

EFECTO DEL TRATAMIENTO DE LAS MATERIAS PRIMAS SOBRE SU VALOR NUTRICIONAL

M. Gorrachategui García.
Consultor

1.- INTRODUCCIÓN

Muchos han sido los autores y trabajos publicados que han abordado la mejora del valor nutritivo de los alimentos a través de distintos tratamientos y, en particular, mediante los tratamientos térmicos. Desde hace años, en el marco de FEDNA, este tema ha sido presentado desde diferentes puntos de vista (Brenes y Brenes, 1993; Guada, 1993; Valls Porta, 1993; Wiseman, 1993; Peisker, 1996; Mateos et al., 2005) generando una base documental rica y amplia. El interés permanente por este tema y la evolución del conocimiento científico hacen que cada día se conozcan más profundamente las bases de los efectos que se encuentran al procesar las materias primas o los alimentos destinados a las distintas especies, pero a pesar de ello aún quedan muchas preguntas sin respuesta.

El tratamiento térmico de los alimentos se ha considerado una vía tecnológica de “externalizar parte del proceso digestivo” consiguiendo aumentar su digestibilidad y, a la vez, reducir su toxicidad potencial. Los efectos conseguidos potencialmente pueden rendir grandes cantidades de energía que afectan a la masa corporal, crecimiento, reproducción, defensa contra parásitos y enfermedades, e inversión en locomoción y/o trabajo (Carmody y Grangham, 2009). En cambio, las respuestas no siempre han sido las esperadas. Se sabe que los efectos de los tratamientos físicos son diferentes sobre los distintos constituyentes de los alimentos como almidón, fibra, proteína y lípidos, y que también dependen de la organización de su estructura celular y del tipo de alimento en sí. A continuación nos referiremos a los aspectos más destacados en las diferentes especies y, con especial énfasis, a los avances aparecidos en los últimos años.

2.- TRATAMIENTOS TECNOLÓGICOS

Podemos decir que los tratamientos tecnológicos que se aplican a las diferentes materias primas o piensos se basan en la reducción del tamaño de partícula, separación de fracciones y aplicación de temperatura y presión en diferentes condiciones de humedad y tiempo. No pocas publicaciones describen con detalle los distintos tratamientos tecnológicos (Lessire et al., 1988; Putier, 1993; Tecaliman, 1988) y por esta razón no profundizaremos en este punto. De manera general y simplificada podríamos hacer una clasificación de los distintos tratamientos de la manera siguiente:

- En seco:
 - En frío: descascarado y molienda.
 - Con aplicación de calor: secado y tostado.
- Con aplicación de calor y humedad: granulación, cocción, micronización, expansión y extrusión.

Si el tratamiento en sí es importante, más puede ser conocer con detalle las condiciones aplicadas en cada caso, sólo así podemos explicar muchas de las respuestas obtenidas tanto a nivel experimental como a nivel de campo y, sobre todo, comparar unos resultados con otros. Generalmente, los tratamientos se aplican a cereales, leguminosas y semillas de oleaginosas.

2.1.- Tratamientos vía seca. Descascarado

El primer impedimento para la digestión es la cáscara de los granos, por ello es necesaria su ruptura o eliminación. El descascarado aumenta el valor nutricional de las materias primas al reducir la fracción fibra y, en muchos casos, eliminar gran parte de los factores antinutricionales (FANs).

En el caso de las leguminosas, los α -galactósidos, taninos y metabolitos secundarios pueden reducirse o eliminarse aumentando la digestibilidad de almidón (A) y proteína (PB) (Stein y Bohlke, 2007). En las variedades de guisante y habas con contenidos altos en taninos, éstos se encuentran en la cáscara y además son resistentes al calor, por lo que el descascarado mejora la digestibilidad. En cerdos se ha comprobado que aumenta la digestibilidad de la materia seca (MS) un 13,4%, de la PB entre un 5,1% y un 12%, y de la lisina (lis) entre un 3,4 y un 6,1 %, teniendo un mayor efecto que el posterior tratamiento térmico (Van der Poel, 1991; Brenes y Brenes 1993). En el caso del guisante de primavera, Longstaff y McNab (1987) observan una mejoría del 25% en el valor de EMV al descascarillar (2390 vs 2367 kcal/kg).

En el altramuз, el descascarado aumenta el valor EMA un 17% (Brenes et al., 1993) y también aumenta su valor nutricional en porcino. Sin embargo, en este caso al descascarillar aumentamos la concentración de galactanos y ramnogalacturonanos presentes en los cotiledones del grano, que fermentarán en el intestino grueso y que pueden derivar en problemas de flatulencia y diarrea si se emplea a concentraciones altas (Kim et al., 2009).

En el caso de las oleaginosas, es conocido el efecto sobre el valor nutricional al descascarillar las habas de soja. En el caso del turtó de colza, el descascarillado aumenta el valor energético en porcino un 15% (3759 vs 3253 kcal/kg MS) debido a una reducción del contenido en fibra (Skiba et al., 1999).

2.2.- Tratamientos vía seca. Molienda

La molienda reduce el tamaño de partícula aumentando el área de superficie y, en consecuencia, hace más susceptibles a los granos al ataque por los jugos digestivos y las enzimas (Lawrence, 1970; Heaton et al., 1988), aunque no parece modificar la estructura de los gránulos de almidón (Mercier y Guilbot, 1974).

El tipo de molienda (molinos o rodillos), el tamaño de partícula obtenido y su grado de homogeneidad influyen de manera distinta en cada especie (Wondra et al., 1996; Mateos et al., 2005).

En las aves, la capacidad de la molleja para triturar alimentos hace que la respuesta a la molienda sea diferente a otras especies. En el caso de piensos de ponedoras la elección es una molienda gruesa homogénea con partículas que actúen mecánicamente en la molleja como dientes de molino, mientras que en el caso de los broilers la elección son piensos granulados pero con partículas suficientemente gruesas, lo que exige un compromiso tecnológico importante para no producir un exceso de finos al granular.

En aves la reducción del tamaño de partícula por la molienda en leguminosas afecta claramente a la digestibilidad del almidón y al valor EMAn, mejorando éste un 9-15% en el caso de los guisantes al moler y granular, y entre un 22 y un 31% en el caso de las habas al moler fino (Carre et al., 1991 y Lacassagne et al., 1988 citados por Brenes y Brenes, 1993).

En porcino, los resultados obtenidos con distintos grados de molienda son variables y, generalmente, se espera que la reducción del tamaño de partícula mejore la digestibilidad y las transformaciones. Un estudio detallado ha sido realizado por Gillou y

Landeau (2000). Wondra et al. (1996) revisan los efectos de la molienda y señalan que se puede esperar una mejora de los resultados entre el 1 y el 1,5% para cada disminución de 100 micrones del tamaño de las partículas del maíz, con una importante disminución de la excreción fecal de nutrientes. Concluyen que cuanto más uniforme es el tamaño, la digestibilidad de MS, PB y energía bruta (EB) aumentan. Kim et al. (2009) indican que la reducción del tamaño de partícula en el altramuz de 1304 a 567 micrones aumenta la digestibilidad ileal estandarizada (DIS) de lisina (lys), metionina (met), treonina (thr) y aminoácidos (AA) totales en un 51, 54, 70 y 49% respectivamente. En lechones la molienda fina tiene efectos positivos las primeras semanas postdestete pero después no es necesaria (Healy et al., 1994).

Una molienda demasiado fina puede aumentar el riesgo de úlceras y de problemas respiratorios y, en el caso del trigo, puede añadir otro factor negativo en la cavidad bucal debido a su consistencia pastosa. Con moliendas habituales (cribas de 2,5 a 3,5 mm Ø) no se observa ningún inconveniente. Además, la molienda gruesa reduce el conteo de enterobacterias y aumenta la presencia de lactobacilos (Callan et al., 2007), y disminuye la prevalencia de Salmonella (Jorgensen et al., 2002 citado por Callan et al., 2007).

Kilburn y Edwards (2001) señalan que los efectos de la molienda y granulación no son independientes al comprobar que la molienda fina mejora el valor energético, sin embargo la granulación sólo mejoró la energía cuando la molienda fue gruesa.

En los rumiantes se han hecho varios estudios sobre el efecto de la inclusión de granos enteros vs molidos en la dieta. En la cebada se observa una mejora de la digestibilidad del almidón al moler el grano con rodillos, pero la magnitud de la respuesta depende de la edad del animal, lo que tendría relación con la capacidad de masticación; mientras que en los terneros recién destetados hubo un aumento del 13% (no significativo estadísticamente), y en el caso de las vacas de 31 meses la mejoría fue del 48 % (Rainey et al., 2002). En el mismo sentido Owens (1986) indica que mientras en ovejas y terneros jóvenes la masticación puede reducir la necesidad de molienda, en vacuno adulto el grano de maíz debe fraccionarse al menos en 4-10 partículas, aunque los resultados se verán influenciados por otros factores como la frecuencia de alimentación, fibra, etc. En cualquier caso, la molienda cambia el lugar y la extensión de la digestión y puede afectar al pH ruminal.

La disminución del tamaño de las partículas aumenta su degradabilidad ruminal pudiendo reducir el consumo, sobre todo en las dietas más intensivas para terneros, entre un 7 y un 11,5% (Bengochea et al. (2005), lo que se compensa parcialmente por una salida

más rápida del rumen (Poncet et al., 2003). En el caso de las semillas de oleaginosas, la molienda grosera protege a las grasas de la hidrogenación ruminal.

2.3.- Tratamientos con calor vía seca. Secado y tostado. Jet sploding

Secado: la recolección de cereales húmedos requiere para su conservación su posterior secado. Normalmente el secado se produce por aplicación de aire caliente a diferentes T^a y posterior enfriamiento y, según las condiciones, este proceso ya puede afectar a la calidad del grano. Barrier Guillot et al. (1993) comprueban que al secar el maíz con alta T^a el valor energético para aves tiende a disminuir, sin que este efecto se observe en cerdos. En ambas especies constatan una disminución de la digestibilidad de PB y AA, siendo el cerdo especialmente sensible a la lisina. Estos resultados confirmarían que la fracción proteica es más afectada por el calor que la energía, debido posiblemente a reacciones de Maillard.

Iji et al. (2003) comprueban, para el maíz, que el aumento de la T^a de secado disminuye el almidón resistente (RS) y que cambia la relación amilosa/amilopectina, sin modificación del valor EMAn en aves (cuadro 1), observando en cambio una mejora en la digestibilidad del fósforo. A juzgar por estos resultados no parece que deban aplicarse altas temperaturas en el secado del maíz.

Cuadro 1.- Efecto de la T^a de secado de maíz en la composición de fracciones de almidón y valor energético en aves (% ó MJ/Kg, MS) (Iji et al., 2003)

| | Almidón | RS | Amilopectina | Amilosa | Amilosa/ Amilopectina | AMEn |
|--------|---------|------|--------------|---------|--------------------------|------|
| Húmedo | 69,9 | 17,7 | 53 | 17 | 32 | 3752 |
| 85°C | 70,2 | 18,4 | 54,6 | 15,6 | 29 | 3824 |
| 95°C | 70,1 | 16,8 | 54,2 | 15,9 | 29 | 3752 |
| 105°C | 70,5 | 15,9 | 55,6 | 14,9 | 27 | 3728 |

El tostado con aire caliente en tambor y posterior molienda también se ha aplicado a las habas de soja con el objetivo de eliminar los FANs termolábiles y de reducir la humedad. Este sistema sobrecalienta más las partes exteriores del grano y no afecta a las partes más internas. En la actualidad se usa poco.

El Jet-sploding (popping): es un tratamiento con aire seco caliente a alta T^a . El agua interior de los granos se convierte en vapor, éstos se hinchan y toman una forma característica. Posteriormente son molidos. Algunos autores han indicado su eficacia en la disminución de la degradabilidad ruminal de las semillas de colza sin afectar a su digestibilidad intestinal (Deacon et al., 1988) Tampoco es un sistema de uso frecuente en Europa en alimentación animal.

2.4.- Tratamientos con calor vía húmeda. Cocción. Extrusión. Expansión y ondas

La acción del calor, humedad y presión modifican en mayor o menor grado la disponibilidad de nutrientes al modificar la estructura de los polisacáridos, desnaturalizar las proteínas y reducir o destruir los FANs. En los cereales, los gránulos de almidón se rompen produciendo su gelatinización y modificando sus características nutricionales, sin embargo para evitar la desnaturalización de la proteína es necesario el control de las condiciones, en particular el contenido mínimo de humedad antes del tratamiento (Apelt, 1987).

Los principales tratamientos vía húmeda son:

- Producción de copos (cocción y laminado): tratamiento en una cámara con vapor a 90-100°C durante tiempo prolongado (40-60'), posterior laminado mediante rodillos y secado.
- Extrusión: tratamiento en un extruder, previo acondicionamiento con adición de líquidos y vapor, en condiciones de alta presión y T^a (entre 125 y 165° C) y posterior salida de la cámara a través de una matriz donde se ejerce la máxima presión. Los extruders pueden ser de uno o dos ejes, alterando las condiciones de presión. También hay extruders que trabajan en seco por la acción del calor y la fricción, pero son de uso poco frecuente.
- Expansión: es un proceso similar a la extrusión, pero se alcanzan T^a más bajas (95-125°C) y la salida se realiza a través de un cono invertido (anular) de separación regulable, por lo que normalmente las condiciones de presión también son menores.
- Emisión de ondas: la micronización se basa en la aplicación de ondas en el rango infrarrojo o microondas del espectro de materias primas a las que previamente se aumenta el contenido en humedad hasta un 18%. Como consecuencia las moléculas vibran generando calor, especialmente en las capas exteriores donde hay un aumento de la presión de agua. Posteriormente, las materias primas se pasan por unos rodillos donde sufren un aumento de presión y luego se enfrían (Medel et al., 1999). A veces se confunde con el término “micronización” aplicado a la reducción del tamaño de partícula a “micrones”.

3.- EFECTOS DE LOS TRATAMIENTOS TÉRMICOS SOBRE LOS CONSTITUYENTES DE LOS ALIMENTOS

Los tratamientos tecnológicos representan diferentes maneras y condiciones de modificar la estructura de los granos que difiere en su aspecto físico, en su composición y en su respuesta. A continuación abordaremos cómo los distintos tratamientos afectan a las fracciones más importantes de los componentes de las materias primas vegetales, que son almidón, polisacáridos no amiláceos (PNAs), proteína y fracción lipídica. También analizaremos el efecto sobre los FANs y la calidad bacteriológica.

3.1.- Almidón

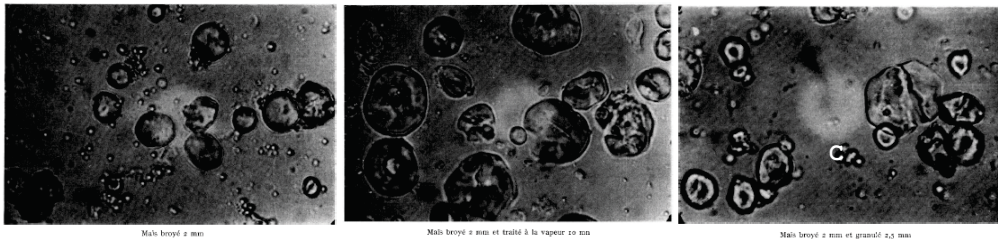
En los monogástricos la mayor parte del almidón ingerido se digiere a nivel intestinal por las enzimas α -amilasas y glucoamilasas que lo transforman en glucosa. El almidón resistente (RS) pasa sin digerir a ciego y colon y allí, una parte es fermentado por la población microbiana formando ácidos grasos de cadena corta (AGV) cuyo valor energético es menor que el de la glucosa y que, a su vez, sirven de alimento a la flora microbiana produciendo metano e hidrógeno lo que disminuye aún más el rendimiento energético (Wiseman, 2006). En el hombre se acepta ampliamente que el RS tiene un valor en energía metabolizable del 50% del almidón digerido a nivel intestinal (Silvester et al., 1995 citado por Carmody y Wrangham, 2009).

El grado de resistencia a la digestión del almidón crudo guarda relación con el patrón de difracción de rayos X del que existen tres tipos: A (altamente digestible) de cereales, B de tubérculos como la patata, más resistente a la digestión por la amilasa y C de leguminosas, intermedio entre los dos anteriores. Otra manera de verlo, por ejemplo, es mediante la clasificación del almidón de Englyst et al. (1992) en: almidón rápidamente digestible (RDS), lentamente digestible (SDS) y almidón resistente (RS), clasificándose este último a su vez en tres fracciones: RS₁ almidón atrapado en la estructura celular físicamente inaccesible, RS₂ almidón granular poco gelatinizado, hidrolizado lentamente por las amilasas, RS₃ almidón retrogradado, y RS₄ almidón químicamente modificado en el proceso. El RS contribuye a disminuir el flujo portal de glucosa y, por lo tanto, afecta negativamente al valor energético. En todos los casos el tratamiento térmico de estos almidones mejora su digestibilidad.

Los mecanismos por los cuales los procesos térmicos (PT) aumentan la digestibilidad del almidón están bien identificados. Los gránulos de almidón nativo son mezclas semicristalinas de amilopectina y amilosa, junto con pequeñas cantidades de lípidos y una matriz proteína que los rodea, cuya estructura determina el carácter harinoso

o vítreo según sus propiedades de solubilidad. Estos gránulos de almidón resisten en más o menos grado la hidrólisis de las amilasas, pero la aplicación del calor y presión causa una ruptura irreversible de esa estructura disminuyendo la cristalinidad del almidón, aumentando su solubilidad y capacidad de absorción de agua lo que facilita su hidratación e hidrólisis a moléculas más sencillas, como dextrinas y azúcares (Tester y Karkalas, 2006), en un proceso conocido como gelatinización, que aumenta la viscosidad debido a la disminución de la masa molecular media (relación de Mark-Houwink) y que a su vez facilita el ataque de las enzimas digestivas. La intensidad de la hidrólisis depende de la extensión de la gelatinización, que a su vez guarda relación con la T^a del proceso, la humedad presente, la presión y el tiempo (Tester y Sommerville, 2000). En la figura 1, se observa el efecto de la granulación sobre la ruptura e hidratación de los gránulos de almidón de maíz y el nulo efecto de la molienda.

Figura 1.- Efectos sobre el gránulo de almidón de maíz. A: molienda 2mm. B: molienda 2 mm y vapor 10'. C: molienda 2 mm y granulación 2.5 mm Ø (Mercier y Guilbot, 1974)



Además Abb El-Khalek y Janssens (2010) señalan que la tasa de gelatinización puede verse afectada por diferentes aspectos:

- Inversamente por el nivel de grasa. Disminuyendo la capacidad de absorción de agua o por formación de complejos de lípidos con amilosa, sobre todo cuanto mayor sea la presencia de ácidos grasos libres y monoglicéridos.
- Relación amilosa/amilopectina. A más amilosa, menor grado de gelatinización.
- Tiempo de retención en el expander o extruder.
- Tamaño de los gránulos de almidón, resultando más fácil gelatinizar los gránulos más grandes.

Se sabe que cuanto más amilopectina y menos amilosa contenga el almidón mejor es digerido (Tester y Karkalas, 2006) debido a que la mayor ramificación de las cadenas posibilita un mayor ataque enzimático, pero, además, el calor degrada la amilosa por la ruptura de enlaces de hidrógeno secundarios entre sus cadenas lineales y desnaturaliza los

inhibidores de amilasas, lo que contribuye a aumentar la digestibilidad del almidón (Svihus et al., 2005).

La hidrólisis del almidón también depende de la especie vegetal por las diferencias que existen en el tamaño del gránulo de almidón, su estructura, T^a de gelatinización, etc. Por ejemplo, la digestibilidad aumenta si el gránulo de almidón es de menor tamaño, lo que explica la digestibilidad relativa de diferentes almidones (trigo > maíz > guisante > patata).

3.2.- Fracción PNAs

En general se admite que los tratamientos térmicos modifican la fracción soluble de los PNAs a costa de la fracción insoluble (Björck et al., 1984). De la misma forma se reconoce que los cambios que produce el PT sobre los PNAs tienen escaso efecto sobre la mejora del valor nutricional (Sun et al., 2006). Sin embargo, y como cabría esperar, no siempre los resultados van en el mismo sentido (Azizah y Zainon 1997) ya que los efectos sobre esta fracción dependen de la proporción que representa, de su composición, estructura y de las condiciones del proceso, resultando difícil prever los resultados de los tratamientos (Chang y Morris, 2006). En algunas variedades de altramuz, donde la fracción PNAs es mayoritaria, parece que los tratamientos térmicos vía húmeda pueden hidrolizar los galactanos, arabinogalactanos y polisacáridos pécticos mejorando el valor energético en aves (Watkinns et al., 1988 y Molina et al., 1983 citados por Brenes y Brenes, 1993).

3.3.- Proteína

Los tratamientos térmicos consiguen una parcial desestructuración de las proteínas. La pérdida de la estructura terciaria y cuaternaria deja más accesible a las enzimas proteolíticas la proteína realmente digestible (Davies et al., 1987) y además destruyen algunos inhibidores de proteasas endógenos. El aumento de la digestibilidad sucede simultáneamente con una disminución de la fracción de proteína soluble y con la eliminación o importante reducción de los factores antinutricionales termolábiles. El PT reduce la solubilidad del N de las diferentes harinas proteicas (Khattab y Arntfield 2009). Se estima que una disminución del 20 al 30% de la proteína soluble es un indicador de un tratamiento moderado (Putier, 1993).

En el caso de las proteínas de las leguminosas, no pocos autores están de acuerdo en que es necesario un tratamiento térmico para mejorar su digestibilidad en los animales monogástricos (Canibe y Eggum, 1997). La digestión de la proteína no es completa a nivel ileal y la fracción sin digerir llega al colon donde es fermentada por los microorganismos convirtiéndola en aminas, amoníaco, fenoles y otros compuestos de nitrógeno que pasan a

sangre y se eliminan en la orina. A diferencia del almidón, no parece que estos productos sean usados como nutrientes por los microorganismos (Mason, 1984).

La aplicación de calor para disminuir la degradabilidad ruminal de la proteína y aumentar el flujo de proteína indegradable al intestino, en el caso de los rumiantes, puede dar lugar a un aumento de la fracción indigestible. Por ello el tratamiento térmico debe hacerse de manera que se dañe lo menos posible a la proteína por la reacción de Maillard.

3.4.- Grasa

En oleaginosas y granos con contenidos altos en grasa, los tratamientos térmicos con aplicación de presión liberan la grasa encapsulada en las células vegetales haciéndola más accesible y aumentando el valor energético del producto. Al mismo tiempo se producen otros efectos, como una parcial y pequeña isomerización de ácidos grasos “cis” a “trans” y una desactivación de lipasas y peróxidasas que confiere una mayor estabilidad a los productos evitando su enranciamiento. Sin embargo, unas condiciones inadecuadas del proceso como el sobrecalentamiento o malas condiciones de secado pueden formar compuestos de oxidación como peróxidos, dímeros y polímeros de ácidos grasos y otros compuestos indigestibles y/o potencialmente tóxicos para los animales. Por ello el tratamiento térmico en las semillas oleaginosas debe hacerse de forma que el aceite se libere lo suficiente para permitir su utilización por los animales, pero sin que aumente el riesgo a ser oxidado de forma significativa (Apelt, 1987).

Distintos autores señalan que las habas de soja después del PT, y en particular de la extrusión, pueden alcanzar un valor energético equivalente al de la mezcla harina y aceite e incluso superior (Wiseman 1984; Lessire et al., 1988; Café et al., 2000). La accesibilidad del aceite constituye una diferencia mayor entre el haba de soja tostada y extrusionada.

3.5.- FANs

El PT en las leguminosas y en las semillas oleaginosas debe hacerse de tal manera que se reduzcan suficientemente los FANs termolábiles presentes, como lectinas e inhibidores de proteasas.

Estructuras como los taninos de guisantes o habas, constituidos por polifenoles condensados, vicina y convicina de las habas o glicinina y β -conglucina de la soja no son inactivadas mediante el PT y sólo la separación física de las partes que los contienen o el empleo de métodos químicos reducen significativamente su contenido. Sin embargo, en condiciones de alta presión y temperatura la extrusión de habas redujo el contenido en

taninos un 54% y las unidades inhibitoras de tripsina (UIT) un 53% (Alonso et al., 2000) lo que podría explicar la mejora de la digestibilidad de AA observada por Stein y Bohlke (2007) en el guisante con la extrusión. La extrusión reduce el contenido en glucosinatos del grano de colza, debido a la reducción del contenido en 4-hidroxiglucobrasicina y mirosinasa (Fenwick et al., 1986) y disminuye el contenido de gossipol libre en la semilla de algodón en un grado que depende de las condiciones de T^a y presión (Bernard y Calhoun, 1997).

La extensión de la reducción de los FANs depende de las condiciones de cada tratamiento, considerándose la granulación tradicional insuficiente para la reducción significativa de estos compuestos (Van del Poel, 1991). En cuanto al efecto sobre las micotoxinas parece que las aflatoxinas, las fumonisinas y el DON son resistentes a los tratamientos térmicos, mientras que la ocratoxina A parece bastante sensible, sobre todo en ausencia de agua (Guerre, 2000).

3.4.- Aspectos microbiológicos

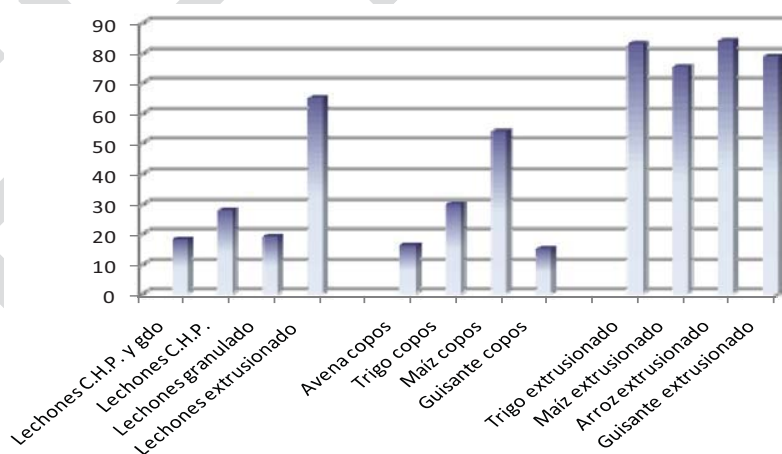
El PT reduce o elimina las bacterias patógenas presentes en los alimentos que pueden causar problemas y ocasionar un gasto energético. Distintos trabajos han mostrado el efecto positivo del PT sobre la contaminación microbiológica y sobre la capacidad de reducción o eliminación de Salmonella (Beumer y Van der Poel, 1997). Ferchal et al. (2003) demuestran que en un pienso de ponedoras, tratamientos mediante calor a 80°C en cámara de acondicionamiento y posterior granulación y migajado reducen drásticamente el conteo de flora aerobia mesófila, enterobacterias y hongos en comparación al pienso control en harina.

En resumen, el PT puede degradar los polisacáridos pécticos que actúan como adhesivos de las paredes celulares aumentando la digestibilidad de los PNAs, disminuyendo la necesidad de masticación y facilitando el ataque de los jugos gástricos y de las enzimas a otras estructuras. En mayor o menor grado, destruye la matriz proteica y lipídica que recubre los gránulos de almidón facilitando su hidrólisis y los enlaces de hidrógeno entre cadenas de amilosa, aumentando la digestibilidad del almidón. La ruptura de la pared celular y la pérdida de la estructura terciaria y cuaternaria de las proteínas posibilitan el aumento de digestibilidad de proteína. Además estos procesos destruyen los insectos presentes en las materias primas, manteniendo su integridad y disminuyendo la carga bacteriana. Sin embargo, la falta de control de estos procesos facilita interacciones indeseables, como la reacción de Maillard, que juegan en sentido contrario. El impacto de estos procesos sobre el valor energético es muy variable y no es exactamente conocido ya que depende de múltiples factores.

4. MEDIDAS DEL EFECTO DE LOS TRATAMIENTOS TECNOLÓGICOS

Existen diferentes ensayos de laboratorio para determinar el efecto del PT sobre el valor nutricional de las materias primas. Podríamos clasificarlos en cualitativos y cuantitativos. Los primeros se basan en el análisis microscópico de las estructuras vegetales y, en particular, del almidón. Los segundos se basan en la susceptibilidad al ataque enzimático de las α -amilasas en diferentes condiciones, en las propiedades de solubilidad, en la capacidad de absorción de agua. También se usan técnicas de análisis NIR (Tecaliman 1988). La puesta a punto de métodos *in vitro* capaces de predecir la digestibilidad del almidón puede ser de una gran ayuda en la evaluación nutricional de los alimentos. Un método simple es la determinación de la tasa de gelatinización del almidón (Medel et al., 1999) si bien, partiendo del mismo principio, la metodología puede hacerse más compleja, existiendo métodos de medida de la cinética de degradación y cálculo del valor de la fracción fácilmente hidrolizable (FFH) por extrapolación a un tiempo cero. El análisis requiere la normalización de la molienda y la enzima empleada para evitar errores. En un estudio realizado por TECALIMAN (1996) se compara el efecto de diferentes tratamientos tecnológicos sobre piensos y materias primas mediante la medida de la variación de la FFH sobre el producto sin tratar (figura 2), observando la clara jerarquía establecida y la importancia de la estructura inicial del almidón.

Figura-2.- Aumento de la Fracción Fácilmente Hidrolizable (FFH) del almidón (%) durante distintos tratamientos tecnológicos (TECALIMAN, 1996)



Otros métodos se basan en la clasificación del almidón según Englyst et al. (1992). Así Murray (2001) analiza *in vitro* el contenido de las distintas fracciones de almidón antes y después de la extrusión (cuadro 2) según el procedimiento descrito por Muir y O'Dea (1992, 1993).

Cuadro 2.- Contenido en fracciones de almidón (% MS) crudo y después de la extrusión en granos de cereales y almidón de patata (Murray, 2001)

| | Almidón total | Fracciones de almidón | | |
|-------------------------------------|------------------|------------------------|------------------|-----------------|
| | | RDS ^a | SDS ^b | RS ^c |
| Cebada | 51,6 | 23,2 (45) ^d | 11,4(22) | 17 (33) |
| Cebada extrusionada LT ^e | 48,6 | 30,3 (62,3) | 13,5 (27,8) | 4,8 (9,9) |
| Cebada extrusionada HT ^f | 58,2 | 47,8 (82,1) | 4,4 (7,6) | 6,0 (10,3) |
| Maíz | 72,8 | 34,6 (47,5) | 14,6 (20,1) | 23,6 (32,4) |
| Maíz extrusionado LT | 73,7 | 54,2 (73,5) | 13,1(17,8) | 6,4 (8,7) |
| Maíz extrusionado HT | 74,2 | 65 (87,6) | 7,8 (10,5) | 1,4 (1,9) |
| Almidón de patata | 86,9 | 24,4(28) | 2,6(3,0) | 60(68,9) |
| Almidón de patata extrusionado LT | 94,6 | 65,4(69,1) | 27(28,6) | 2,2(2,3) |
| Arroz | 80,8 | 36,9(45,6) | 17 (21,1) | 26,9(33,3) |
| Arroz extrusionado LT | 87,9 | 57,7(65,7) | 22,9(26) | 7,3(8,3) |
| Arroz extrusionado HT | 84,6 | 76,1(90,1) | 4,5(5,3) | 4,0(5,7) |
| Sorgo | 74,1 | 27,3(36,8) | 13(17,5) | 33,8(45,6) |
| Sorgo extrusionado LT | 75,4 | 49,1(65,1) | 10,9(14,4) | 15,4(20,5) |
| Sorgo extrusionado HT | 77,5 | 70,0(90,3) | 5,4(7,0) | 2,1(2,7) |
| Trigo | 62,1 | 15,5 (25,0) | 33,6(54,1) | 13,0(20,9) |
| Trigo extrusionado LT | 66,7 | 54,6(81,9) | 6,0(9,0) | 6,1(9,1) |
| Trigo extrusionado HT | 71,3 | 65,5(91,9) | 5,2(7,3) | 0,6(0,8) |

^aAlmidón rápidamente digestible.^bAlmidón lentamente digestible.^cAlmidón resistente.^dLos valores entre paréntesis se corresponden con el % de cada fracción.^eLT: extrusión a baja temperatura: 79-94°C.^fHT: extrusión a alta temperatura: 124-145°C.

El efecto de los tratamientos sobre la proteína se puede predecir por diferentes métodos, entre ellos la solubilidad en KOH, el índice de dispersibilidad de la proteína (PDI), digestibilidad péptica, medida de UIT, determinación de la lisina reactiva mediante fluorodinitrobenzeno (FDNB) (Carpenter, 1960; Peterson y Warthesen, 1979), medida de la adsorbancia del extracto acuoso (Eichner y Wolf, 1983, citado por Hsu y Satter, 1995) o lisina disponible (Hsu y Satter, 1995). Normalmente no se usa un único método.

La mejora de la digestibilidad de la grasa se puede estimar mediante la diferencia de grasa extraída por análisis mediante Soxhlet y mediante hidrólisis previa (Putier, 1993).

5.- EFECTOS DEL PROCESADO TÉRMICO EN AVICULTURA

A diferencia de otros animales, las aves tienen dos características que se deben tener en cuenta para comprender el efecto del PT. La primera es su comportamiento alimentario y la segunda, la presencia de la molleja como parte integrante del aparato digestivo. En las aves, aunque el sabor y el olor tienen su influencia, no son los estímulos más importantes para el consumo ya que intervienen otros factores más complejos. El ave es muy dependiente del aspecto visual de los alimentos por lo que forma y color tienen gran importancia. Además el pico es utilizado como una forma táctil de investigar el pienso y, cuando el ave decide consumirlo, lo ingiere y traga sin masticarlo ni mezclarlo con la saliva. Por ello el pienso debe estar constituido por partículas de determinada forma, tamaño y características (Picard et al., 2000). En lugar de dientes, el ave usa la molleja para reducir el tamaño de las partículas de los alimentos y se ayuda de partículas sólidas que actúan como dientes de molino, sin cuya presencia se pierde digestibilidad. Ello supone, por ejemplo, que la granulación no sea necesaria desde un punto de vista de la digestión (Picard et al., 2000). Mateos et al. (2005) y Behnke y Beyer (2002) hacen una revisión extensa del efecto del tamaño de partícula y de la granulación en avicultura, nosotros nos referiremos al PT.

Los objetivos del PT van dirigidos a facilitar la digestión del almidón en el caso de los cereales o a eliminar los FANs y aumentar la digestibilidad de los nutrientes en el caso de semillas de oleaginosas, estando entre las anteriores la situación de las leguminosas. En las aves el PT aumenta la capacidad de retención de agua (CRA) del quimo (González Alvarado et al., 2007, 2008), sin embargo no siempre se ha observado un aumento de la viscosidad. Así mientras que González Alvarado (2007) y Marsman (1997) no observan efectos, Abb El-Khalek y Janssens (2010) indican que en el caso de las aves un aumento de la tasa de gelatinización implica un aumento de la viscosidad y de las propiedades de formación de geles, lo que puede tener diferentes consecuencias en las aves debido a:

- Retraso del vaciado gástrico.
- Posible reducción de la velocidad de absorción en el intestino delgado.
- Aumento de las secreciones endógenas.
- Proliferación de microorganismos en el tracto digestivo inferior.
- Disminución de la velocidad de difusión de sustratos y enzimas digestivas lo que obstaculiza su interacción efectiva en la superficie de la mucosa.

El almidón es el componente mayoritario en las dietas para aves y su digestibilidad en el tracto gastrointestinal (TGI) depende de muchos factores. La modificación del almidón por el PT puede tener efectos positivos al aumentar la tasa de gelatinización y facilitar la digestión, o negativos al aumentar el contenido en almidón retrogradado (RRS), resistente a la acción de las α -amilasas (Eerlingen et al., 1994) y, particularmente importante en la amilosa, lo que puede modificar la respuesta *in vitro* e *in vivo* de las aves (Svihus et al., 2005).

Aunque las aves digieren sin ningún problema el almidón (Zimonja y Svirus, 2009), algunos investigadores han mostrado que el almidón no es totalmente digerido en el caso de los pollos (Svihus et al., 2005) y que la gelatinización obtenida mediante un PT adecuado aumentaría su digestibilidad. Sin embargo, los resultados de Plavnik y Sklan (1995) y de otros autores no muestran estas diferencias en la práctica. El PT, en general, mejora la digestibilidad del almidón en cereales y leguminosas y puede mejorar la digestibilidad de la grasa en el caso del maíz, sin embargo los resultados no son siempre positivos, por ello en general no se recomienda utilizar cereales procesados por calor en dietas para ponedoras o aves de carne salvo durante los primeros días de vida (Mateos et al., 2005).

Además de que como consecuencia del PT se pueden formar dextrinas, péptidos y otras estructuras de bajo peso molecular a nivel digestivo, en la mayor parte de los casos se liberan glucosa, pentosas y/o ácidos urónicos procedentes de los PNAs de las paredes celulares. Estos compuestos liberan menos energía que la glucosa (Longstaff et al., 1988) y contribuyen menos que el almidón al rendimiento energético. Por ejemplo Savory (1992) sugiere que los AGV producidos por la fermentación de la arabinosa contribuyen más al valor EMAn que la arabinosa en sí misma.

La respuesta al PT depende de cada materia prima y, aunque su necesidad sea discutible en los cereales, en las semillas oleaginosas y, especialmente en la soja, es diferente. El objetivo, en este caso, es destruir los FANs y liberar el aceite contenido dentro de los esferosomas mediante la ruptura de su pared celular. Desde hace años se ha estudiado el efecto del PT sobre el valor energético de las habas de soja en aves

(Wiseman, 1984. McNab, J., 1985; Lessire et al., 1987) (cuadro 3). Es difícil comparar los resultados obtenidos basándose en el método de procesado sin tener información sobre las condiciones aplicadas. Para Wiseman (1984) no parece que un tratamiento sea superior a otro y siempre que se cumplan unas condiciones mínimas de humedad, temperatura y tiempo, el proceso en sí es menos importante, aunque estas variables pueden alterarse por la presión.

Cuadro 3.- Efectos de diferentes tratamientos sobre el valor energético de la soja full-fat en aves. Adaptado de varios autores.

| | Lessire et al. (1988) ¹ | | | McNab (1985) ¹ | | | Wiseman (1984) ² | |
|----------------------------------|------------------------------------|-------------|-----------------|---------------------------|----------------|-----------------|-----------------------------|-----|
| | EMA/ kg MS | EMA/EB % | VR ³ | MEVn/ kg MS | EMVn/ EB, % | VR ⁴ | EMA/ kg SF | VR |
| Haba cruda | 3620 | 64 | 100 | 2900 | 53 | 100 | 3226 | 100 |
| Extrusión seca | 4011 | 71,5 | 108 | 3912 | 69 | 135 | 4110 | 127 |
| Extrusión seca doble | 4235 | 76,7 | 117 | | | | | |
| Extrusión Húmeda | | | | 3881 | 69 | 134 | 4278 | 133 |
| Jet Sploder | 3745 | 66,5 | 103 | 3565 | 64 | 123 | 3513 | 109 |
| Tostado | 3735 | 66,4 | 103 | 3915 | 69 | 135 | 3728 | 116 |
| Tostado vapor + Grd ⁵ | 3863 | 69,5 | 107 | | | | | |
| Microondas + Grd | 3883 | 71,7 | 107 | | | | | |
| Micronización | | | | 3537 | 63 | 122 | 3680 | 114 |
| Microniz. húmeda | | | | 3750 | 67 | 129 | | |
| Harina soja + aceite | | | | 3962 | 70 | 137 | | |

¹Determinada en gallos adultos. ²Determinada en pollos de 21d. ³Valor relativo en relación a las habas de soja crudas. ⁴Valores tomados de Lessire (1992). EMV: Energía metabolizable verdadera Sibbald, 1976). ⁵Grd: granulación.

Las diferencias en los resultados publicados obedecen al método de procesado y a los diferentes sistemas de medida del valor energético en aves. Kahn et al. (1987) demuestran que los valores de EMA en gallos son más altos que en pollos (de 7 a 17%), en cambio, la mejora del PT se refleja mejor en el valor EMA de pollos jóvenes que en los gallos (11,8 vs 4,2%), debido a la diferencia de digestibilidad de la grasa entre las aves adultas y las jóvenes, y al aumento de su digestibilidad como consecuencia del PT. A parecidas conclusiones llegan Café et al. (2000) (cuadro 4). Sin embargo, Lessire et

al.(1988) indican que el valor energético depende sobre todo del nivel de incorporación de las habas de soja en el pienso, observando una disminución a medida que aumenta la inclusión.

Cuadro 4.- Valores medios de Energía Metabolizable Aparente (EMAn) y verdadera (EMVn) (Kcal/Kg MS) y Digestibilidad Aparente (DA) o verdadera (DV) de la grasa bruta (MG) (%) de soja full-fat sometidos a procesos diferentes vs harina y aceite, medidos en aves (Café et al., 2000).

| | Pollos AMEn | Gallos AMEn | Gallos TMEn | Pollos DA MG | Gallos DA MG | Gallos DV MG |
|----------------------|-------------------|----------------|----------------|--------------------|-------------------|-------------------|
| Harina soja + aceite | 3321 ^a | 3548 | 3760 | 76,5 ^{ab} | 87,8 ^a | 93,8 ^a |
| Habas extrusionadas | 3630 ^b | 3961 | 3887 | 79,6 ^a | 92,4 ^b | 92,1 ^a |
| Habas tostadas | 3383 ^a | 3561 | 3765 | 73,2 ^b | 72,6 ^b | 77,1 ^b |

En cada columna, valores con letras diferentes significan valores estadísticamente diferentes, P<0,01.

Además, el PT elimina los FANs presentes en las habas de soja aumentando la digestibilidad media de los aminoácidos de forma similar a la energía (McNaab, 1985).

Los efectos conseguidos con la semilla de colza no siguen el mismo patrón que en las habas de soja, debido al tamaño del grano y a su diferente composición. En este caso el PT mejora más el valor energético por su efecto sobre la textura del grano que por el efecto del calor. Un PT sobre un grano aplastado o correctamente molido de una colza con bajo contenido en glucosinolatos puede ejercer un efecto negativo sobre su valor energético. Entre los PT, la elección parece ser la extrusión por destruir las estructuras físicas del grano de colza (Leclercq et al., 1989). Además, dado que la mirosinasa hidroliza los glucosinolatos formando productos de degradación tóxicos, es necesario un PT adecuado. La granulación sólo destruye parcialmente la mirosinasa, sin embargo la extrusión o la expansión la elimina completamente, pero se debe evitar el sobreprocesado térmico que perjudicaría a los resultados esperados (Fasina et al., 1997). Los efectos anteriores han sido comprobados por Lichovnikova et al. (2004) en piensos basados en trigo, guisante y semilla de colza, en los que observan que la extrusión seca mejora la digestibilidad de la grasa (93,7 vs 80,7%; P < 0,001) y de la proteína (62,9 vs 58,4%, NS) sugiriendo que estos efectos podrían deberse a la liberación de la grasa de la semilla de colza y a la destrucción de la mirosinasa y de los glucosinolatos del grupo Indol.

Aunque no hay un consenso general, el PT aumenta la solubilidad de los PNAs presentes en la dieta, lo que puede contribuir a aumentar la viscosidad intestinal. La

adición de enzimas puede contribuir a la disminución de la viscosidad y formación de geles en dietas PT basadas en cebada o trigo (Scott et al. 2003; Vukic Vranjes y Wenk, 1995; Mateos et al. 2005).

Además del efecto sobre los resultados zootécnicos, los tratamientos térmicos influyen sobre la calidad bacteriológica de los piensos y, cuando éste es el objetivo, la consideración económica sobre la mejora de digestibilidad y resultados pasa a un segundo plano.

5.1.- Efectos en gallinas ponedoras

Desde un punto de vista digestivo, un pienso con una molienda gruesa es suficiente para las gallinas de puesta (Picard et al., 2000), sin embargo la granulación evita que el ave gaste demasiado tiempo en elegir las partículas y constituye una manera de reducir el consumo y las pérdidas de pienso (Zimonja y Svirus, 2008).

Van Barneveld et al. (2005) estudian el efecto de la extrusión y la expansión sobre el valor energético de distintos cereales en gallinas ponedoras (cuadro 5); los resultados son muy diferentes según el cereal, variedad, proceso e incluso muestra. En el caso del trigo se obtienen mejoras en algunas variedades, en el caso de sorgo los resultados no se ven afectados, y en el arroz hay una disminución del valor en el caso de la expansión.

Cuadro 5.- Contenido en EMA (kcal/kg MS) de cereales crudos o después del procesado térmico mediante extrusión o expansión en gallinas ponedoras. Adaptado de Van Barneveld et al. (2005)

| | Crudo | Extrusionado | Expandido |
|------------------------------------|-------------------|--------------------|-------------------|
| Trigo (variedad Oxley) | 3480 | 3571 | 3504 |
| Trigo (variedad H45) | 3119 ^a | 3513 ^b | 3618 ^b |
| Trigo (variedad H45 ¹) | 3227 | 3425 | 3414 |
| Cebada, muestra 1 | 3064 ^a | 2954 ^a | 3439 ^b |
| Cebada, muestra 2 | 3456 ^a | 3372 ^{ab} | 3000 ^b |
| Sorgo | 3659 | 3729 | 3678 |
| Arroz integral | 3819 ^a | 3840 ^a | 3384 ^b |

¹Screenings. En cada línea, valores con letras diferentes significan valores estadísticamente diferentes, P<0,05.

Los resultados en el caso de la cebada son muy dispares e incluso negativos. De acuerdo con lo observado por Vukic Vranjes y Wenk (1995) en pollos, el almidón de la cebada es más susceptible a la retrogradación cuando se aplican estos procesos, además la respuesta negativa a la expansión podría indicar una mayor capacidad de hidratación del almidón de cebada que otros cereales.

Ferchal et al. (2003) (cuadro 6) encuentran una mejora del valor EMAn del 3,3% con el PT a 80°C, sin embargo en el caso de la proteína no se vio mejora o fue negativa consecuencia de la reacción de Maillard y de la disminución de la digestibilidad de los aminoácidos (Parsons et al., 1992).

Cuadro 6.- Influencia de los tratamientos térmicos¹ de un pienso de puesta sobre el valor EMA (kcal/kg MS) y digestibilidad fecal de la proteína (DFA PB, %) medida en gallos y sobre los resultados productivos (Ferchal et al., 2003)

| | Harina sin tratar | Tratamiento térmico 10s. | Tratamiento térmico 40s | Granulado y migajado | P |
|------------------|--------------------|--------------------------|-------------------------|----------------------|-------|
| EMA | 2891 ^a | | 2997 ^b | 2977 ^b | 0,001 |
| DFA PB, | 84,2 ^b | | 82,2 ^b | 79,5 ^a | 0,001 |
| MS heces, % | 25,3 ^{ab} | 24,4 ^b | 27,9 ^a | 25,8 ^{ab} | 0,001 |
| Consumo (g) | 114,9 ^c | 111,9 ^b | 107,8 ^a | 110,6 ^b | 0,01 |
| % puesta | 88,1 ^c | 85,1 ^b | 83,7 ^a | 86,3 ^b | 0,01 |
| Masa de huevo, g | 58,1 ^c | 56,2 ^b | 55,3 ^a | 56,6 ^b | 0,01 |
| I.C. | 1,98 ^a | 2,00 ^a | 1,96 ^b | 1,96 ^b | 0,01 |

¹BOA Compactor

Las diferencias de consumo relacionadas con el valor energético de los alimentos provocan una subcarencia en aminoácidos responsable del deterioro de los resultados, lo que demuestra el distinto efecto que el tratamiento puede tener sobre las distintas fracciones y la necesidad de tener en cuenta estos cambios a nivel nutricional ya sea en el valor de las materias primas o en el diseño de las dietas.

5.2.- Efectos en pollos de engorde

En el caso de los broilers, aunque el pienso sea granulado, las partículas deben ser gruesas para que haya una buena motilidad y desarrollo intestinal lo que constituye un difícil reto tecnológico ya que, a pesar de una molienda gruesa, la granulación puede

reducir el tamaño de las partículas (Svirus y Zimonja, 2008). Según Kilburn y Edwards (2001) la granulación mejora el valor energético de las dietas.

Al igual que con las ponedoras, Van Barneveld et al. (2005) estudian el efecto de la extrusión y la expansión sobre el valor energético de distintos cereales en broilers de 21 d (cuadro 7) llegando a parecidas conclusiones: respuesta diferente en distintas muestras de trigo, menor valor EMA de la cebada con el PT, y falta de respuesta o respuesta negativa en el caso de sorgo y arroz.

Cuadro 7.- Contenido en EMA (kcal/kg MS) de cereales crudos o después del procesado térmico mediante extrusión o expansión en broilers. Adaptado de Van Barneveld et al. (2005)

| | Crudo | Extrusionado | Expandido |
|---------------------------|-------------------|---------------------|-------------------|
| Trigo (variedad Oxley, 1) | 3564 | 3621 | 3592 |
| Trigo (variedad Oxley, 2) | 3334 ^a | 3556 ^b | 3666 ^c |
| Trigo (variedad H45) | 3621 | 3578 | 3542 |
| Cebada, muestra 1 | 3217 ^a | 2574 ^b | 2728 ^b |
| Sorgo | 3909 | 3891 | 3834 |
| Arroz integral | 4227 | 4163 | 4050 |

Valores con superíndices diferentes significan valores estadísticamente diferentes, $P < 0,05$.

Los resultados obtenidos con el PT son variables. En relación a la energía, la mayoría de los autores coinciden en que se mejora con los PT. Así, Plavnik y Sklan (1995) en broilers de 21 d observan que la extrusión del pienso mejora la digestibilidad de la energía y aumenta el valor EMA y EMAN en 1,5 y 3,5% ($P < 0,05$) y, que la extrusión o expansión de trigo o cebada y su incorporación en las dietas basales aumenta estos mismos valores en 1,5 y 2,5% ($P < 0,05$), respectivamente, indicando que la cebada es peor digerida que el trigo y que la expansión del maíz no tuvo ningún efecto. Estos resultados estarían de acuerdo con la escasa variación en la digestibilidad del almidón crudo del maíz vs el tratado térmicamente observada en pollos por Gracia et al. (2003), quienes ven diferencias únicamente antes de los 15 d de edad (1-1,9%, $P < 0,05$). En relación al maíz, Moritz et al. (2005) incluyen cantidades variables de maíz extrusionado (92% de gelatinización) en dietas para broilers y observan una mejora del valor EMAN de la dieta únicamente con los mayores niveles de inclusión. Además, los pollos que consumieron dietas con maíz extrusionado tuvieron mayor crecimiento y consumo y peor I.C. los primeros 21 d que los que consumieron maíz sin procesar, mientras que la granulación sólo afectó al peso vivo.

Los resultados observados podrían deberse bien a una mayor gelatinización del almidón del maíz o bien a una reducción del tamaño de partícula consecuencia de la extrusión o a ambas, aunque no parece que tengan que ver con la modificación de PNAs asociada al tratamiento térmico, concluyendo que la extrusión del maíz puede disminuir la utilización de nutrientes en broilers las primeras 3 semanas.

Vukic Vranjes y Wenk (1995) señalan que en la primera semana de vida los pollos alimentados con cebada extrusionada consumieron más agua y el valor EMAn disminuyó de 7-21 d así como la digestibilidad de grasa y proteína, indicando que la extrusión redujo el valor de EMAn en 196 kcal/kg MS. Sin embargo, indican un efecto sinérgico de la extrusión con la incorporación de enzimas. Gracia et al. (2003), por el contrario, comprueban que el procesado térmico de la cebada mejora el valor EMAn y el crecimiento los primeros 8 días, a pesar del aumento de la viscosidad intestinal, detectando también un efecto sinérgico con las enzimas. Sin embargo, García et al. (1998) no observan ninguna interacción entre el tratamiento térmico de la cebada y la adición de enzimas en pollos.

González- Esquerra y Leeson (2000) observan una mejora del valor EMAn de la harina de lino del 21% en pollos adultos al tratarla con calor.

Parecen aceptarse los efectos positivos de la extrusión sobre la digestibilidad del almidón, al menos cuando el animal es más joven. Sin embargo, los tratamientos agresivos inactivan las enzimas endógenas presentes en los cereales, como xilanasas y fitasas, y ello puede llevar a aumentar los problemas de viscosidad y de disponibilidad del fósforo (Carré et al., 2007). Las variaciones del valor EMAn del trigo se deben a diferencias en medidas individuales, variedades, tecnología del proceso y genética, sin embargo, son necesarios más estudios para conocer las interacciones y su relación con la digestión y otros criterios fisiológicos como el crecimiento diferenciado de los órganos (Carré et al., 2007).

Zimonja y Svirus (2009) estudian el efecto de procesar trigo y avena en distintas condiciones en piensos de broilers (cuadro 8). La extrusión mejoró la digestibilidad en todos los tramos digestivos, aunque la respuesta fue mayor en el trigo, lo que pudo deberse a un mayor grado de gelatinización debido a un menor contenido en grasa de este cereal en relación a la avena o bien a una desactivación de los inhibidores de amilasas presentes en el grano. Los mayores valores de digestibilidad aparente (DA) para la avena podrían guardar relación con los efectos antinutricionales de la fibra soluble del trigo, lo que podría eliminarse mediante la adición de enzimas y tendría un efecto sinérgico, aunque hay otros factores implicados en la respuesta. El aumento de la gelatinización consecuencia de la extrusión es más efectivo en los segmentos iniciales del tracto gastrointestinal. Este estudio

también confirma el escaso efecto de la granulación sobre la gelatinización de acuerdo con lo indicado por Svihus et al. (2005).

Cuadro 8.- Resultados zootécnicos, peso de órganos, digestibilidad aparente del almidón (DA A, %) y valor EMAn (Kcal/Kg) en pollos alimentados con dietas basadas en trigo y avena tratadas por distintos procesos (Zimonja y Svihus, 2009).

| | Trigo | | | Avena descascarada | | |
|--------------------------------------|--------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | GF ¹ | GV ² | EX ³ | GF | GV | EX |
| Ingesta 11-31d (g) | 2251 ^{AB} | 2343 ^A | 2270 ^{AB} | 2167 ^B | 2270 ^{AB} | 2230 ^{AB} |
| Ganancia peso 11-32d (g) | 1464 | 1519 | 1522 | 1487 | 1557 | 1516 |
| I.C. | 1,54 ^A | 1,55 ^A | 1,49 ^{AB} | 1,46 ^B | 1,46 ^B | 1,47 ^{AB} |
| Peso molleja limpia g/g ⁴ | 1,39 | 1,50 | 1,41 | 1,43 | 1,38 | 1,47 |
| EMAn | 2940 ^B | 2964 ^B | 3059 ^{AB} | 3083 ^{AB} | 3131 ^A | 3155 ^A |
| DJA A ⁵ | 76 ^B | 77 ^B | 88 ^A | 86 ^A | 88 ^A | 91 ^A |
| DIA A ⁶ | 83 ^B | 81 ^B | 95 ^A | 96 ^A | 97 ^A | 99 ^A |
| DTA A ⁷ | 97 ^B | 98 ^B | 99 ^A | 100 ^A | 100 ^A | 100 ^A |

¹GF: Granulado en frío. ²GV: Granulado con vapor. ³EX: Extrusionado. ⁴g molleja/g peso vivo. ⁵Digestibilidad del almidón en yeyuno. ⁶Digestibilidad ileal del almidón. ⁷Digestibilidad en el total del tracto intestinal del almidón.

Valores en la misma fila con superíndices diferentes significan valores estadísticamente diferentes, P < 0,05.

En varios estudios, González Alvarado et al. (2007, 2008) estudian el efecto del PT de arroz y maíz sobre los resultados zootécnicos en pollos y comprueban que únicamente se produce algún efecto durante los 4 primeros días. De 1 a 4 d y de 8 a 14 d observan que el PT del maíz empeora el IC, en cambio no sucedió lo mismo con el arroz. Los primeros 21d el procesamiento del maíz aumentó la ingesta de pienso, de acuerdo con lo indicado por Moritz et al. (2005), pero la redujo en el arroz. En relación a los efectos del PT sobre el peso de los órganos digestivos, observan que el proventrículo aumenta de peso. El tratamiento del maíz redujo la longitud del intestino delgado, lo que no sucedió con el arroz y, por ello, el peso del tracto digestivo fue mayor al procesar el arroz y no hubo diferencia al procesar el maíz. El PT no modificó el pH de la molleja, pero en el caso del maíz disminuyó su peso y aumentó el contenido en humedad de su digesta y el peso del hígado, sin que se vieran estos efectos o fueran menores con el PT del arroz. El aumento del peso del hígado con el PT del maíz también fue observado por Gracia et al. (2003), aunque desapareció al añadir enzimas. Las explicaciones a estos efectos pueden estar en

que el PT aumenta la fracción de PNAs solubles y el grado de gelatinización del almidón y, como consecuencia el grado de hidratación, aumentando la humedad de la digesta de la molleja; al mismo tiempo el volumen de alimento que entra al estómago es mayor, por lo que parece lógico su incremento de peso. Por último, el aumento del peso del hígado podría tener relación con un aumento de la producción de sales biliares como consecuencia de una mayor viscosidad de la digesta. El que estos efectos no se vean en el arroz puede guardar relación con la estructura de su almidón, más cristalina y con un menor contenido en grasa y PNAs que el maíz (Tester et al., 2006), y donde el efecto del PT, a pesar de la ruptura de los enlaces entre cadenas lineales de almidón, no aumentaría la capacidad de retención de agua (CRA) (Svihus, 2005).

González Alvarado et al. (2008) concluyen que el procesado tiene pocas consecuencias en el desarrollo de los distintos segmentos y órganos digestivos. El PT aumentó la retención de extracto etéreo un 1,5 % y el valor EMAn un 1%, sin embargo el responsable de estas mejoras fue el maíz. En el arroz, el PT disminuyó el valor de retención aparente de MS, MO y EMAn entre un 2 y un 2,5% y no afectó al resto. El PT del maíz mejoró los valores de retención aparente de MS, MO, EE y EMAn un 2,8, 2,3, 3,3 y 4,8 % respectivamente (cuadro 9).

Cuadro 9.- Influencia del cereal y procesado térmico en la retención aparente total de nutrientes (%) y contenido EMAn (kcal/kg) de las dietas en pollos de 18 d (González Alvarado et al., 2007)

| | Retención aparente total (%) | | | | |
|--------------------|------------------------------|-------------------|------|-------------------|-------------------|
| | MS | MO | N | GB | EMAn |
| <u>Cereal</u> | | | | | |
| Crudo | 74,4 | 78,9 | 68,5 | 85,4 | 3004 |
| PT | 74,5 | 79,0 | 68,7 | 86,7 | 3033 |
| <u>Cereal x PT</u> | | | | | |
| Maíz crudo | 70,6 ^d | 75,3 ^d | 66,7 | 83,1 ^c | 2872 ^d |
| Maíz PT | 72,6 ^c | 77,1 ^c | 68,2 | 85,9 ^b | 3010 ^c |
| Arroz crudo | 78,2 ^a | 82,5 ^a | 70,2 | 87,7 ^a | 3135 ^a |
| Arroz PT | 76,4 ^b | 80,9 ^b | 69,1 | 87,5 ^a | 3055 ^b |

Valores en la misma columna con superíndices diferentes significan valores estadísticamente diferentes, $P < 0,05$.

Las causas de la mejora en el maíz pueden ser debidas a la ruptura de la matriz proteica que protege los gránulos de almidón y a la ruptura de los enlaces entre lípidos y amilosa (Plavnik and Sklan, 1995; Svihus et al., 2005; Van Barneveld et al., 2005) que serían los responsables de dejar los nutrientes más accesibles. La digestibilidad del arroz, en cambio, es de por sí muy alta y, por tanto, no cabe esperar mejoras a causa del procesado (Vicente et al., 2008). Además la grasa en este cereal se encuentra libre ya que la mayor parte ha sido retirada en la separación de germen y pericarpio. Unas condiciones inadecuadas, con exceso de calor, pueden causar el efecto contrario formando complejos entre lípidos y amilosa, compuestos de Maillard y almidón retrogradado, por ello es necesario establecer las condiciones óptimas de tratamiento para cada cereal.

La respuesta obtenida en resultados productivos al tratar térmicamente los cereales ha sido muy variable. Fancher et al. (1996) observan que la expansión a 90°C de un pienso a base de maíz-soja mejora los resultados. Douglas et al. (1991) ven mejoras con micronización a 150°C. Niu et al. (2003) indican que la productividad de broilers mejoró al micronizar el trigo entre 90 y 105°C, mientras que al aumentar la Tª a 120°C los resultados fueron peores. En cambio, Vukic Vranjes y Wenk (1995) obtienen peores resultados en broilers de 7 a 21 d cuando los cereales fueron extrusionados. Las razones de estas discrepancias ya han sido mencionadas: condiciones experimentales, tipo y variedad de cereal y distintas condiciones de los PT pueden ser los responsables.

Por último, Marsman et al. (1997) comparan el efecto del tostado o extrusión de la harina de soja y observan que la extrusión disminuye el I.C. un 3,7% sin afectar ni a la ganancia de peso ni al consumo. La causa de esta mejora puede estar en el aumento de digestibilidad ileal aparente que observaron en PB y PNAs (6,4 y 134% respectivamente. $P < 0,001$). La extrusión de la harina de soja incrementó un 21% la CRA, pero no modificó la viscosidad del quimo debido a las características de los PNAs de la soja. Al estudiar el efecto de diferentes fuerzas de presión en la extrusión, no se observan cambios en los resultados, aunque hay una tendencia a empeorar el I.C. con las condiciones más agresivas. A medida que aumentó la presión en el extruder aumentó la viscosidad del quimo, su contenido en PNAs y su CRA, aunque estas variaciones no fueron suficientes para modificar los valores de digestibilidad, lo que explicaría la nula respuesta en la mejora de los resultados productivos.

6.- EFECTOS DEL PROCESADO TÉRMICO EN PORCINO

En porcino, donde más se ha estudiado el efecto del PT ha sido en lechones. El lechón destetado precozmente tiene una capacidad digestiva limitada durante los primeros

días postdestete que va evolucionando con el tiempo hasta alcanzar su madurez fisiológica. Con el aumento del consumo de pienso, el tamaño del páncreas se desarrolla y aumenta la actividad enzimática, principalmente α -amilasa (Kelly et al., 1991). Al destete la producción de HCl en el estómago es reducida, y también la de ácido láctico, por lo que el empleo de almidones gelatinizados podría favorecer un menor pH intestinal y disminuir el riesgo de problemas digestivos.

En general se acepta que los tratamientos térmicos tienen un efecto positivo sobre los alimentos para porcino, pero como en otras especies, las respuestas son muy variables. En el cuadro 10 figura un resumen de resultados publicados en lechones.

En general el PT de los cereales mejora la productividad y la digestibilidad de los nutrientes (Wiseman, 1993). Esta mejora es mayor los primeros días después del destete (Aumaitre, 1976; Hongtrakul et al., 1998; Medel et al., 1999, 2000, 2002; Royer et al., 2003), lo que podría guardar relación con la funcionalidad del tracto gastrointestinal que no está completamente desarrollado hasta al menos 2 semanas post-destete (Jensen et al., 1997). Para los lechones jóvenes, Champ y Colonna (1993) recomiendan desestructurar los gránulos de almidón.

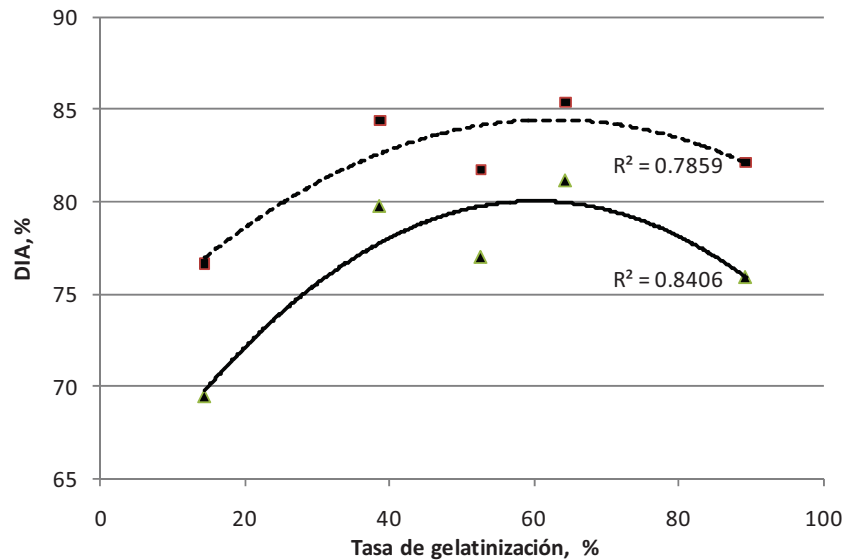
En el caso del maíz, la extrusión mejora la digestibilidad intestinal aparente (DIA) de la MS de los lechones (5,9 %, $P < 0,05$), debido a que modifica la estructura del almidón sin que se alteren otras fracciones. Esto implica que las variedades de maíz con menos fibra y menos germen son más adecuadas para ser extrusionadas y el efecto del PT sobre el valor nutricional será mayor que en otros casos. La razón pueden ser una menor reactividad del almidón con otros componentes como ácidos grasos o proteínas (Muley et al., 2007).

Estos efectos, sin embargo, no parecen estar relacionados con la tasa de gelatinización (TG) (Medel, 1999; Vestergaard et al., 1990; Hongtrakul et al., 1998). Estos últimos autores estudian el efecto de la TG del maíz en lechones de 21 d indicando que los resultados encontrados son variables y que la TG no parece ser el principal factor que explique esta variación. En relación al maíz crudo, el aumento de la TG no modificó los resultados productivos y, en cambio, modificó la DIA de MS, E y N ($P < 0,01$; figura 3). Hongtrakul et al. (1998) señalan que los datos de digestibilidad están negativamente correlacionados con la ingesta y que el aumento de la digestibilidad y la disminución de la ingesta no fueron suficientes para mejorar el I.C., debido posiblemente a la retrogradación del almidón al aumentar la TG.

Cuadro 10.- Resumen de resultados del efecto de los tratamientos térmicos sobre maíz y cebada en lechones.

| Referencia | Tratamiento | Δ Productividad ¹ , % | Δ Digestibilidad ² , % | Edad, d |
|----------------------------------|-------------|--|--|---------|
| Maíz | | | | |
| Aumaitre et al. (1976) | Expansión | s.d ³ | DFA MS + 1,9 DFA PB + 6,8 | 21-60 |
| Den Hartog et al.(1988) | Extrusión | s.d | DIA MO + 3,5 | 45 |
| Van der Poel et al. (1990) | Extrusión | s.d de 31 a 35d I.C. + 3,4, de 35 a 56d | DFA s.d DIA MO +3,5 DIA A + 1,6 | 21-56 |
| Wu et al.. (1995) | Extrusión | GMD +16,5 de 28 a 42d I.C. -8,7 de 28 a 42d GMD +8,6 de 42 a 56d C.M.D +7,8 de 42 a 56d | | 28-56 |
| Hongtrakul et al.(1998) | Extrusión | GMD +25/30 CMD +20/25 | DFA MO +0,7 | 10-24 |
| Medel et al. (1999) | Extrusión | GMD +11 de 14 a 25d I.C. -11 de 14 a 25d s.d otros periodos | DFA s.d | 23-50 |
| Medel et al. (2004) | Copos | GMD +15 de 22 a 32d s.d otros periodos | DFA MS +4 DFA E +3,9 DFA PB +5,4 | 22-52 |
| Cebada | | | | |
| Aumaitre et al. (1976) | Expander | I.C. -9,3 | DFA MS +3,3 DFA PB +4,4 | 21-60 |
| Sauer et al. (1990) ⁴ | Extrusion | GMD +8 I.C. -6 | DFA MA +3 DFA E +3 DFA PB +6 | 21-56 |
| Vestergaard et al. (1990) | Extrusión | s.d | | 21-49 |
| Chu et al. (1998) | Extrusión | | DIA PB +10,5 | 35-40 |
| Medel et al. (1999) | Extrusión | GMD +15 de 23 a 37d I.C. -15 de 23 a 37d GMD +5 de 37 a 50d | DFA MO +4,7 | 23-50 |
| Medel et al. (2000) | Expander | GMD +10 de 23 a 37d s.d de 23 a 37d | DFA MO +5,3 DFA E +3,5 | 23-51 |
| Medel et al. (2002) | Copos | GMD +15.7 de 23 a 37d | DIA A +0,9 | 23-51 |
| Medel et al. (2004) | Copos | GMD +18 de 22 a 32d s.d otros periodos | DFA MS +4,4 DFA E +3,7 DFA PB +4,8 | 22-52 |

Figura 3.- Evolución de la digestibilidad ileal aparente (DIA) de la energía (línea discontinua) y del N (línea continua) en función de la tasa de gelatinización. Adaptado de Hongtrakul et al. (1998).



Sun et al. (2006) estudian el efecto de la extrusión sobre diferentes fuentes de almidón (cebada, guisante y almidón de patata) *in vitro* basándose en la clasificación de Englyst et al. (1992) (cuadro 11), e *in vivo* en cerdos de 37,5 kg de peso. La extrusión aumenta la proporción de RDS a expensas de la fracción SDS y reduce el contenido en almidón RS, pero modificando el peso de la fracción RS₃ (almidón retrogradado durante el proceso) que aumenta en las materias primas extrusionadas. La extrusión modifica la cinética de la digestión del almidón *in vitro*, como se muestra en la figura 4, llegando a digerirse el 93% en un espacio de 20 minutos. Sin la extrusión, cada tipo de almidón se degrada a una velocidad diferente. Estos datos, sin embargo, no guardan correlación con los resultados *in vivo* debido a la multitud de interacciones existentes en el animal. Los autores señalan que, en la medida en que se vayan perfeccionando los sistemas de análisis *in vitro*, mejorarán las correlaciones.

La extrusión mejora la DIA de MS, MO y carbohidratos totales debido a un importante aumento de la DIA del almidón, que es de un 6% (NS) en la cebada, de un 15% en el guisante y de más del 100% en el almidón de patata; en cambio no modificó la DIA de los (PNAs). La digestibilidad fecal aparente (DFA) de MS y MO aumentó con la extrusión un 4% en el guisante y entre un 4 y un 9% para el almidón de patata. La extrusión no modificó estos coeficientes en la cebada, en el caso de la proteína la DFA aumento un 6% en el guisante y entre el 6 y el 16% para el almidón de patata. La DFA del

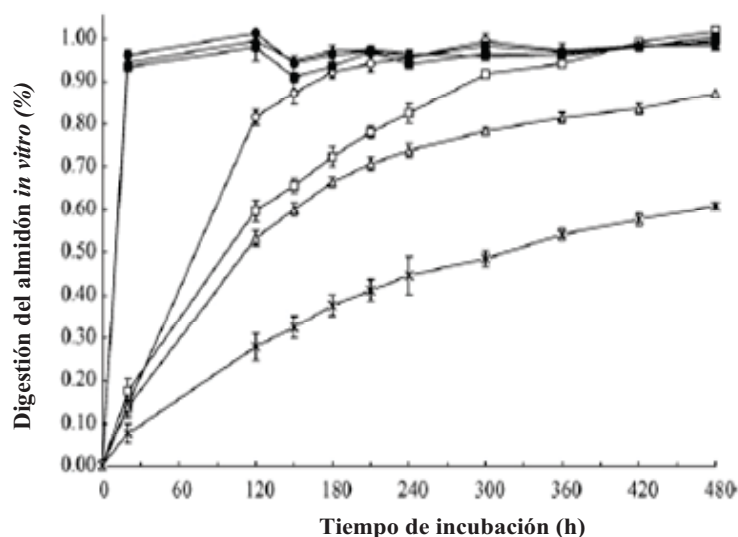
almidón no se vio afectada pero sí la DFA de la fracción PNAs, sobre todo en la dieta con almidón de patata, posiblemente debido al contenido en salvado de trigo (cuadro 12).

Cuadro 11.- Contenido en almidón y fracciones de almidón (g/kg MS) del almidón nativo y después de extrusión en la cebada, guisante y almidón de patata con salvado (APST) (Sun et al., 2006).

| | Almidón | Fracciones de almidón ¹ | | | Fracciones de RS ⁵ | | |
|-----------------------|---------|------------------------------------|------------------|-----------------|-------------------------------|-----------------|-----------------|
| | | RDS ² | SDS ³ | RS ⁴ | RS ₁ | RS ₂ | RS ₃ |
| Cebada | 635 | 98 (16) | 456 (72) | 81 (13) | 66 (74) | 20 (22) | 4 (4) |
| Cebada extrusionada | 617 | 608 (98) | 0 (0) | 13 (2) | 1 (12) | 6 (62) | 3 (26) |
| Guisante | 458 | 68 (15) | 171 (37) | 219 (48) | 153 (71) | 57 (26) | 6 (3) |
| Guisante extrusionado | 491 | 453 (92) | 17 (4) | 22 (4) | 5 (21) | 8 (33) | 11 (46) |
| APST | 818 | 106 (13) | 332 (41) | 380 (47) | 14 (4) | 354 (95) | 3 (1) |
| APST extrusionado | 837 | 810 (97) | 9 (1) | 19 (2) | 1 (6) | 6 (31) | 12 (64) |

¹Los valores entre paréntesis se corresponden con el % de cada fracción de almidón. ²RDS: rápidamente digestible. ³SDS: lentamente digestible. ⁴RS: resistente. ⁵Los valores entre paréntesis se corresponden con el % de cada fracción de RS. RS₁: almidón celular atrapado. RS₂: almidón poco gelatinizado y lentamente hidrolizado por amilasas. RS₃: almidón retrogradado formado en el proceso.

Figura 4.- Cinética de extrusión *in vitro* (% sobre el almidón total) de la cebada (○ cruda; ● extrusionada), guisante (□ crudo, ■ extrusionado), o almidón de patata con salvado (◇ crudo, ◆ extrusionado). (Sun y col., 2006).



En las materias primas extrusionadas la casi totalidad del almidón y de los carbohidratos totales son digeridos a nivel íleal. En las materias primas crudas el comportamiento es el mismo en el caso de la cebada, pero en el caso del almidón de patata con salvado (APS) sólo entre el 33 y el 47% se digiere en el íleon, fermentando el resto en ciego y colon con la consiguiente pérdida de valor energético. La DIA de los PNAs no se vio afectada por la extrusión, que sí modificó la DFA de los PNAs de la dieta basada en almidón de patata y salvado. El bajo contenido en PNAs de las dietas (entre 6 y 11% MS) y su baja DIA hacen que esta fracción contribuya poco al valor energético, siendo el guisante la materia prima cuya fracción PNAs es la más fermentada, con independencia del PT efectuado. La extrusión o, en general, el PT de los cereales tiene escasos efectos sobre la fracción PNAs (Fadel et al., 1988).

Cuadro 12.- Digestibilidad ileal aparente (DIA, %) y digestibilidad fecal aparente (DFA, %) de distintas fracciones de dietas basadas en tres materias primas (cebada, guisante y almidón de patata con salvado (APST)) y efecto de la extrusión.

Resultados adaptados de Sun et al.(2006).

| | Proteína bruta | | Almidón | | PNAs | | Carbohidratos totales | | Mejora I.C. |
|-------------------|-----------------|------------------|------------------|------|-----------------|-----------------|-----------------------|-----------------|-------------|
| | DIA | DFA | DIA | DFA | DIA | DFA | DIA | DFA | |
| Cebada | 81 ^a | 88 ^a | 93 ^{ab} | 100 | 31 ^a | 63 ^a | 85 ^b | 94 ^a | |
| Cebada extr. | 89 ^b | 91 ^a | 99 ^a | 100 | 13 ^b | 55 ^a | 87 ^{ab} | 93 ^a | -8,5 |
| Guisante | 73 ^c | 83 ^b | 79 ^c | 99 | 7 ^b | 82 ^b | 73 ^c | 97 ^b | |
| Guisante extr. | 82 ^a | 88 ^a | 92 ^b | 100 | 8 ^b | 87 ^b | 80 ^b | 98 ^b | -13 |
| APST | 88 ^b | 86 ^{ab} | 40 ^d | 98 | 9 ^b | 35 ^c | 52 ^d | 93 ^a | |
| APST extr. | 90 ^b | 96 ^c | 98 ^a | 100 | 14 ^b | 54 ^a | 92 ^a | 96 ^b | -6,9 |
| Probabilidad (P<) | | | | | | | | | |
| Materia prima | 0,001 | 0,001 | 0,001 | NS | 0,01 | 0,001 | 0,001 | 0,001 | |
| Extrusión | 0,001 | 0,001 | 0,001 | 0,01 | NS | 0,001 | 0,001 | 0,001 | |
| MP X Extrusión | 0,001 | 0,001 | 0,001 | NS | 0,05 | 0,000 | 0,001 | 0,001 | |

En el caso del arroz, Vicente et al. (2008) estudian el cereal crudo frente al PT mediante dos tratamientos que conllevan, en función de su agresividad, grados de gelatinización de 51,5 y 76,2%. Analizan los resultados zootécnicos comprobando que en lechones entre 21 y 53 d, el PT del arroz no mejoró las transformaciones en relación a la dieta con arroz crudo. La DIA de la MS, EB y almidón mejoraron con el tratamiento intermedio respecto al arroz crudo, pero no se mejoraron más a partir de aquí con el

tratamiento más agresivo, de acuerdo con lo observado por Hongtrakul et al. (1998). La DAF de MS y EB mejoraron con el arroz con 51,5% de gelatinización, pero con el arroz con 76,2% no fueron diferentes al arroz crudo. Con la PB la respuesta fue muy parecida. Además observan que el tratamiento más agresivo tiende a empeorar la morfología de la mucosa intestinal. Finalmente, los autores recomiendan que en el caso del arroz se realice un procesado suave a fin de higienizar el producto final, sin que se obtenga efecto beneficioso alguno del exceso de calor o altos grados de gelatinización.

La extrusión mejora la DIA del almidón de las materias primas tanto más cuanto más cristalina sea su estructura y más protegido esté en la matriz celular (Alonso et al. 2000, Canibe y Back-Knudsen 2002). Ello se demuestra por el hecho de que disminuyen las fracciones RS₁ y RS₂ y aumenta la fracción RDS (Periago et al., 1996; Petterson y Lindberg, 1997; Sun et al., 2006; Faraj et al., 2004), de forma que los valores de RS nos podrían ayudar a predecir el efecto *in vivo* de la extrusión. Sin embargo, la respuesta depende de las condiciones de extrusión, ya que Canibe y Backknudsen (1997) no encuentran mejora de la digestibilidad del almidón al tostar guisantes en seco. En general, la digestibilidad del almidón es inversamente proporcional a su contenido en amilosa, debido a que la hidrólisis por las α -amilasas comienza en las regiones amorfas de la amilopectina.

En cuanto a la proteína, la destrucción de FANs así como la ruptura de estructuras de lipoproteínas y glicoproteínas durante la extrusión explican la mejora de su digestibilidad. Otro efecto que contribuye a aumentar la DFA de la proteína es el hecho de que a ciego y colon llegan menos carbohidratos, especialmente de los que forman parte de la fracción de fibra dietética, lo que contribuye a eliminar menos biomasa microbiana aumentando la digestibilidad fecal. Estos resultados estarían de acuerdo con Medel (2004) que encuentra valores de pH mayores en el ciego (6,22 vs 5,99, $P < 0,05$) cuando los cereales fueron PT, señalando que la causa puede ser una menor llegada de nutrientes a este compartimento digestivo.

Los piensos expandidos aumentan el nivel de ácido láctico en el tracto gastrointestinal de los lechones destetados, disminuyendo el pH lo que contribuiría a una menor proliferación de patógenos como *Salmonella* y *E. coli* (Bolduan y Peisker, 1992 citado por Callan 2007). Royer et al. (2003) indican que el PT debe tener una influencia directa en el valor energético, sin embargo las tablas INRA-AFZ (2002) o NRC (1998) no lo tienen en cuenta.

Los efectos observados en cerdos de engorde son menos claros. En el cuadro 13 se muestran los resultados encontrados por algunos autores.

Cuadro 13.- Resumen de resultados del efecto de los tratamientos térmicos sobre maíz y cebada en cerdos de engorde. Adaptación de resultados de diferentes autores.

| Referencia | Tratamiento | Δ Rend. productivos ¹ , % | | Δ Digestibilidad ² , % | |
|--|-------------------|---|--|---|---|
| Fadel et al. (1988) Cebada | Extrusión | | | DIA MS +11.5 DIA A +15.8 DIA E +12 DIA PB +10.9 DFA s.d. ³ | |
| Hancock et al. (1992) Varios cereales | Extrusión seca | <u>I.C:</u> - 4,4 maíz - 9 sorgo - 5,6 trigo - 2,7 cebada <u>GMD y CMD:</u> s.d | <u>Rto canal:</u> + 3,2 maíz +2 sorgo +1.5 trigo +1,7 cebada | <u>DFA MS:</u> +5,4 maíz +1,6 sorgo s.d trigo +8,5 ceb. | <u>DFA PB:</u> +7,5 maíz +5,9 sorgo s.d trigo + 11,8 ceb. |
| Callan et al. (2007) | Expansión | s.d | | | |

¹GMD: Ganancia media diaria, CMD: consumo medio diario, I.C: índice de conversión. ²DFA: Digestibilidad fecal aparente, DIA: digestibilidad ileal aparente, A: almidón, E: energía, MO: materia orgánica, MS: materia seca, PB: proteína bruta. ³s.d: sin diferencias.

En general, se observa que la extrusión mejora la digestibilidad de la energía de los cereales (Herkelman et al., 1990; O'Doherty and Keady, 2001; Htoo, 2008) pero sin afectar a la digestibilidad de los aminoácidos (Van der Poel, 1989; Herkelman et al., 1990; Muley et al., 2007).

Callan et al. (2007) indican que el tipo de molienda antes de la expansión puede modificar la partición de la digestión entre el intestino delgado y el intestino grueso, lo que conlleva cambios en el metabolismo energético y puede disminuir la eficiencia del pienso. El uso energético de los AGV absorbidos es un 10-15% inferior que la energía de la glucosa (Black, 2000, citado por Callan et al., 2007).

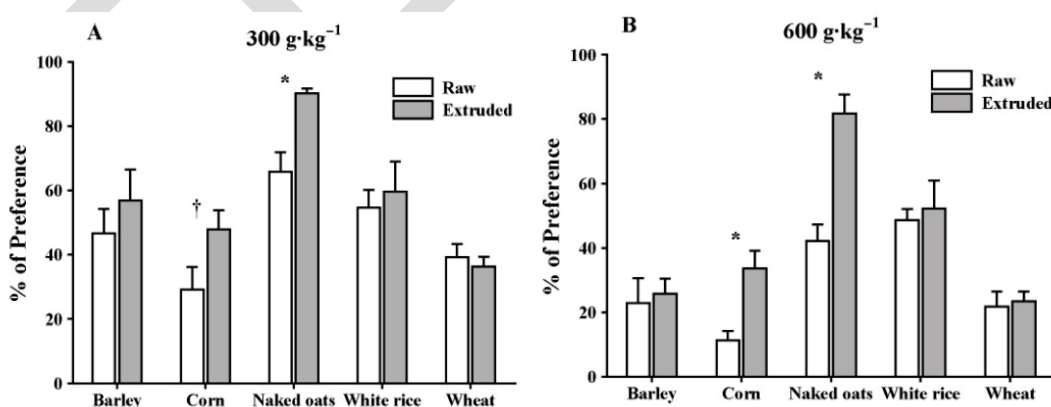
Van Barneveld et al. (2005) estudian los efectos de la extrusión y de la expansión en trigo, cebada, sorgo y arroz en cerdos de 40 kg, obteniendo resultados muy variables hasta el punto que a veces la respuesta del mismo cereal sometido al mismo tratamiento fue diferente. En la cebada observaron, en general, un efecto negativo de la extrusión y, sobre todo, de la expansión sobre el contenido en energía, indicando que la causa puede ser una mayor capacidad de retrogradación del almidón de la cebada debido a una mejor

capacidad de hidratación. En el sorgo las mejoras del PT fueron inconsistentes debido, según los autores, a la pobre capacidad de hidratación de los granos de almidón de este cereal. Aunque en algunas muestras de arroz o trigo la energía digestible (ED) aumentó entre 1-2 MJ/Kg MS, es difícil predecir la respuesta y, por tanto, complicado recomendar la inversión en coste energético ante la incertidumbre de la misma.

Tipo de proceso, composición de los granos, estructura celular, capacidad de hidratación, fisiología de los animales, población microbiana son factores que explican estas diferencias. Medel (2002) no observan interacción entre el PT y la suplementación enzimática.

Algunos trabajos han señalado el efecto positivo de la extrusión sobre la palatabilidad de los cereales en lechones (Bjorck et al., 1985) pudiendo ser una vía para aumentar la ingesta de pienso. Solá-Oriol et al. (2009) observan que la extrusión mejoró la apetencia en el caso del maíz y de la avena desnuda, pero no tuvo efecto en cebada, trigo o arroz (figura 5). El efecto de la mayor apetencia podría deberse a una mayor liberación de glucosa como consecuencia del proceso (Medel et al., 1999; Piao et al., 1999), sin embargo no siempre al extrusionar cereales se observa un aumento de consumo. Sin lugar a dudas, la formación de compuestos consecuencia de interacciones en el proceso puede marcar este factor.

Figura 5.- Porcentaje de preferencia de diferentes cereales extrusionados vs crudos incluidos al 30 y al 60 % en los piensos. * P < 0,05 †P < 0,10. Los valores son las medias con la SE en barras verticales. (Solá-Oriol et al., 2009).



En el caso de las habas de soja, el efecto del procesado sobre la DIA PB es mayor que sobre la MS o la MG (cuadro 14), lo que sugiere que los inhibidores de proteasas son los principales FANs que afectan a su digestibilidad. La mejora de la DIA PB afecta a los

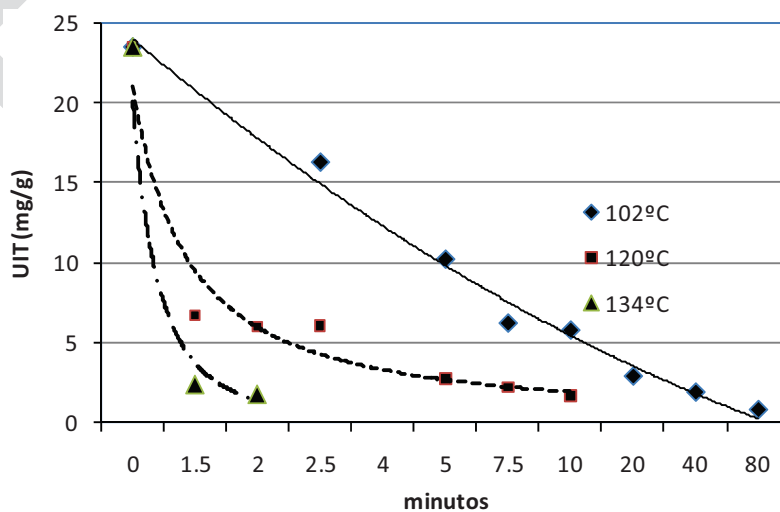
valores de la DIA MS. La mejora en la DIA MG se asocia más con la ruptura física de la estructura celular, que permite liberar el aceite en mayor o menor grado (Qin et al., 1996). Estos autores confirman que la reducción de los inhibidores de tripsina (UIT) se puede conseguir con distintas condiciones de proceso (figura 6) y que es un criterio útil para evaluar la calidad del tratamiento, como también lo señalan Roger et al. (2003) y Zarkadas y Wiseman (2005a), quienes observan que los resultados en lechones fueron mejores con niveles inferiores a 5 mg/g de UIT y que fueron óptimos con ingestas de UIT entre 0,5 y 1,5 g/d con independencia del sistema de procesado. Sin embargo, no parece ser el único criterio que explique la variabilidad de resultados (Palacios et al., 2004) ya que puede haber otros como la desnaturalización de la proteína que la hace más susceptible al ataque enzimático (Zarkadas y Wiseman, 2005).

Cuadro 14.- Digestibilidad ileal aparente (DIA) de MS, PB y MG de las habas de soja procesadas (tostado) bajo diferentes condiciones de T^a e incorporación de vapor, en lechones (Qin et al., 1996).

| | DIA MS | DIA PB | DIA MG |
|------------|------------------|------------------|-------------------|
| 102°, 10' | 37 ^b | 51 ^b | 82 ^a |
| 102°, 20' | 49 ^{ab} | 68 ^{ab} | 84 ^a |
| 102°, 40' | 61 ^a | 81 ^a | 89 ^a |
| 120°, 2' | 48 ^{ab} | 70 ^a | 89,6 ^a |
| 120°, 7' | 57 ^{ab} | 82 ^a | 93 ^a |
| 134°, 1.5' | 57 ^{ab} | 80 ^a | 91,8 ^a |

Datos con superíndices diferentes son significativamente diferentes ($P < 0,05$).

Figura 6.- Efecto de la temperatura y el tiempo sobre el valor de unidades inhibidoras de tripsina (UIT) de las habas de soja (Qin et al., 1996)



Zarkadas y Wiseman (2005a) estudian el efecto del PT de la soja full-fat en dietas para lechones y concluyen que, en el caso de la micronización, la cantidad de vapor aplicado es la responsable de la mejora de los resultados (33% GMD, 16 % CMD y -13,5% I.C., $P < 0,01$). La T^a de extrusión tuvo un efecto lineal sobre la GMD e I.C. y un efecto cuadrático sobre el CMD (figura 7). Sin embargo el efecto más importante que encontraron fue una relación exponencial significativa entre la ingesta de UIT y las transformaciones (figura 8), confirmando que el efecto más importante sobre los resultados es la ingesta del nivel de UIT, recomendando una ingesta diaria inferior a 1,5 mg/g de UIT para obtener los mejores resultados.

Figura 7.- Efecto de la temperatura de extrusión sobre los parámetros zootécnicos en lechones de 10 a 27 kg en dietas con 30% de habas de soja (Adaptado de Zarkadas y Wiseman, 2005)

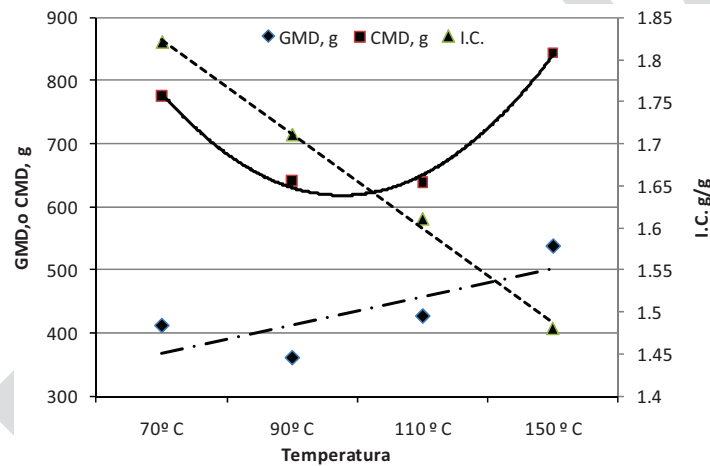
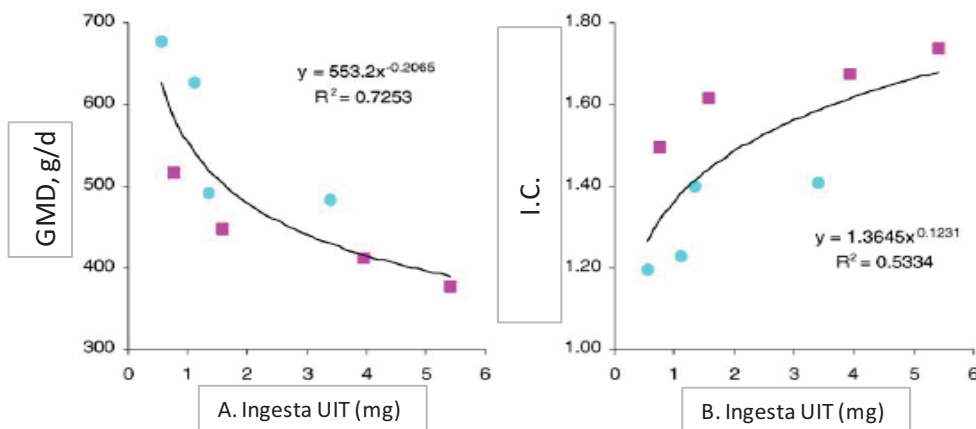


Figura 8.- Ganancia media diaria GMD (A) e Índice de conversión I.C. (B) en relación a la ingesta diaria de UIT (mg) en cerdos alimentados con soja full-fat micronizada (●) y con soja full fat extrusionada (■) (Zarkadas y Wiseman, 2008)



Estos resultados se confirman en ensayos de digestibilidad e histológicos (Zarkadas y Wiseman, 2005b), en los que se observa que la inactivación de los FANs y una menor ingesta de UIT aumentan la longitud de las vellosidades intestinales. En la soja full-fat micronizada observan que el contenido y la ingesta diaria de UIT afectan a la relación entre la longitud de las vellosidades y la profundidad de la cripta, y que esta relación se fue reduciendo a medida que las condiciones del proceso fueron menos agresivas. En el caso de la soja extrusionada encuentran además una relación directa entre la profundidad de la cripta y los niveles e ingesta de UIT. La DAF de MS, E y PB no guardaron relación con las diferentes T^a de extrusión pero sí encontraron algunas diferencias en la DIA.

La mejora de digestibilidad de la MG causada por la extrusión se debe principalmente a la ruptura de los glóbulos grasos por efecto de la presión dejando fácil acceso a la acción de las lipasas. De esta forma se mejora, además, la digestibilidad de la energía y algunos ácidos grasos (AG). Este efecto abre la posibilidad de modificar la digestibilidad de los AG en situaciones de interés para modificar la composición de la canal, como puede ser para aumentar el porcentaje de AG ω -3, de C18:1, etc, (Htoo, 2008).

Sin embargo, los efectos observados en las habas de soja no siempre son extrapolables a otros granos de oleaginosas. Skiba et al. (1999) indican la importancia del descascarado y el aplastado de la semilla de colza sobre el valor nutritivo al aumentar el valor energético (15 y 75% de la ED respectivamente). Sin embargo, indican que las altas temperaturas de cocción aplicadas a los turtós tienen un efecto negativo sobre el valor nutricional.

En el caso de las leguminosas hay varios estudios realizados con guisantes europeos en los que se ha visto que una reducción en los inhibidores de tripsina y en los taninos contribuyen a mejorar los parámetros de digestibilidad en guisantes extrusionados (O'Doherty and Keady, 2000; Mariscal-Landín et al., 2002; Sun et al., 2006). Owusu-Asiedu et al. (2002) observan una mejora de los valores de DIA y DIS de la PB y AA en lechones al extrusionar a 135°C y, aunque algunos autores señalan que los PT no ofrecen grandes ventajas en los cerdos en fase de engorde-acabado (Brenes y Brenes, 1993), otros trabajos más recientes indican mejoras de los resultados zootécnicos con la extrusión (O'Doherty and Keady, 2001).

En un estudio con cerdos de engorde Stein y Bohlke (2007) comprueban que la extrusión de los guisantes mejoró la DIA y DIE de PB y AA con un efecto cuadrático, que indicaría que con una T^a de extrusión de 115° C se obtendrían los mejores resultados (cuadro 15), de acuerdo con Owusu-Asiedu et al. (2002) y Htoo et al. (2008). Las diferencias de resultados que se pueden encontrar se explican porque la forma en la cual se

aplica el calor juega un papel decisivo en la efectividad del tratamiento debido a la reactividad de los grupos amino de algunos AA con el terminal reductor de los azúcares en condiciones de alta presión y T^a, y en poca presencia de agua (Htoo et al., 2008). Parece que la granulación a 75-80 °C es inefectiva para mejorar la digestibilidad de los AA, sin embargo la presencia de FANs en el guisante (IT, lectinas, taninos, α -galactosidos) y las diferencias de sus contenidos entre variedades pueden explicar algunas diferencias entre resultados. La extrusión del guisante mejora la DIA A al facilitar el ataque de las enzimas digestivas (Sun et al., 2006; Stein y Bohlke, 2007, cuadro 16) lo que significaría que el almidón del guisante crudo no es completamente digestible en el intestino. Sin embargo, la DFA, cercana al 100%, indica que el almidón sin digerir es completamente fermentado en ciego y colon. La extrusión no modificó la DFA de la FND ni de la FAD, de acuerdo con otros autores (Canibe y Back Knudsen, 1997; Sun et al., 2006). Sun et al. (2006) no observan tampoco mejora en la digestibilidad de los α -galactosidos ni de la fracción total de PNAS del guisante con la extrusión. Sin embargo, Htoo et al. (2008) observan que la extrusión disminuye el contenido de FND, lo que demuestra la modificación de las características físico-químicas de la fibra a través de la parcial solubilización o de la degradación de sus componentes (Björck et al., 1984).

Cuadro 15.- Digestibilidad Ileal Estandarizada (DIS) de proteína bruta (PB) y aminoácidos (AA) en guisantes tratados térmicamente¹ (Stein y Bohlke, 2007)

| DIS | Control | Gránulo 75°C | Extrusión | | |
|-----|---------|-----------------|-----------|-------|-------|
| | | | 75°C | 115°C | 155°C |
| PB | 81,4 | 83 | 88,8 | 93,5 | 92,2 |
| Lys | 91,1 | 91,7 | 95,3 | 97,1 | 96,4 |
| Met | 84,0 | 82,5 | 92,9 | 92,6 | 92,4 |
| Thr | 81,4 | 80,6 | 89,6 | 92,4 | 91,7 |
| Trp | 80,6 | 82,0 | 87,9 | 92,0 | 92,2 |

¹Efecto lineal y cuadrático de la T^a de extrusión (P < 0,01). Granulación diferente de la extrusión a 75° C (P < 0,05).

Cuadro 16.- Digestibilidad Ileal Aparente (DIA) y Digestibilidad fecal aparente (DFA) de almidón y energía de dietas a base de guisante^{1,2} (Stein y Bohlke, 2007).

| | Control | Gránulo 75°C | Extrusión | | |
|------------|---------|-----------------|-----------|-------|-------|
| | | | 75°C | 115°C | 155°C |
| <u>DIA</u> | | | | | |
| Almidón | 89,8 | 90,1 | 92,1 | 94,7 | 95,9 |
| Energía | 71,5 | 69,1 | 76,4 | 79,3 | 79 |
| <u>DFA</u> | | | | | |
| Energía | 89 | 91,6 | 91,8 | 93,3 | 91,7 |

¹Contienen 85% de guisante. ²Efecto lineal y cuadrático de la Tª de extrusión (P < 0,01) sobre DIA Energía. Efecto lineal de la Tª sobre el DIA Almidón. Granulación diferente de la extrusión a 75°C (P < 0,05).

El tratamiento del guisante mejora la DFA de la energía (+3,5%, P < 0,05) conforme a lo observado por otros autores (O'Doherty y Keady, 2001). La magnitud del aumento fue mayor que el observado para la DIA de la energía (cuadro 16), debido a que mientras que los AA no absorbidos en el intestino delgado no contribuyen al balance energético al ser transformados en proteína microbiana y excretados, el almidón no digerido a nivel intestinal es fermentado y transformado en AGV en ciego y colon contribuyendo al balance energético y, aunque la eficiencia energética es menor, no se pierde como en el caso de los AA.

Basándose en estos datos, Stein y Bohlke (2007) concluyen que la extrusión a 115 °C aumenta la digestibilidad de la energía un 5%, lo que supone que el contenido en ED debería incrementarse en unas 205 kcal/Kg en relación al guisante crudo. Este aumento en energía sería el responsable de la mejora de los resultados productivos observada en algunos ensayos.

De acuerdo con lo anterior, Htoo et al. (2008) concluyen que la extrusión simple aumenta la DAF de la energía un 11% y el contenido en ED de 3700 a 4350 kcal/Kg MS. Otros autores (Noland et al., 1976; Herkelman et al., 1990; O'Doherty and Keady, 2001) señalan que la extrusión mejora la ED de los cereales.

7.- EFECTOS DEL PROCESADO TÉRMICO EN RUMIANTES

Rowe et al. (1999) resumen el impacto de varios métodos de procesado sobre los granos y su digestión en rumiantes (cuadro 17):

Cuadro 17.- Impacto de varios tratamientos tecnológicos sobre los granos y su digestión (Rowe et al., 1999).

| | Ruptura pericarpio | Reducción tamaño partícula | Ruptura matriz endospermo | Ruptura granos almidón | Aumento velocidad fermentación | Aumento digestión intestinal |
|------------------|--------------------|----------------------------|---------------------------|------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| Molido rodillos | +++ | + | - | - | ++ | + |
| Molido martillos | +++ | +++ | - | - | ++ | + |
| Copos | +++ | ++ | + | + | +++ | ++ |
| Extrusión | +++ | - | ++ | + | ++ | ++ |
| Granulación | +++ | - | + | - | + | ++ |
| Micronización | + | + | | | | ++ |

Para entender los efectos del PT de los alimentos en los rumiantes es muy importante conocer las vías metabólicas de los distintos componentes de la dieta, en particular almidón y proteína, en los diferentes tramos digestivos. Los cambios en la degradación de las materias primas sometidas a PT que implican fuertes presiones, como la expansión, son el resultado de las transformaciones de la materia entre fracciones que difieren en sus constituyentes químicos, digestión y velocidad de salida ruminal. No obstante, las propiedades de las materias primas tratadas dependerán fuertemente de sus características (humedad, vitrosidad), de la molienda a que hayan sido sometidas, de las condiciones del proceso y, por supuesto, del tipo de ración y del animal. En los rumiantes las interacciones con los forrajes y alimentos frescos de la ración son muy importantes estableciéndose diferencias entre vacas de leche y terneros sometidos a engorde intensivo, donde la proporción de forrajes de la dieta es menor.

La eficiencia energética de la digestión de los carbohidratos no estructurales es mayor en el intestino delgado que en el rumen o en el intestino grueso (97% vs 80% y 62%) (McLeod, 2005). En el caso de la fermentación ruminal la formación de CH₄ y CO₂ ocasiona pérdidas del 13-18% de la EB (Harmon and McLeod, 2005). Por ello, el nutricionista debe ser capaz de formular dietas para optimizar la digestión en los distintos tramos digestivos y alcanzar la mayor eficiencia energética. Para ello se deben considerar las limitaciones del animal para digerir y absorber tanto los carbohidratos estructurales como los no estructurales. El PT se suele aplicar a los cereales, leguminosas y oleaginosas.

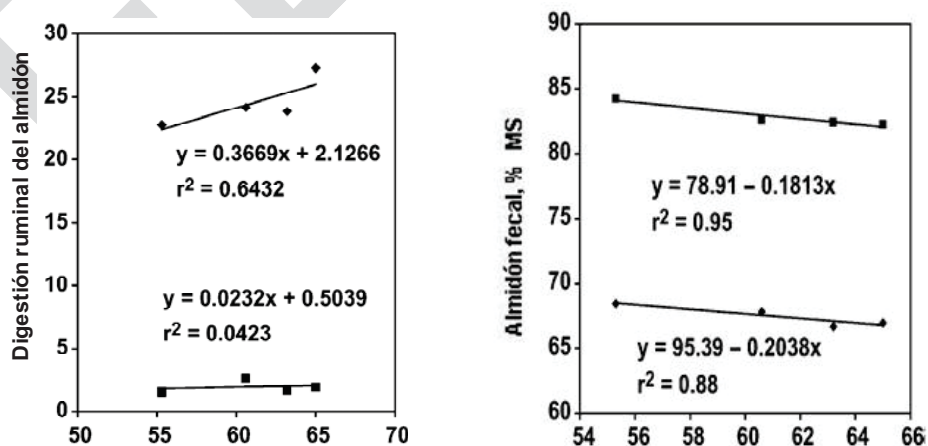
Los cereales son la principal fuente de almidón, que alcanza entre el 10 y el 35% del contenido de las dietas de rumiantes, tanto más cuanto más intensiva es la producción. Aunque se admite que, en general, el PT aumenta la degradabilidad ruminal del almidón, también se han publicado trabajos donde no se ha visto efecto alguno (Chapoutot y Sauvant, 1997). Los cereales responden de diferente forma a la degradación ruminal (cuadro 18 y figura 9). Así los cereales blandos son más susceptibles a la degradación, mientras que maíz y sorgo, con un alto contenido de almidón potencialmente degradable, son más resistentes, siendo estos últimos los que mayor respuesta ofrecen al PT debido a la eliminación del efecto negativo de su vitrosidad (Corona et al. 2006).

Cuadro 18.- Características de degradabilidad media del almidón de distintos cereales en vacas lecheras (Adaptado de Tóhti, 2003).

| | W, % | D, % | K _d , %/h | DREA, % |
|--------|------|------|----------------------|---------|
| Cebada | 62 | 37 | 23 | 92 |
| Maíz | 25 | 75 | 5 | 58 |
| Sorgo | 32 | 68 | 3.5 | 61 |
| Trigo | 68 | 32 | 18 | 93 |
| Avena | 96 | 4 | 19 | 98 |

W: fracción soluble en agua. D: fracción insoluble potencialmente degradable. K_d: velocidad de degradación de D. DREA: degradabilidad efectiva del almidón en el rumen.

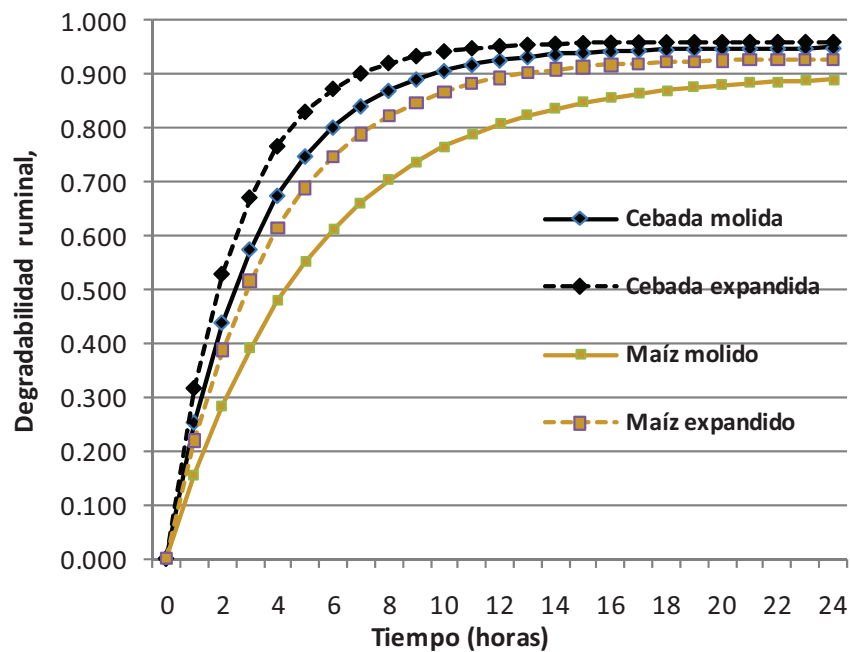
Figura 9.- Efecto de la vitrosidad del grano de maíz en la digestión ruminal del almidón y la excreción fecal. Efecto del tratamiento térmico. Maíz molido con rodillos (líneas superiores) y copos de maíz (líneas inferiores). (Corona et al., 2006).



Así se puede observar en las curvas de desaparición ruminal del almidón al expandir cebada o maíz (figura 10), siendo el efecto más neto en el último caso. La razón a

estos cambios, además de en la modificación de la estructura, está en una mayor accesibilidad de las enzimas, pero además en que T^a , tiempo, humedad y acción mecánica aumentan la superficie y los puntos de unión posibles al sustrato por parte de los microorganismos ruminales (McAllister, 1990).

Figura 10.- Curvas de desaparición ruminal (%) del almidón medida *in vivo* en vacas de leche. (Adaptado de Tóhti, 2003).



La digestión ruminal del almidón es alta, normalmente del 75-80%, aunque los resultados son variables y dependen del tipo de animal. Owens (2005) indica que en terneros está entre el 64 y el 87% y en vacas de leche entre el 49 y el 76% (cuadro 19), atribuyendo las diferencias a una mayor velocidad de paso de las partículas debida a una mayor ingesta y a un mayor tamaño del orificio retículo-omasal en las vacas. No se ha encontrado relación entre ingesta de almidón y digestibilidad ruminal, lo que significaría que la digestión ruminal del almidón no está limitada.

La eficiencia energética de la digestión del almidón es un 42% mayor cuando ocurre en el intestino delgado (Owens et al. 1986) respecto a la digestión en rumen, sin embargo no todo el almidón que llega a nivel intestinal es digerido allí. Aunque hay resultados que demuestran que la digestión en intestino delgado aumenta con el flujo que llega a este tramo (Owens 2005), también se ha visto que este aumento puede ir acompañado por una disminución de la digestión en el tracto intestinal total (Theurer, 1986), sugiriendo limitaciones a la digestión intestinal del almidón debidas bien a que el

aumento del almidón que llega al intestino delgado suponga un aumento de las cantidades que llegan al intestino grueso, donde la eficiencia digestiva es menor (Harmon and McLeod, 2005, Owens, 2005), bien a una disminución de la digestibilidad debida al tamaño de las partículas (Owens, 2005), bien a una peor accesibilidad de las enzimas al ser más resistente (McAllister et al., 1990; Zinn et al., 2002) o bien a otras razones, como a limitaciones en el transporte de glucosa. Estas limitaciones reducirían la respuesta a la modificación del lugar de digestión mediante la manipulación de la dieta a través del PT.

Cuadro 19.- Lugar y extensión de la digestión del almidón en dietas basadas en maíz en vacas de leche y “feedlots” (Owens 2005).

| | Vacas | | | Terneros | | |
|--------------------------------------|-----------------------|------------------------|--------------------|-------------------|-----------------------|-------------------|
| | Molido R ¹ | Molido RV ² | Copos ³ | Entero | Molido R ¹ | Copos |
| Nº ensayos | 22 | 3 | 5 | 6 | 42 | 94 |
| Digestibilidad total, % dieta | 89,9 | 94,2 | 93,9 | 87,1 ^c | 91 ^b | 99,1 ^a |
| Desaparición en rumen, % dieta | 49,2 | 55,7 | 51,8 | 68,3 ^b | 63,8 ^b | 84,1 ^a |
| % Desaparición ruminal ⁴ | 55,5 | 58,8 | 54,8 | 79,2 ^b | 70,1 ^c | 84,7 ^a |
| Desaparición post-ruminal, % flujo | 77,7 | 88,3 | 88,4 | 53 ^b | 72,2 ^b | 94,3 ^a |
| Desaparición intest. delgado % flujo | 48,4 | - | 71,2 | 64,6 ^b | 58,8 ^b | 92,5 ^a |

¹R: molido con rodillos. ²RV: molido con rodillos con algo de vapor. ³Cocción con vapor y aplastamiento. ⁴Fracción de desaparición ruminal en relación a la digestibilidad total. Las letras diferentes en el superíndice significan valores estadísticamente distintos (P < 0,05).

En los rumiantes el mapa enzimático de la mucosa es similar al de los monogástricos, con la diferencia de la ausencia de sacarasa. La producción de α -amilasa es fundamental para la digestión intestinal del almidón, pero su regulación es compleja y diferente en las distintas especies de rumiantes y, como en otras enzimas de la mucosa, difícilmente controlable a través de la dieta. No se ha demostrado que una actividad amilolítica exógena adicional mejore la digestión en el intestino delgado, lo que confirma que tanto las enzimas de la mucosa como el transporte de glucosa pueden limitar la asimilación en el intestino delgado.

Pocos estudios se han realizado para ver cuánto almidón que escapa a la degradación ruminal se digiere en el intestino delgado y cuánto en el intestino grueso. Theurer et al. (1998, 1999) señalan que entre el 2 y el 5% del almidón de la dieta se digiere en el intestino grueso. Aunque hay autores que indican que la digestión ruminal del almidón es más eficiente energéticamente que la digestión en intestino delgado, parece que

el factor limitante de la eficiencia energética es el almidón que llega sin digerir al intestino grueso (Theurer et al., 1998). Para mejorar la eficiencia energética es necesario que al menos el 70% del almidón post- ruminal sea digerido en el intestino delgado.

La digestibilidad total del almidón de los cereales es muy alta y oscila entre el 90 y el 96% en vacas de leche y entre el 87 y el 99% en terneros, por ello parece que sólo reduciendo la digestión ruminal del almidón y aumentando la digestión en el intestino delgado, o disminuyendo la fermentación en intestino grueso podríamos ganar en eficiencia energética (Owens 2005). Este autor hace una revisión del efecto del PT sobre el maíz en vacas y terneros (cuadro 19) observando diferencias entre ellos. Las modificaciones producidas por el PT alteran el patrón de digestibilidad del almidón en el resto de compartimentos digestivos, como se puede ver en el cuadro 20. La expansión de la cebada produce pocos cambios, sin embargo en el maíz hay un efecto claro, viendo que el flujo ileal y fecal del almidón disminuye significativamente con la expansión y la digestibilidad total aumenta (Thothi, 2003). Estas variaciones cambian los valores de degradabilidad teórica (Dt) y dr y en consecuencia los valores PDI, o lo que es lo mismo mejoran la sincronía entre la degradabilidad de la proteína y de los carbohidratos a nivel ruminal, lo que puede tener consecuencias importantes a nivel productivo.

Cuadro 20.- Flujo y digestibilidad del almidón de cereales, medido *in situ* en vacas de leche, en distintos compartimentos digestivos (Adaptado de Thothi, 2003)

| | Cebada | | Maíz | | P ¹ | |
|-------------------------------|--------|-----------|--------|-----------|----------------|-------|
| | Molida | Expandida | Molido | Expandido | T | TxG |
| Flujo de almidón, kg/d | | | | | | |
| Ingesta | 2,76 | 2,77 | 3,42 | 3,29 | | |
| Duodenal | 0,25 | 0,25 | 0,85 | 0,65 | | |
| Ileal | 0,08 | 0,05 | 0,99 | 0,48 | 0,01 | 0,02 |
| Fecal | 0,02 | 0,02 | 0,54 | 0,12 | 0,002 | 0,001 |
| Digestibilidad, % | | | | | | |
| Ruminal | 91 | 91 | 71 | 79 | | |
| Intestino delgado | 70 | 83 | 0 | 19 | | |
| Intestino grueso | 80 | 64 | 45 | 73 | | |
| Íleon ² | 97 | 98 | 72 | 86 | 0,008 | 0,01 |
| Total | 99 | 99 | 84 | 96 | 0,001 | 0,001 |

¹P: significación estadística: T tratamiento térmico, TxG interacción con el tipo de cereal.

²Porcentaje de la cantidad que entra a esta sección.

Algunos factores pueden modificar el patrón normal de digestión del almidón. Así, un aumento del nivel de proteína en la dieta disminuye la desaparición ruminal, en particular en las vacas de leche. En cambio en dietas con más almidón y menos fibra parece que sucede el efecto contrario (Owens, 2005). Un aumento de la fracción FND disminuye la digestibilidad total del almidón, en particular en vacas de leche, disminuyendo la desaparición ruminal y post-ruminal.

Frente a la molienda normal, los copos en vacas de leche aumentan la digestión ruminal del almidón y la digestibilidad de la fracción restante que alcanza el intestino delgado, al tiempo que modifican la partición de nutrientes al incrementar la transferencia de urea sintetizada en el hígado hacia el intestino y, por tanto, aumentar la síntesis de proteína microbiana (cuadro 21), y también la captación de aminoácidos por la glándula mamaria y la síntesis de proteína (Theurer et al., 1998, 1999a,c). También aumentó la síntesis de glucosa en hígado y las concentraciones ruminales de propionato en vacas, y la absorción neta de propionato en terneros y vacas en más de un 20% (Theurer et al., 1999c). Aparentemente los beneficios de tratar maíz y sorgo pueden ser mayores para vacas que para terneros. En esta experiencia (Theurer et al., 1999c), al incluir copos de maíz o sorgo en lugar de los cereales sin tratar, consiguieron un aumento de la producción de leche superior al 5% con una mejora del 2,3% del porcentaje de proteína y una disminución de más del 4% del porcentaje graso de la leche. El PT, en este caso, mejora la energía neta (EN) en un 15-20 en relación al cereal molido. Blezinger (2005) señala que, en el caso del maíz en vacas de leche, la diferencia de EN entre copos obtenidos por molienda sin calor y copos tratados con calor fue de un 33% (de 1828 a 2423 kcal/kg, datos de Plascencia y Zinn, 1996, no publicados), sugiriendo que en la práctica debe aplicarse una diferencia entre el 10 y el 15% del valor de EN.

El PT, en mayor o menor grado, gelatiniza el almidón y desnaturaliza la proteína, modificando la solubilidad de las distintas fracciones y haciendo al almidón más accesible a la degradación microbiana y a la proteína menos, lo que hace que los cereales fermenten más rápidamente al ser expandidos y granulados (Hinman y Johnson, 1974 y Xiong et al., 1991 citados por Guada 1993; Poncet et al., 2003). El patrón de fermentación cambia hacia una mayor formación de ácido propiónico y menor de acetato e isovalerato, y una menor formación de N amoniacal, como lo demuestran estudios *in vitro* llevados a cabo por Azafar (2007) y de acuerdo con otras referencias (Crocker et al., 1998; Yang et al., 2000; Prestløkken and Harstad, 2001; Corona et al., 2006). Estos resultados indican que el procesado podría tener un efecto positivo en la sincronización entre la fermentación de los carbohidratos y las proteínas en el rumen.

Cuadro 21.- Efectos del tratamiento sobre la digestibilidad del almidón de maíz y sorgo (Adaptado de Theurer y col., 1999 a,c).

| | Maíz | | | Sorgo | | |
|---------------------------------|---------------------|-------------------|-------|---------------------|-------------------|-------|
| | Molido ¹ | Copos | % Δ | Molido ¹ | Copos | % Δ |
| <u>TERNEROS</u> | | | | | | |
| Ingesta almidón, Kg/d | 3,06 | 3,04 | | 4,25 | 4,27 | |
| Digestibilidad almidón, % | | | | | | |
| Ruminal | 65 ^a | 81 ^b | 25 | 57 ^a | 78 ^b | 37 |
| Post-ruminal | 68 ^a | 92 ^b | 35 | 85 | 94 | 10 |
| Total | 88,6 ^a | 98,7 ^b | 11 | 94,2 | 98,8 | 3 |
| Proteína microbiana, flujo kg/d | 0,44 | 0,50 | 13 | 0,53 | 0,58 | 10 |
| Mejora EN, % | | | 4-15 | | | 9-14 |
| <u>VACAS LECHE</u> | | | | | | |
| Ingesta almidón, Kg/d | 3,4 | 3,7 | | 7 | 7 | |
| Digestibilidad almidón, % | | | | | | |
| Ruminal | 35 ^a | 52 ^b | 49 | 54 ^a | 76 ^b | 40 |
| Post-ruminal, % entrada | 61 ^a | 93 ^b | 52 | 74 ^a | 90 ^b | 21 |
| Total | 77,5 ^a | 96,6 ^b | 25 | 88,7 ^a | 97,9 ^b | 10 |
| Proteína microbiana, flujo kg/d | 1,04 ^a | 1,23 ^b | 18 | 2,10 | 2,33 | 10 |
| Mejora ENI, % | | | 11-33 | | | 13-20 |

¹R: molido con rodillos. ²RV: molido con rodillos con algo de vapor. ³Cocción con vapor y aplastamiento. Letras con diferentes superíndices en la misma fila significan valores estadísticamente distintos (P < 0,05).

En terneros Harmon y McLeod (2005) efectúan una revisión de todos los datos disponibles (cuadro 22). El almidón que escapa a la fermentación ruminal y llega al intestino delgado se digiere de media un 62% y esta proporción disminuye con el nivel de ingesta. El resto pasa al intestino grueso donde fermenta entre el 35 y el 50% y donde también parece haber relación negativa con el flujo de almidón, aunque estos datos son variables y dependen del tipo de animal, cereal y PT.

Para evaluar el impacto de los cambios en el lugar de la digestión, Harmon and McLeod (2005) calculan el rendimiento en ED en cada zona del tracto intestinal y la ED total. Los valores tomados para el cálculo de la eficiencia energética fueron: ruminal 80%, en intestino delgado 97% y en intestino grueso 62%. Para el cálculo se consideró que la digestibilidad en intestino grueso fue del 44% y el resto se fue variando para calcular los resultados que se muestran en la figura 11. Estos datos demuestran que la energía disminuye cuando la digestibilidad intestinal fue inferior al 75%, en cambio por encima de

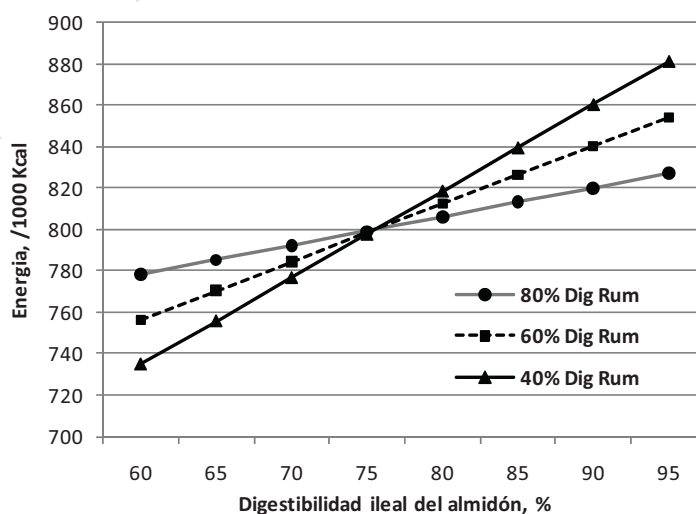
este valor el rendimiento energético aumenta al cambiar la digestión del rumen al intestino delgado, sin olvidar que el efecto es tanto más importante cuanto menor es la digestibilidad ruminal. Los valores de digestibilidad intestinal suelen estar en el extremo inferior del rango con una media del 62% (cuadro 22). Esto supone que solamente con alimentos procesados donde se maximice la digestión intestinal podemos obtener beneficio de modificar el lugar de la digestión (Theurer et al., 1998). La baja digestibilidad y eficiencia energética en el intestino grueso implica que debemos evitar que lleguen cantidades importantes de almidón a este tramo intestinal.

Cuadro 22.- Resumen de experiencias que han medido la digestibilidad intestinal del almidón en vacuno de carne. Adaptado de Harmon y McLeod (2005)

| | Media | SEM ¹ |
|------------------------------------|-------|------------------|
| Peso vivo, kg | 326 | 11 |
| Ingesta MS, g/d | 6.381 | 316 |
| Ingesta de almidón, g/d | 3.160 | 116 |
| <u>Digestibilidad</u> | | |
| Ruminal, % ingesta | 79,5 | 1,1 |
| Intestino delgado, % entrada | 61,9 | 2,9 |
| Intestino grueso, % entrada | 46,9 | 2,5 |
| Digestibilidad intestinal total, % | 94,8 | 0,6 |

¹SEM: error estándar de la media.

Figura 11.- Relación entre la digestibilidad ruminal e intestinal del almidón en el rendimiento energético. Cada línea representa el rendimiento energético al modificar la digestión en el intestino delgado para una digestibilidad ruminal dada (Adaptado de Harmon y McLeod, 2005)



Corona et al. (2006), en terneros, encuentran que con los copos de maíz redujeron el flujo duodenal de almidón un 36%, debido a un aumento de la digestibilidad ruminal del almidón del 17%. La digestión post-ruminal mejoró el 95%, reduciendo un 95% la excreción fecal de almidón. La digestibilidad total del almidón en el tracto digestivo se mejoró un 16% y la del N un 8,4%. La digestibilidad de la fracción FAD se redujo un 26,7% debido a una disminución de la digestión ruminal. Estos autores señalan que la mejora energética de los copos en vacuno de carne fue del 19%, indicando que las $\frac{3}{4}$ partes de esta mejora se deben a la mejora de la digestibilidad de la MO y el $\frac{1}{4}$ restante a la reducción de la formación de metano. Zinn (1993), en terneros, señala que el PT para producir copos mejoró el valor de ENm de la cebada entre un 2,8 y un 7% según el tamaño de los copos obtenidos. La mejoría fue atribuible a un aumento de la digestibilidad del almidón, tanto a nivel ruminal como en todo el tracto digestivo, pero sobre todo se debió a la mejor utilización del N ruminal, disminuyendo las pérdidas por formación de metano, a un mayor flujo de N microbiano y a una digestión post-ruminal más eficiente de la proteína.

Estos efectos, sin duda, tienen que ver con el tamaño de partícula, como ponen de manifiesto Bengochea et al. (2005) que indican que la reducción del tamaño de partícula por la molienda con rodillos de la cebada aumenta el valor ENm y ENg de 1700 a 2002 y de 990 a 1300 kcal/kg MS, es decir un 17,7 y 31% respectivamente. Beauchemin et al. (2001) estudian el efecto de distintos PT sobre la cebada en terneros observando que no afectan a la ingesta total, pero que disminuyen el tiempo de rumia cuanto mayor es la intensidad del procesado, llegando hasta un 30%. El control del proceso debe hacerse para maximizar la rumia y disminuir la velocidad de la fermentación ruminal, y así prevenir la incidencia de acidosis y otros problemas metabólicos. No obstante, su alcance debe ser suficiente para maximizar la digestibilidad y la síntesis de proteína microbiana. En su estudio estas condiciones se dieron con un índice de procesado del 75%, siendo este índice la densidad de la cebada después del proceso como porcentaje de la densidad sin procesar.

Zinn et al. (2002) comparan todos los datos bibliográficos obtenidos con maíz crudo vs copos en terneros de engorde, y las medias de los trabajos arrojan unos valores de ENm y ENg de 2420 (2240 a 2560) y 1720 (1550 a 1840) kcal/kg para los copos, con mejoras de 12,1% (4 a 20,2) y 16,1% (4,5 a 27,2), respectivamente, frente al maíz. La ganancia de peso se mejoró de media un 5,4% y la ingesta se redujo un 6,1%. Owens et al. (1997) señalan una mejoría en la ENm de 17,3% al procesar el maíz para obtener copos.

El flujo de proteína microbiana hacia el duodeno está relacionado con la digestibilidad ruminal de materia orgánica (MO) y, por lo tanto, se aumenta con el PT. Un déficit en proteína degradable puede disminuir el flujo de proteína microbiana y el

rendimiento energético de la fermentación ruminal del almidón (Cooper et al., 2002). La proteína que escapa a la degradación ruminal es mayor con la intensidad del PT, como consecuencia de las reacciones de los grupos amino de los aminoácidos con los carbohidratos, y aumenta en presencia de xilosa que puede estar en el medio como consecuencia de la ruptura parcial de cadenas de arabinosilanos. El PT debe controlarse para que estas reacciones sean reversibles y se liberen los aminoácidos a nivel intestinal. Un excesivo calentamiento haría esta reacción irreversible disminuyendo la digestibilidad de la proteína. Para ello es necesario controlar la variación de la solubilidad de la proteína que produce cada tratamiento. Putier (1993) señala que una disminución de la solubilidad de un 20% es adecuado para rumiantes. Van der Poel (1997), refiriéndose a la expansión, señala que en los rumiantes se modifica la degradabilidad del pienso sin afectar a la digestibilidad intestinal.

El contenido en proteína no degradable (PND) de varias materias primas después de ser procesadas en un expander figura en los cuadros 23 y 24 (Eltner, 1996 y Auran, 1995, citados por Muirhead 1995). La expansión redujo la degradabilidad efectiva de la proteína (DEP) en cebada, avena, mezclas de cereales y soja sin afectar a la colza. Además aumentó la digestibilidad intestinal de la PND, con lo que aumentó el flujo intestinal de aminoácidos disponible para la producción. La expansión, en cambio, no afectó ni a la digestibilidad de la proteína bruta ni al valor energético.

Cuadro 23.- Efecto del tratamiento en expander sobre el contenido en Proteína No Degradable (PND, %) de las materias primas (Eltner, 1996)

| | Tal cual | Expandida |
|-------------------------|-----------------|------------------|
| Cereales | 10-15 | 45-55 |
| Habas de soja | <10 | 40-45 |
| Harina de soja | 40-45 | 55-60 |
| Harina de colza | 25-35 | 55-60 |
| Harina de colza presión | 20-35 | 50-60 |
| Gluten feed | 25-35 | 35-50 |

Se sabe que las proteínas de las leguminosas se degradan fácilmente en el rumen y que la aplicación de calor puede reducir esa degradación. En el caso de habas y altramuces, Benchaar et al. (1992) demuestran que los valores PDIN y PDIE aumentan un 6 y 32% en el primer caso y un 13 y un 194% en el segundo. Sin embargo, en el caso del altramuces Froidmont et al. (2008) indican que la extrusión sólo produce un beneficio marginal y que

se consigue mayor efecto con molindas adecuadas, señalando que las partículas gruesas se degradan más en el rumen, posiblemente como consecuencia de una mayor rumia.

Cuadro 24.- Degradabilidad efectiva de la proteína (DEP)¹ y digestibilidad de la proteína no degradada (dPND)² en materias primas tal cual y expandidas a 130°C. Valores medios \pm desviación estándar (Prestlokken, 1994, citado por Muirhead, 1995)

| | DEP, % | | dPND, % | |
|--|----------------|----------------|------------|------------|
| | Tal cual | Expandida | Tal cual | Expandida |
| Cebada | 65,5 \pm 5 | 50 \pm 4 | 81 \pm 4 | 87 \pm 3 |
| Avena | 88 \pm 2 | 66 \pm 9 | 59 \pm 1 | 87 \pm 4 |
| Harina de soja | 57 \pm 3 | 53 \pm 4 | 96 \pm 1 | 97 \pm 1 |
| Harina de colza | 63 | 62 \pm 4 | 79 | 80 \pm 5 |
| Mezcla de cereales ³ | 68 \pm 4 | 57 \pm 5 | 82 \pm 6 | 87 \pm 5 |
| Mezcla de proteínas ⁴ | 61 \pm 2 | 54 \pm 3 | 86 \pm 2 | 90 \pm 2 |
| Piensos de vacas lecheras ⁵ | 68,7 \pm 5,5 | 53,5 \pm 4,6 | | |

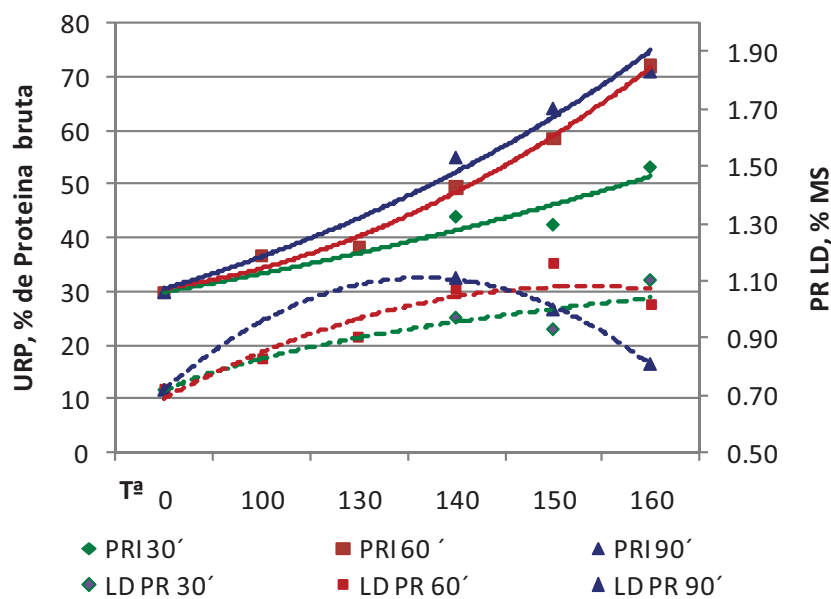
¹DEP calculada según Orskov y McDonald (1979), ²dPND calculada según Hvelplund et al.(1992). ³Cebada y avena 75 % mínimo. ⁴Soja y colza 80 % mínimo. ⁵Valores medidos en muestras de 7 fábricas del grupo FK.

La principal fuente de proteína en rumiantes es la soja y se sabe que las necesidades en PND son importantes en animales de alta producción. En condiciones normales, sólo entre el 25 y el 34 % de la proteína de soja y harina de soja escapa la degradación ruminal (NRC, 1989). Uno de los sistemas más sencillos para aumentar la proteína ruminal indegradable en la soja es el tratamiento con calor. El calor facilita la reacción de Maillard, cuya primera etapa lleva a la formación de bases de Schiff, que son complejos más resistentes al ataque enzimático que los enlaces peptídicos y que aumentan la indegradabilidad. Esas reacciones son reversibles y al pH abomasal los compuestos formados se hidrolizan haciendo que esta proteína sea digestible a nivel intestinal. El alcance de estas reacciones depende del calor y tiempo de tratamiento y la no excesiva presencia de agua facilita estas modificaciones.

Faldet et al. (1992) estudian la influencia del tiempo y T^a en la calidad de las habas de soja sometidas a un proceso de tostado (figura 12). Encuentran que con diferentes condiciones de T^a y tiempo se puede llegar a los mismos resultados y que con la incorporación de humedad al proceso los resultados pueden mejorar aún más. Faldet et al. (1991) indican la necesidad de prever los resultados de los PT mediante el análisis químico sugiriendo que el método de determinación de la lisina reactiva (Carpenter, 1960; Peterson

y Warthesen, 1979), el valor PDI (Protein Dispersibility Index) y la medida de la adsorbancia del extracto acuoso (Eichner y Wolf, 1983, citado por Hsu y Satter, 1995) pueden ser útiles para predecir el valor nutricional de la soja tratada térmicamente. En cuanto a la determinación del N ligado a la fracción FAD, como medida del efecto del PT, hay opiniones contradictorias sobre la validez de los resultados (Ling y Kung, 1992).

Figura 12.- Efecto de la temperatura y el tiempo sobre el contenido en proteína ruminal indegradable (PRI, líneas continuas) y la lisina postruminal disponible (LD PR, líneas a trazos) en la soja fullfat. Adaptado de Faldet et al. (1992)



Scott et al. (1991) indican que el PT de las habas de soja no afecta a los resultados productivos en vacas pero sí a la calidad de la leche al disminuir el % de proteína. En relación al haba cruda todos los parámetros de digestibilidad total disminuyeron con el PT así como la concentración ruminal de propiónico, aumentando la relación acético/propiónico. La digestibilidad fecal aparente total (DFA) de la PB aumentó con la extrusión, en cambio el tostado tuvo un efecto negativo no sólo sobre la proteína sino también sobre la digestibilidad de los ácidos grasos, en este caso, posiblemente debido a la formación de compuestos de oxidación. También disminuyó la digestibilidad de la FND. La Tª de extrusión reduce el contenido de grasa de las habas de soja (Nowak et al., 2005).

Las ventajas del aporte de aminoácidos de las habas de soja en piensos de rumiantes, a menudo, se ven reducidas por la degradación ruminal de la proteína. El PT

aumenta la indegradabilidad de la PB, aunque debemos conocer cuáles son las condiciones que permiten unos óptimos resultados para evitar el bloqueo de las proteínas por el calor.

Ling y Kung (1992) y Faldet et al. (1992b) señalan que, aunque la extrusión reduce la degradabilidad ruminal del N, el tostado es más eficaz. Sin embargo, las condiciones de cada proceso pueden modificar los resultados. En general, se está de acuerdo que el tostado no es el mejor método, pero es necesario fijar cuáles son las mejores condiciones de la extrusión. Orias et al. (2002) estudian esas condiciones en terneros y observan que al aumentar la T^a de extrusión tiende a reducirse el N amoniacal en el rumen y, aunque no se modificó el flujo duodenal de proteína, sí aumentó la desaparición en el intestino delgado en relación a la entrada como consecuencia de una mayor digestibilidad de la proteína en este tramo, sin que se consigan mejoras al aumentar la T^a de 138 a 160°C. El flujo de AA al intestino delgado fue un 18 % mayor (P>0,05) con la extrusión, y hubo un aumento del 30% de la desaparición intestinal tanto de AA esenciales como no esenciales cuando la T^a de extrusión aumentó de 116 a 160°C, excepto en el caso de la Met y la glicina (Gli), sin que la Lys fuese afectada. Estos resultados están de acuerdo con lo apuntado por otros autores (Aldrich et al., 1995; Stern et al., 1985; citados por Orias et al., 2002) indicando que la T^a de 138 °C puede no ser suficiente para proteger a las proteínas de soja de la degradación ruminal y maximizar el uso postruminal de los AA.

Nowak et al. (2005) estudian el efecto de distintas T^a de extrusión sobre la degradabilidad ruminal de MS y PB de las habas de soja (figuras 13 y 14) observando que con independencia de la T^a la extrusión redujo la degradabilidad ruminal de la PB y de la MS debido a una reducción neta de las fracciones rápidamente degradables y a un aumento de las fracciones potencialmente degradables. Aunque las diferencias no fueron significativas, los valores de digestibilidad intestinal de la PB aumentaron con la extrusión. Lindberg et al. (1982) encuentran que el tratamiento a 150 y 200°C de granos de colza disminuyen la degradabilidad de la proteína un 18 y 52% respectivamente, sin que el calentamiento a 100°C tuviera ningún efecto.

La disminución de la degradabilidad ruminal de las proteínas consecuencia del PT en general conlleva un aumento de la digestibilidad de las proteínas en el intestino delgado (dr), lo que ha sido demostrado *in vivo* para el guisante (Poncet et al., 2003), para el altramuz (Rémond et al., 2003), y para las habas (Benchaar et al., 1994) y más recientemente para leguminosas, cereales y soja (Solanas et al., 2008). Este aumento se explica por un mayor flujo de proteína alimentaria al intestino que se empieza a producir, en general a partir de T^a de 100- 140°C, sin que aumentos mayores de T^a sean más efectivos. En condiciones óptimas la proporción de N bypass se dobla pasando la digestibilidad real en intestino delgado de 80-85% a 90-95% (Poncet et al. 2003). En

algunos casos, en cambio, la disminución de la degradabilidad ruminal no modificó los valores dr (Benchaar and Moncoulon, 1993; Cros et al., 1991), pero, cuando los tratamientos son correctos, los valores dr no disminuyen.

Figura 13.- Degradabilidad de la MS de la soja fullfat. Efecto de distintas condiciones de extrusión (Nowak et al., 2005)

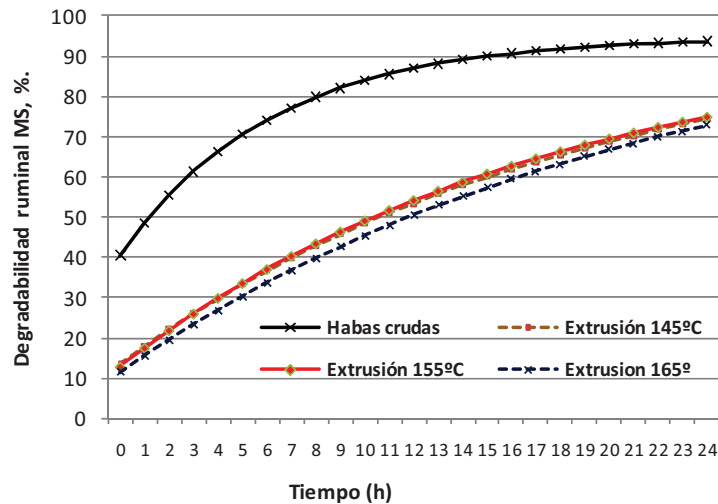
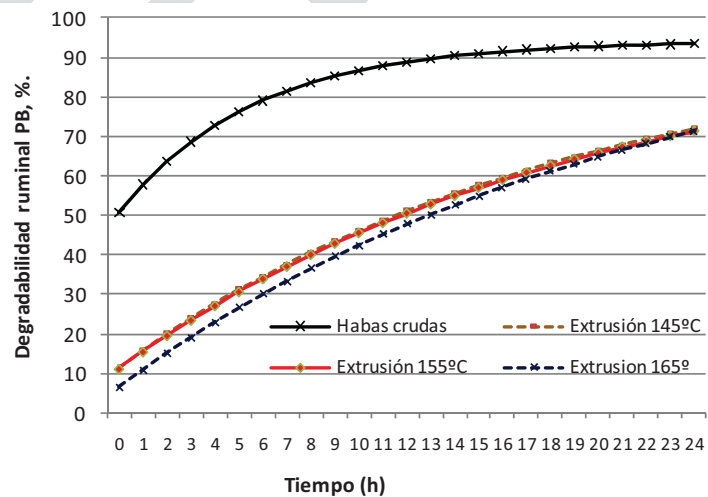


Figura 14.- Degradabilidad de la PB de la soja fullfat. Efecto de distintas condiciones de extrusión (Nowak et al., 2005)



Aunque los efectos observados en vacuno en mayor o menor grado sean extrapolables al ganado ovino, en particular lo referente a la proteína, lo cierto es que en esta especie el menor tamaño del orificio retículo-omasal aumenta la retención de los granos en el rumen, aumentando la rumia hasta una reducción efectiva de las partículas.

Ello conlleva que el ovino digiere mejor el almidón de maíz en el rumen que el vacuno (74 frente a 67%) y probablemente el sorgo, aunque no la cebada (Waldo, 1973, citado por Guada, 1993; Lardy 2010). El hecho de que el PT tenga menos impacto en la digestión del almidón en ovino y caprino que en vacuno (Orskov, 1976) implica una mayor respuesta al procesamiento de los cereales en el ganado vacuno que en las otras especies. Estudios antiguos (Tait y Bryant, 1973) demostraron que, en el caso de cebada y trigo, el procesamiento no es necesario en dietas para corderos y que no representa ninguna ventaja ni en términos de digestibilidad ni en términos de resultados. Stanton y LeValley (2006) en el mismo sentido no recomiendan procesar los granos en el caso del ovino. Las peculiaridades del ganado ovino condicionan la extrapolación de las respuestas obtenidas en vacuno, así por ejemplo, a diferencia de lo que sucede en terneros, en ovino Prestiokken (1994) no observa mejoría en el valor energético al expandir el pienso (cuadro 25). Sin embargo en corderos jóvenes, en la práctica, en algunos casos se suelen emplear cereales extrusionados o en copos, particularmente maíz.

Cuadro 25.- Valor energético de cebada y avena. Medidas en experimentos de digestibilidad en ovino. Adaptado de Prestiokken (1994)

| | EM ¹ (MJ/Kg) | | UFL ² | |
|--------|-------------------------|-----------|------------------|-----------|
| | Tal cual | Expandida | Tal cual | Expandida |
| Cebada | 13,1 | 13 | 1,17 | 1,18 |
| Avena | 12,7 | 12,7 | 1,12 | 1,12 |

¹Energía Metabolizable.

²UFL: energía neta medida como unidades alimenticias leche.

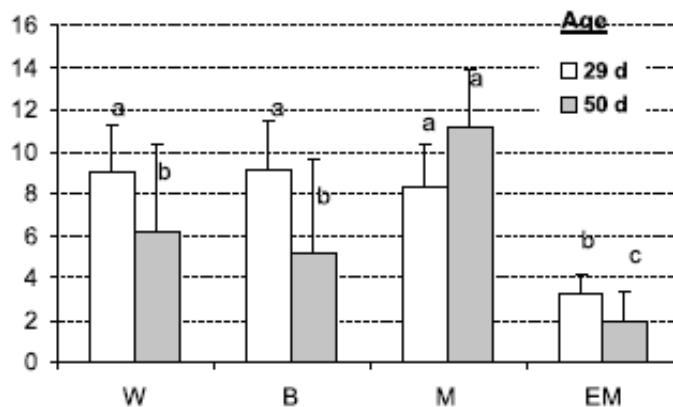
8.- EFECTOS DEL PROCESADO TÉRMICO EN CONEJOS Y CABALLOS

8.1.- Conejos

Hay pocos datos sobre el efecto de los diferentes tratamientos térmicos en piensos de conejos, salvo para la granulación. La mayoría de los estudios realizados de los que hay referencias sobre los tratamientos térmicos son sobre maíz extrusionado. En los primeros trabajos Lebas (1976) observa mejoras en los resultados con el empleo de trigo en copos, sin observar mejora alguna con la expansión. Sin embargo en conejos en interés del PT ha sido relativo.

Recientemente Gidenne et al. (2005b) estudian la respuesta a varios tipos de almidón observando que, aunque la digestibilidad ileal del maíz es menor que la de trigo o cebada, esta se mejoró considerablemente con la extrusión, indicando el efecto positivo de ésta en la mejora de la digestibilidad antes del ciego. Gutiérrez et al. (2002) en estudios con dietas con almidón aportado por guisante y trigo señalan que el PT reduce la concentración ileal de almidón. El aumento en la digestibilidad ileal es coherente con el aumento *in vitro* de la solubilidad del almidón al extrusionarlo, señalado por Maertens y Luzi (1995), aunque los resultados dependen de las condiciones y de la presencia de almidón retrogradado. En general, todos los trabajos concluyen que los tratamientos térmicos mejoran la digestibilidad ileal del almidón. Sin embargo la extrusión del maíz, en relación al cereal sin extrusionar y a otros cereales, no mejora los parámetros de DFA (Cossu et al., 2004) ni reducen las pérdidas fecales de almidón (Maertens y Luzi, 1995), aunque este efecto puede tener que ver con la posible retrogradación.

Figura 16.- Concentración ileal de almidón según la edad y fuente (W: trigo, B: cebada, M: maíz, EM: maíz extrusionado. Valores con letras diferentes son estadísticamente diferentes ($P < 0,05$))



Por otro lado, parece que el efecto de la extrusión sobre el maíz modifica el peso de algunos órganos digestivos. Guidenne et al. (2005a) señalan que se aumenta ligeramente el tamaño del ciego y, aunque hubo tendencia a aumentar la fracción molar de propionato y a disminuir la de butirato, concluyeron que no afectó ni a la actividad fermentativa ni a la digestión de la fibra. Cossu et al. (2004) observan que aunque la extrusión del maíz no afectó al peso del ciego, sí que aumentó el peso del estómago, además un incremento del nivel de maíz extrusionado en el pienso aumentó el peso de los riñones y disminuyó el del hígado.

En cuanto a los resultados zootécnicos las respuestas son variables. Guidenne et al. (2005a) indican que la extrusión del maíz limita el consumo de pienso antes del destete y en consecuencia el peso, sin que afectara al peso final de los animales o al I.C. Sin embargo, en otro estudio Guidenne y col (2005b) concluyen que la extrusión del maíz reduce la ingesta en todos los períodos y mejora proporcionalmente el I.C. a partir de los 50 d y en todo el período de engorde. Gutiérrez et al. (2002) señalan que el PT mejora el I.C. y, en cambio, Cossu et al. (2004) observan una mayor ganancia de peso los primeros 60 días de vida sin que observaran efectos sobre el consumo ni el I.C., recomendando el empleo de maíz extrusionado desde los 40 d a niveles de hasta un 35%. En estos estudios ni la extrusión ni la fuente de cereal modificó la incidencia de enteropatías (Guidenne et al., 2005b).

8.2.- Caballos

En los caballos la digestión de los diferentes cereales depende del tipo, nivel de ingesta y PT de los mismos. La digestibilidad del almidón en el conjunto del tracto intestinal es muy alta en todos los casos, sin embargo el tratamiento de los cereales conlleva a una mejora de los resultados, lo que se explica por el hecho de que los PT de los granos modifican la digestión del almidón aumentando la digestión intestinal que es más eficaz desde un punto de vista energético, ya que en el intestino el almidón se transforma en glucosa mientras que el que llega a ciego y colon es fermentado a AGV y lactato, de menor rendimiento energético. La extensión de la digestión en uno u otro compartimento digestivo puede ser dirigida mediante la elección del tipo de cereal y el procesamiento del mismo (Julliard et al., 2006). Estos datos han sido recientemente confirmados por Rosenfeld y Austbo (2009) quienes indican que el maíz tiene un mayor tiempo de retención en ciego que cebada o trigo y que las harinas gruesas también tienen mayores tiempos de retención en este compartimento digestivo que los cereales tratados térmicamente, observando que en ningún caso se modifica el tiempo de retención total en el TGI de los caballos.

El tiempo de retención en el intestino delgado es muy bajo y alcanza el 10-20% del total y una forma de mejorar la digestión en esta parte es tratar los cereales, aunque el tratamiento puede afectar a cada uno de ellos de manera diferente. Así, mientras el almidón del grano de avena tiene una alta digestibilidad, el del maíz está limitado a causa de su estructura y es mejorable por la reducción del tamaño de partícula o por los tratamientos térmicos (de Fombelle et al., 2003). La molienda altera la forma física del grano aumentando la superficie de contacto o de ataque de las enzimas y microorganismos. En la medida que la molienda reduce el tamaño de partícula más que la masticación, aumenta la digestibilidad del almidón, especialmente en el caso del maíz. Los tratamientos térmicos

mejoran la digestibilidad del almidón del maíz en caballos, como han confirmado (Hoekstra et al., 1999 citado por Julliand et al., 2006), al aumentar la respuesta glicémica. Las alteraciones de los gránulos de almidón después del procesado explican muy bien la mejora de digestibilidad del almidón en el yeyuno y la diferencia de respuesta entre los diferentes tratamientos (Kienzle et al., 1997).

Entre el 4 y el 30% del almidón ingerido llega sin digerir al intestino grueso. Se sabe que, si la ingesta de almidón en cada comida es alta, por encima de 200g/Kg PV, entonces la cantidad disponible para ser fermentada en ciego y colon aumenta y también el riesgo de provocar disfunciones digestivas (Meyer et al., 1995). El PT es positivo para disminuir el riesgo de problemas digestivos (McLean et al., 2000, citado por Julliand et al., 2006), sin embargo, los datos publicados no permiten predecir con absoluta certeza cuánto almidón es fermentado en el intestino grueso según el tratamiento mecánico o térmico empleado y además parece que los PT no afectan a la cinética de degradación fermentativa del almidón (Julliand et al. 2006).

9.- REFERENCIAS

- ABD EL-KHALEK, E. y JANSSENSE, G.P.J. (2010) *World's Poultry Science Journal* 66: 53-63.
- ALONSO, R., GRANT, G., DEWEY, P. y MARZO, F. (2000) *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 48: 2286-2290.
- APELT J. (1987) En: *6th European Symposium on Poultry Nutrition*. Konigslutter, Germany.
- AUMAITRE, A., BONNEAU, M., COINTFPAS, F., LEBOST, J. y PEINIAU, J. (1976) *Annales de Zootechnie*. 25: 41-51.
- AZARFAR, A. (2007). *Fractions of Ruminant Feeds: kinetics of degradation in vitro*. PhD Thesis, Wageningen Institute of Animal Sciences, Animal Nutrition Group, Wageningen University, the Netherlands .ISBN: 90-8504-557-6.
- AZIZAH A.H. y ZAINON, H. (1997). *Malasian Journal of Nutrition*. 3: 131-136.
- BARRIER-GUILLOT, B., ZUPRIZAL, JONDREVILLE, C., CHAGNEAU, A.M., LARBIER, M. y LEUILLET, M. (1993) *Animal Feed Science and Technology* 41: 149-159.
- BEAUCHEMIN, K.A., YANG, W.Z. y RODE, L.M. (2001) *Journal of Animal Science* 79: 1925-1936.
- BEHNKE, K.C. y BEYER, R.S.(2002) En: *VIII International Seminar on Poultry Production and Pathology*. Santiago, Chile.
- BENCHAAR C. y MONCOULON, R. (1993) *Annales de Zootechnie*. 42: 128-129.

- BENGOCHEA, W.L., LARDY, J.P., BAUER, M.L. y SOTO-NAVARRO, S.A. (2005) *Journal of Animal Science* 83: 2815-2825.
- BERNARD, K. y CALHOUN, M.C. (1997) *Journal of Dairy Science* 80: 2062–2068.
- BEUMER, H. y VAN DER POEL A.F.B (1997) *Expander processing of animals feeds, chemical, physical and nutritional effects*. Van der Poel Ed. Wageningen. Netherlands.
- BJÖRCK, I., M. NYMAN, y Asp, N.G. (1984) *Cereal Chemistry*. 61:174–179.
- BJORCK, I., MATOBA, T. y NAIR, B.M.. (1985) *Agricultural Biological Chemistry*. 49: 945-951.
- BLEZINGER, S. (2005) Grain processing has positive effects on production. Part II. Cattle today. www.cattletoday.com. Accedido 08/08/2010.
- BRENES, A. y BRENES, J. (1993) En: *IX Curso de Especialización*. FEDNA. 199-232.
- CAFÉ, M.B., SAKOMURA N.K., JUNQUEIRA, O.M., CARVALHO, M.R.B. y DEL BIANCHI, M. (2000) *Revista Brasileira de Ciência Avícola*. 2 (1).
- CALLAN, J.J., GARRY, B.P. y O'DOHERTY, J.V.(2007) *Animal Feed Science and Technology* 134: 223–234.
- CANIBE, N. y BACK KNUDSEN, K.E. (1997) *Animal Feed Science and Technology* 64: 293-310.
- CANIBE, N. y BACK KNUDSEN, K.E. (2002) *Journal of Science and Food Agriculture*. 82: 27-39.
- CANIBE, N. y EGGUM, B.O. (1997) *Animal Feed Science and Technology* 64: 311-325.
- CARMODY, R.N. y WRANGHAM, R.W. (2009) *Journal of Human Evolution*. 57: 379-391.
- CARPENTER, K.J. (1960) *Biochemistry Journal* . 77: 604-610.
- CARRÉ, B., MIGNON-GRASTEAU, S., PÉRON, A., JUIN, H. y BASTIANELLI, D. (2007) *World's Poultry Science Journal*. 63: 585-596.
- CHAPOUTOT P. y SAUVANT D. (1997) *Animal Feed Science and Technology*. 65: 59-77.
- COOPER, R.J., MILTON, C.T., KLOPFENSTEIN, T.J., SCOTT, T.L., WILSON C.B y MASS, R.A. (2002) *Journal of Animal Science* 80: 797-804.
- CORONA, L., OWENS, F.N. y ZINN, R.A. (2006) *Journal of Animal Science* 84: 3020–3031.
- COSSU, M.E., CUMINI, M. y LAZZARI, G. (2004) En: *8th World Rabbit Congress*. Puebla Mexico. pp. 785-791
- CROCKER LM, DEPETERS EJ, FADEL JG, PEREZ-MONTI H, TAYLOR SJ, WYCKOFF JA y ZINN R.A. (1998) *Journal of dairy Science* 81: 2394-2407.
- CHAMP M. y COLONNA, P. (1993) *INRA Productions Animales*. 6 (3): 185-198.
- CHU, K.S., KIM, J.H., CHAE, B.J., CHUNG, Y.K. y HAN, I.K., (1998) *Asian-Australasian Journal of Animal Science* 11: 249-254.

- DEACON, M.A., DE BOER, G. y KENNELLY, J.J. (1988) *Journal of Dairy Science* 71(3): 745-53.
- DEN HARTOG, L.A., VAN DER POEL, A.F.B., HUISMAN, J., SAUER, W.C y VAN LEEUWEN, P. (1988) En: *Proceedings of the 5th Symposium on Protein Metabolism and Nutrition, European Association for Animal Production*, Publ. No. 35. 37: 56.
- EERLINGEN, R.C., JACOBS, H. y DELCOUR, J.A. (1994) *Cereal Chemistry* 71.4: 351 - 355.
- ELSTNER F. (1996) *Feed Management* 47 (6): 23-28.
- ENGLYST, H.N., KINGMAN, S.M. y CUMMINGS, J.H., (1992) *European Journal of Clinical Nutrition* 46 (Suppl 2): 33-50.
- FADEL, J.G., NEWMAN, C.W., NEWMAN, R.K. y Graham, H. (1988) *Canadian Journal of Animal Science* 68: 891-897.
- FALDET, M.A., VOSS, G.A., BRODERICK, G.A. y SATTER, L.D. (1991) *Journal of Dairy Science* 74: 2548-2554
- FALDET, M.A., SATTER, L.D. y BRODERICK, G.A. (1992a) *Journal of Nutrition* 122: 151-160
- FALDET, M.A., SON, Y.S. y SATTER, L.D. (1992b) *Journal of Dairy Science* 75: 789-160.
- FARAJ, A., VASANTHAN, T. y HOOVER, R., (2004) *Food Research International* 37: 517-525.
- FASINA, Y.O., CAMPBELL, G.L. y TYLER, R.T. (1997) *Canadian Journal of Animal Science* 77:185-190.
- FENWICK, R., SPINKS, E.A., WILKINSON, A. HEANEY, R. y LEGOY, M. (1986) *Journal Science Food and Agriculture* 37: 735-741.
- FERCHAL, E., GALEA, F. y ROUILLERE, H. (2003) En: *Cinquièmes Journées de la Recherche Avicole*. Tours. France.
- FANCHER, B.I., ROLLINS, D. y TRIMBEE, B. (1996) *Journal of Applied Poultry Research*.5: 386-394.
- FROIDMONT, E., BONNET, M., OGER, R., DECRUYENAERE, V., ROMNÉE, J.M., BECKERS, Y. y BARTIAUX-THILL, N. (2008) *Animal Feed Science and Technology* 142: 59-73.
- GARCÍA, M., LÁZARO, R., GRACIA, M., REVUELTA, R. y MATEOS, G.G. (1998) *Poultry Science Journal* 77 (Suppl. 1): 72.
- GONZALEZ-ALVARADO, J.M., JIMENEZ-MORENO, E., LAZARO, R. y MATEOS, G.G. (2007) *Poultry Science* 86: 1705-1715.
- GONZALEZ-ALVARADO, J.M., JIMENEZ-MORENO, E., VALENCIA, R., LAZARO, R. y MATEOS, G.G. (2008) *Poultry Science* 87: 1779-1795
- GONZALEZ-ESQUERRA y LEESON (2000) *Poultry Science*.79: 1603-1607.

- GRACIA, M.I., LATORRE, M.A., GARCÍA, M., LÁZARO, R. y MATEOS, G.G. (2003) *Poultry Science* 82: 1281-1291.
- GUADA, J.A. (1993) En: *IX Curso de especialización FEDNA*. Madrid.
- GUILLOU, D. y LANDEAU, E. (2000) *INRA Productions animals* 13.2: 137-145.
- GUIDENNE, T., SEGURA, M. y Lapanouse, A. (2005a) *Animal Research* 54: 55-64.
- GUIDENNE, T., JEHL, N., PEREZ, J.M., ARVEUX, P., BOURDILLON, A., MOUSSET, J.L., DUPERRAY, J., STEPHAN, S. y LAMBOLEY, B. (2005b) *Animal Research* 54: 65-72.
- GUERRE, P (2000) *Revue Médecine Vétérinaire* 151.12: 1095-1106.
- GUTIERREZ I., ESPINOSA A., GARCA J., CARABANO R. y DE BLAS, J.C. (2002) *Animal Feed Science and Technology* 98: 175-186.
- HANCOCK, J.D., HINES, R.H., RICHERT, B.T. y GUGLE, T.L. (1992) En: *Proceedings Kansas University*. pp: 130-133.
- HARMON, D.L. y McLEOD, K.R. (2005) En: *Plains Nutrition Council Meeting*. AREC 05-20. 69.
- HEALY, B.J., HANCKOCK, J.D., KENNEDY, G.A., BRAMEL, P.J., BEHNKE, K.C. y HINES, R.H. (1994) *Journal of Animal Science* 72: 2227-2236.
- HEATON, K.W., MARCUS, S .N., EMMETT, P.M. y BOLTON, C.H. (1988) *American Journal Clinical Nutrition* 47: 675-682.
- HERKELMAN, K.L., RODHOUSE, S.L., VEUM, T.L. y ELLERSIECK, M.R. (1990) *Journal of Animal Science* 68: 2414-2424.
- HONGTRAKUL, K. L., GOODBAND, R.D., BEHNKE, K.C., NELSSSEN, J.L., TOKACH, M.D., BERGSTROM, J.R., NESSMITH, W.B. Jr. y KIM, K. (1998) *Journal of Animal Science* 76: 3034-3042.
- HSU, J.T. y SATTER, L.D. (1995) *Journal Dairy Science* 78: 1353-1361.
- HTOO, J.K., MENG, X, PATIENCE, J.F., DUGAN, M.E.R. y ZIJLSTRA, R.T. (2008) *Journal of Animal Science* 86: 2942-2951.
- IJI, P.A., KHUMALO, K., SLIPPERS, S. y GOUS, R.M. (2003) *Reproduction Nutrition Development*. 43: 77-90
- JEZIERNY, D., MOSENTHIN, R. y BAUER, E. (2010) *Animal Feed Science and Technology* 157: 111-128.
- JOHNSON, M.L., PARSONS, C.M., FAHEY, G.C., MERCHEN, N.R. y ALDRICH, C.G. (1998) *Journal of Animal Science* 76: 1112-1122.
- JULLIAND V, DE FOMBELLE A. y VARLOUD, M. (2006) *Livestock Science* 100: 44-52
- JUST, A., JØRGENSEN, H., FERNANDEZ, J.A. y BECH-ANDERSEN, S. (1983) *The chemical composition, digestibility, energy and protein value of different feedstuffs for pigs*. Report No. 556 from the National Institute of Animal Science, Denmark.

- KELLY, D., SMYTH, J.A. y McCRAKEN, K.J., (1991) *British Journal of Nutrition* 65: 169-180.
- KHAN, C.A., SCHEELE, C.W. y JANSSEN, W.M. (1987) *Animal Feed Science and Technology* 19: 97-104.
- KHATTAB, R.Y. y ARNTFIELD, S.D. (2009) *Food Science and Technology* 42 (6): 1119-1124.
- KIENZLE, E., POHLENZ, J. y RADICKE, S.(1997) *Journal of Veterinary Medicine* 44: 207-221.
- KILBURN, J. y EDWARDS, H.M. Jr. (2001) *British Poultry Science* 42: 484-492.
- KIM, J.C., MULLAN, B.P., HEO, J.M., HANSEN, C.F. y PLUSKE, J.R. (2009) *British Journal of Nutrition* 102: 350-360
- LARDY, G (2010) *Feeding barley to sheep*. EB-71. North Dakota State University.
- LAWRENCE, T. (1970) *Animal Production* 12: 139-150.
- LECLERCQ, B., LESSIRE, M., GUY, G., HALLOUIS, J.M. y CONAN, L.(1989) *INRA Productions Animals* 2(2): 129-136
- LESSIRE, M., LECLERCQ, B. y CONAN, L. (1988) *INRA Productions Animals* 1(4): 265-270.
- LICHOVNIKOVA , M., ZEMAN, I., KRACHAR, S. y KLECKER, D. (2004) *Animal Feed Science and Technology* 116: 313-318.
- LING, CH. y KUNG, L. (1999) *Heat treated soybeans and soybean meal in ruminant nutrition*. Technical Bulletin. American Soybean Association. Belgium.
- LONGSTAFF, M.A., KNOX, A. y McNAB, J.K. (1987) *British Poultry Science* 28.2: 261-285.
- LONGSTAFF, M.A., KNOX, A. y McNAB, J.K. (1988) *British Poultry Science* 29.3: 379-393.
- MAERTENS, L. y, LUZI, F. (1995) En: *Proceedings 9th Symposium on Housing and Diseases of Rabbits. Furbearing Animals and Pet Animals*. DVG, Celle. pp. 131-138.
- MASON, V.C. (1984) *Proceedings Nutritional Society* 43: 45-53.
- McNAB, J. (1985) En: *3 Congrès Soja*. France. ONIDOL CIS Eds. 16-31.
- MARSMAN, G.J.P., GRUPPEN, H., VAN DER POEL, A.F.B., KWAKKEL, R.P., VERSTEGEN, M.W.A. y VORAGEN, A.J.G. (1997) *Poultry Science* 76: 864-872.
- MATEOS, G.G., GARCÍA VALENCIA, D. y VICENTE PIQUERAS, B. (2005) En: *XXI Curso de especialización FEDNA*. 277-324.
- MEDEL, P., SALADO, S., DE BLAS, J.C. y MATEOS, G.G. (1999) *Animal Feed Science and Technology* 82: 145-156.
- MEDEL, P., GARCÍA, M., LAZARO, R., DE BLAS, C. y MATEOS, G.G. (2000) *Animal Feed Science and Technology* 84: 13-21.
- MEDEL, P., BAUCCELLS, F., GARCÍA, M., DE BLAS, C. y MATEOS, G.G. (2002) *Animal Feed Science and Technology* 95: 113-122.

- MEDEL, P., LATORRE, M.A., DE BLAS, C., LAZARO, R. y MATEOS, G.G. (2004) *Animal Feed Science and Technology* **113**: 127-140.
- MERCIER, C. y GUILBOT, A. (1974) *Annales de Zootechnie* **23**(3): 241-251
- MEYER, H., RADICKE, S., KIENZLE, E., WILKE, S., KLEFFKEN, D. y ILLENSEER, M. (1995) *Journal of Veterinary Medicine* **42**: 371– 381.
- MORITZ, J.S., PARSONS, A.S., BUCHANAN, N.P., CALVALCANTI, W.B., CRAMER, K.R. y BEYER, R.S. (2005) *Journal Applied Poultry Research*. **14**: 47-54.
- MUIR, J. G. y O'DEA, K. (1992) *American Journal Clinical Nutrition*. **56**: 123–127.
- MUIR, J. G. y O'DEA, K. (1993) *American Journal of Clinical Nutrition*. **57**: 540–546.
- MUIRHEAD, S. (1995) *Feedstuffs*. Jul 10.10.
- MULEY, N.S., VAN HEUGTEN, E., MOESER, A.J., RAUSCH, K.D. y VAN KEMPEN, T.A.T.G.(2007) *Journal Animal Science* **85**: 1695-1701.
- MURRAY S.M., FLICKINGER E.A., PATIL A.R., MERCHEN N.R., BRENT J.L. y FAHEY, G.C. (2001) *Journal of Animal Science* **79**: 435-444.
- NOWAK, W., MICHALAK, S. y WYLEGALA, S. (2005) *Czech Journal of Animal Science* **5**(6): 281–287.
- O'DOHERTY, J. V. y Keady, U. (2000) *Animal Science* **70**: 265–274.
- ORIAS, C.G., ALDRICH, C.G., ELIZALDE, J.C., BAUER, L.L. y MERCHEN, N.R. (2002) *Journal of Animal Science* **80**: 2493-2501.
- OWENS, F.N., ZINN, R.A. y KIM, Y.K. (1986) *Journal of Animal Science* **63**: 1634.
- OWENS, F.N., SECRIST, D. S., HILL, W.J. y GILL, D.R. (1997) *Journal of Animal Science* **75**: 868–879.
- OWENS, F.N. (2005) *Corn grain processing and digestion*. Pioneer Hi-Bred International, Inc., Johnston, IA. [http://www.ddgs.umn.edu/articles-proc-storage-quality/2005-Owens%20\(MNC\)%20Corn%20grain%20proc.pdf](http://www.ddgs.umn.edu/articles-proc-storage-quality/2005-Owens%20(MNC)%20Corn%20grain%20proc.pdf) accedido 10/07/2010.
- OWUSU-ASIEDU, A., BAIDOO, S.K. y NYACHOTI, c.M. (2002) *Canadian Journal of Animal Science* **82**: 367–374.
- PALACIOS, M. F., EASTER, R.A., SOLTWEDEL, K.T., PARSONS, C.M., DOUGLAS, M.W., HYMOWITZ, T. y PETTIGREW, J.E. (2004) *Journal of Animal Science* **82**: 1108-1114.
- PARSONS, C.M., HASHIMOTO, K., WEDEKIND, K.J., HAN, Y. y BAKER, D.H. (1992) *Poultry Science* **71**: 133-140.
- PEISKER, M. (1996) En: *XII Curso de especialización FEDNA*. Madrid.
- PERIAGO, M.J., ENGLYST, H.N. y HUDSON, G.J. (1996) *Lebensm-Wiss Technology* **29**: 33–40.
- PETERSON, W.R. y WARTHESEN, J.J. (1979) *Journal of Food Science* **44**: 994–997.
- PICARD, M., LE FUR, C., MELCION, J.P. y BOUCHOT, C. (2000) *INRA Productions Animals*. **13** (2): 117-130.
- PLAVNIK, I. y SKLAN. (1995) *Animal Feed Science and Technology* **55**: 247-251.

- PONCET, C., RÉMOND, D., LEPAGE, E. y DOREAU, M. (2003) *Fourrages* 174: 205-229.
- PRESTLØKKEN E y HARSTAD, O.M. (2001) *Animal Feed Science and Technology* 90: 227- 246.
- PUTIER, F. (1993) *Feed mix.*1.2: 34-37.
- QIN, G., TER ELST,E.R., BOSCH, M.W. y VAN DER POEL, A.F.B. (1996) *Animal Feed Science and Technology* 57: 313-324.
- RAINEY B.M., PATERSON J.A., LIPSEY R.J., FUNSTON R.N., BRESTER G.W. y CHOAT W.T. (2002) *Proceedings, Western Section, American Society of Animal Science* 53.
- Remond, D., Le Guen, M.P. y Poncet, C. (2003) *Animal Feed Science and Technology*, 105.1: 55-70.
- ROSENFELD, I. y AUSTBØ, D. (2009) *Journal of Animal Science* 87: 3991-3996.
- ROYER , E. , ALBAR, J. y GRANIER, R. (2003) *Journées Recherche Porcine.* 35: 89-96.
- ROWE, J.B., M. CHOCT y PETHICK, D.W. (1999) *Journal of Agricultural Research.* 50: 721-736
- SAUER, W.C., MOSENTHIN, R. y PIERCE, A.B., (1990) *Animal Feed Science and Technology* 31: 269-275.
- SAVORY, C.J. (1992) *British Journal of Nutrition.* 67: 103-114.
- SCOTT, T.A., COMBS, D.K. y GRUMMER, R.R. (1991) *Journal of Dairy Science* 74: 2555-2562.
- SKIBA, F., CASTAING, J., ÉVRARD, J., MELCION, J.P.,HAZOUARD I. y GÂTEL, F. (1999) *Journées Recherche Porcine en France.* 31: 215-221.
- SOLÀ-ORIOLO, D., ROURA, E. y TORRALLARDONA, D. (2009) *Journal of Animal Science* 87: 562-570.
- SOLANAS, E.M., CASTRILLO, C., JOVER, M. y DE VEGA, A (2008) *Journal of the Science of Food and Agriculture* 88:15: 2589-2597.
- STANTON, T.L. y LEVALLEY, S.B. (2006) *Livestock Series* n° 1613. Colorado State University.
- STEIN, H.H. y BOHLKE, R.A. (2007) *Journal of Animal Science* 75: 1424-1431.
- SUN, T., LÆRKE, H.N., JØRGENSEN, H. y BACH KNUDSEN, K.E. (2006) *Animal Feed Science and Technology* 131: 66-85.
- SVIHUS B., UHLEN A.K. y HARSTAD, O.M. (2005) *Animal Feed Science Technology* 122: 303-320.
- TAIT, R.M. y BRYANT, R.G. (1973) *Canadian Journal of Animal Science* 53: 89-94.
- TECALIMAN (1988) *Les traitements Hydro-Thermiques des matières premières.* Bulletin d'information. Spécial n° 8. France.
- TECALIMAN. (1996) *Bulletin de liaison* n° 42. Fiche n° 3.France.

- TESTER R.F., QI, X. y KARKALAS, J. (2006) *Animal Feed Science Technology* 130: 39-54.
- TESTER R.F. y SOMMERVILLE M.D. (2000) *Journal Cereal Science* 33: 193-203.
- THEURER, C.B. (1986) *Journal of Animal Science* 63: 1649.
- THEURER, C.B., HUBER, J.T. y DELGADO-ELORDUY, A. (1998) *Feedstuffs*. 70,51: 10.
- THEURER, C.B., WANDERLEY, R. y HUBER, J.T. (1999a) *Feedstuffs*. 71, 20: 16-19.
- THEURER, C.B., LOZANO, O., ALIO, A., DELGADO-ELORDUY, A., SADIK, M. y HUBER, J.T., (1999b) *Journal of Animal Science* 77: 2824-2831.
- THEURER, C.B., HUBER, J.T., DELGADO-ELORDUY, A. y WANDERLEY, R. (1999c) *Journal of Dairy Science* 82: 1950-1959.
- TÓTHI, R. (2003) *Processed grains as a supplement to lactating dairy cows*. PhD Thesis, Wageningen Institute of Animal Sciences, Animal Nutrition Group, Wageningen University, the Netherlands.
- USDA. (2008) *National Nutrient Database for Standard Reference (Release 21)* Agricultural Research Service, USDA Nutrient Data Laboratory.
- VALLS PORTA, A. y PANÉ RIPOLL, A. (1993) En: *IX Curso de Especialización FEDNA*. 109-125.
- VAN BARNEVELD, R.J., HUGHES, R.J., CHOCT, M., TREDREA, A. y NIELSEN, S.G.(2005) *Recent Advances in Animal Nutrition in Australia*. 15: 47-55.
- VAN DER POEL, A.F.B, DEN HARTOG, L.A., VAN DEN ABEELE, T., BOER, H. y VAN ZUILICHEM, D.J. (1989) *Animal Feed Science and Technology* 26: 29-43
- VAN DER POEL, A.F.B., DEN HARTOG, L.A., VAN STIPHOUT, W.A.A., BREMMERS, R. y HUISMAN, J. (1989) *Animal Feed Science and Technology*. 26: 1-2.
- VAN DER POEL, A.F.B., GRAVENDEEL, S. y BOER, H. (1991) *Animal Feed Science and Technology* 33. 1-2: 49-58.
- VESTERGAARD, E.M., DANIELSEN, V., JACOBSEN, E.E. y RASMUSSEN, V. (1990) *Beretning fra Statens Husdyrbrugsforsog* 674: 71.
- VICENTE, B., VALENCIA, D.G., PEREZ-SERRANO, M., LAZARO, R. y MATEOS, G.G. (2008) *Journal of Animal Science* 86: 119-126.
- VUKIC VRANJES y WENK (1995) 54.1: 21-32.
- WANG, X. y PARSONS, C.M. (1998) *Poultry Science* 77: 834-841.
- WISEMAN, J. (1984) *Feed International*. Feb. 14-19.
- WISEMAN, J. (1993) En: *IX Curso de Especialización Fedna*.
- WISEMAN J. (2006) *Animal Feed Science Technology* 130: 66-77.
- WONDRA, K.J., HANCOCK, J.D., HINES, R.H., BEHNKE, K.C. y KENNEDY, G.A. (1996) *Effects of grinding and pelleting on the nutritional value of cereal grains and diets for pigs*. Kansas State University. Eastern Nutrition Conference.

- WU, M.C., WUNG, L.C., KUO, C.C, CHANG, F.S. y CHEN, S.Y. (1995) *Taiwan Sugar* 42: 26-27.
- YANG, W. Z., BEAUCHEMIN, K.A. y RODE, L.M. (2000) *Journal of Dairy Science* 83: 554-568.
- ZARKADAS, J.N. y WISEMAN, J. (2005a) *Animal Feed Science and Technology* 118: 109-119
- ZARKADAS, J.N. y WISEMAN, J. (2005b) *Animal Feed Science and Technology* 118: 121-137.
- ZIMONJA, O. y SVIHUS, B (2009) *Animal Feed Science and Technology* 149: 287-297.
- ZINN, R.A. (1993) *Journal of Animal Science* 71: 3-10.
- ZINN, R.A., OWENS, F.N. y WARE, R.A. (2002) *Journal of Animal Science* 80: 1145-1156.