pienso con frecuencia su objetivo primordial no suele ser la modificación de la digestión, sino el facilitar el mezclado de ingredientes y el manejo y la distribución del pienso pero, independientemente del fin perseguido, la mayor parte de los tratamientos alteran, en mayor o menor grado, el valor nutritivo de las materias primas.

En el cuadro 1 se relacionan los principales métodos de procesado de los granos de cereales, cuya descripción detallada se pueden encontrar en las revisiones de Hale (1973), Hale y Theurer (1974), Beeson y Perry (1982) y Tait y Beames (1982). Por razones de sistemática se han agrupado siguiendo la clasificación de Tait y Beames (1982), en función de las condiciones de temperatura y humedad, aunque generalmente, en la práctica, se utilizan combinaciones de varios métodos.

Cuadro 1. Principales métodos de procesado de los granos de cereales

	Tratamiento	
	Seco	Húmedo
En frío	Triturado Molido Aplastado	Maceración Reconstitución Tratamiento alcalino
Caliente	Expandido Micronizado Torrefactado Extrusionado	Aplastado al vapor Granulado Cocción a presión Descompresión

En los tratamientos en frío se logra aumentar la superficie de exposición del grano a la acción enzimática de los microorganismos ruminales, bien por reducción del tamaño de partícula en la molturación o el aplastado, o por destrucción de la matriz proteica del endospermo o del pericarpio, en el caso de los tratamientos húmedos. La denominación triturado o molido refleja el grado de molturación, y el aplastado, también conocido como laminado, es similar al triturado pero utilizando molino de rodillos en lugar de martillos.

En los tratamientos en caliente, se consigue un cierto grado de gelatinización de los gránulos de almidón mediante la aplicación de calor a temperaturas de 140-180°C, bien por aire seco (expandido), infrarrojos (micronizado) o flameado (torrefactado), o bien por efecto de la presión y fricción que se consigue al forzar el paso del grano molido a través de una matriz (granulado) o del grano entero a través de un cilindro con superficie rugosa, mediante un tornillo en espiral (extrusión) lo que provoca su molturación y calentamiento. Con frecuencia, tanto el efecto del aplastado como de la presión se refuerzan con la aplicación de calor húmedo, mediante el tratamiento previo con vapor, con lo que se consigue un mayor grado de gelatinización del almidón. La cocción previa con vapor a presión es una variante que origina un producto algo más esponjoso y de mayor dificultad para el laminado. El tratamiento previo con vapor es también usual en la granulación y la extrusión, consiguiéndose en este último caso una expansión del grano al cesar repentinamente la presión durante la expulsión del material.

Las semillas oleaginosas son también sometidas a diferentes procesos para maximizar la extracción de aceite y reducir la presencia de factores antinutritivos. Generalmente, estos procesos implican reducción del tamaño de partícula, calentamiento y presión, así como el uso alternativo de solventes. La intensidad del tratamiento depende del proceso de extracción, siendo más acusado el calentamiento en la extracción en prensa, dadas las altas presiones que es necesario alcanzar. Sin embargo, también en la extracción mediante solventes las semillas son sometidas previamente a triturado, calentamiento al vapor, aplastado y en ocasiones a un tostado posterior.

En el caso de los suplementos proteicos de origen animal, como las harinas de carne y pescado, la materia prima es sometida a cocción para coagular la proteína, seguida de prensado y secado en aire seco del producto final.

En definitiva, en la mayor parte de estos procesos se producen alteraciones del tamaño de partícula y aumentos de temperatura, tanto por compresión como por vapor, durante los períodos de acondicionamiento, procesado o secado final, que afectan a la estructura de la proteína y el almidón y en consecuencia a su degradación ruminal.

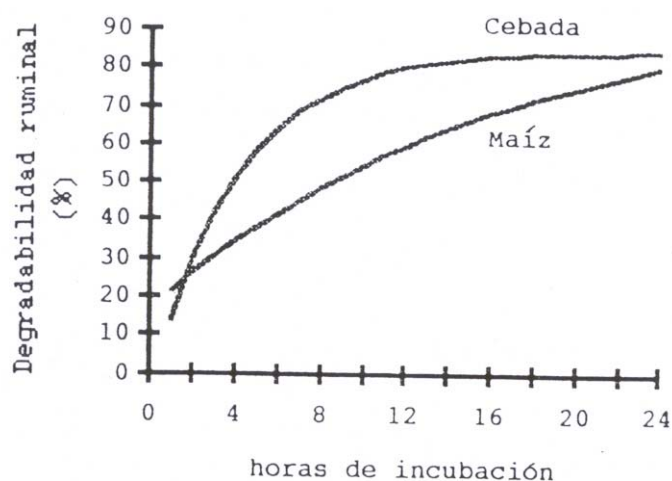
2. DEGRADACION RUMINAL

En el rumen el almidón es fermentado a ácidos grasos volátiles y la proteína degradada a cetoácidos y amoníaco, siendo este último la principal fuente de N para la síntesis microbiana. La intensidad de este proceso degradativo es variable y depende de la magnitud de la fracción potencialmente degradable y de su tiempo de retención en el rumen.

La digestión en el rumen de las fracciones potencialmente degradables del almidón y la proteína puede ser descrita por un modelo cinético de desaparición de este compartimento (Ørskov y McDonald, 1979), definido por dos actividades simultáneas: los ritmos o velocidades de degradación (K_d) y de paso a través del rumen (K_p) cuya relación determina la proporción efectivamente digerida en el rumen ($K_d/(K_d+K_p)$) o, por el contrario, la proporción que abandonaría el rumen sin ser degradada ($K_p/(K_d+K_p)$).

La mayor parte de los tratamientos a que son sometidos los cereales y suplementos proteicos modifican su velocidad de degradación en el rumen (K_d) y con ello la proporción de almidón o proteína que es digerida en éste u otros tramos posteriores del tracto digestivo. Ello puede tener una importante incidencia en la eficiencia de utilización de la dieta y en la respuesta productiva del animal, dada la influencia que el lugar de digestión tiene sobre el tipo de nutrientes absorbidos (Thomas y Rook, 1981). No obstante, estas variaciones en el ritmo de degradación pueden verse compensadas por variaciones en el tiempo de retención, provocadas simultáneamente por el tratamiento. Por ejemplo, la molturación del maíz incrementa su ritmo de degradación al aumentar la superficie expuesta a la acción bacteriana (Galyean et al., 1981), pero también el menor tamaño de partícula puede facilitar su salida del rumen, disminuyendo el tiempo de retención, lo que compensaría, en parte, la mayor velocidad de degradación.

Otros factores, como el nivel de alimentación (Owens y Goetch, 1986) o la proporción de forraje en el caso de dietas mixtas (Colucci et al., 1982), pueden hacer variar el tiempo de retención y por consiguiente la digestibilidad ruminal (Galyean et al., 1979). No obstante, es de notar que la influencia del tiempo de retención varía dependiendo del ritmo de fermentación. Esta diferencia se puede apreciar en la figura 1 en la que se representan las curvas típicas de degradación ruminal del maíz (M) y la cebada (C). Ya que ésta última fermenta muy rápidamente, es de esperar que las variaciones en el tiempo de retención tengan un efecto más acusado sobre la degradabilidad del maíz que sobre la de la cebada.

Figura 1. Cinética de degradación ruminal de la cebada y el maíz

También puede ocurrir que alguno de estos factores, como la proporción de forraje de la dieta, afecten simultáneamente a los ritmos de tránsito (K_p) y de degradación (K_d), compensándose parcialmente ambos efectos. Así, incluyendo paja molida en una dieta granulada para corderos, Castrillo et al. (1992) pudieron disminuir en un 40% el tiempo de retención en el rumen del suplemento proteico. Sin embargo, el aumento simultáneo de su degradabilidad impidió aumentar el paso de proteína sin degradar al duodeno en la medida esperada.

3. UTILIZACION DEL ALMIDON

Los granos de cereales contienen entre un 70 y un 80% de almidón, que se encuentra en el endospermo, formando gránulos compuestos principalmente por amilopectina, el componente más abundante del almidón (70-80%), cuya estructura ramificada, según French (1984), comprende zonas organizadas o cristalinas, compuestas por los residuos lineales de α -1,4 glucosa, y zonas amorfas ricas en residuos de α -1,6 glucosa o puntos de ramificación. El componente minoritario del almidón, la amilosa (polímero lineal de α -1,4 glucosa), se encuentra unido a la estructura de la amilopectina por puentes de hidrógeno, localizados fundamentalmente en las regiones amorfas.

La influencia de esta estructura sobre la digestibilidad del almidón y el efecto del procesado del grano ha sido revisada detalladamente por Rooney y Plugfelder (1986). Las regiones cristalinas de la molécula de almidón son resistentes a la entrada de agua y al ataque enzimático, mientras que las regiones amorfas son más permeables al agua y susceptibles a la acción enzimática que, generalmente, comienza en esta región, aunque se encuentra restringida por los enlaces de la amilosa con la amilopectina.

La aplicación de suficiente energía para romper los puentes de hidrógeno intermoleculares provoca la gelatinización del almidón o pérdida irreversible de su estructura original (Harbers, 1975). Durante la gelatinización, los gránulos de almidón aumentan su absorción de agua, se expansionan, exudan parte de la amilosa y aumentan su susceptibilidad a

la hidrólisis enzimática. Durante el molido y el aplastado en seco del grano, se produce una disminución del tamaño de partícula que aumenta la superficie de exposición de los gránulos de almidón al ataque enzimático, pero la acción mecánica del tratamiento es suficiente para producir un cierto grado de gelatinización que aumenta la susceptibilidad a la hidrólisis enzimática.

La gelatinización comienza por la ruptura de enlaces con la amilosa en la zona amorfa, mientras que la penetración de calor y agua en la región cristalina ocurre más lentamente, ayudada por la mayor plasticidad de la región amorfa. En los tratamientos húmedos, la presencia de agua aumenta la plasticidad de las regiones amorfas, favoreciendo considerablemente la desestructuración de las regiones cristalinas. Así, la combinación de calor y humedad provoca un alto grado de gelatinización del almidón que, unido a la mayor superficie de exposición lograda al aplastar el grano húmedo y caliente, aumenta considerablemente su degradación enzimática (Frederick et al., 1973) y su velocidad de fermentación ruminal (Hinman y Johnson, 1974) según la intensidad del tratamiento (Xiong et al., 1991).

En el cuadro 2 se resumen los resultados de digestibilidad "in situ" de Galyean et al., (1981) que muestran claramente la ventaja adicional del tratamiento al vapor sobre la reducción del tamaño de partícula. Los incrementos en la digestibilidad ruminal "in vivo" del almidón oscilan entre 15 y 20 unidades porcentuales dependiendo del tipo de tratamiento (Theurer, 1986).

Cuadro 2.- Influencia del tamaño medio de partícula y del procesado del maíz sobre la proporción de almidón desaparecido (%) después de su incubación en bolsas de nylon suspendidas durante un tiempo medio de 5 horas (Galyean et al., 1981)

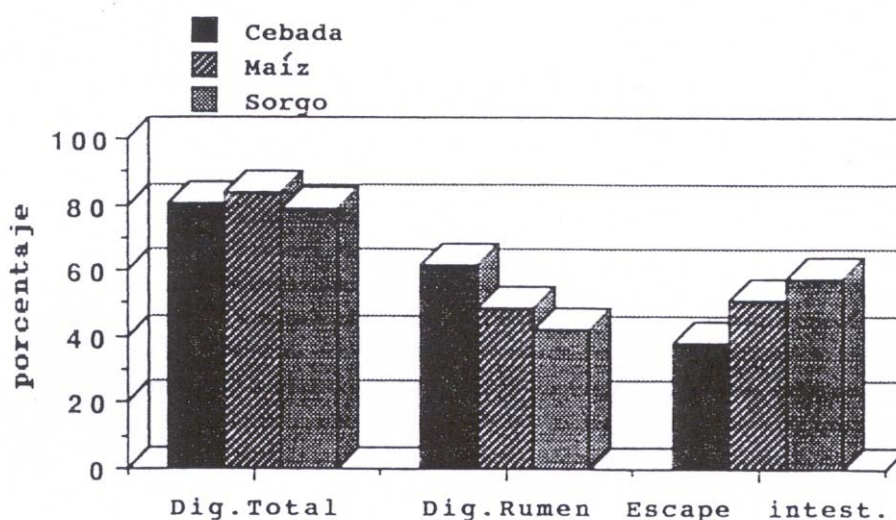
Procesado	Tamaño medio de partícula (mm)			ES
	3,0	1,5	0,75	
<u>Experiencia 1</u>				
Molido	12	13	19	6,3
Aplastado-vapor	31	37	41	
<u>Experiencia 2</u>				
Molido	19	17	27	5,9
Ensilado	12	24	44	

En ausencia de calor, el ensilado de maíz con alta humedad (24%) y la reconstitución del sorgo parecen provocar resultados comparables a los observados con el aplastado al vapor (Galyean et al., 1976, 1981), que se atribuyen, en el primer caso, a la inmadurez de la matriz proteica que protege los gránulos de almidón en el endospermo o a su degradación proteica, en el segundo (Hale, 1973). Las observaciones sobre un incremento paralelo en la degradación proteica y del almidón con el tiempo de reconstitución (Xiong et al., 1990; Stock et al., 1991), parecen apoyar esta hipótesis. Sin embargo, el aplastado al vapor disminuye la degradación

proteica, aunque aumenta la gelatinización del almidón, lo que sugiere la existencia de mecanismos de acción diferente para el procesado húmedo en frío y en caliente.

La eficacia del procesado varía no sólo en función del método, sino también de la fuente de almidón y de la especie animal. Los cereales difieren considerablemente en su susceptibilidad a la degradación ruminal, como se ilustra en la figura 2 (Spicer et al., 1986), aunque estas diferencias no se reflejan en la digestibilidad aparente en el total del tracto digestivo, debido al efecto compensatorio que ejerce la fermentación en el intestino grueso. La elevada degradabilidad de la cebada y el trigo limitan su potencial de respuesta al procesado, cuyo efecto es prácticamente despreciable con estos granos (Waldo, 1973). Sin embargo el maíz, que es más lentamente degradado, y el sorgo, que es todavía más resistente a la degradación, ofrecen mayor potencial de respuesta. El procesado en caliente y húmedo permite aumentar su digestibilidad ruminal en un 20 y 30%, respectivamente (Theurer, 1980), lo que se traduce en mejoras del índice de conversión del orden del 10% (Hale y Theurer, 1974). No obstante, en el caso del sorgo, se han observado importantes diferencias varietales en la digestión ruminal e intestinal (Streeter et al., 1990) y en su respuesta a la reconstitución (Hibberd et al., 1985).

Figura 2. Digestibilidad del almidón de la cebada, el maíz y el sorgo en el total del tracto digestivo y en el rumen y proporción que pasa al intestino sin degradar (Spicer et al., 1986)



Por lo que se refiere a la especie animal, el ganado ovino digiere el almidón de maíz en el rumen mejor que el vacuno (74 frente a 67%) y probablemente el sorgo, aunque no la cebada (Waldo, 1973). Comparando la digestibilidad de un amplio rango de dietas entre vacuno y ovino, se ha observado consistentemente que el ovino es más eficiente digiriendo dietas concentradas, mientras que el vacuno lo es con los alimentos groseros (Aerts et al., 1984; Colucci et al., 1989). Por lo tanto, es de esperar una mayor respuesta al procesado de los cereales en el ganado vacuno que en el ovino.

Por otra parte, el menor tamaño del orificio retículo omasal del ganado ovino permite una más eficiente retención del grano en el rumen, hasta ser reducido por la masticación y la

rumia a un tamaño suficiente para abandonar el rumen, atravesando el orificio retículo omasal. Ello ha permitido utilizar el grano entero en la alimentación del ganado ovino, particularmente el cebo de corderos, sin detrimento de su digestión (Fraser y Ørskov, 1974), lo que no es factible en el vacuno, debido al mayor diámetro de su orificio retículo omasal que permite la salida del grano íntegro. La retención del grano en el rumen hasta su fragmentación es especialmente importante por la elevada resistencia del pericarpio a la degradación ruminal.

En el cuadro 3 se muestran los resultados de una prueba experimental, con corderos en cebo, en la que se comparó la administración de cebada entera y un suplemento proteico granulado con la misma dieta, molida y granulada en su totalidad (Castrillo et al., 1989). Los resultados favorables a la dieta con cebada entera, tanto en lo referente a su digestibilidad e ingestión como a la respuesta productiva, indican la viabilidad de este sistema de alimentación en el cebo de corderos, con la ventaja añadida de poder prescindir de la paja como suplemento de volumen. No obstante, queda por valorar el riesgo de una posible selección de los ingredientes en un sistema de alimentación convencional, ya que en esta prueba los corderos fueron alojados individualmente.

Cuadro 3. Digestibilidad y rendimientos productivos de corderos en cebo consumiendo cebada en grano y un suplemento proteico granulado o la misma dieta molida y granulada. La cebada entera se administró con paja "ad libitum" y sin ella (Castrillo et al., 1989)

Presentación de la cebada	Molida y granulada	En grano		ES
		con paja	sin paja	
Peso inicial (kg)	18,1	17,8	17,9	0,5
<u>Ingestión MS (g/d)</u>				
Total	753	733	727	14
Concentrado	706	698	727	14
<u>Digestibilidad</u>				
Materia Orgánica	77	83	82	0,7
FAD	25	40	35	2,5
<u>Rendimientos</u>				
Ganancia media (g/d)	251	286	305	15
Índice de conversión	3,7	3,0	2,8	0,2

Otras ventajas adicionales de la administración de grano entero son la ausencia de acidosis, paraqueratosis y reblandecimiento de la grasa en la canal (Ørskov, 1986), debido a que la menor velocidad de fermentación del almidón sin procesar evita caídas del pH y altas concentraciones de propiónico en el rumen (Fraser y Ørskov, 1974). Así mismo, un pH más elevado favorece la celulolisis y con ello la digestión y el consumo de forraje, evitando el efecto depresor del concentrado de las dietas mixtas (Ørskov y Fraser, 1975; Ørskov et al., 1978), lo que ha llevado a algunos autores a preconizar la administración de grano entero al ovino y el mínimo procesado en la alimentación del vacuno, sustituyendo el tratamiento

mecánico por el rociado del grano con soluciones alcalinas para facilitar la ruptura del pericarpio (Ørskov, 1981a; 1986).

Sin embargo, la adición de álcali aumenta el ritmo de tránsito, disminuyendo el tiempo disponible para la fermentación ruminal y la digestibilidad en el total del tracto digestivo (Kung et al., 1983). Este efecto podría ser todavía mayor en las dietas mixtas, debido al aumento en el ritmo de tránsito que suscita la adición de forraje. No obstante, en las dietas mixtas, la presencia de forraje parece provocar efectos diferentes sobre la digestibilidad del concentrado, dependiendo de su procesado. Goetsch et al., (1987) observaron que la administración de heno picado provocaba una disminución de la digestión ruminal del maíz molido y un aumento de la del maíz en grano, debido probablemente a variaciones en sentido contrario en el tiempo de retención del concentrado en el rumen. La presencia de forraje aumenta la velocidad de renovación (Kp) de la fase líquida que vehicula las pequeñas partículas del grano molido, disminuyendo con ello su tiempo de retención en el rumen, pero también estimula la rumia, facilitando la masticación del grano entero y probablemente su retención en las trábeculas que forman las partículas de forraje en el rumen.

Por otra parte, ya que el principal efecto del procesado es el aumento en la fermentación ruminal del almidón, un mínimo procesado permitiría reducir la fermentación y aumentar la proporción digerida en el intestino delgado, lo que teóricamente sería más eficiente, al evitarse las pérdidas energéticas en forma de metano y calor que tienen lugar durante la fermentación ruminal. Owens et al. (1986) cifran en un 42% el aumento en la eficiencia de utilización del almidón cuando es digerido en el intestino delgado en lugar de ser fermentado en el rumen. Sin embargo, parte de esta aparente ventaja es compensada por la menor digestibilidad intestinal del almidón sin procesar (Waldo, 1973; Theurer, 1986) o por su fermentación en el propio intestino delgado. Kreikemeir et al. (1991) han observado que, superado un cierto umbral en el aporte de almidón (20 g/kg) a terneros de 300-400 kg, la glucosa absorbida vía porta representaba sólo un 35% del almidón desaparecido en el intestino delgado, a pesar de que la capacidad de absorción de glucosa no se vió limitada.

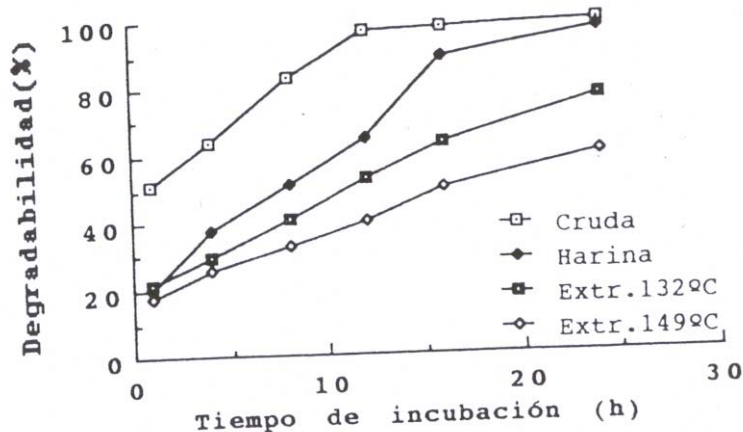
Por último, es preciso tener en cuenta que al aumentar la proporción de almidón digerido en el intestino delgado a expensas de reducir su fermentación ruminal, se disminuye simultáneamente el aporte de proteína microbiana, ya que su síntesis está estrechamente relacionada con la cantidad de carbohidratos fermentados (ARC, 1984). Así se ha observado que el flujo duodenal de N microbiano es mayor con la cebada que con el maíz o el sorgo sin procesar (Spicer et al., 1986) y aumenta con el procesado (Hibber et al., 1985).

4. UTILIZACION DE LA PROTEINA

El incremento de temperatura que experimentan las harinas de semillas oleaginosas o las de carne y pescado, durante su preparación, desnaturaliza las proteínas rompiendo los puentes de hidrógeno y enlaces disulfuro responsables de su estructura secundaria, de forma similar a lo que ocurre en la gelatinización del almidón. Como resultado de la desnaturalización, la solubilidad de la proteína se reduce y disminuye su susceptibilidad a la

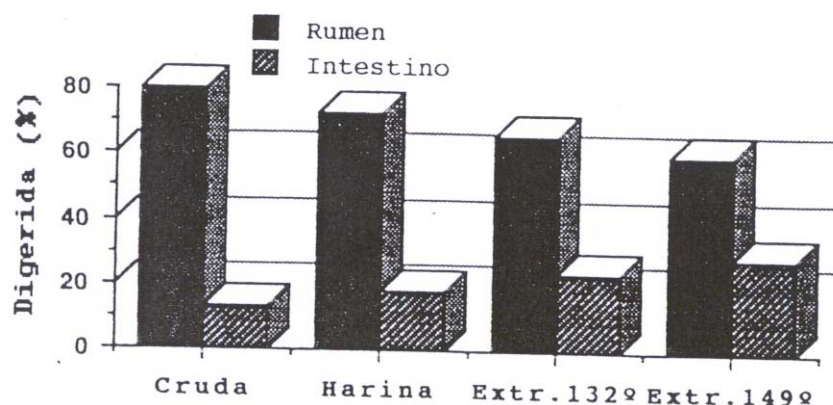
degradación ruminal (Chalmers y Synge, 1954), como se muestra en la figura 3 que ilustra el efecto del procesado de la soja sobre su ritmo de degradación en el rumen (Stern et al., 1985).

Figura 3. Cinética de degradación ruminal de la harina de soja y de la soja cruda o extrusionada a 132 y 149°C (Stern et al., 1985)



Las consecuencias de este efecto sobre la proporción de proteína digerida en el rumen y en el intestino delgado de vacas lecheras que recibían dietas idénticas pero formuladas con distintos tipos de soja se muestra en la figura 4.

Figura 4. Proporción de la proteína ingerida que es digerida en el rumen y en el intestino delgado de dietas con harina de soja, soja cruda o extrusionada a 132 y 149°C (Stern et al., 1985)



Generalmente, la baja degradabilidad ruminal de la proteína constituye una característica deseable en los suplementos proteicos para rumiantes, ya que implica desviar su digestión del rumen al intestino delgado, donde puede ser utilizada como fuente complementaria de la proteína microbiana. En el rumen, la proteína sería degradada a amoníaco cuya utilidad es nula, una vez se han cubierto las necesidades de N para la síntesis microbiana. Ello resulta de especial importancia a la hora de cubrir las elevadas necesidades de los animales de alta producción, especialmente cuando se encuentran en balance energético

negativo, circunstancias en las que el aporte de proteína microbiana suele ser limitante (Hagemester et al., 1981; Ørskov, 1981b).

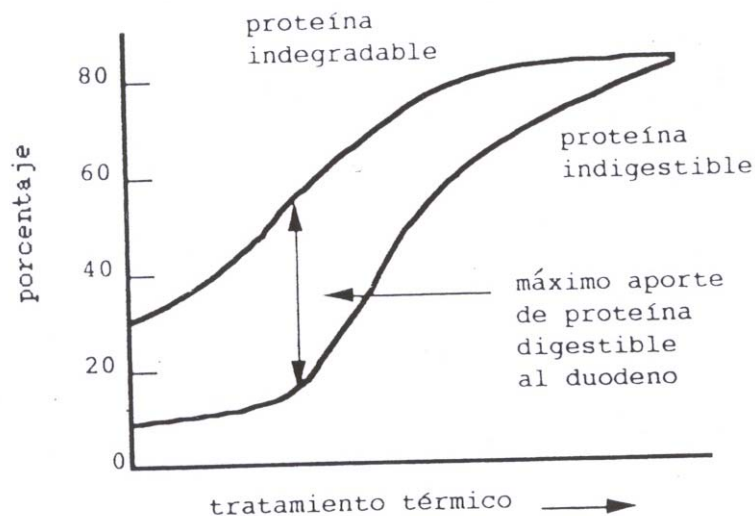
El principal mecanismo responsable de la resistencia a la proteólisis microbiana es el desencadenamiento de la reacción de Maillard entre el grupo e-amino de la lisina y los grupos carbonilo de los azúcares reductores. En esta secuencia de reacciones, la etapa inicial, que supone una simple adición para formar la base de Schiff, es reversible, por lo que, si el tratamiento es lo suficientemente moderado, se puede reducir la degradación ruminal sin afectar negativamente a la digestibilidad intestinal (Stern et al., 1985; Focant et al., 1990). Es sabido que la simple desnaturalización de la proteína no reduce su digestibilidad y puede incluso mejorar su susceptibilidad a los enzimas proteolíticos (Fennema, 1976).

La resistencia a la proteólisis aumenta con la intensidad del tratamiento térmico (Kung et al., 1991; Tagari 1986), siendo superior en las harinas de extracción a presión que con solventes (Broderick, 1986) o en el tratamiento por extrusión que en el aplastado al vapor (Focant et al., 1990), aunque pueden existir variaciones importantes entre semillas oleaginosas (Ferlay et al., 1992). Sin embargo, un excesivo calentamiento da lugar a la formación irreversible de nuevos compuestos de la reacción de Maillard, así como a enlaces entre residuos aminoácidos (aspártico, glutamina, treonina) que restringen el acceso enzimático al resto de la molécula proteica, pudiendo llegarse, en último término, a la oxidación y destrucción total de ciertos aminoácidos (Erbersdobler, 1976). No obstante, a las temperaturas más usuales, la reacción entre la proteína y los carbohidratos es el principal factor responsable de su resistencia a la proteólisis enzimática.

Al aumentar la intensidad del tratamiento también lo hace la proporción de proteína no degradada que fluye al intestino delgado, pero simultáneamente disminuye su disponibilidad, como se muestra esquemáticamente en la figura 5. La eficacia del tratamiento depende de que la degradabilidad ruminal se vea más afectada que la digestibilidad intestinal, existiendo un rango de condiciones óptimas de temperatura y tiempo de aplicación para lograr la máxima protección ruminal sin detrimento de su digestibilidad intestinal (Sherrod y Tillman, 1964). Así por ejemplo, se ha estimado que la duración óptima del tratamiento en autoclave de la harina de algodón es de 60 min (Broderick y Craig, 1980), ya que el progresivo deterioro de la digestibilidad, estimada tanto en ratas como a partir de la lisina reactiva con fluoro dinitrobenzeno, anula las ventajas de la mayor protección que se puede conseguir aumentando la duración del tratamiento.

Sin embargo, a la hora de definir las condiciones óptimas del procesado, es preciso tener en cuenta que los efectos de la temperatura y el tiempo de tratamiento no son proporcionales. Los resultados de Faldet et al., (1988) muestran que se consigue una óptima protección de la soja calentandola en seco a 160°C durante 30 min, pero es posible alcanzar un nivel de protección equivalente con 140°C durante 120 min, lo que supone doblar el tiempo de tratamiento por cada 10°C de diferencia de temperatura, siempre que se supere un nivel mínimo para garantizar una protección significativa.

Figura 5. Influencia del tratamiento térmico sobre la proporción de proteína indegradable en el rumen y digestible en el intestino delgado



Por otra parte, la eficacia del tratamiento aumenta en presencia de humedad o de azúcares que favorecen la reacción de Maillard, siendo la xilosa particularmente eficaz para ello (Cleale et al., 1987; Wallace, 1989). También, la presencia de otros compuestos que favorezcan la desnaturalización de la proteína, como el etanol (Lynch et al., 1987), o potencien el establecimiento de enlaces químicos, como los taninos (Driedger y Hatfield, 1972), pueden aumentar considerablemente la eficacia de la protección a temperaturas moderadas.

En el caso de las harinas de origen animal, cuyas materias primas son generalmente muy degradables, su procesado las transforma en proteínas especialmente resistentes a la degradación ruminal. En la fabricación de la harina de pescado, el calor en condiciones de baja humedad y la auto-oxidación, particularmente durante el secado final de la harina y su almacenamiento, favorecen la formación de compuestos de la reacción de Maillard entre los aminoácidos y los productos de la oxidación del aceite (Tarr, 1982). Durante el secado de la harina de carne y de sangre ocurre un proceso similar, aunque en este caso con participación de la glucosa como donante de grupos carbonilo en la reacción de Maillard (Skurray, 1982).

Aunque el procesado permite convertir estos subproductos de origen animal en excelentes fuentes de proteína protegida, el uso de las harinas de carne y de sangre en la alimentación animal se encuentra, actualmente, muy restringido por los riesgos de transmisión de la encefalopatía espongiiforme bovina (Pain, 1989), mientras que la harina de pescado se caracteriza por una alta variabilidad en lo referente a su degradabilidad (Miller, 1973; Hume, 1974). Gran parte de esta variabilidad es debida a las condiciones del procesado que, según Mehrez et al. (1980), puede hacer variar en más de un 50% la degradabilidad ruminal. En el estudio aludido, el período de almacenamiento del pescado, antes de su procesado, fue el factor que, aisladamente, tuvo mayor influencia sobre la degradación ruminal de la harina de pescado, como consecuencia de la intensa proteólisis durante este período. La adición de formaldehído durante períodos cortos de almacenamiento y el secado al vapor tuvieron un ligero efecto protector de la degradabilidad, pero en todo caso inferior al observado tratando el pescado en fresco.

Generalmente se han observado respuestas favorables de los rendimientos productivos a la administración de proteínas protegidas (Clark, 1975; Hussein y Jordan, 1991), aunque estas pueden ser sumamente variables, dependiendo de la eficacia del método de procesado y de la relación entre aportes y necesidades. La situación más favorable tiene lugar cuando una alta demanda de aminoácidos coincide con un bajo aporte de proteína microbiana, como ocurre al principio de la lactación, debido al retraso de la ingestión voluntaria respecto a la curva de lactación. En estas circunstancias los animales movilizan con facilidad sus reservas corporales de grasa para cubrir las necesidades energéticas, pero la menor disponibilidad de proteína tisular y la reducida síntesis microbiana hacen del aporte duodenal de proteína el principal factor limitante de la producción. Así, no es de extrañar que las respuestas más claras al aporte duodenal de proteína se hayan obtenido con animales en balance negativo de energía (Ørskov et al., 1977; Gonzalez et al., 1982) o que el efecto del procesado de la soja (Broderick, 1986) se manifieste más claramente con bajos niveles de ingestión (Broderick et al., 1990).

El desarrollo de nuevos métodos para cuantificar "*in vivo*" la producción de proteína microbiana (Verbic et al., 1990; Balcells et al., 1991) y el perfeccionamiento de los actuales sistemas de valoración proteica para rumiantes (Webster, 1992), es probable que permitan, en un futuro próximo, definir con mayor exactitud las situaciones de déficit proteico y obtener un mayor beneficio de los efectos del procesado sobre la degradabilidad ruminal de la proteína.

5. BIBLIOGRAFIA

- Aerts, J.V.; De Boever, J.L.; Cottyn, B.G.; De Brabander, D.L. y Buysse, F.X. (1984) *Anim. Feed Sci. Technol.* 12, 47.
- A.R.C. (1984) *The Nutrient requirements of Ruminant Livestock*. Suppl.1. Agricultural Research Council. C.A.B., England.
- Balcells, J.; Guada, J.A.; Castrillo, C. y Gasa, J. (1991) *J. Agric. Sci. Camb.* 116, 309.
- Beeson, W.M. y Perry, T.W. (1982) En: *Handbook of Nutritive Value of Processed Foods. Vol. II. Animal Feedstuffs*. M. Rechcigl Jr. (ed). CRC Press, Florida. pp: 193.
- Broderick, G.A. (1986) *J. Dairy Sci.* 69, 2948.
- Broderick, G.A. y Craig, W.M. (1989) *J. Nutr.* 110, 2381.
- Broderick, G.A.; Ricker, D.B. y Driver, L.S. (1990) *J. Dairy Sci.* 73 453.
- Castrillo, C.; Guada, J.A. y Gasa, J. (1989) *Invest. Agr: Prod. Sanid. Anim.* 4, 111.
- Castrillo, C.; Lainez, J.M.; Gasa, J. y Guada, J.A. (1992) *Anim. Prod.* 54, 59.
- Clark, J.H. (1975) *J. Dairy Sci.* 58, 1178.
- Cleale, R.M.; Klopfenstein, T.J.; Britton, R.A.; Satterlee, L.D. y Lowry, S.R. (1987) *J. Anim. Sci.* 65, 1312.
- Colucci, P.E.; Chase, L.E. y Van Soest, P.J. (1982) *J. Dairy Sci.* 65, 1445.
- Colucci, P.E.; MacLeod, G.K.; Grovum, W.L.; Cahill, L.W. y McMillan, I. (1989) *J. Dairy Sci.* 72, 1774.
- Chalmers, M.L. y Synge, R.L.M. (1954) *Adv. Prot. Chem.* 9, 93.
- Driedger, A. y Hatfield, E.E. (1972) *J. Anim. Sci.* 34, 465.
- Erbersdobler, H. (1976) En: *Protein Metabolism and Nutrition*. D.J.A. Cole, K.N. Boorman, P.J. Buttery, D. Lewis, R.J. Nreale y H. Swan (eds). Butterworths, London. pp: 139.
- Faldet, M.A.; Broderick, G.A.; Satter, L.D. y Ricker, D.B. (1988) *J. Dairy Sci.* 17 Suppl.1, 158.

- Ferlay, A.; Legacy, F.; Bauchart, D.; Poncet, C. y Doreau, M. (1992) *J. Anim. Sci.* **70**, 915.
- Focant, M.; Van Hoecke, A. y Vanbelle, M. (1990) *Anim. Feed Sci. Technol.* **28**, 303.
- Fraser, C. y Ørskov, E.R. (1974) *Anim. Prod.* **18**, 75.
- Frederick, H.M.; Theurer, B. y Hale, W.H. (1973) *J. Dairy Sci.* **56**, 595.
- French, D. (1984) En: *Starch Chemistry and Technology*. Academic Press, New York. pp: 183.
- Galyean, M.L.; Wagner, D.G. y Owens, F.N. (1979) *J. Anim. Sci.* **49**, 199.
- Galyean, M.L.; Wagner, D.G. y Owens, F.N. (1981) *J. Dairy Sci.* **64**, 1804.
- Goetsch, A.L.; Owens, F.N.; Funk, M.A. y Doran, B.E. (1987) *Anim. Feed Sci. Technol.* **18**, 151.
- Gonzalez, J.S.; Robinson, J.J.; MaHattie, I. y Fraser, C. (1982) *Anim. Prod.* **34**, 31.
- Hagemeister, H.; Lüpping, W. y Kaufmann, W. (1981) En: *Recent Developments in Ruminant Nutrition*. W. Haresign y D.J.A. Cole. (eds). Butterworths, London. pp: 31.
- Hale, W.H. (1973) *J. Anim. Sci.* **37**, 1075.
- Hale, W.H. y Theurer, B. (1974) En: *Fisiología Digestiva y Nutrición de los Rumiantes. Vol.3. Nutrición Práctica*. D.C. Church (ed). Acribia, Zaragoza. pp: 79.
- Harbers, L.H. (1975) *J. Anim. Sci.* **41**, 1496.
- Hibberd, C.A.; Wagner, D.G.; Hintz, R.L. y Griffin, D.D. (1985) *J. Anim. Sci.* **61**, 702.
- Hinman, D.D. y Johnson, R.R. (1974) *J. Anim. Sci.* **39**, 417.
- Hume, I.D. (1974) *Aust. J. Agric. Res.* **25**, 155.
- Hussein, H.S. y Jordan, R.M. (1991) *J. Anim. Sci.* **69**, 2147.
- Kreikemeir, K.K.; Harmon, D.L.; Brandt Jr., R.T.; Avery, T.B. y Johnson, D.E. (1991) *J. Anim. Sci.* **69**, 328.
- Kung Jr., L.; Maciorowski, K. y Powell, K.M. (1991) *J. Anim. Sci.* **69**, 3398.
- Kung Jr., L.; Jesse, B.W.; Thomas, J.W.; Huber, J.T. y Emery, R.S. (1983) *J. Anim. Sci.* **63**, 155.
- Lynch, G.L.; Berger, L.L. y Fahey Jr., G.C. (1987) *J. Dairy Sci.* **70**, 91.
- Mehrez, A.Z.; Ørskov, E.R. y Opsvedt, J. (1980) *J. Anim. Sci.* **50**, 737.
- Miller, E.L. (1973) *Proc. Nutr. Soc.* **32**, 79.
- Ørskov, E.R. (1981a) En: *Recent Developments in Ruminant Nutrition*. W. Haresign y D.J.A. Cole (eds). Butterworths, London. pp: 258.
- Ørskov, E.R. (1981b) En: *Recent Developments in Ruminant Nutrition*. W. Haresign y D.J.A. Cole (eds). Butterworths, London. pp: 17.
- Ørskov, E.R. y Fraser, C. (1975) *Br. J. Nutr.* **34**, 493.
- Ørskov, E.R. y McDonald, I. (1979) *J. Agric. Sci., Camb.* **92**, 499.
- Ørskov, E.R.; Grubb, D.A. y Kay, R.N.B. (1977) *Br. J. Nutr.* **38**, 397.
- Ørskov, E.R., Soliman, H.S. y McDearmid, A. (1978) *J. Agric. Sci. Camb.* **90**, 611.
- Owens, F.N. y Goetsch, A.L. (1986) En: *Control of Digestion and Metabolism in Ruminants*. L.P. Milligan, W.L. Grovum y A. Dobson (eds). Prentice Hall, New Jersey. pp: 196.
- Owens, F.N.; Zinn, R.A. y Kim, Y.K. (1986) *J. Anim. Sci.* **63**, 1634.
- Pain, S. (1989) *New Scientist* **7**, 26.
- Rooney, L.W. y Plugfelder, R.L. (1986) *J. Anim. Sci.* **63**, 1607.
- Sherrod, B. y Tillman, A. (1964) *J. Anim. Sci.* **23**, 510.
- Skuray, G.R. (1982) En: *Handbook of Nutritive Value of Processed Food. Vol. II, Animal Feedstuffs*. M. Rechcigl, Jr. (ed). CRC Press, Boca Raton Florida. pp: 269.
- Spicer, L.A.; Theurer, C.B.; Sowe, J. y Noon, T.H. (1986) *J. Anim. Sci.* **62**, 521.
- Stern, M.D.; Santos, K.A. y Satter, L.D. (1985) *J. Dairy Sci.* **68**, 45.
- Stock, R.A.; Sindt, M.H.; Cleale, IV R.M. y Britton, R.A. (1991) *J. Anim. Sci.* **69**, 1645.
- Streeter, M.N.; Wagner, D.G.; Hibberd, C.A. y Owens, F.N. (1990) *J. Anim. Sci.* **68**, 1121.
- Tagari, H.; Pena, F. y Satter, L.D. (1986) *J. Anim. Sci.* **62**, 1732.
- Tait, R.M. y Beamres, R.M. (1988) En: *World Animal Science. B4. Feed Science*. E.R. Ørskov (ed). Elsevier, Amsterdam. pp: 151.

- Tarr, H.L.A. (1982) En: *Handbook of Nutritive Value of Processed Food. Vol.II, Animal Feedstuffs*. M.Rechcigl,Jr. (ed). CRC Press. Boca Raton Florida. pp: 283.
- Theurer, C.B. (1986) J. Anim. Sci. 63, 1649.
- Thomas, P.C. y Rook, J.A.F. (1981) En: *Recent developments in Ruminant Nutrition*. W. Haresign y D.J.A. Cole (eds). Butterworths, London. pp: 157.
- Verbic, J.; Chen, X.B.; Macleod, N.A. y Ørskov, E.R. (1990) J. Agric. Sci. Camb. 114, 243.
- Waldo, D.R. (1973) J. Anim. Sci. 37, 1062.
- Wallace, R.J. (1989) Anim. Prod. 48, 629.
- Webster, A.J.F. (1992) En: *Recent Advances in Animal Nutrition*. P.C.Garnsworthy, W. Haresign y D.J.A. Cole. (eds) Butterworth-Heinemann, Oxford. pp: 93.
- Xiong, Y.; Bartle, S.J. y Preston, R.L. (1991) J. Anim.Sci. 69, 1707.
- Xiong, Y.; Bartle, S.J.; Preston, R.L. y Meng, Q. (1990) J. Anim. Sci. 68, 3880.