

## **EFECTO DEL PROCESADO TÉRMICO SOBRE EL VALOR NUTRITIVO DE LOS INGREDIENTES ALIMENTICIOS**

Ferdinando N. Almeida, Oscar J. Rojas y Hans H. Stein

Department of Animal Sciences, University of Illinois Urbana Champaign, Illinois, USA

### **1.- INTRODUCCIÓN**

Desde hace muchos años los ingredientes de los piensos se procesan con el objetivo de aumentar su valor nutritivo para los animales (NRC, 2012). Muchos de estos procesos incluyen utilización de calor en diferentes grados (es decir, temperatura, tiempo), con el objetivo de desactivar factores antinutricionales (por ejemplo, inhibidores de proteasas) y en otros casos para mejorar la utilización del almidón a través de la gelatinización. Los tratamientos térmicos, sin embargo, pueden también causar la destrucción de otros nutrientes, como algunos aminoácidos (NRC, 2012), pero no sólo ellos. Entre los diferentes tratamientos térmicos se encuentran la extrusión, expansión, granulación y desecación de los ingredientes. Debido a los diferentes procesos a los que los alimentos son expuestos y también cómo consecuencia de las variaciones en su composición nutritiva, es importante entender cómo el procesado térmico afecta al valor nutricional de los ingredientes. Por ello, el objetivo de este trabajo es revisar los efectos beneficiosos del procesado térmico y proporcionar información también sobre sus efectos negativos.

## 2.- EFECTOS BENEFICIOSOS DEL PROCESADO TÉRMICO

Los piensos de ganado porcino pueden suplementarse con guisantes, pero como éstos contienen factores antinutricionales tales como los taninos y los inhibidores de proteasas, deben ser extrusionados para inactivarlos (Stein y Bohlke, 2007). Se ha observado que la extrusión de los guisantes en cerdos en crecimiento mejora la digestibilidad ileal aparente de la proteína bruta, de la mayoría de los aminoácidos, del almidón y de la energía (Stein y Bohlke, 2007). La extrusión puede también aumentar la digestibilidad de la materia seca del maíz en cerdos en crecimiento (Muley et al., 2007). Mientras que la mejora de la digestibilidad de los aminoácidos debida a la extrusión se atribuye a la degradación de los inhibidores de la proteasa, sus efectos beneficiosos sobre la utilización del almidón y la energía pueden ser causados por el ambiente “ideal” que la extrusión crea para la gelatinización. Los dos principales factores necesarios para gelatinizar el almidón son humedad y calor. Los enlaces de hidrogeno en la región cristalina resisten la entrada de agua en el gránulo de almidón, pero cuando se rompen en presencia de humedad y calor se produce una expansión (aumento del área) del gránulo de almidón como consecuencia de la absorción de agua (Wiseman et al., 2001; Liu, 2011). A 60°C, el almidón empieza a perder sus propiedades físicas, tales como la estructura organizada del gránulo y la birrefringencia. La gelatinización es completa cuando se pierde un 98% de la birrefringencia (Wiseman et al., 2001). La temperatura para producir la gelatinización del almidón es característica para cada una de sus fuentes. En el maíz la gelatinización ocurre a 62-72 °C, en la cebada a 59-64 °C y en el trigo a 65-67 °C. Durante la gelatinización del almidón, la fracción de amilasa se libera desde el gránulo (reducción de la región cristalina), lo que aumenta su viscosidad (Liu, 2011). Esto puede también aumentar la digestibilidad del almidón ya que el almidón gelatinizado es más vulnerable a la degradación de las enzimas digestivas (Hancock y Behnke, 2001; Wiseman et al., 2001).

La digestibilidad de la materia seca, materia orgánica y grasa aumenta por la granulación de los piensos suministrados a lechones, y esto se acompaña con un aumento en la ganancia de peso y en la eficacia alimenticia (Xing et al., 2004). Las razones para estas mejoras en la digestibilidad y en el crecimiento pueden estar relacionadas con cambios en las características físico-químicas y pueden también resultar en un menor desperdicio de alimentos (Richert y DeRouchey, 2010; NRC, 2012). Se ha observado que la granulación mejora también la digestibilidad de la materia orgánica, proteína, energía, cenizas y el contenido en energía digestible de piensos suministrados a cerdos en crecimiento-cebo (O’Doherty et al., 2000).

### 3.- EFECTOS NEGATIVOS DEL PROCESADO TÉRMICO

La concentración y digestibilidad de los aminoácidos en los ingredientes alimenticios y en los piensos puede reducirse como consecuencia de su tratamiento térmico (Martinez-Amezcueta et al., 2007; Boucher et al., 2009). Los DDGs que son secados a 50, 75 ó 100 °C tienen una baja concentración de lisina reactiva (Pahm et al., 2008). Cuando los DDGs se introducen en un autoclave durante 45 minutos a 120 °C la digestibilidad de los aminoácidos disminuye, especialmente la de la lisina (Martinez-Amezcueta et al., 2007). Se ha sugerido que la reducción en la digestibilidad de los aminoácidos diferentes de la lisina se debe también a la formación de productos de las reacciones de Maillard que interfieren con la absorción de estos aminoácidos. Las reacciones de Maillard se inician con la condensación de un grupo amino de un aminoácido o proteína con un grupo carboxilo de un azúcar reductor bajo diferentes condiciones de temperatura y humedad, tales como las que ocurren durante la extrusión y la granulación. La lisina es un aminoácido esencial que contiene un grupo amino que se condensa fácilmente con el grupo carboxilo de un azúcar reductor (Nursten, 2005), y por tanto la lisina es el aminoácido más afectado por las reacciones de Maillard. El tratamiento térmico de la proteína de suero en presencia de lactosa a temperaturas entre 75 y 121 °C también causa una disminución de la disponibilidad de la lisina de entre un 45 y un 75% (Desrosiers et al., 1989). Suministrando a pollos un pienso que contenía harina de soja de alta calidad o harina de soja dañada por calor, se observó que cuando los animales recibían esta última se producía una disminución en el peso final, ganancia de peso, consumo de peso y peso de canal en comparación con los que recibían la harina de alta calidad (Redshaw, 2010). Estos efectos negativos de daño por calor sobre los rendimientos fueron sin embargo mitigados parcialmente mediante la adición de aminoácidos cristalinos al pienso. La digestibilidad ileal estandarizada de la lisina en la harina de soja en piensos de porcino se redujo desde un 93% (harina de soja no calentada) hasta un 89,3 y 84,2% cuando la harina de soja fue autoclavada durante 15 y 30 minutos respectivamente a una temperatura de 125 °C (González-Vega et al., 2011). En otro experimento, Cozannet et al. (2010) observaron que la digestibilidad ileal estandarizada de la lisina en DDGs de tigo fue altamente variable y que las muestras en las que los valores eran más bajos eran más oscuras y contenían menos lisina en proporción al contenido total en proteína que las muestras con los mayores valores de digestibilidad. Esto indica que el color y la relación lisina:proteína bruta pueden usarse como indicadores del daño por calor en DDGs. Tal como observaron Stein y Shurson (2009) y confirmaron Cozannet et al. (2010), cuando los ingredientes son dañados térmicamente la concentración en lisina se reduce mientras que el contenido en proteína bruta permanece relativamente constante. Por tanto la concentración de lisina digestible en los DDGs pueden predecirse con precisión ( $R^2 = 0,86$ ) a partir de la relación lisina:proteína bruta (Cozannet et al., 2010). Se ha observado que existe una correlación positiva entre la digestibilidad ileal

estandarizada de la lisina y la relación lisina:proteína bruta, lo que adicionalmente confirma la teoría anterior (Kim et al., 2012). Los efectos de las condiciones de procesado de la harina de pescado sobre la digestibilidad de la proteína en visones ha sido también evaluados (Opstvedt et al., 2003). Se observó que la digestibilidad de la proteína fue inferior en las fuentes de harina de pescado que habían sido producidas a las temperaturas más elevadas ( $< 100^{\circ}\text{C}$ ). Se ha demostrado también que la cisteína y la arginina participan en reacciones de Maillard (Ledl y Schleicher, 1990). El procesado térmico puede causar también la oxidación de las grasas insaturadas dando lugar a la formación de hidroperóxidos (Meade et al., 2005). Los hidroperóxidos pueden oxidar la cisteína y limitar su utilización por el animal. En ingredientes que han sido dañados por calor en un cierto grado, los pre-melanos pueden también reaccionar con la cisteína y la arginina (Finot et al., 1990). La cisteína puede también degradarse a través de reacciones Strecker para producir sulfuro de hidrógeno, amoníaco y acetaldehído (Mottram y Mottram, 2002). Los productos de estas reacciones sirven como intermediarios para la formación de compuestos aromáticos, tales como tiazoles y disulfitos, que están asociados con las reacciones de Maillard (Mottram y Mottram, 2002). La participación de la arginina en las reacciones de Maillard que resultan del procesado térmico está asociada con la formación de enlaces cruzados con la lisina a través de puentes imidazopiridínicos (Ledl y Schleicher, 1990).

El daño térmico puede causar también pérdida de vitaminas tal como observaron Ford et al. (1983). Los resultados de sus trabajos indicaron claramente que el almacenamiento de leche entera en polvo a 60 y 70°C causa una reducción en las concentraciones de vitaminas B<sub>6</sub> y tiamina. A 60 °C, sin embargo, la reducción es mucho menos pronunciada que a 70 °C. Estas observaciones pueden ser debidas a que temperaturas elevadas favorecen las reacciones de Maillard, lo que fue confirmado por un incremento en el contenido de lactulosil-lisina (que es un intermediario de las reacciones de Maillard) a medida que la concentración en vitaminas disminuyó (Ford et al., 1983).

#### 4.- CONCLUSIONES

Está bien establecido que algunos ingredientes alimenticios necesitan ser procesados y que la aplicación de tratamientos térmicos en varios pasos del procesado es necesaria. Estos procesos térmicos mejoran el valor nutritivo de los ingredientes en muchos casos, pero también los exponen a un riesgo de sobrecalentamiento. Hay una amplia evidencia de que el daño térmico puede reducir el valor nutritivo de los alimentos, especialmente la concentración y digestibilidad de la mayoría de los aminoácidos y de la proteína bruta.

## 5.- REFERENCIAS

- BOUCHER, S. E., PEDERSEN, C. STEIN, H. H. y SCHWAB. C. G. 2009. *J. Dairy Sci.* 92:3951-3958.
- COZANNET, P., PRIMOT, Y., GADY, C., MÉTAYER, J.P., CALLU, P., LESSIRE, M., SKIBA, F. y NOBLET, J. (2010) *Anim. Feed Sci. Tech.* 158, 177-186.
- DESROSIERS, T., SAVOIE, L., BERGERON, G. y PARENT, G. (1989) *J. Agric. Food Chem.* 37, 1385-1391.
- FINOT, P.A., AESCHBACHER, H.U., HURREL, R.F. y LIARDON, R. (1990) *The Maillard reaction in food processing, human nutrition and physiology*. Birkhäuser Verlag, Berlin, Germany.
- FORD, J.E., HURREL, R.F. y FINOT, P.A. (1983) *Br. J. Nutr.* 49, 355-364.
- GONZÁLEZ-VEGA, J.C., KIM, B.G., HTOO, J.K., LEMME A. y STEIN, H.H. (2011) *J. Anim. Sci.* 89, 3617-3625.
- HANCOCK, J.D. y BEHNKE, K.C. (2001) En: *Swine Nutrition*. 2nd ed. A. J. Lewis y L. L. Southern (eds.). CRC Press, Washington, DC. pp. 469-498.
- KIM, B.G., KIL, D.Y., ZHANG, Y. y STEIN, H.H. (2012) *J. Anim. Sci.* DOI:10.2527/jas.2011-4692
- LEDL, F. y SCHLEICHER, E. (1990) *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* 29, 565-594.
- LIU, K. (2011) En: *Distillers Grains Production, Properties, and Utilization*. 1nd ed. K. Liu y K.A. Rosentrater (eds.). AOCS Press, Boca Raton, FL. pp. 45-72.
- MARTINEZ-AMEZCUA, C., PARSONS, C.M., SINGH, V., SRINIVASAN, R. y MURTHY, G.S. (2007) *Poult. Sci.* 86, 2624-2630.
- MEADE, S.J., REID, E.A. y GERRARD, J.A. (2005) *J. AOAC. Int.* 88, 904-922.
- MOTTRAM, D.S. y MOTTRAM, H.R. (2002) En: *Heteroatomic Aroma Compounds*. Reineccius, G.A. y T.A. Reineccius (eds.). American Chemical Society, Washington, DC. pp. 73-92.
- MULEY, N.S., VAN HEUGTEN, E., MOESER, A.J., RAUSCH, K.D. y VAN KEMPEN, T.A. (2007) *J. Anim. Sci.* 85, 1695-1701.
- NRC (2012) *Nutrient Requirements of Swine* (11<sup>th</sup> Ed.). National Academy Press, Washington DC.
- NURSTEN, H. (2005) *The Maillard reaction. Chemistry, biochemistry, and implications*. Royal Society of Chemistry, Cambridge, UK.
- O'DOHERTY, J.V., MCGLYNN, S.G. y MURPHY, D. (2000) *J. Sci. Food Agric.* 81, 135-141.
- OPSTVEDT, J., NYGÅRD, E., SAMUELSEN, T.A., VENTURINI, G., LUZZANA, U. y MUNDHEIM, H. (2003) *J. Sci. Food Agric.* 83, 775-782.
- PAHM, A.A., PEDERSEN, C. y STEIN, H.H. (2008) *J. Agric. Food Chem.* 56, 9441-9446.

- REDSHAW, M. (2010) *AminoNews*<sup>®</sup>. 2010. *Aminored*<sup>®</sup>. Tech. Bull. Degussa AG, Hanau, Germany.
- RICHERT, B.T. y DEROCHE, J.M. (2010) En: *National Swine Nutrition Guide*. D.J. Meisinger (ed.). Ames, IA: Pork Center of Excellence. pp. 245-250.
- STEIN, H.H. y SHURSON, G.C. (2009) *J. Anim. Sci.* 87, 1292-1303.
- STEIN, H.H. y BOHLKE, R.A. (2007) *J. Anim. Sci.* 85, 1424-1431.
- WISEMAN, J., PICKARD, J. y ZARKADAS, L. (2001) En: *The Weaner Pig Nutrition and Management*. M.A. Varley y J. Wiseman (eds.). CAB International, Wallingford, Oxon, UK. pp. 65-80.
- XING, J.J., VAN HEUGTEN, E., LI, D.F., TOUCHETTE, K.J., COALSON, J.A., ODGAARD, R.L. y ODLE, J. (2004) *J. Anim. Sci.* 82, 2601-2609.

## 1.- INTRODUCTION

Feed ingredients have been processed for many years with the objective of improving their nutritional value for livestock (NRC, 2012). Many of these processes involve the utilization of heat at different degrees (i.e., temperature, time), which aim at deactivating anti-nutritional factors (e.g., protease inhibitors) and in some cases improve the utilization of starch through gelatinization. Thermal treatments, however, may also cause destruction of other nutrients, which include, but are not limited to, amino acids (NRC, 2012). Among thermal treatments are extrusion, expansion, pelleting, and drying of feed ingredients. Because of the different processes that feed ingredients are exposed to and also because of their different nutritional composition, it is important to understand how thermal processing affects the nutritional value of different feed ingredients. Thus, the aim of this publication is to review the beneficial effects of thermal processing and to provide information about the negative effects of thermal processing on the nutritional value of feed ingredients.

## 2.- BENEFICIAL EFFECTS OF THERMAL PROCESSING

Diets for pigs may be supplemented with field peas, but because field peas contain antinutritional factors such as tannins and protease inhibitors, extrusion may be used to inactivate these antinutritional factors (Stein and Bohlke, 2007). It has been observed that extrusion of field peas fed to growing pigs improves the apparent ileal digestibility of crude protein, most amino acids, starch, and energy compared with field peas that were not extruded (Stein and Bohlke, 2007). Extrusion may also increase ileal digestibility of dry matter in corn fed to growing pigs (Muley et al., 2007). While an improvement in amino acid digestibility due to extrusion is attributed to degradation of protease inhibitors, the beneficial effects of extrusion on the utilization of starch and energy may be that extrusion creates an “ideal” environment for gelatinization. Moisture and heat are the 2 main factors necessary to gelatinize the starch. The hydrogen bonds in the crystalline region are resistant to water uptake from the starch granule, but when they break down in the presence of moisture and heat, this leads to an expansion of the starch granule (increased area) due to the absorption of water (Wiseman et al., 2001; Liu, 2011) and the amylose units will exude because of swelling of the granule. At 60°C, starch begins to lose its physical properties such as organized granule structure and birefringence condition, and the starch gelatinization is complete when 98% of birefringence is lost (Wiseman et al., 2001). The temperature to produce gelatinization of starch is unique among different sources of starch. In corn, gelatinization occurs at 62-72°C, in barley at 59-64°C, and in wheat at 65-67°C. During gelatinization of starch, the amylose part is released from the granule (reduction of the crystalline region), which increases the viscosity of the granule (Liu, 2011). This may also increase digestibility of the starch and gelatinized starch is more vulnerable to digestive enzyme degradation (Hancock and Behnke, 2001; Wiseman et al., 2001).

The digestibility of dry matter, organic matter, and fat is increased by pelleting of diets fed to weanling pigs, and this is accompanied by an increase in average daily gain and feed efficiency (Xing et al., 2004). The reasons for these improvements in digestibility and growth performance may be related to changes in physicochemical characteristics of nutrients such as starch, and may also be a result of reduced feed wastage (Richert and DeRouchey, 2010; NRC, 2012). It has also been observed that pelleting improves the digestibility of organic matter, protein, energy, ash, and digestible energy in diets fed to growing and finishing pigs (O'Doherty et al., 2000).

### 3.- NEGATIVE EFFECTS OF THERMAL PROCESSING

The concentration and digestibility of amino acids in feed ingredients and diets may be reduced due to thermal treatment of feed ingredients (Martinez-Amezcuca et al., 2007; Boucher et al., 2009). Distillers dried grains with solubles that were oven-dried at 50, 75, or 100°C had reduced concentration of reactive lysine (Pahm et al., 2008). When autoclaving distillers dried grains with solubles for 45 min at 120°C, the digestibility of amino acids was reduced, especially that of lysine (Martinez-Amezcuca et al., 2007), and it was suggested that the reduction in the digestibility of amino acids other than lysine was a result of the formation of Maillard reaction products that interfered with the absorption of other amino acids. Maillard reactions start with the condensation between an amino group of an amino acid or protein and a carbonyl group of a reducing sugar under certain conditions of temperature and moisture such as during extrusion and pelleting. Lysine is an essential amino acid that has an  $\alpha$ -amino group that easily condenses with the carbonyl group of a reducing sugar (Nursten, 2005), and thus lysine is the amino acid most affected by Maillard reactions. Thermal treatment of whey protein in the presence of lactose at temperatures that ranged from 75 to 121°C also caused a decrease in the availability of lysine from 75 to 45% (Desrosiers et al., 1989). Feeding broiler chicks a diet containing high quality soybean meal or heat damaged soybean meal, it was observed that chicks that were fed the heat damaged soybean meal had a decrease in final body weight, average daily gain, average daily feed intake, and carcass weight compared with chicks that were fed the high quality soybean meal (Redshaw, 2010). These negative effects of heat damage on performance, however, were partially mitigated by adding crystalline amino acids to the diets. The standardized ileal digestibility of lysine in soybean meal fed to pigs was reduced from 93% (non-heated soybean meal) to 89.3 and 84.2% when soybean meal was autoclaved for 15 and 30 min, respectively, at a temperature of 125°C (González-Vega et al., 2011). In another experiment, Cozannet et al. (2010) observed that the standardized ileal digestibility of lysine in wheat distillers dried grains with solubles was highly variable and that the samples with the lowest values for standardized ileal digestibility were darker and contained less lysine as a percent of crude protein than the samples with the greatest values for standardized ileal digestibility of lysine, thus indicating that color and lysine to crude protein ratio may be used as indicators of heat damage in wheat distillers dried grains with solubles. As observed by Stein and Shurson (2009) and confirmed by Cozannet et al. (2010), when feed ingredients are heat damaged, the concentration of lysine is reduced whereas the concentration of crude protein remains relatively constant. Therefore, the concentration of standardized ileal digestibility of lysine in wheat distillers dried grains with solubles fed to pigs may accurately be predicted ( $R^2 = 0.86$ ) from the lysine to crude protein ratio (Cozannet et al., 2010). It has been observed that there is a positive correlation between the standardized ileal digestibility of lysine and the lysine to crude protein ratio,



which further confirms the above theory (Kim et al., 2012). The effects of processing conditions of fish meal on protein digestibility by mink were also evaluated (Opstvedt et al., 2003). It was observed that protein digestibility was less in fish meal sources that were produced at higher temperatures ( $> 100^{\circ}\text{C}$ ) than in fish meal sources that were produced at lower temperatures ( $< 100^{\circ}\text{C}$ ). Cysteine and arginine have also been shown to participate in the Maillard reactions (Ledl and Schleicher, 1990). Thermal processing may cause oxidation of unsaturated lipids leading to formation of hydroperoxides (Meade et al., 2005). Hydroperoxidases may oxidize cysteine, thus, limiting its utilization by the animal. In feed ingredients that have been heat damaged to a higher degree, pre-melanoidins may also react with cysteine and arginine (Finot et al., 1990). Cysteine may also go through Strecker degradation reactions producing hydrogen sulfide, ammonia, and acetaldehyde (Mottram and Mottram, 2002). The products of these reactions serve as intermediates to the formation of aroma compounds, such as thiazoles and disulfides, which are associated with the Maillard reactions (Mottram and Mottram, 2002). The participation of arginine in the Maillard reactions resulting from heat processing is associated with formation of cross-links with lysine through imidazopyridinium bridges (Ledl and Schleicher, 1990).

Heat damage may also cause losses in vitamins as observed by Ford et al. (1983). Results from their research clearly indicated that storage of whole milk powder at 60 and 70°C causes a reduction in the concentrations of vitamins B6 and thiamine. At 60°C, however, the reduction is much less pronounced than at 70°C. These observations may be because at higher temperatures the Maillard reactions are favored, which was confirmed by an increase in lactulosyl-lysine (which is an intermediate of the Maillard reactions) as the concentrations of vitamins decreased (Ford et al., 1983).

#### **4.- CONCLUSIONS**

It is well recognized that feed ingredients need to be processed and that application of thermal treatments in various processing steps is necessary. These thermal processes improve the nutritional value of feed ingredients in many cases, but they also expose feed ingredients to the risk of overheating. There is ample evidence that heat damage to feed ingredients may reduce the nutritional value of feed ingredients, specifically the concentration and digestibility of most amino acids and crude protein.

## 5.- REFERENCES

- BOUCHER, S. E., PEDERSEN, C. STEIN, H. H. y SCHWAB. C. G. 2009. *J. Dairy Sci.* 92:3951-3958.
- COZANNET, P., PRIMOT, Y., GADY, C., MÉTAYER, J.P., CALLU, P., LESSIRE, M., SKIBA, F. y NOBLET, J. (2010) *Anim. Feed Sci. Tech.* 158, 177-186.
- DESROSIERS, T., SAVOIE, L., BERGERON, G. y PARENT, G. (1989) *J. Agric. Food Chem.* 37, 1385-1391.
- FINOT, P.A., AESCHBACHER, H.U., HURREL, R.F. y LIARDON, R. (1990) *The Maillard reaction in food processing, human nutrition and physiology*. Birkhäuser Verlag, Berlin, Germany.
- FORD, J.E., HURREL, R.F. y FINOT, P.A. (1983) *Br. J. Nutr.* 49, 355-364.
- GONZÁLEZ-VEGA, J.C., KIM, B.G., HTOO, J.K., LEMME A. y STEIN, H.H. (2011) *J. Anim. Sci.* 89, 3617-3625.
- HANCOCK, J.D. y BEHNKE, K.C. (2001) En: *Swine Nutrition*. 2nd ed. A. J. Lewis y L. L. Southern (eds.). CRC Press, Washington, DC. pp. 469-498.
- KIM, B.G., KIL, D.Y., ZHANG, Y. y STEIN, H.H. (2012) *J. Anim. Sci.* DOI:10.2527/jas.2011-4692
- LEDL, F. y SCHLEICHER, E. (1990) *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.* 29, 565-594.
- LIU, K. (2011) En: *Distillers Grains Production, Properties, and Utilization*. 1nd ed. K. Liu y K.A. Rosentrater (eds.). AOCS Press, Boca Raton, FL. pp. 45-72.
- MARTINEZ-AMEZCUA, C., PARSONS, C.M., SINGH, V., SRINIVASAN, R. y MURTHY, G.S. (2007) *Poult. Sci.* 86, 2624-2630.
- MEADE, S.J., REID, E.A. y GERRARD, J.A. (2005) *J. AOAC. Int.* 88, 904-922.
- MOTTRAM, D.S. y MOTTRAM, H.R. (2002) En: *Heteroatomic Aroma Compounds*. Reineccius, G.A. y T.A. Reineccius (eds.). American Chemical Society, Washington, DC. pp. 73-92.
- MULEY, N.S., VAN HEUGTEN, E., MOESER, A.J., RAUSCH, K.D. y VAN KEMPEN, T.A. (2007) *J. Anim. Sci.* 85, 1695-1701.
- NRC (2012) *Nutrient Requirements of Swine* (11<sup>th</sup> Ed.). National Academy Press, Washington DC.
- NURSTEN, H. (2005) *The Maillard reaction. Chemistry, biochemistry, and implications*. Royal Society of Chemistry, Cambridge, UK.
- O'DOHERTY, J.V., MCGLYNN, S.G. y MURPHY, D. (2000) *J. Sci. Food Agric.* 81, 135-141.
- OPSTVEDT, J., NYGÅRD, E., SAMUELSEN, T.A., VENTURINI, G., LUZZANA, U. y MUNDHEIM, H. (2003) *J. Sci. Food Agric.* 83, 775-782.
- PAHM, A.A., PEDERSEN, C. y STEIN, H.H. (2008) *J. Agric. Food Chem.* 56, 9441-9446.

- REDSHAW, M. (2010) *AminoNews*<sup>®</sup>. 2010. *Aminored*<sup>®</sup>. Tech. Bull. Degussa AG, Hanau, Germany.
- RICHERT, B.T. y DEROCHEY, J.M. (2010) En: *National Swine Nutrition Guide*. D.J. Meisinger (ed.). Ames, IA: Pork Center of Excellence. pp. 245-250.
- STEIN, H.H. y SHURSON, G.C. (2009) *J. Anim. Sci.* 87, 1292-1303.
- STEIN, H.H. y BOHLKE, R.A. (2007) *J. Anim. Sci.* 85, 1424-1431.
- WISEMAN, J., PICKARD, J. y ZARKADAS, L. (2001) En: *The Weaner Pig Nutrition and Management*. M.A. Varley y J. Wiseman (eds.). CAB International, Wallingford, Oxon, UK. pp. 65-80.
- XING, J.J., VAN HEUGTEN, E., LI, D.F., TOUCHETTE, K.J., COALSON, J.A., ODGAARD, R.L. y ODLE, J. (2004) *J. Anim. Sci.* 82, 2601-2609.

FEDONA