

PREFACIO Y AGRADECIMIENTOS

El U.S. Grains Council se complace en publicar esta cuarta edición del Manual del Usuario de DDGS llamado “Nutrición de DDGS de precisión”. La primera edición se publicó en 2007 (con 10 capítulos y 142 páginas), la segunda edición se publicó en 2009 (con 16 capítulos y 234 páginas) y la tercera en 2012 (con 35 capítulos y 390 páginas). Mucho ha cambiado en la producción y composición de nutrientes de los DDGS de maíz de EE. UU. en los últimos 5 años. En particular, ahora más del 90 por ciento de las plantas de etanol utilizan tecnología que extrae parcialmente parte del aceite de maíz antes de fabricar DDGS reducidos en aceite. Esto ha resultado en un cambio importante en el perfil de nutrientes entre fuentes de DDGS y ha creado nuevos temas relacionados con la digestibilidad de la energía y nutrientes, así como el valor alimenticio para todas las especies animales. Además, en los últimos cinco años, científicos estadounidenses y de todo el mundo han llevado a cabo investigaciones innovadoras para mejorar los beneficios nutricionales y superar las limitaciones del uso de los DDGS en los programas comerciales de alimentación animal.

La cuarta edición del Manual del Usuario de DDGS del U.S. Grains Council brinda un resumen detallado e integral con conocimientos nutricionales profundos y nuevos descubrimientos de más de 1,500 trabajos científicos publicados desde 2010. Cada vez más nutricionistas de animales y productores de todo el mundo se centran en el diseño de programas de alimentación animal de precisión que mejoren la eficiencia calórica y nutritiva para producir productos alimenticios de alta calidad, inocuos y nutritivos, al tiempo que se mejora la sustentabilidad ambiental de los sistemas de producción de animales para consumo humano.

Los DDGS de maíz son un extraordinario ingrediente de alimentos balanceados que no nada más son una excelente, abundante y económica fuente de energía, proteína y fósforo en las dietas de los animales, sino que también contienen muchas propiedades de “valor agregado” que brindan salud animal y beneficios ambientales adicionales. Este Manual del Usuario de DDGS está diseñado para que lo use todo aquel involucrado en la producción, mercadotecnia, compra y uso de los DDGS de maíz estadounidense y de sus coproductos en alimento para animales.

El autor de esta cuarta edición y de las tres ediciones previas del *Manual del Usuario de DDGS del U.S. Grains Council* es el Dr. Gerald (Jerry) Shurson, profesor de nutrición animal del Departamento de Ciencias Animales de la Universidad de Minnesota, en St. Paul. El Dr. Shurson es un renombrado experto mundial del valor nutritivo y las aplicaciones en la alimentación de los DDGS en alimentos balanceados para todas las especies. Durante 20 años ha dirigido un activo programa de investigación de DDGS, ha colaborado ampliamente con muchos otros investigadores y desde 1998 ha fungido como consultor técnico para el U.S. Grains Council en todas las regiones del mercado de exportación en todo el mundo.

El autor agradece las contribuciones y reconoce a los doctores Zhikai Zeng y Jae-Cheol Jang, becarios de posdoctorado de la Universidad de Minnesota, por llevar a cabo el metaanálisis de los datos publicados relacionados con los estudios de desempeño del crecimiento en cerdos y aves, así como a Steve Markham, Sean Broderick y Sam Erwin de CHS, Inc, por su valiosa colaboración en el capítulo “Factores que afectan el precio y la logística del transporte de los DDGS”.



ÍNDICE

PREFACIO Y AGRADECIMIENTOS

CAPÍTULO 1	El papel de los DDGS de EE. UU. en la nutrición animal de precisión y en la alimentación sustentable del mundo
CAPÍTULO 2	La “incoherencia” entre el precio de los DDGS y su valor económico
CAPÍTULO 3	Producción de etanol, aceite de maíz de destilería y coproductos de maíz por molienda en seco
CAPÍTULO 4	Composición química y valor energético del aceite de maíz de destilería para cerdos y aves
CAPÍTULO 5	Tecnologías emergentes en la producción de etanol y composición nutritiva de los coproductos resultantes de maíz de alta proteína
CAPÍTULO 6	Composición de nutrientes y variabilidad de las fuentes de DDGS de maíz reducido en aceite
CAPÍTULO 7	Procedimientos analíticos recomendados de laboratorio para DDGS
CAPÍTULO 8	Comparación de las diferencias de nutrición y calidad entre las fuentes de DDGS de China y EE. UU.
CAPÍTULO 9	Características físicas y químicas relacionadas con el manejo y el almacenamiento de los DDGS
CAPÍTULO 10	El color de los DDGS NO ES un indicador confiable de su calidad y valor nutritivo
CAPÍTULO 11	Inocuidad alimentaria de los DDGS
CAPÍTULO 12	Beneficios y preocupaciones del azufre en los DDGS
CAPÍTULO 13	DDGS reducidos en aceite en las dietas acuícolas
CAPÍTULO 14	Extrusión de dietas acuícolas con DDGS
CAPÍTULO 15	DDGS reducidos en aceite en las dietas de ganado de engorde
CAPÍTULO 16	Diseminación de <i>Escherichia coli</i> O157:H7 y <i>Listeria monocytogenes</i> en ganado de engorda y lechero
CAPÍTULO 17	DDGS reducidos en aceite en las dietas de ganado lechero
CAPÍTULO 18	DDGS reducidos en aceite en las dietas de pollo de engorde y ponedoras
CAPÍTULO 19	Pelletización de dietas con DDGS para aves
CAPÍTULO 20	DDGS en dietas de patos y gansos
CAPÍTULO 21	DDGS reducidos en aceite en dietas porcinas
CAPÍTULO 22	Pelletización de DDGS en dietas porcinas
CAPÍTULO 23	Uso de enzimas en dietas con DDGS para aves y cerdos
CAPÍTULO 24	DDGS en dietas de ovejas y cabras
CAPÍTULO 25	DDGS en dietas de caballos, conejos y perros
CAPÍTULO 26	Impacto de los métodos de formulación de dietas en la evaluación del valor de los DDGS
CAPÍTULO 27	El papel de los DDGS en la sustentabilidad ambiental
CAPÍTULO 28	Factores que afectan el precio y la logística del transporte de los DDGS
CAPÍTULO 29	Resumen de las pruebas de alimentación con DDGS reducidos en aceite patrocinadas por el U.S. Grains Council
CAPÍTULO 30	Preguntas más frecuentes sobre los DDGS
CAPÍTULO 31	Proveedores de DDGS de EE. UU.
CAPÍTULO 32	Glosario de términos
CAPÍTULO 33	Vínculos a páginas web
CAPÍTULO 34	Artículos clave de revisiones y lectura adicional

CAPÍTULO 1

El papel de los DDGS de EE. UU. en la nutrición animal de precisión y en la alimentación sustentable del mundo

VIVIMOS EN UN MUNDO DE ENORMES RETOS. Quizá uno de los más importantes es desarrollar e implementar nuevos enfoques y tecnologías que brinden un adecuado suministro de alimentos nutritivos, inocuos y asequibles a una población mundial cada vez mayor, conservando al mismo tiempo los recursos naturales y minimizando el impacto ambiental negativo. Se prevé que hacia 2050 la demanda mundial de alimentos se incremente 60 por ciento, lo que hará que aumente la demanda de carne, leche y huevos de la creciente clase media mundial de consumidores (Alexandratos y Bruinsma, 2012). Por fortuna, se espera que en los próximos 10 años la producción de animales para consumo humano aumente y represente el 50 por ciento del valor de producción agropecuaria mundial (FAO, 2008). Sin embargo, para cumplir con esta demanda, todo aquel involucrado en la cadena de producción de alimentos debe desarrollar e implementar nuevas tecnologías para aumentar la cantidad y eficiencia del alimento producido. Se han desarrollado e implementado muchos cambios estructurales e innovaciones en nutrición y producción animal en los sistemas de producción pecuaria de todo el mundo. Las innovaciones de “nutrición animal de precisión” aumentan a un ritmo acelerado para satisfacer los desafíos de proporcionar seguridad alimentaria, inocuidad de los alimentos y sustentabilidad ambiental. El objetivo de la “nutrición animal de precisión” es mejorar la eficiencia calórica y nutricional para convertir la energía y los nutrientes presentes en los ingredientes en productos alimenticios de origen animal de gran calidad.

La industria mundial de alimentos balanceados desempeña un papel importante en la alimentación sustentable del mundo. La producción de casi mil millones de toneladas de alimentos balanceados al año sucede en más de 130 países de todo el mundo (IFIF, 2016). Aunque varios granos como el maíz, sorgo, trigo y cebada representan los principales ingredientes que se usan en la alimentación animal, la gran mayoría de ingredientes que se usa en la industria son subproductos derivados de distintas industrias agropecuarias y alimentarias, no aptos para el consumo humano, pero que brindan energía valiosa y nutrientes esenciales en el alimento balanceado. Por ende, la industria de alimentos balanceados desempeña un papel esencial en el “reciclaje” de nutrientes, en la captación de valor económico, en la mejora de la seguridad alimentaria y en minimizar el impacto ambiental negativo al hacer uso de estas fuentes de nutrientes para producir cantidades abundantes de alimentos de origen animal de alta calidad.

Uno de los temas polémicos relacionado con la capacidad de la agricultura global de alimentar al mundo de forma sustentable es “el debate de los alimentos vs. los combustibles”. Esta controversia supone la compensación de usar parte de los granos y oleaginosas que se producen para biocombustibles,



en lugar de usarlos para alimentos para consumo animal y humano. Sin embargo, solo el 6 por ciento de la producción total mundial de granos se usa para producir etanol (Popp et al., 2016) y casi 33 por ciento del maíz usado para producir etanol en la industria de la molienda en seco, se recupera como coproductos para alimentos balanceados. Por lo tanto, aunque se ha incrementado la demanda de maíz para la producción de etanol, todos los componentes no almidonosos se recuperan y concentran (aproximadamente por triplicado) en coproductos, comparado con la concentración de estos nutrientes en el grano de maíz y se usan para desplazar cantidades importantes de maíz y de harina de soya en el alimento balanceado.

La industria mundial de biocombustibles produce unos 52 millones de toneladas de coproductos para uso en alimentos balanceados y alrededor del 85 por ciento de estos los produce la industria del etanol (Popp et al., 2016). La industria estadounidense del etanol es el mayor productor de coproductos de maíz, con una producción anual cercana a las 38 millones de toneladas. Esta cantidad de coproductos del maíz producidos se compara con la cantidad de harina de soya producida en EE. UU. al año y se usa en grandes cantidades en alimentos balanceados tanto a nivel nacional, como en más de 30 países de todo el mundo. Además, en los últimos 20 años, los DDGS ha sido el ingrediente de alimentos balanceados más

ampliamente investigado de entre los principales ingredientes que se usan en la industria mundial. Las investigaciones no solo se centran en mejorar la eficiencia calórica y nutricional, y en identificar los beneficios y limitaciones del uso óptimo de los DDGS en todos los alimentos para animales, sino que los esfuerzos de investigación están cada vez más enfocados en caracterizar sus extraordinarias propiedades nutracéuticas y de impacto ambiental.

El alto contenido de energía, proteína y fósforo de los DDGS hace que sean un sustituto parcial muy atractivo de algunos de los ingredientes tradicionales más caros de energía (maíz), proteína (harina de soya) y fósforo (fosfato mono o dicálcico) que se utilizan en los alimentos para animales. Cuando se añaden DDGS a un alimento que esté bien formulado, proporcionan un excelente desempeño y salud animal, así como una buena calidad de producto alimenticio. Estos atributos juntos con otros han hecho que los DDGS sean uno de los ingredientes de más popularidad para usarse en los alimentos para animales en todo el mundo.

Debido a la amplia oferta de DDGS que se producen actualmente en EE. UU., sigue en aumento la cantidad disponible para exportación. Gran parte de este incremento en la demanda es resultado directo del importante ahorro en el costo de la dieta por parte del usuario final en comparación con otros ingredientes competitivos. Sin embargo, aunque los DDGS de EE. UU se han usado durante varias décadas en alimentos balanceados en el país, para muchos nutricionistas, fabricantes de alimentos y productores pecuarios del mundo es un ingrediente relativamente desconocido. Como con cualquier nuevo ingrediente en el mercado mundial, hay muchas dudas técnicas sobre los beneficios nutricionales, limitaciones y uso de los DDGS en alimentos balanceados para captar el mayor valor económico. Incluso para los usuarios finales experimentados, la producción de DDGS reducidos en aceite (de siete a nueve por ciento de grasa cruda) ha llevado a muchas dudas sobre el contenido energético y valor alimenticio en comparación con los

de alto contenido de aceite tradicionales (más del 10 por ciento de grasa cruda) en diferentes especies animales.

Esta cuarta edición revisada del *Manual del Usuario de DDGS – Nutrición de DDGS de precisión del U.S. Grains Council* se elaboró para brindar a los nutricionistas, compradores de ingredientes, fabricantes de alimentos balanceados y productores pecuarios la información más actualizada fundamentada en datos científicos que hay con relación al desarrollo de programas de nutrición animal de precisión con este ingrediente.

El Consejo Norteamericano de Granos (USGC) proporciona este resumen exhaustivo de la información nutricional de los DDGS para ayudar a los compradores, tanto actuales como potenciales, a entender sus características nutricionales, las tasas de inclusión máximas recomendadas en la dieta, así como los beneficios y limitaciones de su uso en los alimentos para animales. Como con cualquier ingrediente de alimentos, el usuario final de los DDGS debe consultar y buscar ayuda y consejos de un nutriólogo o nutricionista calificado al formular dietas y desarrollar recomendaciones de alimentación. El USGC no tiene control alguno sobre el contenido nutritivo de ningún ingrediente específico seleccionado para la alimentación. Además, el USGC no ofrece ninguna garantía de que estas recomendaciones sean adecuadas para un hato, parvada o animal en particular. EL USGC exige a la organización misma o a sus miembros, de toda responsabilidad de cualquier problema que se encuentre en el uso de estas recomendaciones. Al revisar este material, los compradores están de acuerdo con estas limitaciones y renuncian a cualquier reclamación contra el USGC por la responsabilidad que surja de esta información.

Para obtener más información, contacte al U.S. Grains Council al teléfono 001-202-789-0789 o al correo electrónico grains@grains.org. También puede consultar www.grains.org.

Bibliografía

- Alexandratos, N., and J. Bruinsma. 2012. World agriculture towards 2030/2050: The 2012 revision. ESA Working Paper No. 12-03, June, Agriculture Development Economic Division, Food and Agricultural Organization of the United Nations (FAO), Rome, Italy.
- Food and Agricultural Organization of the United Nations (FAO). 2008. The Global Livestock Sector – A Growth Engine, Rome, Italy <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/010/ai554e/ai554c00.pdf>
- International Feed Industry Federation. 2016. The Global Feed Industry. Wiehl, Germany <http://www.ifif.org/pages/t/The+global+feed+industry>
- Popp, J., M. Harangi-Rakos, Z. Gabnai, P. Balogh, G. Antal, and A. Bai. 2016. Review: Biofuels and their co-products as livestock feed: Global economic and environmental implications. *Molecules* 21:285. Doi:10.3390/molecules21030285



CAPÍTULO 2

La “incoherencia” entre el precio de los DDGS y su valor económico

CAPTAR EL MAYOR VALOR ECONÓMICO DE LOS DDGS entre fuentes y usar este ingrediente en los programas de nutrición de precisión requiere de una nueva forma de replantear cómo se determina el valor. Uno de los principales desafíos al captar el valor económico total de los ingredientes de alimentos balanceados tiene que ver con el tipo de análisis nutricional usado para determinar el precio de compra en el mercado mundial de *commodities* comparado con las mediciones nutricionales reales para determinar el valor económico real en una dieta animal. La energía, aminoácidos y fósforo son los tres componentes nutricionales más caros de las dietas para animales. En el mercado actual de *commodities*, el precio de compra de un ingrediente se basa en las garantías mínimas de la proteína cruda y grasa cruda. En ingredientes como los DDGS, el precio de compra se basa en la combinación de su contenido de proteína y grasa cruda, que a menudo se le conoce como contenido “Profat”. La proteína cruda y la grasa cruda, junto con la fibra cruda, humedad, cenizas y extracto libre de nitrógeno son los componentes del análisis proximal utilizado como una descripción rutinaria de los ingredientes de alimentos para animales desde que fue establecida en 1865 por Henneberg y Stohmann de la Estación Experimental Weende en Alemania. Sin embargo, en la actualidad este sistema de caracterización general de las distintas características químicas de los ingredientes del alimento es sumamente insuficiente para usar en la formulación de las dietas para animales, porque no brinda información precisa de la cantidad y proporción de la energía usada por las diferentes especies, ni representa la cantidad y digestibilidad de nutrientes específicos como aminoácidos, fósforo y otros nutrientes esenciales que requieren dichos animales. De hecho, los estudios han demostrado que el contenido de proteína cruda del maíz y los DDGS se correlaciona poco con el contenido de lisina (Cromwell et al., 1999). Además, Fiene et al. demostraron que aunque algunos aminoácidos (isoleucina, leucina, metionina, treonina y valina) eran predecibles con cierta precisión mediante ecuaciones de predicción como de la proteína, grasa y fibra crudas, otros aminoácidos (arginina, cistina, lisina y triptofano) se predijeron muy mal. Por ende, aunque el análisis de componentes proximales es relativamente sencillo y económico, los nutricionistas de animales no usan ni proteína cruda ni grasa cruda para formular el alimento, porque son indicadores poco precisos de la energía útil y del contenido de aminoácidos digestibles en los ingredientes para alimentos.

En las últimas décadas, se han hecho importantes mejoras en el desarrollo de mediciones nutricionales altamente precisas que calculan el valor nutritivo real de los ingredientes de alimentos balanceados. En la actualidad, los alimentos balanceados se formulan con base en la energía metabolizable (EM) o energía neta (EN) y con base en una proteína digestible o aminoácidos. Además, las dietas de cerdos y aves se formulan con base en fósforo digestible o biodisponible. La formulación de



dietas para animales a un menor y mejor costo se logra con valores de EM y EN precisas, de aminoácidos digestibles y de fósforo digestible o disponible de los ingredientes a alimentar, y poniendo restricciones de las concentraciones mínimas y máximas en la dieta de dichos componentes nutricionales esenciales y de costo elevado. Por ende, el método analítico usado para determinar el precio de los DDGS es “incoherente” con las mediciones usadas para formular las dietas y determinar el valor económico. Esta “incoherencia” es común que resulte en la subvaloración del verdadero valor económico de los DDGS en el alimento. Por consiguiente, muchas veces los DDGS se comercializan a un menor precio del valor económico real que proporcionan a las dietas para animales.

Como se muestra en el **cuadro 1**, el uso del método común del contenido “Profat” para evaluar el valor nutricional y económico de las fuentes de DDGS causa que la mayoría de los compradores elijan, de entre las cinco diferentes fuentes, a la A como la de mayor valor económico, por la combinación de alto contenido de proteína cruda y grasa cruda (37.1 por ciento). Además, es probable que la mayoría de los compradores de DDGS soliciten un descuento en el precio de las fuentes B (31.4 por ciento Profat) y C (32.4 por ciento Profat) por la percepción de un valor nutricional menor. Sin embargo, como lo muestra el **cuadro 2**, en realidad la fuente C de DDGS es la que tiene el mayor valor económico (US\$279/ton) en una dieta porcina de crecimiento/finalización, seguida de la A (US\$266/ton) y la B (US\$252/ton). Las fuentes E y D de DDGS tuvieron el segundo (34.4 por ciento) y tercer (35.5 por ciento) mayor contenido Profat, respectivamente, pero estas fuentes tuvieron el menor valor económico real de entre las cinco. Estos resultados son un ejemplo “del mundo real” del por qué **no se deben usar las especificaciones Profat** en la toma de decisiones de compra

de DDGS basadas en el precio, en particular ahora que se han desarrollado ecuaciones de predicción de EM y aminoácidos DIE precisas para este ingrediente usado en dietas porcinas y avícolas (véanse los **capítulos 19 y 22**).

Aunque la fuente C de DDGS presentó el segundo mayor contenido EN, tuvo el mayor contenido de metionina, treonina y triptofano digestible ileal estandarizado (DIE) de las cinco, por lo que la combinación de estos componentes nutricionales económicamente importantes dio como resultado que tuviera el mayor valor económico. Además, en este ejemplo, hubo una diferencia de valor económico de US\$60/ton entre las fuentes de DDGS de mayor y menor valor. Esta diferencia representa una oportunidad valiosa para que los compradores capten el mayor valor al adoptar nuevas ecuaciones de predicción de energía y de aminoácidos digestibles “innovadoras” para determinar el verdadero valor económico de las distintas fuentes de DDGS. Esto se puede lograr al solicitar un análisis de laboratorio de las fuentes de DDGS a considerar para compra, con la colaboración con el nutricionista en el uso de ecuaciones de predicción para calcular el contenido de EM y DIE reales para cerdos y/o aves, y el uso de precios actuales de ingredientes competidores para tener un “precio sombra” de dichas fuentes.

Otro aspecto importante de esta comparación es que el precio de los DDGS en el mercado spot al momento de hacer esta comparación de “precio sombra” era de \$182/ton. Al comparar el valor económico real de cada fuente de DDGS con el precio del mercado, todas tuvieron un valor económico entre US\$37 y US\$92/ton mayor que el precio que se hubiera pagado para comprarlas. Estos resultados muestran que actualmente los DDGS son uno de los mejores valores del mercado mundial de ingredientes de alimentos balanceados. De hecho, la “incoherencia” entre el precio del mercado y el valor económico de los DDGS de EE. UU. en las dietas porcinas puede llegar hasta US\$100/ton más el valor económico real que el precio de compra real, dependiendo de las condiciones del precio de mercado de los ingredientes competidores. Además, también puede existir una diferencia de valor económico de hasta US\$90 por ton, entre el valor más bajo y el más alto de las



fuentes de DDGS de EE. UU. en las dietas porcinas. También existen diferencias similares al comparar el valor económico real de los DDGS en las dietas de otros ruminantes, aves y acuicultura, con una mayor diferencia del valor económico en dietas de ganado lechero y de carne. Como resultado, estas diferencias drásticas del valor económico real entre las fuentes de los DDGS representa una gran oportunidad para reducir el costo del alimento balanceado y mejorar la rentabilidad. Sin embargo, estas diferencias de valor solo se pueden captar con el uso de EM, EN, proteínas y aminoácidos digestibles y fósforo digestible dinámicos y precisos de la fuente específica de DDGS que se use en la formulación de las dietas de cada especie.

Cuadro 1. Análisis proximal de 5 fuentes de DDGS de maíz de EE. UU. comercialmente disponibles

	A	B	C	D	E
Materia seca, %	89.2	89.0	88.9	92.8	88.7
Proteína cruda, %	29.6	25.7	26.6	27.5	25.7
Grasa cruda, %	7.5	5.7	5.8	8.0	8.7
Profat, %	37.1	31.4	32.4	35.5	34.4
Fibra cruda, %	6.9	6.7	6.7	7.2	7.1
Cenizas %	4.5	5.2	4.3	4.9	4.8

Fuente: Dr. Rob Musser, Nutriquest, Mason City, IA.

Cuadro 2. Contenido de energía, aminoácidos digestibles ileales estandarizados (DIE), y fósforo disponible de cinco fuentes de DDGS comercialmente disponibles en dietas de cerdos en crecimiento y finalización¹

	A	B	C	D	E
EM, kcal/kg	3,237	3,073	3,180	3,182	3,001
EN kcal/kg	2,302	2,190	2,278	2,256	2,141
Lisina DIE, %	0.58	0.65	0.63	0.60	0.45
Metionina DIE, %	0.48	0.49	0.58	0.46	0.42
Treonina DIE, %	0.79	0.80	0.86	0.76	0.62
Triptofano DIE, %	0.16	0.16	0.17	0.16	0.14
Fósforo disponible, %	0.60	0.69	0.65	0.70	0.66
Valor económico ² , US\$/ton	266	252	279	240	219

¹El contenido de EM, EN y aminoácidos DIE se determinó mediante ecuaciones de predicción con base en la composición química desarrollada específicamente para los DDGS.

²El valor económico se determinó con el "precio sombra" de un programa de formulación del menor costo con los siguientes precios de ingredientes (DDGS = US\$182/ton, maíz = US\$138/ton, harina de soya - US\$343/ton)

Fuente: Dr. Rob Musser, Nutriquest, Mason City, IA.

Conclusiones

Aunque el mercado mundial de *commodities* de alimentos balanceados sigue usando las especificaciones de proteína cruda y grasa cruda para determinar el precio de los ingredientes, este sistema no capta de forma adecuada el valor económico real de los DDGS. De hecho, dado que los DDGS contienen altas cantidades de una combinación de energía, aminoácidos y fósforo comparado con la mayoría de los otros ingredientes de alimentos, a menudo su valor económico es difícil de determinar con precisión porque su precio lo determina la competencia de precios tanto del mercado del maíz como de la harina de soya. Por ello, suelen estar entre US\$40 y US\$100/ton infravalorados, dependiendo de la especie, fase de producción, tasa de inclusión en la dieta y condiciones del mercado. Pueden usarse ecuaciones de energía y aminoácidos digestibles recientemente desarrolladas para proporcionar valores precisos que las utilicen nutricionistas y formuladores de alimentos para determinar "precios sombra" en distintas formulaciones. Los compradores deben usar este método en lugar de depender de las imprecisiones del contenido de proteína y grasa cruda de los DDGS para captar el mayor valor económico, controlar la variabilidad entre las fuentes y evitar la sub o sobrealimentación de energía y nutrientes al eliminar la "incoherencia" entre el precio y el valor económico real.

Bibliografía

- Cromwell, G.L., C.C. Calvert, T.R. Cline, J.D. Crenshaw, T.D. Crenshaw, R.A. Easter, R.C. Ewan, C.R. Hamilton, G.M. Hill, A.J. Lewis, D.C. Mahan, E.R. Miller, J.L. Nelssen, J.E. Pettigrew, L.F. Tribble, T.L. Veum, and J.T. Yen. 1999. Variability among sources and laboratories in nutrient analyses of corn and soybean meal. *J. Anim. Sci.* 77:3262-3273.
- Fiene, S.P., T.W. York, and C. Shasteen. 2006. Correlation of DDGS IDEA™ digestibility assay for poultry with cockerel true amino acid digestibility. In: Proc. 4th Mid-Atlantic Nutrition Conference, University of Maryland, College Park, MD. pp. 82-89.

CAPÍTULO 3

Producción de etanol, aceite de maíz de destilería y coproductos de maíz por molienda en seco

Introducción

ESTADOS UNIDOS ES LÍDER MUNDIAL EN PRODUCCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES

(etanol y biodiésel), resultado de una gran productividad agrícola e infraestructura, aunado a directivas gubernamentales hacia su uso para reducir la dependencia de combustibles fósiles y las emisiones de gases de efecto invernadero. En la última década, la producción del etanol estadounidense ha seguido en aumento; se espera que en 2017 se produzcan más de 59,000 mil millones de litros (**figura 1**; Renewable Fuels Association, 2017) con el uso de más de 5,500 millones de bushels de maíz. Casi el 90 por ciento de la producción estadounidense de etanol se realiza en 214 plantas de etanol de molienda en seco de 29 estados (**figura 2**; RFA, 2017). Como resultado, se espera que en 2017 se produzcan 36.5 millones de toneladas de coproductos de destilería (**figura 3**; RFA, 2017) y 1,500 millones de kg de aceite de maíz de destilería (**figura 4**; RFA, 2017). Actualmente, la molienda en húmedo constituye alrededor del 10 por ciento de la producción de etanol en EE. UU. la cual produce una proporción relativamente menor de coproductos de maíz, apenas 3.6 millones de toneladas harina de gluten de maíz y 705,000 toneladas de harina de gluten de maíz de 65% de proteína (**figura 5**; RFA, 2017). De las 36.5 millones de toneladas de coproductos de destilería que se producen, se exportan cerca de 11 millones de toneladas (**figura 6**; RFA, 2017), de las que el 70 por ciento se usa en alimento para ganado de engorde y lechero, cerdos y aves en EE. UU. (**figura 7**; RFA, 2017). Desde 2004 ha aumentado el uso de los DDGS en las dietas de cerdos y aves (**figura 8**; RFA, 2017), pero el ganado de engorde consume cerca del 45 por ciento de los coproductos nacionales de maíz húmedos y secos, seguido del ganado lechero (31 por ciento), cerdos (15 por ciento) y aves (8 por ciento).

A partir de 2005, unas cuantas plantas de etanol de EE. UU. empezaron a extraer parte del aceite de maíz del destilado ligero (vinaza) antes de producir DDGS reducidos en aceite. El principal motivo de hacerlo así era el capital de inversión y costo de funcionamiento relativamente bajos, lo cual resultó en una rápida recuperación de la inversión y en mayores ganancias de las plantas de etanol de producir y comercializar otro coproducto. Actualmente, cerca del 51 por ciento del aceite de maíz de destilería se usa en alimentos balanceados (es decir, en aves y cerdos), 45 por ciento en la producción de biodiésel y el 5 por ciento restante se usa para otros fines industriales (**figura 9**; RFA, 2017). Desde 2017 han sido mínimas las exportaciones de aceite de maíz de destilería, pero es una fuente de energía excelente y económica que los fabricantes de alimentos del mercado de exportación deben tener muy en cuenta para usar como suplemento alto en energía.

Las principales materias primas que se utilizan para producir biodiésel en el mundo son colza o nabo, soya y aceite de palma (IEA, 2015), pero en los últimos años ha aumentado el uso de grasas animales y aceites reciclados de cocina (Licht, 2013). El aceite de soya ha sido la materia prima más barata para la producción de biodiésel en EE. UU., pero hay incentivos para usar alternativas de menor costo, como el aceite de maíz de destilería, para cumplir los objetivos de producción de biodiésel en el futuro con menos costos, al tiempo que se minimiza la competencia con los lípidos comestibles usados en el consumo humano. El contenido de triaciglicerol de las grasas y aceites sirve como sustituto parcial del petróleo en los motores de diésel una vez que estos lípidos pasan por la transesterificación, un proceso químico usado para convertir ácidos grasos a partir de ésteres de glicerol en ésteres de acilos (por ejemplo, metilo, etilo). Esta conversión es necesaria porque la alta viscosidad del triaciglicerol resulta en una atomización deficiente en los cilindros de motores de diésel, lo cual provoca una combustión deficiente, deposición de combustible, desgaste y fallas del motor (Ziejewski et al., 1986 a,b; Goering et al., 1987).

El objetivo de este capítulo es describir los principios básicos de la producción de etanol, extracción de aceite de maíz y producción de DDGS para tener mayores conocimientos de las características nutricionales y el valor alimenticio de los coproductos de maíz que produce la industria del etanol de EE. UU. .

Figura 1. Histórico de producción de combustible de etanol de EE. UU.

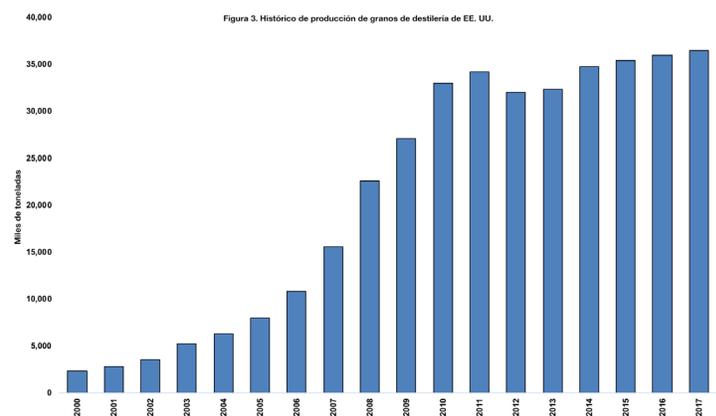


Figura 2. Producción de etanol por tipo de tecnología

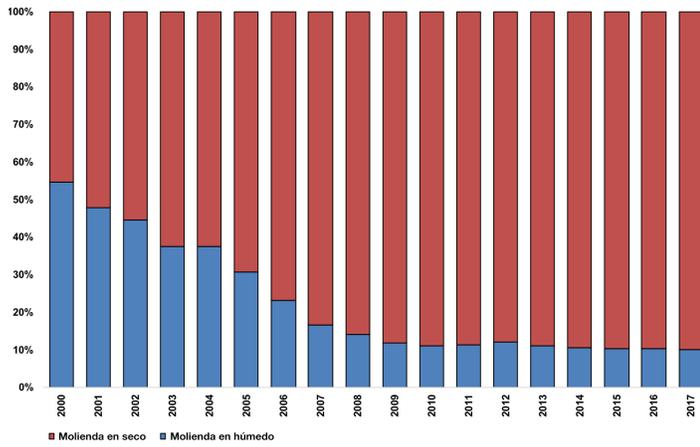


Figura 5. Producción de coproductos de combustible de etanol de EE. UU.

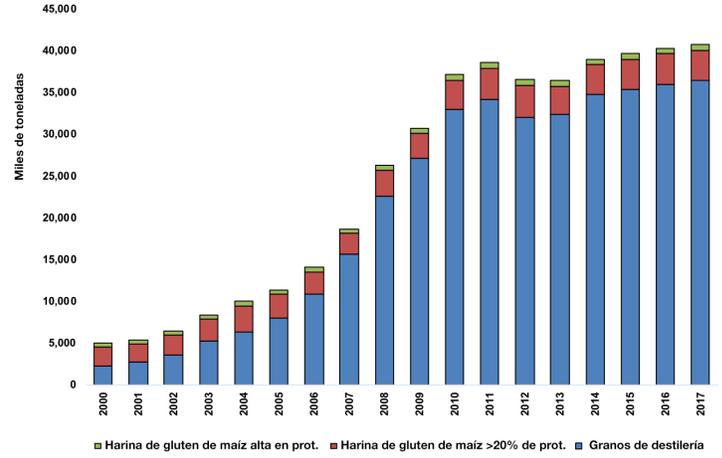


Figura 3. Histórico de producción de granos de destilería de EE. UU.

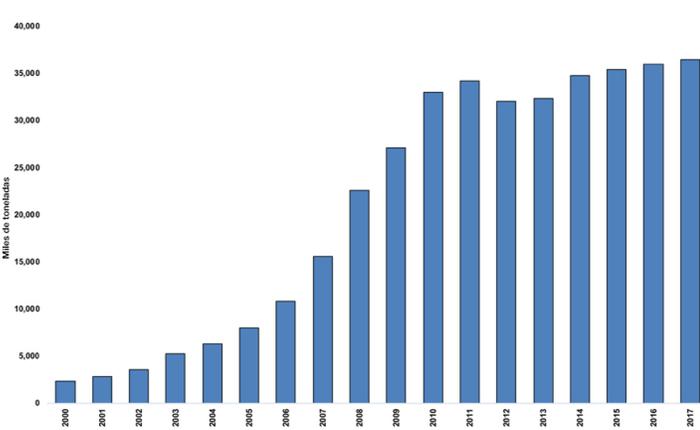


Figura 6. Histórico de exportaciones de granos de destilería de EE. UU.

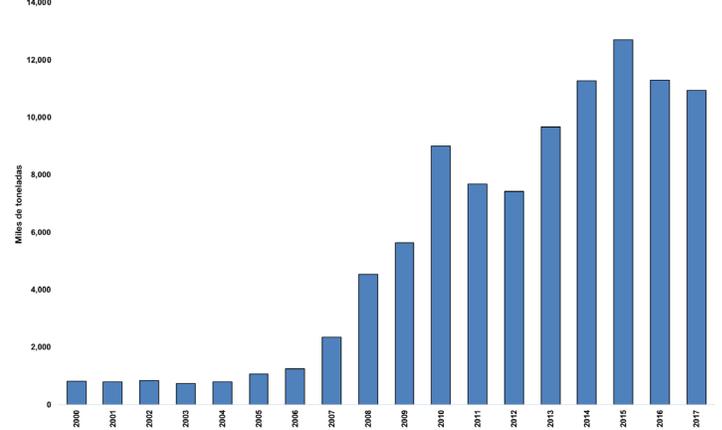


Figura 4. Histórico de producción de aceite de destilería de maíz de EE. UU.

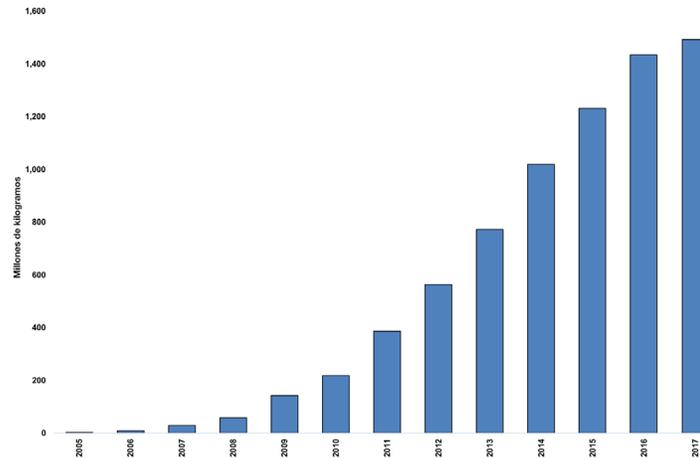


Figura 7. Exportación y uso nacional de granos de destilería de EE. UU.

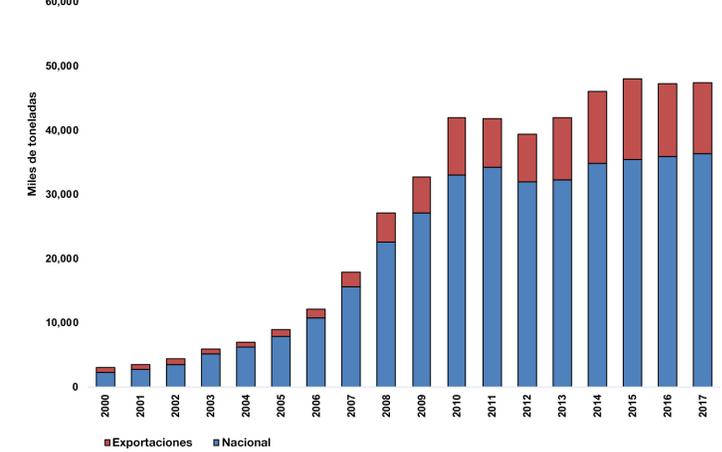


Figura 8. Consumo de granos de destilería de EE. UU. por especie

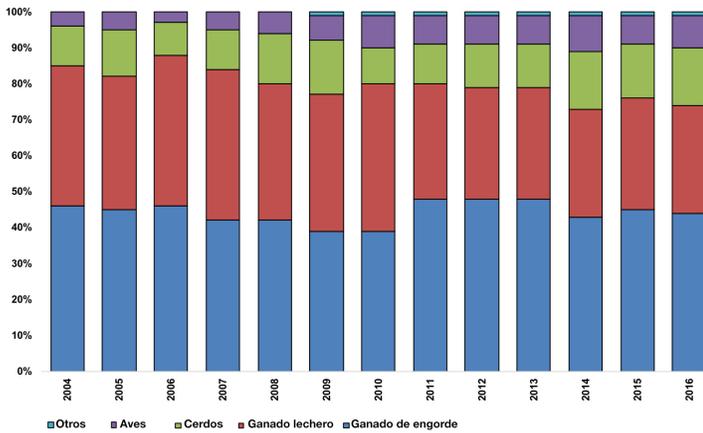
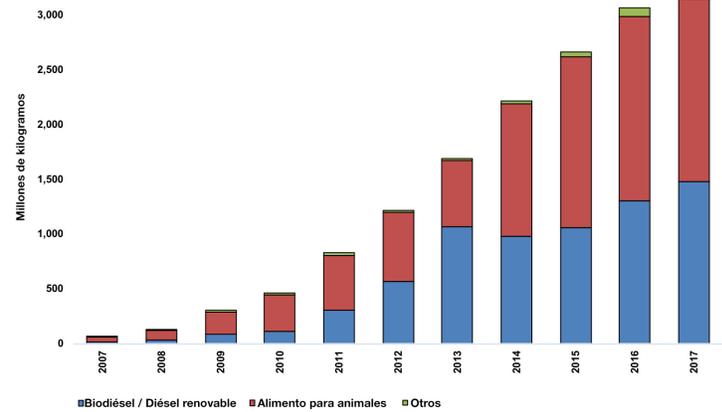


Figura 9. Uso de aceite de destilería de maíz de EE. UU.



Conversión del almidón a etanol

En Estados Unidos, el maíz es la fuente predominante de almidón (glucosa) que se utiliza para producir etanol. Con excepción de la caña de azúcar, el maíz proporciona el rendimiento de etanol más alto en comparación con otras materias primas usadas (**cuadro 1**). Sin embargo, recientemente se han desarrollado tecnologías para convertir la fibra del maíz y otras materias primas de celulosa en glucosa para la producción del etanol. La eficiencia energética de

convertir glucosa a etanol es de alrededor del 51.4 por ciento, mientras que el 48.6 por ciento se atribuye a la producción de dióxido de carbono. La eficiencia de la producción de etanol a partir de almidón sin humedad es cercana al 56.7 por ciento. La composición de nutrientes de las materias primas utilizadas para producir etanol determina el perfil de nutrientes de los coproductos de destilería que se producen.

Cuadro 1. Contenido de almidón y rendimiento del etanol de distintas materias primas (adaptado de Saskatchewan Agriculture and Food, 1993)

Materia prima	Humedad (%)	Almidón (%)	Rendimiento de etanol (L/ton)
Almidón	-	100	720
Caña de azúcar	-	-	654
Cebada	9.7	67.1	399
Maíz	13.8	71.8	408
Avena	10.9	44.7	262
Trigo	10.9	63.8	375

Producción de etanol por molienda en seco

Reducción del tamaño de partícula del grano

Como se muestra en la **figura 10**, el paso inicial en la producción de etanol con la tecnología de molienda en seco, es reducir el tamaño de partícula del maíz moliéndolo con un molino de martillos. Los molinos de martillos rompen el grano del maíz mediante la rotación del martillo a alta velocidad. La fineza del maíz molido está determinada principalmente por el volumen del rotor, la velocidad de la punta del martillo, el número de martillos y el tamaño de la abertura de la malla (Dupin et al., 1997). Las mallas que se usan en el molino de martillos normalmente están en un intervalo de 3 a 5 mm de diámetro. El tamaño de partícula del grano puede afectar el rendimiento de etanol (Kelsall y Lyons, 1999), por lo que los productores tienden a usar maíz molido muy fino para maximizar el rendimiento. Como se muestra en el **cuadro 2**, se puede producir un extra de 0.85 litros (0.20 galones) de etanol si el maíz se muele para que pase por una malla de 5 mm, en comparación con una de 8 mm.

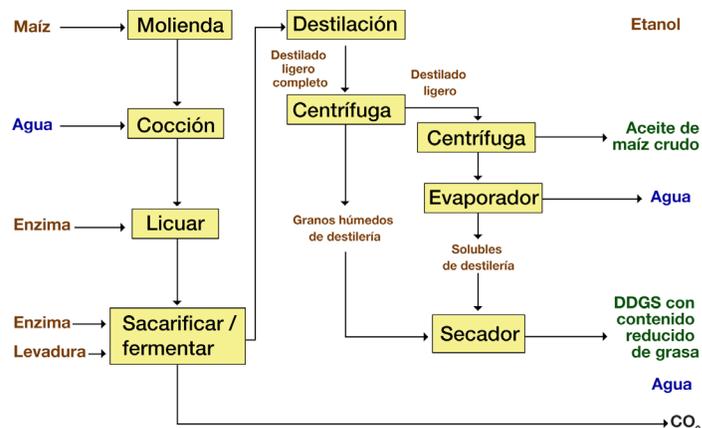


Figura 10. Proceso de producción de etanol de molienda en seco y coproductos

Cuadro 2. Rendimiento de etanol del maíz molido con diferentes tamaños de partícula (adaptado de Kelsall y Lyons, 1999).

Tamaño de partícula	Rendimiento de etanol (galones/bushel)
Maíz molido fino, malla de 5 mm	2.65
Maíz molido grueso, malla de 8 mm	2.45

Cocción y sacarificación

El agua y el destilado reciclado se añaden al maíz molido, los cuales actúan como acondicionadores para empezar la lixiviación de la proteína soluble, los azúcares y los lípidos ligados no almidonosos (Chen et al. 1999). La cocción se usa para hidrolizar el almidón a glucosa junto con la adición de enzimas amilolíticas, para que las levaduras (*Saccharomyces cerevisiae*) conviertan la glucosa en etanol. Las temperaturas que típicamente se usan durante el proceso de cocción son de 40°-60°C en el tanque de premezcla, 90°-165°C para la cocción y 60°C para la licuación (Kelsall y Lyons, 1999). La gelatinización del almidón comienza entre los 50° y 70° C. Un paso crítico en la conversión del almidón en glucosa implica la terminación de la gelatinización del almidón (Lin y Tanaka, 2006). Durante la gelatinización, se filtra casi toda la amilosa de los gránulos de almidón (Han y Hamaker, 2001), lo que incrementa la viscosidad debido a que se hinchan dichos gránulos y a los geles que consisten de amilosa solubilizada (Hermansson y Kidry matterman, 1995).

La hidrólisis completa del polímero de almidón requiere de una combinación de enzimas. Las amilasas son las enzimas termoestables más ampliamente utilizadas en la industria del almidón (Sarıkaya et al., 2000). Éstas incluyen las α -amilasas o glucoamilasas (Poonam y Dalel, 1995). Las enzimas deben ser termoestables para que se dé la hidrólisis del almidón

inmediatamente después de la gelatinización. El uso de enzimas representa del 10 al 20 por ciento del costo de producción del etanol (Gregg et al., 1998).

Algunas plantas de etanol utilizan sistemas de cocción por lote, mientras que otras utilizan sistemas de cocción continua (Kelsall y Lyons, 1999). En el sistema de cocción por lotes, se mezcla una cantidad conocida de harina de maíz con una cantidad conocida de agua y de destilado reciclado. En el proceso de cocción continua, la harina de maíz, el agua y el destilado reciclado se añaden continuamente en un tanque de premezcla. La temperatura del tanque de premezcla se mantiene justo por debajo de lo necesario para la gelatinización y la masa se bombea continuamente a través de un cocedor de inyección. La temperatura del cocedor se fija en 120°C. Del cocedor, la harina pasa a la parte superior de la columna vertical y se va moviendo hacia abajo de la columna en unos 20 minutos y luego pasa a la cámara instantánea para la licuación a 80-90°C. La amilasa tolerante a altas temperaturas se añade a 0.05-0.08 por ciento del peso del cereal para que se dé la licuación. El tiempo de retención en la cámara instantánea/de licuación es de alrededor de 30 minutos. El pH del sistema se controla entre 6.0 y 6.5. Los sistemas por lote usan menos enzimas en comparación con los continuos y son también más eficientes en energía. La principal desventaja de los sistemas por lote, es la menor productividad o utilización de materias primas por unidad de tiempo.

Fermentación

La fermentación es el proceso en el que la levadura convierte los azúcares en alcohol. La levadura más comúnmente utilizada es la *Saccharomyces cerevisiae* (Pretorius, 2000) porque puede producir etanol a una concentración de hasta 18 por ciento en el caldo de fermentación. La *Saccharomyces* también está generalmente reconocida como inocua (GRAS, por sus siglas en inglés) como aditivo para alimentos de consumo humano (Lin y Tanaka, 2006). En la fermentación ideal, cerca del 95 por ciento del azúcar se convierte a etanol y dióxido de carbono, el uno por ciento se convierte en materia celular de las levaduras y el cuatro por ciento en otros productos como el glicerol (Boulton et al., 1996). Las levaduras representan alrededor del 10 por ciento del costo de producción del etanol (Wingren et al., 2003).

La pre-fermentación se hace para lograr el número deseado de levaduras para la fermentación, proceso que implica la agitación durante 10-12 horas para lograr de 300 a 500 millones de levaduras/ml. La fermentación sucede a una temperatura de alrededor de 33°C (Thomas et al., 1996), a un pH de alrededor de 4.0 (Neish y Blackwood, 1951) y dura entre 48 y 72 horas (Ingledew, 1998). Además del etanol, se produce dióxido de carbono, que también se puede recolectar o simplemente liberar al aire.

El control del crecimiento normal de las levaduras es un factor clave en la producción eficiente del etanol. La actividad de las levaduras es altamente dependiente de la temperatura del sistema de fermentación. Torija et al. (2003) informaron que la temperatura óptima de reproducción y fermentación de la levadura es de 28° y 32°C, respectivamente. La eficiencia de la fermentación del *S. cerevisiae* a altas temperaturas (arriba de 35°C) es baja (Banat et al., 1998). Por lo tanto, se requiere de un sistema de enfriamiento en los sistemas de fermentación.

Uno de los desafíos de manejar fermentadores en una planta de etanol es prevenir la contaminación con otros microbios. La contaminación microbiana es causante de una reducción del rendimiento de etanol y de la productividad de la planta (Barbour y Priest, 1988). Los organismos más comúnmente relacionados con la contaminación microbiana son los lactobacilos y las levaduras silvestres. Estos microbios compiten por los nutrientes (minerales traza, vitaminas, glucosa y aminonitrógeno libre) con la *Saccharomyces cerevisiae*, además de que producen productos finales inhibitorios tales como el ácido acético o el láctico. Las levaduras silvestres *Dekkera/Brettanomyces* se han convertido en una preocupación en la producción del alcohol combustible (Abbott e Ingledew, 2005). Actualmente, se ha logrado la reducción en la contaminación de ácido láctico bacteriano con el uso de antibióticos en las plantas de producción de etanol (Narendranath y Power, 2005).

Destilación del etanol

Después de la fermentación, se recolecta el etanol por medio de columnas de destilación. El etanol recolectado de los fermentadores se contamina con agua y se purifica con un sistema de tamices moleculares para eliminar el agua y producir etanol puro.

Extracción de aceite de maíz

Aunque la mayoría de las plantas de etanol en EE. UU. (más del 90 por ciento) usan diferentes tecnologías de extracción de aceite para eliminar cantidades variables de este antes de producir DDGS, es probable que en el futuro se extraiga más aceite de maíz de destilería, porque el resto de las plantas que que hoy en día no lo extraen podrían adoptar esta tecnología. Además, ya se han desarrollado e implementado nuevas tecnologías de extracción de aceite en las plantas de etanol. Se puede producir aceite crudo de maíz en las plantas de etanol de maíz mediante la extracción del aceite de la porción del destilado ligero del proceso de producción de DDGS (CEPA, 2011). La extracción del aceite de maíz del destilado ligero se da después de la fermentación y la destilación, y antes del secado para producir los DDGS. Se han añadido sistemas de extracción de aceite de maíz a las plantas existentes de etanol para aumentar su eficiencia energética, así como aumentar la cantidad total de combustible que produce por tonelada de maíz procesado. La instalación de equipo de extracción de aceite de maíz en una planta existente de etanol facilita la producción de las materias primas de biodiésel, sin afectar el volumen de producción de etanol.

Existen comercialmente diferentes tecnologías de extracción de aceite de maíz para la industria del etanol. Después de la destilación del etanol se usan varios procesos comerciales patentados para extraer aceite de maíz del destilado ligero. La mayor parte de la industria del etanol utiliza un proceso en el que el aceite de maíz se extrae del destilado ligero después de que se elimina del destilado entero mediante centrifugación (CEPA, 2011). El destilado ligero contiene aproximadamente el 30 por ciento del aceite disponible en el maíz, el destilado ligero parcialmente concentrado resultante se calienta y el aceite de maíz se extrae mediante una segunda centrífuga. Para facilitar la extracción, los intercambiadores de calor utilizan vapor para aumentar la temperatura del destilado ligero, por lo que después de que se extrae el aceite de maíz, se recupera la energía térmica del destilado en dichos intercambiadores de calor para calentar el destilado que entra. En general, estos procesos implican el uso de varias configuraciones de decantadores, centrífugas y calor para la separación física del 30 al 70 por ciento del aceite en esta cadena de coproductos. Todos los aceites de maíz de destilería producidos mediante estos procesos no son adecuados para consumo humano. Sin embargo, habitualmente se usa la extracción por solventes (hexano) en la molienda en húmedo para extraer aceite del germen para producir aceite de maíz de alta calidad para consumo humano (Moreau, 2005). La extracción por hexano es muy eficaz para captar el 90 por ciento del aceite de maíz de los DDGS, pero el alto costo de inversión de capital para construir una planta de extracción por hexano limita la adopción de esta tecnología en la industria del etanol. Actualmente, solo una planta (Novita, Brookings, SD) utiliza la extracción por hexano para eliminar el aceite de maíz de los DDGS. Esta planta produce aceite de maíz grado alimenticio animal y DDGS bajos en aceite (3.5 por ciento de grasa cruda).

Por cada 3.8 litros de etanol producido, se producen 2.4 kg de DDGS sin la extracción del aceite de maíz (CEPA, 2011). Sin embargo, con la extracción del aceite de maíz, el rendimiento de los DDGS se reduce en aproximadamente 0.06 kg por litro de etanol producido, lo que representa una reducción del 9.4 por ciento. La eliminación del aceite de maíz afecta el perfil nutricional de los DDGS, principalmente al reducir el contenido de grasa cruda con efectos variables en el contenido de energía y proteína. Para más información sobre los efectos de la alimentación de diversas especies animales con DDGS reducidos en aceite, consulte los **capítulos 13, 15, 17, 18, 20, 21, 24 y 25**.

Producción de coproductos

El agua y los sólidos que quedan después de la destilación del etanol se les llaman destilado entero o completo. El destilado (vinaza) completo está compuesto principalmente de agua, fibra, proteína y aceite. Esta mezcla se centrifuga para separar los sólidos gruesos del líquido. El líquido, que se llama destilado ligero, se somete a un paso adicional de centrifugación para extraer el aceite antes de pasar a través de un evaporador para eliminar la humedad adicional, para producir solubles condensados de destilería, que contienen aproximadamente 30 por ciento de materia seca. Los solubles condensados de destilería (CDS) se pueden vender localmente a los engordadores de ganado o combinarse con la fracción de sólidos gruesos y secarlos para producir los granos de secos de destilería con solubles (DDGS). Los sólidos gruesos, que también se les llaman pasta húmeda, contienen alrededor del 35 por ciento de materia seca, los cuales se pueden vender a los engordadores locales de ganado sin secar, secarse para producir los granos secos de destilería o mezclarse con solubles condensados de destilería y secarlos para producir los

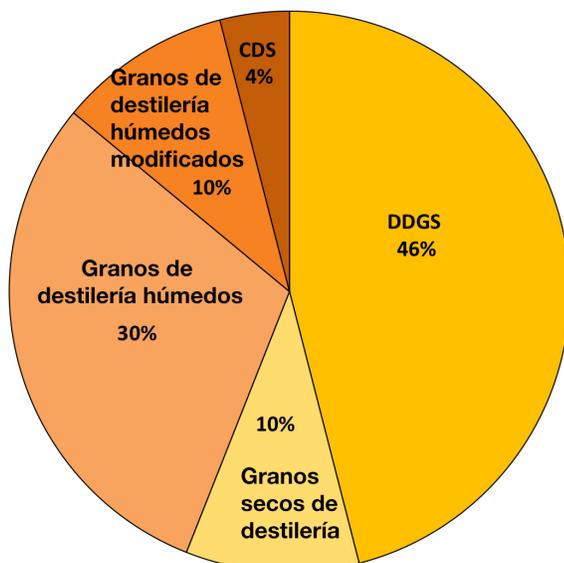


Figura 11. Proporción de distintos tipos de coproductos que se producen en las plantas de etanol de molienda en seco (RFA, 2017)

DDGS (88 por ciento de materia seca). La **figura 11** muestra la proporción de distintos tipos de coproductos producidos en las plantas de etanol de molienda seca.

Bibliografía

- Abbott, D.A., and W.M. Ingledew. 2005. The importance of aeration strategy in fuel alcohol fermentations contaminated with *Dekkera/Brettanomyces* yeasts. *Appl. Biochem. Biotechnol.* 69:16-21.
- Banat, I.M., P. Nigam, D. Singh, R. Merchant, and A.P. McHale. 1998. Ethanol production at elevated temperatures and alcohol concentrations: A review; Part-I Yeast In General. *World J. Microbiol. Biotechnol.* 14:809-821.
- Barbour, E.A., and F.G. Priest. 1988. Some effects of *Lactobacillus* contamination in scotch whisky fermentations. *J. Inst. Brew.* 94:89-92.
- Boulton, B., V.L. Singleton, L.F. Bisson, and R.E. Kunkee. 1996. Yeast and biochemistry of ethanol fermentation. In: *Principles and Practices of Winemaking*, Boulton B, Singleton VL, Bisson LF, Kunkee RE (eds). Chapman and Hall. New York, pp. 139-172.
- California Environmental Protection Agency. 2012. California-Modified GREET Pathway for the Production of Biodiesel from Corn Oil at Dry Mill Ethanol Plants. Stationary Source Division, Release Date: November 3, 2011, Version 2.0. 40 pp.
- Chen, J.J., S. Lu, and C.Y. Lii. 1999. Effect of milling on physicochemical characteristics of waxy rice in Taiwan. *Cereal Chemistry* 76:796-799.
- Dupin, I.V.S., B.M. McKinnon, C. Ryan, M. Boulay, A.J. Markides, P.J. Graham, P. Fang, I. Boloni, E. Haque, and C.K. Spillman. 1997. Comparison of energy efficiency between roller mill and a hammer mill. *Appl. Engineering in Agric.* 13:631-635.
- Goering, C.E., M.D. Schrock, K.R. Kaufman, M.A. Hanna, F.D. Harris, and S.J. Marley. 1987. Evaluation of vegetable oil fuels in engines. *Proc. Int'l. Winter Meeting of ASAE*, Paper No. 87-1586. St. Joseph, MO.
- Gregg, D.J., A. Boussaid, and J.N. Saddler. 1998. Techno-economic evaluations of a generic wood-to-ethanol process: effect of increased cellulose yields and enzyme recycle. *Bioresour. Technol.* 63:7-12.
- Han, X.Z., and B.R. Hamaker. 2001. Amylopectin fine structure and rice starch paste breakdown. *J. Cereal Sci.* 34:279-284.

- Hermansson, A.M., and S. Kidry matteran. 1995. Starch – A phase-separated biopolymer system. In: S.E. Harding, S.E. Hill and J.R. Mitchell, Editors, Biopolymer Mixtures, Nottingham University Press, UK. pp. 225-245.
- International Energy Agency (IEA). 2015. World Energy Outlook 2015. Paris, 200 pp.
- Ingledeu, W.M. 1998. Alcohol production by *Saccharomyces cerevisiae*: A yeast primer. Chapter 5 In: The alcohol textbook. 3rd ed. K.A. Jacques, T.P. Lyons and D.R. Kelsall Ed. Nottingham University Press. Nottingham, UK.
- Kelsall, D.R., and T.P. Lyons. 1999. Grain dry milling and cooking for alcohol production: designing for 23 percent ethanol and maximum yield. Chapter 2. In: The alcohol textbook. 3rd ed. K.A. Jacques, T.P. Lyons and D.R. Kelsall Ed. Nottingham University Press. Nottingham, UK.
- Licht, F.O. 2013. World Ethanol and Biofuels Report, London, Agra Inf.
- Lin, Y., and S. Tanaka. 2006. Ethanol fermentation from biomass resources: current state and prospects. Appl. Microbiol. Biotechnol. 69: 627-642.
- Moreau, R.A. 2005. Corn oil in edible oil and fat products. In: Baileys Industrial Oil and Fat Products, Vol. 2: Edible Oil and Fat Products:Edible Oils, ed. F. Shahidi, pp. 149-172. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.
- Narendranath, N.V., and R. Power. 2005. Relationship between pH and medium dissolved solids in terms of growth and metabolism of Lactobacilli and *Saccharomyces cerevisiae* during ethanol production. Appl. Environ. Microbiol. 71: 2239-2243.
- Neish, A.C., and A.C. Blackwood. 1951. Dissimilation of glucose by yeast at poised hydrogen ion concentrations. Can. J. Technol. 29:123-129.
- Poonam, N. and S. Dalel. 1995. Enzyme and microbial systems involved in starch processing. Enzyme Microb. Technol. 17:770-778.
- Pretorius, I.S. 2000. Tailoring wine yeast for the new millennium: Novel approaches to the ancient art of winemaking. Yeast 16:675-729.
- Renewable Fuels Association. 2017. Annual Industry Outlook. <http://www.ethanolrfa.org/pages/annual-industry-outlook>
- Sarikaya, E., T. Higassa, M. Adachi, and B. Mikami. 2000. Comparison of degradation abilities of α - and β -amylases on raw starch granules. Proc. Biochem. 35:711-715.
- Saskatchewan Agriculture and Food. 1993. Establishing an Ethanol Business.
- Thomas, K.C., S.H. Hynes, and W.M. Ingledeu. 1996. Practical and theoretical considerations in the production of high concentrations of alcohol by fermentation. Proc. Biochem. 31:321-331.
- Torija, M.J., N. Rozès, M. Poblet, J.M. Guillamón, and A. Mas. 2003. Effects of fermentation temperature on the strain population of *Saccharomyces cerevisiae*. International J. Food Microbiol. 80: 47-53.
- Wingren, A.M., Galbe, and G. Zacchiu. 2003. Techno-Economic Evaluation of Producing Ethanol from Softwood: Comparison of SSF and SHF and Identification of Bottlenecks. Biotechnol. Prog. 19:1109-1117.
- Ziejewski, M., H. Goettler, and G.L. Pratt. 1986a. Comparative analysis of the long-term performance of a diesel engine on vegetable oil-based alterantive fuels. SAE Technical Paper Series, No. 860301. Warrendale, PA.
- Ziejewski, M., H. Goettler, and G.L. Pratt. 1986b. Influence of vegetable oil based alternative fuels on residue deposits and components wear in a diesel engine. SAE Technical Paper Series, No. 860302. Warrendale, PA.

CAPÍTULO 4

Composición química y valor energético del aceite de maíz de destilería para cerdos y aves

Introducción

EL ACEITE DE MAÍZ DE DESTILERÍA (DCO, POR SUS SIGLAS EN INGLÉS) SE USA COMO FUENTE DE ENERGÍA DE ALTA CALIDAD

sobre todo en las dietas de aves y cerdos gracias a su alto contenido de energía metabolizable (EM) y precio relativamente bajo en comparación con otras grasas y aceites para alimentos balanceados. El precio en el mercado del DCO está íntimamente relacionado con el de la grasa amarilla en el mercado de grasas y aceites de EE. UU., pero tiene un contenido de EM sustancialmente mayor que la grasa amarilla y un contenido equiparable con el del aceite de soya. Algunos segmentos de mercado de las industrias avícola y porcina de EE. UU. han decidido producir animales alimentados solo con dietas “de origen vegetal” (que incluye a los aceites vegetales) para cumplir con las exigencias específicas del consumidor como parte de sus estrategias de comercialización. Además, el brote generalizado del virus de la diarrea epidémica porcina en EE. UU. de 2013 hizo que muchos veterinarios y nutricionistas eliminaran los ingredientes derivados de animales (de cerdos) de las dietas porcinas (es decir, grasa blanca de primera, harinas de proteína de subproductos de origen animal), y usar solo ingredientes vegetales (o sea, maíz, harina de soya, granos secos de destilería con solubles [DDGS] y aceite de maíz de destilería) para reducir el riesgo percibido de transmisión del virus y otros patógenos que pudieran estar presentes en los ingredientes hacia las granjas comerciales. Sin embargo, el uso del aceite de maíz de destilería en las dietas porcinas por lo general se limita a las fases de maternidad y las iniciales del crecimiento, porque la administración de altas concentraciones de aceite de maíz reduce la firmeza de la grasa del cerdo. La disminución de la firmeza de la grasa de la canal puede reducir el rendimiento al procesar la panza en tocino y reducir la aceptación de la calidad de la carne de cerdo en el mercado de exportación japonés. No obstante, en EE. UU. se puede usar un aditivo comercial aprobado como GRAS (generalmente reconocido como inocuo) (Lipinate™, Nutriquest, Mason City, IA) como un método efectivo de prevención de la reducción de firmeza de la grasa del cerdo al alimentar tasas altas de inclusión de DDGS o DCO.

Como resultado de las grandes cantidades de producción de DCO, su alto contenido de EM y precio competitivo, la Association of American Feed Control Officials (2017) definió y aprobó una definición oficial para su uso en alimentos balanceados:

“33.10 ____ Aceite de destilería grado alimenticio animal que se obtiene después de eliminar el alcohol etílico por destilación de la fermentación de la levadura de granos o mezcla de granos y extraer el aceite de forma mecánica o con solventes

mediante métodos usados en la industria de la producción del etanol. Consiste predominantemente de ésteres de glicéridos de ácidos grasos y no contiene adiciones de ácidos grasos libres u otros materiales de grasas. Debe contener y estar garantizado con no menos de un 85 por ciento de ácidos grasos totales, no más del 2.5 por ciento de materia insaponificable y no más del uno por ciento de impurezas insolubles. Debe garantizarse un máximo de ácidos grasos libres y humedad. Si se usa un(os) antioxidante(s), debe indicarse el nombre común o normal, seguido de las palabras “usado como conservador”. Si el producto lleva un nombre descriptivo del tipo de origen, es decir “maíz, sorgo, cebada, centeno”, debe de corresponder al mismo con el grano predominante declarado en la primera palabra del nombre”. Propuesto en 2015, adoptado en 2016 rev. 1)

Esta definición adoptada oficialmente en 2016, especifica el análisis garantizado exigido y se aplica también al aceite de maíz extraído con solventes, el cual es un proceso diferente al de centrifugación utilizado en la mayoría de las plantas de etanol de Estados Unidos. Aunque se producen cantidades limitadas de DDGS de maíz desgrasado, se ha propuesto la siguiente definición de este coproducto pendiente de aprobación por la AAFCO:

“T27.9 ____ Granos secos de destilería de maíz desgrasado con solubles, extraído con solventes, es el producto que resulta de la extracción con solventes del aceite de los granos secos de destilería de maíz con solubles (DDGS) para obtener un contenido de grasa cruda menor al tres por ciento con base a como se alimenta. Está destinado a ser fuente de proteína. La etiqueta debe incluir una garantía de proteína cruda mínima y azufre máximo. No es necesario poner las palabras “extraído con solventes” al listarlo como ingrediente en un alimento balanceado. (Propuesto en 2015)

Composición química del aceite de maíz de destilería

Una de las características que distinguen al aceite de maíz de destilería del aceite refinado de maíz es que sus fuentes tienen un mayor contenido de ácidos grasos libres (**cuadro 1**), que varían de menos del 2 hasta el 18 por ciento. Estudios previos que evaluaron los diferentes lípidos del alimento han mostrado que el incremento del contenido de ácidos grasos libres reduce el contenido de EM de cerdos y aves, lo cual llevó al desarrollo de ecuaciones de predicción de ED (en cerdos) y EMA_n (en aves) (Wiseman et al., 1998). El aceite de maíz se distingue de otras fuentes de lípidos por su contenido relativamente alto de ácidos grasos poliinsaturados (PUFA), en especial el oleico

(9c-18:1; 28 a 30 por ciento de los lípidos totales) y linoleico (18:2n-6; 53 a 55 por ciento de los lípidos totales). Los aceites vegetales tienen mayor contenido de PUFA que las grasas animales, lo que resulta que tengan un mayor contenido de EM (Kerr et al., 2015). Como resultado, el DCO contiene una de las mayores concentraciones de EM de todas las grasas y aceites para alimentos balanceados, pero también es más susceptible a la peroxidación (Kerr et al., 2015; Shurson et al., 2015; Hanson et al., 2015). Alimentar con lípidos peroxidados a cerdos y pollos de engorde ha demostrado reducir la tasa de crecimiento, eficiencia del consumo de alimento y ganancia (Hung et al., 2017) y que el aceite de maíz altamente

peroxidado reduce la eficiencia de la utilización de la energía y el estado antioxidante de cerdos lactantes (Hanson et al., 2016). Sin embargo, al añadir antioxidantes comerciales al aceite de maíz de destilería es efectivo en minimizar la peroxidación del DCO cuando se almacenan bajo condiciones de temperatura y humedad altas (Hanson et al., 2015). Aunque el alcance de la peroxidación del DCO (índice de peróxido, índice de anisidina y hexanal) es un poco mayor que en el aceite refinado de maíz, es mucho menos que en el aceite de maíz peroxidado que se administró en una prueba de Hanson et al. (2016) a cerdos lactantes en la que se observaron reducciones del desempeño del crecimiento.

Cuadro 1. Composición química y mediciones de peroxidación de las fuentes de aceite refinado de maíz y aceite de maíz de destilería (DCO) (adaptados de Kerr et al., 2016)

Medición	Aceite refinado de maíz	DCO (4.9% AGL¹)	DCO (12.8% AGL)	DCO (13.9% AGL)
Humedad, %	0.02	1.40	2.19	1.19
Insolubles, %	0.78	0.40	1.08	0.97
Insaponificables, %	0.73	0.11	0.67	0.09
Grasa cruda %	99.68	99.62	98.96	99.63
Ácidos grasos libres, %	0.04	4.9	12.8	13.9
Ácidos grasos, % de la grasa total				
Palmitico (16:0)	11.39	13.20	11.87	13.20
Palmitoleico (9c-16:1)	0.10	0.11	0.11	0.11
Margárico (17:0)	0.07	0.07	0.07	0.07
Esteárico (18:0)	1.83	1.97	1.95	1.97
Oleico (9c-18:1)	29.90	28.26	28.92	28.26
Linoleico (18:2n-6)	54.57	53.11	54.91	53.11
Linolénico (18:3n-3)	0.97	1.32	1.23	1.32
Nonadecanoico (19:0)	ND ¹	0.65	0.65	0.65
Araquídico (20:0)	0.40	0.39	0.39	0.39
Gondoico (20:1n-9)	0.25	0.24	0.24	0.24
Behenoico (22:0)	0.13	0.13	0.12	0.13
Lignocérico (24:0)	0.17	0.19	0.18	0.19
Otros ácidos grasos	0.21	0.41	ND	0.41
Medición de la peroxidación				
Índice de peróxido, MEq/kg	1.9	2.9	3.3	2.0
Índice de anisidina ³	17.6	80.9	70.3	73.3
Hexanal, µg/g	2.3	4.4	3.9	4.9

¹AGL = ácidos grasos libres

²ND = No detectado

³No hay unidades del índice de anisidina

El **cuadro 2** se muestra una comparación de la composición química y los indicadores de peroxidación de dos fuentes de DCO con otros lípidos de alimento comunes (es decir, grasa blanca de primera, aceite de palma y aceite de soya). La grasa blanca de primera (grasa de cerdo reciclada) consiste principalmente de ácido oleico (9c-18:1), ácido palmítico (16:0) y ácido esteárico (18:0) lo que a diferencia del DCO, hace que esta fuente de lípidos se clasifique como una fuente de grasa saturada. En general, las grasas animales saturadas (como la grasa blanca de primera) tienen un menor contenido de EM que muchas fuentes de aceite vegetal más insaturadas (como el aceite de maíz de destilería). Además, la grasa blanca de primera contiene una proporción más grande de ácidos grasos saturados, lo que la hace menos susceptible a la peroxidación de lípidos que el DCO, pero la temperatura y el tiempo de calentamiento durante el proceso de reciclaje puede resultar en una cantidad similar de peroxidación comparada con el DCO (**cuadro 2**). Los ácidos grasos predominantes en el aceite de palma son el ácido palmítico (16:0) y oleico (9c-18:1) y el contenido de ácido linoleico (9.85 por ciento) es mucho menor al del DCO (56 por ciento). Como resultado, el aceite de palma es mucho más resistente a la peroxidación, como lo indica el alto índice de estabilidad oxidativa del aceite (OSI) en comparación con el DCO, la grasa blanca de primera y el aceite de soya (**cuadro 2**). En contraste, el perfil de ácidos grasos del aceite de soya es similar al del DCO, pues contiene concentraciones altas de ácido linoleico (53 por ciento) con concentraciones moderadas de oleico (23 por ciento) y

palmítico (11 por ciento). Sin embargo, a diferencia del DCO, el aceite de soya contiene concentraciones relativamente altas de ácido linoléico (18:3n-3), lo que en teoría lo vuelve más susceptible a la peroxidación que el DCO, porque el linoléico tiene más dobles ligaduras en su estructura química que el ácido linoleico. Sorprendentemente, de acuerdo con las mediciones del índice de anisidina y 2,4 decadienal, la fuente de aceite de soya del **cuadro 2** tuvo un menor contenido aldehído (producto de la peroxidación), en comparación con el DCO, la grasa blanca de primera y el aceite de palma. Otros dos componentes químicos que diferencian al DCO de la grasa blanca de primera, el aceite de palma y el de soya es su contenido de tocoferol total relativamente alto (de 626 a 730 mg/kg) y xantofilas (de 92 a 175 mg/kg) (**cuadro 2**). Solo el aceite de soya tiene un mayor contenido de tocoferol total que el DCO, pero esencialmente carece de xantofilas. Los tocoferoles y carotenoides (xantofilas) son fuertes compuestos antioxidantes que parecen benéficos en la prevención de una peroxidación mayor durante la exposición térmica que se da en los procesos de producción de los coproductos. Además, las concentraciones relativamente altas de estos compuestos en el aceite de maíz presente en los DDGS parecen ser benéficas en minimizar el estrés oxidativo si se alimenta a lechones lactantes con fuentes de este ingrediente altamente peroxidadas (Song et al., 2013). El alto contenido de xantofilas del DCO es una característica de “valor agregado” y un incentivo para su uso en dietas de pollo de engorde y de gallinas ponedoras como sustituto parcial de los pigmentos sintéticos para conseguir la pigmentación deseada en la piel del pollo y la yema del huevo.

Cuadro 2. Composición química y medición de la peroxidación de aceite de maíz de destilería (DCO), grasa blanca de primera (GBP), aceite de palma (AP) y aceite de soya (AS); adaptado de Lindblom et al., 2017

Medición	DCO (4.5% AGL)	DCO (10% AGL ¹)	GBP	AP	AS
Humedad %	0.68	0.54	0.24	0.02	0.02
Insolubles %	0.18	0.04	0.22	0.02	0.02
Insaponificables %	1.53	1.86	0.63	0.21	0.33
Grasa cruda %	98.7	98.2	98.3	98.6	98.5
Ácidos grasos libres %	4.5	10.0	13.4	0.07	0.04
Ácidos grasos % de la grasa total					
Cáprico (10:0)	ND ²	ND	0.07	ND	ND
Laúrico (12:0)	ND	ND	ND	0.22	ND
Mirístico (14:0)	ND	ND	1.28	0.99	ND
Pentadecanoico (15:0)	ND	ND	ND	0.04	ND
Palmítico (16:0)	12.86	12.88	23.25	43.41	10.74
Palmitoleico (9c-16:1)	0.10	0.10	2.44	0.15	0.08
Margárico (17:0)	ND	ND	0.33	0.10	0.09
Esteárico (18:0)	1.76	1.73	12.54	4.38	4.20
Oleico (9c-18:1)	26.95	26.56	41.38	39.90	23.08
Linoleico (18:2n-6)	55.88	56.50	16.52	9.85	53.19
Linoléico (18:3n-3)	1.26	1.26	0.55	0.22	7.28

Cuadro 2. Composición química y medición de la peroxidación de aceite de maíz de destilería (DCO), grasa blanca de primera (GBP), aceite de palma (AP) y aceite de soya (AS); adaptado de Lindblom et al., 2017

Ácidos grasos % de la grasa total	DCO (4.5% AGL)	DCO (10% AGL¹)	GBP	AP	AS
Nonadecanoico (19:0)	0.10	ND	ND	ND	0.31
Araquídico (20:0)	0.39	0.38	0.19	0.37	0.33
Gadoleico (20:1)	0.28	0.25	0.80	0.14	0.20
Eicosadienoico (20:2)	ND	ND	0.74	ND	ND
Homo-y linoleico (20:3)	ND	ND	0.11	ND	ND
Araquidónico (20:4)	ND	ND	0.30	ND	ND
Behenoico (22:0)	0.12	0.14	ND	0.07	0.35
Docosatrinoico (22:3)	ND	ND	0.14	ND	ND
Docosatetraenoico (22:4)	0.12	ND	ND	ND	ND
Docosapentaenoico (22:5)	0.18	0.19	ND	ND	ND
Otros ácidos grasos	ND	ND	ND	0.15	0.16
Glicerina libre %	0.85	0.53	0.58	0.74	0.31
Tocoferoles totales, mg/kg	730	626	253	67	1,083
Alfa	51	62	50	67	77
Beta	15	15	<10	<10	<10
Delta	29	15	<10	<10	<10
Gama	635	534	203	<10	817
Xantofilas, mg/kg	92	175	<1	<1	<1
Medición de la peroxidación					
Índice de peróxido, MEq/kg	1.4	0.4	0.4	1.2	1.6
Índice de anisidina ³	30.76	21.47	23.26	11.22	5.87
2.4-decadienal, mg/kg	26.4	ND	17.6	ND	6.2
Hexanal, µg/g	ND	ND	14.7	ND	ND
OSI ⁴ a 110°C, h	5.15	10.75	4.15	30.05	6.35
Ácidos grasos oxidados %	1.6	0.9	2.2	1.2	1.4
Compuestos polares %	9.38	9.55	20.53	7.40	3.46
Valor de TBA ^{3,5}	0.04	0.03	0.03	0.01	0.06

¹AGL = ácidos grasos libres

³No hay unidades del índice de anisidina o del valor de TBA.

⁴OSI = índice de estabilidad del aceite

⁵TBA = ácido tiobarbitúrico

Contenido de energía digestible y metabolizable real y predicho en las fuentes de aceite de maíz de destilería para cerdos

Se llevaron a cabo dos estudios para determinar el contenido de energía digestible (ED) y metabolizable (EM) del DCO en cerdos. La primera prueba la realizaron Kerr et al. (2016) para determinar el contenido de ED y EM del aceite refinado de maíz (0.04 por ciento de AGL), tres fuentes de DCO producidas comercialmente con contenido de AGL del 4.9 al 13.9 por ciento y una fuente alta (93.8 por ciento) de AGL de aceite de maíz producida artificialmente y para determinar el efecto del contenido de AGL en el contenido de EM de las fuentes de DCO. Como se muestra en el **cuadro 3**, el contenido de EM de las muestras de DCO varió de 8,036 a 8,828 kcal/kg, con la muestra de DCO con un 4.9 por ciento de AGL con un contenido de EM similar al aceite refinado de maíz. Los valores de EM del aceite refinado de maíz (8,741 kcal/kg), DCO con 4.9 por ciento de AGL (8,691 kcal/kg) y DCO con 13.9 por ciento de AGL (8,397 kcal/kg) fueron similares al valor de 8,570 kcal/kg del aceite de maíz notificado en el NRC (2012). Sorprendentemente, el 93.8 por ciento de AGL de la fuente de aceite de maíz tuvo el contenido de EB más bajo, pero el mayor contenido de ED y EM de todas las fuentes de aceite de maíz. No hubo un efecto perjudicial significativo del contenido de AGL en el contenido de ED o EM del DCO, excepto con la fuente de DCO de 12.8 por ciento de AGL que tuvo el menor contenido de EM de todas.

En un estudio posterior, Lindblom et al. (2017) determinaron el contenido de ED y EM de dos fuentes diferentes de DCO (4.5 y 10 por ciento de AGL) y compararon estos valores con fuentes comercialmente disponibles de grasa blanca de primera, aceite de palma y aceite de soya (**cuadro 4**). Los valores de EM obtenidos en ambas muestras de DCO fueron sustancialmente menores (7,921 y 7,955 kcal/kg) a los obtenidos en dos de las tres fuentes de DCO (de 8,397 a 8,691 kcal/kg) evaluadas por Kerr et al. (2016). No está claro por qué entre estos dos estudios hubo una diferencia de contenido de EM en las fuentes de DCO, pero estos resultados brindan un apoyo adicional de que el contenido de AGL del DCO no parece afectar el contenido de EM en cerdos. También fue sorprendente que el contenido de EM de la grasa blanca de primera (8,535 kcal/kg) fuera mayor que el de ambas muestras de DCO y que también fuera mayor que el valor del NRC (2012) de 8,124 kcal/kg. Está bien documentado que las fuentes de lípidos insaturados históricamente tienen mayor contenido de lípidos que las fuentes de grasas saturadas (NRC, 2012). Sin embargo, es probable que el uso generalizado de altas tasas de inclusión de DDGS en la dieta de cerdos en crecimiento-finalización en EE. UU. haya podido resultar en un cambio hacia un mayor contenido de ácidos grasos insaturados en la grasa blanca de primera obtenida de canales de dichos cerdos. Prueba de ello es el mayor contenido de ácido linoleico (16 por ciento) de esta fuente de grasa blanca de primera comparado con el notificado por NRC (2012) de 11.6 por ciento. Además, en esta fuente de grasa blanca de primera hubo una ligera disminución de aceite palmítico (23 por ciento) comparado con el 26 por ciento notificado en el NRC (2012). Es más, el contenido de EM de la

fuentes de aceite de soya evaluado por Lindblom et al. (2017) fue sustancialmente mayor (9,408 kcal/kg) que el valor de 8,574 kcal/kg notificado por NRC (2012). Estos resultados muestran los posibles riesgos de sobrevalorar o infravalorar el contenido de EM de grasas y aceites para alimentos al usar valores estáticos a partir de bases de datos de referencia.

Kerr et al. (2016) evaluaron la precisión del uso de ecuaciones de predicción desarrolladas por Wisemann et al. (1998) en la predicción del contenido de ED de las fuentes de DCO para determinar si dichas ecuaciones ampliamente usadas se podían



aplicar a estas fuentes y brindar estimados de ED más dinámicos y precisos con base en la composición variable de AGL de las fuentes (**cuadro 3**). Las ecuaciones de Wiseman et al. (1998) usan el contenido de AGL, la proporción de ácidos grasos insaturados a saturados y la edad del cerdo como valores para calcular el contenido de ED. Desafortunadamente, los resultados del uso de estas ecuaciones mostraron que se sobrestimó el contenido de ED en el aceite refinado de maíz y en las fuentes de DCO de 12.8 y 13.9 por ciento de AGL, que daban un estimado similar del contenido de ED de la fuente de DCO de 4.9 por ciento AGL, y que infravaloraban mucho (1,146 kcal/kg) el contenido de ED de la fuente de DCO de AGL alto producida experimentalmente. Estos resultados indican que es necesario el desarrollo de nuevas ecuaciones de predicción específicas para el DCO, porque el uso de las ecuaciones de Wiseman et al. (1998) no proporcionan la exactitud y precisión necesarias para calcular el contenido de ED del DCO para cerdos.

Contenido de energía metabolizable real y predicho de las fuentes de aceite de maíz de destilería para pollo de engorde

Solo se ha realizado un estudio para determinar el contenido de EM_n del aceite de maíz de destilería para pollo de engorde. Kerr et al. (2016) determinaron el contenido de EM_n del aceite refinado de maíz (0.04 por ciento de AGL) y de las mismas tres fuentes de DCO producidas comercialmente utilizadas

Cuadro 3. Contenido de ED y EM real y predicha del DCO para lechones lactantes (adaptado de Kerr et al. 2016)

Medición	Aceite refinado de maíz	DCO (4.9% AGL ¹)	DCO (12.8% AGL)	DCO (13.9% AGL)	DCO (93.8% AGL)
EB, kcal/kg	9,423	9,395	9,263	9,374	9,156
ED, kcal/kg	8,814 ^a	8,828 ^a	8,036 ^b	8,465 ^{ab}	8,921 ^a
EM, kcal/kg	8,741 ^a	8,691 ^a	7,976 ^b	8,397 ^{ab}	8,794 ^a
EE ² digestibilidad %	93.2	94.0	91.7	95.0	92.7
AGS:AGI ³	6.13	5.00	5.61	5.00	4.81
ED predicha ⁴ , kcal/kg	8,972	8,848	8,794	8,741	7,775
Diferencia entre ED real y predicha, kcal/kg	-158	-20	-758	-276	+ 1,146

^{a,b}Las medias con diferentes superíndices en las filas son diferentes (P menor que 0.05).

¹AGL = ácidos grasos libres

²EE = extracto etéreo

³AGI = ácidos grasos insaturados, AGS = ácidos grasos saturados

⁴Ecuaciones basadas en cerdos jóvenes (ED) obtenidas de Wiseman et al. (1998).

Cuadro 4. Contenido de energía y digestibilidad del extracto etéreo y (EE) del aceite de maíz de destilería (DCO), grasa blanca de primera (GBP), aceite de palma (AP) y aceite de soya (AS) en lechones lactantes (adaptado de Lindblom et al., 2017)

Medición	DCO (4.5% AGL)	DCO (10% AGL ¹)	GBP	AP	AS
EB, kcal/kg	9,392	9,395	9,365	9,419	9,419
ED, kcal/kg	8,001 ^b	8,052 ^b	8,531 ^b	8,293 ^b	9,388 ^a
EM, kcal/kg	7,921 ^b	7,955 ^b	8,535 ^b	8,350 ^b	9,408 ^a
EE ² digestibilidad %	84.6 ^b	85.6 ^a	85.5 ^a	84.4 ^b	85.1 ^{ab}

^{a,b}Las medias con diferentes superíndices en las filas son diferentes (P menor que 0.05).

¹AGL = ácidos grasos libres

²EE = extracto etéreo

en el experimento de cerdos que variaban de 4.9 a 13.9 por ciento en contenido de AGL y una fuente alta en AGL de aceite de maíz producido artificialmente (93.8 por ciento). Como se muestra en el **cuadro 5**, el contenido de EMA_n no fue diferente entre las fuentes de DCO con una variación de 7,694 A 8,036 kcal/kg y no fueron diferentes al contenido de EMA_n del aceite refinado de maíz (8,072 kcal/kg). Sin embargo, estos valores fueron sustancialmente menores que los de EMA_n del aceite refinado de maíz (de 9,639 a 10,811 kcal/kg) notificados en el NRC (1994). Resulta interesante que a diferencia de la respuesta en cerdos, si se alimenta la fuente de DCO con 93.8 por ciento de AGL resulta en una reducción sustancial de contenido de EMA_n (6,276 kcal/kg) en comparación con el contenido de EMA_n en otras fuentes de aceite de maíz. No está claro por qué el pollo de engorde respondió de forma diferente al cerdo al alimentarlo con esta fuente de aceite de maíz alta en AGL producida experimentalmente, pero estos resultados apoyan informes previos de que el mayor contenido de AGL en las grasas y aceites por lo general reduce el contenido de EMA_n en pollos de engorde.

Similar a la comparación con cerdos, Kerr et al. (2016) evaluaron la precisión de usar las ecuaciones de predicción desarrolladas por Wisemann et al. (1998) para calcular el contenido de EMA_n de las fuentes de DCO en pollos de engorde para determinar si dichas ecuaciones pueden brindar cálculos de EMA_n más precisos y dinámicos con base en la composición variable de AGL en DCO para pollos de engorde (**cuadro 5**). Las ecuaciones de Wiseman et al. (1998) usan el contenido de AGL, la proporción de ácidos grasos insaturados a saturados y la edad del aves que como valores para calcular el contenido de EMA_n de las grasas y aceites en pollos de engorde. Desafortunadamente, estas ecuaciones sobrestimaron el contenido de EMA_n de 379 a 659 kcal/kg de todas las fuentes de aceite de maíz. Estos resultados indican que es necesario el desarrollo de nuevas ecuaciones de predicción de EMA_n específicas para el DCO en pollos de engorde, ya que el uso de las ecuaciones de Wiseman et al. (1998) dieron como resultado la sobreestimación de dicho contenido.

Cuadro 5. Contenido de EMAn real y predicho del DCO para pollos de engorde (adaptado de Kerr et al. 2016)

Medida	Aceite refinado de maíz	DCO (4.9% AGL ¹)	DCO (12.8% AGL)	DCO (13.9% AGL)	DCO (93.8% AGL)
EB, kcal/kg	9,423	9,395	9,263	9,374	9,156
EMA _n ² , kcal/kg	8,072 ^a	7,936 ^a	8,036 ^a	7,694 ^a	6,276 ^b
EE ³ digestibilidad %	91.6 ^a	89.8 ^a	89.0 ^a	88.4 ^a	83.0 ^b
AGS:AGI ⁴	6.13	5.00	5.61	5.00	4.81
EMAn ⁵ predicha, kcal/kg	8,680	8,484	8,415	8,329	6,935
Diferencia entre EMA _n real y predicha, kcal/kg	- 608	- 548	- 379	- 635	- 659

¹AGL = ácidos grasos libres

²EMA_n = EM aparente corregida por nitrógeno

³EE = extracto etéreo

⁴AGI = ácidos grasos insaturados, AGS = ácidos grasos saturados

⁵Ecuaciones basadas en el promedio de pollos de engorde jóvenes y viejos (EM aparente) obtenidas a partir de Wiseman et al. (1998) y ajustadas a la EMA_n de pollo de engorde basadas en López y Leeson (2007, 2008) y King et al. (2013).

Bibliografía

AAFCO. 2017. Association of American Feed Control Officials – Official Publication. Champaign, IL.

Hanson, A.R., P.E. Urriola, L. Wang, L.J. Johnston, C. Chen, and G.C. Shurson. 2016. Dietary peroxidized maize oil affects the growth performance and antioxidant status of nursery pigs. *Anim. Feed Sci. Technol.* 216:251-261.

Hanson, A.R., P.E. Urriola, L.J. Johnston, and G.C. Shurson. 2015. Impact of synthetic antioxidants on lipid peroxidation of distiller's dried grains with solubles and distiller's corn oil under high temperature and humidity conditions. *J. Anim. Sci.* 93:4070-4078.

Hung, Y.T., A.R. Hanson, G.C. Shurson, and P.E. Urriola. 2017. Peroxidized lipids reduce growth performance of poultry and swine: A meta-analysis. *Anim. Feed Sci. Technol.* 231:47-58.

Kerr, B.J., W.A. Dozier III, and G.C. Shurson. 2016. Lipid digestibility and energy content of distillers' corn oil in swine and poultry. *J. Anim. Sci.* 94:2900-2908.

Kerr, B.J., and G.C. Shurson. 2016. Determination of ether extract digestibility and energy content of specialty lipids with different fatty acid and free fatty acid content, the effect of lecithin, for nursery pigs. *The Professional Anim. Scientist* 33:127-134.

Kerr, B.J., T.A. Kellner, and G.C. Shurson. 2015. Characteristics of lipids and their feeding value in swine diets. *J. Anim. Sci. Biotechnol.* 6:30.

King, E.J., F.H. de Witt, H.J. van der merwe, A. Hugo, and M.D. Fair. 2013. The effect of lipid saturation on nutrient

digestibility of layer diets. *S. Afr. J. Anim. Sci.* 43:S131-S134.

Lindblom, S.C., W.A. Dozier III, G.C. Shurson, and B.J. Kerr. 2017. Digestibility of energy and lipids and oxidative stress in nursery pigs fed commercially available lipids. *J. Anim. Sci.* 95:239-247.

Lopez, G., and S. Leeson. 2007. Relevance of nitrogen correction for assessment of metabolizable energy with broilers to forty-nine days of age. *Poult. Sci.* 86:1696-1704.

Lopez, G., and S. Leeson. 2008. Assessment of the nitrogen correction factor in evaluating metabolizable energy of corn and soybean meal in diets for broilers. *Poult. Sci.* 87:298-306.

Shurson, G.C, B.J. Kerr, and A.R. Hanson. 2015. Evaluating the quality of feed fats and oils and their effects on pig growth performance. *J. Anim. Sci. Biotechnol.* 6:10.

Song, R., C. Chen, L. Wang, L.J. Johnston, B.J. Kerr, T.E. Weber, and G.C. Shurson. 2013. High sulfur content in corn dried distillers grains with solubles protects against oxidized lipids by increasing sulfur-containing antioxidants in nursery pigs. *J. Anim. Sci.* 91:2715-2728.

Wiseman, J., J. Powles, and F. Salvador. 1998. Comparison between pigs and poultry in the prediction of dietary energy value of fats. *Anim. Feed Sci. Technol.* 71:1-9.

CAPÍTULO 5

Tecnologías emergentes en la producción de etanol y composición nutritiva de los coproductos resultantes de maíz de alta proteína

Introducción

LA INDUSTRIA DE EE. UU. DEL ETANOL SIGUE EVOLUCIONANDO, en la que las plantas de etanol de molienda en seco se convierten en biorrefinerías, no nada más para mejorar el rendimiento de etanol, sino también para generar un portafolio más diversificado de coproductos del maíz con un valor potencialmente mayor para el mercado nacional y de exportación. Anteriormente, se hicieron varios intentos para implementar tecnologías de fraccionamiento inicial para mejorar el rendimiento del etanol y crear nuevos coproductos, pero estas tecnologías de procesamiento eran difíciles para optimizar la eficiencia del etanol y los coproductos, por lo que ya no se utilizan. Sin embargo, a partir de 2005, la nueva tecnología predominante es la extracción de aceite final del destilado ligero, que hoy la utilizan la mayoría de las plantas de etanol de molienda en seco. En el **capítulo 4** se describen con detalle los procesos, composición química y valor energético del aceite de maíz de destilería.

En la actualidad, gran parte de la atención de las nuevas tecnologías de ingeniería implementadas en algunas de las plantas de etanol de molienda en seco implican: 1) separación de la fibra del maíz para la producción de etanol celulósico, 2) mejores métodos de extracción de aceite de maíz y 3) producción de coproductos de maíz altos en proteína (mayor al 40 por ciento). ICM, Inc. (Colwich, KS; <http://www.icminc.com/>) y Fluid Quip Process Technologies, LLC (Cedar Rapids, IA; fqptech.com) desarrollaron estas nuevas tecnologías. Desde enero de 2018, hay cinco plantas de etanol en EE. UU. que pueden producir DDGS altos en proteína (40 por ciento de proteína) mediante las nuevas tecnologías de procesamiento ICM y dos que producen uno de 50 por ciento de proteína (Still Pro 50 o A+ Pro) con tecnologías de procesamiento Fluid Quip y una planta de etanol de molienda en seco adicional que actualmente está en la instalación de este proceso. El sistema de secado por compresión de Rayeman (Lincolnway Energy, Nevada, IA) (<http://www.rayemanelements.com/>) también produce un coproducto alto en proteína de alta calidad (Purestream 40). Por ende, en la actualidad hay cantidades limitadas de estos coproductos altos en proteína en el mercado de exportaciones.

Breve descripción de las nuevas tecnologías de procesamiento ICM, Inc. (www.icminc.com/products)

ICM, Inc. ha desarrollado cuatro nuevos procesos (**figura 1**) que se pueden añadir a las plantas de etanol de molienda en seco existentes para mejorar el rendimiento del etanol y el de aceite de maíz, además de producir granos secos de destilería altos en proteína (HP-DDG).

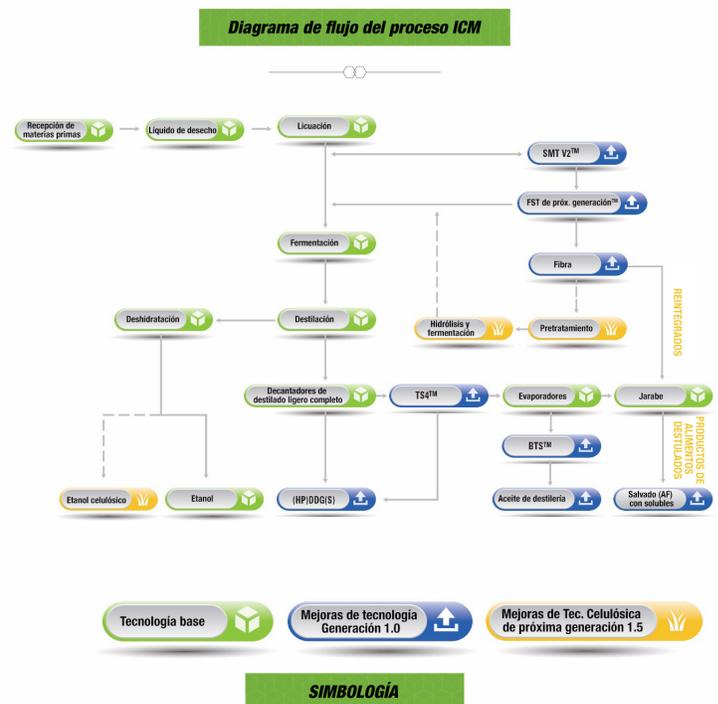


Figura 1. Panorama de ICM Selective Milling Technology (SMT), Fiber Separation Technology (FST), Thin Stillage Separation System (TS4) y Grain Fiber to Cellulosic Ethanol Technology (Gen 1.5) en la producción de etanol y coproductos de las plantas de etanol de molienda en seco

Selective Milling Technology™ (SMT)

Este proceso utiliza equipos de fabricación de molienda patentados de diseño reciente que permiten que las plantas mejoren el rendimiento de extracción de etanol (hasta 3 por ciento) y del aceite de maíz (hasta 25 por ciento) y reducir al mismo tiempo el uso de energía (cerca del 40 por ciento) y mejorar la eficiencia operativa de las plantas de etanol de molienda en seco. La adición de SMT al proceso existente de producción del etanol y coproductos de molienda en seco aumenta la cantidad de almidón disponible para convertir a etanol, mejora la recuperación del aceite y obtiene una mayor proporción de fibra para otras aplicaciones de procesos ICM como Fiber Separation Technology™ (FST) e ICM Generation 1.5. Actualmente, 26 plantas de etanol de todo el mundo usan el proceso SMT.

Fiber Separation Technology™ (FST)

Fiber Separation Technology™(FST) le sigue a SMT y está diseñado para eliminar la fibra antes de la fermentación del almidón de maíz a etanol. Al hacerlo, las plantas de etanol pueden concentrar en el fermentador la cantidad de almidón fermentable e incrementar la capacidad de producción y rendimiento del etanol. Como resultado, las plantas de etanol que instalan tecnología FST logran hasta un 15 por ciento mayor capacidad de producción de etanol, hasta un 30 por ciento más separación de aceite de maíz, reducen el uso de gas natural y son capaces de producir coproductos altos en fibra y proteína (40 por ciento).

Thin Stillage Separation System™ (TS4)

La tecnología TS4 de ICM tienen varias configuraciones de diseño que permite la separación del destilado ligero después de la fermentación en componentes de gran valor como proteína, solubles y aceite de maíz. Este sistema mejora la eficiencia operativa de la planta al aumentar la capacidad del secador y evaporador, mejorar la centrifugación y separación de aceite, aumentar el rendimiento y reducir el consumo de energía y agua.

Generation 1.5 – Grain Fiber to Cellulosic Ethanol Technology™ (Gen 1.5)

Además de usar las tecnologías SMT y FST de ICM, la implementación de Gen 1.5 permite que la planta de etanol produzca de siete a 10 por ciento más de etanol a partir de la fibra del maíz y mejorar hasta un 20 por ciento la extracción de aceite. El sistema permite que la planta sume hasta \$3 más al valor por galón de etanol producido bajo los incentivos actuales de etanol celulósico del gobierno de EE. UU. Además, la fibra de maíz es más fácil de manejar que los residuos voluminosos de la cosecha, lo cual reduce significativamente el costo de capital de producir etanol celulósico. El uso de estas tecnologías de proceso resulta en la producción de DDGS altos en proteína (40 por ciento).

Breve descripción de las nuevas tecnologías de proceso de Fluid Quip, LLC (<http://fqptech.com/technologies.php>)

Fluid Quip LLC ha desarrollado cuatro nuevos procesos (figura 1) que se pueden añadir a las plantas de etanol de molienda en seco ya existentes para mejorar el rendimiento del etanol y el aceite de maíz, y producir granos secos de destilería altos en proteína (HP-DDG).

Selective Grind Technology (SGT)

El sistema SGT implica la separación de líquidos y sólidos para poder moler las partículas de maíz deseadas y al mismo tiempo permitir que otras partículas sobrepasen el molino en la corriente líquida de las plantas de etanol de molienda en seco. Este proceso está diseñado para optimizar el tamaño de partícula para un máximo rendimiento de etanol y aceite de maíz, lo que resulta en incrementos del rendimiento de

etanol (hasta un 3.5 por ciento) y de aceite de maíz, reduce el contenido de almidón en los DDGS y reduce el costo energético de las plantas de etanol de molienda en seco.

Brix Oil Separation (BOS)

El sistema de separación BOS recupera aceite de maíz bajo en ácidos grasos libres (de cinco a siete por ciento) de la parte de licuación del proceso mediante centrifugación. El uso de esta tecnología puede incrementar el rendimiento de aceite de maíz más allá del extraído en el proceso final en las plantas de etanol de molienda en seco.

Maximized Stillage Co-Products™ (MSC)

El proceso MSC de Fluid Quip está diseñado para recuperar la proteína de alto valor y mejorar el rendimiento del aceite de maíz del destilado ligero completo en las plantas de etanol de molienda en seco (figura 2). El uso de este sistema mejora la eficiencia operativa en las plantas y puede ajustarse para producir cantidades variables de Still Pro 50™ (también conocido como A+ Pro) al tiempo que se cumple con las especificaciones de nutrientes típicas del resto de los DDGS del mercado de exportación. Este proceso puede usarse con el Fiber Bypass System de Fluid Quip para separar la fibra antes de la fermentación y para producir también Still Pro 50™.

Wet Fractionation System (WFS)

Fluid Quip brinda varias opciones de tecnología WFS para que las plantas de etanol de molienda en seco mejoren el rendimiento del etanol (hasta 3 por ciento) y de aceite de maíz, produzcan un coproducto con 50 por ciento de proteína y separen la fibra de maíz para producir etanol celulósico.

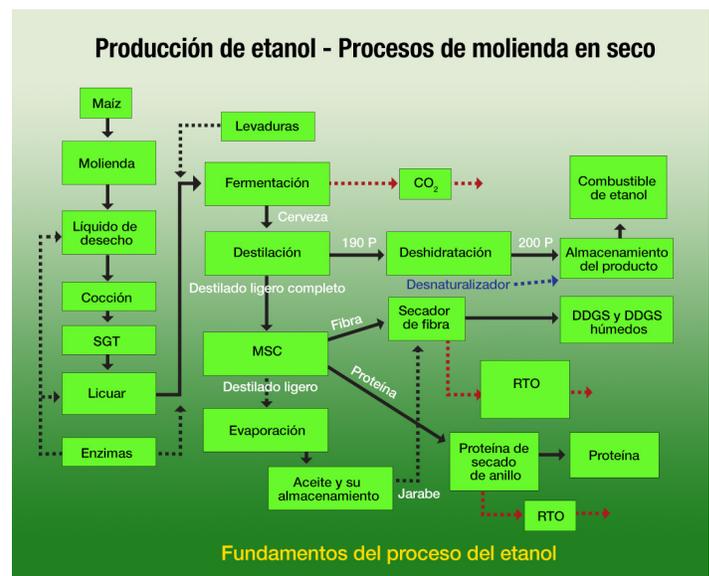


Figura 2. Panorama del proceso utilizado en la separación de proteína del destilado ligero en la producción de A+ Pro (Still Pro 50™)

Breve descripción del sistema de secado por compresión de Rayeman (www.rayemanelements.com)

El secador por compresión de Rayeman es único en comparación con los secadores de tambor giratorios convencionales que se usan en la mayoría de las plantas de etanol. En cuanto los DDGS húmedos entran al secador, dos tornillos calentados con electricidad especialmente diseñados se intercalan uno con otro para crear puntos de compresión designados que comprimen el agua del grano. Mientras esto ocurre, se crea calor a baja temperatura debido al rompimiento y compresión de los granos de los tornillos giratorios, que vaporiza agua contenida en estas en diferentes temperaturas de inflamación en todo el proceso. El uso de este proceso conserva la energía utilizada en el proceso de secado del coproducto, evita que se queme, reduce las emisiones de carbono y presenta un menor costo de capital y de operación comparado con los secadores convencionales.

Composición de nutrientes de los nuevos coproductos de maíz altos en proteína

El punto más importante a recordar cuando se considera la adquisición y uso de cualquiera de los nuevos coproductos de maíz altos en proteína es que la composición nutritiva y valor energético son únicos y varían entre ellos. Además, estos nuevos coproductos se comercializan con nombres particulares para distinguirse entre sí. Por ende, se debe tener cuidado y evitar la generalización de la composición proteínica y nutricional al comparar el valor nutritivo de cada uno de estos coproductos para diversas especies animales.

Hay pocos datos sobre la composición de nutrientes de los nuevos coproductos de maíz altos en proteína que se producen, con excepción de A+ Pro, ya que en las plantas de etanol todavía se están optimizando los procesos que usan estas nuevas tecnologías. Por lo tanto, se recomienda a los compradores de ingredientes que consulten con los productores y comercializadores de tales coproductos para obtener la información nutricional más actual.

Como se muestra en el **cuadro 1**, los granos de destilería altos en proteína (HP-DDG) que se producen con las actuales tecnologías ICM contienen menos proteína cruda, mayor grasa cruda y fósforo, y perfiles de aminoácidos diferentes a los producidos con anterioridad (NRC, 2012). En la actualidad se llevan a cabo estudios en cerdos y pollos de engorde en crecimiento para determinar el contenido de energía metabolizable (EM) de los HP-DDGS de ICM, pero con base en la cifra de los producidos con anterioridad para cerdos, se espera que los nuevos tengan un contenido mayor comparados con los DDGS de contenido medio de aceite (de siete a nueve por ciento de grasa cruda). Es importante reconocer que los resultados de los estudios anteriores que evaluaron el uso de los HP-DDG en las dietas de todas las especies pudieran no aplicarse a los nuevos HP-DDG de ICM debido a las diferentes características nutricionales.

Incluso se sabe menos sobre la composición nutricional del FST Fiber+Syrup porque solo se produjo por poco tiempo en una planta de etanol de maíz en Brasil. Debido a su bajo contenido de proteína cruda (25.8 por ciento) no se le considera un coproducto alto en proteína, pero es comparable su composición nutricional de proteína cruda, grasa cruda, FND y contenido de aminoácidos con algunas de las fuentes de DDGS convencionales. Además, el contenido de fósforo del FST Fiber+Syrup es el más alto (1.34 por ciento) de todos los coproductos del **cuadro 1**, el cual puede brindar ahorros importantes en los costos de las dietas de cerdos y aves (si tiene alta digestibilidad y biodisponibilidad como los DDGS) al reducir la necesidad de suplementación de fósforo inorgánico en dichas dietas. Se llevan a cabo en la actualidad pruebas para determinar la EM, los aminoácidos ileales digestibles estandarizados y el contenido de fósforo total estandarizado en el tubo digestivo o biodisponible de este coproducto en cerdos y pollos de engorde.

Purestream 40 presenta menos proteína cruda (42 por ciento) que HP-DDG y A+ Pro, pero mayor contenido de lisina, metionina, arginina, leucina e isoleucina que los HP-DDG. Además, el contenido de EM recientemente determinado (en cerdos) de Purestream 40 es mayor que el de A+ Pro, los DDGS de contenido medio de aceite y la harina de soya.

De entre todos los nuevos coproductos de maíz, StillPro (también conocido como A+ Pro) ha sido el más investigado, pero la información sigue siendo escasa. Este coproducto cuenta con el mayor contenido de proteína cruda de todos los coproductos altos en proteína, comparable con la harina de soya. Como resultado, el contenido de aminoácidos de A+ Pro es mayor que el encontrado en todos los otros coproductos altos en proteína, pero tiene menos arginina, isoleucina, lisina, fenilalanina y triptofano que la harina de soya. El contenido de EM (en cerdos) de A+ Pro parece ser ligeramente menor que el de los DDGS de contenido medio de aceite, pero cerca de 100 kcal/kg mayor que el de la harina de soya. El contenido de fósforo de A+ Pro es comparable al de Purestream 40 y mayor que el de los DDGS, la harina de soya y HP-DDG.

Todos estos nuevos coproductos de maíz son bajos en calcio y sodio, pero tienen un contenido de fósforo relativamente alto en comparación con otros granos y la harina de soya. El contenido de azufre de HP-DDG y A+ Pro es mayor que el de los DDGS convencionales, el cual puede ser un factor limitante de uso de tasas altas de inclusión (mayores al 20 por ciento) de estos coproductos en dietas de rumiantes.

Aunque todos los nuevos coproductos de maíz se pueden usar en las dietas de todas las especies animales como excelente fuente de energía, aminoácidos digestibles y fósforo digestible, el contenido relativamente alto de leucina, isoleucina y valina en los DDGS y los coproductos altos en proteína puede limitar las tasas de inclusión en dietas de cerdos, aves y peces si se utilizan altas cantidades de lisina, treonina y triptofano sintéticos para reducir la cantidad de harina de soya. El exceso de leucina relativa a lisina interfiere con el uso de isoleucina y valina, y puede reducir el consumo del alimento y la tasa de crecimiento

en cerdos. Se desconoce si estos efectos suceden en aves y varias especies de peces. Actualmente se llevan a cabo estudios de investigación para determinar si la suplementación

de dietas con coproductos de maíz altos en proteína con isoleucina y valina sintéticas son eficaces si se añaden en tasas altas de inclusión en la dieta (mayores al 30 por ciento).

Cuadro 1. Composición nutricional de los nuevos coproductos de maíz altos en proteína (con base en materia seca)

base en materia seca	HP-DDG (ICM)¹	HP-DDG (NRC, 2012)	FST Fiber+Syrup (ICM)²	Purestream 40³	Still Pro A+ Pro⁴	DDGS cont. medio aceite (NRC, 2012)	Harina de soya (NRC, 2012)
Humedad %	8.8	8.8	10	10.7	6.8	10.7	10
Proteína cruda, %	44.2	49.7	25.8	42.1	53.4	30.6	53
Grasa cruda %	8.6	3.9	7.8	9.4	5.8	10	1.69
FND %	36	36.9	32.9	34.8	39.5	34.1	9.1
FAD %	17.5	22.6	9.3	15.8	20	13.5	5.9
EM6, kcal/kg	ND5	4,092	ND	4,275	3,766	3,801	3,660
Arg7 %	1.80 (72-79)	1.78 (85)	1.29	2.10 (87)	2.41 (81)	1.38 (81)	3.83 (94)
Cys, %	1.02 (69-74)	0.90 (78)	0.72	0.91 (75)	1.75 (73)	0.49 (73)	0.78 (84)
His %	1.16 (66-72)	1.17 (79)	0.60	1.15 (82)	1.44 (80)	0.83 (78)	1.42 (90)
Ile %	1.52 (68-75)	2.01 (80)	0.57	1.62 (82)	2.12 (75)	1.19 (76)	2.38 (89)
Ile:Lys	1.13	1.50	0.66	1.05	0.98	1.18	0.72
Leu %	4.95 (81-84)	6.78 (86)	1.27	5.14 (89)	6.68 (85)	3.64 (84)	4.02 (88)
Leu:Lys	3.69	5.06	1.46	3.36	3.08	3.60	1.22
Lys, %	1.34 (47-56)	1.34 (69)	0.87	1.53 (76)	2.17 (61)	1.01 (61)	3.29 (89)
Met, %	0.80 (79-83)	1.02 (86)	0.53	0.88 (87)	0.95 (84)	0.64 (82)	0.73 (90)
Phe %	2.29 (77-80)	2.65 (84)	0.63	2.32 (86)	2.67 (81)	1.53 (81)	2.67 (88)
Thr %	1.90 (60-67)	1.74 (75)	0.80	1.66 (75)	2.57 (70)	1.11 (71)	2.07 (85)
Trp %	0.38	0.26 (82)	0.30	0.31 (80)	0.40 (81)	0.22 (71)	0.73 (91)
Val %	2.19 (69-75)	2.32 (78)	0.93	2.15 (81)	2.73 (74)	1.56 (75)	2.48 (87)
Val:Lys	1.63	1.73	1.07	1.40	1.26	1.54	0.75
Cenizas %	3	2.6	7.3	2.8	3.9	4.5	7
Ca %	0.01	0.02	0.08	0.03	0.03	0.09	0.37
P %	0.80	0.39	1.34	0.91	1	0.67	0.79
S %	0.86	0.82	0.66	0.48	0.51	0.54	0.44
Na %	0.07	0.07	0.54	0.12	0.06	0.34	0.09

¹Datos de las fuentes de HP-DDG usados en estudios recientes de alimentación porcina llevados a cabo en la Universidad de Minnesota. Los valores en paréntesis son digestibilidades ileales estandarizadas (en cerdos) determinadas por Rho et al. (2017).

²Datos de FS Bioenergía (Brasil)

³Datos del Purestream 40 usado en un estudio reciente de alimentación llevado a cabo en la Universidad de Minnesota

⁴Datos de la United Wisconsin Grain Processors y CHS, Inc. sobre A+ Pro

Resumen de los estudios que evalúan el desempeño animal al alimentar HP-DDG producidos mediante fraccionamiento inicial

Se han llevado a cabo varios estudios para determinar el valor nutricional y el desempeño del crecimiento al alimentar con HP-DDG producidos mediante procesos de fraccionamiento inicial (**cuadro 2**). La mayoría de los estudios se llevaron a cabo en cerdos y ganado lechero, aunque se hicieron unos pocos en acuicultura (trucha arco iris), pollos de engorde y gallinas ponedoras, y no se ha publicado ninguno en ganado de engorde. La único estudio relevante a los HP-DDG producidos con los procesos actuales ICM es de Rho et al. (2017). Debido a la diferencia de energía y composición de nutrientes del nuevo HP-DDG de ICM comparado con los coproductos producidos con anterioridad mediante el fraccionamiento inicial, se debe tener cuidado al evaluar la respuesta animal de estos estudios previamente publicados.

Resumen de estudios que evalúan el valor nutricional de A+ Pro (StillPro 50™)

Una de las características únicas de A+ Pro es que contiene una cantidad considerable de levadura de desecho en comparación con HP-DDG, Purestream 40 y los DDGS. Los cálculos preliminares indican que A+ Pro contiene 29 por ciento levadura de desecho en comparación con el 10 por ciento de los DDGS. Por ende, la levadura aporta una cantidad importante de proteína y aminoácidos a este coproducto,

junto con los compuestos benéficos derivados de las paredes celulares de las levaduras (mananos, β -glucanos y nucleótidos) los cuales han demostrado tener efectos benéficos sobre la salud de varias especies de animales para consumo humano (Shurson, 2017). El contenido de mananos de A+Pro es de casi tres por ciento y el de β -glucanos es entre el 8.8 y 8.4 por ciento (Shurson, 2017). Por lo tanto, además de servir como una fuente de energía, aminoácidos digestibles y fósforo de alta calidad también brinda beneficios a la salud animal. Los datos preliminares de la digestibilidad de aminoácidos (en cerdos y aves) y proteína (rumiantes) de A+ Pro se muestran en los **cuadros 3 y 4**. Véase el **cuadro 1** para el contenido de aminoácidos y concentración de otros nutrientes importantes de A+ Pro. No se han llevado a cabo pruebas de alimentación para evaluar el desempeño del crecimiento de cerdos, aves y rumiantes alimentados con A+ Pro.

Conclusiones

Ya hay a disposición varios nuevos coproductos altos en proteína para usarse en el mercado nacional y de exportación. Los datos preliminares indican que aunque el contenido de proteína y aminoácidos de estos coproductos es sustancialmente mayor en comparación con los DDGS convencionales, la digestibilidad de aminoácidos y el contenido de energía metabolizable varía entre ellos. Se deben llevar a cabo investigaciones para determinar las tasas máximas de inclusión en la dieta y los beneficios en el desempeño de alimentar estos coproductos a cerdos, aves, peces y rumiantes.

Cuadro 2. Resumen de los estudios publicados sobre el valor nutricional y del desempeño animal de la alimentación de dietas con HP-DDG producidos mediante procesos de fraccionamiento inicial

Especie	Referencia
Acuicultura	Overland et al. (2013)
Ganado de engorde	Ninguna
Ganado lechero	Kelzer et al. (2007); Mjoun et al. (2009); Christen et al. (2010); Maxin et al. (2013a, b); Swanepoel et al. (2014)
Pollos de engorde	Batal (2007); Kim et al. (2008); Applegate et al. (2009); Rochelle et al. (2011);
Gallinas de postura	Batal (2007); Kim et al. (2008); Tangendjaja and Wina (2011)
Cerdos	Widry matterer et al. (2007); Widry matterer et al. (2008); Gutierrez et al. (2009a,b); Anderson et al. (2012) comenta Kim et al. (2009); Jacela et al. (2010); Seabolt et al. (2010); a and Ragland (2012); Petersen et al. (2014); Rojo et al. (2016); Rho et al. (2017)

Cuadro 3. Energía metabolizable y digestibilidad de aminoácidos de A+ Pro para cerdos y aves

Componente nutricional	Cerdos	Aves
EM, kcal/kg (base materia seca)	3,766	3,542 (EMVn)
Digestibilidad ileal estandarizada (cerdos) o digestibilidad ileal verdadera (aves) de aminoácidos %		
Arginina	81	94
Histidina	80	90
Isoleucina	75	90
Leucina	85	94
Lisina	61	81
Metionina + cistina	79	88
Fenilalanina	81	92
Treonina	70	87
Triptofano	81	90
Valina	74	88

¹Los datos se obtuvieron de experimentos sin publicar de la Universidad de Illinois.

Cuadro 4. Digestibilidad ruminal e intestinal de la proteína en A+ Pro

Medición	Por ciento con base como se alimentó
Proteínas solubles	28.7
Proteína degradable en el rumen	26.1
Proteína no degradable en el rumen	73.9
Proteína digestible en el intestino	63.8
Proteína intestinal digerida como porcentaje de la proteína no degradable	86.4
Proteína digerida total del tracto intestinal	89.9
Proteína intestinal sin digerir	10.1

Bibliografía

Adeola, O., and D. Ragland. 2012. Ileal digestibility of amino acids in coproducts of corn processing into ethanol for pigs. *J. Anim. Sci.* 90:86-88.

Anderson, P.V., B. J. Kerr, T. E. Weber, C. Z. Ziemer, and G. C. Shurson. 2012. Determination and prediction of energy from chemical analysis of corn co-products fed to finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 90:1242-1254.

Applegate, T.J., C. Troche, Z. Jiang, and T. Johnson. 2009. The nutritional value of high-protein corn distillers dried grains for broiler chickens and its effect on nutrient excretion. *Poult. Sci.* 88:354-359.

Batal, A. 2007. Nutrient digestibility of high protein corn distillers dried grains with solubles, dehydrated corn germ and bran. 2007 ADSA/ASAS/AMPA/PSA Joint Ann. Mtg., San Antonio, TX. July 8-12. Abstract M206.

Christen, K.A., D.J. Schingoethe, K.F. Kalscheur, A.R. Hippen,

K.K. Karges, and M.L. Gibson. 2010. Response of lactating dairy cows to high protein distillers grains or three other protein supplements. *J. Dairy Sci.* 93:2095-2104.

Gutierrez, N.A., D.Y. Kil, and H.H. Stein, 2009a. Net energy of distillers dried grains with solubles and high protein distillers dried grains fed to growing and finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 87(Suppl. 2):

Gutierrez, N.A., D.Y. Kil, B.G. Kim, and H.H. Stein. 2009b. Effects of distillers dried grains with solubles and high protein distillers dried grains on growth performance and organ weights of growing and finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 87 (Suppl. 3):

Jacela, J.Y., H.L. Frobose, J.M. DeRouche, M.D. Tokach, S.S. Dritz, R.D. Goodband, and J.L. Nelssen. 2010. Amino acid digestibility and energy concentration of high-protein corn dried distillers grains and high-protein sorghum dried distillers grains with solubles for swine. *J. Anim. Sci.* 88:3617-3623.

- Kelzer, J.M., P.J. Kononoff, K. Karges, and M.L. Gibson. 2007. Evaluation of protein fractionation and ruminal and intestinal digestibility of corn milling co-products. Dakota Gold Research Association. <http://www.dakotagold.org/research/dairy.asp> downloaded June 24, 2008.
- Kim, B.G., G.I. Petersen, R.B. Hinson, G.L. Allee, and H.H. Stein. 2009. Amino acid digestibility and energy concentration in a novel source of high-protein distillers dried grains and their effects on growth performance of pigs. *J. Anim. Sci.* 87:4013-4021.
- Kim, E.J., C. Martinez Amezcua, P.L. Utterback, and C.M. Parsons. 2008. Phosphorus bioavailability, true metabolizable energy and amino acid digestibilities of high protein corn distillers dried grains and dehydrated corn germ. *Poult. Sci.* 87:700-705.
- Maxin, G., D.R. Ouellet, and H. Lapierre. 2013. Ruminal degradability of dry matter, crude protein, amino acids in soybean meal, canola meal, corn and wheat dried distillers grains. *J. Dairy Sci.* 96:5151-5160.
- Maxin, G., D.R. Ouellet, and H. Lapierre. 2013. Effect of substitution of soybean meal by canola meal or distillers grains in dairy rations on amino acid and glucose availability. *J. Dairy Sci.* 96:7806-7817.
- Mjoun, K., K. F. Kalscheur, A. R. Hippen, and D. J. Schingoethe. 2009. In situ ruminal degradability and intestinal digestibility of protein in soybean and dried distillers grains with solubles products. *J. Anim. Sci.* 87(E-Suppl. 2): 84.
- Overland, M., A. Krogdahl, G. Shurson, A. Skrede, and V. Denstadli. 2013. Evaluation of distiller's dried grains with solubles (DDGS) and high protein distiller's dried grains (HPDDG) in diets for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquacult.* 416-417:201-208.
- Petersen, G.I., Y.Liu, and H.H. Stein. 2014. Coefficient of standardized ileal digestibility of amino acids in corn, soybean meal, corn gluten meal, high-protein distillers dried grains and field peas fed to weanling pigs. *Anim. Feed Sci. Technol.* 188:145-149.
- Rochelle, S.J., B.J. Kerr, and W.A. Dozier III. 2011. Energy determination of corn co-products fed to broiler chicks from 15 to 24 days of age, and use of composition analysis to predict nitrogen-corrected apparent metabolizable energy. *Poult. Sci.* 90:1999-2007.
- Rho, Y., C. Zhu, E. Kiarie, and C.F.M. de Lange. 2017. Standardized ileal digestible amino acids and digestible energy contents in high-protein distiller's dried grains with solubles fed to growing pigs. *J. Anim. Sci.* 2017.95 doi:10.2527/jas2017.1553
- Rojo, A., M. Ellis, E.B. Gaspar, A.M. Gaines, B.A. Peterson, F.K. McKeith, and J. Killefer. 2016. Effects of dietary inclusion level of distillers dried grains with solubles (DDGS) and high-protein distillers dried grains (HP-DDG) on the growth performance and carcass characteristics of wean-to-finish pigs. *J. Anim. Sci* abstract doi: 10.2527/msasas2016-187 p. 88
- Seabolt, B.S., E. van Heugten, S.W. Kim, K.D. Ang-van Heugten, and E. Roura. 2010. Feed preferences and performance of nursery pigs fed diets containing various inclusion amounts and qualities of distillers coproducts and flavor. *J. Anim. Sci.* 88:3725-3738.
- Shurson, G.C. 2017. Review: Yeast and yeast derivatives in feed additives and ingredients: Sources, characteristics, animal responses and quantification methods. *Anim. Feed Sci. Technol.* (in press).
- Swanepoel, N., P.H. Robinson, and L.J. Erasmus. 2014. Determining the optimal ratio of canola meal and high protein dried distillers grain protein in diets of high producing Holstein dairy cows. *Anim. Feed Sci. Technol.* 189:41-53.
- Tangendjaja, B., and E. Wina. 2011. Feeding value of low and high protein dried distillers grains and corn gluten meal for layer. *Media Peternakan* p. 133-139. <http://medpet.jouranl.ipb.ac.id/> Doi: 10.5398/medpet.2011.34.2.133
- Widry matterer, M.R., L.M. McGinnis, and H.H. Stein. 2007. Energy, phosphorus and amino acid digestibility of high-protein distillers dried grains and corn germ fed to growing pigs. *J. Anim. Sci.* 85:2994-3003.
- Widry matterer, L.M. McGinnis, D.M. Wulf, and H.H. Stein. 2008. Effects of feeding distillers dried grains with solubles, high protein distillers dried grains and corn germ to growing-finishing pigs on pig performance, carcass quality and the palatability of pork. *J. Anim. Sci.* 86:1819-1831.

CAPÍTULO 6

Composición de nutrientes y variabilidad de las fuentes de DDGS de maíz reducido en aceite

Introducción

UNO DE LOS FACTORES MÁS IMPORTANTES PARA LOGRAR UNA NUTRICIÓN ANIMAL DE PRECISIÓN es determinar de manera exacta la energía, contenido de nutrientes y la digestibilidad de los ingredientes a alimentar. El valor nutricional exacto de los ingredientes minimiza el riesgo de sobre o subalimentar energía y nutrientes con respecto a los requerimientos del animal. Estos valores también son esenciales para captar el mayor valor económico de los ingredientes al minimizar los “márgenes de seguridad” que frecuentemente se asignan a las cantidades de nutrientes objetivo en la formulación de las dietas para animales. Además, si los nutricionistas confían en los valores de energía y nutrientes digestibles de las fuentes de ingredientes que usan en formulación, están en una mejor posición para incrementar las tasas de inclusión de ingredientes competitivos en cuanto a costo, como los DDGS, para ahorrar más en el costo.

En todos los ingredientes hay variaciones en el contenido de nutrientes. Una de las principales quejas entre los compradores de DDGS y nutricionistas, es que el contenido de nutrientes es demasiado variable en comparación con otros ingredientes más comunes. Aunque está muy bien documentado que la

energía y el contenido y digestibilidad de nutrientes varía entre las fuentes de DDGS, en particular ahora que la industria del etanol de EE. UU. extrae parcialmente el aceite antes de fabricarlos, no varía más que el contenido de nutrientes de otros ingredientes. De hecho, en un reciente estudio sobre el análisis de ingredientes realizado por Tahir et al. (2012), el coeficiente de variación (CV) de la proteína cruda fue menor entre muestras de DDGS (5.4 por ciento) que entre las de maíz (8.7 por ciento) y las de trigo (19.1 por ciento; **cuadro 1**). Además, los DDGS tienen la menor variabilidad de FND y contenido de fósforo comparado con el maíz, harina de soya, trigo y harina de canola. Sin embargo, como era de esperarse, la variabilidad en el contenido de grasa cruda entre fuentes de DDGS fue mayor entre estos ingredientes, porque la mayoría de las plantas de etanol de EE. UU. extraen parcialmente cantidades variables de aceite de maíz antes de su fabricación. No obstante, esta alta variabilidad de contenido de grasa cruda es parcialmente atribuible al promedio mucho mayor de contenido de grasa cruda de los DDGS (11.6 por ciento), en comparación al de otros ingredientes (de 0.8 a 3.2 por ciento) usados en esta comparación.

Cuadro 1. Comparación del contenido de nutrientes y variabilidad de los ingredientes comunes usados en dietas avícolas y con los valores del NRC de aves (1994) (base materia seca; adaptado de Tahir et al., 2012)

Variable	Maíz	Harina de soya	DDGS	Trigo	Harina de canola
No. de muestras	133	114	89	22	21
Proteína cruda %	7.8	52.5	29.1	12.7	41.4
CV %	8.7	3.0	5.4	19.1	2.9
porcentaje del NRC	82	97	99	98	101
Grasa cruda %	2.9	0.8	11.6	1.2	3.2
CV %	23.9	82.1	11.2	55	27.6
porcentaje del NRC	69	72	119	43	79
FND %	11	16.8	42.4	13.4	35.8
CV %	18.3	22.9	9	16.4	11
Fósforo %	0.32	0.84	0.96	0.42	0.58
CV %	28.7	7.2	6.5	15	43
porcentaje del NRC	103	121	124	121	80
Fósforo fítico %	0.19	0.40	0.26	0.25	0.70
CV %	13.4	5.6	27.2	13.9	4.7
porcentaje del NRC	83	162	72	-	74
Geniza %	1.2	6.8	4.8	1.8	7.9
CV %	10.9	4.6	13.9	14.9	9.0

Otro punto clave de esta comparación de Tahir et al. (2012), es que la composición de nutrientes de los ingredientes cambia con el tiempo y que el basarse en valores “estáticos” de libro de bases de datos antiguas publicadas lleve a la sobre o subestimación del contenido de nutrientes real de los ingredientes usados normalmente. Esto es aún más crítico en los DDGS, porque conforme las plantas de etanol adoptan nuevos procesos para mejorar el rendimiento del etanol, extraer más aceite de maíz y mejorar el contenido de proteína y aminoácidos va cambiando la composición de nutrientes. Por lo tanto, este capítulo proporciona un resumen de los datos de composición de nutrientes más actualizados de DDGS y se recomienda encarecidamente que los nutricionistas se basen en estos datos para evaluar el valor y formular dietas con ellos.

Para controlar la variación de las fuentes, algunos fabricantes de alimentos comerciales han identificado aquéllas que cumplen con sus especificaciones nutricionales y estándares de calidad, y trabajan directamente con comercializadores que tienen la capacidad de proveer DDGS de identidad preservada. Algunas empresas de alimento comercial también usan una lista de proveedores preferenciales que ayuda a minimizar las variaciones en la compras de DDGS de terceros. Tal vez la mejor estrategia es usar las ecuaciones de predicción de EM y aminoácidos digeribles recientemente desarrolladas y validadas, basadas en la composición química de las fuentes de DDGS, para calcular con precisión su valor nutritivo real (para más detalles sobre las ecuaciones de predicción para cerdos y aves véanse los **capítulos 19 y 20** de este manual).

Contenido de nutrientes y variabilidad de las fuentes de DDGS de maíz de EE. UU.

En el transcurso de diferentes períodos se han compilado grupos de datos de la composición de nutrientes de los DDGS de maíz de varios estudios (Olukosi y Adebisi, 2013; Pedersen et al., 2014; Stein et al., 2016, Zeng et al., 2017). Sin embargo, debe tenerse cuidado al identificar bases de datos para usar en formulación de alimentos, porque la extracción parcial de aceite en la industria de etanol estadounidense empezó alrededor de 2005 y en la actualidad se usa ampliamente, lo que ha resultado en una alta proporción de fuentes de DDGS que contienen entre cinco y nueve por ciento de grasa cruda. Una reducción del contenido de aceite no solo incrementa la variabilidad de contenido de grasa cruda entre las fuentes, sino que cambia también el perfil de otros nutrientes. Sin embargo, aunque muchos nutricionistas y compradores de DDGS suponen que el contenido de proteína cruda y de aminoácidos aumenta si disminuye el de grasa cruda, no siempre es así. A menudo al reducirse el contenido de grasa cruda de los DDGS, hay un incremento desproporcionado de todos los otros componentes químicos. Antes de realizar estudios sobre los cambios de contenido de energía y nutrientes en DDGS reducidos de

aceite, el comité del NRC de cerdos (2012) dio por sentado que a menor contenido de grasa cruda se reduciría el contenido de energía digestible (ED), metabolizable (EM) y neta (EN) para cerdos e incrementaría la concentración de otros nutrientes. Varios estudios de investigación subsiguientes han demostrado claramente que el contenido de grasa cruda por sí solo es un indicador deficiente del contenido de ED, EM y EN en cerdos (Kerr et al., 2013; 2015) y aves (Meloche et al., 2013). Para más información a fondo, véase los **capítulos 19 y 20** del manual. Como resultado, el NRC (2012) proporciona estimados de energía y de los perfiles de nutrientes de los DDGS clasificados con base en el contenido de grasa cruda. Desafortunadamente, había pocos datos sobre el contenido de EM y los perfiles de nutrientes de las fuentes de DDGS de contenido medio de aceite (n menor a 13 del 6 al 9 por ciento de grasa cruda) y de contenido bajo de aceite (n menor a 2 de menos del 4 por ciento de grasa cruda). Por lo tanto, estos valores publicados no reflejan con precisión la variación en el contenido de nutrientes de la mayoría de las fuentes de DDGS reducidos en aceite (de 5 a 9 por ciento de grasa cruda) disponibles en la actualidad en las plantas de etanol de EE. UU.

Igual que con el NRC (2012), una reseña reciente publicada por Stein et al. (2016) proporcionó perfiles de nutrientes de DDGS de maíz con menos del 4 por ciento de aceite (n menor a 3), de 5 a 9 por ciento de aceite (n menor a 15) y mayor a 9 por ciento de aceite (n menor a 100), pero este resumen se basa también en un número limitado de muestras de fuentes que contenían menos del 10 por ciento de grasa cruda. Debido a la baja relación entre el contenido de grasa cruda de las fuentes de DDGS y el de EM para cerdos y aves, se desarrollaron y validaron ecuaciones de predicción (véanse los **capítulos 19 y 22**). Se recomienda ampliamente que los nutricionistas usen estas ecuaciones de predicción de EM para determinar con más precisión los estimados dinámicos del contenido real de energía de las fuentes de DDGS con contenido variable de grasa cruda.

Olukosi y Adebisi (2013) publicaron otra serie de datos de la composición de nutrientes de los DDGS de maíz que incluye 44 juegos de datos publicados entre 2004 y 2011 que representan 463 muestras de este coproducto (**véase cuadro 2**). La mayoría de estas muestras, pero no todas, se produjeron en EE. UU. y debido a que casi todas fueron obtenidas entre 1997 y 2010, no representan de forma adecuada la composición de los DDGS de maíz reducido de aceite que se producen hoy en día. Sin embargo, su análisis es de ayuda para calcular la variabilidad en la composición de nutrientes entre las fuentes de DDGS a lo largo del tiempo, así como para desarrollar ecuaciones de predicción para calcular el contenido de aminoácidos a partir del contenido de proteína cruda. Desafortunadamente, la precisión de estas ecuaciones de predicción no es la adecuada para el uso práctico.

Cuadro 2. Variación en la composición química de las fuentes de DDGS de maíz de 1997 a 2010 (adaptado de Olukosi y Adebisi, 2013)

Analito	Promedio	Mínimo	Máximo	Desv. est.	CV %
Proteína cruda %	27.9	23.3	34.7	2.4	8.5
Fibra cruda %	7.4	6.2	11.3	1.1	15.1
FND %	36.6	27.7	51	5.8	15.7
FAD %	13.6	8.6	18.5	3.3	24.2
Extracto etéreo %	10.8	3.2	17.7	2.4	22
Ceniza %	4.5	3.1	5.9	0.6	13.6
Calcio %	0.04	0.02	0.08	0.02	53.5
Fósforo %	0.80	0.69	0.98	0.07	8.8

Pedersen et al. (2014) recolectaron y usaron la espectroscopia de reflectancia de infrarrojo cercano (NIRS) para analizar 72 muestras de DDGS de maíz de 21 plantas de etanol diferentes de EE. UU. La mayor variación (CV%) de composición entre las fuentes fue del almidón (45 por ciento), azúcares totales (19 por ciento), extracto etéreo (grasa cruda; 17 por ciento) y extracto etéreo hidrolizado con ácido (13 por ciento) que excedieron la variabilidad de contenido de proteína cruda, FND y FAD (**cuadro 3**). Estos investigadores reportaron también la desviación estándar entre las fuentes de DDGS de cada componente nutricional, lo cual es útil para establecer los intervalos de confianza de la variación esperada de los perfiles de nutrientes.

POET es uno de los principales productores de etanol y de DDGS de EE. UU., empresa que es dueña y maneja 27 plantas de etanol. En comparación con otras fuentes de DDGS, las plantas de etanol de POET los producen con el menor contenido de aceite (5.4 por ciento de grasa cruda) del mercado. En un estudio reciente sobre la composición y variabilidad de nutrientes entre las plantas de etanol de POET de 2014 a 2016 (Herrick y Breitling, 2016), la composición de

nutrientes de los DDGS (base en materia seca) de estas plantas fue: 89.2 ± 1.13 por ciento de materia seca, 30.7 ± 1.57 por ciento de proteína cruda, 5.36 ± 0.96 por ciento de grasa cruda, 8.31 ± 0.82 por ciento de fibra cruda, 27.8 ± 3.27 por ciento de FND, 10.6 ± 1.76 por ciento de FAD y 0.92 ± 0.13 por ciento de azufre.

Factores que contribuyen a la variabilidad de contenido de nutrientes de las fuentes de DDGS de maíz de EE. UU.

Muchos factores contribuyen a la variabilidad del contenido de nutrientes de los DDGS además de la extracción parcial de aceite. Olentine (1986) listó una serie de variables en las materias primas y factores de procesamiento que contribuyen a la variación en la composición de nutrientes de los subproductos de destilería (**cuadro 4**). Gran parte de la variación en el contenido de nutrientes de DDGS de maíz probablemente se deba a la variación normal entre las variedades y las ubicaciones geográficas en donde se cultiva.

Cuadro 3. Variación en la composición de las fuentes de DDGS de maíz con base en la espectroscopia de reflectancia de infrarrojo cercano (base materia seca; adaptado de Pedersen et al., 2014)

Analito	Promedio	Intervalo	Desv. est.	CV %
Humedad %	8.7	6.5 - 12.4	0.8	10
Proteína cruda %	31.4	27.1 - 36.4	2.1	7
Fibra cruda %	7.7	6.4 - 9.5	0.6	7
FND %	35.1	30.2 - 39.7	2.4	7
FAD %	10.1	8.9 - 11.9	0.6	6
Almidón %	6	2.9 - 13.9	2.7	45
Azúcares totales %	9	5.4 - 12.6	1.7	19
Extracto etéreo %	9.1	6.5 - 11.8	1.5	17
Extracto etéreo hidrolizado con ácido %	11.1	8.4 - 13.5	1.4	13
Ceniza %	7.1	5.4 - 9	0.7	9

Cuadro 4. Factores que influyen en la composición de nutrientes de los coproductos de destilería (adaptado de Olentine, 1986)

Materias primas

Tipos de granos
 Variedad de granos
 Calidad de granos
 Condiciones de la tierra
 Fertilizante
 Clima
 Métodos de producción y cosecha
 Formula del grano

Factores de procesamiento

Procedimiento de molienda
 Fineza
 Duración
 Cocción
 Cantidad de agua
 Cantidad de premalta
 Temperatura y tiempo
 Fermentación continua o por lotes
 Tiempo de enfriamiento
 Conversión
 Tipo, cantidad y calidad de malta
 Amilasa fúngica
 Tiempo y temperatura
 Dilución de granos convertidos
 Volumen y galones por bushel o embarque de granos
 Calidad y cantidad de productos de granos
 Fermentación
 Calidad y cantidad de levadura
 Temperatura
 Tiempo
 Enfriamiento
 Agitación
 Control de acidez y producción
 Destilación
 Tipo: vacío o atmosférico, continuo o por lotes
 Calentamiento directo o indirecto
 Cambio en el volumen durante la destilación
 Procesamiento
 Tipo de malla: estacionaria, giratoria o vibratoria
 Uso de centrifugas
 Tipo de prensas
 Evaporadores
 Temperatura
 Número
 Secadores
 Tiempo
 Temperatura
 Tipo
 Cantidad de jarabes mezclados con grano

Con el paso del tiempo, la composición del maíz ha ido cambiando gracias al mejoramiento genético de las variedades, tasas de fertilidad del suelo y condiciones climáticas durante la temporada de cultivo. Como se muestra en el **cuadro 5**, los valores de grasa cruda, proteína cruda, FND, FAD, de contenido de ED para cerdos y de EMV y EMA para aves en el maíz son mayores que las notificadas en el NRC (2012) para cerdos y NRC (1994) para aves (Smith et al., 2015). Por ende, esta variabilidad de energía y composición de nutrientes del maíz tiene efectos directos en la disponibilidad de nutrientes entre las fuentes de DDGS. Además, si en la formulación de dietas para aves y cerdos los nutricionistas usan los valores energéticos del maíz del NRC (1994 y 2012), están infravalorando el contenido real de energía del maíz, lo cual tiene consecuencias económicas importantes, porque es el componente nutricional más caro del alimento.

También varía entre plantas la proporción de mezcla de los solubles de destilería condensados con la fracción de granos para producir DDGS. Debido a que entre estas dos fracciones hay diferencias sustanciales en la composición de nutrientes, es comprensible que la proporción de granos y solubles mezclados tengan un efecto importante sobre la composición final de nutrientes de los DDGS. Noll et al. (2006) evaluaron la composición y la digestibilidad de nutrientes de lotes de DDGS de maíz producidos con niveles variables (0, 30, 60 y 100 por ciento) de solubles añadidos a los granos húmedos, que corresponden a agregar 0, 12, 25 y 42 galones de jarabe a la fracción de granos por minuto. Las temperaturas del

secador disminuyeron conforme disminuía la tasa de adición de solubles a los granos. El tamaño de partícula aumentó y fue más variable con el aumento de la adición de solubles a la fracción de granos. La adición de cantidades crecientes de solubles resultó en un color más oscuro de los DDGS (L^* reducido) y menos color amarillo (b^* reducido). El aumento en la adición de solubles dio como resultado un aumento en la grasa cruda, cenizas, EMVn (aves), magnesio, sodio, fósforo, potasio, cloruro y azufre, pero tuvo efectos mínimos sobre el contenido y digestibilidad de proteína cruda y aminoácidos.

Es importante también recordar que el análisis de nutrientes de los ingredientes para alimentos varía entre laboratorios, lo cual está bien documentado (Cromwell et al., 1999). Como se muestra en el **cuadro 6**, se recolectó una sola fuente de DDGS y se envió a cuatro laboratorios diferentes para análisis con los mismos procedimientos analíticos y comparación de resultados. Hubo diferencias entre estos cuatro laboratorios de materia seca (92.4 a 96.2 por ciento), grasa cruda (9.4 a 13 por ciento) y FND (26.8 a 40.5 por ciento). Todos los procedimientos de análisis de laboratorio tuvieron variaciones analíticas inherentes que pueden contribuir a las diferencias en los resultados, pero hay otros factores que también contribuyen, como los errores humanos, error de muestreo, uso de reactivos caducados así como la calibración y mantenimiento inadecuados del equipo de análisis. Para ayudar a minimizar la variación en los resultados analíticos de las muestras de DDGS entre laboratorios, refiérase al **capítulo 7** de este manual para ver los métodos analíticos recomendados.

Cuadro 5. Energía y composición de nutrientes de las fuentes de granos de maíz y comparación con los valores NRC de cerdos (2012) y EMA y EMV de aves del NRC (1994, base materia seca; n = 83 muestras; adaptado de Smith et al., 2015)

	NRC cerdos (2012)	Smith et al. (2015)				
		Promedio	Intervalo	Diferencia	Desv. est.	CV %
Materia seca %	88.3	86.6	83.7 - 88.9	5.2	1.2	1.4
Proteína cruda %	9.3	9.5	7.9 - 12.3	4.4	0.98	10.3
Grasa cruda %	3.9	5.6	3.1 - 10.8	7.7	1.96	35.1
Fibra cruda %	2.2	1.7	0.93 - 3.7	2.8	0.42	27.8
FND %	10.3	10.7	6.7 - 15.4	8.7	2.14	20
FAD %	3.3	4.5	1.9 - 8	6.1	1.80	39.6
Almidón %	70.8	68.5	58.3 - 74.2	15.9	3.4	4.9
Carbohidratos solubles %	-	72.8	63.6 - 79.9	16.3	3.7	5.1
Ceniza %	1.5	1.4	0.87 - 2.4	1.5	0.28	20.5
EB, kcal/kg	4,454	4,576	4,409 - 4,841	432	101	2.2
ED, kcal/kg (cerdos)	3,907	4,105	3,904 - 4,344	440	100	2.4
EMAn, kcal/kg	3,764	4,006	3,865 - 4,269	404	94	2.3
EMVn, kcal/kg	3,898	4,086	3,955 - 4,272	317	80	2.0

Cuadro 6. Comparación del análisis de nutrientes de la misma muestra de DDGS entre cuatro laboratorios

	Lab 1	Lab 2	Lab 3	Lab 4
Materia seca %	96.2	95.1	92.4	95.1
Proteína cruda, %	29.6	30.3	30.2	29.3
Grasa cruda %	9.4	13	11.1	11.9
FND %	32.2	26.8	40.5	27.8
Cenizas %	4.2	5	4.4	4.3

Datos no publicados de Kerr (2013).

Variación en la composición de aminoácidos indispensables de las fuentes de DDGS

En lo que respecta a otros componentes nutricionales, el contenido de aminoácidos de los DDGS puede variar substancialmente entre fuentes. Olukosi y Abebiyi (2013) resumieron varios grupos de datos de aminoácidos de diferentes estudios publicados entre 1997 y 2010, cuyos promedios, concentraciones mínimas y máximas de todos los aminoácidos indispensables, así como las desviaciones estándar y los coeficientes de variación se muestran en el **cuadro 7**. Como lo notificaron previamente Fiene et al. (2006), estos investigadores también mostraron que las correlaciones entre el contenido de proteína cruda y Arg ($r = 0.44$), Ile ($r = 0.26$), Lys ($r = 0.22$) y Trp ($r = 0.33$) fueron bajas y no significativas. Esto significa que la proteína cruda es un mal indicador de las concentraciones de estos aminoácidos en los DDGS de maíz y que no se desarrollaron ecuaciones de

predicción. Aunque las concentraciones de otros aminoácidos indispensables tuvieron una correlación significativa con el contenido de proteína cruda ($r = 0.68, 0.49, 0.73, 0.81, 0.59$ y 0.61 de His, Leu, Met, Phe, Thr y Val, respectivamente), fueron generalmente bajas y las ecuaciones de predicción resultantes tuvieron valores R^2 bajos (de 0.23 a 0.66). Estos resultados confirman que el contenido de proteína cruda es una mala variable predictiva del contenido de aminoácidos de los DDGS de maíz y que se necesita una medición directa para determinar aminoácidos con precisión.

Más recientemente, Zeng et al. (2017) resumieron los grupos de datos de 22 publicaciones arbitradas y de una tesis de maestría de estudios realizados entre 2006 y 2015 (**cuadro 8**). Estos datos reflejan mejor la composición química y variabilidad entre las fuentes actuales de DDGS de maíz que los notificados por Olukosi y Abebiyi (2013).

Cuadro 7. Variación en la composición de aminoácidos indispensables de las fuentes de DDGS de maíz de 1997 a 2010 (adaptado de Olukosi y Abebiyi, 2013)

	Promedio	Mínimo	Máximo	Desv. est.	CV %
Arg %	1.22	1.06	1.46	0.098	8
Cys %	1.73	1.49	1.97	0.057	11.1
His %	0.74	0.65	0.91	0.07	9.4
Ile %	1.07	0.96	1.25	0.072	6.7
Leu %	3.21	2.89	3.62	0.21	6.6
Lys %	0.90	0.62	1.11	0.118	13.1
Met %	0.52	0.44	0.72	0.063	12
Phe %	1.29	1.09	1.51	0.123	9.6
Thr %	1.03	0.93	1.16	0.067	6.5
Trp %	0.22	0.16	0.26	0.022	10.3
Val %	1.42	1.30	1.61	0.095	6.7

Cuadro 8. Variación en la composición química y contenido de aminoácidos de las fuentes de DDGS de maíz de 2006 a 2015 (88 por ciento base materia seca; adaptado de Zeng et al., 2017)

Porcentaje	Promedio	CV %
Proteína cruda %	27.1	8.7
Fibra cruda %	8.2	26.2
FND %	34.1	13.4
FAD %	11.5	21.2
Extracto etéreo %	8.8	36.3
Cenizas %	4.1	24.9
Aminoácidos indispensables		
Arginina %	1.15	11.8
Histidina %	0.74	14.2
Isoleucina %	0.99	11.8
Leucina %	3.16	13.7
Lisina %	0.80	17.9
Metionina %	0.54	15.1
Fenilalanina %	1.32	12.3
Treonina %	1.01	15.5
Triptofano %	0.20	16.3
Valina %	1.35	11.1

Composición de polisacáridos no almidonosos de la fibra de DDGS

Al elegir enzimas comerciales, es importante el conocimiento sobre la composición de polisacáridos no almidonosos de la fracción de fibra en los DDGS, para mejorar la energía y la digestibilidad de nutrientes en las dietas para cerdos, aves y acuicultura. Pedersen et al. (2014) determinaron el perfil de polisacáridos no almidonosos (PNA) a 47 muestras de DDGS de maíz y 11 de trigo y demostraron que estos representan entre el 25 y 34 por ciento de la composición de las muestras de DDGS de maíz (**cuadro 9**), de las cuales la mayoría es insoluble. Esto indica que la fracción de fibra de los DDGS de maíz tiene una digestibilidad limitada en el intestino delgado así como una fermentabilidad limitada en el tubo gastrointestinal bajo de cerdos, aves y peces. La celulosa representa entre el 5 y 9 por ciento del contenido del DDGS de maíz y los polisacáridos no celulósicos predominantes son xilosa (7.7 por ciento) y arabinoxilosa (de 12.3 a 17.2 por ciento), los cuales también son principalmente insolubles. El contenido de manosa (1.7 por ciento) es sustancialmente mayor que en el grano de

maíz, probablemente debido al contenido de mananos en la pared celular de la levadura residual presente en los DDGS. Los DDGS de maíz tienen mayor contenido de arabinosa (6.2 por ciento) y ácido urónico (1.6 por ciento) que los de trigo (5.7 y 0.8 por ciento, respectivamente), lo que resulta en proporciones relativamente altas de arabinosa a xilosa y de ácido urónico a xilosa. Esto indica que la estructura de la fibra (heteroxilano) de los DDGS de maíz es más compleja y variable comparada con la del trigo, y por ende, es más difícil de degradar con enzimas exógenas. Sin embargo, el contenido de lignina Klason, el cual es indigestible, en las muestra de DDGS de trigo es mayor que en las muestras de maíz. La lignina Klason no está bien definida como constituyente químico y es probable que contenga proteína (productos de Maillard), grasas y ceras residuales y cutina, además de lignina verdadera. Estos resultados indican que durante la producción de los DDGS las concentraciones de xilano sustituido y PNA solubles se alteran de su estructura original en el grano de maíz.

Cuadro 9. Concentración promedio (%) y variación en la composición de nutrientes y polisacáridos no almidonosos (PNA) de 47 muestras de DDGS de maíz y 11 de DDGS de trigo (base materia seca, adaptado de Pedersen et al., 2014)

	DDGS de maíz				DDGS de trigo			
	Promedio	Intervalo	Desv. est.	CV %	Promedio	Intervalo	Desv. est.	CV %
Humedad	8.7	6.5 - 12.4	0.8	10	7.6	6.8 - 8.7	2	2
Proteína cruda	31.4	27.1 - 36.4	2.1	7	33.4	30.3 - 37.9	2.8	9
Extracto etéreo	9.1	6.5 - 11.8	1.5	17	5.2	4.4 - 6.5	0.8	16
Extracto etéreo hidrolizado con ácido	11.1	8.4 - 13.5	1.4	13	7.3	6.5 - 8.8	0.8	11
FND	35.1	30.2 - 39.7	2.4	7	30.6	27.3 - 34.2	2.6	8
FAD	10.1	8.9 - 11.9	0.6	6	10.5	9.5 - 12.2	0.8	7
Fibra cruda	7.7	6.4 - 9.5	0.6	7	6.7	5.5 - 8.8	0.9	14
Almidón	6	2.9 - 13.9	2.7	45	4	< 1 - 8.8	4.2	103
Azúcares totales	9	5.4 - 12.6	1.7	19	9.8	4.6 - 12.4	2.2	23
Cenizas	7.1	5.4 - 9	0.7	9	9.1	8.1 - 10	0.4	5
PNA total	28.3	25 - 33.7	2	9	26.2	24.2 - 29.1	0.9	4
PNA solubles	3.1	1.6 - 6.5	0.8	47	6.7	5.3 - 8	0.1	2
Celulosa	6.7	5.2 - 9.1	0.8	16	5	3.5 - 6.7	1.6	32
Polisacáridos no celulósicos								
Xilosa total	7.7	6.7 - 10	0.7	10	8.6	7 - 9.3	0.7	8
Xilosa soluble	0.6	0.1 - 1.6	0.3	62	2.3	1.5 - 3.2	0.5	22
Arabinosa total	6.2	5.6 - 7.2	0.4	7	5.7	5.1 - 6.2	0	0
Arabinosa soluble	0.7	0.2 - 1.5	0.3	45	1.7	1.2 - 2.2	0.3	15
Glucosa total	2.8	2.1 - 4.4	0.4	13	3.3	2.7 - 3.7	0.1	5
Glucosa soluble	0.3	0 - 1.6	0.4	190	1.1	0.1 - 2.1	1	89
Manosa total	1.7	1.2 - 2	0.2	12	1.6	1.3 - 1.8	0.2	13
Manosa soluble	0.6	0.4 - 0.9	0.1	19	0.7	0.4 - 0.8	0.1	18
Galactosa total	1.5	1.3 - 2.1	0.2	11	1.1	1 - 1.2	0.1	11
Galactosa soluble	0.3	0.2 - 0.5	0.1	29	0.6	0.4 - 0.7	0.1	18
Ácidos urínicos totales	1.6	1.4 - 2	0.1	8	0.8	0.7 - 0.9	0.1	12
Ácidos urínicos solubles	0.5	0.3 - 0.6	0.1	11	0.3	0.2 - 0.4	0	15
Lignina Klason	2.5	1.5 - 4.7	0.7	26	6.6	4.4 - 9.3	2.1	32
Arabinosa: Xilosa	0.80	0.71 - 0.85	0	5	0.66	0.62 - 0.70	0.01	9
Ácido urónico: Xilosa	0.20	0.16 - 0.23	0	8	0.09	0.08 - 0.11	0	21

Composición de ácidos grasos e indicadores de peroxidación del aceite de maíz en los DDGS

Es importante la composición de ácidos grasos de los DDGS por varias razones, como su contribución a los valores de EM y EN, el posible impacto en la concentración de grasa láctea en el ganado lechero, los efectos en la firmeza de la grasa de la carne de cerdo de animales en crecimiento y finalización, así como la susceptibilidad a la peroxidación de lípidos durante la producción, transporte y almacenamiento. Como se muestra en el **cuadro 10**, los principales ácidos grasos presentes en el aceite de maíz de los DDGS son ácido linoleico (54 por ciento), ácido oleico (26 por ciento) y ácido palmítico (14 por ciento), de los cuales el ácido linoleico y oleico son ácidos grasos insaturados que contribuyen al alto contenido de energía de este ingrediente, pero también hacen que el aceite sea susceptible a la peroxidación. Además, el perfil de ácidos grasos no difiere sensiblemente entre las fuentes de DDGS de aceite alto (mayor al 10 por ciento de grasa cruda) y aceite reducido (menor al 10 por ciento de grasa cruda). Aunque en el aceite de los DDGS no hay concentraciones detectables de ácido eicosapentaenoico (EPA), está la presencia de cantidades

pequeñas de ácido docohexaenoico (DHA), el cual es un ácido graso omega 3 fisiológicamente importante para las funciones neuronales, retinales e inmunitarias. Hay diferencias mínimas promedio de los indicadores de peroxidación de lípidos (contenido de ácidos grasos libres, ácido tiobarbitúrico e índice de peróxido) entre las fuentes de DDGS con aceite alto y reducido, pero una variación considerable de estas medidas.

Para un análisis más integral de la peroxidación de lípidos entre las fuentes de DDGS, Song y Shurson (2013) analizaron el aceite de maíz extraído de 31 fuentes de DDGS de maíz y los compararon con una muestra de referencia de grano de maíz (**cuadro 11**). Las correlaciones entre Minolta L* y b* y el índice de peróxido fueron -0.63 y -0.57, respectivamente y mayor para TBARS ($r = -0.73$ y -0.67 , respectivamente). Estas importantes correlaciones negativas entre las mediciones de color y la peroxidación de los DDGS indican que el color puede ser un indicador general útil del alcance de la peroxidación de lípidos, ya que durante las reacciones de polimerización de la peroxidación de los lípidos se producen oxipolímeros de color café (Buttkus, 1975; Khayat y Schwall, 1983). Sin embargo, cuando Song et al. (2013) alimentaron dietas con 30 por ciento de DDGS con la fuente más peroxidada

Cuadro 10. Composición de los ácidos grasos y alcance de la peroxidación de lípidos en las fuentes de DDGS con contenido variable de grasa cruda (adaptado de Kerr et al., 2013).

	Promedio de las fuentes de DDGS (>10 % grasa cruda)	Intervalo	Promedio de las fuentes de DDGS (>10 % grasa cruda)	Intervalo
No. de muestras	8		7	
Extracto etéreo %	11.2	10.1 -13.2	8	4.9 -10
Ácidos grasos % de aceite total				
Mirístico, 14:0	0.07	0.06 - 0.08	0.04	ND - 0.08
Palmítico, 16:0	14.2	13.6 - 15.4	14.2	14.0 - 14.6
Palmitoleico, 16:1	0.14	0.12 - 0.16	0.12	ND - 0.15
Esteárico, 18:0	2.2	2 - 2.6	2.2	2.1 - 2.3
Oleico, 18:1	26	24.8 - 27.3	26.2	25.2 - 27.2
Linoleico, 18:2	54	51.9 - 55	53.9	53.4 - 54.5
Linoleico, 18:3	1.6	1.4 - 1.8	1.6	1.6 - 1.8
Araquidónico, 20:4	ND	ND	ND	ND
Eicosapentaenoico, 20:5	ND	ND	ND	ND
Docosapentaenoico, 22:5	ND	ND	ND	ND
Docosahexaenoico, 22:6	0.18	0.15 - 0.27	0.21	0.16 - 0.26
Peroxidación de lípidos				
Ácidos grasos libres %	1.7	1.1 - 2.4	1.1	0.6 - 1.7
Absorbancia de ácido tiobarbitúrico	7.8	5.7 - 11.8	10.6	5.3 - 17.1
Índice de peróxido, mEq/kg	5.4	0.2 - 19	7.7	0.6 - 17.5

Cuadro 11. Mediciones de peroxidación de lípidos del aceite extraído de los granos secos de destilería de maíz con solubles (DDGS) y de su color (adaptado de Song y Shurson, 2013)

	DDGS					
	Maíz	Promedio	Mediana	Mínimo	Máximo	CV %
Valor de peróxido, mEq/kg aceite	3.1	13.9	11.7	4.2	84.1	97.5
TBARS, ng MDA equivalentes/mg aceite	0.2	1.9	1.7	1	5.2	43.6
Color						
L*	83.9	54.1	54.9	45.2	58.1	4.6
a*	2.6	10.9	10.8	9.3	12.4	7.2
b*	20	37.3	37.5	26.6	42.7	8.8

de este estudio (que también contenían 0.95 por ciento de azufre), no observaron efectos negativos en el desempeño del crecimiento de lechones destetados. La falta de respuesta en el desempeño del crecimiento se atribuye al incremento de compuestos antioxidantes azufrados que resultan de alimentar DDGS, además de que no fue necesario suplementar vitamina E adicional para prevenir una reducción en el desempeño del crecimiento. Hanson et al. (2015) observaron resultados similares al alimentar cerdos destetados con una fuente de DDGS altamente peroxidada. Estos resultados indican que aunque en los DDGS haya una importante peroxidación de lípidos, no parece que afecte negativamente el desempeño del crecimiento y la salud de cerdos destetados. Es posible que los antioxidantes naturales relativamente altos que se encuentran en los DDGS sean suficientes para superar los posibles efectos negativos de alimentar cerdos con aceite peroxidado en dicho coproducto.

Antioxidantes naturales y composición fitoquímica de los DDGS

Aunque el papel principal de los ingredientes es el de proporcionar cantidades suficientes de energía y de nutrientes digestibles para satisfacer los requerimientos de los animales, algunos también contienen compuestos que brindan beneficios fisiológicos adicionales más allá de los nutrientes que aportan a las dietas. Se dice que a veces estos compuestos tienen propiedades funcionales o nutraceuticas (es decir, nutricionales y farmacéuticas). En el maíz hay varios compuestos bioactivos que proporcionan beneficios a la salud como la vitamina E, ácido ferúlico y carotenoides. Estos compuestos, junto con otros, pueden contribuir en conjunto a la capacidad antioxidante y posibles beneficios a la salud de los DDGS.

Son limitados los datos sobre el contenido fitoquímico y la capacidad antioxidante de los DDGS. Sin embargo, es importante cuantificar estos componentes fitoquímicos para empezar a entender los efectos benéficos en las respuestas en la salud intestinal y el sistema inmunitario observadas al alimentar a cerdos, aves y peces con dietas de DDGS. La evidencia inicial indica que los DDGS contienen cantidades importantes de diversos compuestos antioxidantes que pueden

brindar beneficios a la salud además de prevenir el estrés oxidativo de alimentar a los animales con aceite peroxidado de algunas estas fuentes. En 2011, Winkler-Moser y Breyer llevaron a cabo el primer estudio para cuantificar los diferentes antioxidantes naturales y fitoquímicos en los DDGS. Estos investigadores obtuvieron una muestra de DDGS de POET e hicieron un análisis exhaustivo para determinar el perfil de ácidos grasos, tocoferoles, tocotrienoles, carotenoides, índice de estabilidad oxidativa (OSI) y fitoesteroles del aceite extraído de este coproducto (**cuadro 12**). Los tocoferoles son los antioxidantes predominantes presentes en los aceites (Kamal-Eldin, 2006) que son importantes para minimizar la peroxidación bajo condiciones prooxidantes. Los tocotrienoles también sirven como antioxidantes (Schroeder et al., 2006), los cuales parecen contribuir a reducir el colesterol en sangre, previenen el cáncer y protegen el sistema neuronal (Sen et al., 2000). Los principales carotenoides del aceite de maíz son la luteína y la zeaxantina, que han demostrado proteger contra la degeneración macular inducida por la edad y las cataratas en humanos (Zhao et al., 2006). Los betacarotenos y la betacriptoxantina son precursores de la vitamina A (Bendich y Olson, 1989); todos los carotenoides han demostrado tener efectos benéficos sobre la salud más allá de que proporcionan actividad de vitamina A en las dietas, como la actividad antioxidante, mejor respuesta inmunitaria y protección contra varios tipos de cáncer (Bendich y Olson, 1989; Rao y Rao, 2007). Los fitoesteroles son constituyentes valiosos de los alimentos funcionales por su capacidad de reducir el colesterol en sangre e impedir la reabsorción del colesterol en el tubo gastrointestinal bajo (Gylling y Miettinen, 2005). Los ferulatos de esterilo ayudan a las propiedades reductoras del colesterol de los fitoesteroles (Rong et al., 1997) y también tienen actividad antioxidante (Nyström et al., 2005). En un estudio más reciente, Shim et al. (comunicación personal) determinaron la capacidad antioxidante y el contenido y variabilidad de tocoferol, tocotrienol, xantofilas y ácido ferúlico de 16 fuentes de DDGS y compararon estos valores con una muestra de maíz (**cuadro 13**). Los resultados de este estudio mostraron que entre las fuentes de DDGS hay una variabilidad considerable de concentraciones de estos compuestos, pero que contienen de dos a tres veces mayores concentraciones que el maíz.

Cuadro 12. Perfil de ácidos grasos, compuestos antioxidantes naturales, estabilidad oxidativa y fitoesteroles en el aceite extraído de los DDGS (adaptado de Winkler-Moser y Breyer, 2011)

Analito	Concentración
Ácidos grasos libres % ácido oleico	10.5 + 0.18
Ácidos grasos (porcentaje del aceite)	
16:0	12.9
16:1	0.1
18:0	1.8
18:1	28.1
18:2	55.5
20:0	0.3
18:3	1.2
20:1	0
Valor de yodo calculado	123.1
Tocoferoles totales, µg/g	1,104
Alfatocoferol, µg/g	296
Gamatocoferol, µg/g	761
Deltatocoferol, µg/g	48
Tocotrienoles totales, µg/g	1,762
Alfatocotrienol, µg/g	472
Gamatocotrienol, µg/g	1,210
Deltatocotrienol, µg/g	80
Carotenoides totales, µg/g	75
Luteína, µg/g	47
Zeaxantina, µg/g	24
Betacriptoxantina	3.3
Betacaroteno, µg/g	0.9
OSI, horas a 110°C	6.62
Fitoesteroles totales, µg/g	21.7
Campesteroles, mg/g	2.97
Campestanoles, mg/g	1.35
Estigmasterol, mg/g	1.10
Sitosterol, mg/g	10.3
Sitostanol, mg/g	3.72
Avenasterol, mg/g	0.93
Cicloartenol, mg/g	0.71
24-metilén-cicloartenol	0.30
Citroestadienol, mg/g	0.31
Ferulatos de esterilo, mg/g	3.42

Cuadro 13. Capacidad antioxidante, contenido de tocoferoles, tocotrienoles, xantofilas y ácido ferúlico (base materia seca) de 16 fuentes de DDGS comparadas con maíz (adaptado de Shurson, 2017)

	Maíz	DDGS		
		Promedio	Mínimo	Máximo
Capacidad antioxidante, equivalentes de tocoferol mmol/kg	8.1	38.07 + 93.9	29	65.2
Tocoferoles y tocotrienoles, mg/kg				
α-tocoferol	3.2	10.8 + 4.5	4.1	19.7
α-tocotrienol	2.4	9.3 + 2.2	5.4	12.8
γ-tocoferol	32.7	69 + 8.6	52.7	81.4
γ-tocotrienol	8.6	14 + 2.9	7.6	17.5
δ-tocoferol	10.1	18.2 + 3.6	10	24.3
Tocoferoles totales	57	121.3 + 16.9	90.8	141.2
Xantofilas, µg/kg				
Luteína	385	627 + 218	447	1,343
Zeaxantina	63	95 + 50	ND	243
Xantofilas totales	448	697 + 257	447	1,586
Ácido ferúlico, mg/ g				
Ácido ferúlico libre	0.01	0.042 + 0.016	0.018	0.087
Ácido ferúlico total	2.50	7.455 + 0.675	6.774	9.511

Bibliografía

- Bendich, A., and J.A. Olson. 1989. Biological actions of carotenoids. *FASEB J.* 3:1927-1932.
- Buttkus, H.A. 1975. Fluorescent lipid autoxidation products. *J. Am. Oil Chem. Soc.* 23:823-825.
- Cromwell, G.L., C.C. Calvert, T.R. Cline, J.D. Crenshaw, R.A. Easter, R.C. Ewan, C.R. Hamilton, G.M. Hill, A.J. Lewis, D.C. Mahan, E.R. Miller, J.L. Nelssen, J.E. Pettigrew, L.F. Tribble, T.L. Veum, and J.T. Yen. 1999. Variability among sources and laboratories in nutrient analyses of corn and soybean meal. *77:3262-3273.*
- Fiene, S.P., T.W. York, and C. Shasteen. 2006. Correlation of DDGS IDEA™ digestibility assay for poultry with cockerel true amino acid digestibility. Pp. 82-89 In: *Proc. 4th Mid-Atlantic Nutrition Conference.* University of Maryland, College Park, MD.
- Gylling, H., and T.A. Miettinen. 2005. The effect of plant stanol- and sterol-enriched foods on lipid metabolism, serum lipids and coronary heart disease. *Ann. Clin. Biochem.* 42:254-263.
- Hanson, A.R., L. Wang, L.J. Johnston, S.K. Baidoo, J. L. Torrison, C. Chen, and G.C. Shurson. 2015. Effects of feeding peroxidized dried distillers grains with solubles to sows and progeny on growth performance and metabolic oxidative status of nursery pigs. *J. Anim. Sci.* 93:135-146.
- Herrick, K.J., and B.J. Breitling. 2016. Nutrient variability of distillers grains with solubles. *J. Anim. Sci.* abstract doi: 10.2527/msasas2016-342 p. 160-161.
- Kamal-Eldin, A. 2006. Effect of fatty acids and tocopherols on the oxidative stability of vegetable oils. *Eur. J. Lipid Sci. Technol.* 58:1051-1061.
- Kerr, B.J., W.A. Dozier, III, and G.C. Shurson. 2013. Effects of reduced-oil corn distillers dried grains with solubles composition on digestible and metabolizable energy value and prediction in growing pigs. *J. Anim. Sci.* 91:3231-3243.
- Kerr, B.J., N.K. Gabler, and G.C. Shurson. 2015. Compositional effects of corn distillers dried grains with solubles with variable oil content on digestible, metabolizable, and net energy values in growing pigs. *Prof. Anim. Scientist* 31:485-496.
- Khayat, A., and D. Schwall. 1983. Lipid oxidation in seafood. *Food technol.* 37:130-140.

- Meloche, K.J., B.J. Kerr, G.C. Shurson, and W.A. Dozier III. 2013. Apparent metabolizable energy and prediction equations for reduced-oil corn distillers dried grains with solubles in broiler chicks from 10 to 18 days of age. *Poult. Sci.* 92:3176-3183.
- National Research Council. 2012. *Nutrient Requirements of Swine*. 11th Rev. Ed. National Academy Press, Washington, DC.
- National Research Council. 1994. *Nutrient Requirements of Poultry*. 9th Rev. Ed. National Academy Press, Washington, DC.
- Noll, S., C. Parsons, and B. Walters. 2006. What's new since September 2005 in feeding distillers co-products to poultry. *Proc. 67th Minnesota Nutrition Conference & University of Minnesota Research Update Session: Livestock Production in the New Millennium*. pp. 149-154.
- Noström, L., Mäkinen, A.-M. Lampi, and V. Piironen. 2005. Antioxidant activity of steryl ferulate extracts from rye and wheat bran. *J. Agric. Food Chem.* 53:2503-2510.
- Olentine, C. 1986. Ingredient profile: Distillers feeds. *Proc. Distillers Feed Conf.* 41:13-24.
- Olukosi, O.A., and A.O. Adebiji. 2013. Chemical composition and prediction of amino acid content of maize- and wheat-Distillers' Dried Grains with Soluble. *Anim. Feed Sci. Technol.* 185:182-189.
- Pedersen, M.B., S. Dalsgaard, K.E. Bach Knudsen, S. Yu, and H.N. Lærke. 2014. Compositional profile and variation of distillers dried grains with solubles from various origins with focus on non-starch polysaccharides. *Anim. Feed Sci. Technol.* 197:130-141.
- Rao, A.V., and L.G. Rao. 2007. Carotenoids and human health. *Pharmacol. Res.* 55:207-216.
- Rong, N., L.M. Ausman, and R.J. Nicolosi. 1997. Oryzanol decreases cholesterol absorption and aortic fatty streaks in hamsters. *Lipids* 32:303-309.
- Schroeder, M.T., E.M. Becker, and L.H. Skibsted. 2006. Molecular mechanisms of antioxidant synergism of tocotrienols and carotenoids in palm oil. *J. Agric. Food Chem.* 54:3445-3453.
- Sen, C.K., S. Khann, and S. Roy. 2000. Tocotrienols in health and disease: The other half of the natural vitamin E family. *Mol. Aspects med.* 28:692-798.
- Shurson, G.C. 2017. The role of biofuels coproducts in feeding the world sustainably. *Annu. Rev. Anim. Biosci.* 5:229-254.
- Smith, B., A. Hassen, M. Hinds, D. Rice, D. Jones, T. Sauber, C. liams, D. Sevenich, R. Allen, F. Owens, J. McNaughton, and C. Parsons. 2015. Predicting the digestible energy of corn determined with growing swine from nutrient composition and cross-species measurements. *J. Anim. Sci.* 93:1025-1038.
- Song, R. and G.C. Shurson. 2013. Evaluation of lipid peroxidation level in corn dried distillers grains with solubles. *J. Anim. Sci.* 91:4383-4388.
- Song, R., C. Chen, L. Wang, L.J. Johnston, B.J. Kerr, T.E. Weber, and G.C. Shurson. 2013. High sulfure content in corn dried distillers grains with solubles (DDGS) protects against oxidized lipids in DDGS by increasing sulfur-containing antioxidants in nursery pigs. *J. Anim. Sci.* 91:2715-2728.
- Stein, H.H., L.V. Lagos, and G.A. Casas. 2016. Nutritional value of feed ingredients of plant origin fed to pigs. *Anim. Feed Sci. Technol.* 218:33-69.
- Tahir, M., M.Y. Shim, N.E. Ward, C. Smith, E. Foster, A.C. Guney, and G.M. Pesti. 2012. Phytate and other nutrient components of feed ingredients for poultry. *Poult. Sci.* 91:928-935.
- Winkler-Moser, J.K., and L. Breyer. 2011. Composition and oxidative stability of crude oil extracts of corn germ and distillers grains. *Industrial Crops and Prod.* 33:572-578.
- Zeng, Z.K., G.C. Shurson, and P.E. Urriola. 2017. Prediction of the concentration of standardized ileal digestible amino acids and safety margins among sources of distillers dried grains with solubles for growing pigs: A meta-analysis approach. *Anim. Feed Sci. and Technol.* 231:150-159.
- Zhao, D.Y., P. Bhosal, and P.S. Bernstein. 2006. Carotenoids and ocular health. *Curr. Top. Nutr. Res.* 4:53-68.

CAPÍTULO 7

Procedimientos analíticos de laboratorio recomendados para DDGS

Introducción

EL ANÁLISIS DE LABORATORIO DE LOS INGREDIENTES PARA ALIMENTOS BALANCEADOS ES UNA PRÁCTICA común en esta industria para verificar que cumplan con las especificaciones garantizadas, determinar la composición de nutrientes para la formulación de alimentos y la presencia y concentración de posibles contaminantes. Por lo tanto, es fundamental la precisión en la medición de varios compuestos químicos de ingredientes, tales como los DDGS.

Los procedimientos analíticos se pueden categorizar con base en el nivel de validación de un método de laboratorio

específico (Thiex, 2012). Una sola validación de laboratorio aplica a un laboratorio, técnico y equipo específicos, mientras que una validación multilaboratorio implica la validación de un procedimiento de dos a siete laboratorios para brindar información de cuán bien se reproducen los resultados de un método fuera del laboratorio original. La existencia de un protocolo completamente armonizado de un estudio de colaboración se da cuando al menos ocho laboratorios brindan datos aceptables con el mismo procedimiento. Thiex (2012) publicó un excelente resumen de los procedimientos analíticos recomendados para los DDGS, de los cuales en este capítulo se resumen los puntos clave.

Métodos analíticos recomendados para cumplir con los estándares de comercialización de DDGS (AFIA, 2007)

Analito	Método	Descripción del método
Humedad	NFTA 2.2.2.5	Materia seca de laboratorio (105°C/3 hr)
Proteína cruda	AOAC 990.03	Proteína (cruda) en alimentos para animales
Proteína cruda	AOAC 2001.11	Proteína (cruda) en alimentos para animales y catalizador de cobre de alimentos para mascotas
Grasa cruda	AOAC 945.16	Complementos de aceite en cereales (éter de petróleo)
Fibra cruda		Fibra (cruda) en alimentos para animales y alimentos para mascotas (crisoles F.G.)

Método recomendados de análisis de nutrientes de DDGS para la formulación de dietas

Analito	Método	Descripción del método
Fibra ácidodetergente (FAD)	AOAC 973.18	La fibra, ácidodetergente y lignina, H ₂ SO ₄ en alimentos para animales e ISO, 2008 son equivalentes
Lignina ácidodetergente (LAD)	AOAC 973.18	Fibra, ácidodetergente y lignina, H ₂ SO ₄ en alimentos para animales e ISO 13906:2008 son equivalentes
Fibra neutrodetergente tratada con amilasa (FND)	AOAC 2002.04	AOAC 2002.04 Fibra neutrodetergente tratada con amilasa en alimentos balanceados e ISO 16472:2006 son equivalentes
Almidón	Método no oficial	AOAC 920.40 ya no es válido debido a la suspensión de la producción de la enzima que se requiere para el ensayo, AOAC 996.11 es el que más comúnmente se usa pero presenta deficiencias.
Aminoácidos	AOAC 995.12 ISO 13903:2005	AOAC 994.12 para todos los aminoácidos, excepto tirosina y triptófano
Triptófano	AOAC 988.15	
Cenizas	AOAC 942.05 ISO 5984:2002	AOAC 942.05 e ISO 5984:2002 son equivalentes. Nota: Si las cenizas contienen carbón no oxidado, la muestra debe volverse a procesar para cenizas

Analito	Método	Descripción del método
Cloro	AOAC 969.10	AOAC 969.10 es el método potenciométrico y AOAC 943.01 es el método Volhard
	AOAC 943.01	
	ISO 6495:1999	
Cromo	Método no oficial	No se han validado métodos
Flúor	Técnica de microdifusión (Mineral Tolerances of Animals, 2005)	No se han validado métodos
Yodo	Técnica ICP-MS (Mineral Tolerances of Animals, 2005)	No se han validado métodos
Fósforo	AOAC 965.17	AOAC 965.17 Fósforo en alimentos para animales, Método fotométrico, ISO 6491:1998 Determinación del contenido de fósforo total – Método espectrofotométrico e ISO 27085:2009 se pueden utilizar
	ISO 6491:1998	
	ISO 27085:2009	
Selenio	AOAC 996.16	AOAC 996.16 Selenio en alimentos balanceados y premezclas, Método fluorométrico y AOAC 996.17 Selenio en alimentos balanceados y premezclas, Método de absorción atómica de generación continua de hidruro son aceptables
	AOAC 996.17	
Azufre	AOAC 923.01	AOAC 923.01 Azufre en plantas e ISO 27085:2009 son comparables
	ISO 27085:2009	
Minerales traza	AOAC 968.08	La solubilización implica ya sea las cenizas secas seguido de la disolución en ácido, o cenizas húmedas con varios ácidos, en función de los elementos a medirse. La detección incluye técnicas gravimétricas, espectrofotometría visible, espectrofotometría de absorción atómica de flama o de horno de grafito (AOAC 968.08; ISO 6869:2000), o detección espectroscópica de masa atómica (ICP-MS; ISO 27085:2009)
	ISO 6869:2000	
	ISO 27085:2009	

Procedimientos recomendados para la medición de posibles contaminantes en DDGS (Caupert et al., 2012)

Micotoxinas

Desde la década de los 60 se han desarrollado muchos métodos analíticos para el análisis de contenido de micotoxinas en alimentos para consumo humano y animal, debido a la preocupación de la toxicidad en la salud humana (Trucksess, 2000). Entre ellos se encuentran el método de cromatografía de capa fina (TLC), el ensayo inmunoabsorbente ligado a enzimas (ELISA) y los métodos basados en inmunosensores, que se han utilizado ampliamente para una determinación rápida, mientras que la cromatografía líquida de alto desempeño (HPLC) con detección de fluorescencia (FD) y la detección de espectrometría de masas (MS) se han utilizado como métodos confirmatorios y de referencia

(Krska et al, 2008). No obstante, debido a la necesidad de métodos rápidos, precisos y económicos hechos en el sitio para la determinación de las micotoxinas, se han desarrollado equipos de análisis, aprobados por la Grain Inspection, Packers and Stockyards Administration (GIPSA) del Departamento de Agricultura de EE. UU., de uso específico para los DDGS (**cuadro 1**; <http://www.gipsa.usda.gov/GIPSA/webapp?area=home&subject=lr&topic=hb>).

Estos métodos son para la detección de una sola micotoxina, son fáciles de usar y cuantitativamente sensibles, además de que permite un alto proceso de muestras. Hay seis métodos aprobados por GIPSA para el análisis de micotoxinas en DDGS (cuatro para aflatoxinas, uno para fumonisina y otro más para zearalenona).

Cuadro 1. Equipos de análisis de micotoxinas para DDGS aprobados por GIPSA (adaptado de Zhang et al., 2009)

Marcas	Fabricante	Intervalo de prueba	Formato de prueba	Extracción	Limpieza
Aflatoxinas					
Veratox Aflatoxin	Neogen Corporation	5–50 ppb	Ensayo de placa microtituladora	Metanol/agua (70 + 30)	ELISA
Ridascreen FAST SC	R-Biopharm	5–100 ppb	Ensayo de placa microtituladora	Metanol/agua (70 + 30)	ELISA
Aflatest	Vicam	5–100 ppb	Columna de inmunoafinidad	Metanol/agua (80 + 20)	Columna de afinidad
FluroQuant® Afla IAC	Romer	5–100 ppb	Fluorometría	Metanol/agua (80 + 20)	Columna de afinidad
Fumonisinina					
AgraQuant fumonisinina total 0.25/5.0	Romer	0.5–5 ppm	ELISA competitiva directa	Metanol/agua (70 + 30)	ELISA
Zearalenona					
ROSA® Zearalenona	Charm Sciences, Inc. 50–1000 ppb		Banda de flujo lateral	Metanol/agua (70 + 30)	

Cuando se considera el análisis de las muestras de DDGS por posible contaminación de micotoxinas, es esencial utilizar procedimientos analíticos aprobados para obtener resultados precisos. El método preferido para determinar la presencia y concentración de micotoxinas en alimentos para animales es la cromatografía líquida de alto desempeño (HPLC). Con el

uso de la HPLC y una gran variedad de detectores, se pueden separar y detectar la mayoría de la micotoxinas en los alimentos para animales (Krska et al, 2008). En el **cuadro 2** se listan los métodos utilizados por los principales laboratorios comerciales de EE. UU., los cuales han sido validados por laboratorios individuales y recientemente publicados en revistas científicas arbitradas.

Cuadro 2. Métodos recomendados de análisis de micotoxinas en alimentos balanceados (adaptado de Zhang et al., 2009)

Objetivo	Pruebas	Límites de detección	Referencia
Aflatoxinas			
Maíz, almendras, nueces de Brasil, cacahuates (maní) y pistachos	HPLC – FD	5 – 30 ppb	AOAC 994.08
Deoxinivalenol			
Cereales y productos de cereales	HPLC – UV	ppm (límite de detección)	MacDonald et al., 2005a
Fumonisinina			
Maíz y hojuelas de maíz	HPLC – FD	0.5 – 2 ppm	AOAC 2001.04
Cuadro 2. Métodos recomendados de análisis de micotoxinas en alimentos balanceados (adaptado de Zhang et al., 2009)			
Maíz y materias primas de maíz	Cromatografía de capa fina (TLC)	ppm (límite de detección)	Rottinghaus et al., 1992
T-2			
Alimentos para consumo humano y animal	Cromatografía de capa fina (TLC)	ppm (límite de detección)	Romer Labs, 1986

Cuadro 2. Métodos recomendados de análisis de micotoxinas en alimentos balanceados (adaptado de Zhang et al., 2009)

Zearalenona			
Maíz, trigo y alimentos balanceados	Ensayo de placa microtituladora	0.8 ppm (límite de detección)	AOAC 994.01
Cebada, harina de maíz y trigo, polenta y alimentos para bebés a base de maíz	HPLC – FD	0.05 ppm (límite de detección)	MacDonald et al., 2005b
Aflatoxinas, deoxinivalenol, fumonisina, T-2, zearalenona			
Alimentos para consumo humano y animal	LC/MS/MS	Aflatoxinas (1– 100 ppb); Deoxinivalenol,(1, 1000 ppb) Fumonisina (16 – 3,200 ppb) T-2, (2 – 1,000 ppb) Zearalenona (20 – 1,000 ppb)	Sulyok et al., 2007

Residuos de antibióticos

El CVM de la Administración de Alimentos y Medicamentos de EE. UU. ha utilizado cromatografía líquida y el procedimiento de espectrometría de masa en tándem con analizador de trampa de iones (Heller, 2009) para determinar la presencia y concentraciones de residuos de 13 antibióticos en los DDGS, tales como:

- Ampicilina
- Bacitracina A
- Cloranfenicol
- Clortetraciclina
- Claritromicina
- Eritromicina
- Monensina
- Oxitetraciclina
- Penicilina G
- Estreptomina
- Tilosina
- Virginiamicina M1

La eficiencia de extracción de este procedimiento va del 65 al 97 por ciento, con límites de cuantificación de 0.1 a 1 µg/g. La precisión va del 88 a 111 por ciento, con coeficientes de variación del 4 al 30 por ciento. El único método aprobado por la FDA para detectar residuos de virginiamicina es un procedimiento de bioensayo de Phibro (QA@Phibro.com), que se recomienda para hacer una determinación precisa de la presencia de residuos de virginiamicina. El bioensayo de

Phibro representa una probable actividad biológica que solo sucede con la presencia de ambas subunidades de la molécula virginiamicina, en comparación con el método LC-MS de Heller (2009) que sólo detecta una subunidad y puede llevar a un alto porcentaje de falsos positivos.

Bibliografía

- AFIA. 2007. Evaluation of Analytical Methods for Analysis of Distillers Grain with Solubles: AFIA Sub Working Group Final Report. American Feed Industry Association. Available online: www.afia.org/Afia/Files/BAMN-percent20BSE-percent20DDGS-percent20Biosecurity-percent20Awareness/DDGS-percent20FINAL-percent20Report-percent20and-percent20Recommendations2-07.pdf. Accessed May 30, 2012.
- AOAC. 2005. Official Methods of Analysis of AOAC International (OMA). AOAC International, Gaithersburg, MD.
- Caupert, J., Y. Zhang, P. Imerman, J.L. Richard, and G.C. Shurson. 2012. Mycotoxin Occurrence in DDGS. In: Distillers Grain Production, Properties, and Utilization, ed. K. Liu and K.A. Rosentrater, CRC Press, Boca Raton, FL, p. 219-234.

- Heller, D.N. 2009. Analysis of Antibiotics in Distillers Grains Using Liquid Chromatography and Ion Trap Tandem Mass Spectroscopy, ed. C.V.M Food and Drug Administration, Office of Research, Department of Health and Human Services. Rockville, MD.
- ISO. 1998. ISO 6491:1998, Animal Feeding Stuffs – Determination of Phosphorus Content – Spectrometric Method. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- ISO. 1999. ISO 6495:1999, Animal Feeding Stuffs – Determination of Water-Soluble Chloride Content. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- ISO. 2000. ISO 6491:1998, Animal Feeding Stuffs – Determination of the Contents of Calcium, Copper, Iron, Magnesium, Manganese, Potassium, Sodium, and Zinc – Method Using Atomic Absorption Spectrometry. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- ISO. 2002. ISO 5984:2002, Animal Feeding Stuffs – Determination of Ash Content. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- ISO. 2005. ISO 13903:2005, Animal Feeding Stuffs – Determination of Amino Acid Content. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- ISO. 2006. ISO 16472:2006, Animal Feeding Stuffs – Determination of Amylase-Treated Detergent Fiber Content (aNDF). International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- ISO. 2008. ISO 13906:2008, Animal Feeding Stuffs – Determination of Acid Detergent Fiber (ADF) and Acid Detergent Lignin (ADL) Content. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- ISO. 2009. ISO 27085:2009, Animal Feeding Stuffs – Determination of Calcium, Sodium, Phosphorus, Magnesium, Potassium, Iron, Zinc, Copper, Manganese, Cobalt, Molybdenum, Arsenic, Lead, and Cd/Mn by ICP-AES. International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- MacDonald, S.J., D. Chan, P. Brereton, A. Damant, and R. Wood. 2005a. Determination of deoxynivalenol in cereals and cereal products by immunoaffinity column cleanup with liquid chromatography: Interlaboratory study. *J. of AOAC International* 88:1197-1204.
- MacDonald, S.J., S. Anderson, P. Brereton, R. Wood, and A. Damant. 2005b. Determination of zearalenone in barley, maize and wheat flour, polenta, and maize-based baby food by immunoaffinity column cleanup with liquid chromatography: Interlaboratory study. *J. of AOAC International* 88:1733-1740.
- Mineral Tolerances of Animals. 2005. National Academy Press, Washington, DC.
- Romer Labs, Inc. 2010. T-2 Toxin. Romer Labs, Inc., Union, MO. Available online: www.romerlabs.com/downloads/Mycotoxins/T2-Toxin.pdf.
- Rottinghaus, G.E., C.E. Coatney, and C.H. Minor. 1992. A rapid, sensitive, thin layer chromatography procedure for the detection of fumonisin B₁ and B₂. *J. Vet Diag. Invest.* 4:326-329.
- Sulyok, M., R. Krska, and R. Schuhmacher. 2007. A liquid chromatography/tandem mass spectrometric multi-mycotoxin method for quantification of 87 analytes and its application to semi-quantitative screening of moldy food samples. *Analytical and Bioanalytical. Chem.* 389:1505-1523.
- Thiex, N. 2012. Analytical Methodology for Quality Standards and Other Attributes of DDGS In: Distillers Grain Production, Properties, and Utilization, ed. K. Liu and K.A. Rosentrater, CRC Press, Boca Raton, FL, p. 193-217.
- Trucksess, M.W. 2000. Natural Toxins. *Official Methods of Analysis of AOAC International*. 17th Edition. Chapter 49, 1 – 2.
- Zhang, Y., J. Caupert, J. Richard, P. Imerman and J. Shurson, 2009. The occurrence and concentration of mycotoxins in U.S. distillers dried grains with solubles. *J. Ag. Food Chemistry* 57:9828-9837.

CAPÍTULO 8

Comparación de las diferencias de nutrición y calidad entre las fuentes de DDGS de China y EE. UU.

Introducción

EN LOS ÚLTIMOS AÑOS, CHINA HA SIDO EL MAYOR IMPORTADOR DE DDGS DE EE. UU. Fabiosa et al. (2009) notificaron que las plantas de alimentos balanceados de China lograron una reducción del 6 por ciento del costo del alimento con el uso de DDGS de maíz importado de EE. UU., como sustituto parcial de la harina de soya, maíz y de otros ingredientes más caros. No hay datos disponibles de la cantidad total de DDGS de China producidos al año, pero la producción total de cinco plantas chinas oficialmente designadas, fue de 1.69 millones de ton en 2010 (Jewison y Gale, 2012). Con los datos de 2011 de la Oficina de la Industria de Alimentos Balanceados del Ministerio de Agricultura de China, Jewison y Gale (2012) señalaron que los cerdos consumieron la mayoría de los DDGS (37 por ciento), seguidos de las ponedoras (29 por ciento), pollos de engorde (19 por ciento) y acuicultura (9 por ciento), mientras que rumiantes y otros consumos representaron solo cuatro y dos por ciento, respectivamente.

En 2014 y 2015, China fue el mayor importador de soya, nabo, DDGS, sorgo, cebada y harina de pescado para alimentos para animales (Gale, 2015). Además, China es el mayor productor pecuario y fabricante de alimento para animales del mundo (Gale, 2015). Conforme aumenta la población humana en China igual que el consumo de productos alimenticios de origen animal, la demanda de muchos ingredientes importados, como los DDGS, seguirá en aumento. Sin embargo, Jewison y Gale (2012) señalaron que en el futuro la demanda de DDGS de EE. UU. en China dependerá de varios factores, entre los que se incluye el precio del maíz, soya y harina de soya; la política gubernamental china, como las recientes reformas al precio mínimo del maíz y los sistemas oficiales de reserva, así como el precio y la disponibilidad de otros sustitutos de ingredientes. Además, se espera que continúe en aumento de forma importante la demanda de China de ingredientes nacionales e importados para sus industrias ganadera y avícola en expansión.

Aproximadamente, el 66 por ciento de los DDGS producidos en EE. UU. los consume el ganado de engorde (45 por ciento), ganado lechero (31 por ciento), cerdos (15 por ciento), aves (8 por ciento) y otros (1 por ciento). El consumo futuro de los DDGS de EE. UU. va a depender del precio y la disponibilidad de ingredientes competidores o sustitutos como el maíz y la harina de soya. Cuando el diferencial de precios está a favor de los DDGS, se usarán más para reemplazar el maíz y/o la harina de soya en los alimentos para animales. En los últimos 12 meses (de julio de 2015 a junio de 2016) el precio spot de los DDGS estuvo entre el 86 y 115 por ciento del precio del maíz, del 37 al 50 por ciento del precio de la harina de soya y el costo

por unidad de proteína ha sido constantemente menor para los DDGS en comparación con la harina de soya (la diferencia va desde cerca \$0.37 a \$2.54 por unidad de proteína). Esta ventaja en el precio de la proteína de los DDGS los hace más competitivos como sustituto parcial de proteína en los alimentos balanceados comparado con la harina de soya en el mercado estadounidense.

Se espera que la producción de etanol y de DDGS crezca muy poco en EE. UU. en los próximos años, a menos que se implementen cambios en políticas gubernamentales que incrementen la producción de etanol. Sin embargo, no se espera que esto pase. La mayoría de los cambios en la industria estadounidense del etanol que han ocurrido y ocurrirán son para generar mayor valor de la producción y coproductos más diversificados. En la mayoría de las plantas de etanol de EE. UU. (más del 85 por ciento) se han hecho gastos menores en bienes de capital para la extracción de aceite de maíz de destilería. Algunas plantas de etanol harán otros gastos de bienes de capital, de menores a modestos, para implementar otras nuevas tecnologías de producción de etanol y coproductos. Estas tecnologías darán como resultado la producción de DDGS bajo en aceite (de menos del 6 por ciento), aceite de maíz de destilería, fibra de maíz para la producción de etanol celulósico, producción de DDG altos en proteína o DDGS altos en fibra, así como algunos coproductos especializados.

Diferencias de los procesos de producción de DDGS

Existe muy poca información publicada acerca de los procesos de producción de bebidas, combustible de etanol y de DDGS de China. Sin embargo, está bien establecido que la energía, al igual que la composición y digestibilidad de nutrientes de los DDGS se ven afectados por diversos factores como el tipo de granos utilizados, composición de nutrientes de estas materias primas, así como los diferentes métodos de procesamiento de bebidas y del combustible y los coproductos de etanol (Ingledew et al., 2009).

Diferencias en las materias primas

Las materias primas que las plantas estadounidenses y chinas usan para la producción de etanol y de DDGS son diferentes, pero no hay datos disponibles sobre la cantidad total, tipo y proporción de dichos insumos usados para su producción en China. Jewison y Gale (2012) dijeron que en 2010 usaban oficialmente declaradas cinco plantas de etanol, que usaban maíz, trigo y yuca como materia prima para producir 1.69 millones de ton de DDGS (4.5 por ciento del total de producción de DDGS de maíz de EE. UU.). En la primera década del siglo la

industria china de bebidas alcohólicas creció rápidamente, pero las materias primas usadas en la producción de etanol de ese país varían por región geográfica, tales como maíz, arroz, trigo, sorgo, papa y yuca (Gale et al., 2009). A menudo la producción de bebidas alcohólicas implica el uso de mezclas de granos, mientras que en la producción de combustible de etanol en EE. UU. se usa principalmente maíz como materia prima única. Hay pocas plantas de etanol en EE. UU. que usan sorgo o mezclas de sorgo y maíz como materia prima, pero los DDGS que estas plantas producen se comercializan y consumen nacionalmente. Además, solo alrededor del uno a dos por ciento de la producción total de DDGS de EE. UU. se deriva de las plantas de alcohol para beber, lo cual se cree que sea mucho menos que en China. Parece que gran parte de la producción de combustible de etanol y coproductos a base de maíz en China se lleva a cabo en la región del noreste, en donde se produce la mayoría del maíz. Sin embargo, aunque no hay datos sobre la cantidad de coproductos que se producen en los distintos tipos de plantas de etanol para bebidas y combustible de China, parece que los más abundantes son los coproductos de maíz.

Diferencias en los procesos de producción y contenido de nutrientes de los DDGS

Las plantas de EE. UU. utilizan una tecnología de producción más avanzada para la producción de etanol y DDGS que la que se usa en China. La mayoría de las plantas de etanol en Estados Unidos se construyeron después de 2004 y gran parte del equipo instalado es de acero inoxidable. Es fundamental que las plantas de etanol cuenten con facilidad de limpieza y que se mantenga un alto nivel de higiene para prevenir infecciones bacterianas durante la fermentación. En contraste, las plantas de etanol chinas que usan maíz como materia prima se construyeron con acero al carbono que se corroe con facilidad, lo que permite que durante la fermentación frecuentemente hayan infecciones bacterianas, lo cual puede ocasionar una fermentación incompleta, reducir el rendimiento de etanol y una calidad deficiente de DDGS. Además, la corrosión del acero al carbono de las plantas de etanol chinas ha llevado a un alto contenido de hierro (de 500 a 1,700 ppm) en los DDGS, comparado con las concentraciones en EE. UU. (de 120 a 150 ppm). Aunque esto pueda ser de poca importancia en lo que respecta al valor alimenticio de los DDGS, posiblemente contribuya al color más oscuro de este coproducto en China.

La mayor parte de las plantas de etanol (más del 90 por ciento) en Estados Unidos extraen el aceite parcialmente para fabricar de DDGS. Aunque una de las principales empresas de etanol (n = 27 plantas de etanol) produce DDGS con 4.5 a 5 por ciento de grasa cruda (base en como se alimenta), la mayoría de la industria en Estados Unidos produce con un contenido mínimo de 7 por ciento y hasta 14 por ciento de grasa cruda con base en como se alimenta. En contraste, Li et al. (2015) notificaron que entre las 25 muestras recolectadas de plantas chinas de etanol de bebida y combustible, alrededor del 44 por ciento contenía menos del seis por ciento de grasa cruda con base en como se alimenta. En otro estudio reciente, (Jie et al., 2013), obtuvo 28 fuentes de DDGS de maíz de diversas plantas de etanol en 11 provincias de China y dos muestras producidas en

EE. UU. importadas a China. El rango de contenido de grasa cruda (con base en como se alimenta) fue de 1.43 a 15.1 por ciento, en las que el 32 por ciento de las muestras contenía menos del seis por ciento. En contraste, las dos muestras de DDGS de EE. UU. analizadas en este estudio contenían 12.1 y 13.6 por ciento de grasa cruda. Kerr et al. (2013) evaluaron el valor energético y la composición química de 15 fuentes de DDGS de maíz producidas en EE. UU. El contenido de aceite está entre el 4.3 y 11.2 por ciento (con base en cómo se alimenta), pero solo dos muestras (13 por ciento) contenía menos del seis por ciento de grasa cruda. En resumen, al parecer una de las principales características que diferencian a los DDGS de ambos países es que en China hay una mayor proporción de bajos en aceite (menos del 6 por ciento de grasa cruda) que en EE. UU.

Un estudio reciente de Li et al. (2015) evaluó el valor energético y la composición química de 25 muestras de DDGS recolectadas de 17 plantas de etanol para bebidas (18 muestras) y combustible (siete muestras). Por ende, con base en la alta proporción de muestras recolectadas de la industria de etanol de bebidas, esta es una prueba más de que una de las características que diferencian a los de China y EE. UU. es que la mayoría de los DDGS de maíz de China los produce la industria de bebidas alcohólicas. Li et al. (2015) clasificaron las muestras de DDGS de China en cinco categorías con base en la composición de grasa cruda (base materia seca) y tipos de procesamiento utilizado:

1. DDGS alto en aceite (de 9.6 a 13.9 por ciento de proteína cruda) (13 muestras)
2. Cascarilla añadida alto en aceite (de 8.7 a 9.9 por ciento de grasa cruda; dos muestras)
3. DDGS parcialmente reducido en aceite (6.6 por ciento de grasa cruda; una muestra)
4. DDGS reducidos en aceite con eliminación de parte del germen (5.1 por ciento de grasa cruda; una muestra)
5. DDGS reducido en aceite "común" (de 2.82 a 4.9 por ciento de grasa cruda; ocho muestras).

Estas clasificaciones implican que hay mucha más variación en los procesos de producción de las plantas de etanol chinas que en las estadounidenses, con la característica común de la extracción parcial del aceite. Sin embargo, si las muestras recolectadas en el estudio Li et al. (2015) son un indicativo de la proporción de plantas de etanol chinas que extraen grandes cantidades de aceite, parece que hay de forma importante más contenido bajo en aceite (menos del 5 por ciento de grasa cruda, con base en materia seca) en los DDGS chinos que en los estadounidenses.

Xue et al. (2012) compararon tres muestras de DDGS de maíz chino producido en las provincias de Shandong, Jilin y Hebei con una muestra de DDGS chinos de arroz con salvado y dos muestras de DDGS de maíz de EE. UU. (convencional

y alto en proteína). La muestra de DDGS de arroz tuvo el contenido de grasa cruda y energía bruta más bajo y el mayor contenido de fibra cruda de todas las muestras. Las muestras de DDGS de maíz chino tuvieron un mayor contenido de fibra ácidodetergente (FAD) y un menor contenido de lisina que las muestras convencionales de EE. UU. Estos investigadores también reportaron que la proporción de lisina a proteína cruda de los DDGS chinos de maíz fue menor (1.93 por ciento) en comparación con los estadounidenses (2.87 por ciento). Esto implica que la digestibilidad de lisina de la muestra china sería menor que la muestra de EE. UU. Una mayor contenido de fibra, menor de energía bruta y de lisina son indicadores clave del valor alimenticio reducido de los DDGS chinos para cerdos y aves, comparado con la fuente estadounidense que se evaluó en este estudio. Sin embargo, el número limitado de muestras evaluadas por Xue et al. (2012) demostró que no hubieron diferencias significativas del contenido de energía metabolizable (EM) entre las tres fuentes de chinas (3,306 kcal/kg) comparado con la estadounidense (3,525 kcal/kg), aunque esta última tuvo numéricamente 219 kcal/kg más contenido de EM que el promedio de las otras tres. Además, el promedio de digestibilidad ileal estandarizada de lisina de las muestras de DDGS chinos de maíz fue menor (52 por ciento) comparado con los convencionales (57 por ciento) y altos en proteína (60 por ciento) de EE. UU.

Diferencias en los procesos de producción y el color de los DDGS

El color de los DDGS se ha convertido en un factor de calidad de gran importancia para algunos compradores en el mercado de exportaciones, el cual se utiliza para diferenciar la calidad real o percibida, así como el valor entre las diferentes fuentes. El color de los DDGS está correlacionado con varios componentes nutricionales y características físicas. En algunos casos, una fuente de DDGS de color claro puede inferir una digestibilidad de lisina y contenido de xantofilas más altos, y una mínima oxidación de lípidos. Por otro lado, una fuente de DDGS de color más oscuro pueden tener concentraciones más altas de otros nutrientes, en comparación con las fuentes más claras. Por ejemplo, la adición de niveles crecientes de solubles a la fracción de granos gruesos resulta en mayor contenido de energía, grasa cruda y minerales, con efectos mínimos sobre el contenido y digestibilidad de proteína cruda y aminoácidos, en comparación con las fuentes de color más claro que contienen menos solubles. Además, las muestras de color más oscuro parecen tener una biodisponibilidad de fósforo relativamente más alta para aves. El tamaño de partícula, el contenido de humedad y otras propiedades físicas de los DDGS también están correlacionadas con el color, pero es más difícil de evaluar el valor de estas relaciones desde la perspectiva de la fabricación de alimentos balanceados y de la nutrición.

Hace varios años, algunos comercializadores y compradores desarrollaron un sistema subjetivo de evaluación de color mediante una tarjeta de calificación de cinco colores (figura 1) para diferenciar el color entre las fuentes de DDGS.

Aunque hoy en día todavía se usa esta tarjeta de calificación de color de los DDGS en el mercado, muchos comercializadores

la han dejado de usar porque es demasiado subjetiva y resulta en discusiones frecuentes con los compradores, debido a las diferentes interpretaciones de la calificación de color real de este ingrediente. Como resultado, muchos de los contratos de comercialización que se negocian en la actualidad entre proveedores de EE. UU. y compradores extranjeros (especialmente de países asiáticos), contienen una garantía mínima de una medición de calidad cuantitativa de color (por ejemplo, L* - claridad u oscuridad del color). La garantía mínima que actualmente se usa para diferenciar la claridad del color de los DDGS es un Hunter L* mayor a 50. Sin embargo, cada vez más cantidades de DDGS de EE. UU. se exportan a varios países sin importar el color, pero para algunos mercados que exigen una garantía de un color claro (por ejemplo, L* mayor a 50), hay una prima de precio importante obtenida para aquellos comercializadores que puedan garantizarla en las fuentes que venden.

El uso de distintos procesos de producción y secado de las plantas de etanol de EE. UU. y China también conlleva a diferencias de color (figura 2). Por lo general, los DDGS estadounidenses son de un dorado claro, el preferido por los compradores chinos ya que se considera que el color es un indicador subjetivo de una mayor digestibilidad de proteína y aminoácidos, así como de valor alimenticio. De hecho, para

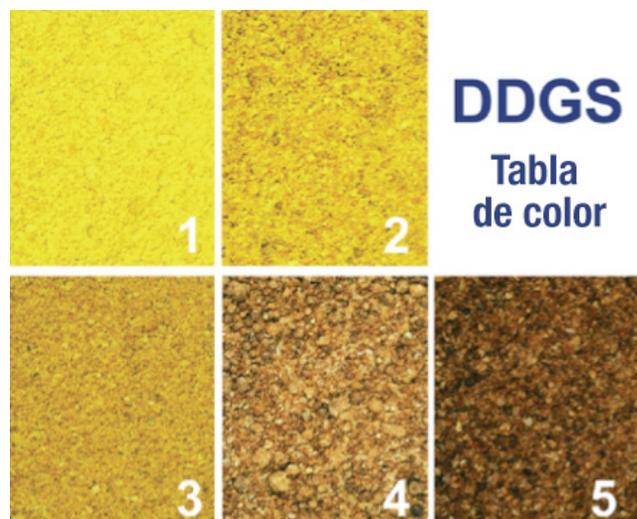


Figura 1. Ejemplo de tarjeta de calificación de color de DDGS



Figura 2. Comparación de color entre los DDGS de EE. UU. (izquierda) y los de China (derecha)

algunos compradores chinos el color es tan importante que en sus acuerdos de comercialización a menudo ofrecen una garantía mínima por un color claro (L^* mayor a 50). Los DDGS de China tienden a tener un color más oscuro, lo que insinúa un menor valor nutritivo.

Jie et al. (2013) obtuvieron 28 fuentes de DDGS de maíz de varias plantas de etanol de 11 provincias chinas y dos muestras de EE. UU. importadas a China. Estos investigadores midieron la claridad (L^*), rojez (a^*) y el amarillo (b^*) del color en estas muestras con un colorímetro HunterLab. Una baja calificación de color L^* (en una escala de 0 a 100) indica un color más oscuro y L^* y b^* tuvieron mayores correlaciones con la digestibilidad de lisina y aminoácidos (los cuales se han usado como indicadores generales del valor nutritivo) que a^* . Los valores L^* de las 28 fuentes de DDGS chinas iban de 30.9 a 59.5, a^* estuvo de 14.6 a 27.7 y b^* de 35.3 a 59.8. Aunque en este estudio solo se evaluaron dos muestras de EE. UU., las calificaciones de L^* estuvieron entre 54.6 y 57.3, a^* entre 18.4 y 19.7 y b^* entre 53.3 y 55.3. Solo cinco de las 28 muestras de China tuvieron calificaciones L^* mayores a 50, mientras que las dos de EE. UU. fueron mayores a 50, lo cual indica un color más claro. Además, el valor b^* de las dos fuentes de EE. UU. estuvo entre 53.3 y 55.3, en comparación con solo cinco fuentes chinas que tuvieron valores mayores a 50. Urriola et al. (2013) notificaron que el valor promedio de L^* entre 34 fuentes de DDGS de maíz de EE. UU. fue de 52.7 y el valor L^* puede llegar hasta 62.5. Por ende, otra característica distintiva de los DDGS de EE. UU. comparados con la mayoría de las fuentes de China es que por lo general, los primeros tienen un color más claro, lo que hace inferir que los aminoácidos (componentes de proteína) son más digestibles.

Diferencias de composición nutricional, consistencia, micotoxinas y valor alimenticio de los DDGS

Diferencias en la composición de nutrientes y consistencia

En general, el contenido de energía y nutrientes de los DDGS de EE. UU. es más consistente que en los chinos. Esto normalmente significa que los nutricionistas cargarán valores de nutrientes menos conservadores en la formulación del alimento, para así poder reemplazar ingredientes más costosos en mayor grado para reducir el costo general de la dieta, con menor riesgo de subalimentar energía y nutrientes a los animales.

Para tener una comparación objetiva de las diferencias en composición de nutrientes, se resumen los datos de tres informes recientemente publicados sobre DDGS de China (**cuadro 1**). Además, se resume la composición de nutrientes de las fuentes de DDGS de maíz de EE. UU. de nueve informes publicados (**cuadro 1**) y de Kerr et al. (2013). Todos los datos se expresan con base en materia seca (materia seca) (**cuadro 1**).

En general, el contenido de grasa, fibra y proteína cruda contribuye al valor total de energía metabolizable, mientras que el contenido de proteína cruda es un indicador poco preciso

de la digestibilidad de aminoácidos. La energía, aminoácidos y fósforo son los tres componentes nutritivos más caros del alimento. Aunque los DDGS y otros *commodities* se cotizan y comercializan con base en el contenido de humedad, proteína cruda, grasa cruda y fibra cruda, los nutricionistas usan el estimado de energía metabolizable (EM), aminoácidos digestibles (en particular, lisina) y fósforo digestible para formular dietas porcinas y avícolas. La mayoría de los DDGS que se usan en China son para dietas porcinas y avícolas. Por ende, se debe comparar el contenido de EM, aminoácidos digestibles (en particular la lisina) y fósforo entre dichas fuentes para determinar si se tratan de diferencias sustanciales de valor alimenticio.

El promedio de contenido de humedad de las fuentes de DDGS chinas tiende a ser menor que el de las estadounidenses, con diferencias mínimas de promedio de contenido de proteína cruda, grasa cruda y cenizas (**cuadro 1**). Sin embargo, el rango (variación) de contenido de grasa cruda entre las fuentes de DDGS de China es mayor que entre las de EE. UU. Además, el contenido de fibra neutrodetergente (FND) de las de EE. UU. es más baja y menos variable que las chinas. El contenido de grasa cruda menor y más variable junto con el mayor contenido de fibra y más variable de los DDGS chinos comparado con los estadounidenses indica que el contenido de energía metabolizable (EM) de los primeros sería más bajo y más variable el de los segundos para cerdos y aves. Esto se confirma al comparar las determinaciones de EM en cerdos de DDGS de maíz de EE. UU. (Kerr et al., 2013) con las determinaciones de los de China (Xue et al., 2012; Li et al., 2015). Kerr et al. (2013) notificaron un rango más estrecho del contenido de EM en las 15 fuentes de DDGS de EE. UU. (3,266 – 3,696 kcal/kg) que Xue et al. (2012; 3,047 – 3,549 kcal/kg) y Li et al. (2015; 2,955-3,899 kcal/kg).

El contenido de almidón de las fuentes de DDGS de China es sustancialmente mayor que el de las de EE. UU. (**cuadro 1**), de lo que se deduce que hay una fermentación incompleta del almidón a etanol y menor digestibilidad de los aminoácidos. Durante el proceso de secado de los DDGS el almidón puede reaccionar químicamente con el aminoácido lisina para formar un enlace químico que torna indigestible a la lisina. De hecho, el promedio de digestibilidad ileal estandarizada (DIE) de la lisina en las muestras chinas de DDGS de maíz (Xue et al., 2012) fue menor (52 por ciento) comparado con los convencionales de EE. UU. (57 por ciento) y los altos en proteína (60 por ciento). Estas diferencias las confirmó el resumen de datos de nueve informes publicados (**cuadro 1**) que indican que el promedio de digestibilidad DIE de la lisina de los DDGS de maíz de EE. UU. es de 63 por ciento.

El contenido de fósforo de los DDGS chinos es mucho más bajo y más variable (Xue et al., 2012; Li et al., 2015) que el que se encuentra en las fuentes de EE. UU. (Kerr et al., 2013). Estos resultados implican que en muchas de las plantas de etanol de China, antes de producir DDGS se añaden menos de solubles condensados (con alto contenido de fósforo) a los granos gruesos. El contenido de fósforo en las dietas porcinas y avícolas es otra ventaja comparativa de los DDGS de maíz estadounidenses contra los chinos.

Cuadro 1. Comparación de los datos publicados de la composición de nutrientes de los DDGS de maíz producidos en China y en EE. UU. (base materia seca)

Medición	Jie et al. (2013) DDGS de maíz de China	Xue et al. (2012) DDGS de maíz de China	Li et al. (2015) DDGS de maíz de China	Resumen DDGS de maíz de EE. UU.¹	Kerr et al. (2013), DDGS de maíz de EE. UU.
Humedad %	6.49 - 12.1 (8.5)	10.7 - 10.9 (10.9)	9.6 - 13.5 (11.4)	6.6 - 14.7 (11.2)	10.0 - 15.2 (12.4)
Proteína cruda %	25.4 - 32.3 (29.6)	26.4 - 32.0 (28.8)	28.5 - 36.8 (32.2)	27.2 - 40.8 (30.8)	27.7 - 32.7 (30.5)
Grasa cruda %	1.5 - 16.2 (9.3)	9.2 - 12.6 (10.5)	2.8 - 13.6 (8.6)	4.6 - 14.1 (10.6)	4.9 - 13.2 (9.7)
FND %	45.0 - 65.8 (54.3)	43.4 - 49.5 (46.4)	31.0 - 46.6 (37.1)	30.2 - 49.6 (38.6)	28.8 - 44.0 (35.4)
Genizas %	2.1 - 8.4 (5.5)	ND ²	2.9 - 9.1 (5.4)	1.78 - 6.6 (4.4)	4.3 - 6.1 (5.1)
Almidón %	ND	ND	5.3 - 16.3 (11.6)	ND	0.84 - 3.89 (2.2)
P %	ND	0.25 - 0.55 (0.39)	0.33 - 1.01 (0.75)	ND	0.71 - 0.91 (0.84)
Lisina %	ND	0.46 - 0.67 (0.56)	0.74 - 1.08 (0.91)	0.55 - 1.36 (0.94)	ND
Lisina DIE ³ %	ND	0.19 - 0.29 (0.25)	ND	0.22 - 0.92 (0.59)	ND

¹Datos obtenidos de Fastinger y Mahan (2006); Stein et al. (2006); Pahn et al. (2008); Stein et al. (2009); Urriola et al. (2009); Jacela et al. (2010); Almeida et al. (2011); Kim et al. (2012) and Soares et al. (2012)

²ND = sin datos

³DIE= Digestibilidad ileal estandarizada

La lisina es el primer aminoácido limitante de las dietas de cerdos y aves, lo que significa que es el aminoácido que probablemente sea más deficiente en las dietas de maíz y harina de soya. Por ende, el contenido y digestibilidad de la lisina son indicadores clave del valor nutritivo de varias fuentes de DDGS. Además, el contenido y digestibilidad de la lisina es altamente variable entre ambos orígenes. Con fundamento en los datos limitados que hay para poder comparar la digestibilidad de la lisina entre China y EE. UU., parece que una mayor proporción de los DDGS de EE. UU. tienen mayor digestibilidad de lisina que las chinas (Xue et al., 2012).

Diferencias en contenido de micotoxinas de los DDGS

Los estudios han mostrado que las micotoxinas en los ingredientes son una preocupación constante y el principal problema en las industrias de alimentos balanceados y pecuaria de China. Muy pocos productores de granos en China tienen acceso a equipo de secado y almacenamiento adecuado del grano, lo cual lleva a una alta prevalencia y concentraciones de micotoxinas que pueden tener efectos adversos significativos en la salud y el desempeño cuando se da alimento contaminado al ganado y las aves. Aunque es probable que el maíz y otros granos que se producen en EE. UU. y en otras partes del mundo contengan micotoxinas, dependiendo de las condiciones climáticas de crecimiento, cosecha y almacenamiento, son significativamente menores la prevalencia de la contaminación y la concentración de micotoxinas que para los granos y DDGS producidos en China.

Uno de los principales factores limitantes de las tasas de inclusión de los DDGS en la dieta es el contenido de micotoxinas. Los nutricionistas se esfuerzan por minimizar el contenido total de micotoxinas porque causan reducción en el desempeño animal y una salud deficiente. La prevalencia de la contaminación y concentración de micotoxinas en los

DDGS de EE. UU. es mucho menor que en los de China. Biomin (2014) llevó a cabo una encuesta para recolectar y analizar las micotoxinas de 4,218 muestras de ingredientes de más de 50 países. Los ingredientes recolectados en Asia tuvieron mayores concentraciones de la mayoría de las micotoxinas determinadas, además de que 65 por ciento de las muestras tenían más de una micotoxina, comparadas con las muestras de Norte y Suramérica, el Medio Oriente y África. Li et al. (2014) evaluaron 55 ingredientes (incluidas 17 muestras de DDGS) y 76 alimentos porcinos completos producidos en la región de Pekín, en China. Sus resultados mostraron que los DDGS tuvieron la contaminación por micotoxinas más grave de todos los ingredientes, pues el 6, 88 y 41 por ciento de las muestras excedían los límites regulatorios chinos de aflatoxina B1 (50 ppb), deoxinivalenol (1,000 ppb) y zearalenona, respectivamente. En otro estudio (Guan et al., 2011), se recolectaron 83 muestras de alimentos completos e ingredientes de varias regiones de China, los cuales incluían cinco de DDGS de China. Los resultados de este estudio mostraron que el 100 por ciento de las muestras presentaron concentraciones positivas de micotoxinas, además de que fue mayor la concentración promedio de las seis micotoxinas que el promedio general de todos los ingredientes.

En años recientes se han publicado dos amplios estudios de contaminación por micotoxinas en DDGS de EE. UU. (Zhang et al., 2009; Khatibi et al., 2014). De 2006 a 2008, Zhang et al. (2009) recolectaron 235 muestras de DDGS de 20 plantas de etanol de EE. UU. y de 23 contenedores de embarques de exportación. Los resultados de este estudio mostraron que:

1. Ninguna de las muestras de DDGS contenían concentraciones de aflatoxinas o deoxinivalenol superiores a los lineamientos para uso en alimentos para animales de la FDA de EE. UU.

2. Ninguna de las muestras de DDGS contenía concentraciones de fumonisinas mayores a los lineamientos de la FDA para uso en el alimento de vacas lecheras, ganado de engorde, cerdos, aves y acuicultura. Solo el diez por ciento de las muestras tuvo concentraciones mayores a los niveles máximos para uso en el alimento de equinos (caballos) y conejos (las especies más sensibles a las fumonisinas).
3. Ninguna de las muestras contenía concentraciones detectables de toxina T-2 y la mayoría no tuvo concentraciones detectables de zearalenona.
4. Los contenedores usados para la exportación de DDGS no contribuyeron a la producción de micotoxinas.

Otra encuesta de micotoxinas llevada a cabo por Khatibi et al. (2014) involucró el análisis de los tricotecnos deoxinivalenol (DON), 15-acetildeoxinivalenol (15-ADON), 3-acetildeoxinivalenol (3-ADON), nivalenol (NIV) y zearalenona (ZON) en 141 muestras de DDGS de maíz de 78 plantas de etanol ubicadas en 12 estados de EE. UU. En 2011, hubo una alta prevalencia inusual de *Fusarium* spp. en la cosecha de maíz de EE. UU., lo cual a veces ocurre en los años de condiciones climáticas adversas durante la temporada de cultivo. No se ha publicado ningún otro estudio que evalúe 15-ADON, 3-ADON y NIV en los DDGS. El 69 por ciento de las muestras no contenía niveles detectables de DON y las que sí, eran de uno a cinco ppb de DON. Solamente el 5 por ciento de las muestras resultó por arriba de los niveles de recomendación de la FDA para cerdos. El 85 por ciento de las muestras no presentó concentraciones detectables de 15-ADON y ninguna tuvo niveles detectables de 3-ADON o NIV. Solo el 19 por ciento de las muestras tuvo concentraciones detectables de ZON.

Los resultados de estos estudios indican que en los DDGS de EE. UU. hay mucho menor riesgo de concentraciones de micotoxinas que en las muestras de China (Guan et al, 2011; Li et al., 2014). Como resultado, los DDGS de EE. UU. pueden usarse en mayores tasas de inclusión en la dieta que los de China y al mismo tiempo minimizar el riesgo de exceder la concentración total de micotoxinas en la dieta por arriba de los niveles recomendados.

Diferencias en valor alimenticio y uso de los DDGS en alimentos balanceados

La mayoría de los DDGS que se usan en China los consumen las industrias porcina y avícola. Los DDGS de EE. UU. tienen varias ventajas frente a los chinos, en particular para las dietas de cerdos, aves y ganado lechero. Debido a que los DDGS de China tienen mayor prevalencia y concentraciones de micotoxinas que los de EE. UU., al alimentar con estos últimos se reduce significativamente el riesgo de disminución del desempeño animal y de la salud, al igual que la contaminación por micotoxinas de la leche de vaca. Además, generalmente los DDGS de EE. UU. son menos variables en energía y contenido de nutrientes (el maíz es la principal materia prima usada y por lo general son similares los procesos de producción en todas las plantas de etanol) y presentan mayor digestibilidad de la lisina y contenido de fósforo, lo que los hace más valiosos en formulación de alimento.

Jewison y Gale (2012) resumieron los estimados de las tasas de inclusión en la dieta de varias especies animales (**cuadro 2**). Jewison y Gale (2012) calcularon también que el consumo total de DDGS por especies en China es de 10 por ciento en ganado lechero, 20 por ciento en cerdos, 60 por ciento en aves y 10 por ciento en acuicultura.

Riesgos potenciales de inocuidad de los DDGS chinos

Debido a la contaminación con melamina en las fórmulas infantiles y otros escándalos de inocuidad alimentaria que en años recientes ocurrieron con productos chinos, existe una preocupación y escepticismo generalizados por sus alimentos balanceados y la inocuidad alimentaria. Gale y Buzby (2009) indicaron que los riesgos de inocuidad alimentaria son difíciles de manejar en los productos alimenticios chinos, debido a la escasa aplicación de normas por parte del gobierno, el fuerte uso de químicos agrícolas y la abundante contaminación ambiental. Como resultado, se desarrolló tecnología para distinguir el país de origen de los DDGS y de otros productos (Tena et al., 2015). El uso de análisis NIR ha permitido resultados excelentes para distinguir las muestras de DDGS de China de las muestras mezcladas de Europa y EE. UU. (Tena et al., 2015). Esto indica que entre las muestras de los DDGS producidos en China existen distintas composiciones y diferencias de calidad comparado con los producidos en Europa y EE. UU.

Cuadro 2. Comparación del porcentaje de tasas de inclusión en la dieta de ganado lechero, de engorde, cerdos y aves en China y EE. UU. (Jewison y Gale, 2012)

Especie	China	Estados Unidos
Ganado lechero	20 al 30 por ciento	10 al 20 por ciento
Ganado de engorde	No hay datos disponibles	10 al 40 por ciento
Cerdos	10 al 12 por ciento	10 al 50 por ciento
Aves	5 al 10 por ciento	5 al 10 por ciento

Demanda del mercado mundial de DDGS de EE. UU.

Desde 2007 la exportación de DDGS de EE. UU. ha ido en aumento conforme se incrementan también la producción de etanol y DDGS; más de 31 países diferentes los importan. Los principales mercados de exportación son México, varios países de Asia, Canadá y Turquía. Este crecimiento de la demanda mundial indica que los DDGS de EE. UU son un ingrediente económicamente competitivo en muchos países de los cinco continentes y son atractivos gracias a su gran calidad y excelente valor nutritivo, comparado con otras alternativas.

Debido a que los DDGS son un ingrediente alto en energía y moderado en proteína; tienden a seguir más de cerca al precio del maíz que el de la harina de soya. Los precios de los DDGS de EE. UU. se basan en el mercado mundial, con garantías mínimas de contenido de proteína y grasa crudas. Históricamente, los DDGS de EE. UU se cotizan con base en la combinación de las garantías mínimas del contenido de proteína y grasa “profat”. Sin embargo, la extracción parcial de aceite de maíz previa a la fabricación de DDGS ha complicado el uso de esta medida combinada para el establecimiento del precio, porque el contenido de proteína no aumenta en la misma medida que disminuye el contenido de grasa cruda en los DDGS reducidos en aceite. Por lo tanto, muchos compradores y vendedores establecen el precio con base en las garantías mínimas individuales de proteína cruda y grasa cruda.

En comparación de otros ingredientes, las políticas chinas de aranceles e impuestos son factores importantes que afectan la importación de DDGS (Jewison y Gale, 2012). Hasta 2012, los DDGS no estaban sujetos a cuotas de importación, estaban exentos del impuesto al valor agregado (IVA) y se les imponía un arancel relativamente bajo (cinco por ciento). En contraste, las importaciones de maíz estaban reguladas por un sistema de cuotas de arancel y sujetas a un arancel del uno por ciento e IVA del 13 por ciento.

Los compradores chinos de ingredientes son muy sensibles a los precios. Las grandes cantidades de DDGS de EE. UU. adquiridas por compradores chinos en los últimos años se atribuyen a menudo a un menor precio en comparación con el maíz de su país, pero parece ser que su mejor calidad, consistencia y valor nutritivo en comparación con los DDGS de China son factores muy importantes. Como ejemplo, Jewison y Gale (2012) indicaron que de junio a diciembre de 2011, el precio promedio de las importaciones de DDGS de EE. UU. a China fue 19 por ciento más bajo que el costo del maíz nacional chino y 35 por ciento menos que el de la harina de soya. Sin embargo, en este mismo período, el precio de los DDGS nacionales (del noreste de China) fue 13 por ciento menor al precio de los importados.

No obstante, los compradores chinos están dispuestos a pagar una prima por los DDGS importados de EE. UU. por su mejor calidad y consistencia comparado con la de su país (Jewison y Gale, 2012). Los compradores chinos prefieren el color más

claro y dorado de los DDGS de EE. UU. comparados con los suyos, porque tienen un mayor valor alimenticio y presentan menos problemas de aceptación del cliente por el color de los alimentos terminados.

Debido a la alta demanda de materias primas para la producción de alimentos balanceados, se exportan muy pocos o nada de DDGS producidos en China. En el noreste de China abunda la producción y abastecimiento de maíz y es ahí donde se produce la mayoría de los DDGS nacionales (Jewison y Gale, 2012). Sin embargo, en el sur de China es donde se produce gran parte de los cerdos y aves, así como de alimentos balanceados, lo que ocasiona altos costos de transporte para mover esos ingredientes a donde se consumen. Como resultado, el precio del maíz al sur de China (por ejemplo, Cantón) es de 12 a 15 por ciento mayor que en el noreste (Jewison y Gale, 2012). Por ende, el sur es la principal ubicación geográfica que usa DDGS importados de EE. UU.

Como resultado, los DDGS importados de EE. UU. tienden a utilizarse en zonas cercanas a los puertos debido al costo de transporte para transportarlos al interior. Por esta razón, los DDGS chinos se usan en mayor medida en zonas cercanas a las plantas de etanol.

Bibliografía

- Almeida, F. N., G. I. Petersen, and H. H. Stein. 2011. Digestibility of amino acids in corn, corn coproducts, and bakery meal fed to growing pigs. *J. Anim. Sci.* 89: 4109-4115.
- Biomim. 2014. Mycotoxins: Science and solutions. *Biomim magazine*, April, 2014.
- Fabiosa, J., J. Hansen, H. Matthey, S. Pan, and F. Tuan. 2009. Assessing China's potential import demand for distillers dried grain: Implications for grain trade. *CARD Staff Report 09-SR 104*, December, 2009.
- Fastinger, N. D., and D. C. Mahan. 2006. Determination of the ileal amino acid and energy digestibilities of corn distillers dried grains with solubles using grower-finisher pigs. *J. Anim. Sci.* 84: 1722-1728.
- Gale, F. 2015. Development of China's feed industry and demand for imported commodities. *USDA-ERS Outlook Report FDS-15K-01*, November 2015.
- Gale, F., and J.C. Buzby. 2009. Imports from China and food safety issues. *ERS Economic Information Bulletin* 52, July, 2009.
- Guan, S., M. Gong, Y. Yin, R. Huang, Z. Ruan, T. Zhou, and M. Xie. 2011. Occurrence of mycotoxins in feeds and feed ingredients in China. *J. Food Ag. Env.* 9:163-167.

- Ingledeew, W.M., D.R. Kelsall, G.D. Austin, and C. Kluhspies. 2009. *The Alcohol Textbook*, 5th Ed., Nottingham University Press, Nottingham, U.K.
- Jacela, J. Y., H. L. Frobose, J. M. DeRouche, M. D. Tokach, S. S. Dritz, R. D. Goodband, and J. L. Nelssen. 2010. Amino acid digestibility and energy concentration of high-protein corn dried distillers grains and high-protein sorghum dried distillers grains with solubles for swine. *J. Anim. Sci.* 88: 3617-3623.
- Jewison, M., and F. Gale. 2012. China's market for distillers dried grains and the key influences on its longer run potential. USDA-ERS Outlook Report FDS-12g-01, August 2012.
- Jie, Y.Z., J.Y. Zhang, L.H. Zhao, Q.G. Ma, and J. Cheng. 2013. The correlation between the metabolizable energy content, chemical composition and color score in different sources of corn DDGS.
- Kerr, B.J., W.A. Dozier, and G.C. Shurson. 2013. Effects of reduced-oil corn distillers dried grains with solubles composition on digestible and metabolizable energy value and prediction in growing pigs. *J. Anim. Sci.* 91:3231-3243.
- Khatibi, P.A., N.J. McMaster, R. Musser, and D.G. Schmale III. 2014. Survey of mycotoxins in corn distillers' dried grains with solubles from seventy-eight ethanol plants in twelve states in the U.S. in 2011. *Toxins* 6:1155-1168.
- Kim, B. G., D. Y. Kil, Y. Zhang, and H. H. Stein. 2012. Concentrations of analyzed or reactive lysine, but not crude protein, may predict the concentration of digestible lysine in distillers dried grains with solubles fed to pigs. *J. Anim. Sci.* 90: 3798-3808.
- Li, P., D.F. Li, H.Y. Zhang, Z.C. Li, P.F. Zhao, Z.K. Zeng, X. Xu, and X.S. Piao. 2015. Determination and prediction of energy values in corn distillers dried grains with solubles with varying oil content for growing pigs. *J. Anim. Sci.* 93:3458-3470.
- Li, X., L. Zhao, L., Y. Fan, Y. Jia, L. Sun, S. Ma, C. Ji, Q. Ma, and J. Zhang. 2014. Occurrence of mycotoxins in feed ingredients and complete feeds obtained from the Beijing region of China. *J. Anim. Sci. Biotech.* 5:37-45.
- Pahm, A. A., C. Pedersen, D. Hoehler, and H. H. Stein. 2008. Factors affecting the variability in ileal amino acid digestibility in corn distillers dried grains with solubles fed to growing pigs. *J. Anim. Sci.* 86: 2180-2189.
- Soares, J. A., H. H. Stein, V. Singh, G. S. Shurson, and J. E. Pettigrew. 2012. Amino acid digestibility of corn distillers dried grains with solubles, liquid condensed solubles, pulse dried thin stillage, and syrup balls fed to growing pigs. *J. Anim. Sci.* 90: 1255-1237.
- Stein, H. H., S. P. Connot, and C. Pedersen. 2009. Energy and nutrient digestibility in four sources of distillers dried grains with solubles produced from corn grown within a narrow geographical area and fed to growing pigs. *Asian-Australas. J. Anim. Sci.* 22: 1016-1025.
- Stein, H. H., M. L. Gibson, C. Pedersen, and M. G. Boersma. 2006. Amino acid and energy digestibility in ten samples of distillers dried grain with solubles fed to growing pigs. *J. Anim. Sci.* 84: 853-860.
- Tena, N., A. boix, and C. von Holst. 2015. Identification of botanical and geographical origin of distillers dried grains with solubles by near infrared microscopy. *Food Control* 54:103-110.
- Urriola, P. E., D. Hoehler, C. Pedersen, H. H. Stein, and G. C. Shurson. 2009. Amino acid digestibility of distillers dried grains with solubles, produced from sorghum, a sorghum-corn blend, and corn fed to growing pigs. *J. Anim. Sci.* 87: 2574-2580.
- Urriola, P.E., L.J. Johnston, H.H. Stein, and G.C. Shurson. 2013. Prediction of the concentration of standardized ileal digestible amino acids in distillers dried grains with solubles. *J. Anim. Sci.* 91:4389-4396.
- Xue, P.C., B. Dong, J.J. Zang, Z.P. Zhu, and L.M. Gong. 2012. Energy and standardized ileal amino acid digestibilities of Chinese distillers dried grains, produced from different regions and grains fed to growing pigs. *Asian-Aust J. Anim. Sci.* 25:104-113.
- Zhang, Y. J. Caupert, P.M. Imerman, J.L. Richard, and G.C. Shurson. 2009. The occurrence and concentration of mycotoxins in U.S. distillers dried grains with solubles. *J. Agric. Food Chem.* 57:9828-9837.

CAPÍTULO 9

Características físicas y químicas relacionadas con el manejo y el almacenamiento de los DDGS

Introducción

EN COMPARACIÓN DE OTROS INGREDIENTES, LOS DDGS PRESENTAN ALGUNAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS que afectan sus particularidades de almacenamiento y manejo. El uso de DDGS en el alimento para ganado, aves y acuicultura ha creado varios desafíos en las distintas etapas del manejo, transporte, almacenamiento y fabricación de los ingredientes, tales como la dificultad de descarga de carros de ferrocarril, contenedores y buques a granel; la dificultad de mover y almacenarlos con alimentadores sin fin y silos de almacenamiento convencionales; la calidad y tasas de producción del pélet (descritas con detalle en los **capítulos 17, 22 y 25**) y mantener la variabilidad de nutrientes para evitar el riesgo de que el alimento no cumpla las especificaciones de nutrientes deseadas (descritas con detalle en los **capítulos 7, 21 y 24**).

Es esencial que haya un almacenamiento adecuado del ingrediente para preservar su valor nutritivo y prevenir la descomposición. La condición original de un ingrediente es el factor más importante que afecta la preservación de la calidad durante el almacenamiento y está influenciada por el contenido de humedad, humedad relativa y temperatura (Mills, 1989). En última instancia, con el tiempo la humedad del interior del ingrediente llega al equilibrio con el aire al interior y entre partículas y dependiendo de las condiciones, puede llevar al crecimiento de hongos y otros microorganismos nocivos (Mills, 1989). Se han establecido concentraciones máximas aceptables de humedad en los granos, que varían entre el tipo de grano en diferentes períodos de almacenamiento (Mills, 1989). Además, para prevenir el crecimiento fúngico (menor al 70 por ciento), crecimiento de bacterias (menor al 90 por ciento) e insectos en el almacenamiento (menor al 60 por ciento; Mills, 1989) se establecieron niveles máximos de humedad relativa en los granos. Sin embargo, es importante recordar que la humedad y la humedad relativa interactúan con la temperatura en el ambiente de almacenamiento. Si se airea la masa, es posible mantener durante varios meses las altas temperaturas del grano e ingredientes al momento de cargarlos en el silo de almacenamiento. La temperatura y el contenido de humedad determinan el alcance de actividades enzimáticas y biológicas del grano o ingrediente, y las diferencias de temperatura dentro de la masa almacenada pueden aumentar el riesgo de crecimiento fúngico por la migración de humedad (Mills, 1989). Desafortunadamente, no se han realizado estudios para determinar las condiciones óptimas de almacenamiento para mantener la calidad de los DDGS y prevenir el deterioro durante períodos prolongados o bajo diferentes condiciones climáticas. Como resultado, por lo general se supone que es aceptable el secado de los DDGS a un contenido de humedad menor al 12 por ciento bajo temperaturas y humedad moderadas durante el almacenamiento.

Asignación del espacio en los silos de almacenamiento

Cuando una planta de alimentos balanceados comercial usa por primera vez un nuevo ingrediente, se debe identificar o construir un espacio de almacenamiento adecuado. Es poco común que una planta de alimentos balanceados tenga un silo abierto o espacio de almacenamiento sin usar para alojar al ingrediente nuevo. Aunque una solución sencilla es decidir dejar de usar un ingrediente existente y designar al nuevo ingrediente a dicho silo de almacenamiento, es muy difícil hacerlo sin crear problemas en el proceso de fabricación (Behnke, 2007). Si el volumen del silo, la configuración de la tolva y el diseño del alimentador sin fin no son aptos para el nuevo ingrediente, es necesario explorar otras opciones (Behnke, 2007). Al decidir la ubicación de los ingredientes en los silos, una de las consideraciones más importantes es determinar las tasas de inclusión en la dieta esperadas de todos los alimentos fabricados para calcular la tasa de uso diario o mensual, así como su frecuencia de uso (Behnke, 2007). Tal vez la segunda consideración importante esté relacionada con las propiedades físicas tales como la densidad de masa y características de flujo del importante.

Puenteo, apelmazamiento y capacidad de flujo de los DDGS

Uno de los mayores retos del manejo de los DDGS es su propensión al puenteo, apelmazamiento y escasa capacidad de flujo en el momento de descargarlos de los carros de ferrocarril, contenedores y buques a granel. La capacidad de flujo se define como “el movimiento relativo de un volumen de partículas entre partículas vecinas o a lo largo de la superficie del contenedor” (Pelig, 1977). Desafortunadamente, algunas fuentes de DDGS tienen una mala capacidad de flujo y características de manejo (Bhadra et al., 2008), lo que impide el uso rutinario de carros de ferrocarril para el transporte. Esto ha llevado al desarrollo de equipo de descarga especialmente diseñado para buques a granel y contenedores, lo cual ha limitado su uso en las dietas de los animales debido al puenteo en los contenedores de almacenamiento a granel.

Muchos factores afectan el flujo de un ingrediente a granel (Peleg, 1977) y ninguna medida por sí sola describe de forma adecuada la capacidad de flujo (Bhadra et al., 2008). Sin embargo, aunque el contenido de humedad de los DDGS y la humedad relativa del ambiente son los principales factores que contribuyen al puenteo, el apelmazamiento y a la mala capacidad de flujo, hay otros factores como el tamaño de

partícula, proporción de solubles condensados añadidos a la fracción de granos previo al secado, temperatura del secador, contenido de humedad a la salida del secador y otros que también se han atribuido a este problema (Ganesan et al., 2008a,b,c). Generalmente el contenido de humedad de los DDGS está entre 10 y 12 por ciento para evitar el deterioro por crecimiento fúngico durante el almacenamiento a largo plazo. Sin embargo, los DDGS son también higroscópicos y pueden aumentar gradualmente el contenido de humedad durante la exposición a condiciones húmedas por períodos largos de almacenamiento (Ganesan et al., 2007). Las propiedades higroscópicas de los DDGS llevan al puenteo, apelmazamiento y a una menor capacidad de flujo durante el transporte y el almacenamiento (Rosentrater, 2007).

Debido a que en las plantas de etanol existe una capacidad de almacenamiento limitada para los DDGS, a veces se cargan en buques de transporte a las pocas horas después de salir del secador antes de que se equilibre la humedad. Cuando esto sucede, los DDGS se endurecen y se vuelven una masa sólida en los camiones, carros de ferrocarril y contenedores, lo que hace que sea muy difícil descargarlos. Sin embargo, si se deja que se enfríen para que la humedad puede equilibrarse antes de la carga, mejora enormemente la capacidad de flujo. En la actualidad, antes de la carga la mayoría de las plantas de etanol implementan un “curado” mínimo de 24 horas, o período de equilibrio de humedad antes de la carga para evitar el puenteo y apelmazamiento, y así prevenir daños y costos a los carros de ferrocarril durante la descarga. Lo ideal es mantener los DDGS de cinco a siete días para dejar que se dé el equilibrio de humedad completo, para que se rompa el puenteo líquido que se forma en la masa enfriada, lo cual minimiza las dificultades de manejo futuras (Behnke, 2007). Desafortunadamente, en operaciones continuas, la mayoría de las plantas de etanol solo cuentan con dos o tres días de capacidad de almacenamiento, lo cual resulta en la incapacidad de brindar los cinco a siete días para el equilibrio adecuado de la humedad.

La relación de equilibrio entre el contenido de humedad y humedad relativa del ambiente circundante de los sólidos a granel se ve afectada por las isotermas de adsorción. Una isoterma de adsorción indica el contenido de agua correspondiente a una temperatura específica constante en un nivel de humedad específico. Por ende, conforme aumenta la humedad relativa en el ambiente de almacenamiento, aumenta la adsorción y ocasiona la formación de un puente líquido entre partículas (Mathlouthi y Roge, 2003). La adsorción (capacidad de retener agua en la superficie externa o interna de un material) y la desorción (liberación del agua a través o de una superficie) de humedad bajo condiciones húmedas es compleja y se ve afectada por la concentración de carbohidratos, azúcares, proteínas, fibra y minerales de un ingrediente (Chen, 2000). Es importante comprender esta relación de los DDGS para determinar los niveles críticos de humedad y humedad relativa que ocasionan el puenteo y apelmazamiento durante el transporte y el almacenamiento.

Kingsly y Ileleji (2009) mostraron la formación de puenteo líquido en los DDGS cuando la humedad relativa llegaba al 60 por

ciento. Con una humedad relativa de 80 por ciento, los DDGS alcanzaron una saturación de la humedad máxima y al 100 por ciento el puenteo líquido formado por la adsorción de humedad se endureció y llevó a la formación de un puente sólido conforme se reducía la humedad. Estos resultados indican que el aumento de la humedad relativa durante el transporte y el almacenamiento ocasiona puenteo irreversible entre las partículas de DDGS y lleva a la acumulación de partículas (formación de grumos), apelmazamiento y reducción de la capacidad de flujo.

Otro enfoque que algunas plantas de etanol han intentado usar para mejorar la densidad de masa y capacidad de flujo es el peletizado. Investigadores de la Universidad Estatal de Kansas evaluaron la utilización de diversas condiciones de temperatura y tamaños de dados del pélet para facilitar el peletizado, propiedades físicas y características de flujo de los DDGS, y mostraron que casi cualquier combinación de condiciones de peletización mejoraba su capacidad de flujo (Behnke, 2007). Sin embargo, por varias razones este enfoque no se ha implementado en la industria del etanol de EE. UU. Primero, sería necesario que las plantas de etanol existentes tuvieran un costo adicional por la necesidad de comprar, instalar y operar calderas y peletizadoras costosas; se requeriría la capacitación de personal y costos de la mano de obra adicionales así como espacio de almacenamiento extra. Además, la mayoría de los clientes de DDGS se rehúsan a comprarlos peletizados porque tienen la percepción de que están adulterados con otros “rellenos”, de que se puede reducir la digestibilidad de aminoácidos y nutrientes por el tratamiento térmico durante el peletizado y el costo añadido de volver a molerlos antes de agregarlos a otros ingredientes para fabricar alimentos completos en la planta.

Efectos del contenido de aceite en la capacidad de flujo de los DDGS

Ya se han evaluado las propiedades físicas de los DDGS convencionales altos en aceite (Rosentrater, 2006), reducidos en aceite (Ganesan et al. 2009) y bajos en aceite (Saunders y Rosentrater, 2007). Ganesan et al. (2009) demostraron que los DDGS reducidos en aceite podrían mejorar las propiedades de flujo comparados con los altos en aceite convencionales, pero ambos se clasificaron con propiedades de “cohesión”, lo cual indica que a pesar del contenido de aceite, este coproducto es propenso a los problemas de puenteo y apelmazamiento durante el almacenamiento a largo plazo. Estos investigadores plantean que la composición química y la morfología de la superficie de partícula (dureza, tamaño y forma) podrían tener un mayor efecto sobre la capacidad de flujo que el contenido de aceite.

Como ya se describió, actualmente el tiempo de almacenamiento prolongado para lograr un equilibrio de humedad completo y el peletizado de los DDGS no son opciones viables para prevenir los desafíos de manejo y capacidad de flujo. Se han desarrollado y se usan varios diseños de nuevos equipos de descarga para facilitar este

proceso en carros de ferrocarril y contenedores. Por ejemplo, los dispositivos fijos se ubican arriba del foso del carro de ferrocarril y antes de descargar usa una lanza de acero para romper la masa endurecida. Aunque estos métodos mejoran el tiempo de descarga, también aumentan el costo de mano de obra y de equipo. Además, muchas plantas de alimentos balanceados comerciales han optado por almacenar los DDGS en plano en lugar de en silos para evitar los problemas de flujo en el manejo. La principal ventaja del almacenamiento plano es que encara de forma adecuada los problemas de capacidad de flujo y requiere una inversión de capital a corto plazo más baja en comparación con la construcción de silos. Sin embargo, el almacenamiento plano es mucho más laborioso, requiere equipo de carga frontal para mover el material, aumenta el riesgo de contaminación con otros ingredientes en el mismo almacenamiento y aumenta las pérdidas por “encogimiento”.

Efectos de añadir agentes de flujo a los DDGS

Otro enfoque que se ha intentado para mejorar la capacidad de flujo de los DDGS es la adición de varios agentes de flujo, pero solo se han realizado pocos estudios para evaluar su efectividad. Ganesan et al. (2008a) evaluaron los efectos de añadir carbonato de calcio a DDGS que constaban de contenidos variables de humedad y solubles condensados de destilería bajo condiciones de laboratorio, mismos que no mostraron beneficios para mejorar el flujo. Johnston et al. (2009) evaluaron la capacidad de flujo después de añadir DMX-7 (2.5 kg/ton; Delst, Inc. Temecula, CA), 2 por ciento de carbonato de calcio (ILC Resources, Inc., Des Moines, IA) o 1.25 por ciento de zeolita clinoptilolita (St. Cloud Mining Co., Winston, NM) a DDGS con 9 o 12 por ciento de humedad. Después de agregar y mezclar agentes de flujo a los DDGS en la planta de etanol, se cargaron camiones que viajaron 250 km, se estacionaron y se estacionaron durante 60 horas, para transportarlos otros 250 km de vuelta a la planta, donde se descargaron y obtuvieron mediciones de capacidad de flujo. Las temperaturas exteriores de cada uno de los cuatro días (en un período de dos meses) iban de 12.9 a 27.8°C y la humedad relativa exterior era de 34 al 67 por ciento. El tamaño de partícula promedio de la fuente de DDGS usada en este experimento fue de 584 a 668 µm. La tasa de flujo durante la descarga de cada camión mejoró al añadir zeolita (558 kg/min) comparado con DMX-7 (441 kg/min), pero estos tratamientos no fueron diferentes a las cargas control (sin agente de flujo; 509 kg/min) y con carbonato de calcio (512 kg/min). Además, se mejoró la calificación de capacidad de flujo (1 = de libre flujo, 10 = sumamente puentado) al añadir zeolita a los DDGS (4) comparado con el control (6), DMX-7 (6.5) y carbonato de calcio (5.5). El contenido de humedad al momento de la carga fue el predictor más importante (que explica el 70 por ciento de la variación) de la tasa de flujo de los DDGS, en el que cada incremento de 1 punto porcentual de contenido de humedad a partir del 9 por ciento, disminuyó la tasa de descarga en 100 kg/min. Ganesan et al. (2008b) informaron de resultados similares, en los que el aumento del contenido de humedad de los DDGS reduce el flujo. Ellos también notificaron que conforme aumentaba la calificación Hunter b* (lo amarillo del color) en los DDGS, también lo hacía la tasa de flujo, pero esto solo representaba el 4 por ciento de

la variación. Estos resultados indican que el criterio más eficaz para mejorar el flujo de los DDGS es secarlos a un menor contenido de humedad (9 por ciento) y que la adición de DMX-7, carbonato de calcio y zeolita no tuvo beneficios significativos para mejorarlo durante la descarga de los camiones.

Efectos de la densidad de masa en el peso de la carga y segregación de partículas de los DDGS

Mantener una densidad de masa constante en los DDGS al cargar carros de ferrocarril y contenedores ha sido todo un reto tanto para comercializadores como para compradores, por el afán de lograr un peso constante de cargas secuenciales para minimizar el costo de envío (Ileleji y Rosentrater, 2008). La densidad de masa varía entre las fuentes de DDGS. Se ha notificado que va de 391 a 496 kg/m³ (Rosentrater, 2006) y de 490 a 590 kg/m³ (Bhadra et al., 2009). Clementson e Ilelejie (2010) sugirieron que las diferencias en la densidad de masa observadas durante la carga de carros de ferrocarril tal vez se deban a la segregación de partículas. Esto probablemente ocurre porque los DDGS son un sólidos granular a granel con partículas de distintos tamaños, densidades y características morfológicas que se encuentran en los componentes estructurales del grano de maíz (Ileleji et al., 2007). Se ha demostrado que hay segregación de partículas durante el manejo y la descarga por gravedad de los DDGS (Ileleji et al., 2007; Clementson et al., 2009). Clementson e Ilelejie (2010) llevaron a cabo un estudio para evaluar la variación de densidad de masa de los DDGS al llenar y vaciar tolvas para simular la carga de carros de ferrocarril en una planta de etanol en donde mostraron que la variación en la densidad de masa se da al cargar y vaciarlos, y se atribuye principalmente a la segregación de partículas. Estos investigadores mostraron que después del llenado, las partículas más finas, pequeñas y densas se concentraban en el centro de la tolva, mientras que las más grandes y gruesas y menos densas se concentraban en los lados. Este fenómeno no solo causa variación de la densidad de masa durante el transbordo de los DDGS, sino que debe tomarse en cuenta durante el muestreo para el análisis de nutrientes, porque la ubicación del muestreo puede influir la mezcla de partículas segregadas y en última instancia, afectar los resultados analíticos (Clementson et al., 2009).

Efectos del diseño de silos de almacenamiento y del tamaño de partícula sobre la capacidad de flujo de las dietas de DDGS

Efectos del diseño de silos de almacenamiento

La capacidad de flujo de los DDGS no es solo un desafío durante la carga, transporte, almacenamiento y fabricación de los alimentos balanceados, sino que también los crea en las granjas porcinas cuando las dietas se suministran en harina. Un flujo subóptimo de alimento puede reducir la tasa de distribución en los comederos y provocar puenteo, lo

que es factible que lleve a casos de comederos vacíos que incrementan el estrés y la probabilidad de problemas de salud intestinal, así como reducir el desempeño de crecimiento en cerdos (Hilbrands et al., 2016). Esto es una mayor preocupación si hay un incentivo económico por aumentar, al 30 por ciento o más, las tasas de inclusión de DDGS en las dietas porcinas, en especial al alimentar con dietas de harina con partículas pequeñas para mejorar la conversión alimenticia, lo cual es muy común en EE. UU. El diseño de los silos de almacenamiento puede ser una causa importante o una posible solución a los problemas de flujo del alimento con DDGS. Hilbrands et al. (2016) llevaron a cabo un estudio para evaluar el flujo del alimento en tres silos de almacenamiento de alimento que hay en el mercado. Los tres diseños de silos consistieron de: 1) silo de acero galvanizado, de caras lisas, de una pieza con un cono de descarga redondo a 60 grados (Steel60), 2) silo de acero galvanizado corrugado con un cono de descarga redondo a 67 grados (Steel67) y 3) silo de polietileno blanco con un cono de descarga redondo a 60 grados (Poly60). Los estilos del silo se eligieron para representar las diferencias de pendientes a los lados de los conos de descarga, así como los diferentes materiales de construcción en las paredes. Las dietas usadas en este estudio contenían 55 por ciento de maíz, 35 por

ciento de harina de soya, 40 por ciento de DDGS y 2 por ciento de minerales y vitaminas, las cuales se molieron a un tamaño de partícula promedio de entre 736 y 1,015 micrones. El estudio se realizó en dos experimentos durante el verano y el otoño. En el verano, las temperaturas máximas y mínimas diarias fueron de 30.9 a 16.6°C y la humedad relativa diaria de 39.4 al 100 por ciento. Durante el otoño, las temperaturas máximas y mínimas diarias fueron de 2.9 a 23.7°C y la humedad relativa del 23.3 al 92.7 por ciento.

La tasa de flujo del alimento a la salida de los silos fue más rápida en Poly60 comparada con Steel60, mientras que la tasa de flujo de alimento de Steel67 fue intermedia (**cuadro 1**). Sin embargo, lo interesante fue que el silo Steel60, con la tasa de flujo más lenta necesitó menor número de golpes para que el alimento siguiera fluyendo durante la descarga. Como se muestra en el **cuadro 2**, la presencia de un agitador pasivo aumentó la tasa de flujo del alimento en todos los diseños de silos, comparado con los silos sin agitadores, pero la presencia de estos en el Poly60 resultó en una mayor tasa de flujo que en los silos de acero. Sin embargo, a diferencia de los resultados

Cuadro 1. Efecto del diseño del silo y de las condiciones de temperatura y humedad de la parte superior en la capacidad de flujo del alimento (adaptado de Hilbrands et al., 2016)¹

Experimento 1			
Medición	Steel60	Poly60	Steel67
Temperatura promedio, °C	23.6	22.9	22.6
Humedad promedio %	55.3	54.7	53.9
Flujo del alimento, kg/min	603 ^a	737 ^b	663 ^{ab}
Golpes necesarios ²	3.8 ^a	7.5 ^b	6.0 ^b
Calificación de la capacidad de flujo ³	3.7 ^a	4.9 ^b	4.2 ^{ab}

¹ Las medias con distintas letras en superíndices son diferentes (P menor a 0.05).

² Número de golpes necesarios al costado del silo para descargar.

³ Calificación subjetiva asignada a la capacidad de flujo (1 = libre flujo, 10 = totalmente puentado)

Cuadro 2. Efecto del diseño del silo, agitadores de ayuda para el flujo pasivo y condiciones de temperatura y humedad de la parte superior sobre la capacidad de flujo del alimento (adaptado de Hilbrands et al., 2016)¹

Experimento 2						
Medición	Steel60		Poly60		Steel67	
	Sin agitador	Con agitador	Sin agitador	Con agitador	Sin agitador	Con agitador
Temperatura promedio, °C	20.1	20.4	19.6	19.5	19.0	18.8
Humedad promedio %	58.3	65.0	65.0	61.3	61.1	63.8
Flujo del alimento, kg/min	827a	827a	831a	970b	807a	880a
Golpes necesarios ²	2.1	2.0	5.2	2.5	3.2	2.0
Calificación de la capacidad de flujo ³	2.3	2.6	4.2	2.9	3.7	2.3

¹ Las medias con distintas letras en superíndices son diferentes (P menor a 0.05).

² Número de golpes necesarios al costado del silo para descargar.

³ Calificación subjetiva asignada a la capacidad de flujo (1 = libre flujo, 10 = totalmente puentado)

del primer experimento, no hubo diferencia en el número de golpes necesarios para restablecer el flujo del alimento entre las seis combinaciones de diseño de silos.

Estos resultados indican que el diseño del silo de alimento afecta la tasa de flujo durante la descarga de las dietas en harina con 40 por ciento de DDGS. El silo Poly60 proporcionó la mejor tasa de flujo y la mayor tasa de descarga en comparación con los diseños en acero, además de que la instalación de agitadores pasivos aumenta el flujo del alimento en todos los diseños.

Efectos del tamaño de partículas

El tamaño de partícula entre las fuentes de DDGS es altamente variable, con un promedio de 660 µm y una desviación estándar de 440 µm (Liu, 2008). El tamaño de partícula de los DDGS no solo contribuye a sus propiedades de flujo (Ganesan et al., 2008a,b,c), sino que afecta también el contenido de energía metabolizable (EM) y la digestibilidad de nutrientes (Mendoza et al., 2010). Para evaluar más a fondo los efectos del tamaño de partícula de los DDGS sobre el contenido de EM y la digestibilidad de nutrientes de cerdos en crecimiento, Liu et al. (2012) determinaron dichas características en la misma fuente de DDGS molidos en tres tamaños de partículas (818 µm = grueso, 594 µm = mediano, y 308 µm = fino). Estos investigadores también evaluaron la capacidad de flujo de las dietas con 30 por ciento de DDGS. Como era de esperarse, el contenido de EM de los DDGS mejoró a medida que se reducía el tamaño de partícula, en el que cada reducción de 25 µm en tamaño de partícula promedio (entre 818 y 308 µm) aumentó el contenido de EM de la dieta en 13.5 kcal/kg de materia seca. Sin embargo, el tamaño de partícula de los DDGS no tuvo efectos sobre la digestibilidad del nitrógeno y fósforo. La capacidad de flujo de la dieta se redujo en las dietas con 30 por ciento de DDGS en comparación con las dietas control de maíz-harina de soya, además de que fue la menor en las dietas con DDGS finamente molidos (determinado con la medición del ángulo de deslizamiento drenado). Cuando se determinó la capacidad de flujo de estas dietas con el ángulo de deslizamiento para verter como criterio de medición, no hubieron diferencias entre la dieta control y la de 30 por

ciento de DDGS, ni entre las dietas con diferentes tamaños de partícula de estos últimos.

Riesgo de crecimiento fúngico y producción de micotoxinas durante el almacenamiento de los DDGS

Las especies fúngicas toxinógenas se pueden desarrollar en los granos durante su crecimiento en el campo antes de la cosecha, al igual que durante el almacenamiento después de cosechar (Suleiman et al., 2013). Por lo tanto, a menudo las especies fúngicas se clasifican como hongos de campo u hongos de almacenamiento (Barney et al., 1995). Los hongos de campo pueden infectar los granos del maíz y producir micotoxinas previo a la cosecha con contenidos de humedad entre el 22 y 33 por ciento, humedad relativa mayor al 80 por ciento y en un amplio rango de temperaturas (de 10 a 35°C; Williams y MacDonald, 1983; Montross et al., 1999). La mayoría de los hongos de campo no sobreviven durante el almacenamiento, pero bajo condiciones adecuadas, algunas especies siguen creciendo (Sanchis et al., 1982). Los hongos de almacenamiento también se originan en el campo y pueden reemplazar a los hongos del campo que hayan infectado a los granos de maíz antes de la cosecha (Reed et al., 2007). Como se muestra en el **cuadro 3**, los hongos del almacenamiento requieren de una humedad relativa mayor al 70 por ciento y contenido de humedad mayor al 12 por ciento en el grano de maíz (Montross et al., 1999). Pueden introducirse también otras especies fúngicas después de la cosecha como la *Fusarium* spp., *Rhizopus* spp., y *Tilletia* spp. (Williams y MacDonald, 1983; Barney et al., 1995). Dado que los DDGS se producen a partir de maíz, es razonable dar por sentado que estén presentes estos mismos hongos. Sin embargo, debido a las propiedades físicas y químicas especiales de los DDGS, se desconoce si se aplican las mismas condiciones de humedad relativa y humedad que con los granos de maíz. De hecho, los DDGS son más susceptibles al crecimiento fúngico que el maíz, porque el daño mecánico que sufre el grano durante y después de la cosecha puede dar entrada a las esporas fúngicas (Dharmaputra et al., 1994) además de que los granos rotos y

Cuadro 3. Humedad relativa y contenido de humedad que fomenta el crecimiento de hongos de almacenamiento comunes en granos de 25°C a 27°C (adaptado de Montross et al., 1999)

Especies fúngicas	Humedad relativa %	Contenido de humedad %
<i>Aspergillus halophilieus</i>	68	12 - 14
<i>Aspergillus restrictus</i>	70	13 - 15
<i>Aspergillus glaucus</i>	73	13 - 15
<i>Aspergillus candidus</i>	80	14 - 16
<i>Aspergillus ochraeus</i>	80	14 - 16
<i>Aspergillus flavus</i>	82	15 - 18
<i>Aspergillus parssiticus</i>	82	15 - 18
<i>Penicillium</i> spp	80 - 90	15 - 18

material extraño promueven el crecimiento de los hongos de almacenamiento (Sone, 2001). Para más información sobre los métodos analíticos recomendados para la determinación de las micotoxinas en los DDGS, véase el **capítulo 7**.

Peroxidación de lípidos de las fuentes de DDGS

Efectos de alimentar cerdos y pollos de engorde con lípidos peroxidados

Los DDGS de maíz contienen la mayor concentración de lípidos de la mayoría de los ingredientes que se usan en alimentos balanceados de todo el mundo. La peroxidación de lípidos es una reacción química en cadena inducida por calor, oxígeno, humedad y metales de transición (por ejemplo, Cu y Fe), en la que los radicales libres se convierten en aldehídos tóxicos y otros compuestos (Shurson et al., 2015). El aceite de maíz presente en los DDGS consta principalmente de ácidos grasos poliinsaturados, particularmente ácido linoleico (C18:2, 58 por ciento), el cual es altamente susceptible a la peroxidación (Frankel et al., 1984). Cuando los lípidos se calientan a temperaturas relativamente altas, se producen grandes cantidades de productos secundarios de la peroxidación de lípidos, como aldehídos, carbonilos y cetonas (Esterbauer et al., 1991). Las temperaturas de secado utilizadas para producir los DDGS pueden ser de hasta 500°C, lo que los hace susceptibles a la peroxidación. En las plantas de etanol que producen DDGS están presentes todas las condiciones prooxidantes (calor, oxígeno, humedad y minerales de transición), además de que durante el transporte, almacenamiento y fabricación de alimentos balanceados completos pueden estar más expuestos a estos factores. Por ende, hay algo de preocupación por el alcance de la peroxidación de los DDGS después de la producción y durante el transporte y almacenamiento a largo plazo.

Se ha demostrado que alimentar cerdos y pollos de engorde con lípidos peroxidados reduce el desempeño del crecimiento y aumenta el estrés oxidativo. Hung et al. (2017) realizaron un

metaanálisis con datos en cerdos y aves de 29 publicaciones que mostraron una reducción promedio de la GDP (5 por ciento), CADP (3 por ciento), ganancia:alimento (2 por ciento) y vitamina E en suero de plasma (52 por ciento), al tiempo que aumentaron las TBARS en suero (sustancias reactivas al ácido tiobarbitúrico; 120 por ciento) en todos los estudios. Las recientes revisiones de Kerr et al. (2015) y Shurson et al. (2015) brindan un resumen integral de los efectos biológicos de alimentar cerdos y aves con lípidos peroxidados y los retos para medirlos e interpretar los resultados. La sección peroxidación de lípidos en el **capítulo 24** de este manual describe los resultados de algunas pruebas recientes de alimentación en cerdos (Song et al., 2013; Song et al., 2014; Hanson et al., 2015a) que mostraron respuestas inconsistentes en el desempeño del crecimiento al alimentar cerdos con dietas de DDGS altamente peroxidadas.

Estudio de indicadores de peroxidación de lípidos entre las fuentes de DDGS

Song y Shurson (2013) evaluaron las mediciones de peroxidación de lípidos y color de 31 fuentes de DDGS de maíz obtenidas en plantas de etanol de nueve estados de EE. UU. y las compararon con una muestra de maíz como referencia (**cuadro 4**). El índice de peróxido y TBARS (sustancias reactivas al ácido tiobarbitúrico) son dos medidas comunes de la peroxidación de los lípidos utilizadas durante años en la industria de los alimentos balanceados. Sin embargo, como todas las otras medidas de peroxidación, estos indicadores tienen varias limitaciones, por lo que no siempre reflejan el alcance real de la peroxidación de lípidos (Hung et al., 2017; Shurson et al., 2015). En la actualidad no hay normas o lineamientos para la medición de peroxidación de lípidos en los ingredientes de alimentos. Sin embargo, Wang et al. (2016) indicaron que el 4-hidroxinonenal y una proporción de aldehídos selectos brindan mejores estimaciones del alcance real de la peroxidación en aceites vegetales. Desafortunadamente, estos procedimientos analíticos no se usan comúnmente en los laboratorios comerciales.

Cuadro 4. Resumen de los indicadores de peroxidación de lípidos de aceite extraído de 31 muestras y color de DDGS de maíz (adaptado de Song y Shurson, 2013)

DDGS

Medición	Maíz	Promedio	Mediana	Mínimo	Máximo	CV %
Índice de peróxido meq/kg aceite	3.1	13.9	11.7	4.2	84.1	97.5
TBARS ¹ , ng MDA equiv./mg de aceite	0.2	1.9	1.7	1.0	5.2	43.6
Color						
L ^{*2}	83.9	54.1	54.9	45.2	58.1	4.6
a ^{*3}	2.6	10.9	10.8	9.3	12.4	7.2
b ^{*4}	20.0	37.3	37.5	26.6	42.7	8.8

¹TBARS = sustancias reactivas al ácido tiobarbitúrico

²L* = un valor mayor indica un color más claro.

³a* = un mayor valor positivo indica un color más rojizo.

⁴b* = un mayor valor positivo indica un color más amarillento.

Se ha utilizado el índice de peróxido (IP) para calcular el alcance de la peroxidación durante la fase inicial del proceso de peroxidación. El IP de las muestras de DDGS fue altamente variable (CV = 97.5 por ciento), con un valor mínimo de 4.2 y uno máximo de 84.1 meq/kg de aceite. El valor TBARS se ha utilizado como un estimado del alcance de la peroxidación de los lípidos durante la fase de propagación de este proceso, que es cuando se producen la mayoría de los aldehídos. Hubo menos variabilidad (CV = 43.6 por ciento) en los valores TBARS entre las fuentes de DDGS comparado con los valores de IP, en un rango de 1 a 5.2 ng MDA equiv./mg de aceite. Tanto el IP como el TBARS fueron mayores en las muestras de DDGS comparado con los valores esperados de referencia del maíz, debido al procesamiento térmico que involucra la producción de estos. Se observaron correlaciones negativas moderadas de las mediciones de colorimetría entre L* e IP ($r = -0.63$) y b* e IP ($r = -0.57$), con correlaciones ligeramente más negativas entre L* y TBARS ($r = -0.73$) y b* y TBARS ($r = -0.67$). Estos resultados indican que las muestras de DDGS con un color más oscuro y menos amarillo pueden estar más peroxidadas.

Sin embargo, estudios posteriores con la fuente de DDGS más peroxidada en cerdos del destete a la finalización (Song et al., 2014) y en cerdas y sus crías en fase de maternidad (Hanson et al., 2016) no tuvieron efectos nocivos en el desempeño del crecimiento. La falta de respuestas al desempeño de crecimiento de estos estudios quizá sea resultado de los compuestos naturales altamente antioxidantes (tocoferoles, ácido ferúlico, luteína, zeaxantina; Shurson, 2017) presentes en los DDGS y la conversión de compuestos azufrados en antioxidantes endógenos.

Efectos de los antioxidantes comerciales en la prevención de la peroxidación de lípidos en los DDGS

Hay antioxidantes sintéticos en el mercado que se usan para minimizar la peroxidación en las grasas y aceites (Valenzuela et al., 2002; Chen et al., 2014). Los antioxidantes sintéticos que se usan más comúnmente *t*-butil-4-hidroxianisol (BHA), 2,6-di-*t*-hidroxitolueno butilado (BHT), *t*-butilhidroquinona (TBHQ), etoxiquina y 2,6-di-*ter*-butil-4-hidroximetil fenol (Guo, et al., 2006).

Se ha publicado un estudio para evaluar la efectividad de añadir antioxidantes sintéticos a DDGS altos (13 por ciento de grasa cruda) y bajos (5 por ciento de grasa cruda) en aceite (Hanson et al., 2015b). Las muestras de estos dos DDGS contenían ya fuera ningún antioxidante sintético añadido (control) o 1,000 mg/kg TBHQ (Rendox; Kemin Industries, Des Moines, IA) o 1,500 mg/kg de etoxiquina y TBHQ (Santoquin; Novus International, St. Louis, MO). Las muestras se almacenaron en una cámara ambiental de temperatura (38°C) y humedad relativa (90 por ciento) controladas en durante 28 días y se recolectaron submuestras los días 0, 14 y 28 para determinar el alcance de la peroxidación de lípidos. Los resultados de este estudio mostraron que hubo peroxidación de lípidos significativa que aumentó durante el período de almacenamiento de 28 días, además de que el grado de peroxidación fue mayor en los DDGS altos en aceite comparados con la fuente baja en aceite (**cuadro 5**). Sin embargo, la adición de Rendox o Santoquin a ambos DDGS aceite redujo la peroxidación en 50 por ciento. Por lo tanto, estos resultados muestran que la adición de Rendox o Santoquin es eficaz para reducir la peroxidación de lípidos en los DDGS si se almacenan hasta 29 días en condiciones cálidas y húmedas. Además, el contenido de humedad aumentó de 10.2 por ciento al 21.4 durante el período de almacenamiento de 28 días, lo que llevó a un crecimiento fúngico significativo en todas las muestras.

Cuadro 5. Efectos interactivos del contenido de aceite, antioxidante y día de muestreo en la peroxidación de los lípidos de DDGS almacenados a 38°C y 90 por ciento de humedad relativa (adaptado de Hanson et al., 2015)

Variable	DDGS altos en aceite			DDGS bajos en aceite		
	Control	Rendox	Santoquin	Control	Rendox	Santoquin
Índice de peróxido, meq/kg aceite						
Día 14	7.1 ^a	3.1 ^{bc}	3.6 ^b	4.5 ^d	2.7 ^c	2.8 ^c
Día 28	31.4 ^a	13.9 ^{bc}	15.4 ^b	20.5 ^d	11.7 ^{bc}	13.6 ^{bc}
TBARS¹, mg MDA² Eq/kg de aceite						
Día 14	5.1 ^a	2.9 ^{cd}	2.4 ^d	3.8 ^{bc}	2.4 ^d	2.3 ^d
Día 28	21.1 ^a	9.5 ^b	9.0 ^b	14.3 ^d	11.0 ^{bc}	10.1 ^{bc}
Índice de p-anisidina³						
Día 14	3.9 ^a	1.0 ^b	1.0 ^b	3.8 ^a	0.7 ^b	1.0 ^b
Día 28	9.1 ^a	3.4 ^{bc}	2.9 ^{bc}	9.5 ^a	5.0 ^b	4.3 ^b

^{a,b,c,d}Las medias dentro del mismo renglón con distintos superíndices son diferentes (P menor a 0.05).

¹TBARS = sustancias reactivas al ácido tiobarbitúrico

²MDA= malondialdehído

³El índice de p-anisidina no cuenta con unidades

Bibliografía

- Barney, R.J., B.D. Price, J.D. Sedlacek, and M. Siddiqui. 1995. Fungal species composition and abundance on stored corn as influenced by several management practices and maize weevil (*Coleoptera curculionidae*). *Crop Protection* 14:159-164.
- Behnke, K.C. 2007. Feed manufacturing considerations for using DDGS in poultry and livestock diets. *Proc. 5th Mid-Atlantic Nutrition Conference*, N.G. Zimmerman, ed., University of Maryland, College Park, MD. p. 77-81.
- Bhadra, R., K. Muthukumarappan, and K.A. Rosentrater. 2009. Flowability properties of commercial distillers dried grains with solubles (DDGS). *Cereal Chem.* 86:170-180.
- Bhadra, R., K.A. Rosentrater, and K. Muthukumarappan. 2008. Understanding and modeling flowability of DDGS. ASABE Paper No. 083808. St. Joseph, MI. ASABE.
- Chen, X., Y. Zhang, Y. Zu, L. Yang, Q. Lu, and W. Wang. 2014. Antioxidant effects of rosemary extracts on sunflower oil compared with synthetic antioxidants. *Int. J. Food Sci. Technol.* 49:385-391.
- Chen, C. 2000. Factors which affect equilibrium relative humidity of agricultural products. *Trans. ASABE* 43:673-683.
- Clementson, C.L., and K.E. Ileleji. 2010. Variability of bulk density of distillers dried grains with solubles (DDGS) during gravity-drive discharge. *Bioresource technol.* 101:5459-5468.
- Clementson, C.L., K.E. Ileleji, and R.L. Strohshine. 2009. Particle segregation within a pile of bulk density of distillers dried grains with solubles (DDGS) and variability in nutrient content. *Cereal Chem.* 86:267-273.
- Dharmaputra, O.S., H.K. Purwadaria, H. Susilo, and S. Ambarwati. 1994. The effects of drying and shelling on fusarium spp. infection and fusarium toxins production in maize. *Grain drying in Asia: Proc. Int'l Conf. at FAO Regional Office for Asia and the Pacific*, Bangkok, Thailand, October 17-20, 1995. P. 275-281.
- Esterbauer, H., R.J. Schaur, and H. Zollner. 1991. Chemistry and biochemistry of 4-hydroxynonenal, malonaldehyde and related aldehydes. *Free Radic. Biol. Med.* 11:81-128.
- Frankel, E.N., L.M. Smith, C.L. Hamblin, R.K. Creveling, and A.J. Clifford. 1984. Occurrence of cyclic fatty acid isomers in frying fats used for fast foods. *J. Amer. Oil Chem. Soc.* 61:87-90.
- Ganesan, V., K.A. Rosentrater, and K. Muthukumarappan. 2009. Physical and flow properties of regular and reduced fat distillers dried grains with solubles (DDGS). *Food Bioprocess. Technol.* 2:156-166.
- Ganesan, V., K. Muthukumarappan, and K.A. Rosentrater. 2008a. Effect of flow agent addition on the physical properties of DDGS with varying moisture content and soluble levels. *Trans. ASABE* 51:591-601.
- Ganesan, V., K. Muthukumarappan, and K.A. Rosentrater. 2008b. Effect of soluble and moisture content on the physical and chemical properties of DDGS. *Cereal Chem.* 85:464-470.
- Ganesan, V., K. Muthukumarappan, and K.A. Rosentrater. 2008c. Flow properties of DDGS with varying soluble and moisture contents using jenike shear testing. *Powder Tech.*, doi:10.1016/j.powtec.2008.02.003.
- Ganesan, V., K.A. Rosentrater, and K. Muthukumarappan. 2007. Dynamic water adsorption characteristics of distillers dried grains with solubles (DDGS). *Cereal Chem.* 84:548-555.
- Guo, L., M.-Y. Xie, A.-P. Yan, Y.-Q. Wan, and Y.M. Wu. 2006. Simultaneous determination of five synthetic antioxidants in edible vegetable oil by GC-MS. *Anal. Bioanal. Chem.* 386:1881-1881.
- Hanson, A.R., P.E. Urriola, L. Wang, L.J. Johnston, C. Chen, and G.C. Shurson. 2016. Dietary peroxidized maize oil affects the growth performance and antioxidant status of nursery pigs. *Anim. Feed Sci. Technol.* 216:251-261.
- Hanson, A.R., L. Wang, L.J. Johnston, S.K. Baidoo, J. L. Torrison, C. Chen, and G.C. Shurson. 2015a. Effects of feeding peroxidized dried distillers grains with solubles to sows and progeny on growth performance and metabolic oxidative status of nursery pigs. *J. Anim. Sci.* 93:135-146.
- Hanson, A.R., P.E. Urriola, L.J. Johnston, and G.C. Shurson. 2015b. Impact of synthetic antioxidants on lipid peroxidation of distiller's dried grains with solubles and distiller's corn oil under high temperature and humidity conditions. *J. Anim. Sci.* 93:4070-4078.
- Hilbrands, A.M., K.A. Rosentrater, G.C. Shurson, and L.J. Johnston. 2016. Influence of storage bin design and feed characteristics on flowability of pig diets containing maize distillers dried grains with solubles. *Appl. Engineering in Agri.* 32:273-280.
- Hung, Y.T., A.R. Hanson, G.C. Shurson, and P.E. Urriola. 2017. Peroxidized lipids reduce growth performance of poultry and swine: A meta-analysis. *Anim. Feed Sci. Technol.* 231:47-58.

- Ileleji, K.E., and K.A. Rosentrater. 2008. On the physical properties of dried distillers grains with solubles (DDGS). ASAE Paper No. 084576. ASAE, St. Joseph, MI.
- Ileleji, K.E., K.S. Prakash, R.L. Strohshine, and C.L. Clementson. 2007. An investigation of particle segregation in corn processed dried distillers grains with solubles (DDGS) induced by three handling scenarios. *Bulk Solids Powder Sci. Technol.* 2:84-94.
- Johnston, L.J., J. Goihl, and G.C. Shurson. 2009. Selected additives did not improve flowability of DDGS in commercial systems. *Appl. Engineering in Agri.* 25:75-82.
- Kerr, B.J., T.A. Kellner, and G.C. Shurson. 2015. Characteristics of lipids and their feeding value in swine diets. *J. Anim. Sci. Biotechnol.* 6:30.
- Kingsly, A.R.P, and K.E. Ileleji. 2009. Influence of relative humidity on corn distillers dried grain with solubles (DDGS) flowability. ASABE Paper No. 095799. St. Joseph, MI. 11 pp.
- Liu, P., L.W.O. Souza, S.K. Baidoo, and G.C. Shurson. 2012. Impact of distillers dried grains with solubles particle size on nutrient digestibility, DE and ME content, and flowability in diets for growing pigs. *J. Anim. Sci.* 90:4925-4932.
- Liu, K. 2008. Particle size distribution of distillers dried grains with solubles (DDGS) and relationships to compositional and color properties. *Bioresource Technol.* 99:8421-8428.
- Mathlouthi, M., and B. Roge. 2003. Water vapour sorption isotherms and the caking of food powders. *Food Chem.* 82:61-71.
- Mendoza, O.F., M. Ellis, A.M. Gaines, M. Kocher, T. Sauber, and D. Jones. 2010. Effect of particle size of corn distillers dried grains with solubles (DDGS) on digestible and metabolizable energy content for growing pigs. *J. Anim. Sci.* 88(E-Suppl. 3):92 (Abstr.)
- Mills, J.T. 1989. Spoilage and heating of stored agricultural products: prevention, detection and control. Canadian Government Publishing Centre, Ottawa, Canada, Agriculture and Agri-Food Canada Publication 1823E, 98 pp.
- Montross, J.E., M.D. Montross, and F.W. Bakker-Arkema. 1999. Part 1.4 Grain storage. F.W. Bakker-Arkema, D.P. Amirante, M. Ruiz-Altisent, and C.J. Studry matteran, eds. In: *CIGR Handbook of Agricultural Engineering. Vol. IV. Agro-Processing Engineering.* St. Joseph, MI, p. 46-59.
- Peleg, G. 1977. Flowability of food powders and methods for its evaluation – A review. *J. Food Process Eng.* 1:303-328.
- Reed, D., S. Doyungan, B. Ioerger, and A. Getchel. 2007. Response of storage molds to different initial moisture contents of maize (corn) stored at 25°C, and effect on respiration rate and nutrient composition. *J. Stored Products Res.* 43:443-458.
- Rosentrater, K.A., 2007. Ethanol processing coproducts – A review of some current constraints and potential directions. *Int. Sugar J.* 109:1-12.
- Rosentrater, K.A. 2006. Some physical properties of distillers dried grains with solubles (DDGS). *Appl. Eng. Agri.* 22:589-595.
- Sanchis, V., I. Vinas, M. Jimenez, M.A. Calvo, and E. Hernandez. 1982. Mycotoxin-producing fungi isolated from bin-stored corn. *Mycopathologia* 80:89-93.
- Saunders, J., and K.A. Rosentrater. 2007. Physical properties of low oil distillers dried grains with solubles (DDGS). ASABE Paper No. 076062. St. Joseph, MI. ASABE.
- Shurson, G.C, B.J. Kerr, and A.R. Hanson. 2015. Evaluating the quality of feed fats and oils and their effects on pig growth performance. *J. Anim. Sci. Biotechnol.* 6:10.
- Shurson, G.C. 2017. The role of biofuels co-products in feeding the world sustainably. *Ann. Rev. Anim. Biosciences* 5:229-254.
- Sone, J. 2001. Mold growth in maize storage as affected by compound factors: Difference levels of maize weevils, broken corn and foreign materials, and moisture contents. *J. Asia-Pacific Entomology* 4:17-21.
- Song, R., and G.C. Shurson. 2013. Evaluation of lipid peroxidation level in corn dried distillers grains with solubles. *J. Anim. Sci.* 91:4383-4388.
- Song, R., C. Chen, L.J. Johnston, B.J. Kerr, T.E. Weber, and G.C. Shurson. 2014. Effects of feeding diets containing highly peroxidized distillers dried grains with solubles and increasing vitamin E levels to wean-finish pigs on growth performance, carcass characteristics, and pork fat composition. *J. Anim. Sci.* 92:198-210.

- Song, R., C. Chen, L. Wang, L.J. Johnston, B.J. Kerr, T.E. Weber, and G.C. Shurson. 2013. High sulfur content in corn dried distillers grains with solubles protects against oxidized lipids by increasing sulfur-containing antioxidants in nursery pigs. *J. Anim. Sci.* 91:2715-2728.
- Suleiman, R.A., K.A. Rosentrater, and C.J. Bern. 2013. Effects of deterioration parameters on storage of maize. ASABE Paper No. 131593351. St. Joseph, MI, ASABE. 52 pp.
- Valenzuela, A., J. Sanhueza, and S. Nieto. 2002. Effect of synthetic antioxidants on cholesterol stability during the thermal-induced oxidation of a polyunsaturated vegetable oil. *J. Am. Oil Chem. Soc.* 79:325-328.
- Wang, L., A.S. Csallany, B.J. Kerr, G.C. Shurson, and C. Chen. 2016. Kinetics of forming aldehydes in frying oils and their distribution in french fries revealed by LC-MS-based chemometrics. *J. Agric. Food Chem.* 64:3881-3889.
- Williams, R.J., and D. MacDonald. 1983. Grains molds in the tropics: Problems and importance. *Ann. Rev. Phytopathology* 21:153-178.

CAPÍTULO 10

El color de los DDGS NO ES un indicador confiable de su calidad y valor nutritivo

¿Por qué el color de los DDGS es una cuestión de calidad?

NO EXISTEN SISTEMAS DE CALIFICACIÓN O NORMAS DEFINIDAS O REGLAMENTARIAS DE LA CALIDAD DE LOS DDGS, como los hay para el maíz (por ejemplo, U.S. #2) y otros granos *commodities* de EE UU. Como resultado, pueden haber malentendidos entre compradores y vendedores de DDGS de EE. UU. de todo el mundo. Cuando no existen normas de calidad se torna problemático el establecimiento de los precios, la elaboración de contratos y el cumplimiento de las expectativas. Aunque durante esta última década los profesionales de la industria, gobierno y universidades han analizado e intentado desarrollar normas de calidad para las DDGS, los intentos no han logrado nada debido a los desacuerdos en la necesidad de definir las y tal vez por el miedo a una mayor transparencia y la capacidad de distinguir las diferencias de calidad y valor entre las fuentes. La mayor parte de los comercializadores de DDGS de EE. UU. prefieren centrarse solamente en las garantías máximas de humedad y fibra, y las garantías mínimas de grasa y proteína. No obstante, debido a la variabilidad en el contenido de nutrientes y en la calidad entre las fuentes de DDGS de EE. UU., muchos compradores internacionales de esta materia prima a menudo exigen más garantías de atributos de calidad específicos para minimizar el riesgo de obtener coproductos que no cumplan con sus expectativas.

El color de los DDGS se ha convertido en un factor de calidad de gran importancia para algunos compradores en el mercado de exportaciones, el cual se utiliza para diferenciar la calidad real o percibida, así como el valor entre las diferentes fuentes. Hace varios años, algunos comercializadores y compradores de DDGS desarrollaron un sistema subjetivo de evaluación de color mediante una tarjeta de calificación de cinco colores (**figura 1**) para diferenciar el color entre las fuentes. Aunque hoy en día todavía se usa esta tarjeta de calificación de color de los DDGS en el mercado, muchos comercializadores la han dejado de usar porque es demasiado subjetiva y resulta en discusiones frecuentes con los compradores, debido a las diferentes interpretaciones de la calificación de color real de este ingrediente. Como resultado, muchos de los contratos de comercialización que ahora se negocian entre proveedores de EE. UU. y compradores extranjeros (especialmente de países asiáticos) contienen una garantía mínima de una medición de calidad cuantitativa de color (por ejemplo, L^* - color claro u oscuro). La garantía mínima que actualmente se usa para diferenciar la claridad del color de los DDGS es un Hunter L^* mayor a 50, la cual cubre algunas de las expectativas de los compradores. Cada vez más cantidades de DDGS de EE. UU. se exportan a varios países sin importar el color, pero para algunos mercados que exigen una garantía de un color



Figura 1. Ejemplo de tarjeta de calificación de color de DDGS

claro (por ejemplo, L^* mayor a 50), hay una prima de precio importante obtenida de aquellos que puedan garantizarla en las fuentes que comercializan.

Como resultado, algunos proveedores de este país se sienten frustrados y cuestionan el valor de utilizar el color de los DDGS como un indicador de calidad, especialmente si no pueden suministrar un ingrediente que cumpla con las expectativas de color del comprador. Por lo tanto, el propósito de este capítulo es definir la calidad de los DDGS y el papel que desempeña el color como indicador de la calidad en el mercado, así como proporcionar una descripción de una gran variedad de otras características y mediciones que se pueden usar para evaluar el valor de este ingrediente.

¿Cómo se define la calidad?

Hay muchas definiciones de calidad. La calidad se define como una característica esencial o inherente que representa el grado de excelencia, superioridad o de un atributo distintivo (<http://www.merriam-webster.com/dictionary/quality>).

En el contexto de negocios (<http://www.businessdictionary.com/definition/quality.html>), la calidad se ha definido como una medición general de la excelencia o del estado de estar libre de defectos, deficiencias y variaciones significativas. La norma ISO 8402-1986 define calidad como "la totalidad de rasgos y características de un producto o servicio que conlleva la capacidad de satisfacer las necesidades declaradas o implícitas". En el contexto de la fabricación, calidad se define como la observancia estricta y consistente de normas mensurables y verificables para lograr uniformidad de la

producción que satisfaga los requisitos específicos del cliente o usuario. La calidad se puede determinar objetivamente mediante criterios que son mensurables y de manera subjetiva, que puedan ser características que se puedan observar y que puedan aproximarse, pero no medirse. Como resultado, la calidad es un término general que se refiere a las características deseables de las cosas materiales y que puede significar diferentes cosas para las diferentes personas.

¿Cómo se determina la calidad de los ingredientes y los alimentos balanceados?

Los fabricantes de alimentos balanceados y los productores pecuarios utilizan una gran variedad de métodos cualitativos y cuantitativos para evaluar la calidad de los ingredientes y los alimentos, entre los que se encuentran pruebas físicas, químicas y biológicas. La evaluación física de los alimentos balanceados es cualitativa, pero se usa para identificar cambios en la naturaleza de las materias primas o los alimentos mismos. Las características físicas comúnmente evaluadas incluyen el color, tamaño de partícula, densidad de masa, homogeneidad, olor, sabor, tacto y sonido. La presencia de otros granos, semillas de malezas, cascarillas y arena son los contaminantes físicos más comunes que se pueden identificar mediante evaluación física.

Las pruebas químicas son cuantitativas y permiten una estimación precisa del contenido de nutrientes y los posibles contaminantes. Para evaluar la calidad, se considera como una práctica común utilizar un laboratorio comercial para determinar el análisis proximal de los ingredientes. Estas mediciones por lo general incluyen la humedad, proteína cruda, fibra cruda, grasa cruda y cenizas. Las especificaciones de ingredientes (contenido de nutrientes) son esenciales para los programas de aseguramiento de la calidad de la fabricación de alimentos balanceados, porque sirven de base para los acuerdos de compra por escrito, la evaluación de la calidad y hasta cierto punto, la formulación de las dietas. Estas especificaciones de nutrientes son las normas que debe cumplir el ingrediente suministrado en cuanto a las expectativas, que a veces incluyen mediciones de algunos posibles contaminantes de preocupación (por ejemplo, micotoxinas o dioxinas).

La microscopía de alimentos balanceados también se utiliza para determinar si los alimentos o sus ingredientes han sido adulterados o contienen contaminantes. Implica el examen de muestras de ingredientes con un microscopio con aumento bajo (8x a 50x) o alto (100x a 500x) para evaluar la forma, color, tamaño de partículas, suavidad, dureza y textura de los alimentos.

También se hace la evaluación biológica de los ingredientes, pero por lo general se limita a las universidades o a las grandes compañías de alimentos con instalaciones de investigación de animales y de laboratorio. Implica la utilización de animales y personal con capacitación especializada para realizar pruebas de digestión y metabolismo en varias especies animales. Estos métodos llevan mucho tiempo, son caros, y por ende, no se pueden usar como procedimientos de rutina, como parte del programa de control de calidad de la fabricación de alimentos

balanceados. Sin embargo, proporcionan la mejor evaluación de la calidad y del valor alimenticio de los ingredientes, en comparación con todos los otros métodos.

De esta manera, la calidad es un término general que se refiere a las características deseables de las cosas materiales y que puede significar diferentes cosas para las diferentes personas. Para algunos, la calidad de los DDGS se puede referir a la ausencia de micotoxinas y de otros factores antinutricionales no deseables que pueden ser dañinos para la salud y el desempeño animal. Para otros, se puede referir a la consistencia del contenido de nutrientes y de su digestibilidad. Mediante estas definiciones, el color puede y es usado en algunos mercados para definir la calidad de los DDGS.

¿Por qué se mide el color?

Durante varias décadas, el color se ha usado como un indicador subjetivo de la calidad nutricional de los ingredientes. Los aminoácidos libres (especialmente la lisina) pueden someterse a reacciones de Maillard al combinarse con azúcares reductores, lo que va a tornarlos indigeribles para el animal. Louis Camille Maillard descubrió y describió la primera prueba de estas reacciones químicas entre los azúcares y los aminoácidos en 1912. Las reacciones de Maillard son un grupo de reacciones químicas que suceden cuando se calientan los azúcares y aminoácidos, así como carbohidratos complejos y amidas. Estas reacciones generalmente se dan cuando los ingredientes con contenido de proteína de medio a alto se sobrecalientan durante la producción y el proceso de secado, las cuales se pueden caracterizar por el oscurecimiento del color (encafecimiento), sabor y olor a quemado. Las temperaturas de secado utilizadas en las plantas de etanol de molienda en seco pueden ir de 127 a 621° C. La importancia nutricional de las reacciones de Maillard en los DDGS ya se ha mostrado en rumiantes (Klopfenstein y Britton, 1987), así como en cerdos y aves (Cromwell et al., 1993) además de que es responsable de las pérdidas de la calidad de la proteína de este ingrediente (Cromwell et al., 1993; Fastinger y Mahan 2006; Stein et al. 2006). Las reacciones de Maillard también se dan en otros ingredientes comunes, tales como el suero deshidratado, harina de sangre y harina de soya. El oscurecimiento del color de estos ingredientes también indica un sobrecalentamiento y una reducción de la calidad de la proteína. Por lo tanto, compradores y fabricantes de ingredientes de alimentos balanceados han sido capacitados para utilizar el color como un indicador general para diferenciar la calidad y digestibilidad de la proteína entre las fuentes de ingredientes.

Además, el color puede ser una indicación de la madurez del grano, condiciones de almacenamiento, presencia de toxinas, contaminación con arena y la posible utilización de insecticidas o fungicidas que le dan la apariencia mate y polvosa. El sorgo de color anaranjado a rojo puede indicar que tiene un alto contenido de taninos. El encafecimiento o ennegrecimiento de los granos y sus coproductos puede ser indicativo de un tratamiento térmico excesivo o de descomposición debido a un mal almacenamiento, por lo que se reduce su valor nutritivo. El color negro de la harina de pescado puede indicar rancidez del aceite de pescado.

¿Cómo se mide el color?

Durante muchos años se han utilizado los colorímetros Hunter y Minolta en la industria de alimentos para consumo humano como indicadores de las características nutricionales y físicas de los productos procesados térmicamente, tales como las barras de chocolate y dulce, galletas y pan. En estos productos alimenticios, con frecuencia el color es un atributo importante de calidad que determina el atractivo del producto para el consumidor. El color se mide mediante la lectura de tres características de color específicamente definidas por la *Commission Internationale d'Eclairage*, en Viena, Austria. [Claridad o L^* (0 oscuro, 100 claro), a^* (rojo - verde) y b^* (amarillo - azul); **figura 2**]. Las mediciones del colorímetro de los ingredientes, especialmente de los DDGS, se han convertido en algo común en la industria de alimentos balanceados para evaluar el grado de daño térmico de los ingredientes de contenido de proteína de mediano a alto. Es importante darse cuenta que las calificaciones de color que utilizan los colorímetros Minolta son más bajas que los colorímetros Hunter Lab. Urriola et al.(2013) mostraron que las lecturas de L^* son generalmente 2.9 unidades más bajas y las lecturas de b^* son 1.7 unidades más bajas en el Minolta, en comparación con las de Hunter de la misma muestra. Sin embargo, es la misma la clasificación de las muestras por calificación de color que utilizan ambos métodos. Por lo tanto, si se utilizan las mediciones de color como criterio para comercializar DDGS, es básico que en el contrato se defina el método utilizado (por ejemplo, Hunter o Minolta) para evitar malentendidos de los resultados.



Figura 2. Escala de medición de color de HunterLab

¿Por qué es importante el color en algunos mercados de exportación?

Cuando se vive y se trabaja en una economía global, es fundamental entender cómo se perciben las cosas en las diferentes culturas del mundo, la naturaleza simbólica de cómo pueden pensar y en qué se basan para tomar medidas. Como ejemplo, la página web (http://webdesign.about.com/od/colorcharts/1/b1_colorculture.htm) describe qué significan los diferentes colores en

las diferentes culturas. Por ejemplo, en la cultura china se considera el color amarillo como el más bonito: corresponde a la tierra y al centro de todo (http://en.wikipedia.org/wiki/Color_in_Chinese_culture). El amarillo se clasifica por arriba del café y también significa neutralidad y buena suerte. El amarillo era el color de la China imperial, es el color simbólico de los cinco emperadores legendarios de la China antigua, que a veces decoran los palacios reales, altares y templos y que se utilizaba en la ropa de ceremonia y vestimenta de los emperadores. El amarillo también representa libertad de cuidados mundanos y es muy respetado en el budismo.

Además, los consumidores de muchos países asiáticos prefieren las yemas de huevo de color amarillo oscuro y la piel del pollo también de amarillo en lugar de los huevos o pieles pálidas que normalmente se encuentran en EE. UU. El color amarillo o dorado se tiene en gran estima, más que el café y es probablemente uno de los posibles factores que contribuyen al por qué los DDGS “dorados” es el color preferido de esta materia prima en muchas partes de Asia.

¿Existe alguna relación entre el color de los DDGS y el valor nutritivo?

Diferencias en color entre las muestras de DDGS.

Hay diferencias significativas en el color entre los DDGS de maíz de EE. UU. (**figura 3**). Se han realizado quince estudios para evaluar la gama de color (L^* , a^* y b^*) o el grado de calentamiento entre las fuentes de DDGS y su relación en cuanto a las diferencias en la calidad nutricional y características físicas. En el **cuadro 1** se encuentra un resumen de los hallazgos clave de estos estudios. Todos, excepto dos de los estudios (Urriola et al, 2013; Song y Shurson, 2013) evaluaron muestras de DDGS de un número limitado de fuentes (de 2 a 9). Sin embargo, a pesar del número limitado de fuentes evaluadas en la mayoría de estos estudios, hubo una gama significativa en las calificaciones de color L^* entre las muestras analizadas, excepto en los estudios que notificaron Rosentrater (2006), Pahm et al. (2009) y Kingsly et al. (2010). En los estudios de Cromwell et al. (1993) y Urriola et al.(2013) se incluyeron muestras de DDGS de las plantas de etanol de bebidas, por lo que puede ser la razón de valores sumamente bajos de L^* (muestras oscuras) en dichos estudios, pero no explica los valores bajos de L^* obtenidos en los estudios de Fastinger y Mahan (2006), y Bhadra et al. (2007), en los que solamente evaluaron este coproducto de plantas de etanol para combustible.



Figura 3. Diferencias de color entre las fuentes de DDGS de maíz de EE. UU.

Cuadro 1. Resumen de los resultados de investigación que involucraron el color de los DDGS (o grado de calentamiento) sobre las características nutricionales y físicas

Referencia	# Fuente de DDGS	Gama L*	Gama a*	Gama b*	Hallazgos clave:
Cromwell et al. (1993)	9	28.9-53.2	ND	12.4-24.1	Correlación significativa entre L* y nivel de lisina de los DDGS y L* y b* con la ganancia de peso y ganancia:alimento en pollitos de engorde. Los efectos fueron similares en cerdos. El NIAD de las fuentes de DDGS también estuvo altamente correlacionado con la ganancia de peso y la ganancia:alimento de los pollitos.
Whitney et al. (2001)	2	ND; claro y oscuro	ND	ND	Los DDGS de color claro tuvieron un AID de lisina de 47.4 por ciento, pero los de color más oscuro tuvieron uno del 0 por ciento en cerdos.
Ergul et al. (2003)	4	41.8-53.8	ND	32.9-42.8	Correlaciones significativas entre L* y b* y lisina digestible en aves.
Roberson et al. (2005)	2	ND; claro y oscuro	ND	ND	La fuente de color claro tuvo 29.8 mg/kg de xantofilas, la de color oscuro tuvo 3.5 mg/kg de xantofilas
Rosentrater (2006)	6	40-49.8	8-9.8	18.2-23.5	L*, a* y b* se correlacionaron con varias propiedades físicas
Batal and Dale (2006)	6	47.9-62.9	4.1-7.6	8.8-28.4	Se encontraron correlaciones significativas entre Lys, Thr, Arg, His y Trp digestibles y los valores L* y b*, pero no con los valores a*.
Fastinger and Mahan (2006)	5	28-55.1	6.7-9	15.8-41.9	Las fuentes de DDGS con color L* y b* mayor presentaron una digestibilidad aparente y estandarizada mayor de los aminoácidos en cerdos que las fuentes de un color más oscuro.
Urriola (2013)	34	36.5-62.5	8-12	21.3-47	La proteína cruda y aminoácidos digestibles se predijeron muy mal (R2 menor que 0.30) a partir de las calificaciones de color Minolta o Hunter en cerdos. La correlación (R2 = 0.48) entre L* y lisina SID fue mayor entre las muestras con L* menor a 50 que las muestras con L* mayor a 50 (R2 = 0.03).
Bhadra et al. (2007)	3	36.6-50.2	5.2-10.8	12.5-23.4	Los parámetros de color a* y b* tuvieron correlaciones altas con la actividad acuosa y correlaciones moderadas con las propiedades térmicas, lo que puede ser importante para el almacenamiento del alimento y el procesamiento posterior
Martinez Amezcua and Parsons (2007)	ND	ND; muestra de DDGS de color claro procesada térmicamente	ND	ND	El mayor calentamiento de los DDGS aumentó significativamente la biodisponibilidad relativa del fósforo en aves, pero se redujo mucho la digestibilidad de aminoácidos, especialmente de la lisina.
Ganesan et al. (2008)	ND	40.8-54.1	12.4-18.7	57.6-73.3	Cantidad de solubles añadidos a los granos para hacer que los DDGS tengan L* reducido y a* mayor e interaccione con el contenido de humedad para afectar su color.
Liu (2008)	6	44.9-59.6	8.3-11.4	31-46.4	La mayoría de las muestras de DDGS tuvieron una disminución en L* y b* y un ligero incremento en a* conforme aumentaba el tamaño de partícula.
Pahm (2009)	7	49.3-56.4	10.4-14.5	36.7-43.9	La correlación entre L* y lisina SID en pollitos fue mala (0.29), pero muy alta (0.90) para la biodisponibilidad relativa de la lisina.
Kingsly et al. (2010)	1	49-53.4	8.8-11.3	24.7-26.5	Conforme se reducía el nivel de CDS, aumentó el valor de L* y disminuyó el de a*.
Song et al. (2013)	31	45.2-58.1	9.3-12.4	26.6-42.4	Correlaciones significativas entre mediciones de oxidación de grasa (TBARS y PV) y L* y b*. El TBARS de los DDGS fue de 5 a 25x mayor que el del maíz.

ND = no determinado

¿Hay relación entre el color y la digestibilidad de la lisina en los DDGS?

Las investigaciones realizadas por Evans y Butts (1948) fueron las primeras que mostraron que el calor excesivo de los ingredientes de alimentos balanceados puede resultar en que se ligan los aminoácidos y las proteínas a otros compuestos, tales como la fibra y se reduzca la digestibilidad de los aminoácidos (especialmente la lisina) en animales monogástricos (por ejemplo, cerdos, aves y peces). Como resultado, el uso del color como un indicador del calentamiento excesivo y de la reducción de la digestibilidad de aminoácidos en los DDGS, ha sido el objetivo principal en siete de 15 estudios de investigación que se han realizado (**cuadro 1**). La primera prueba de la relación entre el color de los DDGS, el contenido de lisina y el desempeño del animal lo publicaron Cromwell et al. (1993). Mostraron que las concentraciones de lisina tendían a ser mayores en las fuentes de DDGS de colores más claros, intermedias en las de colores medios y las más bajas en las fuentes de colores más oscuros. Además, hubo una correlación significativa entre el L^* de Hunter y la ganancia de peso, así como en la relación ganancia:alimento en pollos. Cuando las fuentes de DDGS de calificaciones de colores similares se mezclaban y se alimentaban a cerdos, los resultados de desempeño eran similares a los observados en estudios de pollos. En estudios adicionales de Ergul et al. (2003) y Batal y Dale (2006) se evaluaron fuentes de DDGS que representaban una amplia gama de valores L^* y b^* , los cuales confirmaron los resultados de Cromwell et al. (1993) al mostrar que estos valores se correlacionaban significativamente con la digestibilidad de lisina y otros aminoácidos. Sin embargo, los resultados de un estudio reciente de Pahm et al. (2009), que evaluó siete fuentes de DDGS que podían clasificarse como de color “dorado” y que habían mostrado una gama estrecha de valores L^* (de 49 a 56), no mostraron efectos de L^* sobre la digestibilidad de lisina en aves, pero hubo diferencias significativas en la biodisponibilidad relativa de la lisina entre estas fuentes.

De la misma forma, los resultados de estudios adicionales en cerdos (Whitney et al., 2001; Fasting y Mahan, 2006) mostraron una digestibilidad de aminoácidos más baja en fuentes de DDGS que tenían valores L^* más bajos (más oscuro el color) en comparación con fuentes con valores L^* más altos. No obstante, Urriola et al. (2013) fueron los primeros en demostrar que con un gran número de muestras de DDGS ($n = 34$) en una amplia gama de valores L^* (37 a 63), que la proteína cruda y los aminoácidos digeribles se predecían muy mal (R^2 menor que 0.30) a partir de las calificaciones de color Minolta o Hunter en cerdos. La relación entre L^* y la lisina digerible fue mayor para las muestras con L^* menor a 50 en comparación con las de L^* mayor a 50 (**figura 4**). Sin embargo, incluso en las muestras de DDGS con L^* menor a 50, la correlación entre L^* y el contenido de lisina digerible en cerdos fue relativamente baja ($R^2 = 0.48$), lo cual indica que no se puede usar el color para predecir de manera precisa el contenido de lisina digerible entre las fuentes de estos. Los resultados de estos estudios indican que L^* y b^* , pero no a^* , pueden ser indicadores generales útiles de la digestibilidad relativa de la lisina si los valores L^* son menores que 50, pero no si los valores de L^* son mayores que 50.

Relación entre la temperatura de secado de los DDGS y la biodisponibilidad relativa del fósforo

Si bien hay pruebas consistentes de que el calentamiento excesivo (L^* más bajo y color oscuro) durante el secado de los DDGS reduce la digestibilidad de la lisina y de otros aminoácidos, puede aumentar la biodisponibilidad relativa del fósforo para aves. Martínez-Amezcu y Parsons (2007) aplicaron mayores temperaturas de calentamiento a las muestras de DDGS de color claro y observaron que se mejoraba la biodisponibilidad relativa del fósforo, pero se reducía mucho la digestibilidad de los aminoácidos. Esta es la primera evidencia que demuestra que el calor excesivo de los DDGS pueden mejorar su valor nutritivo para las aves al mejorar la utilización de fósforo.

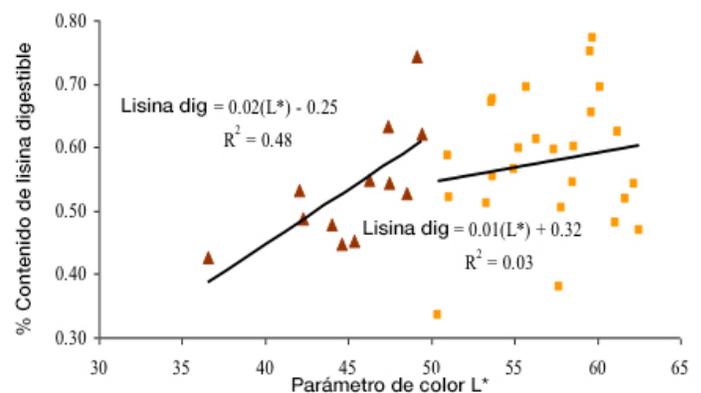


Figura 4. Relación entre la claridad del color (L^*) y el contenido de lisina digerible de DDGS de maíz para cerdos. (Urriola et al., 2013)

Relación entre el color de los DDGS y el contenido de xantofilas

Se han realizado pocos estudios para determinar el contenido de xantofilas en los DDGS. Las xantofilas son pigmentos amarillos y anaranjados naturales del maíz y sus coproductos que son valiosos en las dietas de aves en muchos países, especialmente en Asia, para producir el color dorado deseado de la yema de huevo y de la piel del pollo. Los pigmentos sintéticos de xantofilas (a veces derivados de los pétalos del cempasúchil o marigold) son muy caros, pero es muy común que se añadan a las dietas avícolas en los países asiáticos como la principal fuente de pigmento. Por lo tanto, la adición de coproductos de maíz, tales como la harina de gluten de maíz, y en menor grado los DDGS, a las dietas avícolas, reduce la necesidad de utilizar pigmentos sintéticos caros, y en consecuencia reduce el costo de la dieta, además de que cumple con las normas de calidad del color de la yema de huevo y de la piel que prefiere el consumidor.

Se ha notificado que los valores de xantofilas en los DDGS son entre 10.6 mg/kg y 34 mg/kg (Sauvant y Tran, 2004). Roberson et al. (2005) no utilizaron los colorímetros Minolta o Hunter para medir el color, pero mostraron que los DDGS de color oscuro contenían 3.5 mg/kg de xantofilas en comparación con los de color dorado más claro que contenían 29.8 mg/kg. Indicaron que el sobrecalentamiento de los DDGS puede causar oxidación de las xantofilas, lo que resulta en menores concentraciones. Por lo tanto, parece que es más probable que los DDGS de color más claro contengan mayores cantidades de xantofilas, que los de color más oscuro.

Relación entre el color de los DDGS y la peroxidación de lípidos

Se han realizado pocas investigaciones para evaluar el grado de peroxidación de aceite en los DDGS de maíz. Los granos secos de destilería con solubles contienen de cinco a 13 por ciento de aceite de maíz y este a su vez altas concentraciones de ácidos grasos poliinsaturados (particularmente ácido linoleico), susceptibles a la peroxidación de lípidos. Las temperaturas de secado utilizadas en las plantas de etanol pueden variar substancialmente (de 85° a 600°C), además de que el mayor tiempo y temperatura durante el proceso acelera la peroxidación. La alimentación de dietas con lípidos peroxidados ha demostrado que afecta negativamente la salud y el desempeño del crecimiento de cerdos y pollo de engorde (L'Estrange et al., 1967; Dibner et al., 1996; DeRouchey et al., 2004; Hung et al., 2017). Harrell et al. (2010) mostraron que la alimentación de cerdos lactantes con aceite de maíz o DDGS peroxidados resultó en la reducción del desempeño de crecimiento en comparación con los alimentados con aceite de maíz fresco (no peroxidado). Song y Shurson (2013) determinaron las sustancias reactivas al ácido tiobarbitúrico (TBARS) y el índice de peróxido (IP) –métodos analíticos comunes para medir la peroxidación de los lípidos– en 31 DDGS de maíz y notificaron que el contenido TBARS es de 1 a 5.2 ng MDA equivalentes/mg aceite, y el IP de 4.2 a 84.1 meq/kg aceite. La muestra de DDGS con TBARS e IP más altos fue 25 y 27 veces mayor, respectivamente, que las concentraciones del maíz. Estos autores también informaron que hubo una correlación negativa significativa entre L* y b* con el nivel de peroxidación de lípidos entre las fuentes de DDGS. Estos resultados indican que los DDGS más oscuros y menos amarillos pueden tener mayor concentración de compuestos peroxidados que las fuentes más claras.

¿Hay relación entre el color de los DDGS y las características físicas?

Se realizaron cinco experimentos (**cuadro 1**) para entender la relación entre el color de los DDGS y sus características físicas, mismas que pueden afectar el almacenamiento y el posterior procesamiento del alimento. Rosentrater (2006) fue el primero en notificar que L*, a* y b* se correlacionaban con varias propiedades físicas (humedad, actividad acuosa, conductividad, resistividad, densidad de masa y capacidad de flujo) de los DDGS. Bhadra et al. (2007) confirmaron estos

hallazgos y mostraron que a* y b* presentaban correlaciones más altas con la actividad acuosa y relaciones moderadas con las propiedades térmicas de los DDGS, lo que señala que el color puede ser un indicador para evaluar el almacenamiento del alimento y las características del procesamiento posterior.

Se añadieron cantidades variables de solubles condensados de destilería a la fracción de granos gruesos para producir DDGS entre plantas de etanol. La proporción de solubles y de granos gruesos utilizada para producir DDGS afecta la composición de nutrientes de estos, porque es sustancialmente diferente el contenido de nutrientes de cada una de estas fracciones. La fracción de granos gruesos es más alta en materia seca (33.8 vs. 19.5 por ciento), proteína cruda (33.8 vs. 19.5 por ciento) y fibra cruda (9.1 vs 1.4 por ciento), pero más baja en grasa cruda (7.7 vs. 17.4 por ciento), cenizas (3 vs. 8.4 por ciento) y fósforo (0.6 vs. 1.3 por ciento), que la fracción de los solubles condensados. Por lo tanto, al aumentar las proporciones de solubles condensados añadidos a la fracción de granos gruesos se aumenta la grasa cruda, las cenizas y el fósforo, pero se reduce el contenido de proteína cruda y fibra cruda de los DDGS.

Noll et al. (2006) evaluaron la composición y la digestibilidad de nutrientes de lotes de DDGS de maíz producidos con niveles variables de solubles añadidos a los granos húmedos. Las muestras de DDGS producidas contenían solubles añadidos a aproximadamente 0, 30, 60 y 100 por ciento de la adición máxima posible de solubles a los granos. Esto corresponde a añadir 0, 45.4, 94.6, 159.9 litros (0, 12, 25 y 42 galones) de jarabe a la fracción de granos por minuto. Las temperaturas del secador disminuyeron conforme disminuía la tasa de adición de solubles a los granos. Conforme aumentaba la adición de solubles a la fracción de granos, aumentaba el tamaño de partícula y fue más variable. La adición de cantidades crecientes de solubles resultó en un color más oscuro de los DDGS (L* reducido) y menos color amarillo (b* reducido) (**cuadro 2**). El aumento en la adición de solubles dio como resultado un aumento en la grasa cruda, cenizas, EMVn (aves), magnesio, sodio, fósforo, potasio, cloruro y azufre, pero tuvo efectos mínimos sobre el contenido y digestibilidad de proteína cruda y aminoácidos. Ganesan et al. (2008) y Kingsly et al. (2010) demostraron que conforme se incrementa la cantidad añadida de solubles condensados de destilería a la fracción de granos gruesos, se reduce el L* y aumenta el a*. Por lo tanto, el L* y a* de los DDGS pueden ser indicadores generales de los cambios en la composición de nutrientes entre muestras de estos.

Las investigaciones en la Universidad de Minnesota han mostrado que entre las fuentes de DDGS hay una variación considerable (de 256 a 1,217 µm) del tamaño de partículas, y que esto puede afectar la energía digestible (ED) y la metabolizable (EM) en cerdos (Liu et al., 2012). Liu (2008) notificó que conforme aumentaba el tamaño de partícula de los DDGS, la mayoría de las muestras mostraron una disminución en el valor L* y b*, y un ligero incremento en el valor a*.

Cuadro 2. Efecto de la tasa de adición de solubles a la harina sobre las características del color de los DDGS

Color (escala CIE)	0 gal/min	12 gal/min	25 gal/min	42 gal/min	Correlación de Pearson	Valor P
L*	59.4	56.8	52.5	46.1	- 0.98	0.0001
a*	8	8.4	9.3	8.8	0.62	0.03
b*	43.3	42.1	40.4	35.6	- 0.92	0.0001

Adaptado de Noll et al. (2006).

¿Es el color el mejor indicador de la calidad de los DDGS?

No. Como ya se dijo, hay muchos factores que afectan el color de los DDGS; algunos tienen efectos positivos, mientras que otros tienen efectos negativos sobre su valor nutritivo. Es también importante recordar que hay muchos criterios que se pueden usar para describir la “calidad” de los DDGS. El color se relaciona con varios componentes nutricionales y características físicas de los DDGS. Aunque muchos nutricionistas perciben a los DDGS de color oscuro como un indicio de baja digestibilidad de la lisina, la asociación del color en un amplio rango de valores L* (de 36 a 64) con la digestibilidad de lisina significa que es un mal predictor. Además, fuentes de DDGS con un L* alto pueden indicar que tienen un contenido de xantofilas más alto y una peroxidación de lípidos mínima. Por otro lado, las fuentes de DDGS de color oscuro pueden tener concentraciones más altas de algunos nutrientes, en comparación con fuentes más claras. Por ejemplo, la adición de niveles crecientes de solubles a la fracción de granos gruesos al producir DDGS aumenta el contenido de energía, grasa cruda y minerales, con efectos mínimos sobre el contenido y digestibilidad de la proteína cruda y aminoácidos; comparado con las fuentes de color más claro con menos solubles. Además, las muestras de color más oscuro parecen tener una biodisponibilidad de fósforo relativamente más alta para aves. El tamaño de partícula, el contenido de humedad y otras propiedades físicas de los DDGS también están correlacionadas con el color, pero es más difícil de evaluar el valor de estas relaciones desde la perspectiva de la fabricación de alimentos balanceados y de la nutrición. **Por lo tanto, no se recomienda usar el color como indicador de la calidad de los DDGS.**

¿Cómo se debe determinar la calidad de los DDGS?

Para la mayoría de los usuarios de DDGS, una fuente de alta calidad es aquella con alto contenido y digestibilidad de energía y nutrientes, y que esté libre de factores antinutricionales, como las micotoxinas. La energía, seguida de la proteína (aminoácidos) y el fósforo son los tres componentes nutricionales más caros en los alimentos para animales. Por

ende, deben usarse métodos precisos para determinar energía metabolizable, aminoácidos digestibles y fósforo digestible o disponible. Para hacerlo, se han desarrollado, validado y publicado ecuaciones precisas de predicción de EM y aminoácidos digestibles para cerdos y aves. Para obtener más información sobre estas ecuaciones de predicción, véanse los **capítulos 19 y 22** de este manual. Desafortunadamente, no se han desarrollado ecuaciones de predicción precisas para calcular el fósforo digestible o disponible en DDGS para cerdos y aves, ni para calcular la energía neta, proteína degradable y no degradable en el rumen para rumiantes. En el **capítulo 8** de este manual se analizan los métodos recomendados para determinar el contenido de micotoxinas de los DDGS.

Bibliografía

- Bhadra, R., K. Muthukumarappan, and K.A. Rosentrater. 2007. Characterization of chemical and physical properties of distillers dried grain with solubles (DDGS) for value-added uses. An ASABE Meeting Presentation, Paper Number: 077009, 2007 ASABE Annual International Meeting, Minneapolis, Minnesota, 17 - 20 June 2007.
- Batal, A.B. and N.M. Dale. 2006. True metabolizable energy and amino acid digestibility of distillers dried grains with solubles. *J. Appl. Poult. Res.* 15:89-93.
- Cromwell, G.L., K.L. Herkelman, and T.S. Stahly. 1993. Physical, chemical, and nutritional characteristics of distillers dried grains with solubles for chicks and pigs. *J. Anim. Sci.* 71:679-686.
- DeRouchey, J.M., J.D. Hancock, R.H. Hines, C.A. Maloney, D.J. Lee, H. Cao, D.W. Dean, and J.S. Park. 2004. Effects of rancidity and free fatty acids in choice white grease on growth performance and nutrient digestibility in weanling pigs. *J. Anim. Sci.* 82:2937-2944.
- Dibner, J. J., C.A. Atwell, M.L. Kitchell, W.D. Shermer, and F.J. Ivey. 1996. Feeding of oxidized fats to broilers and swine: effects on enterocyte turnover, hepatocyte proliferation and the gut associated lymphoid tissue. *Animal Feed Science Technology* 62:1-13.

- Ergul, T., C. Martinez-Amezcuca, C. Parsons, B. Walters, J. Brannon and S.L. Noll. 2003. Amino acid digestibility in corn distillers dried grains with solubles. Presented at the 2003 Poultry Science Association Mtg., Madison, WI, July 2003. Available: www.ddgs.umn.edu/info-poultry.html. Accessed: January, 2011.
- Evans, R.J., and H.A. Butts. 1948. Studies on the heat inactivation of lysine in soy bean oil meal. *J. Biol. Chem.* 175:15–20.
- Fastinger, N.D. and D.C. Mahan. Determination of the ileal AA and energy digestibilities of corn distillers dried grains with solubles using grower-finisher pigs. *J. Anim. Sci.* 84:1722-1728.
- Ganesan, V., K. Muthukumarappan, and K.A. Rosentrater. 2008. Effect of moisture content and soluble level in physical, chemical, and flow properties of distillers dried grains with soluble (DDGS). *Cereal Chem.* 85:464-740.
- Harrell, R.J., J. Zhao, G. Rexnik, D. Macaraeg, T. Wineman, and J. Richards. 2010. Application of a blend of dietary antioxidants in nursery pigs fed either fresh or oxidized corn oil or DDGS. *J. Anim. Sci.* 88(E-Suppl. 3): 97-98 (Abstr.).
- http://en.wikipedia.org/wiki/Color_in_Chinese_culture
- <http://hubpages.com/hub/The-significance-of-the-colors-red--gold-in-Chinese-culture>
- <http://v-ast.com/services.htm>
- http://webdesign.about.com/od/colorcharts/l/bl_colorculture.htm
- <http://www.gipsa.usda.gov/GIPSA/webapp?area=home&subject=lr&topic=hb>
- Hung, Y.T., A.R. Hanson, G.C. Shurson, and P.E. Urriola. 2017. Peroxidized lipids reduce growth performance of poultry and swine: A meta-analysis. *Anim. Feed Sci. Technol.* 231:47-58.
- Kingsly, A.R.P., K.E. Ileleji, C.L. Clementson, A.Garcia, D.E. Maier, R.L. Stroshine, and Scott Radcliff. 2010. The effect of process variables during drying on the physical and chemical characteristics of corn dried distillers grains with solubles (DDGS) – Plant scale experiments. *Bioresource Technology* 101:193–199.
- Klopfenstein, T. and R. Britton. 1987. Heat damage. Real or Artifact. In: *Dist.Feed Conf. Proceedings.* 42:84-86.
- L'Estrange J.L., K.J. Carpenter, C.H. Lea, and L.J. Parr. 1967. Nutritional effects of autoxidized fats in animal diets. 4. Performance of young pigs on diets containing meat meals of high peroxide value. *Br. J. Nutr.* 20:377-392.
- Liu, P., L.W.O. Souza, S.K. Baidoo, and G.C. Shurson. 2012. Impact of distillers dried grains with solubles particle size on nutrient digestibility, DE and ME content, and flowability in diets for growing pigs. *J. Anim. Sci.* 90:4925-4932.
- Liu, K. 2008. Particle size distribution of distillers dried grains with solubles (DDGS) and relationships to compositional and color properties. *Bioresource Tech.* 99:8421-8428.
- Martinez-Amezcuca, C. and C.M. Parsons. 2007. Effect of increased heat processing and particle size on phosphorus bioavailability in corn distillers dried grains with solubles. *Poultry Science* 86:331–337.
- Noll, S., C. Parsons, and B. Walters. 2006. What's new since September 2005 in feeding distillers co-products to poultry. *Proceedings from the 67th Minnesota Nutrition Conference & University of Minnesota Research Update Session: Livestock Production in the New Millenium, St. Paul, MN.* pp. 149-154.
- Pahm, A.A., C.S. Scherer, J.E. Pettigrew, D.H. Baker, C.M. Parsons, and H.H. Stein. 2009. Standardized amino acid digestibility in cecectomized roosters and lysine bioavailability in chicks fed distillers dried grains with solubles. *Poult. Sci.* 88:571-578.
- Roberson, K.D., J.L. Kalbfleisch, W. Pan and R.A. Charbeneau, 2005. Effect of corn distiller's dried grains with solubles at various levels on performance of laying hens and yolk color. *Intl J. Poultry Sci.* 4(2):44-51.
- Rosentrater, K.A. 2006. Some physical properties of distillers dried grains with soluble (DDGS). *App. Eng. Agric.* 22:589-595.
- Sauvant, D. and G. Tran. 2004. Corn Distillers. Page 118 In: *Tables of composition and nutritional value of feed materials.* D. Sauvant, J.M. Perez, and G. Tran, ed. Wageningen Academic Publishers. The Netherlands.

Song, R., and G.C. Shurson. 2013. Evaluation of lipid peroxidation level in corn dried distillers grains with solubles. *J. Anim. Sci.* 91:4383-4388.

Stein H.H., M.L. Gibson, C. Pedersen, and M.G. Boersma. 2006. AA and energy digestibility in 10 samples of distillers dried grain with solubles fed to growing pigs. *J. Anim. Sci.* 84: 853-860.

Urriola, P.E., L.J. Johnston, H.H. Stein, and G.C. Shurson. 2013. Prediction of the concentration of standardized ileal digestible amino acids in distillers dried grains with solubles. *J. Anim. Sci.* 91:4389-4396.

Whitney, M.H., M.J. Spiels, G.C. Shurson, and S.K. Baidoo. 2001. Apparent ileal amino acid digestibility of corn distiller's dried grains with solubles. Available: <http://www.ddgs.umn.edu/articles-swine/2002-Spiehs-percent20Apparent-percent20ileal-percent20amino.pdf> Accessed Jan. 7, 2011.

CAPÍTULO 11

Inocuidad alimentaria de los DDGS

Introducción

LA INOCUIDAD DE LOS ALIMENTOS BALANCEADOS TIENE UN IMPORTANTE IMPACTO EN NUESTRO SISTEMA GLOBAL DE INOCUIDAD DE ALIMENTOS porque no solo afecta de forma directa la salud y producción de los animales, sino también la de los productos alimenticios de origen animal para consumo humano. La contaminación de los alimentos balanceados puede afectar a toda la cadena alimenticia, además de que cuesta millones de dólares en pérdidas de utilidades y de aumento de los costos. Además, crea miedo y pánico entre consumidores, reduce la cantidad de alimentos disponibles para consumo y la confianza del consumidor en el sistema alimentario. También puede haber enfermedades, muerte y posibles riesgos futuros a la salud. Como resultado, la inocuidad del alimento balanceado está directamente vinculada con la de los alimentos de consumo humano, lo que ha llevado al concepto de que “el alimento balanceado es alimento para consumo humano”.

Vivimos y trabajamos en una economía global, con ingredientes de alimentos balanceados y productos alimenticios importados y exportados en todos los países. Sin embargo, las normas y regulaciones de inocuidad del alimento de consumo animal y humano varían notablemente entre países. Es probable que el alimento balanceado y sus ingredientes se contaminen con riesgos microbiológicos, físicos y químicos indeseables, pues debido a la interconexión cada vez mayor entre las cadenas de suministro mundiales, la contaminación de un alimento balanceado puede tener un efecto generalizado incluso en los animales y el alimento para consumo humano. Por lo tanto, al aumentar la comercialización, producción y distribución global de alimentos para consumo humano y animal, también aumenta el posible riesgo de adquirir contaminantes indeseables (Liu, 2011). De hecho, la necesidad cada vez mayor de transparencia del origen de algunos ingredientes de alimentos balanceados ha llevado al desarrollo de tecnologías analíticas para autenticar y diferenciar el origen botánico y geográfico de los granos y coproductos en el mercado internacional (Tres et al., 2014; Tena et al., 2015).

Es primordial que proveedores, compradores y fabricantes de alimentos balanceados no solo que cumplan con las agencias gubernamentales de reglamentación, sino que también desarrollen e implementen programas para la mejora constante de la calidad e inocuidad de todos los aspectos de la cadena de alimentos para consumo humano y animal. En más de 150 países, muchas empresas de producción animal y de alimentos balanceados progresistas han implementado normas ISO (Organización Internacional de Normalización) para fabricar productos de forma más eficaz e inocua, lo que en última instancia lleva a productos más estandarizados para el consumidor. Las empresas que implementan estándares ISO deben documentar las normas y garantizar su cumplimiento mediante auditorías

internas, y al mismo tiempo, verificar su cumplimiento con auditorías externas para certificarse. Además, los fabricantes de alimentos balanceados progresistas han implementado también sistemas HAACP (Análisis de Riesgos y Puntos Críticos de Control) diseñados para prevenir la contaminación del alimento en cada paso de los segmentos de fabricación, almacenamiento y distribución de las cadenas de suministros de alimento para consumo humano y animal. El desarrollo e implementación del plan HAACP cuenta con siete principios, que son:

1. Realizar un análisis de riesgos
2. Identificar puntos críticos de control
3. Establecer límites mínimos y máximos del proceso de fabricación para controlar los posibles riesgos
4. Establecer los límites críticos
5. Establecer procedimientos de monitoreo y medidas correctivas
6. Establecer procedimientos de registros
7. Establecer procedimientos de verificación

Los sistemas de manejo de inocuidad alimentaria deben estar diseñados para manejar la calidad y brindar mejoras continuas en las empresas de alimentos balanceados, combinando principios de ISO 9001 y HAACP para disminuir el riesgo de patógenos de origen alimentario, el surgimiento de nuevos patógenos y proteger los productos con marcas con el control de riesgos.

En muchos países la implementación y monitoreo de sistemas de inocuidad de alimentos para consumo animal y humano mejoran constantemente. De hecho, recientemente EE. UU. adoptó regulaciones más rigurosas de inocuidad de los alimentos balanceados (como la producción de DDGS) para minimizar aún más los riesgos de inocuidad alimentaria para el consumidor. En enero de 2012, se suscribió la Ley de Modernización de la Inocuidad Alimentaria en EE. UU.; fue la primera actualización y expansión importante de los poderes de reglamentación de inocuidad de alimentos para consumo animal y humano de la Administración de Alimentos y Medicamentos (FDA) en casi 70 años (Brew y Toeniskoetter, 2012). Aunque en este país las plantas de producción de alimentos balanceados (junto con las plantas de etanol) han sido obligadas desde 2002 a que se registren con la FDA, esta nueva ley le proporciona a dicho organismo una mayor autoridad para revocar el registro de la planta debido a razones de inocuidad. Esta ley también prohíbe el embarque de alimentos para consumo humano o animal en el comercio interestatal sin el registro actualizado. Como resultado, FDA puede forzar el cese de ventas e incluso ordenar el retiro obligatorio de productos del mercado, si encuentra violaciones importantes a la inocuidad. La implementación de esta nueva ley exige que las plantas de etanol desarrollen

e implementen un plan de Análisis de Riesgos y Puntos Críticos de Control (HACCP) para los coproductos que fabrican. Esta ley les exige a los fabricantes de alimentos balanceados que evalúen los riesgos conocidos o potenciales de inocuidad de los alimentos, que identifiquen e implementen procedimientos preventivos de control, que monitoreen dichos procedimientos, que tomen medidas correctivas cuando no funcionen y que verifiquen periódicamente que esté funcionando todo el sistema de manera eficaz. También hay un requisito de documentación por escrito de estos procedimientos de producción de inocuidad, además de que la FDA inspecciona las plantas de etanol para su cumplimiento. La promulgación de esta nueva ley va a brindar mayor seguridad y confianza de que los DDGS de EE. UU. cumplirán con los requisitos más estrictos de inocuidad en el mundo.

Además de las nuevas reglamentaciones y del cumplimiento de las de la Ley de Modernización de la Inocuidad Alimentaria, algunas plantas de etanol de EE. UU. también implementan la Certificación de Alimentos Balanceados BPM+ (Buenas Prácticas de Manufactura) para cumplir las estrictas normas de coproductos de muchos países y mercados. El esquema de Certificación BPM+ la desarrolló en 1992 la industria holandesa como respuesta a varios eventos que implicaban a la contaminación de los ingredientes. Actualmente, la BPM+ ha crecido hasta volverse un programa internacional gestionado por GMP+ International en colaboración con numerosos participantes internacionales. En 2013, el programa BMP+ se amplió aún más para incluir el Aseguramiento de la Garantía de Inocuidad del Alimento BMP+ y el Aseguramiento de la Responsabilidad del Alimento BMP+. La implementación del Aseguramiento de la Garantía de Inocuidad del Alimento BMP+ en las plantas de etanol se ha vuelto necesaria como un “permiso de venta” de DDGS para empresas integradas de producción animal y alimentos balanceados progresistas en varios países y mercados para cumplir con las normas del aseguramiento de la inocuidad del alimento en todos los segmentos de la cadena de suministros. Además, hay una demanda creciente de la industria mundial de alimentos balanceados para trabajar de forma más responsable al abastecerse de ingredientes que minimicen los efectos de competir con la inocuidad de alimentos de consumo humano (por ejemplo, soya y harina de pescado), así como los impactos negativos en el ambiente.

Afortunadamente, en los DDGS de EE. UU. el riesgo de contaminantes microbianos, físicos y químicos es extremadamente bajo. El maíz y los DDGS de maíz no tienen factores antinutricionales, excepto el fitato indigestible del fósforo, el cual se encuentra en varias concentraciones en todos los granos y sus coproductos. Sin embargo, la amplia disponibilidad comercial y uso de fitasas ha demostrado ser eficaz en costos para degradar el fitato y mejorar la digestibilidad del fósforo en las dietas de granos para monogástricos.

El enfoque de este capítulo es brindar una breve revisión sobre los posibles factores de riesgo microbiológico, químico y físico de inocuidad alimentaria en los DDGS que hay que tomar en cuenta cuando se usan para alimentar diversas especies de animales para consumo humano. Los principales contaminantes posibles de preocupación son los microorganismos patógenos, micotoxi-

nas, residuos de antibióticos y azufre. Para información más detallada con respecto a estos temas, el lector pueden consultar los **capítulos 13** (Uso de antibióticos en la producción de DDGS), **14** (Micotoxinas en los DDGS), **15** (Beneficios y preocupaciones del azufre en los DDGS) y el **19** (DDGS y la diseminación de la E. coli O157:H7 en ganado de engorde).

Factores de potencial riesgo microbiológico

Transmisión de coronavirus en el alimento balanceado y sus ingredientes

Los coronavirus (virus de gastroenteritis transmisible o TGEV; deltacoronavirus porcino o PDCoV; virus de la diarrea epidémica porcina, DEP) han tenido efectos devastadores en la industria porcina mundial. Estos virus se excretan en las heces, se pueden transmitir mediante el equipo, personal y otros fómites contaminados; ocasionan diarrea grave, alta mortalidad, así como las consiguientes reducciones en el desempeño del crecimiento y rentabilidad. En 2013, el virus de la diarrea epidémica porcina (DEP) tuvo efectos devastadores en la mortalidad porcina en EE. UU.; se identificó al alimento balanceado y sus ingredientes como importantes factores de riesgo de transmisión. Como resultado, se llevaron a cabo investigaciones para determinar la supervivencia del coronavirus en el alimento y sus ingredientes, así como las posibles estrategias de mitigación para minimizar la transmisión a través de estos. Dee et al. (2015) mostraron que varía la supervivencia del virus de la DEP en el alimento entre los diferentes tipos de ingredientes; parece que sobrevive más en la harina de soya, pero al aplicar un tratamiento líquido a base de formaldehído hizo que el virus se inactivara en todos los ingredientes. De la misma forma, Trudeau et al. (2017) evaluaron la supervivencia de los virus de la DEP, TGEV y PDCoV en distintos ingredientes de alimentos, como las fuentes de DDGS con distinto contenido de aceite (**figura 1**). El virus de la DEP fue el virus que más sobrevivió, además de que los de TGEV y PDCoV tuvieron también una alta supervivencia en la harina de soya comparado con todo los otros ingredientes. Curiosamente, la resistencia del virus fue muy baja en las fuentes de DDGS con contenido de aceite bajo y alto (1.0 y 0.8 días de TGEV y de 0.7 a 0.6 días de DEP, respectivamente), comparada con la fuentes de contenido medio (1.7 días de TGEV y 7.3 días de DEP). En contraste, el PDCoV sobrevivió más tiempo en las fuentes de DDGS con contenido de aceite bajo y alto, comparado con los de contenido medio, harina de sangre, alimento completo, harina de carne y plasma secado por aspersión. El tiempo de supervivencia de todos los virus en las fuentes de DDGS fue mucho menor que en la harina de soya y del TGEV y PDCoV en los DDGS fue mucho menor comparada con el maíz. Estos resultados indican que la harina de soya es un factor de mayor riesgo de transmisión de coronavirus en el alimento balanceado que los DDGS y otros ingredientes comunes. Desafortunadamente, no se han llevado a cabo estudios que determinen si otros patógenos, como el virus de la influenza aviar, se pueden transmitir en los ingredientes o su capacidad de supervivencia durante el transporte y el almacenamiento.

Transmisión de *Salmonella* en el alimento balanceado y sus ingredientes

No hay datos, ni reglamentaciones gubernamentales

relacionadas con el control de la posible contaminación por *Salmonella* en los DDGS. Ha habido un debate científico a largo plazo con respecto a la factibilidad y la probable eficacia de hacer valer la norma de salmonela negativa en alimentos para animales para reducir la incidencia de salmonelosis en los seres humanos (Davies et al., 2004). Es difícil evaluar el impacto de reducir la contaminación de *Salmonella* en el alimento para animales con respecto al riesgo de la salmonelosis de origen alimentario en el ser humano. Los factores que pueden reducir o eliminar el posible beneficio de las intervenciones regulatorias en los alimentos comerciales incluyen:

- Uso amplio del mezclado de alimentos en la granja
- Descontaminación incompleta del alimento durante el procesamiento
- Contaminación del alimento posterior al procesamiento en la planta
- Contaminación durante el transporte o almacenamiento del alimento en la granja
- Numerosas fuentes no alimenticias de *Salmonella*
- Riesgo alto en infección posterior a la granja en el corral temporal
- Fuentes posteriores a la recolección de contaminación de *Salmonella*

Riesgo potencial de diseminación de *Salmonella*, *Escherichia coli* O157:H7 y *Clostridium perfringens* al alimentar con dietas de DDGS

El tracto gastrointestinal de los animales contiene de forma natural *E. coli* O157:H7 y *Salmonella*, patógenos de origen alimentario que se pueden diseminar por las heces, lo que lleva a una posible contaminación de productos alimenticios y a provocar enfermedades al consumidor. Un grupo de

investigación (Jacob et al., 2008a,b,c) llevo a cabo una serie de estudios que demostraron una prevalencia inconsistente, pero generalizada, de diseminación de *E. coli* O157:H7 al alimentar con DDGS al ganado de engorde. Otros estudios (Peterson et al., 2007; Nagaraja et al., 2008) también han mostrado que hay diseminación de *E. coli* en ganado de engorde, pero el uso de altos niveles de DDGS en la dieta no influyó en dicha diseminación. Además, no hubo asociación entre alimentar con dietas de DDGS o maíz rolado en seco sobre la prevalencia de *E. coli* O157:H7 o *Salmonella* (Jacob et al., 2009). Estos resultados indican que hay un riesgo mínimo de una mayor diseminación de *E. coli* O157:H7 o *Salmonella* al alimentar el ganado con DDGS.

Estudios posteriores en crecimiento/finalización de cerdos no demostraron efectos en la susceptibilidad o colonización de *Salmonella typhimurium* al alimentarlos con dietas de DDGS (Rostagno et al., 2013). En el pollo de engorde, Loar et al. (2010) demostraron que la alimentación con dietas de DDGS no tuvo efectos en los conteos de *Clostridium perfringens* y *Escherichia coli* en contenido cecal. Estos resultados indican que, si acaso, parece haber un riesgo mínimo de alimentar DDGS al ganado de engorde, cerdos y pollo de engorde con el incremento del riesgo de transmisión de patógenos de origen alimentario a los productos cárnicos.

Micotoxinas

De todos los factores de riesgo de inocuidad de los alimentos balanceados de los DDGS, quizás la mayor preocupación sea una posible contaminación por micotoxinas. Las micotoxinas las producen hongos durante la temporada de cultivo y bajo condiciones ambientales específicas durante el almacenamiento. Desde una perspectiva de inocuidad alimentaria humana, las aflatoxinas son el único tipo de

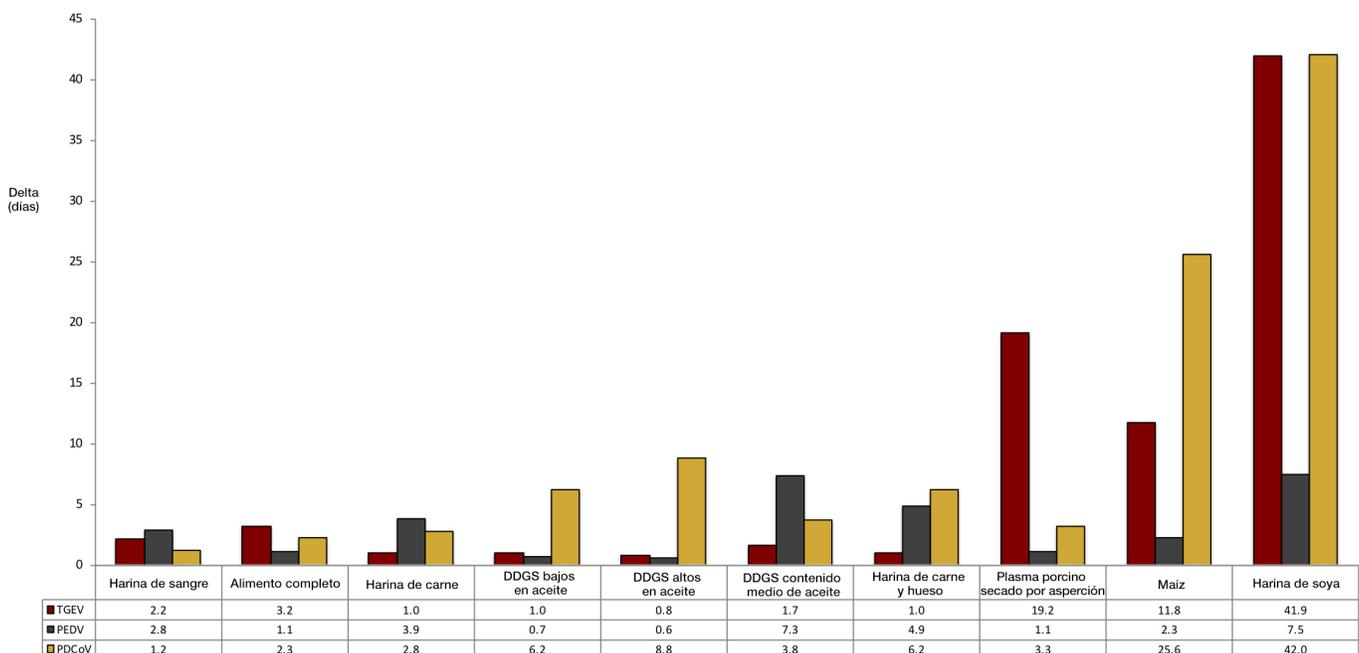


Figura 1. Supervivencia del coronavirus (gastroenteritis transmisible o TGEV; diarrea epidémica porcina o DEP; deltacoronavirus porcino o PDCoV) en alimentos completos e ingredientes de comunes (Trudeau et al., 2017)

micotoxinas reguladas por la FDA de EE UU. debido a sus efectos cancerígenos. Sin embargo, si los ingredientes tienen concentraciones altas de distintas micotoxinas, pueden darse efectos nocivos en la utilización de nutrientes, función inmunitaria y otros efectos fisiológicos adversos que lleven a afectar la salud y el desempeño animal. Por lo general, los cerdos y las aves son más susceptibles a las micotoxinas que los rumiantes y en cada especie los animales jóvenes son más susceptibles que los más viejos. Aunque las micotoxinas las producen cepas específicas de hongos, es inútil medir el conteo de hongos en los ingredientes ya que dicho análisis no proporciona información o confirmación en lo que respecta a la posible presencia de concentraciones de micotoxinas.

La prevalencia y concentraciones de micotoxinas en el maíz, otros granos y DDGS varía entre los países de todo el mundo (Biomín, 2014). Los estudios han demostrado que la prevalencia de la contaminación y concentraciones de micotoxinas en los DDGS de EE. UU. son mucho menores comparado con los ingredientes que se producen en China (Biomín, 2014; Guan et al., 2011; Li et al., 2014). Se han publicado dos extensos estudios de contaminación por micotoxinas en DDGS de EE. UU. (Zhang et al., 2009; Khatibi et al., 2014), que muestran concentraciones relativamente bajas de distintas micotoxinas con respecto a los lineamientos existentes. De 2006 a 2008, Zhang et al. (2009) analizaron un total de 235 muestras de DDGS de 20 plantas de etanol de EE. UU., así como 23 muestras de DDGS recolectadas de 23 contenedores de embarque de exportación y notificaron que:

1. Ninguna de las muestras de DDGS contenían concentraciones de aflatoxinas o deoxinivalenol superiores a los lineamientos para uso en alimentos para animales de la FDA de EE UU.
2. Ninguna de las muestras de DDGS tuvo concentraciones de fumonisinas mayores a los lineamientos de la FDA para uso en alimento para ganado lechero y de engorde, cerdos, aves y acuicultura; solo el 10 por ciento de las muestras tuvo concentraciones mayores al máximo recomendado para uso en alimento de caballos y conejos (las especies más sensibles a las fumonisinas).
3. Ninguna de las muestras contenía concentraciones detectables de toxina T-2 y la mayoría de las muestras no tuvo concentraciones detectables de zearalenona.
4. El uso de contenedores para exportar DDGS no lleva al aumento de producción de micotoxinas.

Más recientemente, Khatibi et al. (2014) llevaron a cabo un estudio de micotoxinas en la que recolectaron y analizaron 141 muestras de DDGS de maíz de 78 plantas de etanol localizadas en 12 estados de EE. UU., en busca de la presencia y concentraciones de diferentes tricotecenos. En el maíz producido en EE. UU. en 2011, hubo una alta prevalencia inusual de hongos *Fusarium spp.*, resultado de condiciones climáticas adversas durante la temporada de cultivo del maíz. En este caso extremo, el 69 por ciento de las muestras no tuvo niveles detectables de deoxinivalenol, solo el 5 por ciento de las muestras estuvo por arriba de los niveles recomendados de la

FDA para cerdos, y solo el 19 por ciento de las muestras tuvo concentraciones detectables de zearalenona.

Los resultados de estos estudios indican que puede haber presencia de micotoxinas en los DDGS de maíz, pero la prevalencia y concentraciones de los que se producen en EE. UU. es mucho menor que en los producidos en China. Por lo tanto, dependiendo del origen geográfico y la prevalencia de micotoxinas en el maíz de un año dado, se pueden usar altas tasas de inclusión de DDGS en la dieta si la prevalencia y la concentración de micotoxinas es baja, para minimizar así el riesgo de que excedan por arriba de los niveles recomendados.

Posibles factores de riesgo químico

Residuos de antibióticos

A menudo se añaden pequeñas cantidades de algún tipo de antibiótico a los fermentadores para controlar las infecciones bacterianas durante la fermentación del almidón para producir etanol y coproductos. La FDA de EE. UU. no restringe el uso de antibióticos en la producción de etanol, además de que hay paneles de científicos expertos que han revisado el de uso predominante (virginiamicina) y lo considera como generalmente reconocido como inocuo (GRAS). En EE. UU. y la UE se ha eliminado el uso global de los antibióticos para propósitos de promoción de crecimiento, mientras que en otros países también se reduce su uso en la producción de animales para consumo humano. La principal preocupación con respecto al uso de los antibióticos es el posible riesgo de que haya residuos en carne, leche y huevos, y se desarrolle resistencia en animales y humanos. La FDA de EE. UU. ha realizado estudios para determinar la presencia y concentraciones de varios residuos de antibióticos en los DDGS, con un método de detección de residuos múltiples (de Alwis y Heller, 2010; Kaktamanos et al., 2013), pero los resultados no se han publicado. La elección de procedimientos analíticos es muy importante porque la presencia de algunos residuos de antibióticos (por ejemplo, la virginiamicina) solo se puede cuantificar con precisión con bioensayos.

Solo se ha realizado un estudio para determinar la prevalencia, concentraciones y actividad biológica de residuos de antibióticos en 159 muestras de coproductos de destilería, recolectadas trimestralmente en 43 plantas de etanol de nueve estados de EE. UU. (Paulus-Compart et al., 2013). Los resultados de este estudio mostraron que el 13 por ciento de las muestras contenía concentraciones bajas (menores a 1.12 mg/kg) de residuos de antibióticos. Al analizar la actividad biológica de los extractos de las muestras mediante bacterias centinelas seleccionadas, solo una muestra (que no tuvo concentraciones detectables de residuos de antibióticos) inhibió el crecimiento de *Escherichia coli* y ninguna inhibió el de *Listeria monocytogenes*. Por lo tanto, es muy baja la probabilidad de detección de residuos de antibióticos en los DDGS y de detectarse, hay un riesgo mínimo de que dichos residuos tengan actividad biológica residual alguna. Desde la época en que se realizó este estudio, ha habido una disminución importante en el uso de antibióticos en la producción de etanol, atribuible al mejor saneamiento y la disponibilidad de

otros aditivos no antibióticos para controlar las infecciones bacterianas durante la fermentación. De hecho, algunas plantas de etanol ahora producen DDGS sin antibióticos.

Dioxinas

No se han llevado a cabo estudios para evaluar la posible contaminación de dioxinas en los DDGS, ni tampoco hay regulaciones al respecto. Las dioxinas son un grupo de químicos que representan más de 210 diferentes compuestos que son ubicuos en el ambiente. Solo 17 de estos compuestos son de preocupación toxicológica y no se producen intencionalmente. Por lo tanto, no se pueden simplemente prohibir. Las dioxinas se forman como un subproducto de los procesos químicos y son insolubles en agua y liposolubles. Las dioxinas no son biodegradables y se pueden acumular en la cadena alimenticia. Se han establecido límites máximos de concentración de dioxinas en pulpa de cítricos y la arcilla caolinita; el aceite y la harina de pescado son los ingredientes más comunes con contaminación de dioxinas. Las grasas animales pueden también contener dioxinas, pero en bajas concentraciones, mientras que son poco comunes en los cereales y semillas, subproductos lácteos y harina de carne y hueso.

Maíz genéticamente modificado (MG)

A diferencia de EE. UU., hay varios países que están preocupados por la inocuidad de los cultivos genéticamente modificados (GM), y como resultado, prohíben o restringen legalmente la producción o importación de algunos de ellos, sino es que todos los granos GM y sus coproductos. Esta restricción continúa siendo un punto controvertido, aunque en muchos países del mundo hay pocas materias primas disponibles para la producción pecuaria para brindar una adecuada seguridad alimentaria. En 2015, en alrededor del 92 por ciento de la superficie sembrada de maíz en EE. UU. se usaron variedades de ingeniería genética (USDA-NASS, 2015). Por lo tanto, la mayoría de los DDGS de maíz de EE. UU. que se producen usa variedades de maíz MG.

En EE. UU. se han aprobado más de 165 eventos de ingeniería genética en 19 especies vegetales (maíz y soya incluidas) (James, 2013); todas fueron evaluadas por la FDA mediante una evaluación detallada de riesgos de inocuidad. En los últimos 20 años, dichos eventos genéticamente modificados evaluados por la FDA de EE. UU. y por reguladores de Japón, han demostrado tener una inocuidad equiparable con las variedades de cultivos tradicionales (Herman y Price, 2013). Además, para la evaluación de riesgos de los organismos modificados genéticamente, se usan los lineamientos internacionalmente aceptados desarrollados por la Comisión del Codex Alimentarius (www.codexalimentarius.org).

Hay una cantidad sustancial de pruebas científicas de que los cultivos GM son inocuos. El Council for Biotechnology Information ha publicado una declaración que indica que la Administración de Alimentos y Medicamentos (FDA) ha determinado que los alimentos y cultivos biotecnológicos son tan inocuos como lo son también sus contrapartes no biotecnológicas. La American Medical Association, la American Dietetic Association y la National Academy of Sciences de EE.

UU. también han declarado que los alimentos biotecnológicos son seguros para el consumo animal y humano. Además, desde que se introdujeron al mercado de EE. UU. en 1996, ninguna persona o animal se ha enfermado por comer alimentos biotecnológicos. Otros grupos internacionales que han concluido que los alimentos y cultivos biotecnológicos son inocuos son la Organización para la Alimentación y la Agricultura de las Naciones Unidas, la Organización Mundial de la Salud, el Consejo Internacional para la Ciencia, la Agencia Francesa de Alimentos y la British Medical Association. La Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA) también ha encontrado que diversas variedades biotecnológicas son inocuas para el consumo humano y animal". A continuación se encuentran varios vínculos relacionados de un análisis más detallado de la inocuidad de los cultivos MG en la cadena alimenticia:

Posición de la American Dietetic Association:
Agricultural and Food Biotechnology
<http://download.journals.elsevierhealth.com/pdfs/journals/0002-8223/PIIS0002822305021097.pdf>

Organización Mundial de la Salud: Modern food biotechnology, human health and development: an evidence-based study
http://www.who.int/foodsafety/publications/biotech/biotech_en.pdf

United Nations: Effects on human health and the environment
<http://www.fao.org/newsroom/en/news/2004/41714/index.html>

National Academy of Sciences: Safety of Genetically Engineered Foods
http://books.nap.edu/catalog/10977.html?onpi_newsdoc07272004

Por más de 15 años los animales destinados a producir alimentos han consumido de 70 a 90 por ciento de cultivos y coproductos modificados genéticamente (Flachowsky et al., 2012). En una reciente revisión exhaustiva (van Eenennaam y Young, 2014) se analizaron los datos de más de 100,000 millones de animales alimentados con cultivos y coproductos modificados genéticamente y no se encontró prueba alguna de efectos adversos en la salud animal, ni en la productividad. Desafortunadamente, a pesar de la ausencia de dichos efectos, en algunos países se han creado barreras comerciales y restricciones a las importaciones para impedir la importación y uso de maíz y DDGS producidos en EE. UU. en el alimento balanceado.

Posibles factores de riesgo físico

El riesgo de contaminantes físicos es extremadamente bajo. Los contaminantes físicos más comunes del grano y los ingredientes de alimentos balanceados son piedras y fragmentos de metal, vidrio, madera o plástico. En los productos alimenticios los riesgos físicos se clasifican como "duros o afilados" o "de obstrucción". Con frecuencia la producción agropecuaria y las instalaciones de carga tienen gravilla compactada o piedras

que pueden contaminar sin querer al alimento balanceado durante la carga. El contacto de metal con metal de las bandas transportadoras y el equipo de carga producen fragmentos de metal por el desgaste normal, que en ocasiones se les puede encontrar en el grano o ingredientes en los contenedores o buques de transporte. En las instalaciones que utilizan contenedores de vidrio o plástico para almacenar materiales, puede haber fragmentos rotos de dichos materiales que puedan también contaminar los ingredientes. Todos estos posibles riesgos físicos son poco comunes, pero pueden estar presentes como resultado de las instalaciones y los procesos usados para fabricar, cargar y transportar los ingredientes de alimentos balanceados.

Bibliografía

- Biomin. 2014. Mycotoxins: Science and solutions. Biomin magazine, April, 2014.
- Brew, S. and S. Toeniskoetter. 2012. FDA Has No Jurisdiction Here – Or Does It? Ethanol Producer Magazine, April, 2012, p. 20.
- Davies, P.R., H.S. Hurd, J.A. Funk, P.J. Fedorka-Cray, and F.T. Jones. 2004. Review: The role of contaminated feed in the epidemiology and control of *Salmonella enteric* in pork production. *Foodborne Pathogens and Disease* 1:202-215.
- de Alwis, H., and D.N. Heller. 2010. Multiclass, multiresidue method for the detection of antibiotic residues in distillers grains by liquid chromatography and ion trap tandem mass spectrometry. *J. Chromatogr. A* 1217:3076-3084.
- Dee, S. C. Neill, T. Clement, A. Singrey, J. Christopher-Hennings, and E. Nelson. 2015. An evaluation of porcine epidemic diarrhea virus survival in individual feed ingredients in the presence or absence of a liquid antimicrobial. *Porcine Health Mgmt.* 1:9.
- Flachowsky, G., H. Schafft, and U. Meyer. 2012. Animal feeding studies for nutritional and safety assessments of feeds from genetically modified plants: A review. *J. Verbraucherschutz Lebensmittelsicherh.* 7:179-194.
- Guan, S., M. Gong, Y.L. Yin, R.L. Huang, Z. Ruan, T. Zhao, and M-Y. Xie. 2011. Occurrence of mycotoxins in feeds and feed ingredients in China. *J. Food Ag. Env.* 9:163-167.
- Herman, R.A., and W.D. Price. 2013. Unintended compositional changes in genetically modified (GM) crops: 20 years of research. *J. Agric. Food Chem.* 61:11695-11701.
- Jacob, M.E., J.T. Fox, J.S. Drouillard, D.G. Renter, and T.G. Nagaraja. 2009. Evaluation of feeding dried distillers grains with solubles and dry-rolled corn and the fecal prevalence of *Escherichia coli* O157:H7 and *Salmonella* spp. in cattle. *Foodborne Pathogens and Disease* 6:145-153.
- Jacob, M.E., J.T. Fox, J.S. Drouillard, D.G. Renter, and T.G. Nagaraja. 2008a. Effects of dried distillers' grain on fecal prevalence and growth of *Escherichia coli* O157 in batch culture fermentations from cattle. *Appl. Environ. Microbiol.* 74:38-43.
- Jacob, M.E., G.L. Parsons, M.K. Shelor, J.T. Fox, J.S. Drouillard, D.U. Thomson, D.G. Renter, and T.G. Nagaraja. 2008b. Feeding supplemental dried distillers grain increases fecal shedding of *Escherichia coli* O157 in experimentally inoculated calves. *Zoonoses Public Health* 55:125-132.
- Jacob, M.E., J.T. Fox, S.K. Narayanan, J.S. Drouillard, D.G. Renter, and T.G. Nagaraja. 2008c. Effects of feeding wet corn distillers grains with solubles with or without monensin and tylosin on the prevalence and antimicrobial susceptibilities of fecal food-borne pathogenic and commensal bacteria in feedlot cattle. *J. Anim. Sci.* 86:1182-1190.
- James, C. 2013. Global status of commercialized biotech/GM crops. The International Service for the Acquisition of Agri-biotech Applications (ISAAA) brief no. 46. ISAAA, Ithaca, NY.
- Kaklamanos, G., U. Vincent, and C. von Holst. 2013. Multi-residue method for the detection of veterinary drugs in distillers grains by liquid chromatography-Orbitrap high resolution mass spectrometry. *Chromatography A* <http://dx.doi.org/10.1016/j.chroma.2013.10.079>.
- Khatibi, P.A., N.J. McMaster, R. Musser, and D.G. Schmale III. 2014. Survey of mycotoxins in corn distillers' dried grains with solubles from seventy-eight ethanol plants in twelve states in the U.S. in 2011. *Toxins* 6:1155-1168.
- Li, X., L. Zhao, L.Y. Fan, Y. Jia, L. Sun, S. Ma, C. Ji, Q. Ma, and J. Zhang. 2014. Occurrence of mycotoxins in feed ingredients and complete feeds obtained from the Beijing region of China. *J. Anim. Sci. Biotech.* 5:37-45.
- Liu, K. 2011. Chemical composition of distillers grains, a review. *J. Agric. Food Chem.* 59:1508-1526.
- Loar, R.E., J.S. Moritz, J.R. Donaldson, and A. Corzo. 2010. Effects of feeding distillers dried grains with solubles to broilers from 0 to 28 days posthatch on broiler performance, feed manufacturing efficiency, and selected intestinal characteristics. *Poult. Sci.* 89:2242-2250.
- Nagaraja, T.G., J. Drouillard, D. Renter, and S. Narayanan. 2008. Distillers grains and food-borne pathogens in cattle: Interaction and intervention. *KLA News & Market Report* Vol. 33, No. 35.
- Paulus Compart, D.M., A.M. Carlson, G.I. Crawford, R.C. Fink, F. Diez-Gonzalez, A. Dicostanzo, and G.C. Shurson. 2013. Presence and biological activity of antibiotics used in fuel ethanol and corn co-product production. *J. Anim. Sci.* 91:2395-2404.

- Peterson, R.E., T.J. Klopfenstein, R.A. Moxley, G.E. Erickson, S. Hinckley, G. Bretschneider, E.M. Berberov, D. Rogan, and D.R. Smith. 2007. Effect of a vaccine product containing type III secreted proteins on the probability of *E. coli* O157:H7 fecal shedding and mucosal colonization in feedlot cattle. *J. Food Protection* 70:2568-2577.
- Rostagno M.H., B.T. Richert, L.V.C. Girao, G.M. Preis, L.J. Lara, A.F. Amaral, A.D.B. Melo, and A. Jones. 2013. Do dried distillers grains with solubles affect the occurrence of *Salmonella enterica* colonization in pigs? *J. Anim. Sci.* 91(E-Suppl. 2):699.
- Tena, N., A. Boix, and C. von Holst. 2015. Identification of botanical and geographical origin of distillers dried grains with solubles by near infrared microscopy. *Food Control* 54:103-110.
- Tres, A., S.P. Heenan, and S. van Ruth. 2014. Authentication of dried distilled grains with solubles (DDGS) by fatty acid and volatile profiling. *LWT – Food Sci. Tech.* 59:215-221.
- Trudeau, M.P., H. Verma, F. Sampedro, P.E. Urriola, G. C. Shurson, and S.M. Goyal. 2017. Environmental persistence of porcine coronaviruses in feed and feed ingredients. *PLoS ONE* 12:e0178094. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0178094>.
- USDA National Agricultural Statistics Service. 2015. Acreage. USDA. <http://usda.mannlib.cornell.edu/usda/current/Acre/Acre-06-30-2015.pdf> (Accessed November 3, 2017)
- van Eenennaam, A.L., and A.E. Young. 2014. Prevalence and impacts of genetically engineered feedstuffs on livestock populations. *J. Anim. Sci.* 92:4255-4278.
- Zhang, Y., J. Caupert, P.M. Imerman, J.L. Richard, and G.C. Shurson. 2009. The occurrence and concentration of mycotoxins in U.S. distillers dried grains with solubles. *J. Agric. Food Chem.* 57:9828-9837.

CAPÍTULO 12

Beneficios y preocupaciones del azufre en los DDGS

Introducción

El **AZUFRE (S) ES UN MINERAL ESENCIAL PARA LOS ANIMALES** y sirve en muchas funciones biológicas importantes en el organismo animal. El contenido promedio de azufre en los DDGS es entre 0.65 y 0.70 por ciento, pero en algunas muestras puede exceder el 1 por ciento (**cuadro 1**), lo cual limita su uso en las dietas de rumiantes. Es común añadir ácido sulfúrico durante el proceso de producción del etanol de molienda en seco para mantener el pH en niveles deseados para obtener la propagación y fermentación óptimas de la levadura que dé una eficaz conversión del almidón a etanol. El ácido sulfúrico también se usa para la limpieza gracias a su bajo costo en relación a otros ácidos. De acuerdo con la AAFCO Official Publication 2004, pág. 386, el ácido sulfúrico está generalmente reconocido como inocuo de acuerdo con el U.S. Code of Federal Regulation (21 CFR 582) y se lista como un aditivo alimenticio aprobado (21 CFR 573). Además, el maíz contiene de manera natural alrededor de 0.12 por ciento de azufre, el cual se concentra por un factor de tres cuando el maíz se utiliza para producir etanol y DDGS, como todos los otros nutrientes. La levadura también contiene alrededor de 3.9 g/kg de azufre y crea de forma natural sulfitos durante la fermentación. Con base en la variabilidad significativa del contenido de azufre en y entre fuentes de DDGS, es importante determinar cuánto contiene la fuente a alimentarse y monitorear la variación entre lotes o cargas. Conocer la variación de contenido de azufre les da a nutricionistas y formuladores la capacidad de brindar un margen de seguridad adecuado en la formulación de alimentos para manejar esta variabilidad.

Sin embargo, cuando hay exceso de azufre en las dietas de rumiantes, se pueden presentar problemas neurológicos. Cuando se dan alimento y agua con niveles altos de azufre (mayores a 0.40 por ciento de la materia seca de la dieta) a rumiantes, puede darse una condición llamada polioencefalomalacia (PEM). La polioencefalomalacia está causada por necrosis de la región cerebrocortical del cerebro de ganado, ovejas y cabras. Cuando los rumiantes consumen azufre, se reduce a sulfuro de hidrógeno mediante las bacterias ruminales. El sulfuro de hidrógeno es tóxico y se cree que su acumulación en el rumen es la causa de estos efectos tóxicos.

Los rumiantes son más vulnerables a PEM cuando las dietas cambian abruptamente de una dieta principalmente de forrajes a una de granos. Esto causa un viraje impresionante en la población microbiana del rumen que produce tiaminasa, lo que resulta en una deficiencia de tiamina. El azufre también parece desempeñar un papel y una interacción importantes en la producción de tiaminasa para causar este estado, pero no se conoce bien el mecanismo. Además, el exceso de azufre en la dieta puede interferir con la absorción y metabolismo del cobre. Como resultado, cuando se alimentan niveles altos de azufre en la dieta durante un período largo, se deben también incrementar los niveles de cobre (Boyles, 2007). Este trastorno no ocurre en animales no rumiantes (cerdos, aves, peces).

En contraste con los rumiantes, la alimentación de dietas que contienen DDGS altos de azufre puede ser benéfica para evitar el estrés metabólico en cerdos. Las investigaciones recientes realizadas en la Universidad de Minnesota (Song et al., 2013) mostraron que el alto contenido de azufre en los DDGS de maíz protege contra los lípidos peroxidados en este ingrediente al aumentar los antioxidantes que contienen azufre en los lechones.

Manejo del contenido de azufre en las dietas de rumiantes cuando se alimentan de DDGS

Los NRC de Ganado de Engorde (1996) indican que el nivel máximo tolerable de azufre en las dietas de ganado de engorde es de 0.40 por ciento (con base en materia seca). Vanness et al. (2009) resumieron la incidencia de PEM de los experimentos de alimentación con coproductos de maíz de la University of Nebraska, en los que mostraron que la tasa de incidencia aumenta conforme lo hace el contenido total de azufre de la dieta de 0.40 por ciento a más de 0.56 por ciento en dietas que contenían de 6 a 8 por ciento de forraje (**cuadro 2**). Las dietas altas en azufre (más del 0.50 por ciento) que son bajas en fibra efectiva (menos del 4 por ciento) y altas en almidones rápidamente fermentables (mayores al 30 por ciento) son las más probables que causen PEM (Drewnoski et al., 2011). Por ejemplo, Vanness et al. (2009) informaron que el ganado que consume una dieta de DDGS con 0.47 por ciento azufre sin forraje tuvieron una tasa de incidencia de PEM del 48 por ciento,

Cuadro 1. Resumen de estudios que determinaron el contenido de azufre (porcentaje de materia seca) de los DDGS (adaptado de Kim et al., 2012)

Referencia	No. de muestras	Promedio	DE	Mínimo	Máximo
Kim et al., 2012	35	0.65	0.19	0.33	1.04
Kerr et al., 2008	19	0.69	0.23	0.38	1.35
Shurson, 2009	49	0.69	0.26	0.31	1.93

pero el ganado que consumía una dieta con una concentración similar de azufre con 6 a 8 por ciento de forraje presentó una tasa menor al 1 por ciento. Las investigaciones realizadas en University of Nebraska y Iowa State University han mostrado que cuando los niveles de forraje en la dieta son mayores al seis u ocho por ciento, el riesgo de la toxicidad por azufre puede ser menor (Drewnoski et al. 2011). Si se incluye en la dieta un 15 por ciento de forraje (base materia seca), la concentración total de azufre puede aumentarse a 0.5 por ciento, lo que es equivalente a un aumento de 10 a 15 por ciento de DDGS en la dieta, sin causar PEM. Al incrementar el contenido de forraje de la dieta, el pH del rumen no se va a reducir, y por lo tanto, no va a favorecer la formación de sulfuro de hidrógeno y va a permitir que aumente su concentración en el rumen. Parece que las estrategias de manejo de alimentación que minimizan el riesgo del acidosis, tales como minimizar la variación del consumo de alimento, el aumento de la frecuencia de alimentación y el uso de ionóforos también pueden reducir el riesgo de PEM.

El **cuadro 3** muestra ejemplos del impacto de añadir diferentes niveles de DDGS, con diferentes niveles de azufre, a las dietas del ganado de engorde hechas de maíz y ensilado de maíz en el contenido final de azufre en la dieta, suponiendo que hay niveles bajos de sulfato en el agua de bebida. Estos datos muestran que a tasas altas de inclusión en la dieta (40 por

ciento de ingestión de materia seca) y altos niveles de azufre en los DDGS (mayor al 0.80 por ciento), los niveles de azufre totales en la dieta sobrepasarían el 0.40 por ciento, considerado como el nivel máximo para causar PEM. En el **cuadro 4** se muestra el posible intervalo de contenido de azufre en la dieta con varias tasas de inclusión de DDGS y de contenido de azufre, suponiendo una variación interna en la planta del 10 por ciento. Por lo tanto, al alimentar con DDGS al ganado, debe determinarse el contenido de azufre y usar junto con la tasa de inclusión en la dieta, así como las contribuciones de azufre de otros ingredientes y del agua, para garantizar que el contenido total de este elemento en la dieta no exceda el 0.40 por ciento.

Además del contenido de azufre de las materias primas, el agua de bebida también puede ser, en ciertas zonas geográficas, una fuente importante de la ingestión de azufre total. Si se desconoce el contenido de azufre del agua de bebida que se le brinda al ganado, debe analizarse en cuanto al contenido de sulfatos y considerarse cuando se determinen las tasas de dieta inclusión de la dieta de DDGS y otros ingredientes. El consumo de agua del ganado también varía de acuerdo a la zona geográfica y está sumamente influenciado por la temperatura ambiente. En el **cuadro 5** se muestra el consumo de azufre adicional en la dieta obtenido del agua de bebida en diversas temperaturas ambiente y concentraciones de sulfatos del agua.

Cuadro 2. Incidencia de PEM de los experimentos de alimentación con coproductos de maíz de la University of Nebraska (adaptado de Vanness et al., 2009)

Tasa de incidencia de PEM	S de la dieta	Casos de PEM/total de cabezas
0.14 por ciento	0.40 al 0.46 por ciento	3 de 2147
0.35 por ciento	a 0.56 por ciento	3 de 566
0.56 por ciento	mayor al 0.56 por ciento	6 de 99

Cuadro 3. Efecto del contenido de azufre de los DDGS y la tasa de inclusión en la dieta (base materia seca) sobre el contenido total de azufre de las dietas de maíz y ensilado de maíz para el ganado de engorde (adaptado de Boyles, 2007)

% de inclusión de DDGS, MS	0.60% de azufre en DDGS	0.80% de azufre en DDGS	1% de azufre en DDGS
20	0.21	0.25	0.29
30	0.27	0.33	0.37
40	0.33	0.41	0.49

Cuadro 4. Rango de contenido de azufre¹ en la dieta basado en la variación típica de azufre en los DDGS dentro de la planta (base materia seca; adaptado de Drewnoski et al., 2011)

Contenido de azufre esperado en DDGS %	Azufre en la dieta con 30% de DDGS %	Azufre en la dieta con 40% de DDGS %	Azufre en la dieta con 50% de DDGS %	Azufre en la dieta con 60% de DDGS %
0.6	0.32-0.34	0.36-0.38	0.40-0.43	0.44-0.48
0.7	0.35-0.37	0.40-0.43	0.45-0.49	0.50-0.54
0.8	0.38-0.40	0.44-0.47	0.50-0.54	0.56-0.61
0.9	0.41-0.44	0.48-0.52	0.55-0.60	0.62-0.67
1	0.44-0.47	0.52-0.56	0.60-0.65	0.69-0.74

¹Bajo el supuesto de que no se obtiene azufre del agua de bebida y un máximo de 10 por ciento de variación del contenido de azufre de los DDGS.

Cuadro 5. Consumo adicional de azufre en la dieta (por ciento) del agua de bebida en varias temperaturas ambiente y concentraciones de sulfato en el agua¹ (adaptado de Drewnoski et al., 2011)

Sulfato del agua, ppm	5°C	21°C	32°C
200	0.02	0.03	0.05
400	0.04	0.05	0.10
600	0.06	0.08	0.14
800	0.09	0.11	0.19
1000	0.11	0.13	0.24

¹ Porcentaje de S a añadir a la ración para determinar el consumo total de S.

Parece que el ganado de engorde es más susceptible a la toxicidad por azufre durante los primeros 30 días en una dieta de finalización, cuando consumen agua alta en sulfatos o alimento con alta concentración de azufre. Esta mayor sensibilidad a la toxicidad por azufre de la alimentación de una dieta alta en concentrado y en azufre parece estar causada por un aumento drástico en las concentraciones de sulfuro de hidrógeno en el rumen, el cual resulta de un incremento en las bacterias reductoras de sulfato y en una disminución del pH ruminal. Debido a que las bacterias que reducen el sulfato en el rumen usan el lactato para convertir el azufre a sulfuro, la mayor disponibilidad de lactato durante esta de primera parte del periodo de finalización puede incrementar el metabolismo microbiano y producir más sulfuro de hidrógeno. Sin embargo, las concentraciones de sulfuro de hidrógeno disminuyen más tarde en el periodo de finalización debido al establecimiento de bacterias que utilizan el lactato, microbios que compiten con las bacterias reductoras del sulfato. Por lo tanto, se puede reducir el riesgo de PEM al retrasar la alimentación de dietas con tasas altas de inclusión de DDGS hasta después de que se hayan adaptado los microbios ruminales a una dieta alta en concentrado (aproximadamente 30 días).

Alimentación de DDGS con alto contenido de azufre a cerdos

Aunque está bien establecida la concentración tolerable máxima de azufre en las dietas de ganado, no se ha determinado para las especies monogástricas. El azufre es un componente esencial de muchas funciones fisiológicas de los animales; se incorpora a aminoácidos, proteínas, enzimas y micronutrientes (Atmaca, 2004). Hasta hace poco se sabía muy poco del impacto de la alimentación de dietas con altas concentraciones de azufre, así como dietas con DDGS y alto azufre sobre la salud y el desempeño de crecimiento de cerdos. Kerr et al. (2011) hicieron un estudio para evaluar los efectos que el contenido de azufre inorgánico en la dieta tiene en el desempeño del crecimiento, inflamación intestinal, composición fecal y presencia de bacterias reductoras de sulfato. Los resultados de este estudio mostraron que los cerdos toleran concentraciones relativamente altas de azufre en la dieta sin

que afecte negativamente su desempeño de crecimiento, pero alimentarlos con dietas altas en azufre modifica los mediadores inflamatorios y las bacterias intestinales. Kim et al. (2012) realizaron cuatro experimentos para determinar si las altas concentraciones de azufre en las dietas con DDGS tenían efectos negativos en la preferencia del alimento y el desempeño del crecimiento de cerdos al destete y en crecimiento/ finalización. Con base en los resultados de estos cuatro experimentos, los autores concluyeron que la concentración de azufre en la dieta no presenta efectos adversos en la preferencia o el consumo del alimento, ni en el desempeño del crecimiento de estos animales alimentados con dietas de maíz, harina de soya y DDGS. En un estudio subsiguiente, Kim et al. (2012) demostraron que alimentar con dietas con 20 por ciento de DDGS que contenían hasta un 0.38 por ciento de azufre a cerdos lactantes o en crecimiento y finalización, no tuvo efectos nocivos en la preferencia y consumo del alimento, o el desempeño del crecimiento. Un estudio adicional realizado por Kim et al. (2014) mostró que al alimentar con 30 por ciento de DDGS con alto contenido de azufre no tuvo efectos negativos sobre el desempeño del crecimiento de cerdos en crecimiento/ finalización ni afectó las características de la canal o las concentraciones de azufre en los tejidos.

De hecho, parece que el elevado contenido de azufre en los DDGS tiene efectos benéficos que contrarrestan cualquier posible efecto negativo de alimentar fuentes de estos altamente peroxidadas. Se ha demostrado que el daño peroxidativo de los lípidos en el alimento afecta negativamente la salud y desempeño del crecimiento de los cerdos (Miller y Brzezinska-Slebodzinska, 1993; Pfalzgraf et al., 1995; Hung et al., 2017). La peroxidación de los lípidos se da durante la producción de los DDGS de maíz. Song y Shurson (2013) analizaron el aceite de maíz extraído de 31 fuentes de DDGS y mostraron que la peroxidación del aceite puede ser de 20 a 25 veces mayor que la que se encuentra en el grano de maíz. El aceite de maíz contiene concentraciones altas de ácidos grasos poliinsaturados (PUFA) en particular de ácido linoleico que es altamente susceptible a la peroxidación de los lípidos (Shurson et al., 2015). Por lo tanto, es posible que alimentar a cerdos con DDGS que contienen lípidos oxidados requiera la suplementación de niveles más altos de antioxidantes

(como la vitamina E) de los que ya se usan. Por ejemplo, la suplementación de antioxidantes adicionales mejora el desempeño del crecimiento en dietas alimentadas a cerdos con DDGS o aceite de maíz oxidado (Harrell et al., 2010). Sin embargo, los resultados de otros estudios han mostrado que no tiene efecto la suplementación de antioxidantes sobre el desempeño del crecimiento en animales bajo el desafío del estrés oxidativo de la dieta (Wang et al., 1997b; Anjum et al., 2002; Fernández-Dueñas, 2009).

Para determinar si la alimentación con la fuente de DDGS más peroxidada identificada en un estudio previo (Song y Shurson, 2013) tiene efectos nocivos en el desempeño del crecimiento de lechones, Song et al. (2013) dieron dietas de maíz/harina de soya o 30 por ciento de DDGS peroxidados (IP= 84.1 mEq/kg aceite; TBARS = 5.2 ng MDA/kg aceite; 0.95 por ciento de azufre) con uno a tres niveles de vitamina E (ninguno, 11 UI/kg, o 110 UI/kg). Las concentraciones de α -tocoferol séricas fueron mayores en los cerdos alimentados con las dietas de DDGS que no contenían vitamina E suplementaria, o 11 UI/kg de vitamina E suplementaria en comparación con los alimentados con la dieta control. Además, los cerdos alimentados con dietas de DDGS presentaron mayores concentraciones séricas de aminoácidos azufrados (Met y taurina), comparados con los alimentados con la dieta control. La concentración de glutatión hepático también fue más alta en los cerdos alimentados con dietas de DDGS que aquellos alimentados con la dieta control, además de que también aumentó la actividad enzimática de la glutatión peroxidasa. Estos resultados indican que el incremento en la concentración de antioxidantes azufrados (Met, taurina, glutatión) puede proteger a los cerdos contra el estrés oxidativo cuando se les alimenta con DDGS altamente peroxidados y quizás no sea necesario alimentarlos con concentraciones elevadas de vitamina E en la dieta para protegerlos contra el estrés oxidativo de los mismos DDGS altamente peroxidados y con alto contenido de azufre.

Para evaluar más a fondo los efectos de alimentar a cerdas y sus crías durante el período de lactancia con DDGS altamente peroxidados, Hanson et al. (2015) alimentaron a las madres con dietas control de maíz/harina de soya durante la gestación y lactancia o con dietas de gestación con 40 por ciento de DDGS y dietas de lactancia con 20 por ciento. Al destete, los cerdos de esas camadas se alimentaron con 0 o 30 por ciento de DDGS peroxidados (IP = 84.1 mEq/kg aceite; TBARS = 5.2 ng MDA/kg aceite; 0.95 por ciento de azufre) con vitamina E suplementaria a cinco veces el requerimiento del NRC (2012). Los cerdos provenientes de cerdas alimentadas con DDGS presentaron concentraciones séricas más bajas de vitamina E antes y después del destete en comparación con aquellos de cerdas alimentadas con las dietas control. Durante el período de lactancia, los cerdos alimentados con dietas de DDGS tuvieron mayor CADP que aquellos alimentados con la dieta control, pero la GDP no fue diferente entre tratamientos. Además, la alimentación con dietas de 30 por ciento de DDGS peroxidados durante la lactancia aumentó la vitamina E sérica, pero no tuvo efecto en TBARS o glutatión peroxidasa sérica. Quizás el hallazgo más interesante de este estudio fue que

las concentraciones séricas de aminoácidos azufrados fueron 40 a 50 por ciento mayores, comparado con los alimentados con las dietas control, lo cual probablemente se deba a una mayor ingestión de aminoácidos azufrados de alimentarse con DDGS. Por lo tanto, parece que las propiedades antioxidantes de los aminoácidos azufrados son suficientes para superar los posibles efectos negativos en el desempeño del crecimiento y el estado oxidativo de alimentar DDGS peroxidados; además, probablemente ahorró vitamina E, por lo que no era necesaria una suplementación adicional.

En resumen, alimentar con dietas que contienen hasta 0.38 por ciento de azufre de fuentes de DDGS e inorgánicas no tiene efectos nocivos en el desempeño del crecimiento, características de la canal y concentraciones tisulares de azufre en cerdos. Además, hay pruebas de que cuando se añade un 30 por ciento de DDGS con altas concentraciones de azufre (0.95 por ciento), en las dietas de cerdos destetados aumenta la protección antioxidante que brindan los aminoácidos azufrados.

Conclusiones

Las estrategias de alimentación que aumentan el consumo de forraje, reducen la variabilidad del consumo de alimento y estabilizan el pH ruminal van a reducir el riesgo de la toxicidad por azufre si se alimenta a rumiantes con dietas altas en este elemento. Al proporcionar 15 por ciento de forraje en la dieta de finalización después de 30 días con una dieta alta en concentrado, va a permitir alimentar dietas con hasta 0.50 por ciento de azufre sin riesgo de toxicidad. Determinar la variabilidad del contenido de azufre de los DDGS de varios lotes o cargas que se reciben en la planta de alimentos o corral de engorde, permitirá determinar los márgenes de seguridad aceptables para la formulación de dietas de rumiantes. También debe considerarse el contenido de sulfato del agua y su consumo cuando se maneje el consumo total de azufre del ganado de engorde. En contraste, se ha mostrado que la alimentación con dietas de 30 por ciento de DDGS con alto contenido de lípidos oxidados y de azufre (0.95 por ciento) aumenta los antioxidantes azufrados y previene el estrés oxidativo metabólico en cerdos jóvenes. La alimentación de dietas con DDGS con hasta 0.38 por ciento de azufre y fuentes inorgánicas no presenta efectos nocivos sobre el desempeño del crecimiento, las características de la canal y la concentraciones tisulares de azufre en cerdos.

Bibliografía

- Anjum, M.I., M.Z. Alam and I.H. Mirga. 2002. Effect of nonoxidized and oxidized soybean oil supplemented with two levels of antioxidant on broiler performance. *Asian-Aust. J. Anim. Sci.* 15:713-720.
- Atmaca, G. 2004. Antioxidant effects of sulfur-containing amino acids. *Yonsei Med. J.* 45: 776-788.

- Boyles, S. 2007. Distillers Grains with Solubles. OSU Extension Beef Team, BEEF Cattle Letter 551.
- Drewnoski, M., S. Hansen, D. Loy, and S. Hoyer. 2011. How much distillers grains can I include in my feedlot diet? Iowa Beef Center, Iowa State University Extension, IBC 46. 3 pp.
- Fernández-Dueñas, D.M. 2009. Impact of oxidized corn oil and synthetic antioxidant on swine performance, antioxidant status of tissues, pork quality and shelf life evaluation. Ph.D. dissertation thesis, Urbana, IL.
- Hanson, A.R., L. Wang, L.J. Johnston, S.K. Baidoo, J. L. Torrison, C. Chen, and G.C. Shurson. 2015. Effects of feeding peroxidized dried distillers grains with solubles to sows and progeny on growth performance and metabolic oxidative status of nursery pigs. *J. Anim. Sci.* 93:135-146.
- Harrell, R. J., J. Zhao, G. Reznik, D. Macaraeg, T. Wineman, and J. Richards. 2010. Application of a blend of dietary antioxidants in nursery pigs fed either fresh or oxidized corn oil of DDGS. *J. Anim. Sci.* 88 (Suppl. 3): 97 (Abstr).
- Hung, Y.T., A.R. Hanson, G.C. Shurson, and P.E. Urriola. 2017. Peroxidized lipids reduce growth performance of poultry and swine: A meta-analysis. *Anim. Feed Sci. Technol.* 231:47-58.
- Kerr, B.J., T.E. Weber, C.J. Ziemer, C. Spence, M.A. Cotta, and T.R. Whitehead. 2011. Effect of dietary inorganic sulfur level on growth performance, fecal composition, and measures of inflammation and sulfate-reducing bacteria in the intestine of growing pigs. *J. Anim. Sci.* 89:426-437.
- Kerr, B.J., C.J. Ziemer, T.E. Weber, S.L. Trabue, B.L. Bearson, G.C. Shurson, and M.H. Whitney. 2008. Comparative sulfur analysis using thermal combustion or inductively coupled plasma methodology and mineral composition of common livestock feedstuffs. *J. Anim. Sci.* 86:2377-2384.
- Kim, B.G., D.Y. Kil, D.C. Mahan, G.M. Hill, and H.H. Stein. 2014. Effects of dietary sulfur and distillers dried grains with solubles on carcass characteristics, loin quality, and tissue concentrations of sulfur, selenium and copper in growing-finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 92:4486-4493.
- Kim, B.G., Y. Zhang, and H.H. Stein. 2012. Sulfur concentration in diets containing corn, soybean meal and distillers dried grains with solubles does not affect feed preference or growth performance of weanling or growing-finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 90:272-281.
- Miller, J.K. and E. Brzezinska-Slebodzinska. 1993. Oxidative stress, antioxidants and animal function. *J. Dairy Sci.* 76:2812-2823.
- National Research Council. 1996. Nutrient requirements of beef cattle. 7th revised edition. National Academy Press, Washington, D.C.
- Pfalzgraf, A., M. Frigg, and H. Steinhart. 1995. α -Tocopherol contents and lipid oxidation in pork muscle and adipose tissue during frozen storage. *J. Agric. Food Chem.* 43:1339-1342.
- Shurson, G.C, B.J. Kerr, and A.R. Hanson. 2015. Evaluating the quality of feed fats and oils and their effects on pig growth performance. *J. Anim. Sci. Biotechnol.* 6:10.
- Shurson, G.C. 2009. Nutrient profiles: Current U.S. data www.ddgs.umn.edu
- Song, R. and G.C. Shurson. 2013. Evaluation of lipid peroxidation level in corn dried distillers grains with solubles. *J. Anim. Sci.* 91:4383-4388.
- Song, R., C. Chen, L. Wang, L.J. Johnston, B.J. Kerr, T.E. Weber, and G.C. Shurson. 2013. High-sulfur content in corn dried distillers grains with solubles protects against oxidized lipids by increasing sulfur-containing antioxidants in nursery pigs. *J. Anim. Sci.* 91:2715-2728.
- Vanness, S.J., T.J. Klopfenstein, G.E. Erickson, and K.K. Karges. 2009. Sulfur in Distillers Grains. Nebraska Beef Report, University of Nebraska-Lincoln, p. 79-80.
- Wang, S. Y., W. Bottje, P. Maynard, J. Dibner, and W. Shermer. 1997b. Effect of santoquin and oxidized fat on liver and intestinal glutathione in broilers. *Poult. Sci.* 76:961-967.

CAPÍTULO 13

DDGS reducidos en aceite en las dietas acuícolas

Introducción

LA ACUICULTURA ES UNO DE LOS SEGMENTOS DE MÁS RÁPIDO CRECIMIENTO de la industria de animales para consumo humano en el mundo. En 2014, el suministro per capita de pescado llegó a un máximo récord de 20 kg, el cual se atribuye principalmente al rápido crecimiento de la acuicultura (FAO, 2016). De hecho, la acuicultura mundial proporciona casi el 50 por ciento del pescado total destinado para consumo humano (FAO 2016). En 2014 la producción total acuícola interior y marítima llegó a las 73.8 millones de ton, lo cual representa un valor de “primera venta” de más de \$160,000 millones de dólares (FAO 2016). De este total, 49.8 millón de ton se derivan de pescados de escama, 16.1 millones de ton de moluscos, 6.9 millones de ton de crustáceos y 7,3 millones de ton comprenden otros animales acuáticos como los anfibios (FAO, 2016). Los principales países de producción acuícola son China (45.5 millones de ton), seguido de India, Vietnam, Bangladesh y Egipto (FAO, 2016).

Históricamente, la harina de pescado se ha sido un componente importante en la mayoría de las dietas acuícolas debido a su alto contenido de proteína, un perfil bien equilibrado de aminoácidos altamente digestibles, cantidades importantes de ácidos grasos esenciales, contenido energético altamente digestible así como su contenido de vitaminas y minerales (Abdelghany, 2003). Sin embargo, la menor disponibilidad de harina de pescado y su mayor costo, aunado a preocupaciones de sustentabilidad, ha causado que nutricionistas y fabricantes de alimentos busquen ingredientes alternos menos caros, de alta calidad y de origen vegetal, para sustituirla parcial o completamente en las dietas acuícolas. Desafortunadamente, la sustitución de la harina de pescado con ingredientes de origen vegetal resulta en una reducción del desempeño del crecimiento (Mbahinzirek et al., 2001; Sklan et al., 2004; Gatlin et al., 2007), a menos que a estas dietas se añadan cantidades adecuadas de otros ingredientes o suplementos para cubrir los requerimientos de nutrientes, en particular de aminoácidos. Sin embargo, cuando se añaden dos o más fuentes de proteína vegetal complementaria (DDGS y harina de soya), es factible sustituir toda la harina de pescado en la dieta. Además, a diferencia de otras especies, no están bien definidos los requerimientos de energía y nutrientes digestibles de la mayoría de las especies acuícolas, ni se han determinado la en la mayoría de los ingredientes usados en las dietas acuícolas. Por lo tanto, estos retos dificultan el desarrollo de programas de nutrición de precisión de varias especies acuícolas, al nivel que actualmente se utilizan en otras especies de animales de consumo. Uno de los mayores desafíos que limita el uso con éxito de los ingredientes vegetales alternativos, DDGS de maíz incluídos, en los alimentos acuícolas es conocer la composición y digestibilidad de energía y aminoácidos. Aunque en comparación con el ganado lechero y de engorde, cerdos y

aves, se ha investigado mucho menos la aplicación de DDGS de maíz en la alimentación de diversas especies acuícolas, este capítulo resume toda la información disponible con respecto a la optimización de su uso en dietas para estas especies.

Valor nutritivo de los DDGS en el alimento acuícola

Los DDGS de maíz son un ingrediente alto en energía, de contenido medio de proteína y de fósforo altamente digestible. No obstante, pueden variar significativamente entre las fuentes el contenido y la digestibilidad de los nutrientes (véase el **capítulo 4** para información detallada el contenido de nutrientes y variabilidad). La energía en los DDGS de maíz se deriva de su contenido de aceite relativamente alto (de 5 a 12 por ciento de grasa cruda), con menores cantidades que contribuyen del almidón residual, fibra y proteína. Aunque no se han realizado estudios que comparen la digestibilidad de energía de los DDGS tradicionales altos y reducidos en aceite en especies acuícolas, se da por hecho que basados en diversos estudios de cerdos y aves, que el contenido de grasa cruda por sí solo es un mal predictor del contenido de energía digestible entre fuentes de este ingrediente con contenido de aceite variable. Aunque el contenido de grasa cruda varía en los DDGS, su aceite de maíz contiene cerca del 58 por ciento de ácido linoleico, 8 por ciento de ácido linoléico y 0.14 por ciento de DHA. Como resultado, los DDGS tienen una proporción alta de omega 6 a omega 3. El contenido de almidón en los DDGS es bajo y puede variar de 1.1 a 7.9 por ciento (base materia seca), en función del grado de fermentación del almidón por las levaduras para producir etanol durante el proceso de producción (Anderson et al., 2012). No se sabe si el almidón presente en los DDGS es digestible o si está en forma de almidón resistente. Los valores promedio de contenido de fibra cruda, fibra ácidodetergente, fibra neutrodetergente y fibra total dietética (FTD) en los DDGS es de 6.6, 11.1, 37.6 y 31.8 por ciento respectivamente, mientras que la mayoría (96.5 por ciento) de la FTD es fibra insoluble (Urriola et al., 2010). El contenido de fibra neutrodetergente es uno de los componentes nutricionales más variables en los DDGS, además que no queda claro si esto se debe a la alta variabilidad en las mediciones analíticas entre laboratorios, o si el contenido de fibra del maíz es lo que varía entre estos. No se ha determinado la digestibilidad de la fibra de los DDGS en peces, pero los estudios realizados con otras especies de monogástricos indican que parte de esta fibra se puede digerir y fermentar para producir ácidos grasos volátiles en el tracto gastrointestinal bajo, pero el grado de esto es variable dentro y entre las especies monogástricas. Parece que los peces con una mayor habilidad de uso de dietas altas en fibra (por ejemplo, tilapia o bagre) se desempeñan bien con niveles altos de inclusión de DDGS en la dieta, en comparación con especies (como el salmón o la trucha) que presentan muy poca fermentación en el intestino grueso.

A pesar del contenido de proteína cruda relativamente alto de los DDGS (27 por ciento), las concentraciones de lisina, metionina, treonina y triptofano son relativamente bajas con relación a los requerimientos de aminoácidos de los peces. Además, la lisina es el más variable de todos los aminoácidos entre las fuentes de DDGS, así como también su digestibilidad debido al grado de calentamiento utilizado en varias plantas de etanol durante el proceso de producción. Como resultado, las dietas de peces que requieren niveles altos de proteína deben suplementarse con aminoácidos cristalinos cuando se añaden cantidades importantes de DDGS. Se ha determinado la digestibilidad aparente de los aminoácidos de los DDGS en dietas de trucha arcoíris, la cual es relativamente alta (mayor a 90 por ciento en todos los aminoácidos esenciales, excepto la treonina; Cheng y Hardy, 2004a). Estudios recientes de Magalhães et al. (2015) determinaron también la digestibilidad aparente de aminoácidos de los DDGS de maíz en la lubina y corvina europeas, y Lech y Reigh, (2012) lo hicieron con el pámpano, pero no se ha determinado en otras especies de peces.

El contenido de fósforo en los DDGS (0.85 por ciento) es más alto que en otros ingredientes vegetales, además de que gran parte del fósforo fítico se libera durante la fermentación del maíz en la producción de etanol, lo que hace que sea altamente digestible para especies monogástricas. Sin embargo, aún no se han determinado en peces la digestibilidad de fósforo en los DDGS y los valores de disponibilidad. Otros macrominerales como el calcio, el cloro y el potasio se encuentran en los DDGS en bajas concentraciones con relación a los requerimientos de los peces, de tal forma que se deben suplementar (Hertrampf y Piedad-Pascual, 2000). Además, las concentraciones de minerales traza como zinc, hierro, manganeso y cobre en los DDGS son más bajas que lo que normalmente se encuentra en la harina de pescado, pero los requerimientos se pueden cubrir fácilmente con la suplementación de estos micronutrientes en las premezclas.

Las vitaminas, entre ellas la riboflavina, niacina, ácido pantoténico, ácido fólico y colina son casi tres veces más altas en los DDGS que lo que se encuentra en el maíz (Hertrampf y Piedad-Pascual, 2000). Hay pocos datos con respecto al contenido y biodisponibilidad de xantofilas en los DDGS, o de su impacto en el color de la carne de los peces. Con base en los datos limitados, el contenido de xantofilas en los DDGS de maíz es altamente variable y va de 20 a 50 mg/kg. Por lo tanto, dependiendo de la cantidad de maíz y sus coproductos en las dietas de algunas especies de peces (por ejemplo, el bagre), se debe limitar el contenido total de xantofilas en la formulación de dietas para evitar la pigmentación amarilla en los filetes de pescado.

Una de las ventajas distintivas de los DDGS en comparación con otros ingredientes vegetales es que no contienen factores antinutricionales como los que se encuentran en la harina de

soya (inhibidores de tripsina; Wilson y Poe, 1985; Shiau et al., 1987), harina de colza (glucosinolatos y ácido erúcico) y en la harina de semilla de algodón (gospol; Jauncey y Ross, 1982; Robinson, 1991), además de que contienen niveles bajos de fitato comparado con otros ingredientes de origen vegetal. Por lo tanto, la falta de factor antinutricionales y el contenido relativamente alto de energía, aminoácidos digestibles y fósforo los vuelve un ingrediente nutritivo y económico a usar en distintas especies acuícolas.

Abulón (*Haliotis discus hannai*)

El abulón (*Haliotis discus hannai*) es una de las especies de mariscos más importantes desde el punto de vista comercial en el este de Asia, especialmente en China, Corea y Japón. Se han desarrollado e implementado con éxito técnicas de cultivo comercial del abulón, con lo que la producción ha aumentado rápidamente en un intento por satisfacer la demanda de consumo humano (Cho, 2010). Desafortunadamente, no se han publicado estudios para evaluar el uso de DDGS de maíz en las dietas de abulón. Sin embargo, Choi et al. (2014) realizaron un estudio para evaluar el desempeño del crecimiento y la composición corporal al añadir niveles crecientes de inclusión (0, 15, 30, 45 y 60 por ciento) de granos secos de destilería de arroz (RDDG), para reemplazar la harina de trigo y de soya en las dietas de juveniles de abulón. La ganancia de peso de los juveniles de abulón alimentados con el 15 y 30 por ciento de RDDG, no difirió de los alimentados con la dieta control, pero las dietas de 45 o 60 por ciento resultaron en menores ganancias de peso comparados con los de 0 por ciento. La tasa de inclusión de RDDG en la dieta no afectó la supervivencia, longitud y grosor de la concha ni la composición química proximal de cuerpo blando. Estos resultados indican que añadir hasta 30 por ciento de RDDG a la dieta de juveniles de abulón puede dar un desempeño del crecimiento y composición de cuerpo blando aceptables. Se requiere de investigación para determinar si los DDGS de maíz brindan resultados similares.

Pargo negro (*Acanthopagrus schlegeli*)

El pargo negro (*Acanthopagrus schlegeli*) es una especie de pez marino muy importante desde el punto de vista comercial en Asia, conocido por su rápida tasa de crecimiento y sus bien establecidas técnicas de cultivo y de producción de alevines. Aunque no hay información sobre el uso de DDGS de maíz en las dietas de pargo negro, un estudio reciente llevado a cabo por Rahman et al. (2013) evaluó la alimentación de niveles crecientes de DDGS de arroz en juveniles de este pez. Los resultados de este estudio mostraron que los DDGS de arroz fueron un sustituto adecuado de la harina de trigo y de gluten y que se puede añadir hasta un 24 por ciento de la dieta para lograr el desempeño de crecimiento óptimo de juveniles de pargo negro. Se necesitan estudios para determinar si se consiguen respuestas similares con estas tasas de inclusión en la dieta de DDGS de maíz.

Bagre de canal (*Ictalurus punctatus*)

El **cuadro 1** muestra un resumen de las tasas óptimas de inclusión de DDGS en la dieta y las condiciones experimentales de 13 estudios publicados de bagre de canal, híbridos de bagre y basa. A principios de la década de 1990 se realizaron estudios iniciales de alimentar bagre de canal con DDGS de maíz tradicional alto en aceite (más de 10 por ciento de grasa cruda). Tidwell et al. (1990) llevaron a cabo un experimento por un período de 11 semanas en el que se alimentó a los alevines de bagre de canal con dietas que contenían 0, 10, 20 y 40 por ciento de DDGS en sustitución de parte del maíz y de la harina de soya. Después dicho período de alimentación, no hubo diferencias significativas en el peso individual de los peces, porcentaje de supervivencia, conversión alimenticia o tasa de eficiencia de proteína entre los tratamientos de dieta. De la misma forma, Webster et al. (1993), alimentaron a juveniles de bagre en jaulas con dietas que contenían 0, 10, 20 o 30 por ciento de DDGS para sustituir parcialmente el maíz y la harina de soya en la dieta. Entre los tratamientos de dieta no hubo diferencias en el peso individual de los peces, supervivencia, conversión alimenticia, composición y desperdicio de la canal (cabeza, piel y vísceras), así como en las propiedades organolépticas de los filetes. Los resultados de este estudio indican se puede añadir hasta un 30 por ciento de DDGS a las dietas de bagre de canal sin efectos negativos sobre el desempeño del crecimiento, la composición de la canal o la calidad del sabor de los filetes. Por lo tanto, durante casi 30 años se ha considerado que los DDGS son un ingrediente aceptable en las dietas para bagre de canal (Tidwell et al., 1990; Webster et al., 1991; Webster et al., 1993).

Posteriormente Robinson y Li (2008), Lim et al., (2009), y Zhou et al. (2010) llevaron a cabo estudios adicionales para evaluar más a fondo el uso de fuentes de DDGS altos en aceite en dietas de bagres. Robinson y Li (2008) realizaron dos experimentos para evaluar el uso de la harina de semilla de algodón, DDGS y lisina sintética como sustitutos de la harina de soya en dietas de bagre de canal. Los peces alimentados con la dieta de DDGS y harina de soya tuvieron ganancia de peso y conversión alimenticia mejores (experimento 1) o similares (experimento 2) compara-

dos con los peces alimentados con las dietas control. La grasa corporal tendió a incrementarse en los peces alimentados con los DDGS en comparación con los de la dieta control. Los resultados de este estudio confirman que la adición de hasta 30 por ciento de DDGS a dietas de bagre de canal sustenta un desempeño del crecimiento satisfactorio cuando se suplementan con lisina sintética. Lim et al. (2009) alimentaron durante 12 semanas a juveniles de bagre (13 g de peso corporal) con dietas con 0, 10, 20, 30 y 40 por ciento de DDGS con lisina sintética suplementaria para reemplazar parcialmente las harinas de soya y de maíz (con base en un igual contenido de proteína). Los resultados de este estudio mostraron que el desempeño de crecimiento y la conversión alimenticia fueron similares entre los tratamientos de la dieta, pero la grasa corporal aumentó y la humedad corporal disminuyó cuando los peces se alimentaron con dietas que contenían DDGS, en comparación con los alimentados con la dieta control. De la misma forma, Zhou et al. (2010) sustituyeron las harinas de soya y de maíz en juveniles de bagres híbridos (bagre de canal × bagre azul *I. furcatus*) y observaron que las dietas que contenían 30 por ciento de DDGS proporcionaron buen crecimiento, conversión alimenticia y retención de proteína. En general, los resultados de estos estudios indican que se pueden utilizar tasas de inclusión en la dieta relativamente altas (de 30 al 40 por ciento) de DDGS, sin afectar de forma de forma negativa la supervivencia, el crecimiento o la conversión alimenticia del bagre. La mayoría de los estudios muestran que las tasas altas de inclusión de DDGS en la dieta aumenta la grasa corporal total, pero no parece afectar el color del filete.

Desafortunadamente, la mayoría de los estudios publicados que evalúan la adición de DDGS de maíz en alimentos acuícolas no proporcionan información detallada de la composición de nutrientes de este ingrediente. Por lo tanto, se asume que la mayoría de estos estudios usan DDGS tradicionales altos en aceite (mayores al 10 por ciento de grasa cruda). Sin embargo, un estudio reciente realizado de Renukdas et al. (2014) evaluó la alimentación de bagres de canal e híbridos con 20 por ciento de DDGS reducidos en aceite y demostró que se puede usar con éxito sin afectar el desempeño del crecimiento ni las características de procesamiento.

Cuadro 1. Resumen de estudios publicados que evalúan los efectos de dar DDGS de maíz a bagres de canal (*Ictalurus punctatus*), híbridos de bagre (*I. punctatus* × *I. furcatus*) y basa (*Pangasius hypophthalmus*) en el desempeño del crecimiento y composición de la carne

Peso corporal (inicial - final, g)	DDGS %	Ingred. que sustituyen	Duración, días	% Harina de pescado	% Lisina suplementaria	% DDGS óptimo	Composición de la carne	Referencia
Bagre de canal (<i>Ictalurus punctatus</i>)								
21 - 265	0 - 20	maíz, harina de soya	186	0	0.15 - 0.25	20	Se redujo el rendimiento del filete	Renukdas et al., 20141
Varía entre experimentos	0 - 40	harina de soya	330 (exp. 1)	0 - 1	0 - 0.80	30 a 40	Aumentó la grasa del filete	Robinson and Li, 2012
			120 (exp. 2)					
			165 (exp. 3)					

Cuadro 1. Resumen de estudios publicados que evalúan los efectos de dar DDGS de maíz a bagres de canal (*Ictalurus punctatus*), híbridos de bague (*I. punctatus* × *I. furcatus*) y basa (*Pangasius hypophthalmus*) en el desempeño del crecimiento y composición de la carne

Peso corporal (inicial - final, g)	DDGS %	Ingred. que sustituyen	Duración, días	% Harina de pescado	% Lisina suplementaria	% DDGS óptimo	Composición de la carne	Referencia
9.1 - 80.4	0 - 30	maíz, harina de soya, harinillas de trigo	56	5	0.30	30	Disminuyó la proteína del filete	Li et al., 2011
12.6 - 156.7	0 - 30	maíz, harina de soya	63	0	0.30 - 0.39	30	Aumentó la grasa y disminuyó la proteína del filete	Li et al., 2010
86 - 491	0 - 30	maíz, harina de soya, harinillas de trigo	150	0	0.10 - 0.20	Hasta 30	No tuvo efecto	Zhou et al., 2010a
13.3 - 67.1	0 - 40	maíz, harina de soya	84	8	0.40	40	Aumentó la grasa corporal total	Lim et al., 2009
48 - 1,227	0 - 40	harina de soya, harinillas de trigo	330	1	0.80 - 0.28	30 a 40	Aumentó la grasa del filete	Robinson and Li, 2008
33 - 226	0 - 30	maíz, harina de soya	110	8	ninguna	30	No tuvo efecto	Webster et al., 1993
12.4 - 54.5	0 - 35	harina de pescado, maíz	84	0	0 - 0.4	35	-	Webster et al., 1992
10 - 79.3	0 - 70	maíz, harina de soya	84	10	0 - 0.4	35/70	Disminuyó la proteína y aumentó la grasa corporal total	Webster et al., 1991
1.5 - 17.3	0 - 40	maíz, harina de soya	77	8	ninguna	40	-	Tidwell et al., 1990
Híbrido de bague (<i>I. punctatus</i> × <i>I. furcatus</i>)								
47 - 703	0 - 20	maíz, harina de soya	186	0	0.15 - 0.25	20	No tuvo efecto	Renukdas et al., 2014 ¹
1.2 - 8.7	0 - 30	maíz, harina de soya, harinillas de trigo	56	0	0.2	30	-	Zhou et al., 2010b
Basa (<i>Pangasius hypophthalmus</i>)								
40 - 500	0 - 15	harina de soya, salvado de arroz	118	4.5 - 5.8	0	15	No tuvo efecto	U.S. Grains Council, 2015

¹Las dietas contenían DDGS reducido en aceite

Carpa común (*Cyprinus carpio*)

La carpa común es la tercera especie de pez de agua dulce más ampliamente cultivada e importante desde el punto de vista comercial del mundo, en especial en Asia y algunos países europeos (Rahman, 2015). Es una especie atractiva para la producción acuícola comercial porque se adapta muy bien a distintos alimentos y ambientes (Rahman, 2015). Desafortunadamente, hay poca información de las tasas óptimas de inclusión de DDGS en las dietas de carpa. Se realizó una prueba de alimentación con carpa común, patrocinada por el U.S. Grains Council, en el embalse de Hoa Binh, provincia de Hoa Binh, Vietnam, para determinar la inclusión óptima de los DDGS en la dieta (U.S. Grains Council, 2007a). Se colocaron carpas comunes con un peso inicial de 26 a 51 g en jaulas flotantes y durante más de tres meses se alimentaron con dietas que contenían 0, 5, 10 y 15 por ciento de DDGS, hasta alcanzar los 200 g de peso corporal promedio. Las cuatro dietas con DDGS se formularon para tener un contenido de energía (2.9 Mcal/kg) y de proteína (26 por ciento) similar, compuestas principalmente de harina de soya, subproductos de trigo, salvado de arroz, harina de pescado, harina de carne y hueso, y aceite de pescado. Los resultados mostraron que el aumento en las tasas de inclusión de DDGS no tuvo efectos sobre la tasa de crecimiento y el consumo de alimento, pero hubo una tendencia más rápida de crecimiento (40 g/mes) en los peces alimentados con dietas de 10 y 15 por ciento que en los alimentados con dietas de 0 y 5 por ciento (28 g/mes). Las tasas de supervivencia en los peces fueron muy altas (de 99.3 a 99.5 por ciento) y no hubo diferencias entre los tratamientos de la dieta. Al final del estudio se determinó la composición de la carne del pescado y no hubo diferencias de humedad, contenido de proteína y grasa ni color de la carne entre los tratamientos. En conclusión, parece que se puede incluir hasta un 15 por ciento de DDGS en las dietas de carpa común, sin afectar el desempeño del crecimiento ni la calidad de la carne de la carpa común.

Lubina europea (*Dicentrarchus labrax*)

La lubina europea (*Dicentrarchus labrax*) es una especie acuícola de gran popularidad y bien establecida en el Mediterráneo. Un estudio reciente realizado por Magalhães et al. (2015) determinó la digestibilidad aparente de dos fuentes de DDGS de maíz (España, 11.8 por ciento de grasa cruda; Hungría, 12.8 por ciento de grasa cruda, base materia seca) en lubina europea juvenil, cuyos los resultados se muestran en el **cuadro 2**. Aunque las dos fuentes tuvieron composiciones similares de nutrientes, la digestibilidad aparente de la materia seca, energía y proteína cruda fue mayor en la fuente de DDGS de maíz de España que en la de Hungría. La variabilidad en contenido y digestibilidad de nutrientes de las fuentes de DDGS son un desafío para el nutricionista al determinar el valor económico, la energía digestible y contenido de nutrientes para formular dietas acuícolas de precisión. Los coeficientes de digestibilidad aparente de materia seca y energía relativamente bajos que se observaron en este estudio, es probable que se debieran al contenido de fibra relativamente alto en los DDGS de maíz ya que los peces, en particular las especies carnívoras, cuentan con una capacidad de digestión limitada de carbohidratos complejos. Sin embargo, la digestibilidad de proteína en ambos DDGS fue similar o mayor que la de la harina de pescado (de 89 a 92 por ciento), la única fuente de proteína de la dieta de referencia. No hubo diferencia de digestibilidad de aminoácidos entre las dos fuentes, pero en general la digestibilidad de la mayoría de los aminoácidos fue menor que en la harina de pescado. Los DDGS de maíz son una buena fuente de lípidos de la dieta y es posible que algunas fuentes tengan concentraciones mayores que misma harina de pescado (9.2 por ciento). Sin embargo, la digestibilidad aparente de los lípidos en los DDGS fue menor que la del aceite de pescado (98.5 por ciento), que fue la principal fuente de lípidos en la dieta de referencia. Aunque no se han llevado a cabo pruebas de desempeño del crecimiento

Cuadro 2. Coeficientes de digestibilidad aparente (porcentaje) de energía y nutrientes de dos fuentes de DDGS de maíz en lubina europea (adaptado de Magalhães et al., 2015)

Componente nutricional	DDGS de maíz (España)	DDGS de maíz (Hungría)
Materia seca	63.3 ^a	56.7 ^b
Energía	67.9 ^a	63.6 ^b
Proteína cruda	96.3 ^a	92.1 ^b
Lípidos	89	87.2
Arginina	86.4	86.5
Histidina	85.1	84.1
Isoleucina	83.7	83
Leucina	89.1	89
Lisina	94.8	99
Metionina	78.3	83.9
Fenilalanina	81	85.9
Treonina	81.5	81.1
Valina	84.3	84.2

^{a, b}Las medias en las filas con diferentes superíndices son diferentes (P menor que 0.05)

en lubina europea, los resultados de este estudio indican que los DDGS de maíz pueden ser un sustituto parcial adecuado de la harina de pescado en las dietas de esta especie.

Langostinos de río (*Macrobrachium rosenbergii*)

Se han realizado algunos estudios con dietas con DDGS altos en aceite en langostinos de río. El primer estudio lo realizó Tidwell et al. (1993a), en el que alimentaron juveniles de langostinos de río (0.66 g) una de tres dietas isonitrogenadas (29 por ciento de proteína cruda) con 0, 20 o 40 por ciento de DDGS. Los resultados de este estudio no mostraron diferencias entre los tratamientos de la dieta en cuanto al rendimiento promedio (833 kg/ha), supervivencia (75 por ciento), peso individual (57 g) y conversión alimenticia (3.1). Por lo tanto, alimentar dietas prácticas con hasta 40 por ciento de DDGS resulta en un buen desempeño del crecimiento y supervivencia en langostinos con una densidad de 19,760/ha.

En un estudio posterior, Tidwell et al. (1993b) evaluaron los efectos de reemplazar parcialmente la harina de pescado con harina de soya y DDGS en dietas para juveniles de langostinos cultivados en estanques (0.51 g). Se formularon tres dietas con 32 por ciento de proteína cruda y 15, 7.5 o 0 por ciento de harina de pescado. La harina de pescado se sustituyó con cantidades variables de harina de soya y 40 por ciento DDGS. No hubo diferencias entre los tratamientos de la dieta en el rendimiento promedio, supervivencia, peso individual y conversión alimenticia. La sustitución de la harina de pescado con harina de soya y DDGS aumentó las concentraciones de glutamina, prolina, alanina, leucina y fenilalanina, y disminuyó el contenido de ácido aspártico, glicina, arginina y lisina en las dietas. También cambiaron los perfiles de ácidos grasos

de las dietas cuando se sustituyó la harina de pescado con harina de soya y DDGS. En las dietas de DDGS aumentaron las concentraciones de 16:0, 18:2n-6 y 20:1n-9 y disminuyeron las de 14:0, 16:1n-7, 18:1n9, 18:3n-3, 20:5n-3, 22:5n-3 y 22:6n-3. Estos resultados indican se puede sustituir parcial o totalmente la harina de pescado con harina de soya y DDGS en dietas para langostinos de río cultivados en estanques de clima templado. Coyle et al. (1996) notificaron que los DDGS pueden tener un doble propósito como alimento para juveniles de langostinos (mayores de 2 g) y servir de fertilizante del estanque.

Corvina (*Argyrosomus regius*)

La corvina (*Argyrosomus regius*) es considerada una de las especies más prometedoras de la diversificación acuícola mediterránea. Desafortunadamente, no se han llevado a cabo estudios que evalúen el desempeño del crecimiento, supervivencia y composición corporal total de la corvina alimentada con DDGS de maíz, pero recientemente Magalhães et al. (2015) determinaron la digestibilidad aparente de dos fuentes (España, 11.8 por ciento de grasa cruda; Hungría, 12.8 por ciento de grasa cruda con base materia seca) en juveniles de corvina de 79 g (**cuadro 3**). Los resultados de este estudio mostraron que aunque las dos fuentes de DDGS tuvieron composición similar de nutrientes, la digestibilidad aparente de la materia seca, energía y proteína cruda fue mayor en la fuente de España que en la de Hungría. La variabilidad en contenido y digestibilidad de nutrientes de las fuentes de DDGS son un desafío al determinar el valor económico, así como la energía digestible y contenido de nutrientes para formular dietas acuícolas. Los coeficientes de digestibilidad aparente de materia seca y energía relativamente bajos es probable que se deban al contenido de fibra relativamente alto en los DDGS de maíz. Sin embargo, la digestibilidad de proteína en ambos DDGS fue similar o mayor que la de la harina de pescado (de 89 a 92 por

Cuadro 3. Coeficientes de digestibilidad aparente (porcentaje) de energía y nutrientes de dos fuentes de DDGS de maíz en corvina (adaptado de Magalhães et al., 2015)

Componente nutricional	DDGS de maíz (España)	DDGS de maíz (Hungría)
Materia seca	65.6 ^a	57.2 ^b
Energía	67.4 ^a	58 ^b
Proteína cruda	97.9 ^a	91.8 ^b
Lípidos	87.9	82
Arginina	81.5	82.6
Histidina	63.3	59.1
Isoleucina	75	76.4
Leucina	93	88.9
Lisina	85	85.6
Metionina	66.3	67
Fenilalanina	76	83.4
Treonina	81.2	91.1
Valina	81.7	81.6

^{a, b}Las medias en las filas con diferentes superíndices son diferentes (P menor que 0.05).

ciento), la única fuente de proteína de la dieta de referencia. No hubo diferencia de digestibilidad de aminoácidos entre las dos fuentes, pero en general la digestibilidad de la mayoría de los aminoácidos fue menor que en la harina de pescado. Los DDGS de maíz son una buena fuente de lípidos de la dieta y es posible que algunas fuentes tengan concentraciones mayores que misma harina de pescado (9.2 por ciento). Sin embargo, la digestibilidad aparente de los lípidos en los DDGS fue menor que en el aceite de pescado (98.5 por ciento), que fue la principal fuente de lípidos en la dieta de referencia. Los resultados de este estudio indican que los DDGS de maíz pueden ser un sustituto parcial adecuado de la harina de pescado en las dietas para esta especie.

Sabalote (*Chanos chanos*)

El sabalote (*Chanos chanos*) es una de las principales especies acuícolas de Asia, que sirve como fuente económica de proteína para los consumidores de la región. De hecho, la Organización para la Alimentación y la Agricultura de las Naciones Unidas recomienda al sabalote como una de las especies aptas para la producción acuícola comercial porque pertenece al nivel trófico inferior de la cadena alimenticia y no requiere una gran cantidad de proteína de la dieta de la harina de pescado.

El U.S. Grains Council (2007b) patrocinó un estudio de demostración para determinar la cantidad máxima de DDGS de maíz que se puede incluir en las dietas de sabalote. Se formularon y alimentaron cinco dietas isonitrogenadas e isoenergéticas que contenían 0, 10, 20, 30 o 40 por ciento de DDGS. No se observaron diferencias entre los tratamientos de la dieta en cuanto al desempeño del crecimiento, lo que indica que se puede alimentar al sabalote con dietas de hasta un 40 por ciento de DDGS para lograr un crecimiento aceptable. Estos resultados se confirmaron en un estudio

reciente desarrollado por Mamauag et al. (2017), en el que se evaluó el desempeño del crecimiento, composición química corporal y morfología intestinal de sabalotes alimentándolos con niveles crecientes (0, 15, 25, 30, 35 y 45 por ciento) de DDGS de maíz en dietas isonitrogenadas (35 por ciento de proteína cruda) e isolípídicas (6 por ciento de grasa cruda) durante un período de alimentación de 90 días (**cuadro 4**). En todas las dietas se usaron harina de pescado y DDGS como las principales fuentes de proteína. La tasa inclusión de DDGS en la dieta no presentó diferencias en las mediciones de ganancia de peso, supervivencia, consumo de alimento, conversión alimenticia y composición química corporal. La digestibilidad aparente de proteína, lípidos, carbohidratos y materia seca de los DDGS de maíz alimentados fue de 91, 85, 75 y 52 por ciento, respectivamente. Además, los tratamientos de la dieta no tuvieron efectos en la morfología intestinal. Estos resultados indican que los DDGS de maíz pueden usarse de forma eficaz en niveles de hasta 45 por ciento en la dieta sin que afecten negativamente en el desempeño del crecimiento, supervivencia, composición corporal y morfología intestinal del sabalote.

Camarón blanco del Pacífico (*Litopenaeus vannamei*)

La producción mundial de camarón ha crecido rápidamente y el camarón blanco del Pacífico (*Litopenaeus vannamei*) es la principal especie cultivada de camarón. Históricamente, la harina de pescado se ha utilizado como principal fuente de proteína del alimento para camarón por su perfil equilibrado de aminoácidos y su contenido relativamente alto de ácidos grasos esenciales y minerales; por lo regular se añade en las dietas a niveles cercanos al 20 por ciento. Sin embargo, la preocupación por el incremento del costo y la sustentabilidad a largo plazo del uso de harina de pescado en las dietas de camarón y de otras especies acuícolas ha llevado a que los investigadores exploren

Cuadro 4. Efectos de alimentar niveles crecientes de DDGS de maíz a juveniles de sabalote (*Chanos chanos*) en el desempeño del crecimiento, supervivencia y composición corporal total (adaptado de Mamauag et al., 2017)

Medición	Tasa de inclusión diaria de DDGS %					
	0%	15%	25%	30%	35%	45%
Peso corporal inicial, g	3.08	3.01	3.08	3.10	3.11	3.08
Peso corporal final, g	21	18.5	20.1	22.1	18.1	19.2
Ganancia de peso%	582	513	553	614	483	519
Supervivencia %	82	81	85	82	85	83
Consumo de alimento ¹	24.2	25.1	25.1	24.1	25	24
Conversión alimenticia ²	0.77	0.76	0.77	0.75	0.73	0.75
Composición corporal total						
Proteína cruda, g/kg de materia seca	732	684	696	694	690	736
Grasa cruda, g/kg de materia seca	157	194	183	164	153	142
Cenizas, g/kg de materia seca	93	99	92	90	103	91

¹Consumo de alimento = g alimento seco/pez/90 días

²Conversión alimenticia = ganancia de peso vivo (g)/consumo de alimento seco (g)

ingredientes vegetales alternativos (como los DDGS) como un posible sustituto parcial o total. En el **cuadro 5** se resumen los resultados de cuatro estudios que evalúan los efectos de alimentar dietas con DDGS al camarón blanco del Pacífico.

Los estudios iniciales realizados por Roy et al. (2009) mostraron que el camarón blanco del Pacífico tuvo una ganancia de peso similar al alimentarlo con una dieta de 10 por ciento de DDGS, comparado con la alimentación de otros ingredientes alternativos (harina de subproductos avícolas, harina de chícharos o guisantes) como sustituto de la harina de pescado, pero produjo una biomasa menor debido a la tendencia al aumento de mortalidad. Sin embargo, un estudio subsiguiente de Sookying y David (2011) mostró que dar una dieta con 10 por ciento de DDGS con altas cantidades de harina de soya como sustituto de la harina de pescado, resultó en que no hubiera diferencias en el peso final (16.3 g), supervivencia (92.2 por ciento) y conversión alimenticia (1.32), comparado con una dieta con 10 por ciento de harina de pescado (16.9 g de peso final, 86.6 por ciento de supervivencia y 1.35 de conversión alimenticia). Cummins et al. (2013) alimentaron dietas con hasta 30 por ciento de DDGS y lisina suplementaria para sustituir la harina de pescado y parcialmente las harinas de soya y trigo. lo que mostró una reducción del desempeño de crecimiento.

En contraste, Rhodes et al. (2015) realizaron una prueba de desempeño del crecimiento y dos pruebas de digestibilidad para evaluar los efectos de la alimentación de camarón blanco del Pacífico con una fuente de DDGS reducida en aceite (4.8

por ciento de grasa cruda). El la prueba de desempeño de crecimiento, se alimentó al camarón con dietas isonitrogenadas con 0, 10, 20, 30 o 40 por ciento de DDGS y 6 por ciento de harina de pescado, para sustituir parcialmente la harina de soya. Las dietas con 30 por ciento de DDGS contenían 0.06 por ciento de lisina suplementaria y las de 40 por ciento contenían 0 o 0.13 por ciento de lisina suplementaria. No se observaron diferencias de biomasa final, peso promedio final, conversión alimenticia y supervivencia (de 95 a 100 por ciento) en los camarones alimentados con dietas de 0, 20, 30 o 40 por ciento de DDGS, y los alimentados con dietas de 10 por ciento tuvieron mejor biomasa final, peso final y conversión alimenticia que todos los otros tratamientos. El desempeño de crecimiento fue similar entre el camarón alimentado con dietas del 40 por ciento de DDGS con o sin lisina suplementaria, lo cual indica que este aminoácido no era limitante. En ambas pruebas los coeficientes de digestibilidad de materia seca, energía y proteína de los DDGS reducidos en aceite fueron mucho menores que los de la dieta de referencia y su digestibilidad aparente de proteína (de 36.9 a 44.7 por ciento) fue mucho menor que la de 78.5 por ciento notificado por Lemos et al. (2009) con las mismas especies y protocolos experimentales similares (**cuadro 6**). Tal vez estas diferencias se deban a la fuente de DDGS, contenido de proteína o métodos analíticos. Estos resultados indican que aunque la digestibilidad aparente de la materia seca, energía y proteína de los DDGS reducidos en aceite fue menor que en la dieta de referencia, el camarón alimentado con dietas con 40 por ciento de este ingrediente, logró un desempeño de crecimiento y supervivencia aceptables.

Cuadro 5. Resumen de los estudios publicados que evalúan los efectos en el desempeño del crecimiento y composición de la carne al alimentar DDGS de maíz a camarón blanco del Pacífico (*Litopenaeus vannamei*).

Peso corporal (inicial - final, g)	DDGS %	Ingred. que sustituyen	Duración, días	% Harina de pescado	% Lisina suplementaria	% DDGS óptimo	Referencia
0.49 - 7.2	0 - 40	harina de soya, almidón de maíz	56	6	0 - 0.13	40	Rhodes et al, 2015 ¹
0.99 - 6.1	0 - 30	harina de pescado, harina de soya, harina de trigo	56	0	0 - 0.4	La sustitución parcial de la harina de soya con DDGS en las dietas sin harina de pescado redujo el desempeño del crecimiento	Cummins et al., 2013
0.04 - 16.3	10	sorgo	126	0	ninguna	10	Sookying and Davis, 2011
0.45 - 25	0 - 10	Sorgo, harina de pescado	63	0	ninguna	Hasta 10	Roy et al., 2009

¹Las dietas contenían DDGS reducido en aceite (4.8 por ciento de grasa cruda)

Cuadro 6. Coeficientes de digestibilidad aparente de materia seca, energía y proteína cruda en una dieta de referencia y DDGS reducidos en aceite en camarón blanco del Pacífico (adaptado de Rhodes y Davis, 2015)

Medición	Dieta de referencia	DDGS reducidos en aceite
Estudio 1		
Materia seca	68.2	53.8
Energía	74.5	55.7
Proteína cruda	85.7	36.9
Estudio 2		
Materia seca	73.2	42.4
Energía	78.1	20.9
Proteína cruda	89.1	44.7

Pámpano (*Trachinotus carolinus*)

Aunque por muchos años ha habido un gran interés de producir pámpano en los sistemas acuícolas comerciales, hasta hace poco se habían hecho pocas investigaciones para determinar sus necesidades nutricionales (Lazo et al., 1998; Weirich et al., 2006; Williams, 2008; Riche, 2009; González-Félix et al., 2010; Gothreaux et al., 2010; Riche y Williams, 2010; Lech y Reigh, 2012). Lech y Reigh (2012) determinaron la digestibilidad aparente de la proteína cruda y energía, así como la disponibilidad aparente de los aminoácidos en los DDGS de maíz y compararon estos valores con la harina de canola y harina de gluten de maíz alta en proteína (**cuadro 7**). La digestibilidad aparente de la energía de la harina de gluten de maíz alta en proteína fue mayor que la de la harina de canola y DDGS, mientras que la digestibilidad de la energía de este último fue mayor que la de la harina de canola. De la misma forma, la digestibilidad aparente de la proteína cruda fue mayor en la harina de gluten de maíz alta en proteína que la de los DDGS, pero la de la proteína de la harina de canola no fue diferente comparada con la harina de gluten de maíz y el coproducto de maíz. Además, entre la harina de canola, la harina de gluten de maíz alta en proteína y los DDGS no hubo diferencias en los coeficientes de disponibilidad de aminoácidos, excepto en la leucina, que fue mayor en la harina de gluten de maíz que en los otros dos. Lech y Reigh (2012) indicaron que los coeficientes de digestibilidad de nutrientes de las materias primas varían entre estudios, incluso cuando las condiciones de cultivo, tamaño de los peces y métodos experimentales son similares. Estos investigadores indicaron la necesidad de desarrollar ecuaciones de predicción para calcular la digestibilidad de la energía y nutrientes de los ingredientes para varias especies piscícolas, lo que ayudaría a estandarizar los valores nutritivos para tener una formulación de dietas más precisa. También señalaron que es necesario contar con más información sobre la digestibilidad de energía y de nutrientes de varias combinaciones y tasas de inclusión de la dieta de los ingredientes para desarrollar coeficientes de digestibilidad de nutrientes más realistas a usar en la formulación de dietas prácticas. Los valores de disponibilidad de nutrientes de las materias primas publicados no solo necesitan ser de especies específicas, sino también de dietas específicas. Por lo tanto, se debe tomar en cuenta la composición de nutrientes de las

dietas de referencia usadas en la determinación de la digestibilidad y disponibilidad de estos para la formulación práctica de alimentos.

Trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*)

El alimento para peces carnívoros como la trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*) requiere de grandes cantidades de harina de pescado (de 30 al 50 por ciento de la dieta). Como resultado, debido al alto el precio de la harina de pescado, los nutricionistas siguen evaluando fuentes alternativas de proteínas, como los DDGS, como sustituto parcial de esta materia prima. Muchos nutricionistas observan que los DDGS de maíz podrían tener un valor nutritivo limitado en las dietas de salmónidos, ya que tienen concentraciones relativamente altas de polisacáridos no almidonosos y un equilibrio de aminoácidos desfavorable. Sin embargo, varios estudios han mostrado que los DDGS de maíz son un ingrediente valioso en las dietas de truchas arcoíris, cuyos resultados se resumen en el **cuadro 8**.

Los estudios iniciales de Cheng et al. (2003) y Cheng y Hardy (2004a, b) demostraron que se pueden añadir los DDGS a niveles de 15 a 22.5 por ciento sin la adición de lisina y/o metionina suplementarias para conseguir un desempeño de crecimiento aceptable, con un mínimo o ningún efecto en la composición corporal. Cheng y Hardy (2004a) informaron que contaban con datos no publicados que indicaban que eran altos los coeficientes de digestibilidad aparente de proteína y aminoácidos en los DDGS (proteína cruda = 90.4 por ciento, aminoácidos esenciales excepto treonina = mayores al 90 por ciento y aminoácidos no esenciales excepto cisteína = mayores al 86 por ciento) para la trucha arcoíris. Sin embargo, señalaron que una de las limitantes de usar DDGS en las dietas de trucha arcoíris son las concentraciones relativamente bajas de lisina y metionina en comparación con las concentraciones de estos aminoácidos en la harina de pescado. Por lo tanto, debe añadirse lisina y metionina sintéticas suplementaria a las dietas con DDGS para la trucha arco iris para lograr un desempeño de crecimiento satisfactorio. Para demostrarlo, Cheng y Hardy (2004a) llevaron a cabo un estudio de alimentación de seis semanas para determinar los efectos de alimentar dietas con 0, 7.5, 15 y 22.5 por ciento

Cuadro 7. Digestibilidad aparente de energía y proteína cruda, y disponibilidad aparente de aminoácidos esenciales en harina de canola, harina de gluten de maíz alta en proteína y DDGS en pámpano de Florida (*Trachinotus carolinus*) (adaptado de Lech y Reigh, 2012)

	Harina de canola	Harina de gluten de maíz	DDGS
Digestibilidad aparente %			
Energía	21.3 ^c	57.1 ^a	30.7 ^b
Proteína cruda	38.6 ^{ab}	57.2 ^a	20.6 ^b
Disponibilidad aparente %			
Arginina	53.8	68.5	35
Cisteína	30.3	42.5	23
Histidina	46.9	58.7	30
Isoleucina	50.4	62.5	40.9
Leucina	46.8 ^b	70.8 ^a	55.6 ^b
Lisina	48.4	47.9	50.4
Metionina	91.9	84.9	91.5
Fenilalanina	54.2	70.9	55.5
Treonina	44.6	56.9	37.6
Valina	48.1	64.7	50.4

^{a,b,c}Las medias con diferentes superíndices en las filas son diferentes (P menor que 0.05).

Cuadro 8. Resumen de los estudios publicados que evalúan los efectos en el desempeño del crecimiento y composición de la carne al alimentar DDGS de maíz a trucha arcoíris (*Oncorhynchus mykiss*)

Peso corporal (inicial-final, g)	DDGS %	Ingred. que sustituyen	Duración, días	% Harina de pescado	% Lisina suplementaria	% DDGS óptimo	Composición de la carne	Referencia
143-359	0-50	harina de semilla de girasol, harina de colza, chícharos (guisantes)	77	18.9	ninguna	50	-	Overland et al., 2013
33.6-57	0-20	Harina de pescado, trigo	36	30-40	0.50	ninguna	La grasa corporal total aumentó al alimentar 20 por ciento	Barnes et al., 2012
21-158.4	0-30	Junto con la harina de gluten de maíz alta en proteína sustituyó a las harinas de pescado y trigo	84	0	ninguna	30	Disminuyó la proteína y aumentó la grasa corporal total	Stone et al., 2005
49.8-96.2	0-22.5	Junto con la harina de gluten de maíz alta en proteína sustituyó a las harinas de pescado y trigo	42	7.5-22.5	0-1.23	15/22.5	La grasa corporal total disminuyó a 22.5 por ciento sin lisina suplementaria, pero no cuando se añadió lisina	Cheng and Hardy, 2004a
20.0-78.5	15	-	70	15	0.82	15	No tuvo efecto	Cheng and Hardy, 2004b
49.5 -114.6	18.5	Harina de arenque, trigo, gluten de maíz	49	17.5	0-0.48	18.5 al suplementar metionina en las dietas	No tuvo efecto	Cheng et al., 2003

de DDGS, con o sin la suplementación de lisina y metionina sintéticas, en el desempeño del crecimiento de la trucha arcoíris de 50 g. La tasa de supervivencia de todos los peces fue del 100 por ciento y los alimentados con las dietas que contenían 15 por ciento de DDGS o con la sustitución del 50 por ciento de la harina de pescado con DDGS con base isonitrogenada e isocalórica resultaron con una ganancia de peso, así como una conversión alimenticia similar en comparación con los alimentados con las dietas de harina de pescado. Estos resultados indican que se pueden añadir DDGS, sin suplementación de lisina y metionina sintéticas, a las dietas hasta en un 15 por ciento, o reemplazar hasta el 50 por ciento de la harina de pescado para lograr un desempeño del crecimiento satisfactorio. Además, se pueden usar DDGS a un nivel de inclusión de hasta el 22.5 por ciento o sustituir hasta un 75 por ciento de la harina de pescado en las dietas de trucha arcoíris con la suplementación adecuada de lisina y metionina sintéticas. Cheng et al. (2003) mostraron que cuando se añadían harina de soya, DDGS y 1.65 g/kg del hidroxianálogo de la metionina (MHA) a las dietas de trucha arcoíris (50 g de peso corporal inicial) para sustituir el 50 por ciento de la harina de pescado, se mejoró significativamente la ganancia de peso, conversión alimenticia, retención de proteína cruda y fósforo, en comparación con los peces que consumieron una dieta equivalente sin la suplementación de MHA.

Cheng y Hardy (2004b) también evaluaron los efectos de la suplementación de fitasa sobre los coeficientes de digestibilidad aparente de los nutrientes en los DDGS, así como el desempeño del crecimiento y la retención aparente de nutrientes de las truchas arcoíris alimentadas con dietas que contenían este ingrediente, fitasa y varios niveles de premezclas de minerales traza. Los coeficientes de digestibilidad aparente en las dietas con DDGS (30 por ciento de inclusión) con diferentes niveles de fitasa (0, 300, 600, 900 y 1200 FTU/kg de la dieta) estuvieron en un intervalo de 49 a 59 por ciento de la materia seca, 79 a 89 por ciento de la grasa cruda, 80 a 92 por ciento de la proteína cruda, 51 a 67 por ciento de la energía bruta, 74 a 97 por ciento de los aminoácidos y de 7 a 99 por ciento de los minerales. Cuando se incluyeron los DDGS al 15 por ciento de la dieta y se suplementó con lisina, metionina y fitasa, pero se agregaron diferentes niveles de premezcla de minerales traza, no hubo diferencias en ganancia de peso, conversión alimenticia, supervivencia, composición corporal y retención aparente de nutrientes entre los peces alimentados con todas las dietas, excepto los alimentados con la dieta sin la suplementación de minerales traza. Estos resultados indican que la fitasa fue eficaz en liberar la mayor parte de los minerales y que se pudo reducir la suplementación de minerales traza cuando se añadió a las dietas de trucha arcoíris.

En un estudio subsiguiente, Stone et al. (2005) evaluaron los efectos de la extrusión sobre el valor nutritivo de las dietas que contenían harina de gluten de maíz alto en proteínas y DDGS de maíz para trucha arcoíris. Observaron que el grado de sustitución de harina de pescado en la dieta dependía de la relación de los DDGS con la harina de gluten de maíz usada. Sus resultados indican que hasta un 18 por ciento de la dieta puede estar compuesta por estos coproductos de maíz para sustituir cerca del 25 por ciento de la harina de pescado,

sin afectar negativamente el desempeño del crecimiento. También encontraron que no fue de beneficio la extrusión de las dietas que contenían DDGS y harina de gluten de maíz, en comparación con las dietas peletizadas en frío.

El estudio más reciente que evalúa los DDGS de maíz en las dietas para truchas arcoíris lo realizaron Øverland et al. (2013) para evaluar la adición de 25 o 50 por ciento en sustitución de la harina de semilla de girasol, harina de colza y chícharos (guisantes). La alimentación con 50 por ciento de DDGS resultó en mayor consumo de alimento y ganancia de peso y mejoró la conversión alimenticia comparado con la dieta control con harina de pescado e ingredientes proteínicos vegetales y la dieta con 50 por ciento del coproducto. Sin embargo, entre las dietas no hubo diferencia en digestibilidad de proteína, de la mayoría de los aminoácidos y del fósforo, además de que alimentar dietas de DDGS tendió a aumentar la digestibilidad de la energía. De hecho, la alimentación de dietas con 50 por ciento de DDGS resultó en mayor retención de energía y fósforo que en las truchas alimentadas con la dieta control y tuvieron mayor retención de nitrógeno que las alimentadas con las dietas control o de 25 por ciento. Además, la alimentación con dietas de DDGS no tuvo efectos en el peso del intestino distal, la actividad enzimática intestinal o metabolitos del plasma. Estos resultados muestran que los DDGS de maíz son una fuente de energía, proteína y fósforo apta para la trucha arcoíris como sustituto de ingredientes vegetales.

Cangrejo de río (*Cherax quadricarinatus*)

En los últimos años ha aumentado el interés por cultivar el cangrejo de río australiano (*Cherax quadricarinatus*); en la actualidad esta especie se produce comercialmente en varios países como China, México y Australia. El cangrejo de río puede alimentarse con dietas preparadas comercialmente y crecer con rapidez en un período relativamente corto (117 días; Thompson et al. (2004). Esta especie es de gran popularidad entre los consumidores de mariscos gracias a su estupendo sabor a carne de cola, apariencia de langosta, es más grande que un camarón y tiene una excelente calidad en almacenamiento. Thompson et al. (2006) evaluaron el desempeño de crecimiento y la composición corporal del juvenil de cangrejo de río de 5.75 g alimentado durante 97 días con dietas de 18 o 28 por ciento de proteína cruda (con sorgo, harina de soya y 18.3 o 30 por ciento de DDGS de maíz como sustituto de harina de pescado). Los resultados de este estudio mostraron que el uso de DDGS de maíz y harina de soya como sustituto de la harina de pescado en dietas con 28 por ciento de proteína no tuvo ningún efecto en la conversión alimenticia, supervivencia y composición corporal, lo que indica que pueden usarse con efectividad en esta aplicación.

Lobina (*Morone chrysops x M-saxatilis*)

Los híbridos de lobina estriada (*Morone saxatilis*) y lobina blanca son una fuente importante de pescado; están en el primer lugar de volumen de pesca recreativa en EE. UU. Sin embargo, como con la mayoría de las especies de peces, se han realizado pocas investigaciones para evaluar los beneficios y limitaciones

de alimentar a la lobina estriada e híbridos relacionados con DDGS de maíz.

Se realizó un estudio inicial por Webster et al. (1999), en el que se alimentaron juveniles de lubinas híbridas (15 g) (*Morone saxatilis* × *M. saxatilis*) con una dieta de 40 por ciento de proteína con 10 por ciento de DDGS como reemplazo de las harinas de pescado, maíz, carne y hueso, en el desempeño del crecimiento y composición corporal durante un período de ochos semanas. Los resultados de este estudio mostraron que la alimentación de dietas con 10 por ciento de DDGS proporcionó un desempeño del crecimiento aceptable sin efectos adversos en la composición de la carne. Más recientemente, Thompson et al. (2008) evaluaron la digestibilidad de la materia seca, proteína, lípidos y materia orgánica de dos harinas de pescado, dos harinas de subproductos avícolas, harina de soya y DDGS en dietas prácticas para lobina. Los peces alimentados con DDGS tuvieron los coeficientes de digestibilidad aparente más bajos de proteína (65 por ciento) y materia orgánica (17 por ciento) en comparación con la harina de pescado menhaden, que presentó los coeficientes más altos (86 y 89 por ciento, respectivamente). No se definió la calidad de los DDGS utilizados, pero es probable que fuera de calidad inferior debido a la baja digestibilidad de proteína y materia orgánica observada en este estudio. Estos resultados contrastan con los de otros diversos estudios con otras especies de peces, en los que algunos niveles de inclusión de DDGS en las dietas brindaron un desempeño satisfactorio. Estos resultados indican que solo se pueden usar fuentes de DDGS de alta calidad en los alimentos acuícolas para lograr un desempeño del crecimiento y la digestibilidad de nutrientes satisfactorios.

Tilapia (*Oreochromis niloticus*)

La tilapia (*Oreochromis niloticus*) es uno de los peces de aguas cálidas de más popularidad y económicamente importantes que se cultiva en todo el mundo. Como resultado, la mayoría de los estudios (n = 23) relacionados con la alimentación de DDGS de maíz en varias especies acuícolas se han realizado con tilapia, cuyos resultados se resumen en el **cuadro 9**.

Los primeros estudios que evaluaban la adición de DDGS de maíz en dietas de tilapias los realizaron Wu et al. (1994, 1996, 1997). Wu et al. (1994) notificaron que alimentar dietas que contenían ya fuera harina de gluten de maíz (18 por ciento) o DDGS (29 por ciento) y 32 por ciento o 36 por ciento de proteína cruda, resultaron en mejores ganancias de peso en tilapias (peso inicial de 30 g), que los peces alimentados con dietas comerciales de 36 por ciento de proteína cruda y harina de pescado. En un estudio subsiguiente, Wu et al. (1996) evaluaron las respuestas del crecimiento en un periodo de alimentación de ocho semanas en tilapias más pequeñas (0.4 g de peso inicial) con dietas que contenían hasta 49 por ciento de DDGS, hasta 42 por ciento de harina de gluten de maíz alta en proteína o hasta 22 por ciento de harina de gluten de maíz, con niveles de proteína cruda en la dieta del 32 por ciento, 36 por ciento y 40 por ciento. De las ocho dietas alimentadas, la mayor ganancia de peso se logró con la dieta comercial control de 36 por ciento de proteína y la dieta de 40 por ciento de proteína con 35 por

ciento de DDGS. La mejor conversión alimenticia se logró con la dieta control (1.05) y con dos dietas de 40 por ciento en proteína que contenían 35 por ciento de DDGS (1.13) o 30 por ciento de harina de gluten de maíz (1.12). La mayor tasa de eficiencia de proteína (ganancia de peso/proteína alimentada) se obtuvo con la dieta control (3.79) y con dos dietas de 36 por ciento de proteína que contenían 49 por ciento de DDGS (3.71) o 42 por ciento de harina de gluten de maíz (3.55). De estos resultados, los investigadores concluyeron que la alimentación de dietas con 32, 36 y 40 por ciento de proteína y de 16 a 49 por ciento de coproductos de maíz resultaron en ganancias de peso, conversión alimenticia y tasas de eficiencia de proteína aceptables para los alevines de tilapia.

Al utilizar DDGS en las dietas acuícolas, a menudo es necesaria la adición de aminoácidos sintéticos suplementarios al formular dietas con contenido de proteína relativamente bajo con altas cantidades de coproductos de maíz (por ejemplo, DDGS, harina de gluten de maíz, harina de gluten de maíz alta en proteína) para evitar deficiencia de aminoácidos, especialmente lisina, y así sustentar un desempeño satisfactorio del crecimiento. Para hacerlo, Wu et al. (1997) evaluaron el desempeño del crecimiento de alevines de tilapia (0.5 g de peso inicial) en un período de alimentación de ocho semanas con dietas que contenían 28 por ciento o 32 por ciento de proteína, lisina y triptofano sintéticos suplementados y 54 a 92 por ciento de coproductos de maíz. No hubo diferencias en la conversión alimenticia y la eficiencia de proteína entre los peces alimentados con la dieta de 28 por ciento de proteína que contenía 82 por ciento de DDGS con lisina y triptofano sintéticos, comparado con las dietas de 67 por ciento de harina de gluten y 26 por ciento de harina de soya y la dieta control con 32 por ciento de proteína. Con base en estos resultados, para sustituir la harina de pescado en tilapias juveniles, se puede utilizar con éxito DDGS, harina de gluten de maíz y harina de gluten de maíz alta en proteína junto con cantidades adecuadas de aminoácidos sintéticos para la formulación de dietas con puros ingredientes vegetales.

Un estudio subsiguiente de Tidwell et al. (2000) evaluó el desempeño de crecimiento, supervivencia y composición corporal de tilapia del Nilo cultivada en jaulas, alimentada con dietas de DDGS peletizadas y no peletizadas en policultivos con langostinos de río. La tasa de crecimiento mejoró en los peces alimentados con la dieta de DDGS peletizada en comparación con los que recibieron la no peletizada, pero la alimentación de una dieta comercial de bagre resultó en un mejor peso y longitud individual, tasa de crecimiento y conversión alimenticia. Aunque el crecimiento fue significativamente mayor para los peces alimentados con la dieta comercial, también lo fue el costo de producción (US\$0.66/kg de ganancia), en comparación con los peces alimentados con las dietas de DDGS peletizada y no peletizada (US\$0.26/kg de ganancia y US\$0.37/kg de ganancia, respectivamente). La producción de langostinos fue de 1,449 kg/ha y la adición de la tilapia en policultivo aumentó la productividad total del estanque en 81 por ciento. Estos investigadores concluyeron que la alimentación de DDGS proporciona un mayor crecimiento económico de la tilapia y que el policultivo con langostinos puede mejorar la eficiencia total de los estanques de agua dulce en climas templados.

Cuadro 9. Resumen de los estudios publicados que evalúan los efectos en el desempeño del crecimiento y composición de la carne al alimentar DDGS de maíz a tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*), tilapias roja e híbrida (*O. aureus* × *O. niloticus*)

Peso corporal (inicial - final, g)	DDGS %	Ingred. que sustituyen	Duración, días	% Harina de pescado	% Lisina supl.	% DDGS óptimo	Composición de la carne	Referencia
Tilapia del Nilo (<i>Oreochromis niloticus</i>)								
21 - 183	52.4	Harina de pescado, harina de soya, harina de subproductos avícolas, harina de trigo, almidón	168	0 - 10	0.4	50	No afectó el color ni la composición de aminoácidos de los filetes, pero aumentó los ácidos grasos n-6	Herath et al., 2016
6.4 - 32.0	17	harina de soya	56	0	0 - 1.0	Se puede usar un concentrado de proteína de maíz alto en lisina para equilibrar la composición de aminoácidos de la dieta sin la adición de lisina cristalina	-	Nguyen and Davis, 2016
0.98 - 14.2	0 - 40	maíz, harina de soya	84	11	ninguna	20 por ciento sin enzimas, 30 por ciento sin enzimas	La proteína corporal total aumentó con 10 y 20 + enzimas, 40 aumentó la grasa corporal	Soltan et al., 2015
6 - 28.3	0 - 20	maíz, harina de pescado	72	11 - 20	ninguna	16	No tuvo efecto	Gabr et al., 2013
6 - 28.3	0 - 20	maíz, harina de soya	72	20	ninguna	10	mayor que 5, disminuyó la proteína corporal total y aumentó las cenizas y grasa cruda	Khalil et al., 2013
27.1 - 286	0 - 15	harina de pescado	123	0 - 15	ninguna	15 por ciento mejor eficiencia económica, 11.25 por ciento mejor crecimiento	Disminuyeron la proteína corporal total y cenizas, pero aumentó el contenido de lípidos y energía	Abdelhamed et al., 2012
18.6 - 35.7	0 - 30	maíz, harina de soya	84	20	0 - 0.6	30	-	Ibrahim et al., 2012
34.9 - 67.7	0 - 27.5	maíz, harina de soya	55	5	ninguna	17.5	-	Schaeffer et al., 2010

Cuadro 9. Resumen de los estudios publicados que evalúan los efectos en el desempeño del crecimiento y composición de la carne al alimentar DDGS de maíz a tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*), tilapias roja e híbrida (*O. aureus* × *O. niloticus*)

Peso corporal (inicial - final, g)	DDGS %	Ingred. que sustituyen	Duración, días	% Harina de pescado	% Lisina supl.	% DDGS óptimo	Composición de la carne	Referencia
6.7 - 11	0 - 40	maíz, harina de soya	42	5	ninguna	20	-	Schaeffer et al., 2009
3.8 - 35	28	-	82	10	ninguna	La suplementación de 57 a 150 mg/kg de fitasa mejoró el crecimiento y la conversión alimenticia en las dietas con DDGS	-	Tahoun et al., 2009
2 - 23	0 - 55	maíz, harina de soya	70	10	0 - 0.4	de 28 a 55	-	Abo-State et al., 2009
6.7 - 68.6	0 - 60	maíz, harina de soya	84	8	0.9	Hasta 60	-	Shelby et al., 2008
9.4 - 60.5	0 - 40	maíz, harina de soya	70	8	0 - 0.4	20 a 40	Disminuyó la proteína corporal total a 40 por ciento	Lim et al., 2007
2.7 - 68.5	0 - 30	harina de pescado, harina de soya	70	0 - 8	ninguna	30	No tuvo efecto	Coyle et al., 2004
26 - 120	0 - 100	-	84	0	ninguna	-	No tuvo efecto	Tidwell et al., 2000
0.5 - 11.4	0 - 82	harina de gluten de maíz, harina de soya	56	0	0.25 - 0.75	ninguna	-	Wu et al., 1997
0.4 - 20.9	0 - 49	maíz	56	0	ninguna	35	-	Wu et al., 1996a
30 - 387	0 - 29	maíz	196	0 - 6	ninguna	19	Los filetes tuvieron contenido de proteína y de cenizas similares, pero menor contenido de grasa que el control y no hubo diferencia en características de sabor	Wu et al., 1996b
30 - 122.4	19 - 29	maíz, harina de soya	103	0 - 6	ninguna	29	-	Wu et al., 1994

Cuadro 9. Resumen de los estudios publicados que evalúan los efectos en el desempeño del crecimiento y composición de la carne al alimentar DDGS de maíz a tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*), tilapias roja e híbrida (*O. aureus* × *O. niloticus*)

Peso corporal (inicial - final, g)	DDGS %	Ingred. que sustituyen	Duración, días	% Harina de pescado	% Lisina supl.	% DDGS óptimo	Composición de la carne	Referencia
Tilapia roja								
31.6 - 265.7	0 - 40	harina de soya, salvado de arroz, harina de maíz quebrado, harina de carne y hueso, harina de gluten de maíz alto en proteína	120	0	ninguna	Hasta 40	-	Suprayudi et al., 2015
190 - 907	0 - 15	maíz, salvado de arroz	120	0	ninguna	Hasta 15	No tuvo efecto	U.S. Grains Council, 2006
Híbrido de tilapia (<i>O. aureus</i> × <i>O. niloticus</i>)								
6 - 81.4 2.1 - 63.2	0 - 50	harina de soya	56 (exp. 1) 84 (exp. 2)	5	0 - 0.27	Hasta 30 (exp. 1) Hasta 50 con suplementación de lisina y lípidos (exp. 2)	-	Chatvijitkul et al., 2016
3.7 - 63.5	0 - 32	maíz, harina de soya	70	8	ninguna	30	-	Welker et al., 2014b
1.5 - 6.1	0 - 40	harina de pescado, trigo	90	3	0.4	Hasta 40	-	U.S. Grains Council, 2007a

En otro estudio, Lim et al. (2007) alimentaron juveniles de tilapia del Nilo (9.4 g de peso corporal) con dietas con 0, 10, 20, 40 por ciento de DDGS y 40 por ciento de DDGS con lisina sintética suplementaria, como sustitutos parciales de las harinas de soya y de maíz durante 10 semanas, y se desafiaron con *Streptococcus iniae*. Los peces alimentados con el 40 por ciento de los DDGS tuvieron la ganancia de peso más baja, así como la eficiencia de proteína y la proteína corporal total, además de la peor conversión, pero la suplementación de la dieta del 40 por ciento de este coproducto con lisina sintética mejoró la ganancia de peso y la tasa de eficiencia proteica. Sin embargo, la alimentación de dietas con DDGS no tuvo efecto en el número de días para la primera mortalidad, la mortalidad acumulada a los 14 días posteriores al desafío o los parámetros hematológicos e inmunitarios. Estos investigadores concluyeron que se puede añadir a la dieta de tilapia del Nilo hasta el 20 por ciento de DDGS como sustituto parcial de las harinas de soya y de maíz sin afectar el desempeño del crecimiento, composición corporal, hematología, respuesta inmunitaria y resistencia a la infección de *Streptococcus iniae*.

Abo-State et al. (2009) reemplazaron la harina de soya con DDGS de maíz en incrementos entre 0 y al 100 por ciento de las dietas, con o sin suplementación de fitasa en tilapia del

Nilo (2 g de peso corporal inicial) durante 70 días. Observaron la mejor tasa de crecimiento y conversión alimenticia en las dietas con 0, 25 y 50 por ciento de DDGS con fitasa.

Schaeffer et al. (2009) llevaron a cabo dos experimentos para evaluar el uso de DDGS en las dietas de tilapia (35 g de peso corporal inicial) y mostraron que alimentar dietas con 0, 17.5, 20, 22.5, 25 y 27.5 por ciento de este ingrediente para reemplazar parcialmente la harina de pescado no resultó en diferencias en la digestibilidad aparente de nutrientes entre las dietas. Sin embargo, las mayores ganancia de peso, conversión alimenticia y eficiencia de proteína (PER) fueron para los peces alimentados con la dieta 0 por ciento de DDGS, pero la de 17.5 por ciento mejoró la conversión alimenticia y PER. En un segundo estudio, la tilapia del Nilo se alimentó con 20, 25 y 30 por ciento de DDGS, con o sin probiótico, en el que no se encontraron diferencias en cuanto a ganancia de peso, conversión alimenticia o PER entre los tratamientos de la dieta. En un estudio subsiguiente, Schaeffer et al. (2010) intentaron definir con mayor precisión la tasa óptima de inclusión en la dieta de juveniles de tilapia al determinar las respuestas al desempeño del crecimiento alimentando con dietas de 17.5 a 27.5 por ciento de DDGS. Al alimentar con dietas de DDGS con 5 por ciento de harina de pescado la tasa de crecimiento

se redujo en comparación con la dieta comercial control con 15 por ciento de harina de pescado. La alimentación con 20 por ciento de DDGS resultó en el mejor desempeño del crecimiento. Los resultados de estos estudios indican que los DDGS pueden ser un ingrediente altamente económico en las dietas de tilapia y que se pueden usar con éxito en una tasa de inclusión relativamente alta, si se suplementa de manera adecuada con aminoácidos.

El estudio más definitivo que demuestra los efectos benéficos de utilizar DDGS en dietas de tilapia fue hecho por Herath et al. (2016). Estos investigadores llevaron a cabo un estudio de alimentación de 12 semanas para determinar los efectos de sustituir por completo la harina de pescado por DDGS (52.4 por ciento), concentrado de proteína de maíz (19.4 por ciento), harina de gluten de maíz de 65 por ciento de proteína (23.5 por ciento) y granos secos de destilería altos en proteína (HP-DDG; 33.2 por ciento) en el desempeño del crecimiento y composición corporal de juveniles de tilapia (peso corporal inicial 4.5 g). Las dietas de coproductos de maíz contenían de 0.4 a 0.8 por ciento de lisina suplementaria y 0.3 a 0.4 por ciento de DL-metionina suplementaria. Los resultados mostraron que la alimentación con las dietas de 52.4 por ciento de DDGS y control proporcionó las mayores tasas de crecimiento específico y supervivencia, seguida de la dieta HP-DDG comparada con las demás (**cuadro 10**). Los ingredientes de la dieta no afectaron la conversión alimenticia, tasa de eficiencia de la proteína y contenido de aminoácidos totales de

todo el cuerpo. El contenido de proteína de todo el cuerpo y de los filetes fue mayor en los peces alimentados con la dieta HP-DDG, mientras que el contenido de lípidos fue mayor en los alimentados con las dietas DDGS. Estos resultados muestran que los DDGS de maíz reemplazan de manera eficaz a toda la harina de pescado en las dietas de tilapia del Nilo a un nivel del 50 por ciento y que apoyan un desempeño del crecimiento, supervivencia, utilización del alimento y composición de todo el cuerpo y de los filetes aceptables.

Posibles beneficios en la salud al alimentar con DDGS

La adición de DDGS en las dietas acuícolas no solo brinda excelente desempeño del crecimiento, supervivencia y composición de la carne, sino que cada vez hay más pruebas de que también puede ofrecer efectos benéficos para mejorar el estado inmunitario y la resistencia a algunas enfermedades en peces. Lim y colaboradores (2009) mostraron que la alimentación de dietas con 40 por ciento de DDGS en bagres de canal desafiados con *Edwardsiella ictaluri* mejoró la resistencia, lo cual probablemente se debió al aumento de las inmunoglobulinas séricas totales y a los títulos de anticuerpos 21 días después del desafío. Sin embargo, Lim et al. (2007) alimentaron dietas con 40 por ciento de DDGS a tilapias del Nilo (*Oreochromis niloticus*) desafiadas con *Streptococcus iniae* y no mostraron mejoras en respuestas hematológicas

Cuadro 10. Desempeño del crecimiento, supervivencia, utilización de la proteína y composición corporal total y de filetes de tilapia del Nilo alimentada con dietas de varios coproductos de maíz (adaptado de Herath et al., 2016)

Medición	Control	DDGS	Concentrado de proteína de maíz	Harina de gluten de maíz	DDGS altos en proteína
Tasa de crecimiento específico %	3.56 ^a	3.53 ^a	2.63 ^d	2.75 ^c	3.30 ^b
Consumo de alimento, g	84.1 ^a	81.2 ^a	38.8 ^b	40.2 ^b	71.1 ^a
Ganancia:Alimento	1	1.05	1.10	1	1.05
Supervivencia %	100 ^a	97.2 ^{ab}	75 ^c	66.6 ^c	80.6 ^{bc}
Tasa de eficiencia proteica	3.20	3.06	2.84	3.10	2.99
Retención de proteína %	49.6 ^a	46.7 ^{ab}	38.4 ^c	42 ^{bc}	46.2 ^{ab}
% cuerpo total, base húmeda					
Humedad	69.4	69.7	71.6	70.9	68.9
Proteína	15.5 ^b	15.4 ^b	13.9 ^d	14.6 ^c	16.7 ^a
Lípidos	8.5 ^b	10 ^a	9.6 ^a	9.8 ^a	9.9 ^a
Cenizas	6.9 ^a	5.7 ^b	5 ^d	4 ^e	5.4 ^c
% filetes, base húmeda					
Humedad	78.2	77.2	78.5	77.9	76.2
Proteína	18.8 ^b	18.3 ^b	18.7 ^b	19.2 ^b	19.8 ^a
Lípidos	1.6 ^c	3.1 ^a	1.9 ^{bc}	2.2 ^b	2.4 ^b
Cenizas	1.4	1.3	1.4	1.3	1.2

^{a,b,c,d,e} Las medias en las filas con diferentes superíndices son diferentes (P menor que 0.05)

ni inmunitarias. De la misma forma, Shelby et al. (2008) no mostraron efectos de alimentar DDGS en la función inmunitaria o resistencia a enfermedades en tilapia del Nilo. Aydin y Gumus (2016) alimentaron dietas con hasta 30 por ciento de DDGS a alevines de trucha arcoíris no desafiados los cuales no mostraron efectos en respuestas hematológicas y bioquímicas. Los investigadores han supuesto que los factores que contribuyen a las pocas respuestas positivas notificadas quizá se deba a la presencia de cantidades importantes de compuestos biológicamente activos (mananos, β -glucanos y nucleótidos) derivados de las levaduras, que comprenden cerca del 10 por ciento de la masa total de DDGS (Shurson, 2018). Se han publicado muy pocos datos sobre los niveles de estos compuestos en los DDGS, pero se calcula que el contenido de β -glucanos en esta materia prima es cercano al 21.2 por ciento (Kim et al., 2008). Ringo et al. (2012) revisaron y resumieron 14 estudios publicados sobre la alimentación de distintas especies de peces con β -glucanos de levaduras y notificaron mejoras en la resistencia a los patógenos, desempeño del crecimiento y supervivencia.

Extrusión de dietas con DDGS

En general, la concentración relativamente alta de fibra en los DDGS crea desafíos para lograr un alto índice de durabilidad del pélet en las dietas acuícolas extruídas, en especial si se agrega a altas concentraciones. Los investigadores han determinado que los factores más críticos que afectan la extrusión y la calidad del pélet de las dietas con DDGS son la geometría del dado, temperatura, contenido de humedad y velocidad del tornillo. La adición de varios agentes aglutinantes es eficaz en mejorar la durabilidad del pélet y la densidad por unidad. Como resultado, se pueden producir alimentos flotantes aceptables con 60 por ciento de DDGS bajo condiciones específicas que resulten en valores de densidad por unidad de 0.24 g/cm³ a 0.61 g/cm³ y valores de durabilidad que van del 96 al 98 por ciento (Chevanan et al., 2007; 2009). Para consultar una revisión más completa de los efectos de la extrusión de dietas acuícolas con DDGS, véase el **capítulo 16**.

Conclusiones

Hay un tremendo interés en la industria acuícola mundial por el uso de ingredientes de alimentos vegetales alternativos para sustituir la harina de pescado en las dietas acuícolas. Como resultado, va en aumento el uso de DDGS de maíz en los alimentos acuícolas. Son pocas las investigaciones que evalúan las tasas óptimas de inclusión de DDGS en dietas de distintas especies acuícolas, pero los estudios recientes han mostrado que hay oportunidades importantes de reducir sustancialmente el costo de la dieta y al mismo tiempo lograr un desempeño del crecimiento, supervivencia y calidad de la carne satisfactorios. Generalmente las tasas de inclusión de los DDGS en las dietas son más altas en especies con una mayor capacidad de uso de la fibra, pero varía dependiendo del tipo de ingredientes que sustituyen y de las cantidades de otras fuentes de proteína (por ejemplo, harina de pescado) incluidas en la dieta. Al usar altas tasas de inclusión de DDGS quizás sea necesaria la suplementación de lisina, metionina y otros aminoácidos para cubrir los requerimientos de aminoácidos digestibles, ya que este ingrediente tiene concentraciones relativamente bajas de lisina digestible con relación a los requerimientos y a pesar de tener un contenido moderadamente alto de proteína cruda. Las dietas acuícolas altas en proteína pueden requerir tasas de inclusión de DDGS más bajas, a menos que se suplemente con los aminoácidos adecuados. El contenido de lípidos relativamente alto en los DDGS podría aumentar el contenido de grasa corporal de algunas especies, pero su contenido de aceite de maíz es relativamente bajo en DHA y no contiene EPA. Por lo tanto, es posible garantizar ácidos grasos esenciales adecuados en el alimento acuícola si se suplementan dietas con aceites de pescado. Otros beneficios del uso de DDGS en el alimento acuícola son la menor excreción de fósforo gracias a su contenido de fósforo digestible relativamente alto, el que no haya preocupaciones sobre factores antinutricionales y que puede brindar beneficios inmunitarios. Se pueden producir pélets de alta calidad con las condiciones de extrusión adecuadas. Con base en los resultados publicados de estudios de investigación, se muestran en el **cuadro 11** las tasas de inclusión máximas de DDGS en la dieta de varias especies

Cuadro 11. Tasas de inclusión máximas recomendadas en dietas para varias especies acuícolas

Especie	Tasa de inclusión máxima en la dieta de DDGS %
Bagre de canal	De 30 a 40 con aminoácidos sintéticos suplementarios
Carpa común	15
Langostinos de río	40
Sabalote	45
Camarón blanco del Pacífico	40 con aminoácidos sintéticos suplementarios
Trucha arcoíris	50
Cangrejo de río	30
Lobina híbrida	10
Tilapia	50 con aminoácidos sintéticos suplementarios

acuícolas. Aunque solo algunos de estos estudios dan detalles de la calidad y composición nutricional de las fuentes evaluadas, deben usarse DDGS dorados de color claro para garantizar la mayor digestibilidad de nutrientes, en especial con altos niveles de inclusión en la dieta.

Bibliografía

- Abdelghany, A.E. 2003. Partial and complete replacement of fish meal with gambusia meal in diets for red tilapia, *Oreochromis niloticus* × *O. mossambicus*. *Aquacult. Nutr.* 9:145-154.
- Abdelhamid, A.M., A.A. El-Shebly, and A.S.I. Sultan. 2012. Effect of dietary graded levels of substituting distillers dried grains with solubles instead of fish meal in tilapia diet. https://www.academia.edu/15415389/EFFECT_OF_DIETARY_GRADED_LEVEL_OF_SUBSTITUTING_DISTILLERS_DRIED_GRAINS_WITH_SOLUBLES_INSTEAD_OF_FISH_MEAL_IN_TILAPIA_DIET
- Abo-State, H.A., A.M. Tahoun, and Y.A. Hammouda. 2009. Effect of replacement of soybean meal by DDGS combined with commercial phytase on Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) fingerlings growth performance and feed utilization. *American-Eurasian J. Agric. Environ. Sci.* 5:473-479.
- Anderson, P.V., B. J. Kerr, T. E. Weber, C. Z. Ziemer, and G. C. Shurson. 2012. Determination and prediction of energy from chemical analysis of corn co-products fed to finishing pigs. *J. Anim. Sci.* 90:1242-1254.
- Aydin, B. and E. Gumus. 2016. Effects of partial replacement of fish meal by DDGS on blood hematological and biochemical parameters of rainbow trout. *Proc. VII International Scientific Agriculture Symposium – Agrosym 2016, October, 2016, Jahorina, Bosnia, and Herzegovina.* Pp. 2472-2476.
- Barnes, M.E., M.L. Brown, and K.A. Rosentrater. 2012. Juvenile rainbow trout responses to diets containing distillers dried grain with solubles, phytase, and amino acid supplements. *Open J. of Animal Sciences* 2:69-77.
- Chatvijitkul, S., A.A. Davis, and C. Lim. 2016. Lipid extracted distillers dried grains with solubles (LE-DDGS) as a partial replacement for soybean meal in hybrid tilapia (*Oreochromis niloticus* × *Oreochromis aureus*) diets. *Aquacult.* 459:131-136.
- Cheng, Z.J. and R.W. Hardy. 2004a. Nutritional value of diets containing distiller's dried grain with solubles for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *J. Appl. Aquacult.* 15:101-113.
- Cheng, Z.J. and R.H. Hardy. 2004b. Effects of microbial phytase supplementation in corn distiller's dried grains with solubles on nutrient digestibility and growth performance of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *J. Appl. Aquacult.* 15:83-100.
- Cheng, Z.J., R.W. Hardy, and M. Blair. 2003. Effects of supplementing methionine hydroxyl analogue in soybean meal and distiller's dried grain-based diets on the performance and nutrient retention of rainbow trout [*Oncorhynchus mykiss* (Walbaum)]. *Aquaculture Research* 34:1303-1310.
- Chevanan, N., K. Muthukumarappan, and K.A. Rosentrater. 2009. Extrusion studies of aquaculture feed using dried distillers grains with solubles and whey. *Food and Bioprocess Technology* 2:177-185.
- Chevanan, N., K.A. Rosentrater, and K. Muthukumarappan. 2007. Twin screw extrusion processing of feed blends containing distillers dried grains with solubles. *Cereal Chemistry* 84:428-436.
- Cho, S.H. 2010. Effect of fish meal substitution with various animal and/or plant protein sources in the diet of the abalone *Haliotis discus hannai*. *Ino. Aquacult. Res.* 41:e587-e593.
- Choi, J., M.M. Rahman, and S-M. Lee. 2014. Inclusion of distillers dried grain as a partial replacement of wheat flour and soybean meal in the diet of juvenile abalone (*Haliotis discus hannai*). *Fish Aquat. Sci.* 17:249-253.
- Coyle, S. G.J. mengel, J.H. Tidwell, and C.D. Webster. 2004. Evaluation of growth, feed utilization and economics of hybrid tilapia, *Oreochromis niloticus* × *Oreochromis aureus*, fed diets containing different protein sources in combination with distillers gried grains with solubles. *Aquaculture Res.* 35:1-6.
- Coyle, S., T. Najeeullah, and J. Tidwell. 1996. A preliminary evaluation of naturally occurring organisms, distiller by-products, and prepared diets as food for juvenile freshwater prawn (*Macrobrachium rosenbergii*). *J. Appl. Aquacult.* 6:57-66.
- Cummins, V.C., C.D. Webster, K.R. Thompson, and A. Velasquez. 2013. Replacement of fish meal with soybean meal, alone or in combination with distiller's dried grains with solubles in practical diets for Pacific white shrimp, (*Litopenaeus vannamei*), grown in a clear-water culture system. *J. World Aquacult. Soc.* 44:775-785.
- Davis, D.A., and D. Sookying. 2009. Strategies for reducing and/or replacing fish meal in production diets for the Pacific white shrimp, *Litopenaeus vannamei*. *The Rising Tide, Proc. of the special session on shrimp farming, C.L. Browdy and D.E. Jory, eds. World Aquaculture 2009, World Aquaculture Society, BatonRouge, LA.* Pp. 91-96.
- FAO. 2016. *The state of world fisheries and aquaculture 2016. Contributing to food security and nutrition for all.* Rome, 200 pp.

- Gabr, A.A., F.F. Khalil, and S. E.M. El-Sharkawy. 2013. Utilization of distillers dried grains with solubles in fish nutrition to partial replacement of fish meal and yellow corn by graded levels of DDGS in Nile tilapia fingerlings diets (*Oreochromis niloticus*). J. Anim. Poult. Prod. Mansoura Univ., Egypt. 4:455-467.
- Gatlin, D.M., III, F.T. Barrows, P. Brown, K. Dabroski, T.G. Gaylord, R.W. Hardy. 2007. Expanding the utilization of sustainable plant products in aquafeeds: a review. Aquaculture Res. 38:551-579.
- Gonzalez-Felix, M.L., D.A. Davis, W. Rossi, and M. Perez-Velazque. 2010. Evaluation of apparent digestibility coefficient of energy of various vegetable feed ingredients in Florida pompano, *Trachinotus carolinus*. Aquaculture 310:240-243.
- Gothreaux, C.T., R.C. Reigh, M.B. Williams, and E.J. Chesney. 2010. Amino acid availability of soybean meal for Florida pompano. North Amer. J. Aqua. 72:309-313.
- Herath, S.S., Y. Haga, and S. Satoh. 2016. Potential use of corn co-products in fish meal-free diets for juvenile Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). Fish Sci. 82:811-818.
- Hertrampf, J.W and F. Piedad-Pascual. 2000. Distillery by-products. In: Handbook on Ingredients for Aquaculture Feeds, pp. 115-124. Boston, MA. Kluwer Academic Publishers.
- Ibrahim, D., E.I. Hassanein, W. Eleraky, and M.F.A. Elgamal. 2012. The combined effect of distiller's dried corn grains with solubles and ginseng on growth performance, nutrient digestibility and some immunological parameters in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). The Global J. of Fisheries and Aqua. Res. Proc. of the 5th Global Fisheries and Aqua. Research Conf., Egypt, Vol. No. 5:299-314.
- Jauncey, K., and B. Ross. 1982. A guide to tilapia feeds and feeding. University of Stirling, Institute for Aquaculture, Stirling, UK.
- Khalil, F.F., A.A. Gabr, and S. E.M. El-Sharawy. 2013. Utilization of distillers grains with solubles in fish nutrition: 1-replacement soybean meal and yellow corn by DDGS graded levels in diet for Nile tilapia fingerlings (*Oreochromis niloticus*). J. Anim. Poult. Prod. Mansoura Univ., Egypt. 4:149-159.
- Kim, Y. N.S. Mosier, R. Hendrickson, T. Ezeji, H. Blaschek, B. Dien, M. Cotta, B. Dale, and M.R. Landisch. 2008. Composition of corn dry-grind ethanol by-products: DDGS, wet cake, and thin stillage. Bioresour. Technol. 99:5156-5176.
- Lazo, J.P., D.A. Davis, and C.R. Arnold. 1998. The effects of dietary protein level on growth, feed efficiency and survival of juvenile Florida pompano (*Trachinotus carolinus*). Aquaculture 169:225-232.
- Lech, G.P., and R.C. Reigh. 2012. Plant products affect growth and digestive efficiency of cultured Florida pompano (*Trachinotus carolinus*) fed compounded diets. PLoS ONE 7(4): e34981. Doi:10.1371/journal.pone.0034981.
- Lemos, D., A.L. Lawrence, and A.J. Sicarri III. 2009. Prediction of apparent protein digestibility of ingredients and diets by in vitro pH-stat degree of protein hydrolysis with species-specific enzymes for juvenile Pacific white shrimp *Litopenaeus vannamei*. Aquaculture 295:89-98.
- Li, M.H., D.F. Oberle, and P.M. Lucas. 2011. Evaluation of corn distillers dried grains with solubles and brewers yeast in diets for channel catfish, *Ictalurus punctatus*. Aquacult. Res. 42:1424-1430.
- Li, M.H., E.H. Robinson, D.F. Oberle, and P.M. Lucas. 2010. Effects of various corn distillers by-products on growth, feed efficiency, and body composition of channel catfish, *Ictalurus punctatus*. Aquacult. Nutr. 16:188-193.
- Lim, C., M. Yildirim-Aksoy, and P.H. Klesius. 2009. Growth response and resistance to *Edwardsiella ictaluri* of channel catfish, *Ictalurus punctatus*, fed diets containing distiller's dried grains with solubles. J. World Aquac. Soc. 40:182-193.
- Lim, C.E, J.C. Garcia, M. Yildirim-Askoy, P.H. Klesius, C.A. Shoemaker, and J.J. Evans. 2007. Growth response and resistance to *Streptococcus iniae* of Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*, fed diets containing distiller's dried grains with solubles. J. World Aquacult. Soc. 38:231-237.
- Magalhães, R., F. Coutinho, P. Pousão-Ferreira, T. Aires, A. Oliva-Teles, and H. Peres. 2015. Corn distiller's dried grains with solubles: Apparent digestibility and digestive enzymes activities in European seabass (*Dicentrarchus labrax*) and meagre (*Argyrosomus regius*). Aquacult. 443:90-97.
- Mamauag, R.E.P., J.A. Ragaza, and T.J. Nacionales. 2017. Nutritional evaluation of distiller's dried grains with solubles as replacement to soybean meal in diets of milkfish (*Chanos chanos*) and its effect on fish performance and intestinal morphology. Aquacult. Nutr. 0:1-8. <https://doi.org/10.1111/anu.12470>.
- Mbahinzirek, G.B., K. Dabrowski, K.J. Lee, D. El-Saidy, and E.R. Wisner. 2001. Growth, feed utilization and body composition of tilapia fed cottonseed meal-based diets in a recirculating system. Aquacult. Nutr. 7:189-200.
- Nguyen, L., and D.A. Davis. 2016. Comparison of crystalline lysine and intact lysine used as a supplement in practical diets of channel catfish (*Ictalurus punctatus*) and Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). Aquaculture 464:331-339.

- Overland, M., A. Krogdahl, G. Shurson, A. Skrede, and V. Denstadli. 2013. Evaluation of distiller's dried grains with solubles (DDGS) and high protein distiller's dried grains (HPDDG) in diets for rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). *Aquacult.* 416-417:201-208.
- Rahman, M.M. 2015. Role of common carp (*Cyprinus carpio*) in aquaculture production systems. *Front. Life Sci.* 8:399-410.
- Rahman, M.M., J. Choi, and S-M. Lee. 2013. Use of distillers dried grains as partial replacement of wheat flour and corn gluten meal in the diet of juvenile black seabream (*Acanthopagrus schlegelii*). *Turkish J. Fisheries and Aquatic Sci.* 13:699-706.
- Renukdas, N. C. Engle, and R. Lochmann. 2014. Performance of alternative diets containing solvent-extracted distillers dried grains with solubles compared to traditional diets for pond-raised channel catfish, *Ictalurus punctatus*, and hybrid catfish, *Ictalurus punctatus* × *Ictalurus furcatus*. *J. World Aqua. Soc.* 45:290-300.
- Rhodes, M.A., D. Yu, Y. Zhou, and D.A. Davis. 2015. Use of lipid-extracted distillers dried grains with solubles (DDGS) in diets for Pacific white shrimp. *North Amer. J. Aquacult.* 77:539-546.
- Riche, M., and T.N. Williams. 2010. Apparent digestible protein, energy and amino acid availability of three plant proteins in Florida pompano, *Trachinotus carolinus* L., in seawater and low-salinity water. *Aqua. Nutr.* 16:223-230.
- Riche, M. 2009. Evaluation of digestible energy and protein from growth and nitrogen retention of juvenile Florida pompano, *Trachinotus carolinus*. *J. World Aqua. Soc.* 40:45-57.
- Ringo, E., R.E. Olson, J.L.G. Vecino, S. Wadsworth, and S.K. Song. 2012. Use of immunostimulants and nucleotides in aquaculture: a review. *J. Marine Sci. Res. Dev.* 1:104.
- Robinson, E.H., and M. H. Li. 2012. Summary of distillers grains studies for pond-raised catfish. Mississippi Agricultural and Forestry Experiment Station, Mississippi State University Res. Rep. 24:11, 7 pp.
- Robinson, E.H. and M.H. Li. 2008. Replacement of soybean meal in channel catfish, *Ictalurus punctatus*, diets with cottonseed meal and distiller's dried grains with solubles. *J. World Aquacult. Soc.* 39:521-527.
- Robinson, E.H. 1991. Improvement of cottonseed meal protein with supplemental lysine in feeds for channel catfish. *J. Appl. Aquacult.* 1:1-14.
- Roy, L.A., A. Bordinhon, D. Sookying, D.A. Davis, T.W. Brown, and G.N. Whitis. 2009. Demonstration of alternative feeds for the Pacific white shrimp, *Litopenaeus vannamei*, reared in low salinity waters of west Alabama. *Aquacult. Res.* 40:496-503.
- Schaeffer, T.W., M.L. Brown, K.A. Rosentrater, and K. Muthukumarappan. 2010. Utilization of diets containing graded levels of ethanol production co-products by Nile tilapia. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.* 94:E348-E354.
- Schaeffer, T.W., M.L. Brown, and K.A. Rosentrater. 2009. Performance characteristics of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) fed diets containing graded levels of fuel-based distillers dried grains with solubles. *J. Aqua. Feed Sci. Nutr.* 1:78-83.
- Shiau, S.Y., J.L. Chuang, and G.L. Sun. 1987. Inclusion of soybean meal in tilapia (*Oreochromis niloticus* × *O. aureus*) diets at two protein levels. *Aquaculture* 65:251-261.
- Shelby, R., C. Lim, M. Yildirim-Askoy, and P. Klesius. 2008. Effect of distillers dried grains with solubles-incorporated diets on growth, immune function and disease resistance in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Aquacult. Res.* 39:1351-1353.
- Shurson, G.C. 2018. Review – Yeast and yeast derivatives in feed additives and ingredients: sources, characteristics, animal responses and quantification methods. *Anim. Feed Sci. Technol.* 235:60-76.
- Sklan, D., T. Prag, and I. Lupatsch. 2004. Apparent digestibility coefficients of feed ingredients and their prediction in diets for tilapia *Oreochromis niloticus* × *Oreochromis aureus* (*Teleostei, Chichlidae*). *Aquaculture Res.* 35:358-364.
- Soltan, M.A., A.A. Radwan, A.H. Gomaa, and A.M. Farag. 2015. Using distillers dried grains as an alternative protein source in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) feeds. *Egypt J. Aquat. Biol. & Fish* 19:23-33.
- Sookying, D., and D.A. Davis. 2011. Pond production of Pacific white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) fed high levels of soybean meal in various combinations. *Aquacult.* 319:141-149.
- Stone, D.A.J., R.W. Hardy, F.T. Barrows, and Z.J. Cheng. 2005. Effects of extrusion on nutritional value of diets containing corn gluten meal and corn distiller's dried grains for rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*. *J. Appl. Aquacult.* 17:1-20.
- Suprayudi, M.A., D. Yaniharto, N. Priyoutomo, A. Kurniati, J. Ekasari, D. Jusadi, and Y. Haga. 2015. Evaluation of practical diets containing high levels of corn distillers dried grains with solubles on red tilapia floating net cage production performance. *Pakistan J. Nutr.* 14:708-711.
- Tahoun, A.M., H.A. Abo-State, and Y.A. Hammouda. 2009. Effect of adding commercial phytase to DDGS-based diets on the performance and feed utilization of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) fingerlings. *American-Eurasian J. Agric. Environ. Sci.* 5:473-479.

- Thompson, K.R., S.D. Rawles, L.S. Metts, R. Smith, A. Wimsatt, A.L. Gannam, R.G. Twibell, R.B. Johnson, Y.J. Brady, and C.D. Webster. 2008. Digestibility of dry matter, protein, lipid and organic matter of two fish meals, two poultry by-product meals, soybean meal and distiller's dried grains with solubles in practical diets for sunshine bass, *Morone chrysops* × *M-Saxatilis*. *J. World Aquac. Soc.* 39:352-363.
- Thompson, K.R., L.S. Metts, L.A. Muzinic, S. Dasgupta, and C.D. Webster. 2006. Effects of feeding practical diets containing various protein levels, with or without fish meal, on growth, survival, body composition and processing traits of male and female Australian red claw crayfish (*Cherax quadricarinatus*) grown in ponds. *Aquacult. Nutr.* 12:227:238.
- Thompson, K.R., L.A. Muzinic, L.S. Engler, S. Morton, and C.D. Webster. 2004. Effects of feeding practical diets containing various protein levels on growth, survival, body composition and processing traits of Australia red claw crayfish *Cherax quadricarinatus*, and on pond water quality. *Aquacult. Res.* 35:659-668.
- Tidwell, J.H., S.D. Coyle, A. Van Arnum, C. Weibel, and S. Harkins. 2000. Growth, survival and body composition of cage-cultured Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*, fed pelleted and unpelleted distillers grains with solubles in polyculture with freshwater prawn, *Macrobrachium rosenbergii*. *J. World Aquacult. Soc.* 31:627-631.
- Tidwell, J.H., C.D. Webster, J.A. Clark, and L.R. D'Abramo. 1993a. Evaluation of distillers dried grains with solubles as an ingredient in diets for pond culture of the freshwater prawn *Macrobrachium rosenbergii*. *J. World Aquacult. Soc.* 24:66-70.
- Tidwell, J.H., C.D. Webster, D.H. Yancey, and L.R. D'Abramo. 1993b. Partial and total replacement of fish meal with soybean meal and distiller's by-products in diets for pond culture of the freshwater prawn (*Macrobrachium rosenbergii*). *Aquaculture* 118:119-130.
- Tidwell, J.H., C.D. Webster, and D.H. Yancey. 1990. Evaluation of distillers grains with solubles in prepared channel catfish diets. *Transactions of the Kentucky Academy of Science* 51:135-138.
- Urriola, P.E., G.C. Shurson, and H.H. Stein. 2010. Digestibility of dietary fiber in distillers coproducts fed to growing pigs. *J. Anim. Sci.* 88:2373-2381.
- U.S. Grains Council. 2006. Feeding trial of DDGS for Tilapia fish. Activity No. M05GX54318. U.S. Grains Council, Washington, DC.
- U.S. Grains Council. 2007a. Feeding trial of DDGS for common carp. Activity No. M06GX64322. U.S. Grains Council, Washington, DC.
- U.S. Grains Council. 2007b. The evaluation of dietary DDGS levels for milkfish (*Chanos chanos*) and hybrid tilapia (*O. aurus* × *O. nilotica*). U.S. Grains Council, Washington, DC.
- U.S. Grains Council. 2015. Effect of feeding diets containing corn distillers dried grains with solubles (DDGS) on growth performance and fillet color of swai (*Pangasius hypophthalmus*). Summary report. Washington, DC. p. 1-23.
- Webster, C.D., L.G. Tiu, A.M. Morgan, and A.L. Gannam. 1999. Effect of partial and total replacement of fish meal on growth and body composition of sunshine bass *Morone chrysops* × *M. saxatilis* fed practical diets. *J. World Aquacult. Soc.* 30:443-453.
- Webster, C.D., J.H. Tidwell, L.S. Goodgame, and P.B. Johnsen. 1993. Growth, body composition and organoleptic evaluation of channel catfish fed diets containing different percentages of distiller's grains with solubles. *The Progressive Fish-Culturist* 55:95-100.
- Webster, C.D., J.H. Tidwell, L.S. Goodgame, D.H. Yancey, and L. Mackey. 1992. Use of soybean meal and distillers grains with solubles as partial or total replacement of fish meal in diets for channel catfish, *Ictalurus punctatus*. *Aquaculture* 106:301-309.
- Webster, C.D., J.H. Tidwell, and D.H. Yancey. 1991. Evaluation of distillers grains with solubles as a protein source in diets for channel catfish. *Aquaculture* 96:179-190.
- Weirich, C.R., D.R. Groat, R.C. Reigh, E.J. Chesney, and R.F. Malone. 2006. Effect of feeding strategies on production characteristics and body composition of Florida pompano reared in marine recirculating systems. *North Amer. J. Aquaculture* 68:330-338.
- Welker, T.L., C. Lim, F.T. Barrows, and K. Liu. 2014a. Use of distiller's dried grains with solubles (DDGS) in rainbow trout feeds. *Anim. Feed Sci. Technol.* 195:47-57.
- Welker, T.L., C. Lim, P. Klesius, and K. Liu. 2014b. Evaluation of distiller's dried grains with solubles from different grain sources as dietary protein for hybrid tilapia, *Oreochromis niloticus* (♀) × *Oreochromis aureus* (♂). *J. World Aqua. Soc.* 45:625-637.
- Williams, T.N. 2008. An assessment of alternative feed ingredients in practical diets for Florida pompano (*Trachinotus carolinus*) held in low salinity recirculating systems. Master's thesis, University of Maine, Orono, Maine, USA.

- Wilson, R.P., and W.E. Poe. 1985. Effects of feeding soybean meal with varying trypsin inhibitor activities on growth of fingerling channel catfish. *Aquaculture* 46:19-25.
- Wu, Y.V., R.R. Rosati, and P.B. Brown. 1997. Use of corn-derived ethanol products and synthetic lysine and tryptophan for growth of tilapia (*Oreochromis niloticus*) fry. *J. Agric. Food Chem.* 45:2174-2177.
- Wu, Y.V., R.R. Rosati, and P.B. Brown. 1996a. Effects of diets containing various levels of protein and ethanol coproducts from corn on growth of tilapia fry. *J. Agric. Food Chem.* 44:1491-1493.
- Wu, Y.V., V.K. Warner, R. Rosati, D.J. Sessa, and P.B. Brown. 1996b. Sensory evaluation and composition of tilapia (*Oreochromis niloticus*) fed diets containing protein-rich ethanol byproducts from corn. *J. Aquatic Food Prod. Technol.* 5:7-16.
- Wu, Y.V., R.R. Rosati, D.J. Sessa, and P.B. Brown. 1994. Utilization of protein-rich ethanol co-products from corn in tilapia feed. *J. Amer. Oil Chem. Soc.* 71:1041-1043.
- Zhou, P., D.A. Davis, C. Lim, M. Yildirim-Askoy, P. Paz, and L.A. Roy. 2010a. Pond demonstration of production diets using high levels of distiller's dried grains with solubles with or without lysine supplementation for channel catfish. *North Amer. J. Aquacult.* 72:361-367.
- Zhou, P., W. Zhang, D.A. David, and C. Lim. 2010b. Growth response and feed utilization of juvenile hybrid catfish fed diets containing distiller's dried grains with solubles to replace a combination of soybean meal and corn meal. *North Amer. J. Aquacult.* 72:298-303.

CAPÍTULO 14

Extrusión de dietas acuícolas con DDGS

Introducción

LA EXTRUSIÓN ES EL PROCESO TÉRMICO MÁS COMÚN UTILIZADO PARA PRODUCIR ALIMENTOS ACUÍCOLAS, porque mejora la conversión alimenticia, controla la densidad del pélet, brinda una mayor estabilidad al alimento en el agua y mejora la eficiencia y versatilidad de la producción (Khater et al., 2014). Este proceso resulta también en la gelatinización del almidón, desnaturalización de la proteína, hidratación, alteración de la textura, deshidratación parcial y destrucción de microorganismos y compuestos tóxicos (Khater et al., 2014).

Desafortunadamente, el principal reto al extruir dietas de DDGS es su bajo contenido inherente de almidón y alto en fibra (Chin et al., 1989). El bajo contenido de almidón de las dietas reduce la expansión durante la extrusión, lo que afecta sus características físicas, mientras que el alto contenido de fibra reduce la fuerza mecánica y durabilidad del material extruido (Chevanan et al., 2007a).

Procesos de extrusión

La extrusión es un proceso mediante el que un alimento se empuja, con un pistón o tornillo, por un orificio o dado de salida con una forma específica. Aunque la extrusión es el proceso térmico más común en la producción de alimentos acuícolas (Khater et al., 2014), presenta también ventajas para mejorar la digestibilidad de energía y nutrientes en alimentos porcinos (Rojas et al., 2016) y avícolas (Lundblad et al., 2011). Durante la extrusión suceden varios procesos como el flujo de fluidos, transferencia de calor y de masa, mezclado, rompimiento, reducción de tamaño de partícula, fundido, texturizado, caramelizado, plastificación, moldeado y dar forma, en función del material a procesar (Camire, 1998). La extrusión tiene varias ventajas en comparación con los procesos convencionales de cocción o peletización al vapor como por ejemplo: flexibilidad para hacer ajustes en línea y lograr las características físicas deseadas; fabricación de muchos tipos de alimentos; no tiene efluentes; es eficiente en el uso de la energía y puede usarse para procesar una amplia gama de materiales que van desde materiales secos a los altamente viscosos o húmedos (Maskan y Altan, 2011).

Hay varios diseños de extrusores dependiendo de su aplicación, pero por lo general se clasifican por el número de tornillos. Los dos tipos generales de extrusores son las configuraciones de tornillo sencillo o doble. Los extrusores de tornillo sencillo son ampliamente utilizados en la industria de alimentos balanceados debido a su bajo costo de inversión inicial y operativo, comparado con el de doble tornillo. El

extrusor de tornillo sencillo funciona con el requisito de presión del dado, el deslizamiento por la pared del tambor y el grado de llenado del tornillo; mientras que el de doble tornillo funciona con la dirección de rotación de los dos tornillos y el grado de engranaje entre ambos (Chevanan et al., 2005). Los extrusores de tornillo sencillo constan de un solo tornillo giratorio dentro de un tambor metálico que se puede configurar con muchos patrones. Los tres componentes principales en el proceso de extrusión del tornillo sencillo son las etapas de alimentación, transición, y compresión y medición. En este diseño, el alimento o los ingredientes molidos ingresan en la tolva y la acción giratoria del tornillo transporta el material hacia la sección de transición, en donde el canal del tornillo se estrecha y compacta. La energía mecánica que causa la compactación genera calor, que se disipa y aumenta la temperatura del material, lo cual resulta en la gelatinización del almidón y la cohesión. Conforme el material del alimento se transporta por la sección de medición, es empujado a través de la abertura del dado. Los extrusores de doble tornillo difieren de los de tornillo sencillo, los cuales cuentan con varias ventajas: no necesitan preacondicionamiento, se autolimpian, mayor rango de proporción entre longitud y diámetro; buen mezclado; menor tiempo de residencia y buena transferencia de calor; y son capaces de manejar una amplia gama de contenido de humedad y tipos de ingredientes (Harper, 1989).

Factores que afectan la extrusión de alimentos acuícolas

Se fabrican muchas formas de alimento piscícola como extruidos flotantes y no flotantes, peletizados al vapor, migajas grandes y pequeñas y harina gruesa; los dos principales métodos de fabricación son peletizado con vapor y extrusión. La mayoría de los peces necesitan pélets flotantes o por lo menos se les entrena para los acepten, mientras que el camarón requiere pélets que se hundan (Craig, 2009). Normalmente se usa el peletizado con vapor para fabricar pélets densos que se hundan rápido en el agua. Por lo general, se usa la extrusión para producir pélets flotantes, pues presenta varias ventajas en comparación con el peletizado al vapor, tales como, procesamiento continuo y de gran capacidad; procesa alimentos con amplio rango de contenido de humedad; eficiencia de la energía; capacidad de procesado en seco, componentes viscosos del alimento; mejora las características de sabor y textura; minimiza los cambios térmicos en el procesamiento; resulta en alimentos más estables que flotan en la superficie del agua y aplica para ingredientes poco convencionales (Chevanan et al., 2005; Brown et al., 2012).

Hay diversos factores que afectan la eficiencia de fabricación y las características de calidad de los alimentos piscícolas extruidos como son la composición de nutrientes (contenido de proteína, lípidos, fibra y cenizas); contenido de humedad; distribución del tamaño de partícula; rendimiento de alimento; tipo, velocidad y configuración del tornillo, y temperatura (Chevanan et al., 2005). Las mediciones importantes de la calidad del alimento piscícola extruido son: densidad de masa aparente y verdadera, porosidad, contenido de humedad, durabilidad del pélet, integridad estructural, índice de estabilidad en el agua, índice de absorción de agua y flotabilidad, pero no existen métodos estándar para evaluar dichas propiedades (Chevanan et al., 2005). Aunque para hacer dietas acuícolas extruidas de gran calidad es importante la composición de nutrientes en las dietas, antes de 2011 no se había estudiado a fondo, hasta que Kannadhasan et al. (2011) demostraron que el contenido de proteína era un factor importante de la calidad del extruido.

Las propiedades de los ingredientes que tienen un mayor efecto en la extrusión son contenido de humedad, tamaño de partícula y composición química. El almidón es útil gracias a su capacidad de generar expansión y cohesión, mientras que la fibra disminuye la expansión, cohesión, durabilidad y estabilidad en el agua (Brown et al., 2012). La extrusión de ingredientes y alimentos altos en proteína resulta en una expansión limitada y un material extruido final con mayor porosidad y textura, mientras que los ingredientes con alto contenido de lípidos reducen la gelatinización del almidón y la expansión, ya que actúan como lubricantes (Brown et al., 2012).

Extrusión de alimentos acuícolas con DDGS

Las propiedades del ingrediente con mayor efecto en la extrusión son el contenido de humedad, tamaño de partícula y composición química. La composición química de los DDGS sigue evolucionando conforme la producción de etanol de EE. UU. adopta nuevos procesos que mejoran los ingresos de la producción de etanol y coproductos. Debido a que la composición química de los DDGS es un factor importante que afecta la calidad del peletizado y extrusión, es de gran utilidad comprender la variabilidad entre las fuentes y el impacto de la extracción parcial del aceite. Tradicionalmente, la composición de nutrientes de los DDGS (Spiehs et al., 2002; Belyea et al., 2004) era de concentraciones mayores de grasa cruda, FND y almidón, pero con un contenido de proteína cruda menor que el de los DDGS reducidos en aceite que se producen en la actualidad (Kerr et al., 2013; **cuadro 1**). Sin embargo, pese a estos cambios de composición química, los DDGS tienen muy poco almidón y un contenido relativamente alto de grasa cruda y FND en comparación con otros ingredientes comunes, lo que hace que sea un reto en la fabricación de alimentos acuícolas extruidos de alta calidad con altas tasas de inclusión de DDGS, porque estos componentes químicos tienen efectos negativos para lograr el índice de durabilidad del pélet (PDI) deseado. Por lo tanto, se deben añadir agentes aglutinantes para

lograr un PDI mayor en los alimentos piscícolas extruidos con DDGS. El **cuadro 2** proporciona un resumen de los distintos agentes aglutinantes, su tasa típica de inclusión en la dieta y características de uso en los alimentos acuícolas.

Se han realizado varios estudios que evalúan las distintas características de calidad de los alimentos piscícolas extruidos con diferentes concentraciones de DDGS, los cuales se resumen en el **cuadro 3**. Nueve estudios evaluaron el uso de extrusores de tornillo sencillo y cinco estudios de extrusores de doble tornillo. Aunque en estos estudios se notificaron muchas características físicas y químicas de las dietas, se incluyeron la composición de ingredientes, tipo de aglutinante usado, tasa de inclusión de DDGS junto con la densidad de unidad e índice de durabilidad del pélet (PDI), porque estos son los principales factores que contribuyen a un alimento acuícola de calidad. En general, la inclusión de DDGS en estas formulaciones generó retos, en particular en altas tasas de inclusión, pero la adición de varios materiales aglutinantes por lo general mejoró la densidad por unidad y el PDI. La mayoría de las dietas evaluadas en estos estudios, excepto las notificadas por Chevanan et al. (2009) y Rosentrater et al. (2009b), tuvieron dietas de DDGS extruidas con densidades por unidad menores a 1 g/cm³, lo cual indica que flotaban. Además, el índice de durabilidad del pélet de las dietas extruidas en la mayoría de los estudios fue mayor al 85 por ciento, en las dietas con hasta 60 por ciento de DDGS y solo dos estudios (Chevanan et al., 2008; Kannadhasan et al., 2011) notificaron disminuciones de PDI con el aumento de la tasa de inclusión de DDGS. En particular Chevanan et al. (2007b) mostraron que se pueden producir pélets de alta calidad (alto PDI y densidad por unidad baja) al añadir 60 por ciento de DDGS a dietas de maíz, soya y harina de pescado con suero de leche como aglutinante. Kannadhasan et al. (2011) evaluaron los efectos de diversas fuentes de almidón con varias proporciones de DDGS y proteína sobre distintas propiedades físicas de extruidos en tornillo sencillo. Encontraron que el aumento en niveles de DDGS y proteína provoca un aumento de densidad por unidad y durabilidad del pélet. Por lo general, un mayor contenido de humedad aumenta el PDI, pero disminuye la densidad por unidad. El aumento de la temperatura del dado disminuye el PDI y la densidad por unidad, pero al aumentar la L:D (longitud/diámetro) mejoran ligeramente estos indicadores de calidad del pélet. Por lo tanto, se puede producir un alimento piscícola extruido aceptable con concentraciones relativamente altas de DDGS y un aglutinante de pélets (suero de leche o almidón), si durante el proceso de extrusión se manejan como es debido el contenido de humedad, temperatura del dado y la L:D del dado.

Hilton et al. (1981) evaluaron los efectos tanto del proceso de extrusión como del peletizado al vapor en la durabilidad del pélet, absorción de agua y respuesta fisiológica de la trucha. Determinaron que los pélets extruidos absorben más agua, tienen mejor estabilidad en el agua y duraron más que los peletizados al vapor.

Table 1. Comparison of average, range, and changes in nutrient composition of DDGS resulting from partial oil extraction (dry matter basis)

Nutrient	Corn DDGS (>10 % oil)	Corn DDGS (<10 % oil)¹
Moisture %	11.1 (9.8-12.8) ¹	12.5 (10.0-14.5)
Crude protein %	30.8 (28.7-33.3) ^{1,2}	31.2 (29.8-32.9)
Crude fat %	11.5 (10.2-12.6) ^{1,2}	8.0 (4.9-9.9)
NDF %	41.2 (36.7-49.1) ¹	32.8 (30.5-33.9)
Starch %	5.3 (4.7-5.9) ²	2.4 (0.8-3.4)
Ash %	5.2 (4.3 – 6.7) ^{1,2}	5.4 (4.9-6.1)

¹Spiehs et al. (2002); ²Belyea et al. (2004); ³Kerr et al. (2013)

Table 2. Common binding agents used in steam pelleted aquaculture feeds (adapted from Lovell, 1989)

Binding agent	Amount added to diets %	Comments
Carboxymethylcellulose	0.5 to 2.0	Good binder but expensive
Alginates	0.8 to 3.0	Good binder in moist feeds and must combine with divalent or polyvalent cations to be effective
Polymethylcarbamide	0.5 to 0.8	Very good binder, not approved by U.S. FDA, and unpalatable for some fish
Guar gum	1.0 to 2.0	Good binder but expensive
Hemicellulose	2.0 to 3.0	Moderate binder at a moderate cost
Lignin sulfonate	2.0 to 4.0	Good binder at a moderate cost
Sodium and calcium bentonite	2.0 to 3.0	Less effective than organic binders
Molasses	2.0 to 3.0	Moderate binder with nutritional value
Whey	1.0 to 3.0	Moderate binder with nutritional value
Gelatinized starches from corn, potato, sorghum, rice, and cassava	10 to 20	Good binders with nutritional value but must be added at high diet inclusion rates to be effective
Wheat gluten	2.0 to 4.0	Good binder but expensive

Cuadro 3. Resumen del tipo de extrusión, composición de la dieta, aglutinantes, concentración de DDGS en la densidad por unidad e índice de durabilidad del pélet de alimentos acuícolas extruidos

Referencia de tipo de extrusión especie acuícola, cuando proceda	Composición de la dieta	Agglutinante	DDGS %	Densidad por unidad, g/cm ³	PDI %
Extrusión de tornillo sencillo					
Chevannan et al. (2008)	Harina de soya, harina de maíz, harina de pescado premezcla de minerales y vitaminas	Ninguno	20	0.96	89
			30	0.93	65
			40	0.93	56
Chevanan et al. (2009)	Harina de soya, harina de maíz, harina de pescado premezcla de minerales y vitaminas	Suero de leche	20	1.05	94
			30	1.07	94
			40	1.06	94
Chevanan et al. (2007a)	Harina de soya, harina de maíz, harina de pescado premezcla de minerales y vitaminas	Suero de leche	40	0.88 - 1.03	85 - 98
Kannadhason et al. (2011) Tilapia y bagre de canal	Harina de soya, harina de pescado, suero de leche, premezcla de minerales y vitaminas	Almidón de yuca	20	0.78	82
			30	0.88	84
			40	0.86	86
		Almidón de maíz	20	0.90	85
			30	0.94	76
			40	0.91	63
		Almidón de papa	20	0.79	82
			30	0.88	85
			40	0.90	87
Rosentrater et al. (2009a) Tilapia	Almidón de maíz, harina de soya, harina de pescado, suero de leche, premezcla de minerales y vitaminas	Almidón de maíz	20	1.03	71
			25	1.01	91
			30	1.02	70
Kannadhason et al. (2009)Tilapia	Harina de soya, harina de pescado, suero de leche, premezcla de minerales y vitaminas	Almidón de tapioca	20	0.94	90
			25	0.93	96
			30	0.99	84
Rosentrater et al. (2009b)Tilapia	Harina de soya, harina de pescado, suero de leche, premezcla de minerales y vitaminas	Almidón de papa	20	0.85	89
			25	0.97	96
			30	0.93	82
Ayadi et al. (2013) Tilapia del Nilo	Harina de maíz, harina de pescado, 30, 40 o 50 por ciento de harina de soya y premezcla de minerales y vitaminas	Suero de leche	20	0.97	94
			30	0.89	95
			40	0.90	95
Ayadi et al. (2016) juveniles de tilapia del Nilo	Harina de soya, maíz, harina de pescado, suero de leche, premezcla de minerales y vitaminas	70 por ciento de amilosa 30 por ciento de amilopectina	20	0.97	93
		100 por ciento de amilopectina	20	0.99	94

Cuadro 3. Resumen del tipo de extrusión, composición de la dieta, aglutinantes, concentración de DDGS en la densidad por unidad e índice de durabilidad del pélet de alimentos acuícolas extruidos

Referencia de tipo de extrusión especie acuícola, cuando proceda	Composición de la dieta	Aglutinante	DDGS %	Densidad por unidad, g/cm ³	PDI %	
Extrusión de tornillo doble						
Chevanan et al. (2007b)	Harina de soya, harina de maíz, harina de pescado premezcla de minerales y vitaminas	Suero de leche	20	0.24	98	
			40	0.34	98	
			60	0.61	97	
Kannadhasan et al. (2010)Tilapia	Harina de soya, maíz, harina de pescado, aceite de soya, premezcla de minerales y vitaminas	Suero de leche	0	0.73	93	
			17.5	0.90	97	
			20	1.00	97	
			22.5	0.88	95	
			25	0.87	97	
			27.5	0.92	93	
Ayadi et al. (2011) Trucha arco iris	Harina de pescado, harina de gluten de maíz alta en proteína, harina de trigo integral, aceite de menhaden, Celufil, premezcla de minerales y vitaminas	Ninguno	0	0.93	83	
			10	0.89	91	
			20	0.89	89	
			30	0.94	88	
			40	0.97	92	
			50	0.99	95	
Fallahi et al. (2011) Tilapia del Nilo	Harina de soya, harina de maíz, harina de pescado, aceite de soya, premezcla de minerales y vitaminas	Suero de leche	20	0.92 - 1.02	94 - 99	
Fallahi et al. (2012) Perca amarilla	DDGS altos en proteína, harina de pescado, harina de gluten de maíz alta en proteína, harina de trigo integral, aceites, aminoácidos cristalinos, premezcla de minerales y vitaminas	Carboximetilcelulosa	31	0.66	99	
			Igual que arriba + harina de soya fermentada alta en proteínas	31	0.60	99
			Igual que arriba + concentrado de proteína de soya	31	0.50	99

En resumen, existen importantes ventajas económicas de usar de altas tasas de inclusión de DDGS en las dietas acuícolas, pero a menudo conseguir el PDI deseado limita su uso en las plantas de alimentos comerciales. Varios estudios científicos han evaluado el uso de distintos aglutinantes para pélets, los procesos de extrusión de tornillo sencillo vs. doble y las tasas de inclusión de DDGS en la dieta sobre la densidad por unidad y PDI de los extruidos. Existen muchas interacciones entre las variables de extrusión que contribuyen a la inconsistencia en los valores de PDI, pero varios estudios han demostrado que se pueden conseguir densidades por unidad y PDI adecuados con la extrusión de dietas con DDGS. Se necesita de más investigación para optimizar la composición química de las dietas acuícolas con DDGS para distintas especies.

Bibliografía

- Ayadi, F.Y., K.A. Rosentrater, K. Muthukumarappan, and S. Kannadhasan. 2016. Effects of amylose-to-amylopectin ratios on binding capacity of DDGS/Soy-based aquafeed blends. *J. Food Res.* 5:43-56.
- Ayadi, F.Y., P. Fallahi, K.A. Rosentrater, and K. Muthukumarappan. 2013. Modeling single-screw extrusion processing parameters and resulting extrudate properties of DDGS-based Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) feeds. *J. Food Res.* 2:11-28.

- Ayadi, F.Y., K. Muthukumarappan, K.A. Rosentrater, and M.L. Brown. 2011. Twin-screw extrusion processing of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) feeds using various levels of corn-based distillers dried grains with solubles (DDGS). *Cereal Chem.* 88:363-374.
- Belyea, R.L., K.D. Rausch, and M.E. Tumbleson. 2004. Composition of corn and distillers dried grains with solubles from dry grind ethanol processing. *Bioresource Tech.* 94:293-298.
- Brown, M.L., T.W. Schaeffer, K.A. Rosentrater, M.E. Barnes, and K. Muthukumarappan. 2012. Feeding DDGS to finfish. In: *Distillers Grains – Production, Properties, and Utilization*, K. Liu and K.A. Rosentrater (eds.), CRC Press, Boca Raton, FL.
- Camire, M.E.. 1998. Chemical changes during extrusion cooking. *Recent advances. Adv. Exp. Med. Biol.* 434:109–21.
- Chevanan, N., K.A. Rosentrater, and K. Muthukumarappan. 2005. Utilization of distillers dried grains for fish feeds by extrusion technology – a review. *ASAE Annual International Meeting*, July 17-20, 2005, Tampa, FL, Paper no. 056025. 20 pp.
- Chevanan, N., K. Muthukumarappan, K.A. Rosentrater, and J. Julson. 2007a. Effect of die dimensions on extrusion processing parameters and properties of DDGS based exudates. *Cereal Chem.* 84:389-398.
- Chevanan, N., K.A. Rosentrater, and K. Muthukumarappan. 2007b. Twin screw extrusion processing of feed blends containing distillers dried grains with solubles. *Cereal Chem.* 84:428-436.
- Chevanan, N., K.A. Rosentrater, and K. Muthukumarappan. 2008. Effect of DDGS, moisture content and screw speed on the physical properties of exudates in single screw extrusion. *Cereal Chem.* 85:132-139.
- Chevanan, N., K.A. Rosentrater, and K. Muthukumarappan. 2010. Effects of processing conditions on single screw extrusion of feed ingredients containing DDGS. *Food Bioprocess Technol.* 3:111-120.
- Chevanan, N., K. Muthukumarappan, and K.A. Rosentrater. 2009. Extrusion studies of aquaculture feed using distillers dried grains with solubles and whey. *Food Bioprocess Technol.* 2:177-185.
- Chin, H.K., A.M. Joseph, and T.M. Jeffrey. 1989. Properties of extruded dried distillers grains (DDG) and flour blends. *J. Food Proc. and Preserv.* 13:219-231.
- Craig, S., 2009. Understanding fish nutrition, feeds and feeding. VCE Publications, Virginia Tech. <https://www.pubs.ext.vt.edu/420/420-256/420-256.html> (accessed 6.24.17).
- Fallahi, P. K. Muthukumarappan, K.A. Rosentrater, and M.L. Brown. 2012. Twin-screw extrusion processing of vegetable-based protein feeds for yellow perch (*Perca flavescens*) containing distillers dried grains, soy protein concentrate and fermented high protein soybean meal. *J. Food Res.* 1:230-246.
- Fallahi, P. K.A. Rosentrater, K. Muthukumarappan, and M. Tulbek. 2011. Effects of conditioner steam, extruder water and screw speed on physical properties of DDGS-based extrudates in twin-screw extrusion. *ASABE Annual International Meeting*, August 7-10, 2011, Louisville, KY, paper no. 1110887, 40 pp.
- Harper, J.M. 1989. Food extruders and their applications. In: *Extrusion Cooking*, C. Mercer, P. Linko, and J.M. Harper (eds.). Amer. Assoc. Cereal chem., St. Paul, MN.
- Hilton, J.W., C.Y. Cho, and S.J. Slinger. 1981. Effect of extrusion processing and steam pelleting diets on pellet durability, pellet water absorption and the physiological response of rainbow trout. *Aquaculture* 25:185-194.
- Kannadhasan, S., K. Muthukumarappan, and K.A. Rosentrater. 2011. Effect of starch sources and protein content on extruded aquaculture feed containing DDGS. *Food Bioprocess Technol.* 4:282-294.
- Kannadhasan, S., K.A. Rosentrater, and K. Muthukumarappan. 2010. Twin screw extrusion of DDGS-based aquaculture feeds. *J. World Aqua. Soc.* 41:1-15.
- Kannadhasan, S., K. Muthukumarappan, and K.A. Rosentrater. 2009. Effects of ingredients and extrusion parameters on aquafeeds containing DDGS and tapioca starch. *J. Aqua. Feed Sci. Nutr.* 1:6-21.
- Kerr, B.J., W.A. Dozier, III, and G.C. Shurson. 2013. Effects of reduced-oil corn distillers dried grains with solubles composition on digestible and metabolizable energy value and prediction in growing pigs. *J. Anim. Sci.* 91:3231-3243.
- Khater, E.S.G., A.H. Bahnasawy, and S.A. Ali. 2014. Physical and mechanical properties of fish feed pellets. *J. Food Process. Technol.* 5:1-6.
- Lovell, R.T. 1989. *Nutrition and feeding of Fish*. Van Nostrand Reinhold publisher.
- Lundblad, K.K., S. Issa, J.D. Hancock, K.C. Behnke, L.J. McKinney, S. Alavi, E. Prestløkken, J. Fledderus, and M. Sørensen. 2011. Effects of steam conditioning at low and high temperature, expander conditioning and extruder processing prior to pelleting on growth performance and nutrient digestibility in nursery pigs and broiler chickens. *Anim. Feed Sci. Technol.* 169:208–217.

Maskan, M., and A. Altan. 2011. *Advances in Food Extrusion Technology*. CRC Press, Boca Raton, Fla. doi:10.1017/CBO9781107415324.004.

Rojas, O.J., E. Vinyeta, and H.H. Stein. 2016. Effects of pelleting, extrusion or extrusion and pelleting on energy and nutrient digestibility in diets containing different levels of fiber and fed to growing pigs. *J. Anim. Sci.* 94:1951-1960.

Rosentrater, K.A., K. Muthukumarappan, and S. Kannadhasan. 2009a. Effects of ingredients and extrusion parameters on aquafeeds containing DDGS and corn starch. *J. Aqua. Feed Sci. Nutr.* 1:44-60.

Rosentrater, K.A., K. Muthukumarappan, and S. Kannadhasan. 2009b. Effects of ingredients and extrusion parameters on aquafeeds containing DDGS and potato starch. *J. Aqua. Feed Sci. Nutr.* 1:22-38.

Spiehs, M.J., M.H. Whitney, and G.C. Shurson. 2002. Nutrient database for distillers dried grains with solubles produced from new plants in Minnesota and South Dakota. *J. Anim. Sci.* 80:2639-2645.

CAPÍTULO 15

DDGS reducidos en aceite en las dietas de ganado de engorde

Introducción

DURANTE VARIAS DÉCADAS, la industria del ganado de engorde de EE. UU ha sido un consumidor importante de los coproductos de destilería del maíz, tanto húmedos como secos. En 2017, la industria de ganado de engorde de EE. UU fue el mayor consumidor de coproductos de destilería de entre todas las especies animales, con un 44 por ciento del uso total nacional. Como resultado, se ha llevado a cabo una cantidad considerable de investigaciones para evaluar el valor alimenticio de los coproductos de destilería del maíz en el ganado, la mayoría enfocada a optimizar su uso en finalización, en donde se utilizan las mayores cantidades. Hace 10 o más años se publicaron varios resúmenes excelentes de investigación y recomendaciones de alimentación (Erickson et al., 2005; Tjardes y Wright, 2002; Loy et al., 2005a; Loy et al., 2005b; Klopfenstein et al. (2008)). Sin embargo, desde 2010 se han publicado 140 estudios, cuyos resultados se resumen en este capítulo.

Energía, composición de nutrientes y digestibilidad de los coproductos de destilería de maíz para ganado de engorde

Los DDGS de maíz se usan en las dietas de ganado de engorde como ingrediente con alto contenido de energía y con contenido medio de proteína. El **capítulo 4** de este manual brinda un resumen detallado de los promedios y rangos de composición de nutrientes de los DDGS. En EE. UU., el ganado de engorde en finalización se ha alimentado con éxito hasta con el 40 por ciento de DDGS de la materia seca de la ración, en sustitución del maíz. No obstante, si se añade más del 30 por ciento principalmente como fuente de energía, suministra más proteína y fósforo del requerido para la finalización.

Energía

La principal fracción de carbohidratos en los DDGS es la FND (fibra neutrodetergente). Gran parte de la FND de los DDGS se obtiene del pericarpio (salvado) del grano de maíz que contiene alrededor del 69 por ciento de FND, y que es alta (87 por ciento) y rápidamente (6.2 por ciento por hora) digerida (DeHaan et al., 1983). Debido a la fibra muy digestible y rápidamente fermentable de los DDGS, con frecuencia se usa como una fuerte alta en energía y proteína en dietas para ganado de engorde estabulado en finalización.

El aceite de maíz presente en los DDGS también es un contribuyente importante a este contenido energético. Vander Pol et al. (2007) mostraron que la digestibilidad del aceite de maíz era del 70 por ciento. Sin embargo, conforme aumenta el nivel de consumo de los ácidos grasos, disminuye su digestión (Plascencia et al., 2003), lo que probablemente explique la disminución del valor nutritivo de los DDGS cuando se alimenta a niveles altos (mayor al 30 por ciento) de la dieta.

Los estudios iniciales indican que la EN_{ganancia} de los DDGS de maíz para ganado de engorde fue 21 por ciento mayor que el valor de EN del maíz rolado en seco (Ham et al., 1994). Una revisión subsiguiente de Tjardes y Wright (2002) indica que los DDGS de maíz contienen de 2.16 a 2.21 Mcal/kg de EN_m y de 1.50 a 1.54 Mcal/kg de EN_g entre fuentes. De hecho, muchos nutricionistas de rumiantes prefieren los DDGS de maíz para finalizar el ganado de engorde en lugar de maíz, porque contienen de 118 a 130 por ciento del valor energético del grano y gracias a su bajo contenido de almidón y de fibra fácilmente fermentable, si se alimenta en grandes cantidades se reduce el riesgo de acidosis ruminal comparado con el maíz rolado en seco (Ahern et al., 2011).

Desafortunadamente, hay pocos datos sobre el contenido energético de los DDGS reducidos en aceite para el ganado de engorde. Bremer (2014) determinó el valor energético de los DDGS húmedos modificados reducidos en aceite (7.2 por ciento de grasa cruda) y altos en aceite (12 por ciento de grasa cruda) con solubles al alimentarlos de 20 a 40 por ciento de ingestión de materia seca en terneros en crecimiento y no mostró diferencias en contenido energético entre ambas fuentes. Estimaron que el valor energético de estas dos fuentes fue casi del 124 por ciento del valor del maíz en grano. Sin embargo, al alimentar al ganado en finalización con estas dos fuentes de DDGS modificados con solubles, los reducidos en aceite tuvieron alrededor del 89 por ciento del valor alimenticio de los altos en aceite, aunque los primeros mejoraron la ganancia:alimento con mayores tasas de inclusión.

Los DDGS reducen la acidosis

La alimentación de dietas con DDGS reduce la acidosis en el ganado de engorde alimentado con dietas altas en granos. Con frecuencia, la acidosis subaguda es un problema cuando el ganado en finalización se alimenta con dietas altas en granos, porque el maíz contiene una gran cantidad de almidón rápidamente fermentable. Sin embargo, el contenido de almidón de los DDGS es bajo (de 2 a 5 por ciento), mientras que el contenido de fibra, proteína y grasa son relativamente altos, lo que permite reducir el contenido de forraje en la dieta cuando contiene más del 20 por ciento de DDGS de consumo de materia seca. Además, se pueden usar de forma eficaz forrajes de baja calidad en dietas que contienen más del 20 por ciento de DDGS, debido a su alto contenido de proteína (Klopfenstein et al., 2008).

Proteína

Los DDGS de maíz son relativamente altos en contenido de proteína (de 27 a 30 por ciento) y de forma histórica se han utilizado como un suplemento proteínico en las dietas de ganado de engorde (Klopfenstein et al., 2008). La mayoría de la proteína en los DDGS de maíz es zeína, que tiene un alto valor de sobrepaso del rumen (Little et al., 1968); alrededor del 40 por ciento de la zeína se degrada en el rumen (McDonald,

1954). Aunque la proteína de sobrepaso del rumen ha mostrado ser bastante variable entre las fuentes de DDGS (Aines et al., 1987), la proteína en este coproducto tiene 1.8 veces más valor proteínico que la de la harina de soya.

Los DDGS de maíz son altos en proteína no degradable en el rumen (PNDR). El nitrógeno insoluble ácido detergente (NIAD) se puede usar para determinar el grado de daño de la proteína en los DDGS, una vez que dicho valor se determina en el laboratorio, se multiplica por un factor de 6.25 para calcular la cantidad de proteína cruda en los DDGS que no está disponible y que se puede comparar con el valor de proteína cruda real para determinar el grado del daño. La proporción de proteína de sobrepaso (PNDR) en los DDGS es de aproximadamente 60 a 70 por ciento, en comparación con el 30 por ciento de la harina de soya. Sin embargo, Erickson et al. (2005) indicaron que el alto valor de de la proteína de sobrepaso de los DDGS se debe a las características innatas de la proteína, más que al secado o al contenido de humedad, y que no parece estar influido por el NIAD, ya que la eficiencia de la proteína (kg de ganancia/kg de proteína suplementaria) parece que sigue siendo el mismo o aumenta conforme lo hace la cantidad de NIAD en los DDGS.

Se han realizado pocos estudios para determinar el contenido de PNDR de los DDGS en ganado de engorde. Castillo-López (2013) determinó que el contenido de PNDR, como porcentaje de la proteína cruda, era cerca del 63 por ciento. La alimentación de DDGS tiende a disminuir el suministro de proteína bacteriana duodenal, no presentó efecto sobre la proteína cruda de protozoarios duodenales y proporciona una pequeña cantidad de proteína cruda de levadura.

Li et al. (2012) compararon trigo, maíz, DDGS de trigo, DDGS de maíz altos en aceite (11.5 por ciento de grasa cruda) y reducidos en aceite (4.5 por ciento de grasa cruda) sobre la degradabilidad *in situ* e *in vitro* de la proteína cruda y de los aminoácidos. Calcularon que la digestibilidad verdadera de la proteína de la dieta era 98.5, 96.5, 94.3, 93.5 y 88.9 por ciento para el trigo, maíz, DDGS de trigo, DDGS alto en aceite y DDGS reducido en aceite, respectivamente. Estos investigadores concluyeron que era menor la degradación ruminal de la proteína cruda en los DDGS que en el grano original, y que era más baja en DDGS de maíz reducidos en aceite que en los altos en aceite, pero no diferente entre los de trigo y de maíz. La degradación ruminal de los aminoácidos esenciales fue mayor en el DDGS de trigo, seguido de los altos en aceite y reducidos en aceite. Aunque la calidad de la proteína y aminoácidos esenciales en la PNDR fue ligeramente menor que en los granos originales, todas las fuentes fueron excelentes fuentes de esta proteína. En un estudio subsiguiente, Li et al. (2013) mostraron que la suplementación con DDGS de trigo y DDGS de maíz reducidos en aceite (4.5 por ciento de grasa cruda) en dietas de ganado en preparación para engorde, dio mayor cantidad de proteína cruda y aminoácidos en el intestino delgado, comparado con la harina de canola y DDGS altos en aceite con dietas isonitrogenadas.

Urea

Cuando las dietas de ganado tienen altas cantidades de carbohidratos rápidamente fermentables (por ejemplo, grano de maíz) y una alta proporción de la proteína cruda proviene del maíz, puede haber un déficit del consumo de proteína degradable. Ceconi et al. (2015) realizaron dos experimentos para evaluar los efectos del aumento del consumo de proteína degradable y la adición de urea en el desempeño del crecimiento, características de la canal, fermentación ruminal, digestibilidad total del tubo digestivo e índice de derivados de purina a creatinina en el ganado de engorde. Los resultados de este estudio mostraron que debido al consumo limitado de proteína degradable en las dietas de maíz roloado en seco y maíz alto en humedad con 20 por ciento de DDGS, fue necesaria la suplementación de urea para mejorar la fermentación ruminal, digestibilidad del alimento y el desempeño del crecimiento.

Fósforo

Los DDGS de maíz tienen un bajo contenido de calcio, pero relativamente alto de fósforo (P) y azufre. Dependiendo del nivel de alimentación, la adición de granos de destilería de la dieta puede permitir una eliminación completa de otras fuentes de fósforo suplementario de la mezcla de minerales que se alimentaba. Debido a los niveles altos de DDGS, las dietas del ganado de engorde contienen fósforo en exceso en relación con el requerimiento. Esto resulta en que se excrete el exceso de fósforo en las heces, lo cual se debe considerar cuando se desarrollen planes del manejo del estiércol para prevenir una contaminación ambiental no deseada. Debido al bajo nivel de calcio de los DDGS, deben añadirse fuentes de calcio suplementario (por ejemplo, piedra caliza molida o alfalfa) a la dieta para mantener la relación de calcio a fósforo entre 1.2:1 a no más de 7:1, y evitar así reducciones en el desempeño animal y cálculos urinarios (Tjardes y Wright, 2002).

Geisert et al. (2010) alimentaron dietas con sémola cervecera para brindar contenido bajo (0.12 por ciento), medio (0.27 por ciento) y alto (0.42 por ciento) de fósforo con fosfato monosódico suplementario, maíz roloado y 30 por ciento de DDGS, para determinar la digestibilidad y excreción de este mineral. Los resultados de este estudio mostraron que la adición del 30 por ciento de DDGS en las dietas resultó en contenido y consumo relativamente alto de fósforo, que es casi 50 por ciento digestible (**cuadro 1**). Sin embargo, la cantidad de fósforo digestible en los DDGS excede el requerimiento de ganado de finalización y resulta en una importante cantidad de excreción (casi el 54 por ciento del consumo). El requerimiento de fósforo del ganado en finalización es menor al contenido de fósforo en las dietas típicas del ganado estabulado de EE. UU. (de 0.30 a 0.50 por ciento) y a los estimados del NRC (2001). Por lo tanto, no es necesaria la adición de fósforo suplementario a las dietas típicas a base de maíz o de DDGS, ya que el requerimiento de fósforo para un máximo desempeño del crecimiento es menor a 0.17 por ciento de la materia seca de la dieta. La eliminación del fósforo en exceso proporcionado por los suplementos de minerales en las dietas de ganado de engorde, se reduce la cantidad de excreción en el estiércol para minimizar el riesgo de consecuencias ambientales negativas.

Cuadro 1. Consumo, digestibilidad aparente y excreción de fósforo en novillos de engorde alimentados con diferentes cantidades y fuentes de fósforo (adaptado de Geisert et al. 2010)

	P bajo	P medio	P alto	Maíz rolado en seco	DDGS
Fósforo en la dieta %	0.12	0.27	0.42	0.30	0.36
Consumo de materia seca, kg/día	8.86	10.54	9.76	9.57	9.48
Digestibilidad de materia seca %	71.9	69.6	72.5	75.7	68.5
Consumo de P, g/día	11.0 ^a	28.0 ^b	41.3 ^d	28.9 ^b	34.0 ^c
Digestibilidad aparente del fósforo %	11.3 ^a	48.9 ^b	39.0 ^b	58.6 ^b	51.5 ^b
Excreción de fósforo fecal, g/día	9.3 ^a	14.2 ^a	26.0 ^b	12.1 ^a	15.9 ^a
Excreción de fósforo en la orina, g/día	0.4 ^a	2.2 ^b	1.9 ^b	2.0 ^b	2.3 ^b
Excreción total de fósforo, g/día	9.7 ^a	16.3 ^{ab}	27.9 ^c	14.0 ^{ab}	18.2 ^b
% excretado en orina como porcentaje de fósforo total excretado	3.5	14.2	9.9	14.3	12.4

^{a,b,c,d}Las medias en las filas con diferentes superíndices son diferentes (P menor que 0.10).

Las altas tasas de inclusión de DDGS en la dieta aumentan la excreción de nitrógeno y fósforo en el estiércol

Cuando se usan DDGS como fuente de energía y se añaden a la dieta a niveles mayores del 15 al 20 por ciento, se alimentan proteína y fósforo en exceso. La proteína en exceso se utiliza para la energía que se da a través de la desaminación de los aminoácidos, la cual resulta en excreción de urea. Vander Pol et al. (2005) mostraron que cuando se alimenta el ganado en finalización con dietas que contienen 10 o 20 por ciento de DDGS de materia seca de la dieta, no hay beneficio de suplementar con urea, lo indica que hubo reciclaje de nitrógeno. Sin embargo, Erickson et al. (2005) indicaron que al formular dietas que con menos del 20 por ciento de DDGS, se deben seguir los lineamientos del NRC (2001) de la suplementación de proteína ingerida degradable. La alimentación de fósforo en exceso que brindan los DDGS en las dietas de ganado de engorde, no parecen tener ningún efecto negativo en el desempeño o las características de la canal, si se suplementa el calcio adecuado para mantener una relación aceptable de calcio a fósforo.

Azufre

Los niveles altos de azufre en los DDGS pueden ser de preocupación para el ganado de engorde (Lonergan et al. 2001). Para ello, el **capítulo 14** brinda un resumen más detallado de cómo manejar el consumo de azufre en los rumiantes. Las plantas de etanol utilizan ácido sulfúrico para ajustar el pH durante la producción de etanol y de los DDGS. Como resultado, el contenido de azufre puede ser altamente variable y estar entre 0.6 y 1 por ciento. Los microorganismos en el rumen requieren de una cantidad adecuada de azufre de la dieta, pero demasiado de este elemento puede causar polioencefalomalacia, reducir el consumo de materia seca, la GDP y los niveles hepáticos de cobre. Félix et al. (2102A) indicaron que al incluir más del 30 por ciento de DDGS en la dieta de rumiantes, es posible que se reduzca el consumo de materia seca, el pH del rumen y la digestibilidad de la fibra del ganado de engorde (si comprende la mayoría de la materia seca de la dieta). Un aumento en el pH del rumen a 6.35,

puede incrementar el consumo de materia seca y mejorar la digestibilidad ruminal de los nutrientes (Leventini et al., 1990). Por lo tanto, la adición de suplementos alcalinos a dietas con alto contenido de DDGS puede ser eficaz para aumentar el pH y mejorar la digestibilidad de los nutrientes. Se han llevado a cabo varios estudios que evalúan los efectos de la tiamina, cobre, NaOH y CaO en dietas de DDGS con alto azufre.

Neville et al. (2012) evaluaron los efectos de alimentar dietas con 20, 40 o 60 por ciento de DDGS y el método de procesamiento de maíz (maíz de humedad alta contra maíz rolado en seco) sobre el desempeño del crecimiento, incidencia de polioencefalomalacia y concentraciones del gas sulfuro de hidrógeno en terneros estabulados. Las dietas contenían de 0.6 a 0.9 por ciento de azufre y estuvieron suplementadas con tiamina para proporcionar 150 mg/animal/día. El peso corporal final ajustado a la canal disminuyó linealmente con las concentraciones crecientes de DDGS en la dieta, pero no se vio afectada la ganancia:alimento ajustada a la canal. Se redujeron el peso de la canal en caliente y la grasa dorsal cuando se alimentaron niveles crecientes de DDGS, lo que resultó en una disminución del grado del rendimiento. El gas sulfuro de hidrógeno aumentó con el incremento de la concentración de los DDGS en la dieta, pero no se confirmaron casos de polioencefalomalacia. El método de procesamiento del maíz no afectó el desempeño del crecimiento, la incidencia de polioencefalomalacia o las concentraciones del gas sulfuro de hidrógeno en el rumen. Estos resultados, así como aquellos notificados por Neville et al. (2010) y Schauer et al. (2008) han demostrado de manera consistente que se puede alimentar el azufre de los DDGS más allá del nivel máximo tolerable tanto en ovejas como en terneros alimentados con dietas altas en concentrado. Es posible que se necesite volver a evaluar el nivel máximo tolerable de azufre del NRC (2005).

La suplementación de cobre en las dietas a base de DDGS puede ser eficaz para reducir la producción de sulfuro de hidrógeno ruminal y prevenir la toxicidad del azufre si se alimentan grandes cantidades de DDGS con alto contenido de azufre. El cobre y el azufre se pueden precipitar en el rumen y formar sulfuros de cobre, lo cual reduce la disponibilidad

de ambos elementos en el animal (McDowell, 2003). Se ha notificado que el nivel máximo tolerable de cobre en las dietas para ganado de engorde es de 100 mg/kg de materia seca de la dieta (McDowell, 2003). Por lo tanto, Félix et al. (2012a) evaluaron los efectos de suplementar dietas de 60 por ciento de DDGS con 0, 100 o 200 mg de Cu/kg de materia seca de la dieta sobre el desempeño del crecimiento, características de la canal y metabolismo de azufre ruminal en terneras y terneros. Los resultados mostraron que aunque la suplementación de cobre mejoró la eficiencia alimenticia del ganado que consumió las dietas de 60 por ciento de DDGS y no tuvo ningún efecto en la GDP o en las características de la canal, fueron mínimos sus efectos en el metabolismo de azufre del rumen, incluso al suplementar el doble del límite máximo recomendado para ganado de engorde.

Ya que la reducción del pH del rumen interfiere con la fermentación de la fibra y los DDGS tienen relativamente un contenido alto de fibra y un pH bajo, varios estudios de investigación han determinado los efectos del uso de tratamientos o suplementos alcalinos para incrementar el pH del rumen y la digestibilidad de la fibra. Félix et al. (2012b) demostraron que el ganado alimentado con dietas de 25 a 60 por ciento de DDGS tratados con 2 por ciento de NaOH antes de la alimentación, aumentó la desaparición *in situ* de FND en comparación con el alimentado con DDGS y sin tratamiento de NaOH. El tratamiento de DDGS con 2 por ciento de NaOH puede aumentar el pH del rumen y disminuir la concentración de sulfuro de hidrógeno para reducir el riesgo de polioencefalomalacia, además de que la adición de NaOH fue eficaz en neutralizar la acidez del ácido sulfúrico de los DDGS. Sin embargo, el exceso de Na en las dietas de rumiantes puede disminuir el consumo del alimento (Croom et al., 1982), además de que no se ha determinado la inclusión óptima de tratamientos alcalinos para reducir los efectos ácidos de las dietas a base de DDGS para mejorar el desempeño del crecimiento. Es por eso que Freitas et al. (2016) hicieron un estudio para determinar la tasas de inclusión óptimas de NaOH en dietas con 50 por ciento de DDGS para mejorar el desempeño del crecimiento, características de la canal y los patrones de consumo de alimento en terneros de engorde. Sin embargo, debido al bajo pH (5.5) de la fuente de DDGS de este estudio, no hubo ningún efecto en el desempeño del crecimiento o características de la canal por la adición de hasta 1.5 por ciento de NaOH.

Se puede lograr aumentos del valor alimenticio y del desempeño del crecimiento mediante dietas con más de 30 por ciento de DDGS al añadir óxido de calcio, ya que los DDGS tratados con agentes alcalinos antes de la alimentación, mejoran la digestibilidad de los nutrientes (Félix et al., 2012b). Schroeder et al. (2014) realizaron un estudio para determinar los efectos de alimentar dietas con 50 por ciento de DDGS con o sin suplementación de óxido de calcio en el desempeño del crecimiento, características de la canal, digestibilidad de la dieta, patrón de consumo del alimento y distribución del alimento. Los resultados de este estudio mostraron que los terneros alimentados con DDGS tratados con óxido de calcio disminuyeron su consumo de materia seca, pero no

tuvo efecto sobre la GDP, lo cual resultó en una mejora de la ganancia:alimento comparado con los que no recibieron óxido de calcio. Los terneros alimentados con DDGS tratados con óxido de calcio tuvieron un número similar de periodos de alimentación, pero la cantidad consumida en cada uno de ellos fue menor a la de los alimentados sin el tratamiento. Aunque el tratamiento de DDGS con CaO mejora la eficiencia alimenticia, no afecta la digestibilidad de la materia seca o FND. En contraste, Nuñez et al. (2014) evaluaron la adición de óxido de calcio a dietas con 60 por ciento de DDGS en terneros de engorde sobre la fermentación ruminal, digestibilidad de la dieta, desempeño del crecimiento y características de la canal. Sus resultados mostraron que la adición de hasta 1.6 por ciento de CaO fue eficaz para mejorar el desempeño del crecimiento, digestibilidad de la fibra, producción de ácidos grasos volátiles, uso de aminoácidos, equilibrio metabólico ácido-base y porcentaje de rendimiento de la canal, minimizando al mismo tiempo la variación de pH del rumen del ganado de engorde con dietas con 60 por ciento de DDGS.

Si se consume más del 0.4 por ciento de azufre del alimento (base materia seca) y el agua, puede darse polioencefalomalacia en el ganado. Además, el azufre interfiere con la absorción y metabolismo del cobre, lo cual se reduce más en presencia del molibdeno. Por lo tanto, en zonas geográficas en las que se encuentran niveles altos de azufre en los forrajes y en el agua, será necesario reducir el nivel de DDGS que se añade (Tjardes y Wright, 2002). Drownoski et al. (2014) señalaron que es posible minimizar el riesgo de toxicidad por azufre por alimentar con altas tasas de inclusión de DDGS con alto contenido de azufre al ganado, si en las dietas con más del 0.4 por ciento de azufre total, al menos se les brinda de 7 a 8 por ciento de FND de una fuente de forraje. El **cuadro 2** sirve como guía para determinar las tasas de inclusión máxima de la dieta de DDGS con contenido variable de azufre para ganado de engorde en finalización para evitar el riesgo de toxicidad y la aparición de polioencefalomalacia.

Alimentación de los DDGS a ganado en finalización

Quizás la alimentación de DDGS húmedos y DDGS a ganado de engorde sea lo más investigado entre todas las especies animales. Como uno de tantos ejemplos, Buckner et al. (2007) realizaron un estudio para evaluar los efectos de alimentar niveles crecientes de DDGS a terneros en finalización sobre el desempeño del crecimiento y las características de la canal (**cuadro 3**). Los resultados de este estudio no mostraron efectos de los niveles crecientes de DDGS en el consumo de materia seca, la profundidad de la grasa de la 12ª costilla, la superficie del músculo del lomo y la calificación del marmoleo, pero hubo un efecto cuadrático en la GDP y el peso de la canal en caliente, así como una tendencia cuadrática de la eficiencia de la ganancia. Además, en todas las tasas de inclusión de la dieta, el valor alimenticio de los DDGS es mayor que el del maíz, pero disminuye con el aumento en las tasas de inclusión (**cuadro 3**). Klopfenstein et al. (2008) utilizaron los datos de Buckner et al. (2007), junto con los resultados de

Cuadro 2. Rango de contenido de azufre¹ en las raciones de finalización a base de maíz para ganado de engorde, suponiendo una variación del 10 por ciento entre cargas de DDGS (adaptado de Drewnoski et al., 2014)

Azufre en los DDGS %	Tasa de inclusión de DDGS %				
	20	30	40	50	60
	S de la dieta %				
0.3	0.16 - 0.17	0.18 - 0.18	0.20 - 0.21	0.22 - 0.23	0.23 - 0.25
0.4	0.18 - 0.19	0.21 - 0.22	0.24 - 0.25	0.27 - 0.29	0.29 - 0.32
0.5	0.20 - 0.21	0.24 - 0.27	0.28 - 0.30	0.32 - 0.34	0.35 - 0.38
0.6	0.22 - 0.24	0.26 - 0.30	0.32 - 0.34	0.37 - 0.40	0.41 - 0.45
0.7	0.24 - 0.26	0.28 - 0.33	0.36 - 0.39	0.42 - 0.45	0.47 - 0.51
0.8	0.26 - 0.28	0.33 - 0.35	0.40 - 0.43	0.52 - 0.56	0.53 - 0.58
0.9	0.28 - 0.30	0.36 - 0.38	0.44 - 0.47	0.52 - 0.56	0.59 - 0.65
1.0	0.30 - 0.32	0.39 - 0.41	0.48 - 0.52	0.57 - 0.62	0.65 - 0.71

¹Supone que no se obtiene azufre del agua de bebida y que otros ingredientes de la dieta contienen 0.13 por ciento de azufre.

Cuadro 3. Desempeño del crecimiento y características de la canal de terneros en finalización alimentados con niveles crecientes de DDGS en la dieta (adaptado de Buckner et al. 2007)

Crterios de respuesta	0% de DDGS	10% de DDGS	20% de DDGS	30% de DDGS	40% de DDGS
Consumo de materia seca, kg/día	9.25	9.47	9.52	9.71	9.47
GDP, kg	1.50	1.61	1.68	1.62	1.59
Ganancia:Alimento	0.162	0.171	0.177	0.168	0.168
Valor alimenticio ¹	100	156	146	112	109
Peso de canal en caliente, kg	351	362	370	364	359
Grasa de la 12 ^a costilla, cm	1.42	1.37	1.50	1.40	1.47
Superficie del músculo del lomo, cm ²	80	80.6	82.6	81.3	81.3
Calificación del marmoleo ²	533	537	559	527	525

¹ Valor relativo al maíz calculado por la diferencia de ganancia: alimento dividido por la tasa de inclusión en la dieta de DDGS.

²Grado de marmoleo de 400 = escaso, 500 = pequeño

otros cuatro experimentos en su metanálisis. Los resultados también mostraron una respuesta cuadrática a la GDP cuando se alimentaron niveles crecientes de DDGS, pero observaron una respuesta cúbica en la ganancia:alimento. Los resultados del metanálisis mostraron que se logra la GDP máxima cuando se incluyen de 20 a 30 por ciento de DDGS en la dieta, y se logra la máxima ganancia:alimento si se alimenta al ganado en finalización con dietas de 10 a 20 por ciento de DDGS.

Otro ejemplo reciente de los beneficios positivos de alimentar al ganado de engorde en finalización con tasas altas de inclusión en la dieta (hasta el 40 por ciento) de DDGS, fue realizado por Swanson et al. (2014). En este estudio, los investigadores alimentaron a terneros de un año con dietas con 20 a 40 por ciento de DDGS con maíz molido grueso o fino para determinar los efectos en el desempeño sobre el crecimiento y las características de la canal. La tasa de inclusión de DDGS o el tamaño de partículas no afectaron el peso corporal final ni la GDP, pero el aumento de estas tasas sí disminuyó el consumo

de materia seca y aumentó la ganancia:alimento (**cuadro 4**). La tasa de inclusión de DDGS o el tamaño de partículas del maíz rolado en seco no afectó las características de la canal. Estos resultados muestran que se puede alimentar al ganado en finalización hasta un 40 por ciento de DDGS para mejorar la GDP y ganancia:alimento sin que se afecte la calidad de la canal.

A partir del metanálisis que hicieron Klopfenstein et al. (2008) se han realizado varios estudios (n = 28), cuyo resumen se encuentra en el **cuadro 5**. Desafortunadamente, en la mayoría de estos estudios no se notificó el contenido de grasa cruda de las fuentes de DDGS, pero se indica en el resumen si la información está a disposición. Los estudios con ganado de engorde en finalización hechos por Freitas et al. (2017), Engle et al. (2016), Rodenhuis et al. (2016), Nuñez et al. (2015), Gigax et al. (2011) y Leupp et al. (2009) hablan que usaron los DDGS húmedos reducidos en aceite o DDGS. En el estudio de Gigax et al. (2011), se alimentó a terneros en finalización con dietas

Cuadro 4. Efectos en el desempeño del crecimiento y la características de la canal de ganado en finalización alimentado con maíz rolado en seco fino y grueso y dietas con 20 o 40 por ciento de DDGS (adaptado de Swanson et al., 2014)

Medición	Procesamiento de maíz rolado en seco			
	Grueso (2.68 mm)		Fino (1.46 mm)	
	20% de DDGS	40% de DDGS	20% de DDGS	40% de DDGS
Peso corporal inicial, kg	345	345	343	345
Peso corporal final, kg	606	607	600	603
GDP, kg/día	2.06	2.05	2.01	2.03
Consumo de materia seca, kg/día ¹	12.1	11	11.6	11
Consumo de materia seca en % del peso corporal/día ¹	2.55	2.31	2.47	2.31
Ganancia:Alimento ¹	0.169	0.185	0.169	0.178
Peso de la canal en caliente, kg	361	369	360	360
Grosor de la grasa 12 ^a costilla, cm	1.06	1.37	1.27	1.28
Superficie del músculo del lomo, cm ²	82.2	82	81.3	83.3
Calificación del marmoleo ²	543	538	533	530

¹Efecto de la tasa inclusión de DDGS (P menor que 0.001)

²Calificación del marmoleado = 500 modesto y 600 moderado

de maíz rolado en seco y de humedad alta con 35 por ciento de materia seca de DDGS húmedos con solubles (WDGS), con 6.7 por ciento de grasa cruda (lo reducidos en aceite) o 12.9 por ciento (los altos en aceite). El ganado alimentado con WDGS altos en aceite aumentó la GDP, el peso corporal final y el peso de la canal en caliente en comparación con los terneros alimentados con las dietas de maíz o WDGS reducidos en aceite, pero estos últimos tuvieron un consumo de materia seca, GDP y ganancia:alimento similares al alimentado con la dieta control. Estos resultados indican que la alimentación de terneros en finalización con 35 por ciento de WDGS reducidos en aceite proporciona un desempeño del crecimiento y composición de la canal por lo menos igual que las dietas de maíz rolado en seco y de alta humedad.

Es interesante hacer notar que muchos de estos estudios recientes evaluaron tasas de inclusión muy altas (de 50 a 70 por ciento) de DDGS en la dieta, pero dependiendo de la formulación y las condiciones de alimentación, unos cuantos notificaron buen desempeño del crecimiento y características de la canal. Además, varios estudios usaron de rutina dietas control con 20 a 25 por ciento de DDGS, lo que indica que hay un alto grado de confianza entre los nutricionistas de que al alimentar al ganado de engorde con dietas de hasta 25 por ciento de DDGS se logra siempre un desempeño del crecimiento y características de la canal aceptables. Por lo tanto, no hay razones para que otros países no usen dietas con tasas de inclusión de DDGS similares o relativamente altas.

Cuadro 5. Resumen de 28 estudios publicados desde 2009 que evalúan las respuestas del desempeño del crecimiento y características de la canal¹ del ganado de engorde en finalización alimentado con distintos tipos de dietas de DDGS.

Fase de crecimiento, PC inicial	Inclusión DDGS; contenido de grasa cruda	Condiciones de alimentación	Respuestas del crecimiento	Respuestas de la canal	Referencia
Ganado en finalización					
Terneros, 211 a 261 kg	50 por ciento; 8.8 por ciento de grasa cruda	Las dietas contenían 20% de ensilado de maíz, 20% de maíz rolado en seco y 50% de DDGS con 0, 0.5, 1.0 o 1.5% de NaOH	La suplementación de NaOH no tuvo efecto en el peso corporal final, GDP y ganancia:alimento	El nivel de NaOH no tuvo efecto en el peso de la canal en caliente, superficie del LM, rendimiento de la canal, grosor de la grasa dorsal o marmoleo	Frietas et al., 2017
Terneros, 310 kg	26 por ciento engorde y finalización; 5.8 o 9.6 por ciento de grasa cruda	Las dietas de engorde contenían 19% de heno de pasto, 22% de ensilado de maíz, 30% de maíz o cebada, 3% de suplemento; las dietas de finalización contenían 20% de ensilado de maíz, 51% de maíz o cebada, 3% de suplemento	No hubo diferencias en GDP, CMS y ganancia:alimento	No hubo diferencias en el porcentaje de rendimiento de la canal, peso de la canal en caliente, grado de rendimiento, superficie de LM, grado de marmoleo y grasa dorsal	Engle et al., 2016

Cuadro 5. Resumen de 28 estudios publicados desde 2009 que evalúan las respuestas del desempeño del crecimiento y características de la canal¹ del ganado de engorde en finalización alimentado con distintos tipos de dietas de DDGS.

Fase de crecimiento, PC inicial	Inclusión DDGS; contenido de grasa cruda	Condiciones de alimentación	Respuestas del crecimiento	Respuestas de la canal	Referencia
Terneros, 436 kg	20, 40 o 60 por ciento de DDGS; 10 por ciento de grasa cruda	Las dietas contenían cantidades crecientes de DDGS para sustituir el maíz rolado en seco y 300 mg Fe férrico /kg de citrato de amonio férrico (CAF) y con 0.28, 0.41, 0.56% de azufre.	El peso corporal final disminuyó linealmente con el aumento de DDGS, pero con 60% DDGS tendió a ser mayor con CAF que sin él; hubo un efecto cuadrático sobre el CMS y éste disminuyó al alimentar con 60% de DDGS.	El aumento de DDGS en la dieta disminuyó el peso de la canal en caliente y la superficie del LM, pero al alimentar 20 y 40% de DDGS con CAF mejoró la calificación del marmoleo comparado con la misma inclusión de DDGS sin CAF	Pogge et al., 2016
Terneros, 428 kg	No se notificó; grasa cruda de 4 a 5 por ciento (bajo) o de 7 a 9 por ciento (medio)	Dietas de maíz o cebada con DDGS bajo o medio	El contenido de aceite de los DDGS no tuvo efecto en el peso corporal final ni GDP, y la ganancia:alimento fue mayor en las dietas a base de cebada	El contenido de aceite de los DDGS o tipo de grano no tuvieron efecto en las características de la canal	Rodenhuis et al., 2016
Año 1 – terneros, 396 kg Año 2 – terneros, 436 kg	25 por ciento; no se notificó el contenido de grasa cruda	Estudio de dos años usando dietas de ganado de recría con 75% de ensilado de maíz y 25% de harina de gluten de maíz, o 25% de DDGS, o 10% de harina de soya y 15% de maíz molido, colocadas en pastura de festuca alta durante 30 días y alimentados igual que el período de ganado de recría durante el período de finalización de 100 días.	Los terneros alimentados con DDGS tuvieron mayor GDP y ganancia:alimento que los alimentados con maíz-harina de soya	No hubo diferencias en las características de la canal debido a la dieta, excepto que los terneros alimentados con harina de gluten de maíz tuvieron mayor superficie de LM y calificación del marmoleo; según panel sensorial los <i>steaks</i> de los terneros alimentados con DDGS fueron más tiernos	Stelzleni et al., 2016
Terneros, 428 kg	20 por ciento; no se notificó el contenido de grasa cruda	0, 0.4, o 0.6% de urea añadida a dietas de 12% de maíz alto en humedad, 20% de DDGS, 10% de heno ensilado de raigrás y maíz rolado en seco	La dieta con 0.6% de urea aumentó la GDP ajustada a la canal y la ganancia:alimento, pero el peso corporal final y CMS fueron similares entre tratamientos	Las características de la canal fueron similares entre los tratamientos de la dieta	Ceconi et al., 2015
Terneros y terneras, 351 kg	0 o 60 por ciento de DDGS; 6.9 por ciento de grasa cruda	Dieta a base de maíz durante 126 días y dieta con 60% de DDGS durante 70 días, seguida de una dieta a base de maíz hasta el día 126	La alimentación a base de maíz durante los primeros 70 días aumentó la GDP, CMS y ganancia:alimento, pero del día 71 al 126 los DDGS aumentaron la GDP, CMS y ganancia:alimento, lo que resultó en que en el período de alimentación general no hubieran diferencias de GDP y ganancia:alimento	-	Nuñez et al., 2015
Terneros, 450 kg	0, 20, 30 por ciento; no se notificó el contenido de grasa cruda	Dietas de granos de cebada y ensilado de cebada con cantidades crecientes de DDGS como sustituto de la cebada	La alimentación con 20 por ciento de DDGS no tuvo efecto en el desempeño del crecimiento, pero con 30 por ciento disminuyó la ganancia:alimento	La alimentación con 20 por ciento de DDGS no tuvo efectos en las características de la canal y el 30 por ciento aumentó los ácidos grasos deseables en la carne	He et al., 2014

Cuadro 5. Resumen de 28 estudios publicados desde 2009 que evalúan las respuestas del desempeño del crecimiento y características de la canal¹ del ganado de engorde en finalización alimentado con distintos tipos de dietas de DDGS.

Fase de crecimiento, PC inicial	Inclusión DDGS; contenido de grasa cruda	Condiciones de alimentación	Respuestas del crecimiento	Respuestas de la canal	Referencia
Terneros, 287 kg	0, 0.5 o 1% del peso corporal a diario de DDGS; 11.1% de grasa cruda	Período de alimentación de 84 días en el que se alimentó ad libitum a los terneros con pasto de mediana calidad/heno de leguminosas y cantidades crecientes de DDGS suplementarios	Respuesta cuadrática a la GDP y ganancia:alimento en la que el aumento de ganancia:alimento fue menor con la alimentación de 1% de DDGS	El aumento de DDGS hizo que aumentara la superficie del LM, el grosor de la grasa dorsal y de la grupa	Islas et al., 2014
Terneros, 359 kg	32% de DDGS y 7% de solubles condensados de destilería; no se notificó el contenido de grasa cruda	Durante un período de alimentación de 84 días se dieron 6 dietas de 3.5 a 11.4% de FND de heno de bromo con 0.46% de azufre en la dieta de DDGS y solubles condensados de destilería	El nivel del FND no tuvo efecto en el peso corporal final, GDP y ganancia:alimento, pero el CMS aumentó linealmente.	-	Morine et al., 2014
Terneros, 355 kg	60%; no se notificó el contenido de grasa cruda	60% de DDGS, 20% de ensilado de maíz, de 13 a 14% de maíz molido, 4% de suplemento y de 0 a 2.5% de CaO	El incremento de CaO aumentó linealmente la GDP y ganancia:alimento, pero disminuyó linealmente el CMS	Hasta 1.6% de CaO aumentó linealmente el rendimiento de la canal, pero no afectó otras características de la canal	Núñez et al., 2014
Terneros, 368 kg	0, 16.7, 33.3, 50% de DDGS húmedos (WDGS) o DDGS (base materia seca); no se notificó contenido de grasa cruda	Las dietas contenían 10% de alfalfa picada/ensilaje de pasto y niveles crecientes de WDGS o DDGS para sustituir los granos enteros de maíz	Los WDGS, DDGS o las tasas de inclusión no tuvieron efecto en el peso corporal final y GDP; el incremento del nivel de DDGS disminuyó linealmente la calificación de abscesos hepáticos	No hubo efecto de la dieta sobre el rendimiento de la canal, el peso de la canal en caliente, calificación del marmoleado, rendimiento o color magro	Salim et al., 2014
Terneros, 336 kg	50% de DDGS o DDGS húmedos modificados con solubles (MWDGS); no se notificó el contenido de grasa cruda	Los DDGS o MWDGS sustituyeron al heno de alfalfa y hojas de mazorca de maíz con o sin 1.2% de CaO	La alimentación con DDGS tratados con CaO disminuyó el consumo de materia seca, no tuvo efecto en la GDP y mejoró la ganancia:alimento en comparación con los no alimentados con CaO	-	Schroeder et al., 2014
Terneros, 345 kg	20 o 40%; no se notificó el contenido de grasa cruda	Las dietas contenían maíz rolado grueso o fino y 20 o 40% de DDGS	El procesamiento del maíz o los DDGS no tuvieron efecto en el peso corporal final ni en la GDP, pero el incremento del nivel de los DDGS disminuyó la CMS y aumentó la ganancia:alimento	El aumento en la tasa de inclusión de DDGS no tuvo efecto en las características o calidad de la canal	Swanson et al., 2014
Terneros, 268 kg	1% de peso corporal; no se notificó el contenido de grasa cruda	Pastoreo de invierno de pastizales de gramíneas altas latentes durante 121 días con suplementos de 1 kg/día de harina de semilla de algodón (harinolina), 1% del peso corporal de maíz-harina de soja o cascarillas y harina de soja, o DDGS.	Los terneros suplementados con maíz- harina soja tuvieron mayor GDP que los alimentados con cascarilla y harina de soja o DDGS	La suplementación de energía aumentó la grasa mesentérica y el grado de rendimiento, pero no tuvo efecto en la grasa de la 12 ^a costilla o grado de marmoleo	Sharman et al., 2013
Terneros, 335 kg	0, 25, 40, 70% de materia seca o DDGS húmedos modificados con solubles (MWDGS); 10.4% de grasa cruda	Las dietas contenían 15 por ciento de ensilado de maíz y cantidades crecientes de MWDGS para sustituir al maíz desgranado y la harina de soja	No hubo diferencias por la tasa de inclusión de MWDGS sobre la GDP o el peso corporal final; la alimentación con 0 a 70 por ciento de MWDGS resultó en un menor CMS, pero con 70 por ciento de MWDGS la ganancia:alimento fue la mayor	Los terneros alimentados con 70 por ciento de MWDGS tuvieron una superficie del ojo de la costilla más pequeña y los grados de la calidad disminuyeron con el aumento de MWDGS	Veracini et al., 2013

Cuadro 5. Resumen de 28 estudios publicados desde 2009 que evalúan las respuestas del desempeño del crecimiento y características de la canal¹ del ganado de engorde en finalización alimentado con distintos tipos de dietas de DDGS.

Fase de crecimiento, PC inicial	Inclusión DDGS; contenido de grasa cruda	Condiciones de alimentación	Respuestas del crecimiento	Respuestas de la canal	Referencia
Terneros de pastoreo de trigo de invierno, 363 a 403 kg	35 por ciento; 12.2 por ciento de grasa cruda	Estudio de dos años con dos grupos de terneros alimentados con dietas de DDGS en sustitución de maíz hojuelizado al vapor, urea y harina de semilla de algodón (harinolina)	No hubo diferencias de ganancia de peso corporal, pero la alimentación con maíz rolado en seco mejoró la ganancia:alimento, comparado con las dietas control y de DDGS	No hubo diferencia de superficie del LM, grado de rendimiento, grado del marmoleo, pero la alimentación con maíz hojuelizado al vapor aumentó el porcentaje de rendimiento, el grosor de la grasa de la 12 ^a costilla y la grasa de la canal vacía	Buttrey et al., 2012
Terneros, 297 kg	22.5 por ciento de DDGS de trigo o maíz; no se notificó el contenido de grasa cruda	Cebada rolada en seco (71%), 5% de ensilado de cebada y 2% de suplemento con DDGS de trigo o maíz	Los DDGS de maíz aumentaron la GDP y la ganancia:alimento comparado con los DDGS de trigo; la GDP y CMS fue mayor en la dieta de DDGS de maíz que en la control.	Los DDGS de maíz tuvieron menos canales con grado de rendimiento 1 y más con grado 2 y 3, comparados con los terneros alimentados con la dieta control	Hallewell et al., 2012
Terneros, 336 kg	20, 40 o 60 por ciento; no se notificó el contenido de grasa cruda	Las dietas contenían 20, 40 o 60% de DDGS con maíz rolado en seco o maíz alto en humedad en dietas con 5% de heno de alfalfa y 10% de ensilado de maíz	No sucedieron casos de PEM, disminuyeron cuadráticamente el peso corporal final ajustado a la canal y la GDP, pero la alimentación con dietas con niveles crecientes de DDGS no afectó la ganancia:alimento; el método de procesamiento del maíz no afectó el desempeño del crecimiento	El aumento del nivel de DDGS en la dieta disminuyó el peso de la canal en caliente, profundidad de la grasa y grado de rendimiento	Neville et al., 2012
Terneros, 252 kg	65 por ciento; no se notificó el contenido de grasa cruda	Las dietas contenían 65% de DDGS o maíz alimentadas de forma limitada para una ganancia prevista de 0.9 o 1.4 kg de peso corporal/día durante las fases de crecimiento y finalización	En general, la GDP, CMS y ganancia:alimento fueron mayores al alimentar con maíz durante el crecimiento, pero no durante la finalización comparado con los DDGS	Durante la fase de crecimiento, la alimentación de DDGS para conseguir mayor GDP, hizo aumentar el marmoleo, pero la alimentación con maíz para aumentar la GDP hizo disminuir el marmoleo	Felix et al., 2011
Terneros, 403 kg	De 0 a 35 por ciento de DDGS húmedos con solubles (WDGS); 6.7 o 12.9 por ciento de grasa cruda	La dieta control contenía 85% de maíz rolado en seco y de alta humedad con 10% de ensilado de sorgo y para sustituir el maíz y la urea se añadió 35% de WDGS reducidos en aceite o altos en aceite	La alimentación con WDGS altos en aceite aumentó la GDP y el peso corporal final, en comparación con las dietas de WGDS reducidos en aceite o maíz; no hubo diferencia de CMS, GDP y ganancia:alimento en el ganado alimentado con dietas WDGS reducidos en aceite y maíz	La alimentación con WDGS altos en aceite aumentó el peso de la canal en caliente, comparado con las dietas de maíz o WDGS reducidos en aceite, pero no tuvo efecto en otras características de la canal	Gigax et al., 2011
Terneros, 306 kg	24.5 por ciento; no se notificó el contenido de grasa cruda	La dieta de ganado de recría contenía 75% de ensilado de maíz con 25% de DDGS, harina de gluten de maíz o harina de soya, alimentada durante 84 días y con los mismos suplementos de proteína durante 100 días de finalización	-	El suplemento no tuvo efectos en el rendimiento y calidad de la canal, pero los <i>steaks</i> de los terneros alimentados con DDGS o harina de gluten de maíz fueron más tiernos que los de los alimentados con harina de soya	Segers et al., 2011
Terneros de un año, 406 kg	30%; 12% de grasa cruda	Dietas de maíz hojuelizado al vapor o rolado en seco con 30% de DDGS con azufre moderado (0.42% de S) o azufre alto (0.65% de S logrado con la adición de H ₂ SO ₄)	Las dietas con alto azufre disminuyeron el consumo de materia seca y GDP, pero no tuvieron efecto en la ganancia:alimento	Las dietas con alto azufre disminuyeron el peso de la canal en caliente y el grado de rendimiento, pero no afectaron el porcentaje de rendimiento, abscesos hepáticos, grosor de grasa de la 12 ^a costilla, superficie del LM o grados de calidad	Uwituze et al., 2011

Cuadro 5. Resumen de 28 estudios publicados desde 2009 que evalúan las respuestas del desempeño del crecimiento y características de la canal¹ del ganado de engorde en finalización alimentado con distintos tipos de dietas de DDGS.

Fase de crecimiento, PC inicial	Inclusión DDGS; contenido de grasa cruda	Condiciones de alimentación	Respuestas del crecimiento	Respuestas de la canal	Referencia
Terneros, 349 kg	20 o 40% de DDGS, o 20 o 40% de DDGS húmedos con solubles (WDGS); no se notificó el contenido de grasa cruda	Los DDGS o WDGS sustituyeron toda la harina de soja y parte del maíz quebrado	-	La alimentación con WDGS y DDGS aumentó el grosor de la grasa de la canal, grado de rendimiento y resultó en un porcentaje más bajo de grados de rendimiento 1 y 2, y de contenido de α -tocoferol en la carne molida o picada de res que en los terneros alimentados con la dieta control; la alimentación con WDGS y DDGS no tuvo efecto en el ácido linoleico conjugado de la carne, pero aumentó el contenido de PUFA, lo que la hizo más susceptible a la peroxidación	Koger et al., 2010
Terneras, 353 kg	0 o 25%: 10.1% de grasa cruda	Las dietas contenían maíz hojuelizado al vapor y 11% de ensilado de maíz con o sin 25% de DDGS o maíz hojuelizado al vapor y 6% de heno de alfalfa con o sin 25% de DDGS	La alimentación de DDGS no tuvo efectos sobre la GDP, CMS o ganancia:alimento; cuando no se incluyeron DDGS en la dieta los abscesos hepáticos fueron mayores	Entre las dietas no hubo diferencias en el peso de la canal caliente, rendimiento de la canal, grosor de la grasa, calidad o grado de rendimiento	Uwituze et al., 2010
Terneros, 257 kg	0, 10.5 o 17.5% en la dieta de crecimiento; 0, 11.4 o 18.3% en la dieta de finalización; no se notificó el contenido de grasa cruda	Las dietas contenían cantidades crecientes de DDGS para sustituir cebada rolada en seco durante un período de crecimiento de 84 días y un período de finalización de 112 días	En el período de crecimiento no hubo diferencia entre el peso corporal inicial y final, pero la alimentación de dietas con DDGS disminuyó el CMS y aumentó la GDP y ganancia:alimento; en el período de finalización los DDGS disminuyeron el CMS, pero tendieron a aumentar la ganancia:alimento, sin diferencias en la tasa de inclusión de DDGS	La alimentación de DDGS aumentó el grado del marmoleo y grado de rendimiento, pero tendió a disminuir la superficie del ojo de la costilla; la alimentación con dietas altas en DDGS aumentó el grosor de la grasa dorsal	Eun, J.-S. et al., 2009
Terneros, 443 kg	25 o 50%; 13.9% de contenido de grasa cruda	Las dietas a base de maíz tenían 25 o 50% DDGS, las dietas con 25% DDGS tenían 12% de harina de gluten de maíz o 2.4 o 2.8% de aceite de soja suplementario	Los terneros alimentados con dietas de 25% de DDGS tuvieron mayor GDP y ganancia:alimento que los alimentados con dietas de 50% de DDGS con proteína elevada o proteína y grasa elevadas	Los terneros alimentados con dietas de 25% de DDGS tuvieron mayor peso de la canal en caliente, así como grados de marmoleo y de calidad, pero entre los tratamientos no hubo diferencias de rendimiento de la canal, profundidad de la grasa de la 12 ^a costilla, superficie del LM, grado de rendimiento, fuerza de corte o peroxidación de la carne	Gunn et al., 2009
Terneros, 296 kg	30%; 9.7% de grasa cruda	Las dietas de crecimiento y finalización tuvieron combinaciones de 0 a 30% de DDGS	Los períodos de crecimiento y de finalización no mostraron diferencias de CMS, GDP y ganancia:alimento con la alimentación de DDGS	La tasa de inclusión de DDGS no tuvo efecto en la superficie del LM, grosor de la grasa de la 12 ^a costilla, grado de rendimiento, marmoleo y terneza, pero los steaks de los terneros alimentados con 30% DDGS durante la finalización o en todo el período fueron más jugosos y sabrosos	Leupp et al., 2009

¹Abreviaturas utilizadas: GDP = ganancia diaria promedio, PC = peso corporal, CMS = consumo de materia seca, ganancia:alimento = proporción de ganancia a alimento balanceado, LM = músculo del lomo

Alimentación de DDGS en ganado en crecimiento o de recría

Se han llevado a cabo menos investigaciones con respecto a la alimentación de DDGS de maíz en otras edades del ganado. Sin embargo, los DDGS son un excelente ingrediente que se puede usar de forma eficaz para suplementar energía y proteína en la dieta cuando el ganado se alimenta con forraje de baja calidad. Cuando se añaden DDGS a dietas que contienen forrajes bajos en fósforo, va a ser de valor significativo el fósforo en esta materia prima. Se han llevado a cabo cinco estudios en ganado en crecimiento o de recría para evaluar la alimentación de dietas con hasta 60 por ciento de DDGS (**cuadro 6**). En general, los DDGS no presentaron efectos o mejoraron el desempeño del crecimiento y las características de la canal.

Alimentación de DDGS a terneros de engorde

Se han llevado a cabo tres estudios en terneros de engorde para evaluar la alimentación de dietas con hasta 60 por ciento de DDGS (**cuadro 7**). En general, los DDGS resultaron en un mayor desempeño del crecimiento y mejoras en distintas características de la canal.

Alimentación de DDGS a ganado en pastura

Se realizaron otros tres estudios adicionales con ganado en pastura para evaluar los beneficios de suplementar DDGS en el crecimiento y la posterior respuesta de la canal (**cuadro 8**). En general, los DDGS mejoraron el desempeño del crecimiento y las características de la canal.

Cuadro 6. Resumen de cinco estudios publicados desde 2009 que evalúan las respuestas del desempeño del crecimiento y características de la canal¹ del ganado de engorde en crecimiento o ganado de recría alimentado con distintos tipos de dietas de DDGS.

Fase de crecimiento, PC inicial	Inclusión DDGS; contenido de grasa cruda	Condiciones de alimentación	Respuestas del crecimiento	Respuestas de la canal	Referencia
Ganado en crecimiento/de recría					
Año 1 – terneros, 305 kg Año 2 – terneros y terneras, 301 kg	25%; 10.9% de grasa cruda	Estudio de dos años con dos grupos alimentados con dietas a base de ensilado de maíz (75% de materia seca) con 25% de harina de gluten de maíz, 25% de DDGS o 25% de harina de soya y mazorca de maíz molida	Los terneros alimentados con dietas de DDGS y maíz-harina de soya tuvieron mayor GDP, el CMS fue menor y la ganancia:alimento fue mayor para los alimentados con DDGS; el costo por kg ganado fue menor en los alimentadas con DDGS	Entre los tratamientos de la dieta no hubo diferencia en la predicción de características de la canal con ultrasonido	Segers et al., 2013
Terneros, de 198 a 208 kg	Suplementación de maíz rolado en seco o DDGS alimentado al 0.5% del peso corporal; el contenido de grasa cruda fue 11.6%	Estudio de dos años con dos grupos de terneros en pastoreo con trigo de invierno con o sin suplementación de maíz rolado en seco o DDGS	La alimentación con DDGS suplementado aumentó 8% la GDP en comparación con no suplementado o con maíz rolado en seco	-	Buttrey et al., 2012
Terneros y terneras, 238 kg	60%; no se notificó el contenido de grasa cruda	Se añadieron 0, 100 o 200 mg de Cu/kg de materia seca a las dietas con 60% de DDGS con 10% de heno de pasto de tallos largos, 15% de cascarilla de soya peletizada y 15% de suplemento	La suplementación de Cu no tuvo efecto en la GDP, pero la ganancia:alimento aumentó linealmente	La suplementación de Cu no tuvo efectos en el peso de la canal en caliente, superficie del LM, grado de rendimiento, grasa dorsal o grado del marmoleo	Felix et al., 2012a
Terneros, 277 kg	60%; no se notificó el contenido de grasa cruda	Dieta de heno ensilado de 0 a 10% con 0 o 33 mg de monensina/kg de dieta y 60% de DDGS, 10% de ensilado de maíz, 15% de suplemento y 5 o 15% de maíz	La GDP aumentó en las dietas con 10% de ensilaje y aumentó aún más al añadir monensina, pero disminuyeron el CMS y ganancia:alimento con la adición de ensilaje	-	Felix and Loerch, 2011
Toros Holstein, 246 kg	0, 0.8 o 1.6 kg/día de DDGS; no se notificó el contenido de grasa cruda	Se suministró diariamente ensilado de maíz ad libitum con 1.1 kg de harina de soya, 1.5 kg de harina de colza, 1.6 kg de DDGS o 0.8 kg de harina de colza y 0.8 kg de DDGS	Al alimentar con DDGS la GDP fue más baja comparada con DDGS más harina de colza, pero no fue diferente a otros tratamientos; entre las dietas no hubo diferencia de ganancia:alimento	No tuvo efecto en el peso corporal final, rendimiento de la canal y grasa interna	Meyer et al., 2010

¹Abreviaturas utilizadas: GDP = ganancia diaria promedio, PC = peso corporal, CMS = consumo de materia seca, ganancia:alimento = proporción de ganancia a alimento balanceado, LM = músculo del lomo

Cuadro 7. Resumen de tres estudios publicados desde 2009 que evalúan las respuestas del desempeño del crecimiento y características de la canal¹ del ganado de engorde en crecimiento o de recría alimentado con distintos tipos de dietas de DDGS

Fase de crecimiento, PC inicial	Inclusión DDGS; contenido de grasa cruda	Condiciones de alimentación	Respuestas del crecimiento	Respuestas de la canal	Referencia
Terneros					
Terneras y terneros, 156 kg	De 11 a 34; no se notificó el contenido de grasa cruda	Cuatro dietas que proporcionaban alto contenido de grasa con alto o bajo contenido de proteína cruda y bajo contenido de grasa con alto o bajo contenido de proteína cruda para sustituir al maíz	Las dietas con alto contenido de proteína aumentaron la GDP, los terneros alimentados con dietas de maíz tuvieron menor CMS, pero la ganancia:alimento aumentó, en comparación con las dietas de DDGS	Las dietas con alto contenido de grasa aumentaron la grasa de la 12 ^a costilla y el grado de marmoleo, mientras que las dietas con alto contenido de proteína disminuyeron el grado de marmoleo. No hubo diferencias de peso de la canal en caliente, superficie del LM o grado de rendimiento	Segers et al., 2014
Terneros Holstein, 112 kg	0, 12, 20 o 30 por ciento; no se notificó el contenido de grasa cruda	Las dietas contenían niveles crecientes de DDGS para sustituir al maíz hojuelizado al vapor y se alimentaron durante 305 días	Durante los 126 días iniciales del período de alimentación los niveles crecientes de DDGS aumentaron linealmente la GDP y ganancia:alimento respondió cuadráticamente, pero en los 179 días finales y en general, no tuvo efectos sobre el desempeño del crecimiento	El mayor peso de la canal en caliente fue con la alimentación de 20 por ciento de DDGS, pero entre las tasas de inclusión de DDGS no se observaron otros efectos en la características de la canal	Carrasco et al., 2013
Terneros de destete temprano, 200 kg	0, 30 o 60 por ciento de DDGS; el contenido de grasa cruda fue de 9.8 por ciento	20 por ciento de ensilado de maíz con 0, 30 o 60 por ciento de DDGS durante 99 días, después se alimentaron con una dieta común hasta el sacrificio	El nivel de inclusión de la dieta de DDGS durante la fase de crecimiento no tuvo efectos sobre la GDP, CMS o ganancia:alimento y en la fase de finalización no tuvo efectos remanentes en el desempeño del crecimiento	El porcentaje de rendimiento, peso de la canal en caliente, grosor de la grasa respondieron cuadráticamente a la tasa de inclusión de DDGS; no tuvo efectos en el marmoleo, pero la alimentación de 30 a 60 por ciento de DDGS aumentó la proporción de grasa intramuscular a subcutánea y disminuyó con la alimentación de 0 a 30 por ciento de DDGS	Schoonmaker et al., 2013

¹Abreviaturas utilizadas: GDP = ganancia diaria promedio, PC = peso corporal, CMS = consumo de materia seca, ganancia:alimento = proporción de ganancia a alimento balanceado, LM = músculo del lomo

Cuadro 8. Resumen de 3 estudios publicados desde 2009 que evalúan las respuestas del desempeño del crecimiento y características de la canal¹ del ganado de engorde en pastoreo alimentado con distintos tipos de dietas de DDGS.

Fase de crecimiento, PC inicial	Inclusión DDGS; contenido de grasa cruda	Condiciones de alimentación	Respuestas del crecimiento	Respuestas de la canal	Referencia
Ganado en pastoreo					
Terneros, 204 kg	0, 0.25 o 0.5% de peso corporal; 13.3% de grasa cruda	Estudio de dos años con terneros que pastorean en praderas desérticas con arbustos en el norte de México y alimentados con cantidades crecientes de DDGS suplementado tres veces a la semana	La suplementación creciente de DDGS aumentó el peso corporal final, GDP y conversión del suplemento	-	Murillo et al., 2016
Terneros, Año 1 = 206 kg Año 2 = 230 kg	DDGS suplementado con 0, 0.2, 0.4 o 0.6% de peso corporal; 12.1% de grasa cruda	Estudio de dos años con períodos de pastoreo de 56 a 58 días en praderas nativa durante la temporada de crecimiento de forraje y alimentados con niveles crecientes de los DDGS suplementario a 0, 0.2, 0.4 o 0.6% del peso corporal	Aumentó linealmente la GDP con niveles crecientes de DDGS suplementario	-	Martínez-Pérez et al., 2013
Terneros de un año, 321 kg	1% de peso corporal durante el período de pastoreo, 40% durante el período de finalización; no se notificó el contenido de grasa cruda	Pastura de bromo con suplemento de azufre bajo (0.34% de S de los DDGS) o azufre alto (0.47% de S de los DDGS y NaSO ₄); las dietas de finalización con 48% de maíz, 40% de DDGS, 8% de heno picado	El azufre en la dieta no tuvo efectos en la GDP durante el período de pastoreo; el aumento de azufre en la dieta disminuyó la GDP durante el período de finalización subsiguiente, pero no afectó el CMS ni la ganancia:alimento	La alimentación con dietas con azufre alto durante el período de finalización disminuyó el peso de la canal en caliente, pero no tuvo efecto en la grasa de la canal, superficie del LM, grado de rendimiento o grado del marmoleo	Richter et al., 2012

¹Abreviaturas utilizadas: GDP = ganancia diaria promedio, PC = peso corporal, CMS = consumo de materia seca, ganancia:alimento = proporción de ganancia a alimento balanceado, LM = músculo del lomo

Calidad de la carne de res

En general, la alimentación de dietas con cantidades típicas de DDGS (hasta 30 por ciento de consumo de materia seca) no cambia la calidad o rendimiento de la canal de las reses y no afecta las características sensoriales y de consumo de la carne de res (Erickson et al. 2005). Un creciente número de estudios evaluaron la calidad y las características sensoriales de la carne de res de ganado alimentado con granos húmedos de destilería o DDGS. Los resultados muestran de forma constante que no hay efectos negativos sobre las características del consumo de carne de res con niveles altos DDGS.

En dos experimentos en los que se alimentó a novillos Holstein con DDGS de maíz húmedos o secos a niveles de hasta el 50 por ciento de la ración, Roeber et al. (2005) evaluaron el color, lo tierno y las características sensoriales del lomo de res. No hubo diferencias en lo tierno, sabor o jugosidad. De la misma forma, Jenschke et al. (2006) mostraron que el ganado en finalización alimentado con dietas con hasta 50 por ciento de granos húmedos de destilería (base materia seca) produjo un bistec (*steak*) similar en suavidad, cantidad de tejido conectivo, jugosidad o intensidad de sabor desagradable. De hecho, los *steaks* del ganado alimentado con dietas de 0 y 10 por ciento de DDGS con solubles fueron más propensos a tener un sabor desagradable, en comparación con los del ganado

alimentado con dietas con 30 y 50 por ciento de DDGS con solubles. Gordon et al. (2002) alimentaron durante 153 días de estudio a terneras en finalización con dietas con 0, 15, 30, 45, 60 o 75 por ciento de DDGS y observaron que hubo una pequeña mejora lineal en la suavidad de los *steaks* del ganado alimentado con cantidades crecientes de DDGS.

Koger et al. (2010) alimentaron terneros híbridos Angus con dietas de 20 o 40 por ciento de DDGS húmedos o secos con solubles para substituir toda la harina de soya y parte del maíz quebrado. Las canales de los terneros alimentados con DDGS presentaron un mayor grosor de la grasa, mayores grados de rendimiento que los alimentados con la dieta control de maíz rolado en seco, harina de soya y heno de alfalfa. El músculo del lomo de los terneros con DDGS tuvo valores de pH final más altos que los de los alimentados con DDGS húmedos. La carne molida o picada de los terneros alimentados con DDGS presentó un mayor contenido de α -tocoferol en comparación con la de los alimentados con la dieta control, pero al día dos de venta los que fueron alimentados con DDGS al 40 por ciento produjeron una carne con mayor TBARS (sustancias reactivas al ácido tiobarbitúrico), un indicador de la peroxidación de los lípidos, que la de los alimentados con 20 por ciento de DDGS. Estos investigadores concluyeron que es probable que los terneros alimentados con DDGS necesiten comercializarse un poco antes de lo normal para evitar la grasa externa en exceso,

pero no hay efectos adversos o benéficos sobre la incidencia de carne oscura por estrés, vida útil al menudeo de la carne de res molida (picada) o suavidad de la carne. Sin embargo, la carne de ganado alimentado con granos de destilería presenta ácidos grasos poliinsaturados elevados que pueden ser más susceptibles a la rancidez oxidativa.

Leupp et al. (2009) no mostraron diferencias en el desempeño de crecimiento al alimentar terneros con 0 o 30 por ciento de DDGS en el período de engorde o finalización. El marmoleo y la suavidad no se vieron afectados por la dieta, pero los *steaks* de los terneros alimentados con DDGS durante la finalización fueron más jugosos y tenían más sabor. Estos datos indican que se puede incluir DDGS a 30 por ciento de la materia seca de la dieta en el período de engorde o finalización para substituir parcialmente el maíz rolado en seco sin efectos perjudiciales sobre el desempeño, las características de la canal o los atributos sensoriales. Sin embargo, la alimentación con 30 por ciento de DDGS puede afectar negativamente el color de la carne.

De la misma forma, Segers et al. (2011) mostraron que la composición y suavidad del corte del *longissimus lumborum* no se vieron afectadas por la alimentación de dietas con 25 por ciento de DDGS o harina de gluten de maíz comparado con la harina de soya como suplemento de proteína, del destete hasta el terminado. No obstante, al igual que los efectos observados por Leupp et al. (2009) en el color de la carne, los panelistas capacitados en este estudio también observaron diferencias del color percibido, pero el color en general fue similar entre los *steaks* de los diferentes grupos de tratamiento. A diferencia del estudio de Koger et al. (2010), no hubo diferencias en la concentración de TBARS entre los grupos de tratamiento, pero los *steaks* de los terneros alimentados con DDGS se decoloraron más después de estar expuestos nueve días en la venta, además de que contenían mayor cantidad de ácidos grasos poliinsaturados, lo que indica que puede haber oxidación de lípidos y reducción de la vida útil de productos cárnicos frescos del ganado alimentado con DDGS. Los resultados de este estudio también indicaron que los DDGS y la harina de gluten de maíz pueden substituir la harina de soya y una parte del maíz en las dietas de ganado de carne desde el destete hasta el sacrificio, al tiempo que se mantiene la calidad de la carne.

Aldai et al. (2010a,b) compararon los efectos de alimentar ganado de engorde con DDGS de trigo contra los de maíz sobre la calidad de la carne y mostraron que los de trigo no tuvieron efectos negativos sobre la calidad de la carne. En contraste, la alimentación con DDGS de maíz presentó algunos efectos positivos en la calidad de la carne, tales como un mejoramiento de la suavidad y la palatabilidad comparados con el ganado alimentado con la dieta control de cebada.

Impacto de alimentar DDGS sobre la diseminación de la *E. coli* O157:H7

En 2007, hubo un aumento espectacular en el interés de identificar y comprender las posibles razones del aumento de *E. coli* O157:H7 en la contaminación de la carne de res molida o picada en EE. UU. Debido al aumento exponencial

en la producción de etanol y de granos de destilería durante este mismo periodo, había sospechas de que la alimentación de los granos de destilería contribuía a este problema. Como resultado, los investigadores empezaron a realizar estudios para determinar si había una relación entre la alimentación de los granos de destilería con solubles y el aumento en la incidencia de *E. coli* O157:H7 en la carne de res. En resumen, los resultados de distintos estudios mostraron que no hay un efecto consistente de la alimentación con DDGS sobre la diseminación de *E. coli* O157:H7 en el ganado de engorde. La respuesta a la diseminación de la *E. coli* O157:H7 se puede ver afectada por el nivel de alimentación de DDGS y otros ingredientes de la dieta, tales como el tipo de procesamiento del maíz. Actualmente, no hay pruebas científicas que indiquen que los niveles de DDGS con los que se alimenta sean causa de contaminación de *E. coli* O157:H7 en carne de res molida o picada. Refiérase al **capítulo 18** de este manual para obtener más detalles, un resumen integral de los resultados de investigación relacionados con la posible relación de los DDGS con la prevalencia de la diseminación fecal de *E. coli* O157:H7.

Alimentación de los DDGS a vacas de engorde

Entre otros posibles usos de los DDGS se incluye su utilización como alimento suplementario de terneros lactantes, como suplemento para ganado en pastoreo y como suplemento para forrajes y residuos agrícolas de baja calidad que pueden darse a terneros en crecimiento, vacas gestantes o novillas en desarrollo. Sin embargo, a diferencia del ganado de engorde-finalización, se han llevado a cabo menos investigaciones sobre la alimentación de los DDGS a vacas de engorde. Loy et al. (2005a) publicaron un primer resumen de los resultados de la inclusión de DDGS en dietas de vacas de engorde en el que indican que las mejores aplicaciones son situaciones en las que 1) se requiere de proteína suplementaria (en especial si se alimenta con forraje de baja calidad) para substituir la harina de gluten de maíz o la harina de soya, 2) cuando se requiere de una fuente de energía baja en almidón y alta en fibra para substituir la harina de gluten de maíz o la cascarilla de soya y 3) cuando se requiere de una fuente de grasa suplementaria.

DDGS como fuente de proteína suplementaria

Investigaciones previas han mostrado que cuando se suplementan DDGS para proporcionar 0.18 kg de proteína/día a vacas en pastoreo en una pradera nativa de invierno en Colorado, se comparó de manera favorable con el heno de alfalfa o el frijol blanco de desecho (Smith et al., 1999). Shike et al. (2004) compararon los efectos en el desempeño de alimentar harina de gluten de maíz baja en proteína o DDGS como suplemento del heno de alfalfa molido a vacas Simmental lactantes, en el que observaron que las vacas alimentadas con DDGS subieron más de peso, pero produjeron menos leche en comparación con las alimentadas con la harina de gluten de maíz baja proteína. Sin embargo, no hubo diferencias entre las vacas alimentadas con DDGS y las alimentadas con harina de gluten de maíz baja en proteína con respecto al peso de los terneros y al desempeño en el reapareamiento. En un estudio subsiguiente, Loy et al. (2005a) informaron que limitar la alimentación de vacas lactantes Angus y Simmental

con terneros con raciones totales mezcladas de rastrojo de maíz molido suplementadas con DDGS o con harina de gluten de maíz, no presentó diferencias en la producción de leche ni en la ganancia de peso de los terneros entre las vacas suplementadas con DDGS o con harina de gluten de maíz baja en proteína.

DDGS como fuente suplementaria de energía

Los DDGS de maíz son un suplemento de energía eficaz cuando se alimenta con forrajes de baja calidad. Summer y Trenkle (1998) mostraron que los DDGS y la harina de gluten de maíz fueron suplementos superiores al maíz en las dietas de rastrojo de maíz, pero no en las de alfalfa de alta calidad. El rastrojo de maíz (tallos) es bajo en proteína, energía y minerales, pero es económico y se encuentra fácilmente en los principales estados productores de maíz de EE. UU. Cuando se alimenta con forrajes de baja calidad (por ejemplo, rastrojo de maíz) a vacas en gestación en buena condición, la administración de 1.4 a 2.3 kg de DDGS al día durante el último tercio de gestación va a cubrir los requerimientos adecuados de proteína y energía (Loy y Miller, 2002). Para las vacas de engorde alimentadas con forrajes de baja calidad (por ejemplo, rastrojo de maíz) al inicio de la lactancia, la suplementación con 2.7 a 3.6 kg de DDGS cubre los requerimientos de proteína y energía (Loy y Miller, 2002).

Radunz et al. (2010) evaluaron los efectos en el desempeño previo y posterior al parto de las vacas alimentadas con heno de pasto, maíz o DDGS como fuentes de energía de la dieta de la última parte de la gestación. Cuando estas fuentes de energía se alimentaron para cubrir o exceder los requerimientos diarios, no hubo efectos perjudiciales en el desempeño de la vaca previo o posterior al parto, además de que la alimentación de DDGS como fuente de energía de preparto redujo el costo

del alimento diario durante la gestación. La fuente de energía de la dieta afectó la distribución de este nutriente y causó cambios en los metabolitos del plasma, lo que resultó en pesos al nacer más altos de terneros de vacas alimentadas con DDGS o maíz durante la última parte de la gestación, en comparación con los alimentados con heno de pasto.

DDGS como fuente suplementaria de grasa

La grasa suplementaria puede mejorar la reproducción en los hatos de vacas que experimentan tasas subóptimas de gestación (menos del 90 por ciento). Loy y Miller (2002) indicaron que la alimentación de suplementos con perfiles similares de ácidos grasos al del aceite de maíz (que se encuentra en los DDGS) mejoró las tasas de gestación. También mostraron que la suplementación de grasa es más benéfica en situaciones de alimentación en las que es necesaria la suplementación de proteína y/o energía. Engle et al. (2008) evaluaron los efectos de alimentar DDGS en comparación con cascarilla de soya en las dietas de la última parte de la gestación de terneras sobre el desempeño animal o reproductor, estudios en los que mostraron que las dietas preparto que contienen DDGS, como fuente de grasa y proteína no degradable, mejoraron las tasas de gestación en las terneras primíparas bien mantenidas.

Shike et al. (2009) evaluaron los efectos de usar coproductos de maíz en las raciones limitadas en el desempeño de la vaca, lactación, producción de nutrientes y reproducción subsiguiente. Las vacas alimentadas con DDGS bajaron 16 kg del peso corporal y tuvieron 0.9 kg/día menos de producción de leche, lo que resultó en terneros que tendían a tener una GDP más baja que las vacas alimentadas con harina de gluten de maíz baja en proteína. Sin embargo, en un segundo experimento, las vacas se alimentaron con 2.3 kg/día de rastrojo de maíz molido y cantidades isocalóricas de harina

Cuadro 9. Resumen de 13 estudios publicados desde 2009 que evalúan el desempeño reproductivo de vacas de engorde y las subsiguientes respuestas al crecimiento, canal o reproductivas¹ de la progenie alimentada con distintos tipos de dietas de DDGS.

Fase reproductiva	Tasa de inclusión de DDGS y contenido de grasa cruda	Condiciones de alimentación	Respuestas de rendimiento reproductivo	Respuestas de crecimiento, de la canal o reproductiva de la progenie	Referencia
Vacas en gestación					
Vacas multiparas de parto en otoño, 623 kg	0, 2.2 u 8.6 kg/día con suplemento de 70 por ciento de DDGS y 30 por ciento de cascarilla de soya; no se notificó contenido de grasa cruda	Estudio de dos años en el que las vacas pastaron festuca alta/trébol rojo infectados por endófitos y se alimentaron con cantidades crecientes desde los 103 días previos al parto a dos días posteriores a él	-	No hubo efecto en la progenie de las terneras al destete, reproducción o preñez, tasa de concepción IA, tasa de gestación y tasa de parto; el peso del ternero al nacer, porcentaje de nacimientos sin asistencia, producción de leche y PC del ternero a los 73 días de edad de la progenie por la suplementación.	Shoup et al., 2017

Cuadro 9. Resumen de 13 estudios publicados desde 2009 que evalúan el desempeño reproductivo de vacas de engorde y las subsiguientes respuestas al crecimiento, canal o reproductivas¹ de la progenie alimentada con distintos tipos de dietas de DDGS.

Fase reproductiva	Tasa de inclusión de DDGS y contenido de grasa cruda	Condiciones de alimentación	Respuestas de rendimiento reproductivo	Respuestas de crecimiento, de la canal o reproductiva de la progenie	Referencia
Vacas multiparas	0, 2.5 o 4.7 kg DDGS/día; no se notificó el contenido de grasa cruda	Alimentados con TMR ensilada isocalórica con o sin DDGS suplementarios durante las primeras fases de la lactancia	La suplementación creciente de DDGS aumentó el contenido de grasa láctea y urea y la alimentación con 2.5 kg de DDGS aumentó el contenido de lactosa en la leche; no difirieron entre tratamientos el PC final, GDP, la edad en la pubertad y tasas de concepción de las crías de ternera	-	Taylor et al., 2017
Las vacas de primer y segundo parto, 520 kg	0 o 0.35 por ciento de PC a diario, cada tercer día o cada sexto día; no se notificó contenido de grasa cruda	Pastoreo de residuos de maíz con o sin suplementación de DDGS	La suplementación diaria o cada tercer día aumentó la GDP; la CCC fue mayor con la suplementación diaria	-	Gross et al., 2016
Vacas multiparas, 674 kg	0.3 por ciento de PC en el último tercio de la gestación y ocho semanas después del parto; no se notificó contenido de grasa cruda	Período de alimentación de gestación tardía de 10 semanas con rastrojo y ensilado de maíz con o sin suplemento de DDGS	No tuvo efectos en la distocia, pero las vacas alimentadas con DDGS presentaron crías más pesadas al nacer debido a la mayor glucosa sanguínea y mayor peso al destete; la suplementación de DDGS aumentó la sangre uterina, pero disminuyó las concentraciones de estradiol y progesterona	-	Kennedy et al., 2016a,b,c
Vacas multiparas, 653 kg	0 o 6.9 kg/día de DDGS; no se notificó el contenido de grasa cruda	Se alimentó a parejas de vacas y terneros con dietas suplementadas con DDGS o harina de soya desde el parto hasta los 129 días posteriores que consistían en heno de centeno y DDGS o ensilado de maíz, heno de centeno y harina de soya	La dieta no tuvo efectos en la producción de leche, pero aumentó el nitrógeno ureico y la grasa en la leche, mientras que la proteína láctea disminuyó con la alimentación de DDGS; la alimentación de DDGS aumentó las tasas IA programadas, pero no tuvo efectos en la tasas de gestación	Aumentó la GDP y el PC de los terneros de vacas alimentadas con DDGS	Shee et al., 2016
Vacas multiparas de parto en primavera, 657 kg	19 o 39 por ciento de DDGS húmedos modificados con solubles (base materia seca); no se notificó contenido de grasa cruda	Las dietas contenían ensilado de avena, ensilado de maíz y DDGS húmedos modificados con solubles que proporcionaron proteína y el requerimiento o 129 por ciento del requerimiento, alimentados 78 días previos al parto en el parto	La dieta no tuvo efectos en el PC de las vacas, CCC, producción de leche, reproducción subsiguiente o desempeño del crecimiento de la progenie antes del destete	No tuvo efecto en el crecimiento, finalización de la progenie y grado del marmoleo de la canal, pero la alimentación del suplemento con alto contenido de proteína aumentó el grosor de la grasa de la 12 ^a costilla de la canal y grado de rendimiento	Wilson et al., 2016a

Cuadro 9. Resumen de 13 estudios publicados desde 2009 que evalúan el desempeño reproductivo de vacas de engorde y las subsiguientes respuestas al crecimiento, canal o reproductivas¹ de la progenie alimentada con distintos tipos de dietas de DDGS.

Fase reproductiva	Tasa de inclusión de DDGS y contenido de grasa cruda	Condiciones de alimentación	Respuestas de rendimiento reproductivo	Respuestas de crecimiento, de la canal o reproductiva de la progenie	Referencia
Vacas múltiparas de parto en primavera, 688 kg	0 a 7 por ciento de DDGS en dietas después del parto y 45 por ciento de DDGS o DDGS húmedos modificados con solubles usados en dietas comunes de progenie de ganado de engorde	Se alimentó a vacas desde los 83 días previos al parto hasta el parto con dietas que contenían 100 o 125 por ciento de los requerimientos de TDN con heno molido y DDGS o salvado de maíz y rastrojo de maíz molido y se les alimento con una dieta común posterior al parto; la progenie se alimentó con una dieta común con 45 por ciento de DDGS con solubles hasta el sacrificio	El PC, CCC de las vacas y el peso del ternero al nacer fueron mayores cuando se alimentaron con la dieta alta en energía, pero entre las dietas no hubo efectos en el porcentaje de nacimientos sin asistencia, día del parto, producción de leche, tasa de gestación subsiguiente	No hubo diferencias en el peso del ternero al destete, PC inicial y final del ganado, CMS, GDP, ganancia:alimento o morbilidad entre los tratamientos de la dieta de las madres	Wilson et al., 2016b
Vacas en un sistema de parto en otoño, 632 kg; terneros destetados a los 186 días de edad	El suplemento contenía 70 por ciento de DDGS, 30 por ciento de cascarilla de soya; se alimentó a los terneros destetados con 8.1 por ciento de grasa cruda, del 25 al 45 por ciento de DDGS húmedos modificados	Pastoreo con festuca alta/trébol rojo infectado con endófitos sin suplemento o con suplemento en bajas cantidades (2.2 kg/vaca/día) o altas (8.6 kg/vaca/día)	Las vacas alimentadas con altas cantidades de suplemento tuvieron mayor PC antes del parto, después del parto y después de la reproducción, pero la suplementación no afectó el peso del ternero al nacer, mortalidad o la asistencia en el parto La suplementación previa al parto tendió a mejorar la concepción de IA, pero no afectó la tasa de gestación. El destete temprano y los suplementos del alimento mejoraron el PC, CCC y reproducción de las vacas.	Los terneros destetados de vacas alimentadas con bajas cantidades de suplemento tuvieron mayor PC al destete en comparación con las vacas no suplementadas, pero diferencias de desempeño mínimas del ternero con base al nivel de suplementación de la madre antes del parto	Shoup et al., 2015
Vacas maduras de parto en primavera, 678 kg	No se notificó el contenido de grasa cruda de los DDGS	Alimentación limitada de heno molido (12 kg/día) o una dieta con 60 por ciento de rastrojo de maíz molido, 24 por ciento de DDGS, 16 por ciento de salvado de maíz (10.4 kg/día) desde los 88 días previos al parto hasta el parto; la dieta después del parto contenía 22 por ciento de heno molido, 22 por ciento de rastrojo de maíz molido, 33 por ciento de DDGS, 24 por ciento de salvado de maíz; la progenie se alimentó con una dieta de ganado común con harina de gluten de maíz húmeda, maíz alto en humedad, hojas de mazorca de maíz y suplemento	El PC y CCC de las vacas y el peso del ternero al nacer fueron mayores al alimentar la dieta con DDGS antes del parto y no hubo diferencia en partos sin asistencia, tasa de gestación y producción de leche	Durante el período de alimentación del ganado no hubo diferencias en el PC final de la progenie, GDP, CMS, ganancia:alimento, mortalidad, morbilidad, peso de la canal caliente, superficie del LM, grasa dorsal, grado de marmoleo y grado de rendimiento	Wilson et al., 2015a

Cuadro 9. Resumen de 13 estudios publicados desde 2009 que evalúan el desempeño reproductivo de vacas de engorde y las subsiguientes respuestas al crecimiento, canal o reproductivas¹ de la progenie alimentada con distintos tipos de dietas de DDGS.

Fase reproductiva	Tasa de inclusión de DDGS y contenido de grasa cruda	Condiciones de alimentación	Respuestas de rendimiento reproductivo	Respuestas de crecimiento, de la canal o reproductiva de la progenie	Referencia
Vacas maduras de parto en otoño, 603 kg	0 o 2.1 kg DDGS/vaca/día hasta el parto; 43 por ciento de DDGS durante el período de corral de engorde; el contenido de grasa cruda fue siete por ciento	Pastoreo de festuca alta con o sin suplemento de DDGS durante 69 días antes del parto, después cambio a otra pastura sin suplementación; se alimento con una dieta común a los terneros de la progenie con 43% DDGS	Las vacas alimentadas con suplementación de DDGS tuvieron mayor PC y CCC, pero no hubo diferencias en fechas de parto, producción de leche, concepción de IA o tasa de gestación; no hubo diferencias en el peso del ternero al nacer o al destete, o GDP antes del destete	No hubo diferencia en PC inicial y final, días en alimento, GDP, CMS, ganancia:alimento, morbilidad, peso de la canal caliente, superficie del LM, grado de marmoleo o grado de rendimiento de los terneros de la progenie	Wilson et al., 2015b
Vacas maduras, 606 kg	4.1 kg/cabeza/día; no se notificó el contenido de grasa cruda	Las dietas alimentadas desde los 167 días de gestación hasta una semana antes del parto incluyeron acceso ad libitum a heno de pasto sin suplemento, o 5.3 kg/día de maíz desgranado o 4.1 kg/día de DDGS con 2.1 kg/día de heno y 1 kg/día de suplemento	Las vacas alimentadas con DDGS ganaron más PC, pero el CCC no fue diferente comparado con solo heno de pasto o suplemento de maíz; la alimentación de DDGS aumentó el peso del ternero al nacer, pero no tuvo efectos en distocia, tasas de concepción, producción o composición de la leche	-	Radunz et al., 2010

Abreviaturas utilizadas: GDP = ganancia diaria promedio, IA = inseminación artificial, CCC = condición corporal, PC = peso corporal, CMS = consumo de materia seca, ganancia:alimento = proporción de ganancia a alimento balanceado, LM = músculo del lomo

Cuadro 10. Resumen de cuatro estudios publicados desde 2009 que evalúan el desempeño reproductivo de terneras de engorde y las subsiguientes respuestas al crecimiento, canal o reproductiva de la progenie alimentada con distintos tipos de dietas de DDGS.

Fase reproductiva	Inclusión de DDGS y contenido de grasa cruda	Condiciones de alimentación	Respuestas de rendimiento reproductivo	Respuestas crecimiento, canal o reproductiva de la progenie	Referencia
Terneras en gestación					
Terneras de un año		Desde los 192 días de gestación a 118 días posteriores al parto se alimentó a las madres con TMR de ensilado de maíz o residuos de maíz con DDGS; se brindó acceso ad libitum a la progenie de las terneras y hasta el destete acceso a DDGS como alimento suplementario y después, hasta la IA se les alimentó con ensilado de maíz, ensilado de pasto, rastrojo de maíz, cascarilla de soya y harina de soya	Las terneras de la progenie de madres alimentadas con suplemento de DDGS tuvieron mayor PC y calificación de estructura del esqueleto del destete a la reproducción, pero el tamaño ovárico, conteo de folículos y edad en la pubertad no se vieron afectados por la dieta de la madre; el PC en la pubertad y la tasa de preñez de IA fueron mayores cuando se suplementaron a las madres con DDGS y no afectó la tasa de distocia	-	Gunn et al., 2015
Tenera primípara, 450 kg	0.83 kg/día; no se notificó el contenido de grasa cruda	Estudio de tres años durante 142 días de gestación y alimentadas con heno de pasto sin suplemento ni suplementos isonitrogenado, isocalórico con DDGS o gluten de maíz	Las terneras sin suplementación tuvieron menor CMS y menor ganancia de PC. Las suplementadas tuvieron mayor GDP, pero fueron similares el peso del ternero al nacer y la tasa de gestación posteriores.	La dieta materna no afectó el destete del ternero ni el PC final y la GDP y peso de la canal en caliente fueron similares. Los terneros de vacas alimentadas con cantidades bajas de suplemento tuvieron la grasa de la 12 ^a costilla y la terneza de la carne más bajas.	Summers et al., 2015a,b
Terneras de dos años de edad, 199 kg	1.2 kg soya cruda molida y 0.4 kg de maíz o 1.65 kg de DDGS; 11.5 por ciento de grasa cruda	Acceso <i>ad libitum</i> hasta la cosecha tardía de heno de las praderas Sandhills con suplementos de soya cruda-maíz o DDGS desde el destete hasta la reproducción	La alimentación de DDGS suplementario aumentó la GDP en el primer año, pero en el segundo no fue diferente; no hubo diferencias del tamaño de folículo, hormona del folículo o tasa de gestación entre el primer y segundo año; no hubo diferencia de producción de terneros entre las dietas de desarrollo	-	Martin et al., 2010
Terneras de gestación tardía,	2.8 a 3.1 kg/cabeza/día; 12 por ciento grasa cruda	Estudio de dos años con 4 kg/cabeza/día de heno de pasto con 2.8 a 3.1 kg/cabeza/día de DDGS o de 3.2 a 3.5 kg/cabeza/día de cascarilla de soya durante 190 días desde la gestación hasta el parto	Al alimentar con DDGS aumentó el PC, pero no tuvo efecto en el cambio de CCC, facilidad de parto, vigor del ternero, peso del ternero al nacer, peso al destete o GDP; las vacas alimentadas con DDGS tuvieron mayores tasas de gestación, pero no afectó la distribución de preñez ni los ciclos de estro	-	Engle et al., 2008

¹Abreviaturas utilizadas: GDP = ganancia diaria promedio, IA = inseminación artificial, CCC = condición corporal, PC = peso corporal, CMS = consumo de materia seca, ganancia:alimento = proporción de ganancia a alimento balanceado, LM = músculo del lomo

de gluten de maíz (7.7 kg/día) o de DDGS (7.2 kg/día) para cubrir los requerimientos de nutrientes. Los resultados de este experimento mostraron que las vacas alimentadas con DDGS tendieron a perder más peso que las alimentadas con harina de gluten de maíz, pero no hubo diferencias en la producción de leche o la GDP del ternero. Además, tampoco hubo diferencias en el desempeño reproductor en ambos experimentos, lo que indica que los DDGS y la harina de gluten de maíz pueden incluirse hasta en un 75 por ciento de una dieta de alimentación limitada, pero no mejora la reproducción el contenido más alto de grasa de los DDGS en comparación con la harina de gluten de maíz.

El **cuadro 9** muestra un resumen de los 13 estudios publicados que evalúan la alimentación de vacas en gestación con suplementos de DDGS y el **cuadro 10** los 4 estudios adicionales con terneras de engorde gestantes. En general, los suplementos de DDGS no tuvieron efecto ni mejoró el desempeño reproductivo de vacas o terneras, así como los efectos subsiguientes de crecimiento, canal o reproducción de la progenie.

Novillas de reemplazo

Muy poca investigación se ha llevado a cabo sobre la alimentación de DDGS a novillas de reemplazo. Sin embargo, con base en los numerosos estudios del ganado en finalización, los DDGS podrían ser una excelente fuente de proteína y de energía de sobrepaso para las novillas o terneras de reemplazo en desarrollo. En un estudio hecho por MacDonald y Klopfenstein (2004), las novillas de reemplazo que pastaban en bromo se suplementaron con 0, 0.45, 0.90, 1.36 ó 1.81 kg de DDGS al día. Los resultados mostraron que por cada 0.45 kg de DDGS suplementados, disminuía el consumo de forraje en 0.78 kg al día y aumentaba la GDP en 27 g al día.

Loy et al. (2003) evaluaron el valor de la suplementación de DDGS diariamente o tres veces por semana en dietas altas en forraje para novillas híbridas en crecimiento. A las novillas se les proporcionó acceso *ad libitum* a heno de pasto (8.7 por ciento de proteína cruda) y se suplementaron con DDGS o maíz rolado en seco. Los suplementos se dieron a dos niveles de alimentación y se ofrecieron ya fuera a diario o tres veces a la semana en iguales proporciones. Las novillas suplementadas diariamente comieron más heno y tuvieron mayor GDP, pero

presentaron una conversión alimenticia más reducida que las suplementadas tres veces a la semana. Sin embargo, tanto el nivel de suplementación de DDGS alto como en el bajo resultó en mayores GDP y conversión alimenticia que las alimentadas con maíz rolado en seco (**cuadro 11**). Con base en estos resultados, el valor de energía neta calculada de los DDGS fue 27 por ciento más alto que para el maíz en grano.

En un estudio subsiguiente, Loy et al. (2004) alimentaron novillas canuladas ya fuera sin suplemento, o DDGS a diario o en días alternos, o maíz rolado en seco a diario o en días alternos. Como era de esperarse, el consumo de heno fue mayor para las novillas que no recibieron suplementación, en comparación con las que sí la recibieron, pero no hubo diferencias en el consumo de alimento entre las suplementadas con DDGS o maíz, aunque las suplementadas con DDGS tuvieron tasas más altas de desaparición de fibra en el rumen, que las suplementadas con maíz.

Loy et al. (2008) determinaron el efecto del tipo, concentración y frecuencia de alimentación del suplemento sobre el consumo de alimento y el desempeño del crecimiento para calcular el valor energético de los DDGS en una dieta alta en forrajes en terneras en crecimiento. Los resultados de este estudio mostraron que la suplementación de DDGS o de maíz rolado en seco tres veces a la semana disminuyó el consumo de forraje y la ganancia de peso corporal, en comparación con la suplementación diaria, pero la alimentación con DDGS mejoró la ganancia de peso corporal y la ganancia:alimento en comparación con el maíz rolado en seco. Calcularon que el TDN de los DDGS utilizados en este estudio fue de 118 a 130 por ciento del valor del maíz cuando se alimentó como suplemento a una dieta de heno de pasto para terneras en crecimiento.

Stalker et al. (2004) llevaron a cabo dos experimentos para evaluar los efectos de los requerimientos de proteína degradable suplementaria cuando se alimentó DDGS como fuente de energía en las dietas a base de forraje. Las dietas se formularon para ser deficientes (más de 100 g/día) en proteína degradable, pero contenían proteína metabolizable en exceso. Los resultados de este estudio mostraron que no es necesaria la adición de urea para cubrir el requerimiento de consumo de proteína degradable cuando se usan DDGS como fuente de energía en dietas a base de forraje.

Cuadro 11. Desempeño del crecimiento de terneras en engorde alimentadas con heno de pasto nativo y suplementadas con maíz o DDGS a niveles bajos o altos de suplementación (adaptado de Loy et al., 2003).

		Bajo (0.21 por ciento de peso corporal)	Alto (0.81 por ciento de peso corporal)
GDP, kg/día	Maíz	0.37	0.71
	DDGS	0.45	0.86
consumo de materia seca/ADG	Maíz	15.9	9.8
	DDGS	12.8	8

Morris et al. (2005) mostraron que cuando se le proporcionó a novillas alimentadas individualmente dietas de forraje de alta o baja calidad con suplementación de 0, 0.68, 1.36, 2.04 o 2.72 kg de DDGS al día, el consumo de forraje disminuyó y aumentó la ganancia diaria promedio. Estos resultados indican que los DDGS pueden ser un suplemento eficaz de forraje para aumentar el crecimiento cuando se vea limitada la disponibilidad de este.

Islas y Soto-Navarro (2011) evaluaron los efectos de la suplementación de DDGS en el consumo y digestión de forraje en terneras que estaban en pastura de granos finos o menores, y mostraron que la suplementación con hasta 0.6 por ciento del peso corporal aumentó el consumo de lípidos, así como la digestibilidad de lípidos y FND, sin efectos adversos sobre el consumo, la digestibilidad y las características de la fermentación ruminal. Con base en estos resultados, los DDGS se pueden utilizar con éxito como suplemento para aumentar el consumo de lípidos sin afectar negativamente el consumo o la digestibilidad de forrajes en ganado que está al pastoreo de granos finos.

Conclusiones

Los DDGS de maíz son una excelente fuente de energía y proteína para ganado de engorde en todas las fases de producción. Se pueden usar de manera eficaz como fuente de energía y alimentarse hasta el 40 por ciento del consumo de materia seca de la ración para ganado en finalización, con excelente desempeño del crecimiento, calidad de la canal y de la carne. No obstante, con altos niveles de inclusión de DDGS en la dieta se van a consumir proteína y fósforo en exceso con respecto a los requerimientos, lo cual resulta en una mayor excreción de nitrógeno y fósforo en el estiércol. De ser necesario, se debe monitorear el contenido de azufre de los DDGS para ajustar las tasas de inclusión en la dieta, para evitar toxicidad por azufre, en especial si el ganado consume forraje y agua con alto contenido de este elemento. La alimentación del ganado en finalización con dietas con alto contenido de DDGS tiene un mínimo efecto en el color de la carne, puede mejorar las características sensoriales, pero aumentar el contenido de ácidos grasos poliinsaturados, lo cual puede reducir la vida útil de la carne de res fresca en caso de largos períodos de almacenamiento en la tienda.

No hay efecto consistente de alimentar DDGS sobre la diseminación de *E. coli* O157:H7 en ganado de engorde. Los niveles de la dieta de DDGS y el tipo de procesamiento del maíz (maíz rolado en seco, maíz alto en humedad o maíz hojuelizado al vapor) puede afectar la respuesta de la diseminación de *E. coli* O157:H7. Actualmente, no hay pruebas científicas que indiquen que el nivel de DDGS alimentado sea la causa de la contaminación de *E. coli* O157:H7 en la carne molida o picada de res.

La alimentación de vacas y novillas de engorde con DDGS suplementario apoya el desempeño de la lactación

y reproductivo satisfactorio, con efectos mínimos en el crecimiento, la canal o el desempeño reproductivo de la progenie. Las mejores aplicaciones para el uso de DDGS en las dietas de vacas de engorde son en las situaciones en que 1) se requiere de proteína suplementaria (especialmente cuando se alimentan forrajes de baja calidad) para sustituir la harina de gluten de maíz o la harina de soya, 2) cuando se requiere de una fuente de energía baja en almidón y alta en fibra para sustituir la harina de gluten de maíz o la cascarilla de soya y 3) cuando se requiere de una fuente de grasa suplementaria.

Para las terneras en crecimiento, no es necesaria la adición de urea para cubrir el requerimiento de consumo de proteína degradable cuando se usan los DDGS como fuente de energía en dietas a base de forraje. Los DDGS pueden ser un suplemento eficaz de forraje para aumentar el crecimiento cuando haya poca disponibilidad de esta materia prima. Además, para las novillas en desarrollo tienen un valor en TDN de 18 a 30 por ciento más alto que el maíz rolado en seco.

Bibliografía

- Ahern, N.A., B.L. Nettleman, C.D. Buckner, T.J. Klopfenstein, and G.E. Erickson. 2011. Use of dry-rolled corn, dry or wet distillers grains plus solubles as an energy source in high-forage diets for growing cattle. Nebraska Beef Cattle Report, p. 20-21.
- Aines, G., T. Klopfenstein, and R. Stock. 1987. Distillers Grains. MP51, Nebraska Agric. Res. Div., Lincoln.
- Aldai, N., M.E.R. Dugan, J.L. Aalhus, T.A. McAllister, L.J. Walter, and J.J. McKinnon. 2010a. Differences in the trans-18:1 profile of the backfat of feedlot steers fed wheat or corn based dried distillers' grains. Anim. Feed Sci. Technol. 157:168-172.
- Aldai, N., J.L. Aalhus, M.E.R. Dugan, W.M. Robertson, T.A. McAllister, L.J. Walter, J.J. McKinnon. 2010b. Comparison of wheat- versus corn-based dried distillers' grains with soluble on meat quality of feedlot cattle. Meat Sci. 84:569-577.
- Bremer, M.L. 2014. Energy value of de-oiled distillers grains plus solubles in beef cattle diets. Master's thesis, University of Nebraska-Lincoln. 117 pp.
- Buckner, C.D., T.L. Mader, G.E. Erickson, S.L. Colgan, K. Karges, and M.L. Gibson. 2007. Optimum levels of dry distillers grains with soluble for finishing beef steers. Nebraska Beef Rep. 35-38.
- Buttrey, E.K., F.T. McCollum, III, K.H. Jenkins, J.M. Patterson, B.E. Clark, M.K. Luebbe, T.E. Lawrence, and J.C. MacDonald. 2012. Use of dried distillers grains throughout a beef production system: Effects on stocker and finishing performance, carcass characteristics, and fatty acid composition of beef. J. Anim. Sci. 90:2381-2393.

- Carrasco, R., A.A. Arrizon, A. Plascencia, N.G. Torrentera, and R.A. Zinn. 2013. Comparative feeding value of distillers dried grains plus solubles as a partial replacement for steam-flaked corn in diets for calf-fed Holstein steers: Characteristics of digestion, growth performance, and dietary energetics. *J. Anim. Sci.* 91:1801-1810.
- Castillo-Lopez, E., T.L. Klopfenstein, S.C. Fernando, and P.J. Kononoff. 2013. In vivo determination of rumen undegradable protein of dried distillers grains with solubles and evaluation of duodenal microbial crude protein flow. *J. Anim. Sci.* 91:924-934.
- Ceconi, I., M.J. Ruiz-Moreno, N. DiLorenzo, A. DiCostanzo, and G.I. Crawford. 2015. Effect of urea inclusion in diets containing corn dried distillers grains on feedlot cattle performance, carcass characteristics, ruminal fermentation, total tract digestibility, and purine derivatives-to-creatinine index. *J. Anim. Sci.* 93:357-369.
- Croom, W.J., Jr., R.W. Harvey, A.C. Linnerud, and M. Frotschel. 1982. High level of sodium hydroxide in in beef cattle diets. *Can J. Anim. Sci.* 62:217-227.
- DeHaan, K., T. Klopfenstein, R. Stock, S. Abrams, and R. Britton. 1983. Wet distiller's co-products for growing ruminants. *Nebraska Beef Rep.* MP 43:33-35.
- Drewnoski, M.E., D.J. Pogge, and S.L. Hansen. 2014. High-sulfur in beef cattle diets: A review. *J. Anim. Sci.* 92:3763-3780.
- Drewnoski, M.E., C.J. Brasche, and S.L. Hansen. 2014. Short communication: effects of dietary sulfur source on rumen pH and hydrogen sulfide gas concentration. *Livest. Sci.* 165:66-69.
- Engle, C.L., V.L. Anderson, and K.C. Swanson. 2016. Influence of two fat levels of dry distillers grains in diets with corn or barley on growing and finishing feedlot and carcass performance of steers. *J. Anim. Sci.* 94(Suppl. 2):173 (Abstr.).
- Erickson, G.E., T.J. Klopfenstein, D.C. Adams, and R.J. Rasby. 2005. Utilization of corn co-products in the beef industry. - A joint project of the Nebraska Corn Board and the University of Nebraska-Lincoln, Institute of Agriculture and Natural Resources, Agricultural Research Division, Cooperative Extension Division. www.nebraskacorn.org
- Eun, J.-S., D.R. ZoBell, and R.D. Wiedmreier. 2009. Influence of replacing barley grain with corn-based dried distillers grains with solubles on production and carcass characteristics of growing and finishing beef steers. *Anim. Feed Sci. Technol.* 152:72-80.
- Felix, T.L., W.P. Weiss, F.L. Fluharty, and S.C. Loerch. 2012a. Effects of copper supplementation on feedlot performance, carcass characteristics and rumen sulfur metabolism of growing cattle fed diets containing 60 percent dried distillers grains. *J. Anim. Sci.* 90:2710-2716.
- Felix, T.L., T.A. Murphy, and S.C. Loerch. 2012b. Effects of dietary inclusion and NaOH treatment of dried distillers grains with solubles on ruminal metabolism of feedlot cattle. *J. Anim. Sci.* 90:4951-4961.
- Felix, T.L., and S.C. Loerch. 2011. Effects of haylage and monensin supplementation on performance, carcass characteristics and ruminal metabolism of feedlot cattle fed diets containing 60 percent dried distillers grains. *J. Anim. Sci.* 89:2614-2623.
- Geisert, B.G., G.E. Erickson, T.J. Klopfenstein, C.N. Macken, M.K. Luebbe, and J.C. MacDonald. 2010. Phosphorus requirement and excretion of finishing beef cattle fed different concentrations of phosphorus. *J. Anim. Sci.* 88:2393-2402.
- Gigax, J.A., B.L. Nuttleman, W.A. Griffin, G.E. Erickson, and T.J. Klopfenstein. 2011. Performance and carcass characteristics of finishing steers fed low-fat and normal-fat wet distillers grains. *Nebraska beef Cattle Report* p. 44-45.
- Gordon, C.M., J.S. Drouillard, R.K. Phebus, K.A. Hachmeister, M.E. Dikeman, J.J. Higgins, and A.L. Reicks. 2002. The effect of Dakota Gold Brand dried distiller's grains with solubles of varying levels on sensory and color characteristics of ribeye steaks. *Cattlemen's Day 2002, Report of Progress 890, Kansas State University.* pp. 72-74.
- Gross, S.M., B.W. Neville, F.A. Brummer, and M. Undi. 2016. Frequency of feeding distillers dry grain with solubles as a supplement to beef cows grazing corn residue. *J. Anim. Sci.* 94(E-Suppl. 5):290 (Abstr.)
- Gunn, P.J., J.P. Schoonmaker, R.P. Lemenager, and G.A. Bridges. 2015. Feeding distiller's grains as an energy source to gestating and lactating beef heifers: Impact on female progeny growth, puberty attainment and reproductive processes. *J. Anim. Sci.* 93:746-757.
- Gunn, P.J., A.D. Weaver, R.P. Lemenager, D.E. Gerrard, M.C. Clays, and S.L. Lake. 2009. Effects of dietary fat and crude protein on feedlot performance, carcass characteristics and meat quality in finishing steers fed differing levels of dried distillers grains with solubles. *J. Anim. Sci.* 87:2882-2890.
- Hallewell, J., T.A. McAllister, J. Thomas, C.W. Booker, S. Hannon, G.K. Jim, L.O. Burciaga-Robles, M.L. May, R.E. Peterson, C. Flaig, E.M. Hussey, and K. Stanford. 2012. Effects of wheat or corn distillers dried grains with solubles on feedlot performance, fecal shedding and persistence of *Escherichia coli* O157:H7. *J. Anim. Sci.* 90:2802-2810.

- Ham, G.A., R.A. Stock, T.J. Klopfenstein, E.M. Larson, D.H. Shain, and R.P. Huffman. 1994. Wet corn distillers co-products compared with dried distillers grains with soluble as a source of protein and energy for ruminants. *J. Anim. Sci.* 72:3246.
- He, M.L., L. Xu, W.Z. Yang, D. Gibb, and T.A. McAllister. 2014. Effect of low-oil corn dried distillers grains with solubles on growth performance, carcass traits and beef fatty acid profile of feedlot cattle. *Can J. Anim. Sci.* 94:343-347.
- Islas, A., T.C. Gilbery, R.S. Goulart, C.R. Dahlen, M.L. Bauer, and K.C. Swanson. 2014. Influence of supplementation with corn dried distillers grains plus solubles to growing calves fed medium-quality hay on growth performance and feeding behavior. *J. Anim. Sci.* 92:705-711.
- Islas, A., and S.A. Soto-Navarro. 2011. Effect of supplementation of dried distillers grains with solubles on forage intake and characteristics of digestion of beef heifers grazing small-grain pasture. *J. Anim. Sci.* 89:1229-1237.
- Jenschke, B.E., J.M. James, K.J. Vander Pol, C.R. Calkins, and T.J. Klopfenstein. 2006. Wet distiller's grains plus solubles do not increase liver-like off-flavors in cooked beef. *Nebraska Beef Report*, University of Nebraska-Lincoln, pp. 115-117.
- Kennedy, V.C., M.L. Bauer, K.C. Swanson, and K.A. Vonnahme. 2016. Supplementation of corn dried distillers grains plus solubles to gestating beef cows fed low-quality forage: I. Altered intake behavior, body condition and reproduction. *J. Anim. Sci.* 94:240-247.
- Kennedy, V.C., B.R. Mordhorst, J.J. Gaspers, M.L. Bauer, K.C. Swanson, C.O. Lemley, and K.A. Vonnahme. 2016. Supplementation of corn dried distillers' grains plus solubles to gestating beef cows fed low-quality forage: II. Impacts on uterine blood flow, circulating estradiol-17 α and progesterone and hepatic steroid metabolizing enzyme activity. *J. Anim. Sci.* 94:4619-4628.
- Kennedy, V.C., J.J. Gaspers, B. Mordhorst, G.L. Stokka, M.L. Bauer, K.C. Swanson, and K.A. Vonnahme. 2016. Supplementation of corn-dried distiller's grains plus solubles to gestating beef cows fed low quality forage: neonatal calf performance. *J. Anim. Sci.* 94(E-Suppl. 5):558 (Abstr.)
- Klopfenstein, T.J., G.E. Erickson, and V.R. Bremer. 2008. Board-invited review: Use of distillers by-products in the beef cattle feeding industry. *J. Anim. Sci.* 86:1223-1231.
- Koger, T.J., D.M. Wulf, A.D. Weaver, C.L. Wright, K.E. Tjardes, K.S. Mateo, T.E. Engle, R.J. Maddock, and A.J. Smart. 2010. Influence of feeding various quantities of wet and dry distillers grains to finishing steers on carcass characteristics, meat quality, retail-case life of ground beef and fatty acid profile of longissimus muscle. *J. Anim. Sci.* 88:3399-3408.
- Leupp, J.L., G.P. Lardy, M.L. Bauer, K.K. Karges, M.L. Gibson, J.S. Caton, and R.J. Maddock. 2009. Effects of distillers dried grains with soluble on growing and finishing steer intake, performance, carcass characteristics and steak color and sensory attributes. *J. Anim. Sci.* 87:4118-4124.
- Leventini, M.W., C.W. Hunt, R.E. Ruffler, and D.G. Casebolt. 1990. Effect of dietary level of barley-based supplements and ruminal buffer on digestion and growth of beef cattle. *J. Anim. Sci.* 68:4334-4340.
- Li, C., K.A. Beauchemin, and W.Z. Yang. 2013. Effects of supplemental canola meal and various types of distillers grains on ruminal degradability, duodenal flow and intestinal digestibility of protein and amino acids in backgrounded heifers. *J. Anim. Sci.* 91:5399-5409.
- Li, C., J.Q. Li, W.Z. Yang, and K.A. Beauchemin. 2012. Ruminal and intestinal amino acid digestion of distiller's grain vary with grain source and milling process. *Anim. Feed Sci. Technol.* 175:121-130.
- Little, C.O., G.E. Mitchell Jr., and G.D. Potter. 1968. Nitrogen in the abomasums of wethers fed different protein sources. *J. Anim. Sci.* 27:1722-1726.
- Loneragan, G.H., J.J. Wagner, D.H. Gould, F.B. Garry, and M.A. Toren. 2001. Effects of water sulfate concentration on performance, water intake and carcass characteristics of feedlot steers. *J. Anim. Sci.* 79:2941-2948.
- Loy, T.W., T.J. Klopfenstein, G.E. Erickson, C.N. Macken, and J.C. MacDonald. 2008. Effect of supplemental energy source and frequency on growing calf performance. *J. Anim. Sci.* 86:3504-3510.
- Loy D.D., D.R. Strohbehn, and R.E. Martin. 2005a. Ethanol co-products for cattle: Distillers grains for beef cows. IBC 26. Iowa Beef Center, Iowa State University.
- Loy, D.D., D.R. Strohbehn, and R.E. Martin. 2005b. Ethanol co-products for cattle: Factors affecting the economics of corn co-products in cattle feeds. IBC 28. Iowa Beef Center, Iowa State University.
- Loy, T.W., J.C. MacDonald, T.J. Klopfenstein, and G.E. Erickson. 2004. Effect of distiller's grains or corn supplementation frequency on forage intake and digestibility. *Nebraska Beef Cattle Report MP 80-A:22-24.*
- Loy, T.W., T.J. Klopfenstein, G.E. Erickson, and C.N. Macken. 2003. Value of dry distiller's grains in high fiber diets and effect on supplementation frequency. *Nebraska Beef Cattle Report MP 80-A:8.*
- Loy, D. and W. Miller. 2002. Ethanol co-products for cattle – The process and products. Iowa Beef Center. Iowa State University IBC-18.

- MacDonald, J.C. and T.J. Klopfenstein. 2004. Dried distiller's grains as a grazed forage supplement. Nebraska Beef Cattle Report MP 80-A:22-24.
- Martin, J.L., D.M. Larson, H.L. Stroh, A.S. Cupp, and R.N. Funston. 2010. Effects of dietary crude protein sources on hormone and follicle characteristics in beef heifers. *J. Anim. Sci.* 88:937-942.
- Martínez-Pérez, M.F., D. Calderón-Mendoza, A. Islas, A.M. Encinias, F. Loya-Olguín, and S.A. Soto-Navarro. 2013. Effect of corn dry distillers grains plus solubles supplementation level on performance and digestion characteristics of steers grazing native range during forage growing season. *J. Anim. Sci.* 91:1350-1361.
- McDonald, I.W. 1954. The extent of conversion of feed protein to microbial protein in the rumen of sheep. *Biochem. J.* 56:120-125.
- McDowell, L.R. 2003. *Minerals in Animal and Human Nutrition*, 2nd edition, Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
- Meyer, U., A. Schwabe, S. Dänicke, and G. Flachowsky. 2010. Effects of by-products from biofuel production on the performance of growing fattening bulls. *Anim. Feed Sci. Technol.* 161:132-139.
- Morine, S.J., M.E. Drewnoski, and S.L. Hansen. 2014. Increasing dietary neutral detergent fiber concentration decreases ruminal hydrogen sulfide concentrations in steers fed high-sulfur diets based on ethanol coproducts. *J. Anim. Sci.* 92:3035-3041.
- Morris, S.E., T.J. Klopfenstein, D.C. Adams, G.E. Erickson, and K.J. Vander Pol. 2005. The effects of dried distiller's grains on heifers consuming low- or high-quality forages. Nebraska Beef Report MP 83-A:18-20.
- Murillo, M., E. Herrera, O. Ruiz, O. Reyes, F.O. Carrete, and H. Gutierrez. 2016. Effect of supplemental corn dried distillers grains with solubles fed to beef steers grazing native rangeland during the forage dormant season. *Asian Australas. J. Anim. Sci.* 29:666-673.
- Neville, B.W., G.P. Lardy, K.K. Karges, S.R. Eckermann, P.T. Berg, and C.S. Schauer. 2012. Interaction of corn processing and distillers dried grains with soluble on health and performance of steers. *J. Anim. Sci.* 90:560-567.
- Neville, B.W., C.S. Schauer, K. Karges, M.L. Gibson, M.M. Thompson, L.A. Kirschten, N.W. Dyer, P.T. Berg, and G.P. Lardy. 2010. Effect of thiamine supplementation on animal health, feedlot performance, carcass characteristics, and ruminal hydrogen sulfide concentrations in lambs fed diets based on 60 percent DDGS. *J. Anim. Sci.* 88:2444-2455.
- Núñez, A.J.C., T.L. Felix, S.C. Loerch, and J.P. Schoonmaker. 2015. Short communication: Effect of dried distillers grains with solubles or corn in growing cattle diets, followed by a corn-based finishing diet, on performance of feedlot cattle. *Anim. Feed Sci. Technol.* 207:267-273.
- Núñez, A.J.C., T.L. Felix, R.P. Lemenager, and J.P. Schoonmaker. 2014. Effect of calcium oxide inclusion in beef feedlot diets containing 60 percent dried distillers grains with solubles on ruminal fermentation, diet digestibility, performance and carcass characteristics. *J. Anim. Sci.* 92:3954-3965.
- NRC. 2001. *Nutrient Requirements of Beef Cattle*, 7th ed. National Academy Press, Washington, DC.
- NRC. 2005. *Mineral tolerances of animals*, 2nd ed. Natl. Acad. Press, Washington, D.C.
- Plascencia, A., G. D. Mendoza, C. Vásquez, and R. A. Zinn. 2003. Relationship between body weight and level of fat supplementation on fatty acid digestion in feedlot cattle. *J. Anim. Sci.* 81:2653-2659.
- Pogge, D.J., M.E. Drewnoski, D. Snider, W.K. Rumbelha, and S.L. Hansen. 2016. Effect of ferric ammonium citrate in feedlot diets with varying dried distillers grains inclusion on ruminal hydrogen sulfide concentrations and steer growth. *J. Anim. Sci.* 94:3894-3901.
- Radunz, A.E., F.L. Fluharty, M.L. Day, H.N. Zerby, and S.C. Loerch. 2010. Parturient dietary energy source fed to beef cows: I. Effects on pre- and postpartum cow performance. *J. Anim. Sci.* 88:2717-2728.
- Richter, E.L., M.E. Drewnoski, and S.L. Hansen. 2012. Effects of increased dietary sulfur on beef steer mineral status, performance, and meat fatty acid composition. 90:3945-3953.
- Rodenhuis, M.A., F.E. Keomanivong, J.J. Gaspers, T.C. Gilbery, S.R. Underdahl, M.L. Bauer, V.L. Anderson, C.L. Engle, and K.C. Swanson. 2016. The influence of grain source and dried corn distiller's grains plus solubles oil concentration on finishing cattle performance and feeding behavior. *J. Anim. Sci.* 94(Suppl. 2):170 (Abstr.)
- Roeber, D.L., R.K. Gill, and A. DiCostanzo. 2005. Meat quality responses to feeding distiller's grains to finishing Holstein steers. *J. Anim. Sci.* 83:2455-2460.
- Salim, H., K.M. Wood, P.L. McEwen, G. Vandervoort, S.P. Miller, I.B. Mandell, J.P. Cant, K.C. Swanson. 2014. Influence of feeding increasing level of dry or modified wet corn distillers grains plus solubles in whole corn grain-based finishing diets on growth performance, carcass traits and feeding behavior in finishing cattle. *Livest. Sci.* 161:53-59.

- Schauer, C.S., M.M. Stramm, T.D. Maddock, and P.B. Berg. 2008. Feeding 60 percent lamb finishing rations as dried distillers grains with solubles results in acceptable performance and carcass quality. *Sheep and Goat Res. J.* 23:15-19.
- Schoonmaker, J.P., M.C. Claeys, and R.P. Lemenager. 2013. Effect of increasing distillers grains inclusion on performance and carcass characteristics of early-weaned steers. *J. Anim. Sci.* 91:1784-1790.
- Schroeder, A.R., M. Iakiviak, and T.L. Felix. 2014. Effects of feeding dry or modified wet distillers grains with solubles with or without supplemental calcium oxide on ruminal metabolism and microbial enzymatic activity of beef cattle. *J. Anim. Sci.* 92:3997-4004.
- Schroeder, A.R., M.J. Duckworth, D.W. Shike, J.P. Schoonmaker, and T.L. Felix. 2014. Effects of calcium oxide treatment of dry and modified wet corn distillers grains plus solubles on growth performance, carcass characteristics and apparent digestibility of feedlot steers. *J. Anim. Sci.* 92:4661-4668.
- Segers, J.R., D.B. Faulkner, K.M. Retallick, and D.W. Shike. 2014. Effects of protein and fat concentration in coproduct-based growing calf diets on performance and carcass composition. *J. Anim. Sci.* 92:5603-5611.
- Segers, J.R., A.M. Stelzleni, T.D. Pringle, M.A. Froetschel, C.L. Ross, and R.L. Stewart, Jr. 2013. Use of corn gluten feed and dried distillers grains plus solubles as a replacement for soybean meal and corn for supplementation in a corn silage-based stocker system. *J. Anim. Sci.* 91:950-956.
- Segers, J.R., R.L. Stewart, Jr., C.A. Lents, T.D. Pringle, M.A. Froetschel, B.K. Lowe, R.O. McKeith, and A.M. Stetleni. 2011. Effect of long-term corn by-product feeding on beef quality, strip loin fatty acid profiles, and shelf life. *J. Anim. Sci.* 89:3792-3802.
- Sharman, E.D., P.A. Lancaster, C.R. Krehbiel, G.G. Hilton, D.R. Stein, U. DeSilva, and G.W. Horn. 2013. Effects of starch- vs. fiber-based energy supplements during winter grazing on partitioning of fat among depots and adipose tissue gene expression in growing cattle and final carcass characteristics. *J. Anim. Sci.* 91:2264-2277.
- Shee, C.N., R.P. Lemenager, and J.P. Schoonmaker. 2016. Feeding dried distillers grains with solubles to lactating beef cows: impact of excess protein and fat on cow performance, milk production and pre-weaning progeny growth. *Animal* 10:1, pp. 55-63.
- Shike, D.W., D.B. Faulkner, and J.M. Dahlquist. 2004. Influence of limit-fed dry corn gluten feed and distiller's dried grains with solubles on performance, lactation and reproduction of beef cows. *J. Anim. Sci.* 82 (Suppl. 2):96.
- Shike, D.W., D.B. Faulkner, D.F. Parrett, and W.J. Sexten. 2009. Influences of corn co-products in limit-fed rations on cow performance, lactation, nutrient output and subsequent reproduction. *Professional Animal Scientist.* 25:132-138.
- Shoup, L.M., F.A. Ireland, and D.W. Shike. 2017. Effects of dam prepartum supplemental level on performance and reproduction of heifer progeny. *Italian J. Anim. Sci.* 16:75-81.
- Shoup, L.M., A.C. Kloth, T.B. Wilson, D. González-Peña, F.A. Ireland, S. Rodriguez-Zas, T.L. Felix, and D.W. Shike. 2015. Prepartum supplement level and age at weaning: I. Effects on pre- and postpartum beef cow performance and calf performance through weaning. *J. Anim. Sci.* 93:4926-4935.
- Smith, C.D., J.C. Whittier, D.N. Schutz, and D. Conch. 1999. Comparison of alfalfa hay and distiller's dried grains with solubles alone and in combination with cull beans as protein sources for beef cows grazing native winter range. *Beef Program Report. Colorado State Clin.*
- Stalker, L.A., T.J. Klopfenstein, D.C. Adams, and G.E. Erickson. 2004. Urea inclusion in forage-based diets containing dried distiller's grains. *Nebraska Beef Cattle Report MP 80-A:20-21.*
- Stelzleni, A.M., J.R. Segers, and R.L. Stewart Jr. 2016. Long-term use of corn coproducts as a sources of protein in beef finishing diets and the effects on carcass characteristics and round muscle quality. *J. Anim. Sci.* 94:1227-1237.
- Summer, P., and A. Trenkle. 1998. Effects of supplementing high- or low-quality forages with corn or corn processing co-products upon digestibility of dry matter and energy by steers. *Iowa State University Beef Research Report ASL-R1540.*
- Summers, A.F., T.L. Meyer, and R.N. Funston. 2015a. Impact of supplemental protein source offered to primiparous heifers during gestation on I. Average daily gain, feed intake, calf birth body weight and rebreeding in pregnant beef heifers. *J. Anim. Sci.* 93:1865-1870.
- Summers, A.F., A.D. Blair, and R.N. Funston. 2015b. Impact of supplemental protein source offered to primiparous heifers during gestation on II greater than Progeny performance and carcass characteristics. *J. Anim. Sci.* 93:1871-1880.
- Swanson, K.C., A. Islas, Z.E. Carlson, R.S. Goulart, T.C. Gilbery, and M.L. Bauer. 2014. Influence of dry-rolled corn processing and increasing dried corn distillers grains plus solubles inclusion for finishing cattle on growth performance and feeding behavior. *J. Anim. Sci.* 92:2531-2537.

- Taylor, E.G., R.P. Lemenager, and K.R. Stewart. 2017. Effects of using distiller's dried grains with solubles in postpartum diets of beef cows on heifer offspring reproductive performance. *J. Anim. Sci.* 95(Suppl. 2): 165 (Abstr.)
- Tjardes, J. and C. Wright. 2002. Feeding corn distiller's co-products to beef cattle. SDSU Extension Extra. ExEx 2036, Dept. of Animal and Range Sciences. pp.1-5.
- Uwituze, S., G.L. Parsons, C.J. Schneider, K.K. Karges, M.L. Gibson, L.C. Hollis, J.J. Higgins, and J.S. Drouillard. 2011. Evaluation of sulfur content of dried distillers grains with solubles in finishing diets based on steam-flaked corn or dry-rolled corn. *J. Anim. Sci.* 89:2582-2591.
- Uwituze, A., G.L. Parsons, M.K. Shelor, B.E. Depenbusch, K.K. Karges, M.L. Gibson, C.D. Reinhardt, J.J. Higgins, and J.S. Drouillard. 2010. Evaluation of dried distillers grains and roughage source in steam-flaked corn finishing diets. *J. Anim. Sci.* 88:258-274.
- Vander Pol, K.J., M.K. Luebbe, G.I. Crawford, G.E. Erickson, and T.J. Klopfenstein. 2007. Digestibility, rumen metabolism and site of digestion for finishing diets containing wet distillers grains or corn oil. *Nebraska Beef Cattle Report.* MP88-A:51-53.
- Vander Pol, K.J., G.E. Erickson, and T.J. Klopfenstein. 2005. Degradable intake protein in finishing diets containing dried distiller's grains. *J. Anim. Sci.* 83(Suppl. 2):62.
- Veracini, J.L., P.M. Walker, M.J. Faulkner, R.E. Hall, R.L. Atkinson, and B.R. Wiegand. 2013. Effects of high-fat, modified-wet, corn distiller's grains plus solubles on beef steer performance and carcass characteristics. *Livest. Sci.* 157:151-161.
- Wilson, T.B., N.M. Long, D.B. Faulkner, and D.W. Shike. 2016a. Influence of excessive dietary protein intake during late gestation on drylot beef cow performance and progeny growth, carcass characteristics and plasma glucose and insulin concentrations. *J. Anim. Sci.* 94:2035-2046.
- Wilson, T.B., D.B. Faulkner, and D.W. Shike. 2016b. Influence of prepartum dietary energy on beef cow performance and calf growth and carcass traits. *Livest. Sci.* 184:21-27.
- Wilson, T.B., D.B. Faulkner, and D.W. Shike. 2015a. Influence of late gestation drylot rations differing in protein degradability and fat content on beef cow and subsequent calf performance. *J. Anim. Sci.* 93:5819-5828.
- Wilson, T.B., A.R. Schroeder, F.A. Ireland, D.B. Faulkner, and D.W. Shike. 2015b. Effects of late gestation distillers grains supplementation on fall-calving beef cow performance and steer calf growth and carcass characteristics. *J. Anim. Sci.* 93:4843-4851.

CAPÍTULO 16

Diseminación de la *Escherichia coli* O157:H7 y *Listeria monocytogenes* en ganado de engorde y lechero

Introducción

LOS CENTROS DE CONTROL Y PREVENCIÓN DE ENFERMEDADES

(CDC) identificaron a la *Escherichia coli* O157:H7 y a la *Listeria monocytogenes* como dos importantes patógenos de origen alimentario (CDC, 2014). Con mucha frecuencia, el consumo de carne de res molida o picada está implicado como causante de enfermedades de origen alimentario por *E.coli* O157:H7 en humanos, además de que se han vinculado los productos alimenticios originados en el ganado con aproximadamente el 75 por ciento de los brotes (USDA-APHIS, 1997; Vugia et al., 2007). El ganado es uno de los principales reservorios de *E. coli* O157:H7 en la superficie de la mucosa del recto (Naylor et al., 2003; Gyles, 2007; Hussein, 2007) y en las heces (Callaway et al., 2003; Berg et al., 2004; Jacob et al., 2008a,b). De hecho, los estudios han demostrado que hasta 30 por ciento del ganado es portador de *E. coli* O157:H7 (Callaway et al., 2006; Reinstein et al., 2007; Stanford et al. 2005).

Muchos factores afectan la diseminación en rumiantes de estos patógenos, tales como el alimento, el agua, la edad del animal y la temporada (Caro et al., 1990; Bach et al., 2002; Renter y Sargeant, 2002; Ho et al., 2007). El estiércol con *E.coli* O157:H7 de los sistemas de alojamiento del ganado puede contaminar las fuentes de agua, usada como agua de riego de cultivos o transmitirse a través de otros animales (Hill et al., 2006; LeJeune et al., 2001; Sargeant et al., 2003; Thurston-Enríquez et al., 2005). Aunque se considera que la dieta es un factor importante que contribuye a la diseminación fecal de estos patógenos, no está claro su impacto con respecto a los granos, coproductos de granos y el forraje. Los resultados iniciales de Díez-González et al. (1998), mostraron que un cambio abrupto de raciones de grano a una de heno reduce significativamente las población de *E.coli* genérica. No obstante, varios estudios de investigación subsiguientes han demostrado resultados variables (Hancock et al., 2000; Hovde et al., 1999; Keen et al., 1999).

La *Listeria monocytogenes* también está presente en las heces del ganado (Pell, 1997; Pauly et al., 1999). Se identificó la presencia de varias *Listeria* spp. (*L. innocua*, *L. monocytogenes* y *L. welshimeri*) en 9 a 35 por ciento de las muestras fecales de ganado de engorde estabulado sano (Siragusa et al., 1993). Skovgaard y Morgen (1988) demostraron la presencia de *Listeria* spp. en las muestras fecales y de ensilado recolectadas de 7 granjas lecheras; Ryster et al. (1997) aislaron *L. monocytogenes* en el 2 por ciento de 129 muestras de ensilado y 35 de ensilado de heno. Estos resultados indican que las muestras de ensilado pueden ser un riesgo potencial de transmisión *L. monocytogenes* al ganado. Sin embargo,

faltan pruebas claras que demuestren la relación directa entre la composición de la dieta y la diseminación de patógenos en el ganado de engorde y lechero.

Debido a la inquietud por la posible contaminación con *E.coli* O157:H7 y *L. monocytogenes* en carne y leche, así como el posible papel que la composición de la dieta contribuye al riesgo de contaminación, es importante revisar los resultados de los estudios de investigación que implican la alimentación con DDGS al ganado de engorde y lechero para determinar si se trata de un factor de riesgo.

¿Aumenta la alimentación de DDGS la diseminación de *E. coli* O157:H7?

Hay distintos tipos de bacterias que se encuentran presentes en todas partes del ambiente y también en los coproductos. No obstante, un factor más importante podría ser la proporción de granos y forraje y los niveles de proteína cruda en las dietas para el ganado (Biswas et al., 2016).

Un informe inicial indica que la alimentación con DDGS aumenta la diseminación de la *E. coli* O157:H7 en las explotaciones de vacas y terneros en Escocia (Synge et al., 2003). En un estudio posterior, otros investigadores encontraron que la alimentación de granos de cervecería al ganado también aumentaba la diseminación de *E. coli* O157 y la probabilidad de su diseminación en más de 6 veces (Dewell et al., 2005). En 2007, hubo un aumento espectacular en el interés de identificar y comprender las posibles razones del aumento de contaminación de *E. coli* O157:H7 en la carne molida o picada de res de EE. UU. Debido al aumento exponencial en la producción de granos de destilería y su uso en dietas para el ganado durante este mismo periodo, hubo la sospecha de que la alimentación de dichos granos de destilería contribuía a este problema. Como resultado, los investigadores empezaron a realizar estudios para determinar si había una relación entre la alimentación de los granos de destilería con solubles y el aumento en la incidencia de *E. coli* O157:H7 en la carne de res. Investigadores de la Kansas State University realizaron una serie de estudios controvertidos (Jacob et al., 2008a,b,c), que mostraron una baja prevalencia y respuestas inconsistentes a la diseminación de *E. coli* O157:H7 en el ganado de engorde estabulado alimentado con DDGS. A pesar de estos resultados inconsistentes, estos investigadores concluyeron que la alimentación de los granos de destilería aumentaba la diseminación de *E. coli* O157:H7 fecal en el ganado de engorde estabulado.

Sin embargo, estudios posteriores realizados por investigadores en la University of Nebraska (Peterson et al., 2007) mostraron que la alimentación de hasta 50 por ciento (base materia seca) de granos húmedos de destilería en la dieta resultó en que hubiera diseminación de la *E. coli* O157:H7, pero el nivel de diseminación no era diferente al de las dietas sin DDGS. Estos resultados no concordaron con los de Jacob et al. (2008a,b,c). Posteriormente, Nagaraja et al. (2008) recolectaron muestras de estiércol de 700 cabezas de ganado alimentadas con dietas control y con DDGS durante 150 días, con lo que mostraron que la prevalencia general de la diseminación de *E. coli* O157:H7 era baja (5.1 por ciento) y que la alimentación de los DDGS no presentaba efectos. Además, en contraste con los estudios anteriores, Jacob et al. (2009) no mostraron diferencias en la diseminación fecal de *Escherichia coli* O157:H7 y *Salmonella* spp. en ganado alimentado con maíz rolado en seco o DDGS.

Callaway et al. (2010) llevaron a cabo un estudio para evaluar los cambios en la población bacteriana ruminal y fecal en ganado de engorde alimentado con dietas en las que el DDGS sustituyó 0, 25 o 50 por ciento del grano suplementado, y mostraron que la alimentación de DDGS cambió la población bacteriana, lo que puede estar relacionado en un pH ruminal más bajo. Biswas et al. (2016) demostraron que la alimentación con dietas de alto contenido de forraje y proteína resultó en mayor diseminación de *E. coli* O157:H7 en ganado lechero, en comparación con las dietas con bajo contenido de forraje y alto contenido de proteína que presentaron la menor diseminación. Estos resultados indican que la composición de la dieta y el contenido de proteína cruda pueden influir en la diseminación de *E. coli* O157:H7 en el ganado lechero, pero la inclusión de DDGS en la dieta no tuvo efectos.

Actualmente, no hay pruebas científicas que indiquen que los niveles de DDGS que se alimentan sean causa de contaminación de *E. coli* O157:H7 en carne de res molida o picada. Además, si hay una posible conexión entre la alimentación de los granos de destilería y la diseminación de *E. coli*, aún no se ha esclarecido el mecanismo. Los estudios *in vitro* no han detectado ningún efecto de los granos de destilería sobre la población de *E. coli* O157:H7 en las fermentaciones mezcladas de fluido ruminal y fecal (Callaway et al., 2008). Es importante reconocer que la contaminación bacteriana (como la *E. coli* O157:H7) en el suministro de carne puede darse en muchos segmentos de la cadena alimentaria: no se restringe al alimento balanceado o a sus ingredientes.

¿Aumenta la alimentación de DDGS la diseminación de *L. monocytogenes*?

No se han llevado a cabo estudios que determinen el efecto de la composición de la dieta o la alimentación de DDGS sobre la diseminación fecal de *Listeria* en el ganado. Fenlon et al. (1996) mostraron que casi el 30 por ciento del ganado en un hato diseminó *L. monocytogenes* después de la

alimentación con ensilado. Ho et al. (2007) determinaron que el 38 por ciento de las muestras de ensilado analizadas contenían *L. monocytogenes* y que el 94 por ciento de las vacas alimentadas con ensilado excretaron *L. monocytogenes* en las heces por lo menos una vez durante el estudio. Biswas et al. (2016) mostraron que las vacas lecheras excretaron *Listeria* al alimentarlas con heno de alfalfa contaminado con este microorganismo, el cual representó la mayor proporción de la dieta. Estos investigadores mostraron que la alimentación con dietas con alto contenido de forraje o bajo contenido de proteína resultó en la mayor diseminación de *Listeria* comparado con la alimentación con dietas de bajo contenido de forraje y alto contenido de proteína. Sin embargo, la fuente de DDGS usada en este estudio no contenía niveles detectables de *E. coli* ni *Listeria* spp.

Conclusiones

Las bacterias patógenas de origen alimentario continúan siendo una amenaza importante para la salud humana en muchos países del mundo, a pesar de la implementación de las reglamentaciones de inocuidad alimentaria. Aunque las estrategias de sanidad posteriores a la producción han reducido la presencia de *E. coli* O157:H7 y *Listeria monocytogenes* en los productos cárnicos y lácteos, la implementación de estrategias de intervención previas pueden reducir aún más el riesgo de patógenos de origen alimentario en los animales de consumo, antes de que entren a la cadena alimentaria. Algunas materias primas de alimentos balanceados parecen alterar los niveles de diseminación de la *E. coli* O157:H7, pero estos efectos no siempre han sido consistentes. El ayuno y la alimentación de forraje de mala calidad han mostrado que incrementan la diseminación de *E. coli* O157:H7 en el ganado, pero el cambio abrupto de una dieta alta en granos a una dieta de heno de alta calidad ha mostrado que reduce la población de *E. coli* O157:H7. Se necesitan hacer más investigaciones para identificar el mecanismo (por ejemplo, exclusión competitiva, eliminación física, calidad de forraje, taninos, lignina y otros fenólicos) por medio del cual la alimentación del forraje impacte la población microbiana del tubo intestinal rumiante, como por ejemplo la ecología de las poblaciones de *E. coli* y de *E. coli* O157:H7, para poder implementar modificaciones prácticas de la dieta. Además, poco se sabe sobre los efectos de la composición de la dieta y el uso de distintos ingredientes de alimentos en la diseminación de *Listeria* en el ganado lechero y de engorde.

Bibliografía

- Bach, S.J., T.A. McAllister, D.M. Veira, V.P.J. Gannon, and R.A. Holley. 2002. Transmission and control of *Escherichia coli* O157:H7: a review. *Can J. Anim. Sci.* 82:475-490.
- Berg, J., T. McAllister, S. Bach, R. Stilborn, D. Hancock, and J. LeJeune. 2004. *Escherichia coli* O157:H7 excretion by commercial feedlot cattle fed either barley- or corn-based finishing diets. *J. Food Protection* 67:666-671.

- Biswas, S., M. Niu, J.A.D.R.N. Appuhamy, A.B. Leytem, R.S. Dungan, E. Kebreab, and P. Pandey. 2016. Impacts of dietary forage and crude protein levels on the shedding of *Escherichia coli* O157:H7 and *Listeria* in dairy cattle feces. *Livest. Sci.* 194:17-22.
- Callaway, T.R., S.E. Dowd, T.S. Erdington, R.C. Anderson, N. Krueger, N. Bauer, P.J. Kononoff, and D.J. Nisbet. 2010. Evaluation of bacterial diversity in the rumen and feces of cattle fed different levels of dried distillers grains plus solubles using bacterial tag-encoded FLX amplicon pyrosequencing. *J. Anim. Sci.* 88:3977-3983.
- Callaway, T.R., M.A. Carr, T.S. Erdington, R.C. Anderson, and D.J. Nisbet. 2008. Diet, *Escherichia coli* O157:H7, and cattle: A review after 10 years. *Curr. Issues Mol. Biol.* 11:67-80.
- Callaway, T.R., T.S. Erdington, A.D. Brabban, J.E. Keen, R.C. Anderson, M.L. Rossman, M.J. Engler, K.J. Genovese, B.L. Gwartney, J.O. Reagan, T.L. Poole, R.B. Harvey, E.M. Kutter, and D.J. Nisbet. 2006. Fecal prevalence of *Escherichia coli* O157, *Salmonella*, *Listeria*, and bacteriophage infecting *E. coli* O157:H7 in feedlot cattle in the southern plains region of the United States. *Foodborne Pathog. Dis.* 3:234-244.
- Callaway, T.R., R.O. Elder, J.E. Keen, R.C. Anderson, and D.J. Nisbet. 2003. Forage feeding to reduce preharvest *Escherichia coli* populations in cattle, a review. *J. Dairy Sci.* 86:852-860.
- Caro, M.R., E. Zamora, L. Leon, F. Cuello, J. Salinas, D. Megias, M.J. Cubero, and A. Contreras. 1990. Isolation and identification of *Listeria monocytogenes* in vegetable byproduct silages containing preservative additives and destined for animal feeding. *Anim. Feed Sci. Technol.* 31:285-291.
- CDC. 2014. Surveillance of Foodborne Disease Outbreaks, United States, 2012 (Annual Report). U.S. Department of Health and Human Services, Centers for Disease Control and Prevention, Atlanta, GA.
- Dewell, G.A., J.R. Ransom, R.D. Dewell, K. McCurdy, I.A. Gardner, A.E. Hill, J.N. Sofos, K.E. Belk, G.C. Smith and M.D. Salman. 2005. Prevalence of and risk factors for *Escherichia coli* O157 in market-ready beef cattle from 12 U.S. feedlots. *Foodborne Path. Dis.* 2:70-76.
- Diez-Gonzalez, F., T.R. Callaway, M.G. Kizoulis and J.B. Russell. 1998. Grain feeding and the dissemination of acid-resistant *Escherichia coli* from cattle. *Science* 281:1666-1668.
- Fenlon, D.R., J. Wilson, and W. Donachie. 1996. The incidence and level of *Listeria monocytogenes* contamination of food sources at primary production and initial processing. *J. Appl. Bacteriol.* 81:641-650.
- Gyles, C.L. 2007. Shiga toxin-producing *Escherichia coli*: an overview. *J. Anim. Sci.* 85(E-Suppl.):E45-E62.
- Hancock, D.D., T.E. Besser, C. Gill and C.H. Bohach. 2000. Cattle, hay, and *E. coli*. *Science* 284:49-50.
- Hill, D.D., W.E. Owens, and P.B. Tchounwou. 2006. Prevalence of *Escherichia coli* O157:H7 bacterial infections associated with the use of animal wastes in Louisiana for the period 1996-2004. *Int. J. Environ. Res. Pub. Health* 3:107-113.
- Ho, A.J., R. Ivanek, Y.T. Grohn, K.K. Nightingale, and M. Wiedemann. 2007. *Listeria monocytogenes* fecal shedding in dairy cattle shows high levels of day-to-day variation and includes outbreaks and sporadic cases of shedding of specific *L. monocytogenes* subtypes. *Prev. Vet. Med.* 80:287-305.
- Hovde, C.J., P.R. Austin, K.A. Cloud, C.J. Williams and C.W. Hunt. 1999. Effect of cattle diet on *Escherichia coli* O157:H7 acid resistance. *Appl. Environ. Microbiol.* 65:3233-3235.
- Hussein, H.S. 2007. Prevalence and pathogenicity of Shiga toxin-producing *Escherichia coli* in beef cattle and their products. *J. Anim. Sci.* 85(E. Suppl.):E63-E72.
- Jacob ME, J.T. Fox, J.S. Drouillard, D.G. Renter, and T.G. Nagaraja. 2009. Evaluation of feeding dried distiller's grains with solubles and dry-rolled corn on the fecal prevalence of *Escherichia coli* O157:H7 and *Salmonella* spp. in cattle. *Foodborne Pathog. Dis.* 6(2):145-53.
- Jacob, M.E., J.T. Fox, J.S. Drouillard, D.G. Renter, & T.G. Nagaraja. 2008a. Effects of feeding dried distillers' grains on fecal prevalence and growth of *Escherichia coli* O157 in batch culture fermentations from cattle. *Appl. Environ. Microbiol.* 74:38-43.
- Jacob, M.E., J.T. Fox, S.K. Narayanan, J.S. Drouillard, D.G. Renter, and T.G. Nagaraja. 2008b. Effects of feeding wet corn distiller's grains with soluble with or without monensin and tylosin on the prevalence and antimicrobial susceptibilities of fecal food-borne pathogenic and commercial bacteria in feedlot cattle. *J. Anim. Sci.* 86:1182-1190.
- Jacob, M.E., G.L. Parsons, M.K. Shelor, J.T. Fox, J.S. Drouillard, D.U. Thomson, D.G. Renter, and T.G. Nagaraja. 2008c. Feeding supplemental dried distiller's grains increases fecal shedding *Escherichia coli* O157 in experimentally inoculated calves. *Zoonoses Publ. Hlth.* 55:125-132.
- Keen, J. E., G. A. Uhlich, and R. O. Elder. 1999. Effects of hay- and grain-based diets on fecal shedding in naturally-acquired enterohemorrhagic *E. coli* (EHEC) O157 in beef feedlot cattle. In 80th Conf. Res. Workers in Anim. Dis., Chicago, IL. (Abstr.)

- Keen, J.E., L.M. Durso and T.P. Meehan. 2007. Isolation of *Salmonella enterica* and shiga-toxigenic *Escherichia coli* O157 from feces of animals in public contact areas of United States zoological parks. *Appl. Environ. Microbiol.* 73:362-365.
- LeJeune, J.T., T.E. Besser, and D.D. Hancock. 2001. Reduction of fecal shedding of enterohemorrhagic *Escherichia coli* O157. *Appl. Environ. Microbiol.* 67:3053-3057.
- Nagaraja, T.G., J. Drouillard, D. Renter, & S. Narayanan. 2008. Distiller's grains and food-borne pathogens in cattle: Interaction and intervention. *KLA News and Market Report* Vol. 33, No. 35.
- Naylor, S.W., J.C. Low, T.E. Besser, A. Mahajan, G.J. Gunn, M.C. Pearce, I.J. McKendrick, D.G.E. Smith, and D.L. Gally. 2003. Lymphoid follicle dense mucosa at the terminal rectum is the principal site of colonization of enterohemorrhagic *Escherichia coli* O157:H7 in the bovine host. *Infect. Immun.* 71:1505:1512.
- Pauly, T.M., I.B. Hansson, and W.A. Tham. 1999. The effect of mechanical forage treatments on the growth of *Clostridium tyrobutyricum* and *Listeria monocytogenes* in grass silage. *Anim. Feed Sci. Technol.* 78:127-139.
- Pell, A.N. 1997. Manure and microbes: public and animal health problem? *J. Dairy Sci.* 80:2673-2681.
- Peterson, R.E., T.J. Klopfenstein, R.A. Moxley, G.E. Erickson, S. Hinkley, G. Bretschneider, E.M. Berberov, D. Rogan, and D.R. Smith. 2007. Effect of a vaccine product containing type III secreted proteins on the probability of *E. coli* O157:H7 fecal shedding and mucosal colonization in feedlot cattle. *J. Food Protection* 70:2568-2577.
- Reinstein, S., J.T. Fox, X. Shi, and T.G. Nagaraja. 2007. Prevalence of *Escherichia coli* O157:H7 in gallbladders of beef cattle. *Appl. Env. Microbiol.* 73:1002-1004.
- Renter, D.G., and J.M. Sargeant. 2002. Enterohemorrhagic *Escherichia coli* O157: epidemiology and ecology in bovine production environments. *Anim. Health res. Rev.* 3:83-94.
- Ryster, E.T., S.M. Arimi, and C.W. Donnelly. 1997. Effects of pH on distribution of *Listeria* Ribotypes in corn, hay, and grass silage. *Appl. Environ. Microbiol.* 63:3695-3697.
- Sargeant, J.M., M.W. Sanderson, R.A. Smith, and D.D. Griffin. 2003. *Escherichia coli* O157 in feedlot cattle feces and water in four major feeder-cattle states in the USA. *Prev. Vet. Med.* 61:127-135.
- Siragusa, G.R., J.S. Dickson, and E.K. Daniels. 1993. Isolation of *Listeria* spp. from feces of feedlot cattle. *J. Food Protection* 56:102-105.
- Skovgaard, N., and C. Morgen. 1988. Detection of *Listeria* spp. in faeces from farm animals, in feeds, and in raw foods of animal origin. *Int. J. Food Microbiol.* 6:229-242.
- Stanford, K., D. Croy, S.J. Bach, G.L. Wallins, H. Zahiroddini, and T.A. McAllister. 2005. Ecology of *Escherichia coli* O157:H7 in commercial dairies in southern Alberta. *J. Dairy Sci.* 88:4441.
- Synge, B.A., M.E. Chase-Topping, G.F. Hopkins, I.J. McKendrick, F. Thomson-Carter, D. Gray, S.M. Rusbridge, F.I. Munro, G. Foster and G.J. Gunn. 2003. Factors influencing the shedding of verocytotoxin-producing *Escherichia coli* O157 by beef suckler cows. *Epidemiol. Infect.* 130:301-312.
- Thurston-Enriquez, J.A., J.E. Gilley, and B. Eghball. 2005. Microbial quality of runoff following land application of cattle manure and swine slurry. *J. Water Health* 3:157-171.
- USDA-APHIS. 1997. An update: *Escherichia coli* O157:H7 in humans and cattle.
- Vugia, D., A. Cronquist, J. Hadler, M. Tobin-D'Angelo, D. Blythe, K. Smith, S. Lathrop, D. Morse, P. Cieslak, T. Jones, K.G. Holt, J.J. Guzewich, O.L. Henao, E. Scallan, F.J. Angulo, P.M. Griffin and R.V. Tauxe. 2007. Preliminary FoodNet data on the incidence of infection with pathogens transmitted commonly through food --- 10 states, 2006. *Morbid. Mortal. Weekly Rep.* 56:336-339.

DDGS reducidos en aceite en las dietas de ganado lechero

Introducción

LOS DDGS DE MAÍZ SON UN EXCELENTE INGREDIENTE DE ALIMENTOS para usarse en raciones de vacas lecheras lactantes, que consumen casi 30 por ciento de las 38 millones de toneladas de coproductos DDGS que se producen en EE. UU. Los granos de destilería son una excelente fuente de energía, de fibra fácilmente fermentable, proteína y minerales para las vacas lecheras lactantes, así como para vacas secas y terneras de reemplazo. Se han publicado varios resúmenes excelentes (Schingoethe et al., 2009; Kalscheur et al., 2012a,b; y Kalscheur, 2013) sobre los beneficios, limitaciones y aplicaciones en alimentación de los DDGS de maíz en el ganado lechero. Los resultados de numerosos estudios han mostrado que una inclusión del 20 por ciento de DDGS en raciones totales mezcladas (TMR) es óptimo para sustentar la máxima producción y composición adecuada de la leche (Schingoethe et al., 2009), al tiempo que se minimiza la excreción de fósforo en el estiércol (Schmit et al., 2009). La principal preocupación de añadir más del 20 por ciento de DDGS en las TMR es la posible disminución de la grasa láctea, ya que los lípidos de los DDGS son altos en ácidos grasos poliinsaturados. A menudo, se considera que la carga de ácidos grasos insaturados del rumen es el factor de riesgo más probable causante de la disminución de la grasa láctea, pero no es el único factor relacionado con esto (Kalscheur, 2013). Otros factores de riesgo que contribuyen a esta disminución son la composición variable de nutrientes, falta de fibra eficaz adecuada de distintos ingredientes y cantidades crecientes de carbohidratos fermentables. De hecho, Kalscheur (2005) mostró que la alimentación de dietas con DDGS causó disminución de la grasa láctea solo si contienen menos del 50 por ciento de forraje o menos del 22 por ciento de FND del mismo. Por lo tanto, al alimentar dietas con alto contenido (mayor al 20 por ciento) de DDGS, se recomienda que al menos un 22 por ciento de FND de la dieta total lo brinde el forraje. Además, la mayoría de los DDGS producidos en la actualidad tienen un contenido de grasa cruda más bajo (de 5 a 9 por ciento) comparado con los DDGS de alto contenido de aceite tradicionales (mayor al 10 por ciento de grasa cruda), lo que va a resultar en que el aceite de los DDGS tenga menor capacidad de modificar el ambiente microbiano ruminal y reduzca así el riesgo de disminución de grasa láctea. Por ende, si en la alimentación de DDGS se utilizan enfoques de formulación de dietas adecuados, es poco probable que haya disminución de la grasa láctea.

Composición nutritiva de los DDGS para ganado lechero

Ventajas nutricionales de los DDGS

Los DDGS de maíz cuentan con varias ventajas nutricionales en las raciones de vacas lecheras, en comparación con otros ingredientes de proteína (Yildiz y Todorov, 2014).

1. Contenido de proteína relativamente alto (de 26 a 38 por ciento)
2. Alto contenido de energía (2.03 Mcal/kg EN_L)
3. Alta concentración de proteína de sobrepaso (55 por ciento de proteína cruda)
4. Bajo contenido de almidón que disminuye el potencial de que las raciones con alto contenido de energía causen acidosis ruminal
5. Contiene células de levaduras deshidratadas que proporcionan vitaminas, mejora la palatabilidad, mayor digestibilidad de la fibra y síntesis de proteína microbiana
6. Fibra neutrodetergente (FND) altamente digestible que aumenta el contenido de energía y estimula los microorganismos del rumen
7. Alto contenido de metionina que brinda la oportunidad de mezclar ingredientes de alimentos con un contenido de metionina más bajo
8. Concentración relativamente alta (de 0.7 a 0.9 por ciento) de fuentes de fósforo fácilmente disponibles y económicas
9. No contiene factor antinutricionales
10. A pesar de su contenido relativamente bajo de lisina, brinda un desempeño de producción de leche comparable a la alimentación con harina de soya y harina de colza, lo que permite que la proporción de lisina a metionina se acerque a la recomendada de 3:1 sin que se afecte el contenido de proteína láctea.

No es de sorprender que gracias a todos estos beneficios nutricionales del uso de los DDGS como ingrediente de alimento en las dietas de vacas lecheras lactantes, sea un suplemento de energía y proteína de gran popularidad y ampliamente usado en la industria lechera de EE. UU.

Energía

Se han realizado pocos estudios para determinar el contenido de energía y la digestibilidad de nutrientes de los DDGS reducidos en aceite en rumiantes. Sin embargo, si se usa la información publicada disponible, Schingoethe et al. (2009) resumieron los valores energéticos publicados de los DDGS de maíz, en los que notifican que el promedio es de 2.25 Mcal EN_L/kg de materia seca, casi 10 por ciento mayor que el del maíz y mayor que 1.97 Mcal EN_L/kg de materia seca notificado por el NRC (2001). Esto se debe al contenido relativamente alto de grasa cruda (de 5 a 12 por ciento) y ala alta proporción de fibra fácilmente digestible (38 por ciento de FND) en los DDGS de maíz. La fibra en los DDGS tiene un contenido bajo de lignina, lo que facilita su alta digestibilidad (de 62 a 71 por ciento; Birkelo et al., 2004; vander Pol et al., 2009).

Nuez-Ortín y Yu (2011) utilizaron el resumen químico y los enfoques biológicos del NRC para predecir los valores de energía de los nuevos coproductos de la producción de bioetanol para vacas lecheras, cuyos estimados se muestran en el **cuadro 1**. Con este enfoque, la digestibilidad verdadera de la proteína y carbohidratos no fibrosos es menor en los DDGS de maíz que en los de trigo, pero los primeros tienen mucho más ácidos grasos digestibles y FND que los segundos. Como resultado, la EN_L a 3x la de mantenimiento fue comparable (2.3 Mcal/kg de materia seca) al notificado por Schingoethe et al. (2009).

Recientemente, Foth et al. (2015) determinaron que el valor energético de los DDGS reducidos en aceite (6.2 por ciento de grasa cruda) en vacas lecheras lactantes era 3.82 Mcal ED/kg de materia seca a 1x la de mantenimiento, 3.41 Mcal EM/kg de materia seca a 1x la de mantenimiento y 2.03 Mcal EN_L /kg de materia seca a 3x la de mantenimiento. Estos estimados son más bajos que los publicados por Schingoethe et al. (2009) de las fuentes de DDGS altas en aceite (menos del 10 por ciento de grasa cruda), pero similares al valor de EN_L notificado por el NRC (2001). En resumen, los resultados de estos pocos estudios indican que el contenido de EN_L a 3 x la de mantenimiento de los DDGS altos en aceite es de 2.25 a 2.30 Mcal/kg de materia seca y para los DDGS reducidos en aceite es alrededor de 2 Mcal/kg de materia seca.

Contenido de aceite y composición de los ácidos grasos de los DDGS

Una de las principales preocupaciones sobre el uso de los DDGS de maíz en las dietas de vacas lecheras en lactación es el contenido relativamente alto de grasa cruda y de la concentración de ácidos grasos insaturados, lo cual deriva en una reducción de contenido de grasa láctea. Distintas encuestas de nutricionistas (Owens, 2009a) y productores de ganado lechero (NASS, 2007) indican que el alto contenido de grasa cruda de los DDGS fue un motivo de preocupación de moderado a alto y una razón primordial por la que no los usan en las raciones de vacas lecheras lactantes.

No obstante, en un metanálisis de 24 experimentos, Kalscheur (2005) mostraron que la alimentación de dietas con DDGS causó disminución de la grasa láctea solo si contienen menos del 50 por ciento forraje o menos del 22 por ciento de FND del forraje. Además, la mayoría de los DDGS producidos en la actualidad tienen un contenido de grasa cruda más bajo (de 5 a 9 por ciento) comparado con los DDGS de alto contenido de aceite tradicionales (mayor al 10 por ciento de grasa cruda), lo que va a resultar en que el aceite de los DDGS tenga menor capacidad de modificar el ambiente microbiano ruminal y reduzca así el riesgo de disminución de grasa láctea. Diaz-Royón et al. (2012) resumieron la composición de los ácidos grasos de las fuentes de DDGS de maíz a partir de varios estudios y los resultados se muestran en el **cuadro 2**. Los ácidos grasos que más abundan en el aceite de maíz extraído de los DDGS son linoleico (C18:2) y oleico (C18:1), los cuales representan alrededor del 74 por ciento de los ácidos grasos totales de los DDGS. Sin embargo, de este resumen, la composición de ácidos grasos entre las fuentes de DDGS, laboratorios y procedimientos analíticos puede variar mucho.

Proteína degradable y digestible sin degradar en el rumen de los DDGS

Yildiz y Todorov (2014) resumieron los estudios publicados que determinaron la proteína degradable en el rumen (PDR) y la digestibilidad de la proteína sin degradar en el intestino delgado (dPNDR) de los DDGS de maíz (**cuadro 3**). Es posible que la gran variación en la degradabilidad ruminal y digestibilidad de la proteína en el intestino delgado de los DDGS de maíz se deba a las diferencias en las temperaturas de secado que usan las plantas de etanol al producirlos. Se ha demostrado también una variación similar en la digestibilidad de aminoácidos, en particular lisina, en las fuentes de DDGS para cerdos y aves. Sin embargo, en general la degradabilidad ruminal de los DDGS de maíz es relativamente baja, lo cual es una ventaja en las dietas de rumiantes. Los DDGS de maíz son una buena fuente de dPNDR que va del 47 al 64 por ciento de proteína cruda. Además, la digestibilidad intestinal de la mayoría de los aminoácidos excede el 93 por ciento, lo cual es ligeramente menor que en la harina de soya, excepto la lisina

Cuadro 1. Comparación de contenido de nutrientes digestibles verdaderos y valor energético de los DDGS de trigo y maíz con un ensayo in situ (base materia seca; adaptado de Nuez-Ortín y Yu, 2011)

Medición	DDGS de trigo	DDGS de maíz
Proteína cruda digestible verdadera %	33.5	22.7
Carbohidratos que no son fibra digestibles verdaderos %	23.6	6.4
Ácidos grasos digestibles verdaderos %	3.7	15.1
FND digestible verdadera %	17.3	33.9
Contenido de energía predicha		
ED_{3x} , kcal/kg de materia seca (ganado lechero)	3,470	3,791
EM_{3x} , kcal/kg de materia seca (ganado lechero)	3,069	3,439
EN_{L3x} , kcal/kg de materia seca (ganado lechero)	1,979	2,299
EN_m , kcal/kg de materia seca (ganado de engorde)	2,110	2,340
EN_g , kcal/kg de materia seca (ganado de engorde)	1,439	1,630

Cuadro 2. Resumen de los estudios que notifican la composición de ácidos grasos (porcentaje de ácidos grasos totales) en los DDGS de maíz (adaptado de Díaz-Royón et al., 2012)

Ácido graso	Tang et al. (2011)	Ranathunga et al. (2010)	Nyoka (2010)	Owens (2009b)	Martinez-Amezcuca et al. (2004)	Anderson et al. (2006)	Promedio
C12:0	0.02	ND	ND	0.01	0.04	0.78	0.21
C14:0	0.07	0.42	3.95	0.38	0.09	2.45	1.23
C16:0	16.7	14.7	16.9	12.5	12.8	15.5	14.9
C16:1	0.16	0.13	2.46	0.11	0.18	ND	0.61
C18:0	2.62	1.99	2.82	1.68	2.03	2.38	2.25
C18:1	23.1	26.9	21.4	38.2	23.2	17	25
C18:2	53.7	50.7	40.2	40.3	56.3	52.5	49
C18:3	0.45	1.60	1.44	1.05	1.48	4.79	1.80
C20:0	1.99	0.39	0.55	0.26	0.39	1.45	0.84
C20:1	0.29	0.22	3.46	0.14	0.27	ND	0.88
C20:2	ND	0.03	0.13	0.03	0.05	ND	0.06

Cuadro 3. Proteína degradable en el rumen y digestibilidad de la proteína no degradable en el rumen en el intestino delgado de DDGS en vacas lecheras (adaptado de Yildiz y Todorov, 2014)

Proteína degradable en el rumen (PDR) %	Proteína no degradable en el rumen digestible (dPNDR) %	Referencia
46	-	Firkins et al., 1984
63.3	50.5	Carvalho et al., 2005
48.7	88.8	MacDonald et al., 2007
57	86.2	Kononoff et al., 2007
22 - 36.5	-	Kleinschmit et al., 2007a
47 - 64	-	Schingoethe et al., 2009
38	64	Cao et al., 2009
-	92.4	Mjoun et al., 2010c
43.7 - 66.9	91.9 - 92.1	Kelzer et al., 2010
45	-	Schingoethe et al., 2009
69.3	-	Oba et al., 2010

cuya digestibilidad en los DDGS es del 8 por ciento comparado con el 97 por ciento de la harina de soya. Sin embargo, los datos proporcionados por Schingoethe et al. (2009) y Mjoun et al., 2010c, mostraron que la concentración de aminoácidos, en especial la lisina (3.15 por ciento de la proteína cruda) y la digestibilidad intestinal de los DDGS de maíz, son mayores que los notificados en el NRC (2001).

Digestibilidad de aminoácidos

Para cubrir los altos requerimientos de producción de la leche y síntesis de proteína láctea, las vacas lecheras lactantes de alta producción requieren de un alto consumo diario de proteína cruda y un mejor suministro y equilibrio de aminoácidos que ingresen al duodeno. Generalmente se acepta que la concentración de proteína láctea aumente ligeramente si se alimentan a las vacas lecheras lactantes con mayores niveles de proteína

de la dieta. Ningún ingrediente de alimentos por sí solo contiene una cantidad adecuada de proteína no degradable en el rumen con el equilibrio idóneo de aminoácidos esenciales que coincida con el perfil de la leche y los requerimientos de una óptima producción de leche. Como resultado, es difícil formular raciones para vacas lecheras lactantes que cubran los requerimientos diarios de todos los aminoácidos esenciales para la producción de leche con los ingredientes comunes.

En años recientes, ha habido un interés importante de suplementar lisina protegida contra el rumen en las dietas de vacas lecheras en lactación con DDGS, ya que las fuentes de proteína de maíz, como los DDGS, cuentan con perfiles de aminoácidos que no coinciden con el de la leche y cuyo contenido de lisina es especialmente bajo. Los modelos metabólicos actuales dificultan el equilibrio de las dietas de proteína metabolizable, debido

a la variabilidad de los ingredientes de alimentos, las diferencias genéticas en el rendimiento de la leche entre vacas, condiciones ambientales y sus interacciones, lo cual lleva a una predicción poco precisa de los aminoácidos absorbidos por el intestino. Sin embargo, se han realizado varios estudios para evaluar la efectividad de suplementar con lisina protegida contra el rumen las dietas de vacas lecheras con DDGS para determinar los posibles beneficios en el rendimiento y composición de la leche.

Boucher et al. (2009) midieron la digestibilidad intestinal de los aminoácidos de la fracción de proteína no degradable en el rumen de cinco fuentes de DDGS para determinar si contenían una fracción de proteína constante no degradable en el rumen e indigestible en el intestino delgado. Los resultados de este estudio mostraron que los DDGS no contienen una fracción de proteína constante no degradable en el rumen e indigestible en el intestino delgado. Por lo tanto, con base en los valores de indigestibilidad obtenidos en este experimento, parece que los DDGS tienen una fracción de proteína indigestible en el intestino, pero que se degrada parcialmente en el rumen, digestible en el intestino después de incubarse en el rumen o ambos.

Swanepoel et al. (2010a) calcularon el potencial de escape del rumen de un producto de lisina protegida contra el rumen y determinaron sus efectos sobre el consumo de alimento, digestibilidad, producción y composición de la leche en vacas lecheras altas productoras. La alimentación de dietas suplementadas con lisina protegida contra el rumen no tuvo efecto en el consumo de materia seca, rendimiento de leche, de proteína láctea verdadera y de lactosa, pero disminuyó la concentración y el rendimiento de la grasa láctea. Disminuyeron las concentraciones en plasma de la mayoría de los aminoácidos, excepto lisina, al dar lisina protegida contra el rumen. Esto indica que la lisina fue el primer aminoácido limitante de estas dietas y la suplementación de lisina protegida contra el rumen mejoró la absorción y utilización de otros aminoácidos. Sin embargo, la suplementación de lisina protegida contra el rumen no tuvo efecto en la síntesis de proteína láctea y disminuyó la concentración de 3-metilhistidina en el plasma, lo cual indica que es probable que haya aumentado la síntesis de proteína del músculo o se haya reducido la degradación. Aunque la lisina haya afectado el recambio de proteínas del músculo y el metabolismo energético haya resultado en diferencias en el consumo, metabolismo y absorción de aminoácidos, así como en la producción de leche; estos investigadores recomendaron no suplementar estas dietas con la lisina protegida debido a los posibles resultados negativos que resultan en la mala predictabilidad de estimar los requerimientos de lisina que se absorbe en el intestino.

En un estudio subsiguiente, Swanepoel et al. (2010b) compararon el uso de tres modelos metabólicos de predicción para calcular los perfiles de aminoácidos de proteína despachada en el intestino en las raciones de ganado lechero y determinar si tenían perfiles de nutrientes lo suficientemente consistentes para desarrollar y suplementar una premezcla de aminoácidos comunes protegidos contra el rumen. Aunque estos investigadores notificaron que parecía haber suficiente consistencia de perfiles de nutrientes entre las raciones de uso común para apoyar el uso de un complejo de aminoácidos protegidos contra el rumen para equilibrar

las raciones del ganado lechero, indicaron que era imposible determinar qué predicciones de los modelos eran correctas.

Robinson et al. (2011) calcularon también el escape del rumen de la lisina protegida en dietas deficientes de lisina, así como sus efectos en el consumo de materia seca, producción de leche y perfiles de aminoácidos en plasma de vacas lecheras altas productoras. La alimentación con lisina protegida contra el rumen aumentó las concentraciones de lisina en plasma en vacas a media lactación, lo que indica que se excedieron los requerimientos de lisina y no era necesaria su suplementación. Con base en las investigaciones anteriores de este grupo, indicaron que la primera prioridad de uso de los aminoácidos es el recambio de proteínas corporales, seguido de la síntesis de los componentes de la leche.

Li et al. (2012) realizaron un estudio para determinar la degradabilidad ruminal in situ de la proteína cruda, los perfiles de aminoácidos de la proteína no degradable en el rumen (PNDR) y la digestibilidad intestinal in vitro de los aminoácidos del trigo y de maíz y los DDGS de trigo y maíz. La degradación ruminal de la proteína cruda en los DDGS fue menor que en los granos correspondientes, pero no hubo diferencias entre los DDGS de trigo y los de maíz. La degradación ruminal de los aminoácidos esenciales fue mayor en los DDGS de trigo, comparados con los de maíz y el perfil de aminoácidos de la PNDR fue diferente entre los tipos de granos y las fuentes de DDGS. La digestibilidad intestinal de los aminoácidos totales y esenciales fue altamente variable entre los aminoácidos individuales y los ingredientes de alimentos, pero no difirieron entre los DDGS de trigo y de maíz. Estos resultados indican que la disponibilidad de aminoácidos varía sustancialmente entre las fuentes de granos y de DDGS.

Paz et al. (2013) alimentaron dietas con 0, 10 o 20 por ciento de DDGS con o sin lisina protegida contra el rumen (60 g/día) para determinar los efectos de los aminoácidos en el rendimiento, composición de la leche y concentración en plasma. Las vacas alimentadas con dietas con 10 o 20 por ciento de DDGS tuvieron un consumo de materia seca y rendimiento de leche similar al de las vacas alimentadas con la dieta control. Las vacas alimentadas con dietas con 20 por ciento de DDGS tuvieron una concentración de proteína láctea y rendimiento mayores, pero fueron similares otros componentes de la leche comparado con las alimentadas con dietas de 0 y 10 por ciento de DDGS. La suplementación de lisina protegida contra el rumen en las dietas de DDGS no tuvo efecto en la producción y composición de la leche. En las vacas alimentadas con las dietas de DDGS fueron menores las concentraciones de arginina, histidina y valina en plasma y mayores las de leucina y metionina en comparación con las alimentadas con la dieta de 0 por ciento de DDGS. Aunque la concentración de lisina en plasma disminuyó conforme aumentaban los niveles de inclusión de DDGS, la suplementación de dietas con lisina protegida contra el rumen no disminuyó la concentración de otros aminoácidos esenciales en plasma, lo que indica que la lisina no es limitante en estas dietas.

En un estudio subsiguiente, Paz y Kononoff (2014) evaluaron los efectos de alimentar dietas isonitrogenadas e isocalóricas

con 15 o 30 por ciento de DDGS reducidos en aceite con o sin suplementación de lisina protegida contra el rumen en las respuestas de la lactación y uso de aminoácidos. La tasa de inclusión en la dieta de DDGS reducidos en aceite no tuvo efecto en el consumo de materia seca, rendimiento de la leche o concentración de grasa láctea y lactosa, pero cuando las vacas se alimentaron con dietas con 30 por ciento de DDGS reducidos en aceite, disminuyó el contenido de proteína láctea. Sin embargo, las vacas alimentadas con dietas con 30 por ciento de DDGS reducidos en aceite tuvieron mayor eficacia de extracción de aminoácidos y tendieron a una mayor concentración de proteína láctea si la dieta estaba suplementada con lisina protegida contra el rumen, que las alimentadas con dietas con 15 por ciento de DDGS. Esta observación indica que en las dietas con 30 por ciento de DDGS no fue adecuada la lisina, pero no hubo diferencia en el rendimiento de proteína láctea entre los tratamientos de la dieta. Estos investigadores especularon que la lisina protegida contra el rumen que se utilizó brindó menos lisina metabolizable de la esperada e indicaron que los tres aminoácidos más limitantes en estas dietas fueron la lisina, arginina y fenilalanina. Estos resultados indican que la suplementación con aminoácidos protegidos contra el rumen en las dietas de vacas lecheras lactantes puede ser útil para suministrar aminoácidos deficientes, pero es necesaria la información precisa sobre la biodisponibilidad de estos aminoácidos.

Mjoun et al. (2010A) determinaron con procedimientos in situ e in vitro la degradabilidad ruminal y digestibilidad intestinal de la proteína y los aminoácidos en la harina de soya extraída con solventes, harina de soya de expeller, soya extruída, DDGS altos y bajos en aceite, granos secos de destilería altos en proteína y DDGS húmedos modificados con solubles. La digestibilidad intestinal de la mayoría de los aminoácidos en los coproductos de DDGS de maíz excedieron 92 por ciento y fue ligeramente menor para los productos de soya, con excepción de la lisina, que promedió 84.6 por ciento en los coproductos de destilería comparado con el 97.3 por ciento de los productos de soya. Los resultados de este estudio indican que la disponibilidad de aminoácidos es comparable entre los coproductos de DDGS de maíz y los productos de soya para las vacas lecheras en lactación.

Mjoun et al. (2010b) evaluaron la respuesta en producción de leche y utilización de aminoácidos de vacas lecheras en lactación temprana alimentadas con dietas 0 por ciento DDGS, 22 por ciento altos en aceite (porcentaje de grasa cruda) o 20 por ciento reducidos en aceite. Las dietas se formularon para tener un contenido de proteína cruda, lípidos, FND y EN similares. Las calificaciones de peso corporal, cambio del peso corporal y condición corporal fueron similares entre los tratamientos de la dieta, pero las vacas alimentadas con la dieta control tendieron a una mayor condición corporal que las alimentadas con las dietas con DDGS (**cuadro 4**). No hubo diferencias en consumo de materia seca, de proteína ni energía neta. Todas las vacas tuvieron un equilibrio energético positivo de los 35 a los 120 días en lactación, pero las vacas alimentadas con la dieta control tuvieron un equilibrio energético mayor, tendieron a tener mayores reservas de energía corporal total y menor eficiencia de la energía que las alimentadas con las dietas de DDGS. Estos resultados indican que es posible que las vacas

alimentadas con la dieta control tengan energía metabolizable con partición preferente hacia reservas de energía corporal en vez de usar esta energía para la producción de leche y síntesis de sus componentes. Entre los tratamientos de la dieta no hubo diferencias en rendimiento de la leche o contenido de grasa láctea y lactosa, pero las vacas alimentadas con dietas de DDGS tuvieron mayor contenido de proteína láctea y rendimiento. Además, en las vacas alimentadas con las dietas de DDGS la eficiencia alimenticia y de nitrógeno tendieron a ser mayores. En el pico de producción láctea (nueve semanas de lactación) se determinó la utilización de aminoácidos, lo cual mostró que la eficacia de la extracción de lisina de la glándula mamaria fue mayor al alimentar a las vacas con dietas de DDGS (76 por ciento) en comparación con las alimentadas con la dieta control (65 por ciento), pero la asimilación de lisina mamaria fue similar (2.56 g/kg leche) entre los tratamientos de la dieta. Además, la asimilación mamaria de metionina tendió a aumentar en las vacas alimentadas con las dietas de DDGS. A pesar de la aparente deficiencia de lisina, en las vacas alimentadas con dietas de DDGS aumentó la concentración de proteína láctea. Estos resultados indican claramente que los DDGS con contenido de aceite alto y reducido son buenas fuentes de energía y aminoácidos metabolizables si se añaden al 20 por ciento de la dieta y que el contenido y disponibilidad de lisina no limita la producción de leche ni la síntesis de proteína láctea de vacas lecheras en lactación que producen 40 kg de leche al día.

Mjoun et al. (2010c) también evaluaron los efectos de alimentar con dietas de 0, 10, 20 o 30 por ciento de DDGS con bajo contenido de aceite (3.5 por ciento de grasa cruda) a vacas lecheras a media lactación (para sustituir a la harina de soya) en la producción y composición de la leche, así como el uso de aminoácidos. El contenido creciente de DDGS en la dieta no tuvo efecto en el consumo de materia seca y rendimiento de la leche y aumentó linealmente el contenido de grasa láctea, mientras que el rendimiento de grasa láctea tendió a aumentar. El creciente nivel de inclusión de DDGS en la dieta no afectó el rendimiento de proteína láctea, pero aumentó cuadráticamente su concentración. El incremento de contenido de DDGS en la dieta aumentó la eficiencia de producción de leche, pero no afectó la eficiencia de uso del nitrógeno. La extracción de lisina de la glándula mamaria aumentó linealmente, mientras que disminuyó de la misma forma la extracción de metionina. Los resultados de este estudio mostraron que la alimentación con dietas de hasta 30 por ciento de DDGS bajos en aceite brinda un desempeño de lactancia y eficiencia nutricional similares al de las vacas alimentadas con la dieta control a base de proteína de soya.

Pereira et al. (2015) determinaron los efectos de alimentar dietas con DDGS suplementadas con lisina y metionina protegidas contra el rumen para sustituir la harina de soya en el desempeño de la lactancia de vacas en lactancia tardía. Los resultados mostraron que la suplementación de dietas con DDGS con lisina y metionina protegidas fue eficaz en mantener el rendimiento y la composición de la leche en sustitución de la harina de soya en dietas de ensilado de maíz bajo en proteína y ensilado de ballico (raigrás) a vacas lecheras en lactancia tardía que producen de 21 a 27 kg de leche/día.

Cuadro 4. Desempeño de la lactancia, utilización de la energía y aminoácidos y composición de la leche al alimentar vacas lecheras de lactación temprana con DDGS altos o reducidos en aceite (adaptado de Mjoun et al., 2010a)

Medición	Control	22% DDGS altos en aceite	20% DDGS reducidos en aceite
Peso y condición corporal de la vaca			
Peso corporal inicial, kg	693	682	660
Peso corporal final, kg	734	722	704
Cambios de peso corporal, kg/día	0.47	0.47	0.53
Calificación de condición corporal ¹	3.43	3.32	3.34
Cambios en la calificación de condición corporal/día	0.14	0.02	0
Consumo de materia seca, proteína y energía			
Consumo de materia seca, kg/día	24.8	24.7	24.6
Consumo de proteína, kg/día	4.3	4.3	4.3
EN _p , Mcal/día ²	41.3	40.1	40.3
EN _m , Mcal/día ³	11	11	11
EN _L , Mcal/día ⁴	26.4	26.5	27.4
Equilibrio energético, Mcal/día ⁵	4.39	1.98	1.98
Reservas energéticas totales ⁶	20.7	20	20.1
Eficiencia de energía ⁷	63.1	66.9	68.1
Producción y eficiencia de la leche			
Rendimiento de leche, kg/día	39.2	38.9	39.8
Rendimiento de la leche corregido por energía ⁸	38	37.8	39.5
Rendimiento de la leche corregido por grasa ⁹	35.7	35.3	37.1
Eficiencia alimenticia ¹⁰	1.50	1.57	1.61
Eficiencia del nitrógeno ¹¹	24.5	26.9	26.5
Absorción mamaria de aminoácidos esenciales, g/kg de leche¹²			
Histidina	0.80	0.91	0.98
Isoleucina	2.07	2.40	2.45
Leucina	3.09	4.03	4.38
Lisina	2.52	2.49	2.68
Metionina	0.58	0.83	0.81
Fenilalanina	1.14	1.39	1.58
Treonina	1.18	1.19	1.30
Triptofano	0.14	0.64	0.50

Cuadro 4. Desempeño de la lactancia, utilización de la energía y aminoácidos y composición de la leche al alimentar vacas lecheras de lactación temprana con DDGS altos o reducidos en aceite (adaptado de Mjoun et al., 2010a)

Medición	Control	22% DDGS altos en aceite	20% DDGS reducidos en aceite
Valina	2.35	2.87	2.87
Composición de la leche			
Grasa %	3.63	3.24	3.57
Grasa, kg/día	1.33	1.34	1.40
Proteína, %	2.82	2.88	2.89
Proteína, kg/día	1.07	1.15	1.14
Lactosa %	4.90	4.99	4.96
Lactosa, kg/día	1.94	1.94	1.96
Sólidos totales %	12.3	12	12.4
Sólidos totales, kg/día	4.73	4.70	4.90
Nitrógeno ureico en leche, mg/dL	11.8	10.9	10.1
Calificación de células somáticas ¹³	3.38	3.91	3.83

¹calificación de condición corporal: de 1 = emaciado a 5 = obeso

²EN_i = consumo de energía neta (EN_i, Mcal/kg × consumo de materia seca, kg/día)

³EN_M = energía neta de mantenimiento = Peso corporal^{0.75} × 0.08; NRC (2001)

⁴EN_L = energía neta necesaria para la lactación = [rendimiento de la leche, kg × (0.029 × grasa láctea %) + (0.0563 × proteína láctea %) + (0.0395 × lactosa %)]; NRC (2001)

⁵Equilibrio energético = EN_i - (EN_M + EN_L)

⁶Reservas totales de energía = (proporción de grasa de la canal vacía × 9.4) + (proporción de proteína de la canal vacía × 5.55); NRC (2001)

⁷Eficiencia energética = EN_L/EN_i × 100

⁸Leche corregida por energía = [0.327 × rendimiento de la leche, kg] + [12.95 × rendimiento de la grasa, kg] + [7.2 × rendimiento de la proteína, kg]

⁹Leche corregida por grasa = [0.4 × rendimiento de la leche, kg] + [15 × rendimiento de la grasa, kg]

¹⁰Eficiencia alimenticia = (leche corregida por energía / consumo de materia seca) × 100

¹¹Eficiencia del nitrógeno = (nitrógeno de la leche, kg/día)/(consumo de nitrógeno, kg/día) × 100

¹²Absorción mamaria = diferencia arterio-venosa × flujo de plasma mamario

¹³Calificación de células somáticas = log conteo de células somáticas

Fósforo

El fósforo es uno de los minerales más importantes y costosos en la nutrición animal, pero también se le considera uno de los principales contaminantes en los sistemas pecuarios intensivos, ya que si se alimenta en exceso, en el estiércol se excretan grandes concentraciones (Humer y Zebeli, 2015). Schmit et al. (2009) mostraron que la excreción de fósforo no aumentó significativamente con la inclusión de niveles moderados (10 por ciento) en las raciones de vacas lecheras lactantes, pero cuando se añaden DDGS en las raciones de vacas secas y terneras, aumentó la cantidad de fósforo disponible para las plantas y se excedieron los requerimientos de fósforo de los cultivos al aplicarles estiércol de este ganado.

El contenido de fósforo en los DDGS es alto (de 0.65 a 0.95 por ciento) y en las dietas de rumiantes ha demostrado una alta disponibilidad (Mjoun et al., 2008), y debido a que las vacas lecheras altas productoras necesitan fósforo suplementario en la ración, se puede usar la adición de DDGS para sustituir parcialmente a los costosos suplementos de fósforo inorgánico. Por lo tanto, para minimizar la excreción en exceso de fósforo en el estiércol, las raciones de vacas lecheras se deben formular para que sean lo más cercanas al requerimiento diario de la vaca (NRC, 2001).

Resumen de los estudios iniciales de alimentar con DDGS altos en aceite, en el desempeño de la lactancia y composición de la leche.

Schingoethe et al. (2009) resumieron numerosos estudios que tratan sobre el valor alimenticio de los DDGS altos en aceite en el ganado lechero. Los DDGS de maíz son una buena fuente de proteína cruda (mayor al 30 por ciento de PC base materia seca), que es alta en proteína no degradable en el rumen (aproximadamente 55 por ciento de proteína cruda). Los DDGS de maíz también son una excelente fuente de energía (la energía neta de lactación es aproximadamente 2.25 Mcal/kg de materia seca), que se deriva de la concentración de grasa intermedia (de 5 a 12 por ciento base materia seca) y de fibra fácilmente digestible (cerca del 39 por ciento de fibra neutrodetergente). El desempeño en la lactación es generalmente similar cuando las vacas se alimentan con granos de destilería húmedos o DDGS, aunque algunos resultados de investigaciones han mostrado una ligera ventaja de alimentar los DDGS húmedos con solubles. Se pueden usar los DDGS de maíz como sustituto parcial tanto de concentrados como de forrajes, pero por lo general se usan como reemplazo del concentrado. Esto se debe a que se

necesita una adecuada fibra eficaz para evitar la disminución de la grasa láctea cuando se usan DDGS en sustitución del forraje en las dietas de vacas lactantes. Las dietas de las vacas lecheras lactantes pueden contener de 20 a 30 por ciento de DDGS base materia seca, siempre y cuando las dietas estén nutricionalmente equilibradas. De hecho, varios estudios han mostrado que la alimentación de dietas con hasta 30 por ciento de DDGS proporcionan una producción de leche similar o mayor en comparación con las vacas que se alimentan con dietas de ingredientes comunes. Aunque se pueden añadir los DDGS en las dietas de vacas lecheras lactantes a niveles mayores al 30 por ciento (base materia seca), el llenado del intestino puede limitar el consumo de materia seca y la producción de la leche. Por lo general se considera a la fibra en los DDGS como un sustituto de los ingredientes altos en almidón, como el maíz, y como resultado minimiza los el riesgo de acidosis, pero no necesariamente lo elimina.

Kalscheur (2005) realizó un metanálisis de datos de 23 experimentos previos y 96 comparaciones de tratamientos que tenían que ver con la alimentación de granos de destilería de maíz húmedos (WDG) o secos (DDGS) a vacas lecheras lactantes. Estos estudios que evaluaron la alimentación con DDGS altos en aceite se publicaron entre 1982 y 2005. Más adelante en este capítulo se analizará un resumen de varios estudios recientes que tratan de la alimentación con DDGS reducidos en aceite. Para evaluar los efectos de la tasa de inclusión en la dieta de los granos de destilería de maíz húmedos y secos sobre el desempeño de la lactancia, los tratamientos se dividieron en cinco categorías de niveles de alimentación: 0 por ciento, de 4 a 10 por ciento, de 10 a 20 por ciento, de 20 a 30 por ciento y más de 30 por ciento base materia seca. También se utilizó la forma de los granos de destilería (húmedos o secos) para separar las respuestas en los análisis.

El consumo de materia seca (CMS) se vio afectado tanto por el nivel de inclusión en la dieta como por la forma de los granos de destilería (**cuadro 5**). Para las vacas en lactancia alimentadas con DDGS, aumentó el consumo de materia seca conforme se aumentaba el nivel de inclusión en la dieta, el cual llegó a su máximo en las vacas que se alimentaron con dietas de entre 20 y 30 por ciento de DDGS. De hecho, estas vacas consu-

mieron 0.7 kg más alimento al día (base materia seca) que las vacas alimentadas con las dietas control sin DDGS. Las vacas alimentadas con más del 30 por ciento de DDGS consumieron alrededor de la misma cantidad de alimento que las las de las dietas control. Aunque el CMS aumentó en las vacas que se alimentaban con dietas con 20 al 30 por ciento de DDGS, fue mayor en las vacas alimentadas con dietas con WDG en los niveles de inclusión más bajos (de 4 a 10 por ciento y de 10 a 20 por ciento). Cuando se incluyeron los WDG en concentraciones mayores al 20 por ciento, disminuyó el CMS y las vacas alimentadas con más del 30 por ciento de WDG tuvieron 2.3 kg/día menos de CMS que el grupo control y 5.1 kg/día menos que las alimentadas con los niveles de 4 a 10 por ciento. Estos resultados muestran que los DDGS de maíz son altamente palatables, porque estimulan el CMS al incluirlos en las dietas para vacas lecheras hasta el 20 por ciento de la materia seca. La disminución del consumo de alimento a niveles de inclusión más altos puede estar causada por la alta concentración de grasa de la dieta, o en el caso de los WDGs, el alto contenido de humedad en la dieta.

No se vio afecta la producción de leche por la forma húmeda o seca de los granos de destilería consumidos, pero hubo una respuesta curvilínea al aumento de los granos de destilería en las dietas para vacas lecheras (**cuadro 5**). Las vacas alimentadas con dietas con 4 a 30 por ciento de granos de destilería produjeron la misma cantidad de leche (0.4 kg/día más leche), que las alimentadas con dietas sin granos de destilería. Cuando las vacas se alimentaron con la tasa de inclusión más alta (mayor al 30 por ciento) de granos de destilería, tendió a disminuir el rendimiento de leche y produjeron casi 0.8 kg/día menos leche que las alimentadas con dietas sin granos de destilería. Sin embargo, las vacas alimentadas con más del 20 por ciento de WDG presentaron una disminución de la producción de leche, lo cual muy probablemente estuvo más relacionado con la reducción del CMS.

El porcentaje de grasa láctea varió al alimentar granos de destilería húmedos o secos, pero no se vio afectado por el nivel en la dieta o contenido de humedad (**cuadro 6**). Las respuestas de la composición de la grasa láctea observadas en este extenso conjunto de datos no apoya la preocupación de

Cuadro 5. consumo de materia seca y rendimiento de la leche de vacas lecheras alimentadas con niveles crecientes de granos secos de destilería de maíz húmedos o secos en la dieta (Kalscheur, 2005)

Nivel de inclusión en la dieta (Base materia seca)	Consumo de materia seca, kg/día			Rendimiento de leche, kg/d		
	Secos	Húmedos	Todos	Secos	Húmedos	Todos
0%	23.5 ^c	20.9 ^b	22.2 ^b	33.2	31.4	33.0
4 – 10%	23.6 ^{bc}	23.7 ^a	23.7 ^a	33.5	34	33.4
10 – 20%	23.9 ^{ab}	22.9 ^{ab}	23.4 ^{ab}	33.3	34.1	33.2
20 – 30%	24.2 ^a	21.3 ^{ab}	22.8 ^{ab}	33.6	31.6	33.5
> 30%	23.3 ^{bc}	18.6 ^c	20.9 ^c	32.2	31.6	32.2
SEM	0.8	1.3	0.8	1.5	2.6	1.4

^{a,b,c} Los valores dentro de una columna seguidos de un sobreíndice diferente son diferentes (P menor que 0.05).

Cuando no hay sobreíndice dentro de una columna, indica que no hubo diferencia significativa entre los niveles de inclusión de granos de destilería en la dieta.

que la alimentación con altas tasas de inclusión de granos de destilería resulte en la disminución de la grasa láctea. Muchos factores pueden afectar la disminución de la grasa láctea, que se pueden evitar proporcionando fibra suficiente de forrajes para mantener una función ruminal adecuada. Los granos de destilería están conformados de 28 a 44 por ciento de fibra neutrodetergente, aunque esta fibra se procesa finamente y se digiere de forma rápida en el rumen. Como resultado, no se considera la fibra de los granos de destilería como ruminalmente eficaz y no debe considerarse igual a la fibra del forraje. Además, los altos niveles de lípidos que brindan los granos de destilería pueden afectar la función del rumen que conduce a una disminución de la grasa láctea. En general, es la combinación de varios factores de la dieta lo que lleva a la reducción significativa de dicho porcentaje de grasa.

El porcentaje de proteína láctea no fue diferente entre las vacas alimentadas con dietas de 0 a 30 por ciento de granos de destilería, además de que la forma de estos granos no alteró la composición de dicha proteína (**cuadro 6**). Sin embargo, el porcentaje de proteína láctea disminuyó 0.13 unidades porcentuales en comparación de las vacas alimentadas con las dietas control al incluir granos de destilería en concentraciones mayores a 30 por ciento de la dieta. A los niveles de inclusión en la dieta más altos, los granos de destilería muy probablemente sustituyeron a todas las otras fuentes de proteína. A estos niveles altos de inclusión, la digestibilidad intestinal de la proteína más baja, las concentraciones de lisina más bajas, así como el desequilibrio del perfil de aminoácidos pudieron haber contribuido a reducir la concentración de proteína láctea. Sin embargo, cabe hacerse notar que las concentraciones más bajas se reportaron con más frecuencia en los estudios realizados en los 80 y 90, cuando la composición de nutrientes y la digestibilidad de los DDGS era diferente al de los producidos actualmente. Los resultados de estudios recientes no mostraron este efecto. La lisina es muy termosensible y puede afectarse negativamente en los DDGS por las altas temperaturas usadas durante la producción y secado en algunas plantas de etanol. Sin embargo, desde la época en que se hicieron estos estudios la tecnología de producción y secado de las plantas de etanol han mejorado sustancialmente, lo cual resulta en una mejor digestibilidad de lisina y aminoácidos de los DDGS.

Estudios recientes que evalúan los efectos de alimentar DDGS con alto y bajo contenido de aceite en el desempeño de la lactancia, composición de la leche, fermentación ruminal y digestibilidad de nutrientes

Varios estudios recientes han mostrado los numerosos beneficios de alimentar a vacas lecheras en lactación con dietas de hasta 30 por ciento de DDGS con alto y bajo contenido de aceite sobre el rendimiento y composición de la leche, así como en las reducciones de emisiones de metano y las respuestas subyacentes de fermentación del rumen y de la digestibilidad de nutrientes que lo fomentan. Es importante comprender los efectos de alimentar vacas lecheras en lactación con DDGS de maíz en la fermentación del rumen y digestibilidad de los nutrientes por varias razones, tales como el impacto en la emisiones de metano, composición del estiércol y excreción de nutrientes, así como el posible riesgo de disminución del contenido de grasa láctea.

Benchaar et al. (2013) evaluaron los efectos de sustituir maíz y harina de soya con 0, 10, 20 o 30 por ciento de DDGS altos en aceite en las dietas de vacas lecheras lactantes en las emisiones intestinales de metano, características de fermentación ruminal, digestibilidad total aparente del tubo digestivo, equilibrio del nitrógeno y producción de leche. El incremento de los niveles de DDGS en la dieta aumentó el consumo de materia seca y rendimiento de la leche, pero disminuyó la digestibilidad total aparente de materia seca y energía bruta en el tubo digestivo (**cuadro 7**). La proporción de acetato a propionato en el rumen disminuyó linealmente como resultado de la disminución de la concentración de acetato, además de que la producción de metano disminuyó linealmente con el incremento de los niveles de DDGS. La reducción en producción de metano se atribuyó a la cantidad creciente de lípidos proporcionados por los DDGS y sus efectos en la degradación de la fibra en el rumen, acetato:propionato y número de protozoarios. Al alimentar con niveles crecientes de DDGS mejoró la eficiencia de uso de nitrógeno, pero también aumentó la excreción de nitrógeno en el estiércol. Los resultados de este estudio indican que la alimentación de

Cuadro 6. Concentración de proteína y grasa lácteas de vacas lecheras alimentadas con niveles crecientes de DDGS de maíz húmedos o secos (Kalscheur, 2005)

Nivel de inclusión de granos de destilería (base materia seca)	Grasa láctea, %	Proteína láctea, %
0%	3.39	2.95 ^a
4 – 10%	3.43	2.96 ^a
10.1 – 2%	3.41	2.94 ^a
20.1 – 30%	3.33	2.97 ^a
> 30%	3.47	2.82 ^b
SEM	0.08	0.07

a,b Los valores dentro de una columna seguidos de un sobreíndice diferente son diferentes (P menor que 0.05).

Cuando no hay sobreíndice dentro de una columna, indica que no hubo diferencia significativa entre los niveles de inclusión de granos de destilería en la dieta.

Cuadro 7. Efectos de alimentar niveles crecientes de DDGS reducidos en aceite a vacas lecheras lactantes sobre el desempeño de la lactancia, pH ruminal, producción de ácidos grasos volátiles del rumen y amoníaco, digestibilidad total aparente del tubo digestivo y producción fecal (adaptado de Benchaar et al., 2013)

Medición	0% de DDGS	10% de DDGS	20% de DDGS	30% de DDGS
Peso corporal inicial, kg	700	701	697	698
Peso corporal final, kg	710	714	724	730
Ganancia de peso, kg/día	0.29	0.35	0.76	0.95
Consumo de materia seca, kg/día	24.2	24.6	24.4	25.3
Rendimiento, eficiencia y composición de la leche				
Rendimiento de leche, kg/día	32.6	35.1	35.8	36.6
Rendimiento de la leche corregido por energía, kg/día ¹	35.3	37.8	37.3	37.1
Leche corregida por grasa al 4%, kg/día ²	32.1	34.5	34.1	33.7
Leche/consumo de materia seca	1.40	1.44	1.44	1.45
Leche corregida por energía/consumo de materia seca	1.51	1.55	1.50	1.46
Leche corregida por grasa/consumo de materia seca	1.37	1.42	1.37	1.33
Grasa láctea, %	3.93	3.91	3.69	3.47
Rendimiento de grasa láctea, kg/día	1.27	1.36	1.32	1.27
Proteína láctea, %	3.49	3.41	3.31	3.31
Rendimiento de proteína láctea, kg/día	1.13	1.19	1.18	1.20
Lactosa en la leche %	4.60	4.63	4.59	4.58
Rendimiento de lactosa en la leche, kg/día	1.50	1.62	1.65	1.68
Nitrógeno ureico en leche, mg/dL	11.1	10	9.9	10.6
Conteo de células somáticas ($\times 10^3$ /mL)	75	82	133	89
pH del rumen				
Mínimo	5.92	5.92	5.98	5.97
Máximo	6.56	6.59	6.64	6.55
Promedio	6.21	6.21	6.27	6.22
Protozoarios ($\times 10^5$ /mL)	5.12	5.28	5.42	4.48
Ácidos grasos volátiles				
Total, mM	99.3	96.1	93.6	91.1
Acetato, mol/100 mol	63.4	62.7	61.8	60.1
Propionato, mol/100 mol	21.8	22.1	22.3	23.1
Isobutirato, mol/100 mol	0.8	0.8	0.7	0.7
Butirato, mol/100 mol	11.5	12	12.8	13.7
Isovalerato, mol/100 mol	1.4	1.2	1.2	1.1
Valerato, mol/100 mol	1.2	1.2	1.2	1.3
Acetato:propionato	63.4	62.7	61.8	60.1
Amoníaco, mg/dL	8.4	7.5	6.7	6.1

Cuadro 7. Efectos de alimentar niveles crecientes de DDGS reducidos en aceite a vacas lecheras lactantes sobre el desempeño de la lactancia, pH ruminal, producción de ácidos grasos volátiles del rumen y amoníaco, digestibilidad total aparente del tubo digestivo y producción fecal (adaptado de Benchaar et al., 2013)

	0% de DDGS	10% de DDGS	20% de DDGS	30% de DDGS
Producción de metano				
g/día	495	490	477	475
g/kg consumo de materia seca	0.6	20.1	19.7	18.9
% de consumo de energía bruta	6.09	5.80	5.61	5.23
% de consumo de energía digestible	8.75	8.39	8.17	7.74
g/kg leche	15.6	14.2	13.6	13.2
g/kg leche corregida por grasa	15.7	14.3	14.3	14.4
g/kg leche corregida por energía	14.3	13.1	13	13
g/kg grasa láctea	396	363	372	390
g/kg proteína láctea	446	415	411	400
Consumo de nutrientes, digestibilidad aparente total de nutrientes en el tubo digestivo y equilibrio de nitrógeno				
Consumo de materia seca, kg/día	23.4	24.4	24.8	25.2
Digestibilidad de materia seca %	70.7	70.2	69.6	68.1
Consumo de materia orgánica, kg/día	21.7	22.7	22.9	23.3
Digestibilidad de materia orgánica %	72.5	71.9	71.1	69.8
Consumo de energía bruta, Mcal/día	104	111	115	119
Digestibilidad de energía bruta %	69.6	69.2	68.7	67.6
Consumo de fibra neutrodetergente, kg/día	7.5	8.2	9	9.5
Digestibilidad de fibra neutrodetergente %	56	56.9	57.4	54.8
Consumo de fibra ácidodetergente, kg/día	5.1	5.3	5.7	5.9
Digestibilidad de fibra ácidodetergente %	60.6	60.4	60.3	60.6
Consumo de proteína cruda, kg/día	3.8	4	4.1	4.3
Digestibilidad de proteína cruda %	67.3	68.3	68.4	69.2
Consumo de almidón, kg/día	4.3	3.9	3.4	2.8
Digestibilidad del almidón %	94.7	95.4	96.2	98.8
Consumo de extracto etéreo, kg/día	0.9	1.2	1.5	1.8
Digestibilidad de extracto etéreo %	53	53.8	57.4	59.4
Consumo de nitrógeno, g/día	606	642	655	682
Nitrógeno fecal excretado, g/día	198	204	207	211
Nitrógeno fecal excretado como porcentaje de consumo de N	32.7	31.7	31.6	30.8
Nitrógeno urinario excretado, g/día	204	209	213	223
Nitrógeno urinario excretado como porcentaje de consumo de N	33.7	32.7	32.7	32.6
Nitrógeno total excretado, g/día	402	413	419	434
Nitrógeno total excretado como porcentaje de consumo de N	66.4	64.4	64.3	63.5
Nitrógeno de la leche g/día	177	187	185	189
Nitrógeno de la leche como porcentaje de consumo de N	29.4	29.1	28.2	27.7

Cuadro 7. Efectos de alimentar niveles crecientes de DDGS reducidos en aceite a vacas lecheras lactantes sobre el desempeño de la lactancia, pH ruminal, producción de ácidos grasos volátiles del rumen y amoníaco, digestibilidad total aparente del tubo digestivo y producción fecal (adaptado de Benchaar et al., 2013)

	0% de DDGS	10% de DDGS	20% de DDGS	30% de DDGS
Nitrógeno retenido, g/día	33	42	51	60
Nitrógeno retenido como porcentaje de consumo de N	5.3	6.5	7.6	8.9
Nitrógeno productivo, g/día	204	229	236	248
Nitrógeno productivo como porcentaje de consumo de N	34.6	35.6	35.7	36.5

¹Leche corregida por energía = 0.327 × rendimiento de la leche (kg/día) + 12.95 × rendimiento de grasa láctea (kg/día) + 7.2 × rendimiento de proteína (kg/día)

²Leche corregida por grasa de 4 por ciento = 0.4 × rendimiento de la leche (kg/día) + 15 × rendimiento de grasa láctea (kg/día)

vacas lecheras lactantes con DDGS es eficaz para reducir las emisiones de metano y al mismo tiempo mejorar el consumo de materia seca y rendimiento de la leche.

Castillo-López (2014) determinó los efectos de alimentar vacas lecheras en la lactación con niveles crecientes (de 0 a 30 por ciento) de DDGS reducidos en aceite en el desempeño de la lactación, fermentación del rumen, flujo intestinal del nitrógeno microbiano y digestibilidad total de nutrientes del tubo digestivo. El aumento de las tasas de inclusión en la dieta de los DDGS reducidos en aceite no tuvo efecto en el rendimiento de la leche y contenido de grasa láctea, pero tendió a incrementar el contenido de proteína láctea (**cuadro 8**). Alimentar con niveles crecientes de DDGS reducidos en aceite disminuyó el pH del rumen, lo cual es parcialmente atribuible a un menor tamaño de partícula de la TMR y quizás haya dado lugar a menos

tiempo que la vaca gastó en masticación para producir saliva y, en consecuencia, tuvo menor efecto amortiguador en el pH del rumen. El nivel de alimentación de DDGS no afectó la concentración de ácidos grasos volátiles ruminales totales y de amoníaco, así como tampoco el flujo de nitrógeno microbiano. La alimentación con cantidades crecientes de DDGS reducidos en aceite tendió a incrementar la digestibilidad de la materia seca, materia orgánica, fibra neutrodetergente y carbohidratos que no son fibra. Los resultados de este estudio indican que la alimentación con hasta 30 por ciento de DDGS reducidos en aceite proporciona excelentes desempeño de lactación y composición de la leche, sin afectar las concentraciones de ácidos grasos volátiles del rumen y el suministro de nitrógeno microbiano; asimismo, tendió a aumentar la digestibilidad total aparente de nutrientes en el tubo digestivo.

Cuadro 8. Efectos de alimentar niveles crecientes de DDGS reducidos en aceite a vacas lecheras lactantes sobre el desempeño de la lactancia, pH ruminal, producción de ácidos grasos volátiles del rumen y amoníaco, digestibilidad total aparente del tubo digestivo y producción fecal (adaptado de Castillo-López, 2014)

Medición	0% DDGS-RA	10% DDGS-RA	20% DDGS-RA	30% DDGS-RA
Peso corporal, kg	687	688	693	697
Calificación de condición corporal	3.06	3.10	3.14	3.18
Consumo de materia seca, kg/día	25.0	23.8	25.9	27.9
Rendimiento y composición de la leche				
Rendimiento de leche, kg/día	34.4	33.2	34.5	34.2
Grasa láctea, %	3.59	3.74	3.64	3.67
Rendimiento de grasa láctea, kg/día	1.24	1.23	1.25	1.26
Proteína láctea, %	3.08	3.18	3.15	3.19
Rendimiento de proteína láctea, kg/día	1.06	1.04	1.07	1.09
Lactosa en la leche %	4.80	4.70	4.73	4.73

Cuadro 8. Efectos de alimentar niveles crecientes de DDGS reducidos en aceite a vacas lecheras lactantes sobre el desempeño de la lactancia, pH ruminal, producción de ácidos grasos volátiles del rumen y amoníaco, digestibilidad total aparente del tubo digestivo y producción fecal (adaptado de Castillo-López, 2014)

Medición	0% DDGS-RA	10% DDGS-RA	20% DDGS-RA	30% DDGS-RA
Rendimiento de lactosa en la leche, kg/día	1.66	1.58	1.62	1.63
Nitrógeno ureico en leche, mg/dL	16.24	15.54	16.23	15.94
pH del rumen				
Mínimo	6.08	6.17	6.06	6.03
Máximo	6.95	8.88	6.83	6.77
Promedio	6.53	6.49	6.38	6.35
Tiempo < 6.5, minutos/día	546	834	941	1,040
Superficie < 6.5, pH x minutos/día	126	158	357	334
Tiempo < 6.3, minutos/día	279	382	936	946
Superficie < 6.3, pH x minutos/día	45	47	180	169
Ácidos grasos volátiles				
Total, mM	136	135	139	131
Acetato, mol/100 mol	63.4	63.4	60.8	60
Propionato, mol/100 mol	22.1	22	25	26.1
Isobutirato, mol/100 mol	0.8	0.8	0.7	0.7
Butirato, mol/100 mol	11.2	11.2	10.6	10.7
Isovalerato, mol/100 mol	0.6	0.6	0.6	0.6
Valerato, mol/100 mol	1.8	1.9	2.1	2.2
Acetato:propionato	2.98	2.94	2.52	2.39
Amoníaco, mg/dL	19	18.8	19.3	17.6
Consumo de nutrientes, digestibilidad total aparente de nutrientes en el tubo digestivo y producción fecal				
Digestibilidad de materia seca %	65.5	65.4	73	73.4
Materia seca fecal, kg/día	6.94	7.20	5.65	5.61
Consumo de materia orgánica, kg/día	19.6	19.9	20	19.3
Digestibilidad de materia orgánica %	67.7	67.7	74.9	75.2
Consumo de carbohidratos que no son fibra, kg/día	7.8	7.6	7.4	6.7
Digestión de los carbohidratos que no son fibra %	89.7	90.1	92.6	92.7
Consumo de fibra neutrodetergente, kg/día	7	7.5	7.8	7.9
Digestibilidad de fibra neutrodetergente %	44	43.2	57	58
Consumo de nitrógeno, kg/día	0.63	0.63	0.63	0.62
Digestibilidad del nitrógeno %	64.3	67.7	74.7	76.9
Nitrógeno fecal, kg/día	0.20	0.20	0.15	0.15
Consumo de fósforo, g/día	73	86	96	109
Digestibilidad del fósforo %	28.1	35	50.2	50.5
Fósforo fecal, g/día	46	54	53	53

Ramírez-Ramírez et al. (2016) compararon los efectos de alimentar dietas con 30 por ciento de DDGS reducidos en aceite (6.6 por ciento de grasa cruda), con y sin 1.9 por ciento de grasa inerte en el rumen y 30 por ciento de DDGS convencionales altos en aceite (12 por ciento de grasa cruda) en fermentación del rumen, desempeño de lactancia y composición de la grasa láctea (**cuadro 9**). La alimentación de fuentes de DDGS con alto y bajo contenido de aceite aumentó el consumo de materia seca y el rendimiento de la leche. Es probable que el aumento de consumo de materia seca fuera resultado de una proporción 1.8 veces mayor de partículas finas (menores a 1.18 mm) de las dietas con DDGS al reemplazar parte del forraje. Como resultado, la composición de ácidos grasos volátiles del líquido ruminal cambió al alimentar dietas con DDGS para reducir la concentración de acetato. La alimentación con fuentes de DDGS altos en aceite redujo el contenido y rendimiento de la grasa láctea, pero no las dietas de 30 por ciento de este ingrediente comparado con las vacas alimentadas con la dieta control. Las especies bacterianas que predominan en el rumen fueron *Bacteroidetes* (54 por ciento) y *Firmicutes* (43 por ciento), con poca tendencia a cambios en la abundancia relativa de algunas familias bacterianas entre los tratamientos de la dieta. La alimentación de dietas con DDGS resultó en un mayor consumo de ácidos grasos poliinsaturados y menor pH del rumen comparado con la dieta control sin DDGS, lo cual quizá sea resultado de una mayor fermentabilidad de este ingrediente en el rumen y de menor masticación y producción de saliva durante la rumia. Estos cambios

de fermentación ocasionaron cambios en la biohidrogenación bacteriana y la formación de ácido linoleico conjugado (isómeros de ALC que suprimen la síntesis de la grasa láctea). Aunque el ALC tras-10, cis-12 es un conocido inhibidor de la síntesis de la grasa láctea, solo se detectó en la leche de unas vacas alimentadas con DDGS con alto contenido de aceite y no en las alimentadas con los otros tratamientos de dietas. Además, la concentración y rendimiento de trans-10 18:1 en la leche fue casi 10 veces mayor en las vacas con las dietas de DDGS en comparación con aquellas alimentadas con la dieta control. Por lo tanto, parece que la alimentación de dietas con DDGS reducidos en aceite disminuyó el suministro y producción ruminal de trans-10 18:1, relacionado con la disminución de la grasa láctea. Asimismo, aunque la alimentación de dietas con DDGS reducidos en aceite resultó en un pH ruminal similar comparado con los DDGS con alto contenido de aceite, no hubo disminución de la concentración o rendimiento de la grasa láctea. Esto probablemente fue el resultado del menor contenido de aceite de la fuente de DDGS reducidos en aceite comparado con la fuente convencional de alto contenido de aceite. Los resultados de este estudio mostraron que la alimentación de DDGS con un contenido alto y reducido de aceite aumenta el consumo de materia seca y apoya una excelente producción y composición de leche, aunque las dietas fueran deficientes en FND del forraje. Aunque el ALC trans-10, cis-12 se relacionaba con una menor producción de grasa láctea, no se observó con las dietas de DDGS reducidos en aceite. Por lo tanto, la alimentación de

Cuadro 9. Efectos de alimentar vacas lecheras lactantes con raciones totales mezcladas con 30 por ciento de DDGS reducidos en aceite (6.6% de grasa cruda), con o sin grasa inerte en el rumen, o 30 por ciento de DDGS convencionales altos en aceite (12% de grasa cruda) en el desempeño de la lactancia, composición de la leche, fermentación del rumen, digestibilidad total aparente de nutrientes en el tubo digestivo (adaptado de Ramírez-Ramírez et al., 2016)

Medición	0% de DDGS	30% DDGS-AA	30% DDGS-RA	30% RO-DDGS+GIR
Peso corporal, kg	607 ^b	619 ^a	616 ^a	619 ^a
Calificación de condición corporal	3.1	3.2	3.1	3.2
Consumo de materia seca, kg/día	21.6 ^b	25.8 ^a	26.1 ^a	26.1 ^a
Rendimiento y composición de la leche				
Rendimiento de leche, kg/día	32.2 ^b	33.8 ^a	33.8 ^a	34.0 ^a
Leche corregida por grasa al 3.5% ¹	33.2 ^b	32.8 ^b	34.3 ^{ab}	35.0 ^a
Grasa láctea, %	3.69 ^a	3.27 ^b	3.65 ^a	3.70 ^a
Rendimiento de grasa láctea, kg/día	1.18 ^a	1.11 ^b	1.22 ^a	1.25 ^a
Rendimiento de los ácidos grasos totales, g/día	1,103 ^a	1,036 ^b	1,137 ^a	1,166 ^a
Ácidos grasos insaturados totales, g/día	314 ^c	400 ^a	365 ^b	398 ^a
Ácidos grasos poliinsaturados totales, g/día	49	79	77	78
Ácidos grasos saturados totales, g/día	787 ^a	636 ^b	765 ^a	766 ^a
18:1 trans-10	5.6 ^b	18.9 ^a	6.4 ^b	7.6 ^b
18:2 cis-9, trans-11	4.8 ^d	13.7 ^a	9.1 ^c	11.0 ^b
18:2 trans-10, cis-12	-	0.05	-	-
Proteína láctea, %	3.07 ^c	3.22 ^a	3.21 ^a	3.12 ^b
Rendimiento de proteína láctea, kg/día	1 ^b	1.10 ^a	1.07 ^a	1.06 ^a

Cuadro 9. Efectos de alimentar vacas lecheras lactantes con raciones totales mezcladas con 30 por ciento de DDGS reducidos en aceite (6.6% de grasa cruda), con o sin grasa inerte en el rumen, o 30 por ciento de DDGS convencionales altos en aceite (12% de grasa cruda) en el desempeño de la lactancia, composición de la leche, fermentación del rumen, digestibilidad total aparente de nutrientes en el tubo digestivo (adaptado de Ramírez-Ramírez et al., 2016)

	0% de DDGS	30% DDGS-AA	30% DDGS-RA	30% RO-DDGS+GIR
Nitrógeno ureico en leche, mg/dL	15.3 ^b	15.2 ^b	16.4 ^a	15.9 ^a
Fermentación ruminal				
pH	6.17 ^a	5.80 ^b	5.78 ^b	6.02 ^{ab}
Ácidos grasos volátiles totales, mM	116	121	127	119
Acetato, mol/100 mol	67.3 ^a	60.9 ^c	61.4 ^{bc}	63.2 ^b
Propionato, mol/100 mol	18.2 ^c	23.6 ^a	23.1 ^a	20.7 ^b
Isobutirato, mol/100 mol	0.85	0.66	0.69	0.76
Butirato, mol/100 mol	11.6	12.5	12.3	12.8
Isovalerato, mol/100 mol	0.56	0.56	0.51	0.62
Valerato, mol/100 mol	1.62 ^b	1.84 ^{ab}	2 ^a	1.91 ^a
Acetato:propionato	3.74 ^a	2.64 ^c	2.68 ^{bc}	3.05 ^b
Amoniaco, mg/dL	25.6	28.5	27.4	26.5
Digestibilidad total aparente de nutrientes en el tubo digestivo				
Digestibilidad de materia seca %	50.6 ^c	58.0 ^b	67.1 ^a	59.1 ^b
Digestibilidad de materia orgánica %	52.6 ^c	59.9 ^b	69.3 ^a	60.9 ^b
Digestibilidad de fibra neutrodetergente %	32.5 ^c	43.8 ^{ab}	53.0 ^a	43.2 ^b
Digestibilidad del nitrógeno %	53.2 ^c	63.8 ^b	72.6 ^a	64.4 ^b

¹Leche corregida por grasa al 3.5 por ciento = (grasa láctea, kg × 16.216) + (rendimiento de la leche, kg × 0.4324)

dietas con 30 por ciento de DDGS reducidos en aceite reduce el riesgo de disminución de la grasa láctea.

Whelen et al. (2017) evaluaron la alimentación con una mezcla de bioproductos con proporciones iguales (11.6 o 31 por ciento) de cascarilla de soya, DDGS y extracto de palmiste para sustituir la cebada y harina de soya en dietas de vacas lecheras a media lactación en pastoreo de raigrás perenne (ballico). Los resultados de este estudio mostraron que es posible sustituir la cebada y harina de soya con cascarilla de soya, DDGS y harina de palmiste sin afectar las mediciones de producción de la leche, digestibilidad y metabólicas en vacas lecheras en pastoreo de raigrás perenne.

Satisfacción del consumidor y beneficios a la salud de consumir leche

Varios estudios demostraron que la alimentación de vacas lecheras lactantes con DDGS aumenta la concentración de ácidos grasos insaturados en la leche, lo cual potencialmente conduce a la peroxidación y desarrollo de malos sabores. Por lo tanto, Testroet et al. (2015) determinaron los efectos en la composición química y características de sabor de la leche al alimentar vacas lecheras lactantes con 0, 10 o 25 por ciento de DDGS. El contenido de peróxidos y ácidos grasos libres en la

leche fue bajo y casi todos estuvieron por debajo del límite de detección. Los resultados de este estudio indican que aunque la alimentación de dietas con DDGS alteró la composición de la leche, no contribuyó al desarrollo de malos sabores.

En años recientes, ha habido un enorme interés por mejorar los beneficios para la salud humana al aumentar los compuestos lácteos con efectos benéficos sobre la salud. Una de estas sustancias es el ácido linoleico conjugado cis-9, trans-11 (ALC), que ha demostrado reducir los riesgos de carcinógenos y de aterosclerosis, además de mejorar la inmunidad. Como resultado, ha habido varios intentos de aumentar el contenido de ALC en la leche a través de cambios en la dieta. Anderson et al. (2006) y Sasikala-Appukuttan et al. (2008) mostraron que la alimentación de dietas con 10 a 20 por ciento de DDGS aumentó la concentración de ALC en la leche sin afectar el consumo de materia seca, rendimiento de la leche y concentración de grasa láctea. Más recientemente, Kurokawa et al. (2013) alimentaron vacas lecheras lactantes con dietas con 0, 10 o 20 por ciento de DDGS con alto contenido de fibra neutrodetergente (46 por ciento) y confirmaron que aumentó el rendimiento de la leche así como notablemente su contenido de ALC. Por lo tanto, parece que uno de los beneficios adicionales de alimentar vacas lecheras lactantes con DDGS es la mejora en los beneficios para la salud humana de consumir leche.

Alimentación de DDGS en terneras lecheras prepúberes

La mayoría de las investigaciones sobre la alimentación de DDGS en ganado lechero se centra en vacas lecheras maduras lactantes, con pocas investigaciones sobre los efectos en el desempeño a largo plazo del crecimiento, de reproducción y lactancia de terneras lecheras. Aunque investigaciones previas han mostrado que la alimentación de DDGS mejora el desempeño reproductivo de terneras de engorde (Martin et al., 2007; Engle et al., 2008), hasta hace poco se han realizado unos cuantos estudios con terneras lecheras. Anderson et al. (2015a,b) demostraron que las terneras lecheras alimentadas con dietas con altas cantidades de DDGS reducido en aceite (22 por ciento) y DDGS convencionales altos en aceite (34 por ciento) tuvieron mayor GDP (0.96 kg/día) y digestibilidad total aparente de nutrientes en el tubo digestivo. Además, Anderson et al. (2015b) mostraron que la alimentación de dietas con alto contenido de DDGS mantuvo el estado energético con base en las concentraciones plasmáticas de leptina, IGF-1 e insulina similares, pero la alimentación de dietas de DDGS con alto contenido de aceite aumentó la concentración de colesterol del plasma y de ácidos grasos comparado con una dieta de DDGS reducidos en aceite. Es posible que los incrementos de lípidos plasmáticos mejoren el desempeño reproductivo

(Talavera et al., 1985; Thomas et al., 1997; Funston, 2004). Para evaluar más a fondo estas respuestas, Anderson et al. (2015c) determinaron el desempeño reproductivo, medidas corporales y las subsiguientes producción y composición de la leche al alimentar 33 terneras lecheras prepúberes con una dieta control a base de productos de maíz y soya, dietas con 22 por ciento de DDGS reducidos en aceite o 34 por ciento de DDGS con alto contenido de aceite durante 24 semanas hasta el parto y cuatro meses subsiguientes de lactancia. No hubo diferencias de edad en el primer servicio, número de inseminaciones, edad en la concepción o parto (**cuadro 10**). Las terneras alimentadas con la dieta de DDGS altos en aceite tuvieron menor altura a la cruz y longitud corporal comparadas con las alimentadas con la dieta control o de DDGS reducidos en aceite. Las terneras alimentadas con la dieta de DDGS reducidos en aceite tuvieron un rendimiento de leche mayor que las de las otras dietas, además de que el contenido de proteína y grasa láctea y rendimiento fueron similares entre los tratamientos. Estos resultados muestran que la alimentación de terneras prepúberes con dietas con DDGS reducidos en aceite o altos contenido de aceite en sustitución del maíz y productos de soya mantuvo o mejoró el desempeño reproductivo y de la lactación. Además, el aceite de los DDGS puede sustituir de manera eficaz al almidón del maíz sin efectos perjudiciales en el desempeño consiguiente.

Cuadro 10. Desempeño reproductivo, medidas corporales, desempeño de lactación y composición de la leche de terneras lecheras alimentadas durante 24 semanas previas al parto y cuatro meses de lactación subsiguiente con dietas con 22 por ciento de DDGS reducidos en aceite y 34 por ciento de DDGS altos en aceite (adaptado de Anderson et al., 2015c)

Medición	0% de DDGS	22% DDGS reducidos en aceite	34% DDGS altos en aceite
Edad en el primer servicio, días	394	400	398
Número de inseminaciones artificiales	2.11	2.89	1.78
Edad en la concepción, días	455	483	444
Edad en el primer parto, días	733	764	728
Medición corporal, 3 semanas previas al parto			
Peso corporal, kg	681	678	638
Altura a la cruz, cm	144 ^a	144 ^a	140 ^b
Altura de la pelvis, cm	147	147	144
Circunferencia del corazón, cm	206	206	203
Longitud corporal, cm	145 ^a	144 ^a	140 ^b
Calificación de condición corporal	3.4	3.4	3.4
Mediciones corporales, en el parto			
Peso corporal, kg	634	621	590
Calificación de condición corporal	3.3	3.1	3.2
Peso corporal del ternero, kg	40.8	41.6	41.6
Núm. de problemas de parto	1	2	2
Núm. de transiciones logradas	9	9	9

Cuadro 10. Desempeño reproductivo, medidas corporales, desempeño de lactación y composición de la leche de terneras lecheras alimentadas durante 24 semanas previas al parto y cuatro meses de la lactación subsiguiente con dietas con 22 por ciento de DDGS reducidos en aceite y 34 por ciento de DDGS altos en aceite (adaptado de Anderson et al., 2015c)

	0% de DDGS	22% DDGS reducidos en aceite	34% DDGS altos en aceite
Edad al entrar en lactancia, días	732	764	728
Rendimiento de leche, kg/día	33.0 ^b	36.4 ^a	34.7 ^{ab}
Leche corregida por energía ¹ , kg/día	34.4	37.9	35.1
Proteína láctea, %	2.94	3.01	3.03
Rendimiento de proteína láctea, kg/día	0.98	1.08	1.03
Grasa láctea, %	3.98	3.94	3.86
Rendimiento de grasa láctea, kg/día	1.28	1.41	1.28
Células somáticas, $\times 10^3$ /mL	53.4	124.4	299.6

^{a, b}Las medias en las filas con diferentes superíndices son diferentes (P menor que 0.05).

¹Leche corregida por energía = (0.327 \times kg leche) + (12.95 \times kg grasa láctea) + (7.2 \times kg proteína láctea)

Estudios adicionales también han mostrado beneficios consistentes de alimentar terneras lecheras en crecimiento con dietas de DDGS con alto y bajo contenido de aceite. Suárez-Mena (2015) evaluó el efecto de diferentes proporciones de forraje a concentrado (50:50 o 75:25) y tasas de inclusión de DDGS (0, 7, 14 o 21 por ciento) en la digestibilidad y fermentación del rumen de las raciones de terneras lecheras alimentadas con precisión. La alimentación de la dieta con 14 por ciento de DDGS resultó en la mayor digestibilidad aparente de materia seca, materia orgánica, fibra ácidodetergente y fibra neutrodetergente; pero el aumento de las tasas de inclusión en la dieta de los DDGS disminuyó la retención de nitrógeno. Las concentraciones molares de acetato tendieron a disminuir al alimentar con la dieta alta en forrajes y conforme aumentaban los niveles de DDGS, mientras que la concentración de propionato aumentó conforme lo hicieron los niveles de DDGS. Además, conforme aumentaba el nivel de DDGS de la dieta, disminuía el conteo de protozoarios en el rumen. Estos resultados indican que la alimentación de dietas con 14 por ciento de DDGS mejoró la utilización de nutrientes y la fermentación en terneras lecheras alimentadas con dietas con diferentes proporciones de forraje a concentrado.

Manthey y Anderson (2016) dieron un concentrado de DDGS o de maíz-harina de soya al 0.8 por ciento de peso corporal a terneras lecheras junto con acceso ad libitum a heno de pasto para ver el efecto en consumo de materia seca y desempeño de crecimiento. Entre los tratamientos de dieta fueron similares el consumo de materia seca, peso corporal, GDP y ganancia:alimento; y no hubo diferencias en las calificaciones de altura de la pelvis, circunferencia del corazón, anchura de la pelvis y condición corporal. Estos resultados indican que las terneras alimentadas con DDGS al 0.8 por ciento del peso corporal con acceso ad libitum a heno de pasto tuvieron un desempeño de crecimiento y crecimiento del esqueleto similar al de las alimentadas con cantidades iguales de concentrado de maíz-harina de soya y heno de pasto. En un estudio posterior,

Manthey et al. (2016) mostraron que limitar la alimentación de dietas con concentraciones mayores de DDGS (hasta 50 por ciento) mejoró ganancia:alimento, digestibilidad aparente total de materia seca y proteína cruda en el tubo digestivo, y al mismo tiempo mantuvo el crecimiento del esqueleto, sin aumentar la calificación de la condición corporal.

Manthey y Anderson (2017) realizaron dos estudios adicionales para determinar los efectos de limitar la alimentación de terneras lecheras peripúberes con dietas con DDGS con diferentes proporciones de forraje a concentrado (experimento 1) y DDGS con heno de pasto ad libitum (experimento 2) en el crecimiento, fermentación del rumen, digestibilidad de nutrientes, perfil metabólico, inicio de la pubertad y el consiguiente desempeño. En el experimento 1, se alimentó con 30 por ciento (2.65 por ciento de peso corporal), 40 por ciento (2.50 del peso corporal) o 50 por ciento (2.35 por ciento de peso corporal) de DDGS a terneras Holstein, mientras que el resto de la dieta consistió en heno de pasto y mezcla mineral. En el segundo experimento, se alimentó a las terneras con una mezcla de maíz-harina de soya o de concentrado de DDGS (0.8 por ciento de peso corporal) y acceso ad libitum a heno de pasto. Los resultados de estos estudios mostraron que es posible usar los DDGS para sustituir hasta el 50 por ciento del heno en las dietas con límite, o para sustituir el maíz y la harina de soya cuando se tiene acceso ad libitum al heno, para apoyar un desempeño de crecimiento satisfactorio, con algunos cambios en los perfiles metabólicos, pero mejor digestibilidad de nutrientes.

Manthey et al. (2017) también determinaron los efectos en el perfil metabólico e inicio de la pubertad al alimentar granos secos de destilería (30, 40 o 50 por ciento) en sustitución del forraje en las raciones limitadas de terneras lecheras. La glucosa en plasma, insulina, IGF-1, leptina y triglicéridos fueron similares entre tratamientos, pero con niveles crecientes de DDGS en la dieta aumentaron los ácidos grasos totales y ácidos grasos poliinsaturados. Entre los tratamientos de la dieta no

fueron diferentes la edad y peso corporal en la pubertad de las terneras. Estos resultados mostraron que la alimentación de dietas con aumento en las tasas de inclusión de DDGS (hasta 50 por ciento) mantiene el estado energético corporal sin la acumulación en exceso de tejido adiposo y no presenta efectos perjudiciales en la edad o peso corporal en la pubertad.

Por último, Rodríguez-Hernández (2017) determinaron si el tipo y concentración de glucosinolatos en la harina de carinata afectaron preferencia y consumo del alimento de las terneras lecheras, comparado con la alimentación de DDGS u otras harinas de oleaginosas. Las terneras prefirieron las dietas con DDGS, seguido de la harina de linaza, harina de camilina y harina de canola; la harina de carinata fue la de menor preferencia.

Conclusiones

Los DDGS de maíz son una excelente fuente de energía, proteína y fósforo para vacas lecheras en lactación. Diversos estudios han mostrado que es posible incluir DDGS de maíz en las dietas de vacas lecheras lactantes a niveles de hasta el 20 por ciento, sin disminuir el consumo de materia seca, producción de leche y contenido de proteína y grasa lácteas. De hecho, la inclusión de 20 al 30 por ciento de DDGS apoya la producción de leche de igual o mejor manera que las dietas sin DDGS, sin disminuir la concentración de grasa láctea, si se formulan adecuadamente las raciones. Además, la adición de 30 a 50 por ciento de DDGS en las dietas de terneras lecheras en desarrollo apoya un excelente crecimiento así como los desempeños reproductivo y de lactación posteriores. Kalscheur et al. (2012b) aportaron tasas de inclusión recomendadas de DDGS en ganado lechero y terneros en varias etapas de producción e identificaron componentes clave de la dieta que se deben manejar al formular dietas de DDGS (**cuadro 11**).

Cuadro 11. Tasas de inclusión máximas recomendadas de DDGS en la dieta para ganado lechero (adaptado de Kalscheur et al. 2012b)

Etapas de producción	DDGS %	Nutrientes críticos en la formulación de la dieta
Terneros predestetados	25	Lisina, fibra, grasa cruda
Terneras en crecimiento	30	Grasa cruda/energía, azufre
Vacas secas	15	Grasa cruda/energía, azufre, calcio/fósforo
Vacas lactantes	20	Grasa total/ácidos grasos poliinsaturados, fibra físicamente eficaz, azufre, calcio/fósforo, PNDR, lisina

Bibliografía

Anderson, J.L., K.F. Kalscheur, A.D. Garcia, and D.J. Schingoethe. 2015a. Feeding fat from distillers dried grains with solubles to dairy heifers: I. Effects on growth performance and total-tract digestibility of nutrient. *J. Dairy Sci.* 98:5699-5708.

Anderson, J.L., K.F. Kalscheur, A.D. Garcia, and D.J. Schingoethe. 2015b. Feeding fat from distillers dried grains with solubles to dairy heifers: II. Effects on metabolic profile. *J. Dairy Sci.* 98:5709-5919.

Anderson, J.L., K.F. Kalscheur, A.D. Garcia, and D.J. Schingoethe. 2015c. Short communication: Feeding fat from distillers dried grains with solubles to dairy heifers: III. Effects on posttrial reproductive and lactation performance. *J. Dairy Sci.* 98:5720-5725.

Anderson, J.L., D.J. Schingoethe, K.F. Kalscheur, and A.R. Hippen. 2006. Evaluation of dried and wet distiller's grain included at two concentration in the diets of lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 89:3133-3142.

Benchaar, C., F. Hassanat, R. Gervais, P.Y. Chouinard, C. Julien, H.V. Petit, and D.I. Masse. 2013. Effects of increasing amounts of corn dried distillers grains with solubles in dairy cow diets on methane production, ruminal fermentation, digestion, N balance and milk production. *J. Dairy Sci.* 96:2413-2427.

Birkelo, C.P., M.J. Brouk, and D.J. Schingoethe. 2004. The energy content of wet corn distillers grains for lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 87:1815-1819.

Boucher, S.E., S. Calsamiglia, C.M. Parsons, H.H. Stein, M.D. Stern, P.S. Erickson, P.L. Utterback, and C.G. Schwab. 2009. Intestinal digestibility of amino acids in rumen-undegraded protein estimated using a precision-fed cecectomized rooster bioassay: II Distillers dried grains with solubles and fish meal. *J. Dairy Sci.* 92:6056-6067.

Cao, Z.J., J.L. Anderson, and K.F. Kalscheur. 2009. Ruminal degradation and intestinal digestibility of dried or wet distillers grains with increasing concentrations of condensed distillers solubles. *J. Anim. Sci.* 87:3013-3019.

- Carvalho, L.P.F., D.S.P. Melo, C.R.M. Pereira, M.A.M. Rodrigues, A.R.J. Cabrita, and A.J.M. Finseca. 2005. Chemical composition, *in vivo* digestibility, N degradability and enzymatic intestinal digestibility of five protein supplements. *Anim. Feed Sci. Technol.* 119:171-178.
- Castillo-Lopez, E., H.A. Ramirez-Ramirez, T.J. Klopfenstein, D. Hostetler, K. Karges, S.C. Fernando, and P.J. Kononoff. 2014. Ration formulations containing reduced-fat dried distillers grains with solubles and their effect on lactation performance, rumen fermentation and intestinal flow of microbial nitrogen in Holstein cows. *J. Dairy Sci.* 97:1578-1593.
- Diaz-Royón, F., A. Garcia, and K.A. Rosentrater. 2012. Composition of fat in distillers grains. *Agricultural and Biosystems Engineering Publications*, 391. http://lib.dr.iastate.edu/abe_eng_pubs/391.
- Engel, C.L., H.H. Patterson, and G.A. Perry. 2008. Effect of dried corn distillers grains plus soluble compared with soybean hulls, in late gestation heifer diets, on animal and reproductive performance. *J. Anim. Sci.* 86:1697-1708.
- Firkins, J.L., L.L. Berger, G.C. Fahey, Jr., and N.R. Merchen. 1984. Ruminant nitrogen degradability and escape of wet and dry distillers grains and wet and dry corn gluten feeds. *J. Dairy Sci.* 67:1936-1944.
- Foth, A.J., T. Brown-Brandi, K.J. Hanford, P.S. Miller, G. Garcia Gomex, and P.J. Kononoff. 2015. Energy content of reduced-fat dried distillers grains with solubles for lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 98:7142-7152.
- Funston, R.N. 2004. Fat supplementation and reproduction in beef females. *J. Anim. Sci.* 82(E Suppl.):E154-E161.
- Humer, E., and Q. Zebeli. 2015. Phytate in feed ingredients and potentials for improving the utilization of phosphorus in ruminant nutrition. *Anim. Feed Sci. Technol.* 209:1-15.
- Kalscheur, K.F. 2013. Use of low-fat DDGS in diets for lactating dairy cattle. *Proceedings 34th Western Nutrition Conference – Processing, Performance & Profit*, September 24-26, 2013, Saskatoon, SK, p. 139-145.
- Kalscheur, K.F., A.D. Garcia, D.J. Schingoethe, F. Diaz-Royón, and A.R. Hippen. 2012a. Feeding biofuels co-products to dairy cattle. In: *Biofuel Co-products as Livestock Feed – Opportunities and Challenges*. H.P.S. Makkar, ed. FAO, Rome, Italy. <http://www.fao.org/docrep/016/i3009e/i3009e00.htm> pp 115-153.
- Kalscheur, K.F., A.R. Hippen, and A.D. Garcia. 2012b. Feeding distillers grains products to dairy cattle. In: *Distillers Grains: Production, Properties and Utilization*, K. Liu and K.A. Rosentrater, eds. CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 265-295.
- Kalscheur, K.F. 2005. Impact of feeding distillers grains on milk fat, protein and yield. *Proc. Distillers Grains Technology Council, 9th Annual Symposium*, Louisville, KY.
- Kelzer, J.M., P.J. Kononoff, L.O. Tedeschi, T.C. Jenkins, K. Karges, and M.L. Gibson. 2010. Evaluation of protein fractionation and ruminal and intestinal digestibility of corn milling co-products. *J. Dairy Sci.* 93:2803-2815.
- Kleinschmit, D.H., J.L. Anderson, D.J. Schingoethe, K.F. Kalscheur and A.R. Hippen. 2007a. Ruminant and intestinal degradability of distillers grains plus solubles varies by source. *J. Dairy Sci.* 90:2909-2918.
- Kononoff, P.J., S.K. Ivan and T.J. Klopfenstein. 2007. Estimation of the proportion of feed protein digested in the small intestine of cattle consuming wet corn gluten. *J. Dairy Sci.* 90:2377-2385.
- Kurokawa, Y., H. Shibata, S. Tateno, S. Kanada, K. Takaura, S. Ishida and H. Itabashi. 2013. Rumen fermentation, milk production and conjugated linoleic acid in the milk of cows fed high fiber diets added with dried distillers grains with solubles. *Anim. Sci. J.* 84:106-112.
- Li, C., J.Q. Li, W.Z. Yang and K.A. Beauchemin. 2012. Ruminant and intestinal amino acid digestion of distiller's grain vary with grain source and milling process. *Anim. Feed Sci. Technol.* 175:121-130.
- MacDonald, J.C. T.J. Klopfenstein, G.E. Erickson and W.A. Griffin. 2007. Effect of dried distillers grains and equivalent undegradable intake protein or ether extract on performance and forage intake of heifers grazing smooth bromegrass pastures. *J. Anim. Sci.* 85:2614-2624.
- Manthey, A.K., and J.L. Anderson. 2017. Feeding peripubertal dairy heifers diets high in distiller's grains with varying forage-to-concentrate ratios. *J. Dairy Sci.* 100(Suppl. 1):183 (Abstr.)
- Manthey, A.K., J.L. Anderson, G.A. Perry and D.H. Keisler. 2017. Feeding distillers dried grains in replacement of forage in limit-fed dairy heifer rations: Effects on metabolic profile and onset of puberty. *J. Dairy Sci.* 100:2591-2602.
- Manthey, A.K., J.L. Anderson and G.A. Perry. 2016. Feeding distillers dried grains in replacement of forage in limit-fed dairy heifer rations: Effects on growth performance, rumen fermentation and total-tract digestibility of nutrients. *J. Dairy Sci.* 99:7206-7215.

- Manthey, A.K., and J.L. Anderson. 2016. Growth performance of dairy heifers limit-fed distillers dried grains with ad libitum forage. *J. Dairy Sci.* 99(E-Suppl. 1):680-681 (Abstr.)
- Martin, J.L., A.S. Cupp, R.J. Rasby, Z.C. Hall and R.N. Funston. 2007. Utilization of dried distillers grains for developing beef heifers. *J. Anim. Sci.* 85:2298-2303.
- Martinez-Amezcuca, V., C.M. Parson and S.L. Noll. 2004. Content and relative bioavailability of phosphorus in distillers dried grains with solubles in chicks. *Poult. Sci.* 83:971-976.
- Mjoun, K., K.F. Kalscheur, A.R. Hippen and D.J. Schingoethe. 2010a. Rumen degradability and intestinal digestibility of protein and amino acids in soybean and corn distillers grains products. *J. Dairy Sci.* 93:4144-4154.
- Mjoun, K., K.F. Kalscheur, A.R. Hippen and D.J. Schingoethe. 2010b. Performance and amino acid utilization of early lactation dairy cows fed regular or reduced-fat dried distillers grains with solubles. *J. Dairy Sci.* 93:3176-3191.
- Mjoun, K., K.F. Kalscheur, A.R. Hippen, D.J. Schingoethe, and D.E. Little. 2010c. Lactation performance and amino acid utilization of cows fed increasing amounts of reduced-fat dried distillers gains with solubles. *J. Dairy Sci.* 93:288-303.
- Mjoun, K., K.F. Kalscheur, A.R. Hippen and D.J. Schingoethe. 2008. Ruminal phosphorus disappearance from corn and soybean feedstuffs. *J. Dairy Sci.* 91:3938-3946.
- NASS (National Agricultural Statistics Service). 2007. Ethanol Co-Products Used for Livestock Feed. U.S. Agricultural Statistics Board, U.S. Department of Agriculture.
- NRC. 2001. Nutrient Requirements of Dairy Cattle. 7th Rev. Ed. National Academy of Science, Washington, DC.
- Nuez-Ortín, W.G., and P. Yu. 2011. Using the NRC chemical summary and biological approaches to predict energy values of new co-product from bioethanol production for dairy cows. *Anim. Feed Sci. Technol.* 170:165-170.
- Nyoka, R. 2010. Fat and rumen undegradable protein for grazing cows: Effect on composition of milk and quality of cheese. Master's thesis, South Dakota State University, Brookings.
- Oba, M.G.B., T.D. Penner, T.D. Whyte and T.D. Wierenga. 2010. Effects of feeding triticale dried distillers grains plus solubles as a nitrogen source on productivity of lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 93:2044-2052.
- Owens, F. 2009a. Nutrition & Health: Dairy. Cattle nutritionists. Feedstuffs, p.22-25.
- Owens, T.M. 2009b. Risk of milk fat depression for dairy cows fed high moisture corn and distillers grains in diets containing monensin. Ph.D. Thesis, South Dakota state University, Brookings.
- Paz, H.A., and P.J. Kononoff. 2014. Lactation responses and amino acid utilization of dairy cows fed low-fat distillers dried grains with solubles with or without rumen-protected lysine supplementation. *J. Dairy Sci.* 97:6519-6530.
- Paz, H.A., M.J. de Veth, R.S. Ordway and P.J. Kononoff. 2013. Evaluation of rumen-protected lysine supplementation to lactating dairy cows consuming increasing amounts of distillers dried grains with solubles. *J. Dairy Sci.* 96:7210-7222.
- Pereira, A.B.D., L.K. Zeringue, C. Leonardi, B.F. Jenny, C.C. Williams, M.E. McCormick and V.R. Moreira. 2015. Short communication: Substituting dry distillers grains with solubles and rumen-protected amino acids for soybean meal in late-lactation cows' diets based on corn silage or ryegrass silage. *J. Dairy Sci.* 98:8121-8127.
- Ramirez-Ramirez, H.A., K.J. Harvatine and P.J. Kononoff. 2016a. Short communication: Forage particle size and fat intake affect rumen passage, the fatty acid profile of milk and milk fat production in dairy cows consuming dried distillers grains with solubles. *J. Dairy Sci.* 99:392-398.
- Ramirez-Ramirez, H.A., E. Castillo Lopez, C.J.R. Jenkins, N.D. Aluthge, C. Anderson, S.C. Fernando, K.J. Harvatine and P.J. Kononoff. 2016b. Reduced-fat dried distillers grains with solubles reduces the risk for milk fat depression and supports milk production and ruminal fermentation in dairy cows. *J. Dairy Sci.* 99:1912-1928.
- Ranathunga, S.D. K.F. Kalscheur, A.R. Hippen and D.J. Schingoethe. 2010. Replacement of starch from corn with nonforage fiber from distillers grains and soyhulls in diets of lactating dairy cows. *J. Dairy Sci.* 93:1086-1097.
- Robinson, P.H., N. Swanepoel, I. Shinzato and S.O. Juchem. 2011. Productive responses of lactating dairy cattle to supplementing high levels of ruminally protected lysine using a rumen protection technology. *Anim. Feed Sci. Technol.* 168:30-41.
- Rodriguez-Hernandez, K., J.L. Anderson and M.A. Berhow. 2017. Preference of carinata meal compared with other oilseed meals and distiller's dried grains by dairy heifers. *J. Dairy Sci.* 100(Suppl. 1):178 (Abstr.).
- Sasikala-Appukuttan, A.K., A.R. Hippen, K.F. Kalscheur, K. Karges, M.L. Gibson. 2008. The Feeding Value of Corn Distillers Solubles for Lactating Dairy Cows. *J. Dairy Sci.* 91:279-287.

- Schingoethe, D.J., K.F. Kalscheur, A.R. Hippen and A.R. Garcia. 2009. The use of distillers products in dairy cattle diets. *J. Dairy Sci.* 92:5802-5813.
- Schmit, T.M., R.N. Boisvert, D. Enahoro and L.E. Chase. 2009. Optimal dairy farm adjustments to increase utilization of corn distillers dried grains with solubles. *J. Dairy Sci.* 92:6105-6115.
- Suarez-Mena, F.X., G.J. Lascano, D.E. Rico and A.J. Heinrichs. 2015. Effect of forage level and replacing canola meal with dry distillers grains with solubles in precision-fed heifer diets: Digestibility and rumen fermentation. *J. Dairy Sci.* 98:8054-8065.
- Swanepoel, N., P.H. Robinson and L.J. Erasmus. 2010a. Amino acid needs of lactating dairy cows: Impact of feeding lysine in a ruminally protected form on productivity of lactating dairy cows. *Anim. Feed Sci. Technol.* 157:79-94.
- Swanepoel, N., P.H. Robinson and L.J. Erasmus. 2010b. Amino acid needs of lactating dairy cows: Predicting limiting amino acids in contemporary rations fed to high producing dairy cattle in California using metabolic models. *Anim. Feed Sci. Technol.* 161:103-120.
- Talavera, F., C.S. Park and G.L. Williams. 1985. Relationships among dietary lipid intake, serum cholesterol and ovarian function in Holstein heifers. *J. Anim. Sci.* 60:1045-1051.
- Tang, S.C., I. Zulkifli, M. Ebrahimi, A.R. Alimon, A.F. Soleimani and K. Filer. 2011. Effects of feeding different levels of corn dried distillers grains with solubles on growth performance, carcass yield and meat fatty acid composition in broiler chickens. *Intl. J. Anim. Vet. Adv.* 3:205-211.
- Testroet, E.D., G. Li, D.C. Beitz and S. Clark. 2015. Feeding dried distillers grains with solubles affects composition but not oxidative stability of milk. *J. Dairy Sci.* 98:2908-2919.
- Thomas, M.G., B. Bao and G.L. Williams. 1997. Dietary fats varying in their fatty acid composition differentially influence follicular growth in cows fed isoenergetic diets. *J. Anim. Sci.* 75:2512-2519.
- Vander Pol, K.J., M.K. Luebbe, G.I. Crawford, G.E. Erickson and T.J. Klopfenstein. 2009. Performance and digestibility characteristics of finishing diets containing distillers grains, composites of corn processing coproducts or supplemental corn oil. *J. Anim. Sci.* 87:639-652.
- Whelan, S.J., W. Carey, T.M. Boland, M.B., Lynch, A.K. Kelly, G. Rajauria and K.M. Pierce. 2017. The effect of by-product inclusion level on milk production, nutrient digestibility and excretion and rumen fermentation parameters in lactating dairy cows offered a pasture-based diet. *J. Dairy Sci.* 100:1055-1062.
- Yildiz, E., and N. Todorov. 2014. The comparison of the main protein sources for dairy cows. A review. *Bulgarian J. Agricult. Sci.* 20:428-446.

CAPÍTULO 18

DDGS reducidos en aceite en dietas de pollo de engorde y ponedoras

Introducción

LOS DDGS DE MAÍZ SON UN EXCELENTE INGREDIENTE DE ALIMENTOS para dietas de pollo de engorde y de gallinas ponedoras. Para la formulación de dietas de pollo de engorde y de gallinas ponedoras se han publicado varias revisiones científicas que incluyen los valores recomendados de energía y nutrientes de los DDGS (Waldroup et al. 2007; Choi et al., 2008; Swiatkiewicz y Korelski, 2008; Bregendahl, 2008; Salim et al., 2010; El-Hack et al., 2015), pero por lo general estas recomendaciones se aplican a DDGS altos en aceite (más del 10 por ciento de grasa cruda) y no a los reducidos en aceite (menos del 10 por ciento de grasa cruda). Afortunadamente, en los últimos siete años se ha llevado a cabo una cantidad considerable de investigaciones para determinar la energía metabolizable aparente (EMA_n) y el contenido de aminoácidos digestibles de los DDGS con contenido de grasa cruda variable. En este capítulo se resumen los resultados de estos estudios recientes. Los datos de energía y composición nutritiva, así como las ecuaciones de predicción usadas para derivarlos, son los más actuales y representativos de las fuentes de DDGS de maíz que se produce en EE. UU., por lo que son los que se deben usar para formular dietas de nutrición de precisión con DDGS para pollo de engorde y de gallinas ponedoras.

Los DDGS de maíz contienen cerca del 85 por ciento del valor energético presente en el maíz para aves, cuenta con niveles moderados de aminoácidos esenciales digestibles y son altos en contenido de fósforo disponible. Las dietas de ponedoras y pollos de engorde pueden tener fácilmente hasta un 10 por ciento de DDGS, con un mínimo ajuste en la formulación, si es que lo hay, en cuanto a la energía y aminoácidos. En una revisión de la literatura de hace 10 años, Swiatkiewicz y Korelski (2008) concluyeron que los DDGS son un ingrediente aceptable para usar en dietas avícolas y que pueden añadirse de forma segura a niveles del 5 al 8 por ciento en dietas de iniciación y de 12 a 15 por ciento en dietas de crecimiento y finalización de pollo de engorde y gallinas ponedoras. Sin embargo, estas son tasas de inclusión en la dieta prudentes que se basan en la formulación de dietas con base en aminoácidos totales en lugar de digestibles. Los estudios recientes de investigación (Shim et al. 2011; Loar et al., 2010; Masa'deh et al. 2011) han mostrado que se pueden añadir DDGS a dietas avícolas a tasas de inclusión incluso más altas (por ejemplo, mayores al 20 por ciento), siempre y cuando que al formular dietas se utilicen valores de energía y aminoácidos digestibles precisos.

Contenido energético y de nutrientes digestibles de los DDGS reducidos en aceite para la avicultura

El componente más caro de las dietas avícolas es la energía,

seguida de los aminoácidos y fósforo. Es por ello que el aspecto más importante para maximizar las tasas de inclusión en la dieta y minimizar su costo es la determinación de valores precisos de la EMA_n , aminoácidos digestibles y de fósforo disponible o digestible de la fuente de DDGS con la que se alimenta a las aves, sin que afecte el desempeño o la calidad de la carne y huevo. Está bien documentado que entre las fuentes de DDGS varían EMA_n , aminoácidos digestibles y contenido de fósforo disponible. Los integrados avícolas de más éxito de todo el mundo utilizan enfoques de nutrición de precisión para formular dietas con base en EMA_n o energía metabolizable verdadera (EMV), aminoácidos digestibles ileales estandarizados (DIE) y fósforo digestible total estandarizado del sistema digestivo o disponible. Debido a la variabilidad en composición de nutrientes entre las fuentes de DDGS, se deben usar cálculos dinámicos de EMA y de aminoácidos y fósforo digestibles en lugar de los valores de referencia publicados, los cuales son anticuados. Este capítulo proporciona los más recientes enfoques “innovadores” para determinar los estimados dinámicos de EMA_n , aminoácidos DIE y fósforo disponible mediante ecuaciones de predicción. Al evaluar diferentes fuentes de DDGS de maíz de EE. UU. deben usarse estos enfoques para determinar el valor económico y nutritivo en la formulación de un alimento a mínimo costo. El uso de estas ecuaciones de predicción proporcionará los estimados precisos de estas importantes variables de formulación de dietas, que permitirán usar tasas de inclusión de DDGS relativamente altas para lograr ahorros sustanciales de la dieta, y al mismo tiempo, apoyar el desempeño de crecimiento y características de la canal aceptables en pollo de engorde y la producción y calidad del huevo en ponedoras.

Para determinar el valor económico, también son fundamentales valores nutricionales precisos de los ingredientes, como el mayor precio que se puede pagar por los DDGS usados en la formulación a mínimo costo, así como las tasas máximas de inclusión. Tahir y Pesti (2012b) calcularon que la industria avícola mundial puede ahorrar casi \$160 millones de dólares en el costo del alimento balanceado si se usa la base de datos de aminoácidos digestibles de los ingredientes más precisa. Se ha implementado ampliamente el uso de programación lineal en el software de formulación para determinar la mezcla óptima de ingredientes para minimizar el costo estableciendo restricciones (tasas de inclusión mínimas y máximas) de los ingredientes con respecto a los requerimientos de nutrientes. Además, la mayoría de los softwares comerciales de formulación brindan la función de análisis de sensibilidad o “precio sombra” para determinar el precio más alto con el que se puede incluir un ingrediente individual en la fórmula. Con este enfoque, es posible desarrollar curvas de uso del ingrediente con base en el precio y las tasas de inclusión en distintas fórmulas de alimentos.

Contenido y predicción de la energía metabolizable aparente (EMA_n)

El NRC (1994) para aves indica que el contenido de EMA_n de los DDGS es de 2,667 kcal/kg y el contenido EMV_n es de 3,330 kcal/kg base materia seca. Sin embargo, estos cálculos se derivan de la producción de DDGS convencionales altos en aceite (mayor al 10 por ciento de grasa cruda) que hace más de 20 años se produjeron en la industria del etanol. Actualmente, la composición de los DDGS reducidos en aceite es substancialmente diferente que las fuentes anteriormente usadas para desarrollar los valores de composición de energía y nutrientes del NRC (1994). Se llevaron a cabo tres estudios recientes para determinar el contenido de EMA_n de las fuentes de DDGS con concentraciones variables de grasa cruda (**cuadro 1**).

Primero, el valor promedio de EMA_n de los DDGS notificado por Rochell et al. (2011) fue 2,678 kcal/kg de materia seca y fue similar al valor notificado en el NRC (1994). Sin embargo, en el estudio de Rochell et al. (2011) solo una de las fuentes de DDGS contenía menos del 10 por ciento de grasa cruda, la cual correspondió con el contenido más bajo de EMA_n (**cuadro 1**). Entre las fuentes de DDGS convencionales altas en aceite el rango de contenido de EMA_n fue de 2,593 a 3,098 kcal/kg de materia seca, una diferencia de 505 kcal/kg de materia seca entre las fuentes de DDGS con un contenido de grasa cruda similar. Aunque en este estudio solo se evaluaron 6 fuentes de DDGS, el contenido de EMA_n no se correlacionó con el de energía bruta (EB), grasa cruda, proteína cruda, almidón, cenizas y FAD, pero se relacionó negativamente al contenido de fibra total de la dieta (FTD; $r = -0.77$) y fibra neutrodetergente (FND; $r = -0.83$). Estos hallazgos indican que el contenido de fibra se relaciona más de cerca con el contenido de EMA_n en los DDGS que el de grasa cruda.

En un estudio subsiguiente, Meloche et al. (2013) evaluaron 15 fuentes de DDGS, de las cuales seis contenían menos del 10 por ciento de grasa cruda. El contenido promedio de EMA_n de estas fuentes de DDGS fue de 2,309 kcal/kg de materia seca, el cual fue 358 kcal/kg de materia seca menos que el valor del NRC (1994) (**cuadro 1**). Además, la diferencia de contenido de EMA_n entre estas 15 fuentes de DDGS fue de 955 kcal/kg de materia seca y mayor al notificado en el estudio de Rochell et al. (2011). La concentración de EMA_n fue de 1,869 a 2,824 kcal/kg de materia seca y se correlacionó positivamente con el contenido de EB ($r = 0.69$), y negativamente con el contenido de FTD ($r = -0.56$), FND ($r = -0.52$), fibra ácidodetergente (FAD; $r = -0.52$), pero no se correlacionó con el contenido de grasa cruda, proteína cruda, almidón o cenizas. Estas correlaciones (o la falta de estas) son consistentes con las notificadas por Rochell et al. (2011) e indican que el contenido de fibra de los DDGS está más relacionado con el de EMA_n que el de grasa cruda. Además, estos datos también indican que no es posible asumir que una reducción del contenido de grasa cruda en los DDGS, resulta en un aumento del contenido de proteína cruda y fibra, porque no están correlacionados. En conjunto, los resultados de estos dos estudios indican que el contenido de grasa cruda en DDGS es un indicador muy deficiente del contenido de EMA_n.

En un tercer estudio, Meloche et al. (2014) notificaron que el contenido promedio de EMA_n de las fuentes de DDGS evaluadas fue de 2,764 kcal/kg de materia seca, el cual fue 97 kcal/kg de masa seca mayor al valor del NRC (1994) de pollo de engorde (**cuadro 1**). Al juntar los datos de estos tres estudios, el rango de contenido de EMA_n de las fuentes de DDGS con contenido variable de grasa cruda fue de de 1,869 a 3,634 kcal/kg de materia seca. Esta alta variabilidad de contenido de EMA_n entre las fuentes de DDGS indica que el uso de los valores publicados en libros no brindarán valores confiables a usar en la formulación de dietas prácticas, por lo que se requieren enfoques más dinámicos. Por lo tanto, Meloche et al. (2013) desarrollaron una ecuación de predicción de EMA_n “más adecuada” con las mediciones de composición química de los DDGS:

$$\text{EMA}_n \text{ kcal/kg de materia seca} = -12,282 + (2.60 \times \text{EB kcal/kg de materia seca}) - (40.67 \times \text{por ciento de FDT de materia seca}) + (89.75 \times \text{por ciento de proteína cruda de materia seca}) + (125.80 \times \text{por ciento de almidón de materia seca}) \text{ con } R^2 = 0.86.$$

Aunque esta ecuación es altamente precisa ($R^2 = 0.86$) para predecir el contenido de EMA_n en las fuentes de DDGS, por lo general la medición de contenido de energía bruta, FDT y almidón no se determina en los laboratorios comerciales. Por lo tanto, estos investigadores desarrollaron una ecuación alternativa de predicción de EMA_n con la FND como medida de fibra en lugar de la FDT:

$$\text{EMA}_n \text{ kcal/kg de materia seca} = -14,322 + (2.69 \times \text{EB kcal/kg en materia seca}) - (117.08 \times \text{por ciento de proteína cruda en materia seca}) + (149.41 \times \text{por ciento de almidón en materia seca}) - (18.30 \times \text{por ciento de NDF en materia seca}) \text{ con } R^2 = 0.88.$$

Esta ecuación resultó en una precisión ligeramente mejor ($R^2 = 0.88$) que la ecuación inicial, pero aún necesita la determinación de la energía bruta y almidón, que a menudo son difíciles de obtener a partir de los análisis de los laboratorios comerciales.

Por lo tanto, Meloche et al. (2014) determinaron el contenido de EMA_n de 15 muestras adicionales de DDGS que iban de 5 a 14.2 por ciento de grasa cruda base materia seca y usaron estos datos para validar las ecuaciones de predicción de EMA_n de Rochell et al. (2011) y Meloche et al. (2013). Aunque es difícil la obtención de los valores de EB y FTD a partir de los análisis de laboratorios comerciales, la ecuación más adecuada con el mayor R^2 (0.92) fue:

$$\text{EMA}_n \text{ kcal/kg de materia seca} = 2,655 - (18.29 \times \text{por ciento de FND}) + (44.14 \times \text{por ciento de extracto etéreo}) + (0.21 \times \text{EB, kcal/kg}) - (10.91 \times \text{por ciento de FDT}) - (91.08 \times \text{por ciento de cenizas}) \text{ con } R^2 = 0.92 \text{ con una precisión de predicción de } 321 \text{ kcal/kg.}$$

Sin embargo, si solo se cuenta con los componentes químicos normalmente medidos, se puede usar la siguiente ecuación, pero tiene un R^2 más bajo (0.70) y es menos precisa (± 457 kcal/kg) que la ecuación anterior:

Cuadro 1. Energía bruta, EMAn y composición química (base materia seca) de las fuentes de DDGS que varían en contenido de grasa cruda (adaptado de Rochell et al., 2011; Meloche et al., 2013; y Meloche et al., 2014)

Rochell et al. (2011)									
Fuente de DDGS	EB, kcal/kg	EMAn, kcal/kg	Grasa cruda %	Proteína cruda, %	FTD %	FND %	FAD %	Almidón %	Cenizas %
4	5,547	3,098	11.7	29.5	35.9	33.4	8.6	4.9	5.4
1	5,434	2,685	10.2	31.9	35.7	40.1	14.4	6.2	4.5
5	5,375	2,593	10.9	29.7	38.1	40.1	10.6	3.5	4.4
3	5,314	2,628	11.5	29.6	30.3	34.6	11.3	7.9	4.2
6	5,174	2,903	11.5	26.5	32.7	27.7	9.8	3.3	4.5
2	5,076	2,146	3.2	34.7	37.2	51	15.8	3	5.2
Meloche et al. (2013)									
15	5,167	2,687	13.2	30.6	32.4	34	9.9	1.3	5.3
14	5,130	2,824	11.8	32.1	33.5	38.9	13.3	1.1	4.9
12	5,077	2,074	11.3	27.7	37.8	44	14	1.8	4.4
11	5,075	2,418	11.1	29.7	33.9	36.5	12.1	3.9	4.3
9	5,066	2,273	10.8	29.7	35.3	38.6	13.9	1.6	4.6
10	5,043	2,012	10.8	31	35.7	38.9	12.9	0.9	4.9
3	5,022	2,487	6.3	28.9	28.5	27	8.2	3.3	5.2
13	5,008	2,032	11.5	26.5	32.7	27.7	9.8	3.3	4.5
2	4,990	2,551	4.2	27.9	30.5	27.3	7.7	3.7	4.8
5	4,963	2,401	9.6	30.1	30.8	33.3	10.5	3.4	4.9
6	4,963	2,526	9.7	29.8	31.3	28.8	10.3	2.8	5
7	4,948	2,309	10	32.3	33.9	35.9	13.7	1	5.3
8	4,938	2,068	10.1	30.3	33.9	38.2	12.5	2.2	5
4	4,897	2,103	8.6	32.9	32.5	35.7	13.4	0.8	5.1
1	4,678	1,869	3.2	34.7	37.2	51	15.8	3.0	5.2
Meloche et al. (2014)									
1	5,254	3,634	13.3	29.7	31.5	38.3	11.5	2.5	4.8
10	5,254	3,120	14.3	33	26.5	32.8	12.1	4	4.6
6	5,194	2,535	11.4	29.8	32.1	27.8	8.6	4.7	5.5
15	5,154	3,137	11.6	30.7	33.6	33	8.2	6.7	5
8	5,148	2,640	8.2	34.1	30.5	37.1	13.2	4	5.1
2	5,139	2,553	10.4	32	31.6	38.5	12.1	2.3	4.7
11	5,098	3,111	12	28.4	28.1	38.1	10.7	10	4.6
3	5,061	2,869	9.1	31.6	31.1	39.6	11.6	3.8	5.4
14	5,052	2,644	8.8	28.5	36.6	37.1	9.7	5.9	5.4
4	5,009	2,781	8	30.6	32.4	31	8.9	4.9	5.6
5	4,978	2,523	7	32.2	32.8	31.1	8.6	4.4	5.5
9	4,951	2,461	10.7	32.7	29.2	43.8	14.8	8.1	4.7
13	4,934	1,975	6.1	30.3	31.4	32.9	9.2	4.9	5.4
12	4,884	2,581	5.9	32.3	31.7	34.6	9.4	6	5.6
7	4,841	2,903	5	34.2	29.3	31.4	8.8	5.6	5.6

$EMA_n \text{ kcal/kg de materia seca} = 3,673 - (121.35 \times \text{por ciento de fibra cruda}) + (55.29 \times \text{por ciento de extracto etéreo}) - (121.08 \times \text{por ciento de cenizas})$

Otro enfoque, además del uso de ecuaciones de predicción, para calcular el contenido de EMA_n de manera dinámica entre las diversas fuentes de DDGS en los programas de nutrición avícola de precisión, es un sistema computarizado de simulación de la digestión para predecir la concentración de EM de distintas materias primas para gallos desarrollado por Zhao et al. (2014), que se usa en la industria de los alimentos balanceados de China. Este método proporcionó predicciones precisas del contenido de EMA y EMV de 17 de los 26 ingredientes evaluados, tales como los DDGS de maíz.

Contenido y predicción de aminoácidos digestibles

Para optimizar el desempeño de las aves y el valor económico de los ingredientes, es primordial tener una selección de bases de datos precisas de aminoácidos digestibles y totales. Durante muchos años se ha utilizado ampliamente el NRC (1994) de avicultura, pero en los últimos 23 años, ha cambiado drásticamente el contenido y la digestibilidad de energía y nutrientes de la mayoría de los ingredientes, en especial de los DDGS. Por lo tanto, no se recomienda seguir usando los valores de energía y nutrientes de los ingredientes de esta referencia desactualizada.

Se ha demostrado que la formulación de alimentos con base en aminoácidos digestibles mejora la tasa de crecimiento, consumo de alimento y composición de la canal del pollo de engorde (Rostagno et al., 1995; Fernández et al., 1995) comparado con la formulación en aminoácidos totales. Aunque muchos nutricionistas avícolas dan por hecho que los valores de digestibilidad de aminoácidos obtenidos a partir de estudios con gallos son similares entre los distintos tipos de aves (por ejemplo, pollo de engorde, ponedoras, patos y pavos), Tahir y Pesti (2012a) demostraron que esta suposición es errónea. Estos investigadores mostraron que entre 20 ingredientes de alimentos evaluados, los valores de aminoácidos digestibles fueron 6 a 14 por ciento más altos, cuando los estimados se derivaron de estudios con gallos, comparado con los valores de los mismos ingredientes determinados en estudios con pollitos.

Ajinomoto Heartland (Chicago, IL) y Evonik Degussa (Hanau-Wolfgang, Alemania) desarrollaron bases de datos exhaustivas de contenido de aminoácidos digestibles de muchos ingredientes con los que se alimenta a las aves. Sin embargo, la diferencia que distingue estas bases de datos es que los valores de Ajinomoto se derivan de pruebas con gallos y los de Evonik se basan en estudios con pollitos. Como resultado, el contenido de lisina digestible (0.60 vs. 0.56 por ciento), metionina (0.47 vs. 0.44 por ciento), aminoácidos azufrados totales (1.07 vs. 1 por ciento) y treonina (0.72 vs 0.71 por ciento) de los DDGS fue mayor en la base de datos de Ajinomoto que en la de Evonik, respectivamente. A pesar del muy difundido uso de ambas pruebas con gallos y pollitos para determinar la digestibilidad de aminoácidos en aves, aún no se ha determinado la precisión de uso de los valores de digestibilidad de estos métodos

en el desempeño de las aves de distintas edades y líneas genéticas (Tahir y Pesti, 2012b). Para poder brindar un mejor conocimiento del valor económico de los DDGS en las dietas de pollo de engorde, pavos y de ponedoras, Tahir y Pesti (2012b) llevaron a cabo un comparativo en la formulación de dietas comerciales comunes con las bases de datos de aminoácidos digestibles de Ajinomoto y Evonik (**cuadro 2**).

A partir de las comparaciones del **cuadro 2**, podemos sacar varios puntos clave:

1. Tomando el promedio de precios de los ingredientes de 2009, los precios sombra de inclusión de DDGS en todas las formulaciones de alimentos de pollo de engorde, pavos y ponedoras excedieron de \$65.9 a \$139.5/ton el precio de compra de los DDGS. Esto indica que en dietas avícolas los DDGS tienen un valor mucho mayor que en el precio de compra del mercado.
2. El precio sombra de los DDGS fue mayor (de \$0.2 a \$6.4/ton) con la base de datos de digestibilidad de aminoácidos de Evonik que con la de Ajinomoto, excepto en las dietas de finalización de pavos y de prepostura de ponedoras. Esta diferencia se debió a los valores más bajos de digestibilidad de aminoácidos de DDGS en la base de datos de Evonik y enfatiza la importancia de elegir valores precisos de digestibilidad de aminoácidos al tomar decisiones de compra de DDGS basadas en el precio sombra.
3. En las dietas de alto costo (por ejemplo, de iniciación de pavos) no necesariamente es mayor el valor de los DDGS si se comparan con las dietas de menor costo (por ejemplo, de finalización de pavos).
4. El valor de los DDGS varía entre los tipos y edades de las aves, en los que el de mayor valor en las dietas de prepostura de ponedoras y el de menor valor en las de iniciación de pavos. Es mayor el valor económico de los DDGS en las dietas de finalización de pollo de engorde y de pavos que en las de iniciación.
5. Con los valores de digestibilidad de aminoácidos de Evonik, se incluiría de 7 a 17 por ciento de DDGS a un precio entre \$221.40 y \$226.70/ton en las dietas de iniciación de los pollos de engorde; pero con los valores de digestibilidad de Ajinomoto, no se usarían DDGS a un precio menor que \$221.40/ton. Esto enfatiza aún más en la importancia de usar valores precisos de digestibilidad de aminoácidos de los DDGS al evaluar su valor y uso en las dietas avícolas.
6. Con base solo en la economía es posible usar tasas de inclusión en la dieta de DDGS aún mayores (de 20 a 24 por ciento) en dietas de iniciación de pollo, si en esta comparación los precios estuvieron entre \$211.10 y \$191.20/ton. Esto indica que si disminuye el precio de los DDGS con respecto al precios de otros ingredientes competidores, es posible lograr mayores tasas de inclusión.
7. El pollo en finalización tiene menores requerimientos de aminoácidos digestibles en la dieta que durante la iniciación. Como resultado, las diferencias en valores que hay entre las bases de datos es mucho menos importantes en las dietas con concentraciones de aminoácidos digestibles relativamente bajas que en las de concentraciones más altas, lo que en última instancia afecta a las diferencias en el precio sombra y las tasas de inclusión de DDGS en la dieta.

Muchos nutricionistas dan por sentado que conforme disminuye el contenido de grasa cruda en los DDGS aumenta el contenido de proteína cruda y de aminoácidos. Como lo muestra el **cuadro 3**, esta no es una suposición válida porque este cambio en composición no sucede sistemáticamente entre las fuentes de DDGS con distinto contenido de fibra cruda. Por ejemplo, aunque el contenido total de lisina y treonina tiende a aumentar conforme disminuye el de grasa cruda, el de triptófano disminuyó y el de metionina de la fuente de DDGS con 5.4 por ciento de aceite fue el mismo que el de la fuente con 10.5 por ciento de aceite (**cuadro 3**). La digestibilidad ileal aparente (DIA) de la lisina, metionina, treonina y triptófano fue menor en las fuentes de DDGS reducidos en aceite, que en la de 10.5 por ciento de grasa cruda. Estos resultados indican que el contenido de grasa cruda de DDGS afecta la digestibilidad de algunos aminoácidos en aves (Dozier et al., 2015). Sin embargo,

al considerar los cambios combinados en concentración y digestibilidad total, no hubo diferencias de lisina digestible ileal aparente, contenido de treonina, diferencias pequeñas e inconsistentes en triptófano y variable en metionina digestible entre las tres fuentes de DDGS. Estos resultados indican que el contenido de aminoácidos digestibles en las fuentes de DDGS reducidas en aceite no es drásticamente diferente que en las de alto contenido de aceite, aunque se reducen los coeficientes de digestibilidad de varios aminoácidos. Sin embargo, se necesitan de métodos para determinar dinámicamente el contenido de aminoácidos digestibles en los DDGS con una composición variable de aminoácidos y grasa cruda.

Adedokun et al. (2015) determinaron la digestibilidad ileal estandarizada (DIE) de aminoácidos de cinco fuentes de DDGS para pollo de engorde (Ross 708 de 21 días de edad) y

Cuadro 2. Comparación entre el precio de mercado y precio sombra de los DDGS en la formulación de alimento comercial para pollos, pavos y ponedoras (adaptado de Tahir y Peski, 2012b)

Ingrediente	\$/ton	Iniciador de pollo (Ross)		Finalizador de pollo (Cobb)		Iniciador de pavos (Nicholas)		Finalizador de pavos (pavos macho British United)		Prepostura Leghorn (ISA North America)		Pico Leghorn (Hy-Line)	
		Alin.	Evo.	Alin.	Evo.	Alin.	Evo.	Alin.	Evo.	Alin.	Evo.	Alin.	Evo.
Maíz	170	58.41	56.17	71.96	71.20	39.48	36.42	81.22	81.17	59.40	59.16	56.08	54.40
Harina de soya	396	36.37	38.23	21.92	22.54	49.85	52.39	14.80	14.80	20.69	21.25	27.98	29.41
Harinillas de trigo	265	-	-	-	-	-	-	-	-	13.88	13.55	-	-
Grasa avícola	487	2	2.33	2.70	2.78	5.57	6.03	1	1	-	-	4.04	4.29
L-lisina	1,666	0.17	0.19	0.18	0.19	0.33	0.35	0.18	0.19	-	-	-	-
DL-metionina	3,721	0.30	0.32	0.19	0.22	0.37	0.40	0.18	0.20	0.15	0.15	0.18	0.21
L-treonina	2485	0.06	0.08	-	-	0.07	0.09	-	-	-	-	-	-
Carbonato de calcio	45	0.65	0.65	0.68	0.68	0.73	0.73	0.61	0.61	3.90	3.90	9.08	9.08
Fosfato defluorinado	646	1.70	1.68	2.09	2.08	3.34	3.32	1.41	1.41	1.67	1.66	2.26	2.25
Sal y premezcla de vitaminas y minerales	-	0.36	0.36	0.33	0.33	0.27	0.27	0.67	0.67	0.32	0.32	0.37	0.37
Costo total de la dieta, \$/ton		283.5	290.3	249.7	252.6	338.1	347.4	224.6	225.7	241.7	242.8	255.2	260.2
Precio en el mercado de DDGS, \$/ton	154												
Precio sombra de DDGS, \$/ton		221.4	226.7	240.6	240.8	219.9	225.2	236.3	227.6	293.5	291.5	233.8	240.2
Diferencia entre el precio del mercado y precio sombra de DDGS, \$/ton		67.4	72.7	86.6	86.8	65.9	71.2	82.3	73.6	139.5	137.5	79.8	86.2

Alin.= Ajinomoto, Evo.= Evonik

Cuadro 3. Digestibilidad ileal aparente total (DIA) y digestibilidad ileal aparente de aminoácidos (DIA AA) de las fuentes de DDGS con diferentes concentraciones de grasa cruda (adaptado de Dozier et al., 2015)

Nutriente %	DDGS con 10.5% de aceite			DDGS con 7.9% de aceite			DDGS con 5.4% de aceite		
	Total	DIA	DIA AA	Total	DIA	DIA AA	Total	DIA	DIA AA
Humedad	9.3	-	-	10.6	-	-	10.3	-	-
Proteína cruda	27.9	-	-	27.6	-	-	29.2	-	-
Arginina	1.25	79.9	1	1.35	77.6	1.05	1.32	76.2	1
Cisteína	0.55	68.4	0.37	0.57	62.9	0.36	0.52	62	0.32
Histidina	0.76	75	0.57	0.78	71.2	0.56	0.81	72.1	0.58
Isoleucina	1.05	73.3	0.77	1.05	69.8	0.73	1.13	70.2	0.79
Leucina	3.40	83.5	2.84	3.27	80.1	2.62	3.54	80.3	2.84
Lisina	0.81	55.2	0.45	0.87	51.0	0.44	0.89	50.4	0.45
Metionina	0.55	79.1	0.43	0.64	77.8	0.50	0.54	72.2	0.39
Fenilalanina	1.43	79.9	1.15	1.41	76.7	1.09	1.53	76.8	1.18
Treonina	1.08	61.2	0.66	1.11	56.6	0.63	1.16	56.3	0.65
Triptofano	0.29	76.7	0.15	0.22	73.3	0.16	0.20	70.8	0.14
Valina	1.43	73.3	1.05	1.45	69.9	1.01	1.52	70.1	1.07

gallinas de postura (Hy-Line W36 de 30 semanas de edad). Las fuentes de DDGS contenían de 8.25 a 9.79 por ciento de grasa cruda; en el **cuadro 4** se muestran los rangos de digestibilidad ileal aparente de materia seca y proteína cruda, así como la DIE de los aminoácidos de cinco fuentes. Entre las fuentes con contenido de grasa cruda similar hubo una variabilidad significativa de digestibilidad de la materia seca, proteína cruda y aminoácidos indispensables, con una diferencia promedio de 9.9 puntos porcentuales en DIE de aminoácidos en gallinas de postura. Como era de esperarse, los coeficientes de DIE de lisina fueron los más variables (de 41.3 a 56.5 por ciento), seguidos de la cisteína (de 56.8 a 69 por ciento), metionina (de 67.9 a 78.6 por ciento) y valina (de 55.8 a 66.5 por ciento). La variabilidad DIE de aminoácidos entre las fuentes de DDGS fue menor en pollo con una diferencia promedio en coeficientes de 7.1 puntos porcentuales. Una vez más, la mayor variabilidad de coeficientes DIE en pollo fue para la lisina (de 49.9 a 63.3 por ciento), seguido de la isoleucina (de 67.8 a 76.8 por ciento), valina (de 68.5 a 75.9 por ciento), treonina (de 61.7 a 69 por ciento) y metionina (de 77.7 a 85 por ciento). Los valores DIE de lisina y metionina fueron 8.2 y 7.4 puntos porcentuales más en pollo que en ponedoras, respectivamente. Estos resultados indican que se deben usar coeficientes de digestibilidad de aminoácidos diferentes en la formulación de dietas con DDGS para ponedoras comparado con las de pollos, y que son necesarios métodos precisos para estimar dinámicamente el contenido de aminoácidos DIE entre las fuentes de DDGS para aves. Además, estos estimados son los primeros valores DIE publicados de DDGS para ponedoras, los cuales se deben utilizar al formular dietas de nutrición de precisión para ponedoras.

Debido a la alta variabilidad del contenido de aminoácidos digestibles entre las fuentes de DDGS y a la necesidad de métodos para calcular de forma dinámica el contenido de aminoácidos digestibles, Zhu et al. (2017) realizaron un metanálisis con base en 86 observaciones de 19 publicaciones para desarrollar ecuaciones de predicción de los valores de aminoácidos ileales digestibles en los DDGS de maíz y de trigo para aves. En el **cuadro 5** se muestra la composición química promedio y el coeficiente de variación de las fuentes de DDGS de maíz notificadas en estos estudios publicados. Como era de esperarse, entre las fuentes de DDGS de maíz hay una variación considerable de composición química, lo cual es importante para desarrollar ecuaciones sólidas de predicción. El contenido de lisina fue el más variable entre las fuentes de DDGS. La digestibilidad ileal estandarizada (DIE) fue mayor para la leucina (85 por ciento) y triptofano (84.5 por ciento), y menor para la lisina fue (62.7 por ciento; **cuadro 6**). En el **cuadro 7** se muestra el promedio, rango y coeficiente de variación del contenido de aminoácidos digestibles ileales estandarizados en los DDGS de maíz entre fuentes.

El contenido de aminoácidos totales fue el único componente químico que se incluyó en las ecuaciones de predicción de contenido de aminoácidos DIE (**cuadro 8**) ya que fue la variable más predecible y representó la mayor parte de la variación entre fuentes. Las ecuaciones de predicción desarrolladas tuvieron un RMSE bajo (de 0.01 a 0.36) y R² alto, lo cual explica el 84 al 99 por ciento de variación de los valores. La evaluación del modelo de predicción mostró que la pendiente e intersección, que respectivamente representan el sesgo lineal y sesgo promedio, no fueron significativamente diferentes a 0 y 1 para todos los

Cuadro 4. Rangos de la digestibilidad ileal aparente de materia seca y proteína cruda y los coeficientes de DIE (porcentaje) de aminoácidos en las cinco fuentes de DDGS (adaptado de Adedokun et al., 2015)

Nutriente %	Gallinas ponedoras	Pollos de engorde
Materia seca	40.8 - 50.5	42.2 - 51.1
Proteína cruda	59.6 - 68.3	72.2 - 78.2
Arginina	66 - 74.7	76 - 82.6
Cisteína	56.8 - 69	71.6 - 76.5
Histidina	63.7 - 70.5	70.4 - 75.8
Isoleucina	59.6 - 68.5	67.8 - 76.8
Leucina	72.1 - 80.3	81.8 - 86
Lisina	41.3 - 56.5	49.9 - 63.3
Metionina	67.9 - 78.6	77.7 - 85
Fenilalanina	71.4 - 78	77.2 - 82.5
Treonina	52.8 - 63.8	61.7 - 69
Valina	55.8 - 66.5	68.5 - 75.9

Cuadro 5. Composición química (porcentaje) de los granos secos de destilería de maíz con solubles (DDGS) notificada en 19 estudios publicados y usados en la predicción del contenido de aminoácidos digestibles ileales estandarizados de (88 por ciento de materia seca; adaptado de Zhu et al., 2017)

Variable	n	Promedio	CV¹ %
Proteína cruda	59	27.16	11.1
Cenizas	8	4.66	9.3
Extracto etéreo	24	10.24	27.8
Fibra cruda	7	8.10	41
Fibra neutrodetergente	38	35.66	12.1
Fibra ácidodetergente	20	9.92	19.4
Aminoácidos esenciales			
Arginina	75	1.18	16.5
Cisteína	72	0.50	12.4
Histidina	67	0.70	12.1
Isoleucina	75	1	15.9
Leucina	75	3.13	11.5
Lisina	75	0.79	19.9
Metionina	75	0.50	15.8
Fenilalanina	67	1.28	12.5
Treonina	75	1	11.2
Triptofano	51	0.20	19.4
Valina	75	1.33	12.4

¹Coefficiente de variación

Cuadro 6. Promedio, rango y coeficiente de variación de digestibilidad ileal estandarizada (DIE %) de los DDGS de maíz entre las fuentes (adaptado de Zhu et al., 2017)

Variable	n	Promedio	Mínimo	Máximo	CV ¹ %
Arginina	75	81.5	53	92.6	9.7
Cisteína	67	74.3	49	91.9	14.3
Histidina	67	76.3	47	89.4	11.4
Isoleucina	75	77	52	89.4	11.1
Leucina	75	85	64.3	93.7	7.3
Lisina	75	62.7	31.3	84.8	19
Metionina	75	82.9	53.2	98.4	10
Fenilalanina	67	81.6	58.3	91	8.3
Treonina	75	70.9	39.2	89.7	12.8
Triptofano	22	84.5	60.2	92.2	10.7
Valina	75	75.9	48.8	90.6	11.5

¹Coefficiente de variación

Cuadro 7. Promedio, rango y coeficiente de variación del contenido de aminoácidos digestibles ileales estandarizados en los DDGS de maíz entre fuentes (adaptado de Zhu et al., 2017)

Variable	n	Promedio	Mínimo	Máximo	CV ¹ %
Arginina	75	0.96	0.47	1.48	21.1
Cisteína	67	0.37	0.22	0.69	22
Histidina	67	0.54	0.29	0.83	19.2
Isoleucina	75	0.77	0.49	1.38	23.1
Leucina	75	2.67	1.90	4.24	15.4
Lisina	75	0.51	0.16	0.84	31.6
Metionina	75	0.42	0.22	0.71	21.7
Fenilalanina	67	1.05	0.70	1.63	17.9
Treonina	75	0.71	0.36	1.10	20.1
Triptofano	22	0.18	0.08	0.26	26.8
Valina	75	1.02	0.60	1.64	20.6

¹Coefficiente de variación

aminoácidos, lo que sugiere que las ecuaciones son altamente confiables para predecir aminoácidos DIE en los DDGS para aves (**cuadro 9**). Los dos métodos más comúnmente usados para la determinación de la digestibilidad de aminoácidos en los ingredientes de alimentos avícolas son la prueba de digestibilidad ileal estandarizada con pollos de 3 semanas de edad y la prueba con gallos cecotomizados alimentados con precisión. Sin embargo, los estimados de digestibilidad de aminoácidos obtenidos mediante estos ensayos son diferentes y algunos nutricionistas prefieren usar los datos de uno de estos ensayos que del otro. Por lo tanto, también se desarrollaron ecuaciones de predicción a partir de los datos de estudios con

pruebas con pollos y con gallos cecotomizados alimentados con precisión (**cuadro 10**).

Por último, para actualizar las bases de datos de composición de nutrientes en el software de formulación de alimentos, muchas plantas usan la espectroscopia de reflectancia de infrarrojo cercano (NIRS) para la obtención rápida y económica de datos de composición de nutrientes de distintos ingredientes. Se han desarrollado calibraciones de aminoácidos totales y digestibles en los DDGS para diferentes equipos NIRS. Un estudio reciente de Soto et al., (2013) evaluó las diferentes estrategias de formulación de alimento para pollo al determinar

Cuadro 8. Ecuaciones para predecir el contenido de aminoácidos digestibles ileales estandarizados de las fuentes de DDGS a partir de la composición química para aves (adaptado de Zhu et al., 2017)

Aminoácido	Ecuación ¹	R ²	RMSE	Error de predicción	Sesgo de predicción
Arginina	$y = -0.20 + 0.96x$	0.95	0.13	0.19	0.31
Cisteína	$y = -0.07 + 0.88x$	0.87	0.09	0.09	0.29
Histidina	$y = -0.17 + 1.00x$	0.91	0.08	0.10	0.46
Isoleucina	$y = -0.01 + 0.77x$	0.94	0.12	0.20	0.55
Leucina	$y = -0.60 + 1.04x$	0.93	0.36	1.48	2.57
Lisina	$y = -0.22 + 0.91x$	0.87	0.16	0.25	0.25
Metionina	$y = -0.12 + 1.05x$	0.90	0.08	0.06	0.08
Fenilalanina	$y = -0.15 + 0.93x$	0.99	0.06	0.22	- 0.001
Treonina	$y = -0.17 + 0.88x$	0.84	0.24	0.23	0.73
Triptofano	$y = -0.03 + 1.00x$	0.99	0.01	- 0.001	0.01
Valina	$y = -0.19 + 0.90x$	0.93	0.15	0.40	0.82

¹y es la predicción del contenido de aminoácidos digestibles ileales estandarizados y x es la concentración total de aminoácidos en los DDGS.

Cuadro 9. Comparación entre el contenido observado y el predicho de aminoácidos digestibles ileales estandarizados de fuentes de DDGS a partir de la composición química para aves (adaptado de Zhu et al., 2017)

Aminoácido %	Promedio observado	Promedio predicho	Intercepción	Error estándar	Valor P
Arginina	0.97	0.97	0.01	0.02	0.75
Cisteína	0.38	0.37	0	0.02	0.98
Histidina	0.54	0.53	0.01	0.02	0.59
Isoleucina	0.79	0.79	0.02	0.02	0.50
Leucina	2.58	2.55	0.06	0.08	0.46
Lisina	0.50	0.50	0.01	0.02	0.69
Metionina	0.42	0.42	0.01	0.01	0.54
Fenilalanina	1.09	1.08	0.03	0.03	0.35
Treonina	0.71	0.71	0.01	0.03	0.84
Triptofano	0.18	0.18	0.	0	0.30
Valina	1.03	1.02	0.03	0.04	0.45

Cuadro 10. Ecuaciones para predecir el contenido de aminoácidos digestibles ileales estandarizados de las fuentes de DDGS a partir de la composición química de las pruebas con pollos y gallos cecotomizados (adaptado de Zhu et al., 2017)

Aminoácido	Pruebas con pollos			Pruebas con gallos		
	Ecuación ¹	R ²	RMSE	Ecuación ¹	R ²	RMSE
Arginina	$y = -0.16 + 0.89x$	0.90	0.15	$y = -0.09 + 0.95x$	0.99	0.03
Cisteína	$y = -0.05 + 0.82x$	0.79	0.10	$y = -0.08 + 0.98x$	0.97	0.02
Histidina	$y = -0.24 + 1.06x$	0.88	0.08	$y = -0.08 + 0.95x$	0.99	0.04
Isoleucina	$y = -0.03 + 0.71x$	0.90	0.13	$y = -0.11 + 0.95x$	0.99	0.04
Leucina	$y = -0.79 + 1.08x$	0.87	0.37	$y = -0.12 + 0.94x$	0.98	0.09
Lisina	$y = -0.24 + 0.90x$	0.73	0.21	$y = -0.20 + 0.97x$	0.99	0.05
Metionina	$y = -0.16 + 1.12x$	0.81	0.10	$y = -0.05 + 0.97x$	0.99	0.01
Fenilalanina	$y = -0.19 + 0.95x$	0.76	0.27	$y = -0.13 + 0.98x$	0.98	0.03
Treonina	$y = -0.14 + 0.82x$	0.82	0.13	$y = -0.15 + 0.94x$	0.99	0.04
Triptofano	$y = -0.08 + 1.13x$	0.99	0.01	$y = -0.01 + 0.92x$	0.98	0.01
Valina	$y = -0.17 + 0.86x$	0.86	0.16	$y = -0.13 + 0.92x$	0.98	0.06

¹y es la predicción del contenido de aminoácidos digestibles ileales estandarizados y x es la concentración total de aminoácidos en los DDGS.

el contenido de aminoácidos y EM de los ingredientes. Estos investigadores compararon el uso de los valores de tablas publicados de aminoácidos totales con los valores de aminoácidos totales obtenidos del NIRS, los de aminoácidos digestibles de NIRS y los de aminoácidos digestibles y de EM de NIRS en la formulación de alimentos y los efectos en el desempeño de crecimiento y composición de la canal del pollo. Los resultados de este estudio mostraron que el instrumento NIRS Foss para la determinación del contenido de aminoácidos digestibles y EM en maíz, harina de soya y DDGS y el uso de estos datos para formular dietas, resultó en mejores ganancias de peso corporal y conversión alimenticia comparado con el uso de los valores de aminoácidos totales de las tablas de composición de nutrientes publicadas.

Fósforo disponible y digestible

A diferencia de los granos y otros subproductos de granos, los DDGS contienen la mayor concentración de fósforo digestible y disponible para aves. Tahir et al. (2012) notificaron que entre múltiples muestras de maíz, harina de soya, harina de subproductos de panadería, trigo, subproductos de trigo, harina de canola y harinillas de trigo, los DDGS de maíz tuvieron el contenido más bajo de fitato y el más alto de no fitico entre estos ingredientes. El contenido total de fósforo y fitato (base materia seca) de las 89 muestras de DDGS de maíz promedió de 0.96 a 0.26 por ciento, respectivamente, los cuales estuvieron al 124 y 72 por ciento, respectivamente, de los valores notificados en el NRC (1994). Esto indica que al usar el valor del fósforo de los DDGS del NRC (1994) resultará en la subestimación del contenido de fósforo total y la sobrevaloración del contenido de fitato y fósforo disponible. Estos investigadores también mostraron que aunque el contenido de fósforo fitico de los DDGS estuvo correlacionado positivamente con la concentración de Ca y relacionado negativamente con FND, FAD y el contenido de grasa cruda; el desarrollo de un modelo de regresión óptimo resultó en una

predicción deficiente del contenido de fitato ($R^2 = 0.37$), con base en la composición del análisis proximal de los DDGS. Como resultado, no se han desarrollado ecuaciones precisas de predicción de la digestibilidad o disponibilidad del fósforo en los DDGS para aves.

En un estudio reciente de Mutucumarana et al. (2014), se determinó que el contenido de fósforo digestible verdadero de los DDGS de maíz era de 0.59 por ciento, que representaba cerca del 73 por ciento del fósforo total (**cuadro 11**). Sin embargo, todas las dietas evaluadas por Mutucumarana et al. (2014) eran deficientes en Ca y P, por lo que pudo haber llevado a una sobreestimación de la digestibilidad del fósforo, ya que aumenta la utilización del fósforo fitico cuando la concentración de Ca en la dieta está por debajo del requerimiento (Mohammed et al., 1991; Tamin y Angel, 2003), y si las aves se alimentan con una dieta deficiente en fósforo, aumenta significativamente la actividad de fitasa intestinal en comparación con la alimentación de una dieta adecuada en fósforo (Davies et al., 1970). Los resultados que se muestran en el **cuadro 11** indican que no es preciso el uso de fósforo no fitico para calcular la concentración de fósforo digestible en los ingredientes, ya que el contenido de fósforo digestible en todos los ingredientes fue mayor que las concentraciones no fíticas, lo cual indica que las aves pueden usar parte del fósforo no fitico.

La capacidad de las aves para usar fósforo fitico varía en función de la concentración en la dieta de Ca, P, vitamina D₃ y fibra, así como de la solubilidad y ubicación del fitato en la matriz de ingredientes, el procesamiento del alimento y la edad del ave (Ravidran et al., 1995; Angel et al., 2002). Martínez-Amezcuca et al. (2006) realizaron tres experimentos para evaluar la efectividad de añadir fitasa OptiPhos® y ácido cítrico a la dieta del pollo para mejorar la disponibilidad del fósforo en los DDGS. En uno de los experimentos, usaron un ensayo de proporción de pendiente del crecimiento y el análisis de cenizas de la tibia

Cuadro 11. Composición y digestibilidad del fósforo en trigo, sorgo, harina de soya y DDGS de maíz (adaptado de Mutucumarana et al., 2014)

Medición %	Trigo	Sorgo	Harina de soya	DDGS de maíz
P total ¹	0.32 (0.37)	0.24 (0.30)	0.65 (0.62)	0.82 (0.72)
P fítico	0.21	0.18	0.43	0.38
P no fítico ¹	0.11 (0.13)	0.06	0.22 (0.22)	0.44 (0.39)
P digestible verdadero	0.15	0.08	0.52	0.59
Como porcentaje de P total				
P fítico	66	77	67	47
P no fítico	35	23	33	53
P digestible verdadero	46	33	80	73

¹Los valores entre paréntesis son del NRC (1994)

del pollito para determinar que la biodisponibilidad del fósforo en los DDGS era del 67 por ciento. En otro experimento, la suplementación con fitasa y ácido cítrico liberó de 0.04 a 0.07 por ciento más fósforo de los DDGS, lo cual indica que se puede usar tanto la suplementación de fitasa OptiPhos®, como de ácido cítrico, para aumentar la disponibilidad del fósforo en los DDGS para aves. La suplementación de fitasa y ácido cítrico aumentó de 62 a 72 por ciento la biodisponibilidad de fósforo en los DDGS. Wamsley et al. (2013) determinaron que la biodisponibilidad del fósforo en la fuente de DDGS que ellos evaluaron estuvo entre 66 y 68 por ciento, lo cual concuerda con el valor notificado por Martínez-Amezcuca et al. (2006). Por lo tanto, hasta que se desarrollen métodos más precisos para calcular la digestibilidad y disponibilidad del fósforo en aves, es razonable suponer que cerca del 66 por ciento del fósforo total de los DDGS está a disposición de las aves.

Alimentación de pollo de engorde con DDGS reducidos en aceite

Desempeño del crecimiento y características de la canal

Desde 2010 se han publicado un total de 17 estudios que evalúan los efectos en el desempeño del crecimiento con la alimentación de distintas tasas de inclusión de DDGS en la dieta de pollo de engorde, cuyos resultados generales se resumen en el **cuadro 12**. De estos 17 estudios, 6 evaluaron los efectos de alimentar con varias tasas de inclusión de DDGS reducidos en aceite.

Loar et al. (2010) evaluaron los efectos de añadir 0 u 8 por ciento de DDGS en la dieta de iniciación (de 0 a 14 días) y 0, 7.5, 15, 22.5 o 30 por ciento de DDGS en dietas de crecimiento (de 14 a 28 días). La conversión alimenticia y las tasas de mortalidad no se vieron afectadas por el nivel de inclusión en la dieta de los DDGS, pero redujo la tasa de crecimiento en dietas

Cuadro 12. Resumen de las respuestas de diferentes tasas de inclusión de DDGS en el crecimiento de pollos

Inclusión de DDGS	Período	Grasa cruda de DDGS	Efectos sobre el desempeño	Referencia
0, 8, 16, 18, 24, 30% 0, 18, 16, 24%	Finalizador I - 28 a 42 días Finalizador II- 43 a 56 días	7.4%	La alimentación de 24% de DDGS durante las fases de finalización no tuvo efectos en la GDP, consumo de alimento y conversión alimenticia	Kim et al., 2016
0, 2.7, 5.4, 8.1% 0, 2, 4, 6 %	Iniciador- 0 a 28 días Finalizador- 29 a 42 días	No se notificó	La sustitución del 20% de harina de soya (de 4 a 5.4% de DDGS) mejoró la ganancia de peso corporal y redujo el costo de la dieta.	Gacche et al., 2016
0, 6, 12%	Iniciador- 0 a 10 días Engorde - 11 a 21 días Finalizador - 22 a 42 días	6.5% y 5.4%	A pesar del contenido de aceite de los DDGS y la tasa de inclusión en la dieta, no tuvo efectos en la GDP, CADP y ganancia:alimento general	Cortes-Cuevas et al., 2015

Cuadro 12. Resumen de las respuestas de diferentes tasas de inclusión de DDGS en el crecimiento de pollos

Inclusión de DDGS	Período	Grasa cruda de DDGS	Efectos sobre el desempeño	Referencia
0, 5, 10%	de 0 a 35 días	10.5%	La alimentación de dietas con 10% de DDGS hasta los 35 días de edad no tuvo diferencias en GDP, CADP y ganancia:alimento	Hassan and Al Aqil, 2015
0, 15 %	Iniciador- 0 a 21 días Engorde - 22 a 42 días	No se notificó	La alimentación con 15% de DDGS no tuvo efecto sobre la GDP, el CADP y A/G a los 21 y 42 días.	Min et al., 2015
0, 5, 10, 15%	Iniciador- 0 a 21 días	8.2%	La alimentación con la dieta de 15% de DDGS disminuyó la GDP los días 7 y 14 en comparación con las de 0 y 5% y disminuyó al día 21 comparado con las de 0 y 10%. El día 14 se redujo la conversión alimenticia con la alimentación de 15% de DDGS, comparado con otras tasas de inclusión, pero no al día 21.	Campasino et al., 2015
5, 7, 9 % o 8, 10, 12 %	Iniciador - 0 a 13 días Engorde - 14 a 26 días Finalizador - 27 a 33 días	10.5, 7.8, 5.4%	El contenido de grasa cruda de la fuente de DDGS no tuvo efecto en el desempeño del crecimiento. La inclusión de 5, 7 y 9% de DDGS resultó en mayor GDP, consumo de alimento y mejor conversión alimenticia comparado con las tasas de inclusión de 8, 10 y 12%.	Dozier and Hess, 2015
0 o 12% - iniciador o 18 % - finalizador	Iniciador – 0 a 21 días Finalizador – 21 a 42 días	11%	La alimentación con 12% de DDGS en el iniciador y 18% en el finalizador no tuvo efecto en la GDP, el CADP ganancia:alimento al alimentar dietas isocalóricas e isonitrogenadas.	Swiatkiewicz et al., 2014
10% 20% 20%	Iniciador – 0 a 17 días Engorde – 17 a 35 días Finalizador – 35 a 49 días	11%, 4%	Las fuentes de DDGS con alto o bajo contenido de aceite no tuvieron efecto en la GDP, el CADP y ganancia:alimento en el iniciador y engorde. El CADP fue mayor en las aves alimentadas con DDGS bajos en aceite durante el período de alimentación general, pero no hubo diferencias en GDP y ganancia:alimento.	Kubas and Firman, 2014
7%	Iniciador - 1 a 21 días Finalizador - 28 a 48 días	No se notificó	El NIRS determinó que el contenido de AA mejoró la ganancia de peso corporal en comparación con usar los valores de ingredientes del NRC (1994). El uso de NIRS para determinar el contenido de AA digeribles mejoró la conversión alimenticia a los 21 días en comparación de usar los AA totales.	Soto et al., 2013
0, 10, 20 %	Iniciador – 0 a 18 días	12.5%, 7.5%, 6.7%t	La alimentación de dietas con 20% de DDGS no tuvo efectos en el peso corporal, consumo de alimento y conversión alimenticia sin importar el contenido de aceite.	Guney et al., 2013
0, 10, 20 %	Iniciador – 7 a 21 días	No se notificó	La inclusión creciente de DDGS disminuyó linealmente la GDP del día 7 al 14, pero durante este período no se observaron efectos en el CADP y ganancia:alimento. Del día 15 al 21 hubo un efecto cuadrático en el CADP, pero no hubo diferencias en GDP y ganancia:alimento.	Perez et al., 2011
0, 10, 20 %	Iniciador – 0 a 21 días Finalizador– 22 a 42 días	No se notificó	La alimentación de DDGS aumentó el CADP, pero disminuyó la GDP y conversión alimenticia del día 1 al 21 y del día 22 al 42 disminuyó el CADP, GDP y la conversión alimenticia. La alimentación con 10% o 20% de DDGS no tuvo efecto en el desempeño del crecimiento entre los días 1 a 21, pero del día 22 al 42 mejoró la GDP y la conversión alimenticia.	Liu et al., 2011

Cuadro 12. Resumen de las respuestas de diferentes tasas de inclusión de DDGS en el crecimiento de pollos

Inclusión de DDGS	Periodo	Grasa cruda de DDGS	Efectos sobre el desempeño	Referencia
0, 8 % 0. 7.5, 15, 22.5, 30 %	Iniciador – 0 a 14 días Engorde – 14 a 28 días	No se notificó	La alimentación con 8% de DDGS durante la iniciación y entre 7.5 y 15% de DDGS en la primera fase del crecimiento proporcionó un desempeño del crecimiento aceptable.	Loar et al., 2010
0, 5, 10 %	de 0 a 42 días	12.6%	No tuvo efecto en el CADP, GDP y conversión alimenticia generales. La extrusión aumentó la digestibilidad de aminoácidos en los DDGS de maíz.	Oryschak et al., 2010
0, 10, 20, 30, 40, 50 %	Iniciador – 0 a 14 días Engorde – 14 a 35 días Finalizador – 35 a 49 días	No se notificó	Es posible incluir hasta 20% de DDGS en las dietas de pollo hasta los 49 días de edad con poca o ninguna reducción en el desempeño del crecimiento si las dietas se formulan con base en aminoácidos digestibles. La adición de 30% o más de DDGS reduciría el desempeño del crecimiento.	Wang et al., 2008
0, 15, 30 %	Iniciador - 0 a 14 días Engorde – 15 a 35 días Finalizador - 36 a 42 días	9.4%	Al formular dietas con base en aminoácidos digestibles, la alimentación continua de 15% de DDGS o de manera alternada entre 0 y 15%, no tuvo efectos en la GDP, el CADP y ganancia:alimento. La alimentación con 30% de DDGS disminuyó la GDP en cada fase, así como el CADP general.	Wang et al., 2007

con más del 15 por ciento de este ingrediente. Sin embargo, Shim et al. (2011) alimentaron con dietas isonutricionales con 0, 8, 16 y 24 por ciento de DDGS con grasa avícola como fuente de energía suplementaria y las dietas se formularon con base en aminoácidos digestibles, con aminoácidos cristalinos. Al final de la fase de iniciación (día 18) se mejoró la ganancia de peso corporal, cuando las aves se alimentaron con 8 por ciento DDGS comparado con la dieta control, mientras que a los 42 días la ganancia de peso y ganancia:alimento fueron similares entre los niveles de DDGS. La grasa abdominal, el rendimiento de carne de pechuga y la calidad de la canal tampoco fueron diferentes entre las dietas con hasta un 24 por ciento de DDGS. Estos resultados muestran que los DDGS pueden ser un buen ingrediente alternativo en las dietas para pollos de engorde en niveles de hasta 24 por ciento cuando se formulan con base en aminoácidos digestibles, sin afectar el desempeño del crecimiento, ni la calidad de la canal o la carne.

Guney et al. (2013) alimentaron dietas de iniciación y crecimiento con 0, 10 o 20 por ciento de DDGS con contenido variable de aceite y no mostraron efectos perjudiciales en la ganancia de peso corporal, consumo de alimento y conversión alimenticia del día 0 al 18 de edad (**cuadro 13**). De hecho, la conversión alimenticia mejoró con la dieta de 10 por ciento de DDGS con la fuente que tenía el contenido más bajo de grasa cruda.

Kim et al. (2016) determinaron los efectos de alimentar dietas con 30 por ciento de DDGS reducidos en aceite (7.4 por ciento de grasa cruda) en el desempeño del crecimiento y composición de la canal de pollos en finalización de los 28 a los 42 días de edad (finalización 1; **cuadro 14**) y del los 43 a los 56 días de edad (**cuadro 15**). Durante la primera fase

de finalización, no hubo diferencias en ganancia de peso corporal, consumo de alimento y conversión alimenticia entre los niveles de inclusión de DDGS en la dieta, excepto con 30 por ciento, que resultó en una reducción del desempeño de crecimiento. Sin embargo, entre las aves alimentadas con niveles crecientes de DDGS en esas dietas no hubo diferencias en el peso o grasa de la canal, filetes, tiras de pollo ternura y peso total de la pechuga. De manera similar durante la fase dos de finalización, Kim et al. (2016) mostraron que no hubo diferencias en el desempeño del crecimiento y la composición de la canal al alimentar dietas con hasta 24 por ciento de DDGS reducidos en aceite. Por lo tanto, cada vez hay más pruebas de múltiples estudios publicados que indican que es posible alimentar hasta 20 por ciento de DDGS reducidos en aceite en dietas de iniciación y crecimiento, y hasta 24 por ciento en las de finalización, sin que afecte el desempeño del crecimiento y las características de la canal. Sin embargo, para conseguir el desempeño de crecimiento y características de la canal aceptables, las dietas se deben formular con valores precisos de EMA_n y aminoácidos digestibles de las fuentes de DDGS reducidos en aceite.

Para obtener un análisis más detallado de los efectos generales de la alimentación con dietas con DDGS en pollo de engorde, se realizó un metanálisis que resume los datos de desempeño de crecimiento de 19 estudios publicados (Martínez-Amezcu et al., 2006; Wang et al., 2007; Wang et al., 2008; Loar et al., 2010; Olukosi et al., 2010; Oryschak et al., 2010; Liu et al., 2011; Min et al., 2011; Barekatin et al., 2013a, b, c; Guney et al., 2013; Wamsley et al., 2013; Swiatkiewicz et al., 2014; Campasino et al., 2015; Cortés-Cuevas et al., 2015; Hassan y Al Aqil, 2015; Min et al., 2015; Kim et al., 2016). Los resultados de este metanálisis se muestran en los **cuadros 16, 17 y 18**.

Cuadro 13. Efectos de la adición de 0, 10 o 20 por ciento de DDGS de contenido de aceite variable en el desempeño del crecimiento de pollo de engorde de 0 a 18 días de edad (adaptado de Guney et al., 2013)

	Control	DDGS 12.5 % de grasa cruda		DDGS 7.5 % de grasa cruda		DDGS 6.7 % de grasa cruda	
		10%	20%	10%	20%	10%	20%
Tasa de inclusión en la dieta	0%	10%	20%	10%	20%	10%	20%
Peso corporal al día 18, g	596	666	615	607	615	650	598
Consumo de alimento del día 0 al 18, g/ave/día	53.6	56	56.8	54.2	55.9	53.3	56.7
Ganancia:Alimento	1.61	1.51	1.66	1.61	1.63	1.47	1.70

^{a,b,c}Las medias con diferentes superíndices en las filas son diferentes (P menor que 0.05).

Cuadro 14. Efectos alimentar pollos de engorde con concentraciones crecientes de DDGS con 7.4 por ciento de grasa cruda en el Finalizador 1 sobre el desempeño del crecimiento y composición de la canal (adaptado de Kim et al., 2016)

Finalizador 1, 28 – 42 días de edad	Tasa de inclusión en la dieta de DDGS					
	0%	6%	12%	18%	24%	30%
Ganancia de peso corporal, kg	1.60 ^a	1.64 ^a	1.57 ^a	1.56 ^a	1.56 ^a	1.42 ^b
Consumo de alimento, kg	3.01	3.06	3.05	2.97	2.98	3
Ganancia:Alimento	1.84 ^b	1.87 ^b	1.90 ^b	1.89 ^b	1.90 ^b	2.03 ^a
Peso corporal a los 43 días de edad, kg	2.63	2.70	2.62	2.72	2.58	2.60
Peso de la canal, kg	1.92	1.97	1.91	1.98	1.87	1.87
Rendimiento de la canal %	73.5 ^a	73.2 ^{ab}	73.5 ^a	72.9 ^{abc}	72.8 ^{bc}	72.3 ^c
Grasa, g	27	28	28	28	25	29
Filete, g	461	481	471	483	458	461
Tiras de pollo, g	98	100	98	98	96	94
Pechuga total, g	559	581	569	581	553	554

^{a,b,c}Las medias con diferentes superíndices en las filas son diferentes (P menor que 0.05).

Cuadro 15. Efectos alimentar pollos de engorde con concentraciones crecientes de DDGS con 7.4 por ciento de grasa cruda en el Finalizador 2 sobre el desempeño del crecimiento y composición de la canal (adaptado de Kim et al., 2016)

Finalizador 2, 43 – 56 días de edad	Tasa de inclusión en la dieta de DDGS			
	0%	8%	16%	24%
Ganancia de peso corporal, kg	1.45	1.47	1.42	1.44
Consumo de alimento, kg	3	3.14	3.02	3.06
Ganancia:Alimento	2.08	2.09	2.07	2.08
Peso corporal a los 57 días de edad, kg	4.61	4.67	4.60	4.66
Peso de la canal, kg	3.51	3.47	3.49	3.52
Rendimiento de la canal %	75.6	75.2	75.7	76.1
Grasa, g	79	77	78	80
Filete, g	976	964	972	988
Tiras de pollo, g	179	178	180	182
Pechuga total, g	1,155	1,142	1,152	1,170

^{a,b,c}Las medias con diferentes superíndices en las filas son diferentes (P menor que 0.05).

Entre las 70 observaciones notificadas, la alimentación de dietas con DDGS no tuvo efectos en la ganancia de peso corporal, mejoró 3 por ciento el consumo de alimento y aumentó 1.5 por ciento la ganancia:alimento (**cuadro 16**). De hecho, el 73 por ciento de las observaciones mostró que no hubo cambios o que mejoró la ganancia de peso corporal, el 85 por ciento resultó sin cambios o mejoró el consumo de alimento y la ganancia:alimento no tuvo cambios o mejoró un 91 por ciento de las veces (**cuadro 17**). La alimentación de dietas con DDGS durante el período de iniciación mejoró la ganancia de peso corporal y la ganancia:alimento, comparado con la alimentación de dietas de DDGS durante el período de finalización y el período de alimentación general (**cuadro 18**). Los niveles crecientes de DDGS aumentaron linealmente un 5.5 por ciento la ganancia:alimento al hacerlo con dietas con más del 20 por ciento, pero hubo efectos mínimos con una alimentación menor

al 20 por ciento. Estos resultados indican que los DDGS se pueden usar eficazmente a tasas de inclusión de hasta el 20 por ciento en dietas de iniciación, crecimiento y finalización del pollo de engorde, con un mínimo efecto en ganancia de peso corporal, consumo de alimento y ganancia:alimento.

Calidad de la canal y de la carne

Los investigadores han observado resultados positivos de manera constante en la calidad de la canal y de la carne cuando se añaden DDGS a las dietas del pollo de engorde. Corzo et al. (2009) alimentaron pollos con dietas con 0 u 8 por ciento de DDGS y no observaron diferencias en el color de la carne, pH final, pérdida por cocción y valores de esfuerzo de corte. Además, no hubo diferencia en la textura de la carne, pero la preferencia en sabor y aceptabilidad general por parte del consumidor fue ligeramente mayor en la carne

Cuadro 16. Resumen de los efectos de la inclusión de DDGS en la dieta en el desempeño del crecimiento del pollo de engorde (resumen de 19 estudios desde 2010)¹

Variable	DDGS – control (Expresado como %)			Peso corporal inicial, g	Peso corporal final, g	Días de alimentación
	Ganancia de PC ²	Consumo de alimento	Ganancia:Alimento			
Observaciones	70	70	70	67	67	70
Estudios	16	16	16	15	15	16
Promedio	2.7	3**	1.5**	345	1,812	26
Mínimo	-23.4	-6.5	-21.2	25	302	5
Máximo	76.5	50.8	25.1	3,200	4,660	49

**Las medias difieren de 0 (P menor que 0.05).

¹En el análisis se usó la inversa del error estándar combinado de las observaciones como factor de ponderación.

²PC = peso corporal

Cuadro 17. Resumen de las respuestas de desempeño del crecimiento al alimentar pollo de engorde con dietas de DDGS en comparación con las dietas control (resumen de 19 estudios desde 2010).

Variable	N	Respuesta a los DDGS ¹ de maíz en la dieta		
		Aumentó	Se redujo	Sin cambio
Ganancia de peso corporal	70	15	19	36
Consumo de alimento	67	22	10	35
Ganancia:Alimento	70	17	6	47

¹Número de resultados significativos y no significativos.

Cuadro 18. Resumen de los efectos del período de alimentación y las tasas de inclusión en la dieta de DDGS de maíz en el desempeño del crecimiento de pollo de engorde (resumen de 19 estudios desde 2010)¹

Variable	Período de alimentación			Error Est.	Tasa de inclusión de DDGS %			Error Est.
	Iniciador	Finalizador	Total		<10	de 10 a 20	> 20	
Observaciones	26	14	30	-	21	34	15	-
Estudios	8	3	7	-	9	14	7	-
Ganancia de PC ²	0.56	-5.42	-5.57	2.70	-0.89	-2.57	-6.97	2.85
Consumo de alimento	0.14	-3.31	-0.25	1.73	1.10	-1.64	-2.87	1.95
Ganancia:Alimento ²	-0.05	1.59	4.17	1.40	-0.38	0.54	5.54	1.55

¹Se notificó el valor de la media de cuadrados mínimos. En el análisis se usó la inversa del error estándar combinado de las observaciones como factor de ponderación. La fase de iniciación fue del día 0 al 21 y la de finalización de los 21 al 42 o 49 días. Si el pollo se alimentó del día 0 al 42 o 49, se usó el desempeño del crecimiento de todo el período en lugar del de las fases individuales.

²Cada aumento de unidad porcentual (porcentaje) en la tasa de inclusión de DDGS en la dieta resultó en una disminución del 0.34 por ciento (porcentaje relativo) en ganancia de peso corporal y un 0.32 por ciento de aumento de ganancia:alimento.

del pollo alimentado con la dieta control. Sin embargo, los consumidores caracterizaron las pechugas de pollo de ambos tratamientos como que les gustó “medianamente” y aquellos a los que les gustó “medianamente” o “mucho” no pudieron distinguir la carne de pechuga entre los dos tratamientos. Entre ambos tratamientos no hubo diferencias de características sensoriales de las pechugas de pollo, pero la carne de los pollos alimentados con la dieta de DDGS tuvo un contenido mayor de ácido linoleico y ácidos grasos poliinsaturados, lo que probablemente la hizo más susceptible a la peroxidación durante el almacenamiento a largo plazo de la carne fresca. En general, estos investigadores indicaron que la alimentación de 8 por ciento de DDGS en la dieta resultó en una carne de pechuga y de muslo de alta calidad, con diferencias mínimas.

Schilling et al. (2010) alimentaron dietas con 0, 6, 12, 18 y 24 por ciento de DDGS a pollos de engorde durante 42 días; lograron rendimientos de carne de pechuga de alta calidad sin importar el nivel de DDGS. La calidad de la carne del muslo fue similar entre las aves alimentadas con dietas con 0 a 12 por ciento de DDGS, pero los niveles de inclusión mayores resultaron en una carne más susceptible a la peroxidación.

Estrés oxidativo y función inmunitaria

Cada vez hay más pruebas en múltiples especies animales de que los DDGS tienen propiedades químicas que reducen el estrés oxidativo y mejoran la función inmunitaria y la salud. Los DDGS de maíz tienen concentraciones relativamente altas de tocoferoles, tocotrienoles y xantofilas que se sabe son potentes antioxidantes (véase el **capítulo 6** de este manual). Además, los DDGS de maíz tienen cerca del 10 por ciento de levadura residual y componentes de la pared celular de la levadura (mananos, α -glucanos y nucleótidos) que han demostrado tener efectos benéficos sobre la salud de los animales (Shurson, 2017).

Min et al. (2015) llevaron a cabo un estudio para evaluar los efectos de alimentar con dietas de 0 o 15 por ciento de DDGS a pollos durante seis semanas bajo un desafío inmunosupresivo (dexametasona). Las aves sujetas a un desafío

inmunitario redujeron la tasa de crecimiento y la conversión alimenticia, pero la alimentación de dietas con DDGS no tuvo efecto en el desempeño del crecimiento. Curiosamente, la alimentación con dietas de DDGS resultó en una reducción de la actividad antioxidante sérica total, así como actividad de dismutasa superóxido total sérica y hepática, pero aumentó en pollos de 21 días de edad la IgA, IgG y malondialdehído séricos. Los pollos alimentados con DDGS tuvieron mayor abundancia relativa de ARNm que codifica IL-4 e IL-6 que las aves alimentadas con las dietas control, el desafío inmunitario disminuyó la expresión de glutatión peroxidasa, IL-6 e IL-10. Estos resultados indican algún beneficio de mejorar la función inmunitaria del pollo de engorde sujeto a desafío inmunitario al alimentarlo con dietas de DDGS.

Alimentación de gallinas ponedoras con DDGS reducidos en aceite

Desde 2010 se han publicado un total de 11 estudios que evalúan la producción y calidad del huevo con la alimentación de dietas que contenían diversas cantidades de DDGS en ponedoras, cuyos resultados generales se resumen en el **cuadro 19**. De estos 11 estudios, 5 evaluaron los efectos de alimentar gallinas ponedoras con varias tasas de inclusión de DDGS reducidos en aceite.

Recientemente, El-Hack et al. (2015) revisaron el uso de DDGS de maíz en las dietas de ponedoras. Estos autores informaron que aunque anteriormente las tasas de inclusión máximas de DDGS en las dietas de ponedoras habían sido del 10 a 15 por ciento, varios estudios han demostrado que si se hacen ajustes adecuados en la formulación, en especial de contenido de energía, lisina digestible y metionina, es posible usar tasas de inclusión mucho mayores para lograr un desempeño y calidad del huevo adecuados. Además, Masa'deh (2011) demostró que la alimentación de dietas con 30 por ciento de DDGS en ponedoras ahorró \$31.15/ton y \$28.58/ton en las fases de producción I y II, comparado con las dietas sin DDGS.

Los DDGS de maíz son una excelente fuente de energía, aminoácidos digestibles, fósforo disponible y xantofilas para gallinas ponedoras. Swiatkiewicz et al. (2014a) indicaron la alimentación de dietas con hasta 20 por ciento de DDGS sin afectar los índices de calidad ósea de ponedoras. Además, numerosos estudios han mostrado de manera constante que la alimentación de niveles crecientes de inclusión de DDGS aumenta el color de la yema de huevo debido a las xantofilas (de 30 a 56 mg/kg; Trupia et al., 2016) presentes de forma natural en este coproducto del maíz.

Para obtener un análisis más detallado de los efectos generales de la alimentación con dietas con DDGS en ponedoras, se realizó un metanálisis que resume la producción de huevo y características de calidad con los datos de 17 estudios publicados desde 2010 (Świątkiewicz y Koreleski, 2006; Shalash et al., 2010; Wu-Haan et al., 2010; Ghazalah et al., 2011; Masa'deh et al., 2011; Tangendjaja y Wina, 2011; Koksai et al., 2012; Sun et al., 2012; Cho et al., 2013; Deniz et al., 2013a; Deniz et al., 2013b; Jiang et al., 2013; Świątkiewicz et al., 2013; Purdum et al., 2014; Cortés-Cuevas et al., 2015; Hassan y Al Aquil, 2015; Trupia et al., 2016).

Cuadro 19. Resumen de las respuestas de producción y calidad del huevo de alimentar ponedoras con diversas tasas de inclusión de DDGS en la dieta.

Inclusión de DDGS	Período	Grasa cruda de DDGS	Efectos sobre el desempeño	Referencia
0, 10, 20 %	21 a 26 semanas de edad	No se notificó	No tuvo efecto en la producción de huevos, consumo de alimento, peso del huevo y cambio del peso corporal de la gallina. La alimentación con 20 por ciento de DDGS redujo 24 por ciento las emisiones diarias de amoníaco y 58 por ciento las de sulfuro de hidrógeno.	Wu-Haan et al., 2010
0, 5, 10, 15, 20, 25%	24 a 46 semanas de edad (Fase 1) 47 a 76 semanas de edad (Fase 2)	10.3%	El nivel de DDGS en la dieta no tuvo efecto en el consumo de alimento, producción de huevo, unidades Haugh, gravedad específica y ganancia de peso general. El aumento de la tasa de inclusión de DDGS disminuyó el peso del huevo durante la fase 1, pero no durante la fase 2. El aumento del nivel de DDGS en la dieta aumentó el color de la yema y disminuyó la excreción de nitrógeno y fósforo en la gallinaza.	Masa'deh et al., 2011
0, 4, 8, 12, 16%	40 a 50 semanas de edad	9.7%	Las gallinas alimentadas con dietas de DDGS tuvieron un consumo diario de alimento ligeramente menor, pero entre los niveles de inclusión de DDGS en la dieta no hubo diferencias en la producción de huevo, conversión alimenticia, masa y peso del huevo.	Tangendjaja and Wina, 2011
0, 17, 35, 50 %	54 semanas de edad alimentadas durante 24 semanas	10.7%	Es posible alimentar dietas con hasta un 50 por ciento de DDGS sin que se afecten la producción de huevo, consumo de alimento, conversión alimenticia, peso y masa del huevo, siempre y cuando se brinden aminoácidos digestibles adecuados en dichas dietas. La alimentación de dietas con DDGS mejoró la calidad interna del huevo durante el almacenamiento y mejoró el color de la yema. La alimentación de dietas con 50 por ciento de DDGS tuvo las mayores unidades Haugh, pero entre los tratamientos de la dieta no hubo diferencias de yema y porcentaje de albúmina.	Sun et al., 2012
10 por ciento		12.2%	No hubo efecto en la producción de huevo, consumo de alimento, eficiencia alimenticia, peso corporal inicial y final, peso y masa del huevo, grosor y resistencia a la ruptura de la cáscara de huevo, unidades Haugh, huevos dañados y comercializables.	Deniz et al., 2013a

Cuadro 19. Resumen de las respuestas de producción y calidad del huevo de alimentar ponedoras con diversas tasas de inclusión de DDGS en la dieta.

Inclusión de DDGS	Período	Grasa cruda de DDGS	Efectos sobre el desempeño	Referencia
0, 5, 10, 15, 20 %	28 a 36 semanas de edad	11.2%	La alimentación con dietas de hasta 15 por ciento de DDGS no tuvo efectos en la producción de huevo, consumo de alimento, conversión alimenticia, peso y masa del huevo, huevos dañados y comercializables, pero el 20 por ciento de DDGS redujo el desempeño, así como el peso y masa del huevo. La tasa de inclusión de DDGS no tuvo efectos en el grosor y la resistencia a la ruptura de la cáscara, y las unidades Haugh, pero aumentó el color de la yema.	Deniz et al., 2013b
0, 10, 20 %	40 a 63 semanas de edad	8.3%	El aumento del nivel de DDGS en la dieta no tuvo efecto en la producción de huevo, consumo de alimento, peso y masa del huevo, pero sí mejoró el color de la yema, el grosor de la cáscara y la conversión alimenticia.	Jiang et al., 2013
20%	20 a 33 semanas de edad	10.3, 7.3, o 5.2%	El contenido de grasa cruda de los DDGS no tuvo efecto en la producción de huevo, consumo de alimento, conversión alimenticia, peso o masa del huevo y ganancia de peso de la gallina.	Purdum et al., 2014
20%	26 a 39 semanas de edad (Fase 1) 40 a 55 semanas de edad (Fase 2)	11%	En la fase de postura y en general, no hubo diferencias en la producción de huevo, consumo de alimento, conversión alimenticia, peso y masa del huevo, calidad interna y de la cáscara de huevo. La alimentación de dietas con DDGS aumentó el color de la yema de huevo.	Swiatkiewicz et al., 2014b
0, 6, 12 %	69 a 77 semanas de edad	6.5 o 5.4 %	Entre los tratamientos de la dieta no hubo diferencias en la producción de huevo, consumo de alimento, conversión alimenticia, peso y masa del huevo. Se mejoró el color de la yema con las dietas con DDGS.	Cortes-Cuevas et al., 2015
0, 5, 10, 20 %	30 a 42 semanas de edad	9%	Los niveles de DDGS en la dieta no tuvieron efecto en la producción de huevo, peso y masa del huevo, consumo de alimento, conversión alimenticia por masa de huevo, gravedad específica del huevo, unidades Haugh y color de la yema. Las gallinas alimentadas con dietas con 20 por ciento de DDGS tuvieron mayor pérdida de peso corporal que los otros tratamientos.	Hassan and Al Aqil, 2015

Como se muestra en el **cuadro 20**, las ponedoras alimentadas con dietas de DDGS perdieron en promedio casi el 16 por ciento de peso corporal, comparado con las alimentadas con las dietas control, pero el consumo de alimento, ganancia:alimento, producción de huevo, peso del huevo y unidades Haugh fueron mínimamente afectadas (de -0.2 a 2.7 por ciento de cambio con relación al control). Sin embargo, el grosor de la cáscara y color de la yema se vieron afectadas positivamente (mejoraron 4.1 y 18.1 por ciento, respectivamente) con la alimentación de dietas de DDGS en ponedoras. La mayoría de las observaciones notificadas en estos 17 estudios mostraron ya sea una mejoría o ningún cambio (**cuadro 21**) en el peso corporal de la gallina (78 por ciento), consumo de alimento (78 por ciento), ganancia:alimento (65 por ciento), producción de huevo (70 por ciento), peso del huevo (75 por ciento), grosor de la cáscara (100 por ciento),

color de la yema (98 por ciento) y unidades Haugh (89 por ciento).

Los cambios del peso corporal y consumo de alimento fueron similares en gallinas alimentadas con dietas de DDGS durante más de 16 semanas, comparado con las gallinas alimentadas durante menos de 16 semanas, pero la ganancia:alimento fue mayor (P menor que 0.01) en estudios en los que las ponedoras se alimentaron durante menos de 16 semanas (**cuadro 22**). La duración del período de alimentación no afectó la producción de huevo, dureza de la cáscara y color de la yema de huevo, pero las gallinas alimentadas con dietas de DDGS durante menos de 16 semanas tuvieron una reducción del peso del huevo ligeramente mayor (P menor que 0.01) pero relativamente menor (4 por ciento) y una ligera mejoría de unidades Haugh (P menor que 0.03) en comparación con las

alimentadas durante más de 16 semanas. El aumento de las tasas de inclusión de DDGS en la dieta tendió a aumentar (P menor que 0.11) el cambio de peso corporal, mejoró (P menor que 0.01) el consumo del alimento y aumentó (P menor que 0.01) ganancia:alimento. Además, el aumento de las tasas de inclusión de DDGS en la dieta disminuyó (P menor que 0.01) la

producción y peso del huevo, pero mejoró (P menor que 0.01) las unidades Haugh. Por último, la creciente tasa de inclusión de DDGS en la dieta de ponedoras tendió (P menor a 0.11) a mejorar el color de la yema de huevo, pero redujo ligeramente el grosor de la cáscara.

Cuadro 20. Resumen de los efectos de la alimentar gallinas ponedoras con dietas de DDGS de maíz sobre el desempeño de la producción de huevo (resumen de 17 estudios publicados desde 2010)¹

Variable	Observaciones	Estudios	DDGS - control (expresado como porcentaje)		
			Promedio	Mínimo	Máximo
Cambio en el peso corporal	36	8	-16**	-100	183.9
CADP	65	16	-0.2*	-11.7	6.9
Ganancia:Alimento	51	13	2.7**	-4	26.1
Producción de huevo	57	15	-1.7**	-28.7	2.6
Peso del huevo	69	17	-0.5**	-5.5	3.7
Grosor de la cáscara de huevo	32	9	4.1**	-2.8	8.3
Color de la yema	41	11	18.1**	-2.3	58.2
Unidades Haugh	35	9	-0.1**	-2.4	6

**Las medias difieren de 0 (P menor que 0.05)

* Las medias difieren de 0 (P menor que 0.10).

¹Se usó la inversa del error estándar combinado de las observaciones como factor de ponderación.

Cuadro 21. Resumen de los efectos de la alimentar gallinas ponedoras con dietas de DDGS de maíz sobre el desempeño de la producción de huevo (resumen de 17 estudios publicados desde 2010)¹

Variable	N	Respuesta a los DDGS de maíz en la dieta ¹		
		Aumentó	Se redujo	Sin cambio
Cambio en el peso corporal	36	1	8	27
CADP	65	2	14	49
Ganancia:Alimento	51	18	2	31
Producción de huevo	57	5	17	35
Peso del huevo	69	4	17	48
Grosor de la cáscara de huevo	32	6	0	26
Color de la yema	41	33	1	7
Unidades Haugh	35	0	4	31

¹Número de resultados significativos y no significativos.

Cuadro 22. Resumen de los efectos de la duración del período de alimentación y las tasas de inclusión en la dieta de DDGS de maíz en gallinas ponedoras en el desempeño de la producción de huevo y calidad del huevo (resumen de 17 estudios publicados desde 2010)¹

Variable	Período de alimentación			Nivel de inclusión de DDGS %			SEM
	> 16 semanas	< 16 semanas	SEM2	<10	de 10 a 20	> 20	
Observaciones	25	44		16	30	23	
Estudios	6	11		9	13	12	
Cambio del PC	-28.8	-25.6	17.7	-17.2	-17.5	-46.9	4.9
CADP	0.03	1	0.7	-0.4	0.6	1.4	0.3
Ganancia:Alimento	3.6	13.1	2.9	2.2	7.6	15.1	1
Producción de huevo	-4.3	-6.6	1.9	-2.2	-5.6	-8.4	0.8
Peso del huevo	-2.3	-4.3	0.8	-1.3	-3.5	-5	0.3
Grosor de la cáscara de huevo	2	-0.8	2	1.1	1	-0.2	0.6
Color de la yema	22.3	23.1	5.2	12.5	16.3	39.3	1.9
Unidades Haugh	1.5	0.1	0.6	-0.1	1.3	1.2	0.2

¹Se usó la inversa del error estándar combinado de las observaciones como factor de ponderación.

SEM = error estándar de la media.

Calidad del huevo

Como se resume en el **cuadro 19**, la mayoría de los estudios recientes que han evaluado la tasas de inclusión de los DDGS y el contenido de grasa cruda notifican efecto mínimos, si es que los hay, en la calidad del huevo con niveles relativamente altos de DDGS (de más del 20 por ciento). Durante 24 semanas Sun et al. (2012) alimentaron gallinas de postura White Leghorn de 54 semanas con dietas isocalóricas con 0, 17, 35 o 50 por ciento de DDGS (10.7 por ciento de grasa cruda) para evaluar la producción y calidad interna del huevo. La producción de huevo, consumo de alimento, conversión alimenticia, peso y masa del huevo solo se redujo al alimentar con la dieta de 50 por ciento de DDGS durante el período de las primeras 12 semanas (**cuadro 23**). Sin embargo, una vez reformuladas las dietas con mayor contenido de lisina y metionina, mejoró enormemente la reducción de desempeño por la alimentación

de dietas con 50 por ciento de DDGS. Como resultado, durante las últimas seis semanas del estudio no hubo diferencias en producción, peso de huevo y consumo de alimento entre los tratamientos de la dieta. La alimentación de niveles crecientes de inclusión de DDGS aumentó el color de la yema de huevo y las unidades Haugh, y la alimentación de 50 por ciento de DDGS resultó en las unidades Haugh más altas, lo que indica que los huevos producidos por gallinas alimentadas con esta dieta tuvieron una vida útil más larga que los de gallinas alimentadas con tasas de inclusión más bajas (**cuadro 24**). Además, el mayor porcentaje de grosor y resistencia a la ruptura de la cáscara fue mayor en gallinas alimentadas con la dieta de 50 por ciento de DDGS. Estos investigadores concluyeron que hasta un 50 por ciento de DDGS se puede añadir a las dietas de ponedoras sin afectar la producción de huevo, el consumo de alimento, eficiencia alimenticia, peso y masa del huevo, si las dietas con DDGS tienen cantidades

Cuadro 23. Efecto de la alimentación de gallinas ponedoras con dietas con niveles crecientes de DDGS en el desempeño de la producción de huevo durante 24 semanas (adaptado de Sun et al., 2012)

Medición	0% de DDGS	17% de DDGS	35% de DDGS	50% de DDGS
Producción de huevo %	87 ^a	83 ^b	84 ^{a,b}	62 ^c
Consumo de alimento, g/gallina/día	104.4 ^a	104.2 ^a	106 ^a	92.2 ^b
Eficiencia alimenticia, g huevo/kg de alimento	531.6 ^a	487.6 ^b	501.9 ^b	431.8 ^c
Peso del huevo, g	64.7 ^a	63.3 ^{bc}	64 ^{ab}	62.6 ^c
Masa del huevo, g/gallina/día	56 ^a	51.8 ^b	53.6 ^{ab}	39.1 ^c
Cambio de peso corporal, kg	0.02	0	0	0.05

^{a,b,c}Las medias con diferentes superíndices en la fila son diferentes (P menor que 0.05).

Cuadro 24. Efecto de la alimentación de gallinas ponedoras con dietas con niveles crecientes de DDGS en la calidad y composición del huevo (adaptado de Sun et al., 2012)

Medición	0% de DDGS	17% de DDGS	35% de DDGS	50% de DDGS
Color de la yema ¹	5.5 ^d	7 ^c	7.9 ^b	8.7 ^a
Yema %	26.5	26.8	26.8	26.5
Albúmina %	63.7	63.4	63.4	63.3
Cáscara %	9.8 ^b	9.8 ^b	9.9 ^b	10.1 ^a
Unidades Haugh² tiempo de almacenamiento, semanas				
Semana 0	80.5 ^b	81.8 ^b	82.3 ^b	85.3 ^a
Semana 1	76.4 ^b	78 ^b	78.3 ^b	82.3 ^a
Semana 2	73.7 ^b	75.6 ^b	76 ^b	79.9 ^a
Semana 3	72.4 ^b	73.7 ^b	74.3 ^b	78.2 ^a
Resistencia a la ruptura de la cáscara, g	3,924 ^b	3,995 ^b	3,877 ^b	4,299 ^a

^{a,b,c,d}Las medias con diferentes superíndices en la fila son diferentes (P menor que 0.05).

¹Los rangos de calificación del color de la yema van de 1 (clara) a 10 (oscura).

²Ecuación de unidades Haugh = $100 \times \log [\text{altura} - 0.01 \times 5.6745 \times (30 \times \text{peso}^{0.37} - 100) + 1.9]$

suficientes de aminoácidos digestibles.

Con huevos del mismo estudio, Sun et al. (2013) evaluaron los efectos de alimentar dietas isocalóricas con 0, 17, 35 o 50 por ciento de DDGS (10.7 por ciento de grasa cruda) a ponedoras en la composición de la yema del huevo. No hubo diferencias en contenido de lípidos y proteína de la yema del huevo, excepto con la dieta con 50 por ciento de DDGS, que resultó en un ligero aumento del contenido de lípidos y una ligera disminución de contenido de proteína. La tasa de inclusión de DDGS en la dieta no afectó el contenido de humedad del huevo. Sin embargo, el incremento de contenido de DDGS en la dieta aumentó el contenido total de ácidos grasos poliinsaturados de la yema de huevo, y aunque inicialmente el contenido de colina y colesterol fue mayor en las yemas de las gallinas alimentadas con las dietas de 50 por ciento de DDGS, durante las últimas cuatro semanas del estudio dichas concentraciones no fueron diferentes entre las dietas. Como era de esperarse, la alimentación de niveles crecientes de DDGS en la dieta aumentó el contenido de luteína en la yema de huevo. No obstante, un hallazgo interesante de este estudio fue que la alimentación de 50 por ciento de DDGS aumentó la concentración de ácidos grasos omega-3 (ácido linolénico y ácido eicosapentaenoico) en la yema del huevo, los cuales han demostrado tener importantes beneficios en la salud humana.

Trupia et al. (2016) evaluaron los efectos de la alimentación con dietas que contenían 0, 10 o 20 por ciento de fuentes de DDGS con alto contenido de aceite (13.3 por ciento de grasa

cruda) o reducidos en aceite (7.4 por ciento de grasa cruda) en el desempeño de la producción y calidad de los huevos; entre los tratamientos de la dieta no hallaron efectos en ganancia de peso de la gallina, producción de huevo, consumo de alimento, eficiencia alimenticia, masa o peso del huevo. La gravedad específica de los huevos fue ligeramente menor en las gallinas alimentadas con las dietas con 10 por ciento de DDGS alto en aceite o 20 por ciento de reducido en aceite. Sin embargo, los huevos de las gallinas alimentadas con dietas de DDGS tuvieron mayores concentraciones de tocoferoles, tocotrienoles y xantofilas en la yema de huevo y mayor color amarillo y rojo comparado con las alimentadas con la dieta control (**cuadro 25**).

En el **cuadro 26** se muestra la composición de lípidos de las fuentes de DDGS con alto contenido de aceite y reducidos en aceite de este estudio, e indica que las concentraciones de tocoferoles, tocotrienoles y xantofilas en las fuentes de DDGS alimentadas influyeron en la composición de estos componentes de la yema de huevo. De hecho, los huevos de gallinas alimentadas con dietas de DDGS reducidos en aceite tienen un mayor contenido de tocoferol, pero menor de xantofilas que las alimentadas con DDGS alto en aceite. La alimentación de DDGS alteró ligeramente la composición de ácidos grasos del huevo, pero la relación de ácidos grasos saturados a insaturados fue similar, sin efecto en el contenido de lecitina o colesterol del huevo. Estos resultados indican que la adición de DDGS alto en aceite y reducido en aceite a las dietas de ponedoras aumenta varios nutrientes lipofílicos benéficos en la yema del huevo y no parece tener efectos

Cuadro 25. Color y composición de lípidos de la yema de huevos de gallinas ponedoras alimentadas con dietas de 10 o 20 por ciento de DDGS altos en aceite (AA) o reducidos en aceite (RA) (adaptado de Trupia et al., 2016)

Medición	Control	10% DDGS AA	20% DDGS AA	10% DDGS AA	20% DDGS AA
Yema L*	58.5 ^a	57.8 ^b	56.7 ^c	57.3 ^b	56.6 ^c
Yema a*	-4.3 ^d	-3.5 ^c	-2.2 ^a	-3.5 ^c	-2.7 ^b
Contenido de ácidos grasos %					
C16:0	25.5	25.4	25.1	25.5	25.5
C16:1	2.71 ^a	2.46 ^b	2.08 ^c	2.54 ^{ab}	2.49 ^{ab}
C18:0	9.50	9.42	9.56	9.28	9.19
C18:1	45.7 ^a	43.5 ^{bc}	42.1 ^d	44.4 ^b	42.3 ^{cd}
C18:2	13.6 ^c	16.4 ^b	18.3 ^a	15.5 ^b	17.6 ^a
C18:3	0.44 ^c	0.45 ^d	0.47 ^c	0.45 ^b	0.58 ^a
C22:0	2.10	2.10	2.20	2.10	2.10
Tocoferoles y tocotrienoles, µg/g aceite					
α-tocoferol	173.8 ^b	183.5 ^{ab}	183.3 ^{ab}	209.9 ^{ab}	218.2 ^a
β-tocoferol	0.58 ^c	0.95 ^b	0.96 ^b	0.98 ^b	1.34 ^a
γ-tocoferol	46 ^d	57.2 ^{cd}	72.2 ^{ab}	67 ^{bc}	85.1 ^a
δ-tocoferol	1.1 ^{ab}	1 ^{ab}	0.82 ^b	1 ^{ab}	1.2 ^a
α-tocotrienol	2.5 ^c	4 ^{bc}	5.8 ^a	5.1 ^{ab}	6.3 ^a
γ-tocotrienol	0.13 ^b	0.23 ^{ab}	0.34 ^a	0.26 ^a	0.32 ^a
Tocotrienoles totales	224.2 ^c	246.9 ^{bc}	263.4 ^{abc}	284.2 ^{ab}	312.4 ^a
Xantofilas, µg/g aceite					
Luteína	80 ^b	110.1 ^a	123.1 ^a	87.4 ^b	91.1 ^b
Zeaxantina	22.4 ^c	31.7 ^{ab}	36.8 ^a	29.1 ^b	34.9 ^a
β-criptoxantina	No detectado	1.1 ^b	2.0 ^a	1 ^b	1.7 ^a
Desconocido	8.6 ^d	13.6 ^{bc}	17.3 ^a	12.1 ^c	14.8 ^{ab}
Xantofilas totales	111.1 ^d	156.4 ^{ab}	179.1 ^a	129.7 ^{cd}	142.6 ^{bc}

^{a,b,c,d}Las medias dentro de la misma fila con distintos superíndices son diferentes (P menor que 0.05).

Cuadro 26. Composición de lípidos de DDGS altos en aceite (13.3 por ciento) y reducidos en aceite (7.4 por ciento) añadidos a las dietas de gallinas ponedoras (adaptado de Trupia et al., 2016)

Componente	DDGS con 13.3 % de grasa cruda	DDGS con 7.4 % de grasa cruda
% de ácidos grasos de los lípidos		
C16:0	11.3	11.9
C16:1	0.14	0.13
C18:0	1.73	1.93
C18:1	27.0	27.4
C18:2	57.7	56.3
C18:3	1.50	1.60
Otros lípidos, mg/kg		
α-tocoferol	20.9	20.1
β-tocoferol	0.45	0.37
γ-tocoferol	76.0	38.3
δ-tocoferol	1.4	0.9
α-tocotrienol	10.9	8.8
γ-tocotrienol	17.4	9.0
δ-tocotrienol	1.40	0.3
Tocoferoles y tocotrienoles totales	128.6	77.8
Luteína	15.7	39.3
Zeaxantina	9.4	9.7
β-criptoxantina	3.3	3.4
Desconocido	1.6	3.7
Xantofilas totales	29.9	56.1

perjudiciales en su calidad.

Riesgo de residuos de virginiamicina en huevo

En la producción de etanol y DDGS, a menudo se añaden pequeñas cantidades de antibióticos (1 o 2 mg/kg) a los fermentadores para prevenir las infecciones bacterianas que reducen el rendimiento de etanol y resultan en la disminución de la calidad y valor nutritivo de los DDGS. Los antibióticos más comúnmente utilizados en la industria del etanol de EE. UU. son la virginiamicina y la penicilina. Paulus-Compart (2013) demostró que es muy bajo el riesgo de hallar residuos de virginiamicina y penicilina en los DDGS y, de estar presentes, lo están en concentraciones tan bajas que no son detectables en la carne, leche y huevos. Sun et al. (2012) usaron métodos de placa y bioautografía para determinar la presencia de residuos de virginiamicina en cuatro dietas con 0, 17, 35 o 50 por ciento de DDGS y encontraron que los residuos de este antibiótico en todas las dietas estuvieron por debajo del límite de restricción de 0.1 mg/kg y que apenas se encontraban entre los límites de detección de 0.05 a 0.1 mg/kg de estas pruebas. No obstante, el único método aprobado por la FDA para la detección de

virginiamicina en los ingredientes de alimentos es el bioensayo. Por lo tanto, es cuestionable la validez de estos resultados notificados. De cualquier forma, estos resultados indican que la posibilidad de la presencia de virginiamicina en la yema de huevo es insignificante, incluso con la adición de 50 por ciento de DDGS en las dietas de ponedoras.

Efectos de los DDGS sobre la pelecha

Hong et al. (2007) realizaron un estudio para comparar la alimentación de una dieta con DDGS y una dieta sin sal para inducir la pelecha y comparar el efecto de los tratamientos de pelecha con alimento y pelecha con ayuno sobre el desempeño de producción de huevo, calidad del huevo, peso de los órganos de las ponedoras. En este estudio se utilizaron 108 gallinas White Leghorn (de 62 semanas de edad) con una producción de huevo de más del 80 por ciento y un peso corporal promedio de 1.08 kg. Los tratamientos consistieron de la dieta control (tratamiento para no pelechar), tratamiento de pelecha con alimento (dieta con DDGS y sin sal) y tratamiento de pelecha con ayuno. En el grupo de pelecha con alimento la producción de huevo disminuyó a 0 después de 18 días y en el grupo de pelecha con dieta de DDGS sin sal disminuyó a 0

después de 17 días. La producción de huevo se detuvo por seis días en el grupo de pelecha con ayuno. La producción de huevo volvió a empezar después de 12 y 16 días en los grupos de pelecha con alimento y pelecha con ayuno, respectivamente. Excepto por la calidad de la yema del huevo, la calidad del huevo se incrementó en todos los tratamientos de pelecha. Disminuyó el peso del hígado, corazón y oviducto de las gallinas ponedoras con todos los tratamientos de pelecha. Estos resultados indican que el tratamiento de pelecha con alimento (dieta con DDGS y sin sal) podría reemplazar el tratamiento de pelecha con ayuno y reducir las preocupaciones de bienestar animal causadas por el ayuno durante la pelecha.

Mejía et al. (2010) alimentaron 36, 45 y 54 g/día de DDGS en un programa de pelecha sin retiro de alimento en comparación con la alimentación de consumos similares diarios de maíz, en el que encontraron que la producción de huevo posterior a la pelecha (de 5 a 43 semanas) fue mayor para las gallinas alimentadas con dietas de pelecha con DDGS con respecto a las de dietas de maíz. No se observaron diferencias consistentes de la masa de huevo, gravedad específica del huevo, eficiencia alimenticia o consumo de alimento entre los tratamientos de pelecha para el período posterior a este proceso. Estos investigadores concluyeron que limitar la alimentación de maíz o DDGS en un programa sin retiro de alimento resultará en un desempeño posterior a la pelecha a largo plazo comparable a la alimentación ad libitum de una dieta de maíz y cascarilla de soya.

Cama húmeda

Una de las preocupaciones del manejo de las instalaciones de pollos y ponedoras comerciales es minimizar la existencia de cama húmeda. La cama húmeda ha sido caracterizada como consecuencia de un desequilibrio hídrico en aves (Collett, 2012). Muchos factores de la dieta contribuyen a los casos de cama húmeda, como la alimentación de dietas con alta proporción de polisacáridos no almidonosos, proteína animal, ácidos grasos libres saturados, factores antinutricionales o toxinas (Collett, 2012).

Las altas concentraciones de sodio, magnesio o sulfato en el agua de bebida y el alimento están relacionadas a los problemas de cama húmeda. Se han notificado concentraciones máximas aceptables de sodio (de 0.05 g/kg, Muirhead, 1995 a 0.25 g/kg, Coetzee, 2005), magnesio (de 0.125 g/kg, Schwartz, 1994 a 0.25 g/kg, Coetzee, 2005), y sulfato (de 0.06 g/kg, Keshavarz, 1987 a 0.50 g/kg, Coetzee, 2005) en el agua de bebida de las aves. La sal es un contaminante común del agua de bebida en todo el mundo, la cual debe de monitorearse para, de ser necesario, hacer los ajustes adecuados en la sal suplementaria. Los DDGS de maíz tienen un contenido de sodio variable y algunas veces alto (mayor a 0.5 por ciento) y de azufre (mayor a 0.6 por ciento), lo cual puede contribuir a los problemas de cama húmeda si no se ajustan los niveles de diferencia de cationes y aniones y

sal suplementaria en las dietas con altas tasas de inclusión de DDGS.

Conclusiones

Los DDGS de maíz son un ingrediente excelente para las dietas de pollos de engorde y gallinas ponedoras para reducir el costo del alimento y brindar un desempeño del crecimiento y producción de huevo óptimos, así como de calidad de la carne y huevo. El mayor desafío en el uso de DDGS en dietas avícolas es usar los valores precisos de EMA_n , aminoácidos digestibles y fósforo disponible de la fuente de DDGS que se usa, porque varía el contenido de energía y nutrientes digestibles entre fuentes. El contenido de grasa cruda en los DDGS es mal predictor la EMA_n y de aminoácidos digestibles. Como resultado, se han desarrollado ecuaciones de predicción con base en la composición química para calcular con precisión el contenido EMA_n y de aminoácidos digestibles ileales estandarizados de las fuentes de DDGS. Como era de esperarse, entre los estudios publicados varían las respuestas del crecimiento y composición de la canal en pollos, pero la mayoría de las respuestas notificadas mostraron que no hubo cambios o una mejoría en la producción normal y las mediciones de composición de la canal. De hecho, estudios recientes han demostrado que la alimentación de dietas de iniciación de pollos con 20 por ciento de DDGS reducidos en aceite y de dietas de finalización con 24 por ciento de DDGS reducidos en aceite proporcionan un desempeño del crecimiento y calidad de la canal aceptables. De la misma forma, entre los estudios publicados varían las respuestas de producción y calidad del huevo de las ponedoras, pero la mayoría de las respuestas notificadas mostraron que no hubo cambios o una mejoría en el desempeño de producción normal de huevo y de las mediciones de la calidad de este. Al usar valores precisos de EMA_n y de aminoácidos digestibles de DDGS reducidos en aceite para la formulación de las dietas de nutrición de precisión de ponedoras, se pueden alimentar hasta 50 por ciento de DDGS para lograr una producción y calidad del huevo aceptables.

Bibliografía

- Adedokun, S. A., P. Jaynes, R. L. Payne, and T. J. Applegate. 2015. Standardized ileal amino acid digestibility of corn, corn distillers' dried grains with solubles, wheat middlings and bakery by-products in broilers and laying hens. *Poult. Sci.* 94:2480-2487.
- Angel, R., N.M. Tamim, T.J. Applegate, A.S. Dhandu, and L.E. Ellestad. 2002. Phytic acid chemistry: Influence on phytin phosphorus availability and phytase efficacy. *J. Appl. Poult. Res.* 11:471-480.
- Barekattain, M.R., C. Antipatis, M. Choct, and P.A. Iji. 2013a.

- Interaction between protease and xylanase in broiler chicken diets containing sorghum distillers' dried grains with solubles. *Anim. Feed Sci. Technol.* 182:71-81.
- Barekatin, M.R., C. Antipatis, N. Rodgers, S.W. Walkden-Brown, P.A. Iji, and M. Choct. 2013b. Evaluation of high dietary inclusion of distillers dried grains with solubles and supplementation of protease and xylanase in the diets of broiler chickens under necrotic enteritis challenge. *Poult. Sci.* 92:1579-1594.
- Barekatin, M.R., M. Choct, and P.A. Iji. 2013c. Xylanase supplementation improves the nutritive value of diets containing high levels of sorghum distillers' dried grains with solubles for broiler chickens. *J. Sci. Food. Agric.* 93:1552-1559.
- Bregendahl, K. 2008. Use of Distillers Co-products in Diets Fed to Poultry. In: *Using Distillers Grains in the U.S. and International Livestock and Poultry Industries*, B.A. Babcock, D.J. Hayes, and J.D. Lawrence eds., Midwest Agribusiness Trade Research and Information Center, Center for Agricultural and Rural Development, Iowa State University, Ames. Pp. 99-134.
- Campasino, A., M. Williams, R. Latham, C.A. Bailey, B. Brown, and J.T. Lee. 2015. Effects of increasing dried distillers' grains with solubles and non-starch polysaccharide degrading enzyme inclusion on growth performance and energy digestibility in broilers. *J. Appl. Poult. Res.* 00:1-10 <http://dx.doi.org/10.3382/japr/pfv018>
- Cho, J.H., Z.F. Zhang, and I.H. Kim. 2012. Effects of canthaxanthin on egg production, egg quality and egg yolk color in laying hens. *J. Agri. Sci.* 5:269-274.
- Choi, H.S., H.L. Lee, M.H. Shin, C. Jo, S.K. Lee, and B.D. Lee. 2008. Nutritive and economic values of corn distiller's dried grains with solubles in broiler diets. *Asian-Australasian J. Anim. Sci.* 21(3):414-419.
- Coetzee, C.B. 2005. The development of water quality guidelines for poultry in southern Africa. Ph.D. thesis. Animal and Wildlife Sciences, University of Pretoria, South Africa.
- Collett, S.R. 2012. Nutrition and wet litter problems in poultry. *Anim. Feed Sci. Technol.* 173:65-75.
- Cortes-Cuevas, A.C., S.R. Estrada, J.A. Menocal, E.A. Gonzalez, and C.L. Coello. 2015. Effect of feeding low-oil DDGS to laying hens and broiler chickens on performance and egg yolk and skin pigmentation. *Brazilian J. Poult. Sci.* 17:247-254.
- Corzo, A., M.W. Schilling, R.E. II. Loar, V. Jackson, S. Kin, and V. Radhakrishnan. 2009. The effects of feeding distillers dried grains with solubles on broiler meat quality. *Poult. Sci.* 88:432-439.
- Davies, M.I., G.M. Ritcey, and I. Motzok. 1970. Intestinal phytase and alkaline phosphatase of chicks: Influence of dietary calcium, inorganic and phytate phosphorus and vitamin D₃. *Poult. Sci.* 49:1280-1286.
- Deniz, G., H. Gencoglu, S.S. Gezen, I.I. Turkmen, A. Orman, and C. Kara. 2013a. Effects of feeding corn distiller's dried grains with solubles with and without enzyme cocktail supplementation to laying hens on performance, egg quality, selected manure parameters and feed cost. *Livest. Sci.* 15:174-181.
- Deniz, G., S.S. Gezen, C. Kara, H. Gencoglu, Y. Meral, and E. Baser. 2013b. Evaluation of nutrient equivalency of microbial phytase in hens in late lay given maize-soybean or distiller's dried grains with solubles (DDGS) diets. *Br. Poult. Sci.* 54:494-502.
- Dozier III, W.A., and J.B. Hess. 2015. Growth and meat yield responses of Hubbard × Cobb 500 male broilers fed diets formulated with distillers dried grains with solubles varying in ether extract content and inclusion rate from 1 to 33 days of age. *J. Appl. Poult. Res.* 24:436-450.
- Dozier III, W.A., K.R. Perryman, and J.B. Hess. 2015. Apparent ileal amino acid digestibility of reduced-oil distillers dried grains with solubles fed to broilers from 23 to 31 days of age. *Poult. Sci.* 94:379-383.
- El-Hack, M.E.A., M. Alagawany, M.R. Farag, and K. Dhama. 2015. Use of maize distiller's dried grains with solubles (DDGS) in laying hen diets: Trends and advances. *Asian J. Anim. Vet. Advances* 10:690-707.
- Fernandez, S.R., Y. Zhang, and C.M. Parsons. 1995. Dietary formulation with cottonseed meal on a total amino acid versus a digestible amino acid basis. *Poult. Sci.* 74:1168-1179.
- Gacche, S.M., A.B. Kanduri, P.V. Patil, and N.Z. Gaikwad. 2016. Extent of replacement of soybean meal with distillers dried grains with solubles (DDGS) on carcass yield, dressing percentage and feed cost in broiler chickens. *Anim. Sci. Reporter* 10:109-114.
- Guney, A.C., M.Y. Shim, A.B. Batal, N.M. Dale, and G.M. Pesti. 2013. Effect of feeding low-oil distillers dried grains with solubles on the performance of broilers. *Poult. Sci.* 92:2070-2076.
- Hassan, S.M., and A.A. Al Aqil. 2015. Effect of adding different

- dietary levels of distillers dried grains with solubles (DDGS) on productive performance of broiler chicks. *Intl. J. Poult. Sci.* 14:13-18.
- Hong, E.C., J.C. Na, D.C. You, H.K. Kim, W.T. Chung, H.J. Lee, I.H. Kim, and J. Hwangbo. 2007. Effects of feeding non-salt diet on the induced molting in laying hens. *Korean J. Poult. Sci.* 34:4, 279-286.
- Jiang, W., L. Zhang, and A. Shan. 2013. The effect of vitamin E on laying performance and egg quality in laying hens fed corn dried distillers grains with solubles. *Poult. Sci.* 92:2956-2964.
- Keshavarz, K. 1987. Proper water management for poultry. *Poult. Dig. (January)*, pp. 12-22.
- Kim, E.J., J.L. Purswell, and S.L. Branton. 2016. Effects of increasing inclusion rates of a low-fat distillers dried grains with solubles (LF-DDGS) in finishing broiler diets. *Intl. J. Poult. Sci.* 15:182-187.
- Kubas, T.A., and J.D. Firman. 2014. Effects of yellow grease addition to broiler rations containing DDGS with different fat contents. *Intl. J. Poult. Sci.* 13:437-441.
- Liu, N., Y.J. Ru, D.F. Tang, T.S. Xu, and G.G. Partridge. 2011. Effects of corn distillers dried grains with solubles and xylanase on growth performance and digestibility of diet components in broilers. *Anim. Feed Sci. Technol.* 163:260-266.
- Loar, R.E. II, J. S. Moritz, J.R. Donaldson, and A. Corzo. 2010. Effects of feeding distillers dried grains with soluble to broilers from 0 to 28 days posthatch on broiler performance, feed manufacturing efficiency and selected intestinal characteristics. *Poult. Sci.* 89:2242-2250.
- Martinez-Amezcuca, C., C.M. Parsons, and D.H. Baker. 2006. Effect of microbial phytase and citric acid on phosphorus bioavailability, apparent metabolizable energy and amino acid digestibility in distillers dried grains with solubles in chicks. *Poult. Sci.* 85:470-475.
- Masa'deh, M.K. 2011. Dried distillers grain with solubles in laying hen and pullet rations. Ph.D. Thesis, Department of Animal Science, University of Nebraska-Lincoln.
- Masa'deh, M.K., S.E. Purdum, and K.J. Hanford. 2011. Dried distillers grains with soluble in laying hen diets. *Poult. Sci.* 90:1960-1966.
- Mejia, L., E.T. Meyer, P.L. Utterback, C.W. Utterback, C.M. Parsons, and K.W. Koelkebeck. 2010. Evaluation of limit feeding corn and distillers dried grains with soluble in non-feed-withdrawal molt programs for laying hens. *Poult. Sci.* 89:386392.
- Meloche, K.J., B.J. Kerr, N. Billor, G.C. Shurson, and W.A. Dozier III. 2014. Validation of prediction equations for apparent metabolizable energy of corn distillers dried grains with solubles in broiler chicks. *Poult. Sci.* 93:1428-1439.
- Meloche, K.J., B.J. Kerr, G.C. Shurson, and W.A. Dozier III. 2013. Apparent metabolizable energy and prediction equations for reduced-oil corn distillers dried grains with solubles in broiler chicks from 10 to 18 days of age. *Poult. Sci.* 92:3176-3183.
- Min, Y.N., L.L. Li, S.K. Liu, J. Zhang, Y.P. Gao, and F.Z. Liu. 2015. Effects of dietary distillers dried grains with solubles (DDGS) on growth performance, oxidative stress and immune function in broiler chickens. *J. Appl. Poult. Res.* 24:23-29.
- Min, Y.N., F.Z. Liu, A. Karimi, C. Coto, C. Lu, F. Yan, and P.W. Waldroup. 2011. Effect of Rovabio® Max AP on performance, energy and nitrogen digestibility of diets high in distillers dried grains with solubles (DDGS) in broilers. *Intl. J. Poult. Sci.* 10:796-803.
- Mohammed, A., M.J. Gibney, and T.G. Taylor. 1991. The effects of dietary levels of inorganic phosphorus, calcium and cholecalciferol on the digestibility of phytate phosphorus by the chick. *Br. J. Nutr.* 66:251-259.
- Muirhead, S. 1995. Good, clean water is critical component of poultry production. *Feedstuffs*.
- Mutucumarana, R.K., V. Ravindran, G. Ravindran, and A.J. Cowieson. 2014. Measurement of true ileal digestibility of phosphorus in some feed ingredients for broiler chickens. *J. Anim. Sci.* 92:5520-5529.
- NRC. 1994. Nutrient requirements for poultry. 9th rev. ed. Natl. Acad. Press, Washington, DC.
- Olukosi, O.A., A.J. Cowieson, and O. Adeola. 2010. Broiler responses to supplementation of phytase and aDMiMixture of carbohydrases and protease in maize-soyabean meal diets with or without maize distiller's dried grain with solubles. *Brit. Poult. Sci.* 51: 434-443.
- Oryschak, M., D. Korver, M. Zuidhof, X. Meng, and E. Beltranena. 2010. Comparative feeding value of extruded and nonextruded wheat and corn distillers dried grains with solubles for broilers. *Poult. Sci.* 89:2183-2196.
- Paulus-Compart, D.M., A.M. Carlson, G.I. Crawford, R.C. Fink, F. Diez-Gonzalez, A. DiCostanzo, and G.C. Shurson. 2013. Presence and biological activity of antibiotics used in fuel ethanol and corn co-product production. *J. Anim. Sci.* 91:2395-2404.
- Perez, V.G., C.M. Jacobs, J. Barnes, M.C. Jenkins, M.S. Kuhlenschmidt, G.C. Fahey Jr., C.M. Parsons, and J.E. Pettigrew. 2011. Effect of corn distillers dried grains

- with solubles and *Eimeria acervulina* infection on growth performance and the intestinal microbiota of young chicks. *Poult. Sci.* 90:958-964.
- Purdum, S., K. Hanford, and B. Kreifels. 2014. Short-term effects of lower oil dried distillers grains with solubles in laying hen rations. 93:2592-2595.
- Ravindran, V., W.L. Bryden, and E.T. Kornegay. 1995. Phytates: Occurrence, bioavailability and implications in poultry nutrition. *Poult. Avian Biol. Rev.* 6:125-143.
- Rochelle, S.J., B.J. Kerr, and W.A. Dozier III. 2011. Energy determination of corn co-products fed to broiler chicks from 15 to 24 days of age, and use of composition analysis to predict nitrogen-corrected apparent metabolizable energy. *Poult. Sci.* 90:1999-2007.
- Rostagno, H.S., J.M.R. Pupa, and M. Pack. 1995. Diet formulation for broilers based on total versus digestible amino acids. *J. Appl. Poult. Res.* 4:293-299.
- Salim, H.M., Z.A. Kruk, and B.D. Lee. 2010. Nutritive value of corn distillers dried grains with soluble as an ingredient of poultry diets: A review. *World's Poult. Sci. J.* 66:411-432.
- Schilling, M.W. V. Battula, R.E. Loar II, V. Jackson, S. Kin, and A. Corzo. 2010. Dietary inclusion level effects of distillers dried grains with solubles on broiler meat quality. *Poult. Sci.* 89:752-760.
- Schwartz, D.L. 1994. Water quality. In: 131st American Veterinary medical Association Annual Convention, San Francisco, CA.
- Shalash, S.M.M., S. Abou El-Wafa, R.A. Hassan, Nehad A. Ramadan, Manal S. Mohamed, and Hoda E. El-Gabry. 2010. Evaluation of distillers dried grains with solubles as feed ingredient in laying hen diets. *Int. J. Poult. Sci.* 9:537-545.
- Shim, M.Y., G.M. Pesti, R.I. Bakalli, P.B. Tillman, and R.L. Payne. 2011. Evaluation of DDGS as an alternative ingredient for broiler chickens. *Poult. Sci.* 90:369-376.
- Shurson, G.C. 2017. Review article: Yeast and yeast derivatives in feed additives and ingredients: Sources, characteristics, animal responses and quantification methods. *Anim. Feed Sci. Technol.* 235:60-76.
- Soto, C., E. Avila, J. Arce, F. Rosas, and D. McIntyre. 2013. Evaluation of different strategies for broiler feed formulation using near infrared reflectance spectroscopy as a source of information for determination of amino acids and metabolizable energy. *J. Appl. Poult. Res.* 22:730-737.
- Sun, H., E.J. Lee, H. Samaraweera, M. Persia, and D.U. Ahn. 2013. Effects of increasing concentration of corn distillers dried grains with solubles on chemical composition and nutrient content of egg. *Poult. Sci.* 92:233-242.
- Sun, H., E.J. Lee, H. Samaraweera, M. Persia, H.S. Ragheb, and D.U. Ahn. 2012. Effects of increasing concentrations of corn distillers dried grains with solubles on the egg production and internal quality of eggs. *Poult. Sci.* 91:3236-3246.
- Świątkiewicz, S., A. Arczewska-Włosek, and D. Jozefiak. 2014a. Bones quality indices in laying hens fed diets with a high level of DDGS and supplemented with selected feed additives. *Czech J. Anim. Sci.* 59:61-68.
- Świątkiewicz, S., A. Arczewska-Włosek, and D. Jozefiak. 2014b. Feed enzymes, probiotic or chitosan can improve the nutritional efficiency of broiler chicken diets containing a high level of distillers dried grains with solubles. *Livest. Sci.* 163:110-119.
- Świątkiewicz, S., A. Arczewska-Włosek, J. Krawczyk, M. Puchała, and D. Józefiak. 2013. Effects of selected feed additives on the performance of laying hens given a diet rich in maize dried distiller's grains with solubles (DDGS). *Brit. Poult. Sci.* 54:478-485.
- Świątkiewicz, S., and J. Koreleski. 2008. The use of distillers dried grains with solubles (DDGS) in poultry nutrition. *World's Poult. Sci. J.* 64:257-266.
- Świątkiewicz, S., and J. Koreleski. 2006. Effect of maize distillers dried grains with solubles and dietary enzyme supplementation on the performance of laying hens. *J. Anim. Feed Sci.* 15:253-260.
- Tahir, M. and G.M. Pesti. 2012a. A comparison of digestible amino acid databases: Relationship between amino acid concentration and digestibility. *J. Appl. Poult. Res.* 21:1-12.
- Tahir, M., and G.M. Pesti. 2012b. Comparison of ingredient usage and formula costs in poultry feeds using different amino acid digestibility databases. *J. Appl. Poult. Res.* 21:693-705.
- Tahir, M., M.Y. Shim, N.E. Ward, C. Smith, E. Foster, A.C. Guney, and G.M. Pesti. 2012. Phytate and other nutrient components of feed ingredients for poultry. *Poult. Sci.* 91:928-935.
- Tamin, N.M., and R. Angel. 2003. Phytate phosphorus hydrolysis as influenced by dietary calcium and micro-mineral source in broiler diets. *J. Agric. Food Chem.* 51:4687-4693.

- Tangendjaja, B., and E. Wina. 2011. Feeding value of low and high protein dried distillers grains and corn gluten meal for layer. *Media Peternakan* p. 133-139. <http://medpet.jouranl.ipb.ac.id/> doi: 10.5398/medpet.2011.34.2.133
- Trupia, S., J.K. Winkler-Moser, A.C. Guney, R. Beckstead, and C-Y. O Chen. 2016. Nutritional quality of eggs from hens fed distillers dried grains with solubles. *Poult. Sci.* 2592-2601.
- Waldroup, P.W., Z. Wang, C. Coto, S. Serrate, and F. Yan. 2007. Development of a standardized nutrient matrix for corn distillers dried grains with solubles. *Intl. J. Poult. Sci.* 6:478-483.
- Wamsley, K.G.S., R.E. Loar II, K. Karges, and J.S. Moritz. 2013. The use of practical diets and regression analyses to determine the utilization of lysine and phosphorus in corn distillers dried grains and solubles using Cobb 500 male broilers. *J. Appl. Poult. Res.* 22:279-297.
- Wang, Z., S. Cerrate, C. Coto, F. Yan, and P.W. Waldroup. 2008. Evaluation of high levels of distillers dried grains with solubles (DDGS) in broiler diets. *Intl. J. Poult. Sci.* 7:990-996.
- Wang, Z., S. Cerrate, C. Coto, F. Yan, and P.W. Waldroup. 2007. Effect of rapid and multiple changes in level of distillers dried grains with solubles (DDGS) in broiler diets on performance and carcass characteristics. *Intl. J. Poult. Sci.* 6:725-731.
- Wu-Haan, W., W. Powers, R. Angel, and T.L. Applegate. 2010. The use of distillers dried grains plus soluble as a feed ingredient on air emissions and performance from laying hens. *Poult. Sci.* 89:1355-1359.
- Zhao, F., L.Q. Ren, B.M. Mi, H.Z. Tan, J.T. Zhao, H. Li, H.F. Zhang, and Z.Y. Zhang. 2014. Developing a computer-controlled simulated digestion system to predict the concentration of metabolizable energy of feedstuffs for rooster. *J. Anim. Sci.* 92:1537-1547.
- Zhu, J.L., Z.K. Zeng, G.C. Shurson, and P.E. Urriola. 2017. A meta-analysis to predict the concentration of standardized ileal digestible amino acids in distillers dried grains with solubles for poultry. *Poult. Sci.* (in review)

CAPÍTULO 19

Peletización de dietas de DDGS para aves

Introducción

AUNQUE LOS DDGS SON UNA FUENTE ECONÓMICA DE ENERGÍA Y DE NUTRIENTES DIGESTIBLES en las dietas avícolas, a menudo la tasa de inclusión se limita a menos del 10 por ciento de la dieta debido a las preocupaciones por lograr la calidad del pélet y la producción de la peletizadora deseada. Como resultado, disminuye la capacidad de los fabricantes de alimentos balanceados y avicultores de captar un valor económico mayor con tasas de inclusión más altas, debido a las limitaciones impuestas a los DDGS por la calidad del pélet y la eficiencia de la producción en las plantas de alimentos comerciales.

La peletización es el método de procesamiento térmico más usado en la fabricación de alimentos avícolas (Abdollahi et al., 2013); brinda la ventaja de una mejor conversión alimenticia que resulta de tener menos desperdicio de alimento y una mayor digestibilidad de la energía y nutrientes, atribuida en parte a la gelatinización parcial del almidón (Richert y DeRouchev, 2010; NRC, 2012). Entre las ventajas adicionales de las dietas peletizadas se encuentran una menor polvosidad, segregación de ingredientes durante el transporte, presencia de patógenos y de que las aves escojan las partículas grandes en el alimento en harina, junto con una mejor palatabilidad, densidad de masa y características de manejo (Abdollahi et al., 2012; NRC, 2012).

Proceso de peletizado

El peletizado es un proceso mecánico que aglomera partículas pequeñas en unas más grandes mediante el uso de humedad, calor y presión (Falk, 1985). Los pélets comerciales se pueden fabricar con un amplio rango de diámetros (de 0.16 mm a 0.75 mm), formas (triangular, cuadrado, ovalado o cilíndrico) y tamaños, en función de la especie animal a los que se destinan y la aplicación en alimentación (California Pellet Mill Co., 2016).

El primer paso en la producción de alimento peletizado es la reducción del tamaño de partícula de los ingredientes (principalmente granos) mediante un molino de martillos o de rodillos. Por lo general, las dietas a peletizar tienen un tamaño de partícula más pequeño que las que están en harina para aumentar la durabilidad del pélet (Wondra et al., 1995). Después, los ingredientes se pesan individualmente y se añade a mezcladoras en las proporciones deseadas, dependiendo de la formulación, para luego mezclarse durante el tiempo adecuado hasta conseguir una mezcla homogénea. Después, la masa resultante es sometida a acondicionamiento con vapor, para brindar un adecuado equilibrio entre calor y humedad (Smallman, 1996). Aunque el acondicionamiento con vapor requiere energía y contribuye al costo del proceso de la peletización, comparado con el acondicionamiento en seco incrementa la tasa de producción y el índice de durabilidad del pélet (PDI) (Skoch et al., 1981). Después de aplicar vapor a la harina dentro del acondicionador, la masa húmeda y caliente fluye hacia la cámara de peletizado

en donde pasa por un dado metálico para formar los pélets. Conforme los pélets salen del dado, ingresan a un enfriador que reduce su temperatura de 80 a 90°C, unos 8°C arriba de la temperatura ambiente (Zimonja et al., 2007), además de reducir de 15 o 17 por ciento de humedad a 10 o 12 por ciento con una corriente de aire del ambiente (Robinson, 1976). Los finos recolectados en el enfriador se regresan a la cámara de peletizado para volver a ser transformados en pélets posteriormente. Para algunas aplicaciones de alimentos avícolas, los pélets fríos y secos pasan a través de un desmoronador para crear migajas (pélets quebrados).

Factores que afectan la durabilidad del pélet, el consumo de energía y la tasa de producción

Los tres objetivos principales de fabricar dietas avícolas peletizadas de alta calidad son lograr una alta durabilidad del pélet y producción en las peletizadoras, minimizando al mismo tiempo el costo energético del proceso (All About Feed, 2012). En general, lograr una alta durabilidad del pélet aumenta la probabilidad de permanecer intactos desde que se fabrican hasta que las aves los consuman. No obstante, casi cualquier ajuste para aumentar la durabilidad del pélet disminuye la producción de las peletizadoras e incrementa el costo energético (Behnke, 2006). La producción de pélets de alta calidad está influida por factores como el tipo de alimento, cantidad de lípidos, aditivos del vapor, tamaño de partícula, contenido de humedad, calidad del dado, calidad del rodillo y la separación entre estos últimos (California Pellet Mill Co., 2016). Los principales factores de uso y costo energético en el proceso de peletizado son la producción de vapor para el acondicionamiento y la electricidad (medida en kilovatios hora por ton) necesaria para el funcionamiento de los sistemas de alimentación, acondicionamiento, peletizadora y enfriamiento del pélet. La mayoría de la energía utilizada (hasta el 72 por ciento) durante el peletizado es en el sistema de acondicionamiento con vapor (Skoch et al., 1983); Payne (2004) indicó que un objetivo razonable para las dietas peletizadas del pollo sería 10 kilovatios hora por tonelada. De hecho, se han desarrollado sistemas de apoyo de decisiones eficaces para optimizar la calidad, tasa de producción y costo del pélet, al mismo tiempo que disminuye solo un poco la durabilidad del pélet (Thomas et al., 1997).

Las características del dado de salida afectan la durabilidad, producción y consumo energético del pélet, entre las que se incluyen: propiedades del metal, diseño, patrón y número de orificios (Stark, 2009). El tipo de metal del dado afecta la cantidad de fricción que genera y conforme la masa pasa por el dado, aumenta la temperatura subsiguiente (Behnke, 2014). El diseño del orificio puede ser de calibre recto o con relieve, pero el factor más importante en lo que respecta al dado es el grosor

(L) en relación con el diámetro (D), comúnmente descrito como la proporción L a D o L:D. Conforme aumenta la proporción L a D (dado más grueso), aumenta la durabilidad del pélet por el aumento de fricción y tiempo de retención del dado, pero se reduce la producción de las peletizadoras y aumenta el consumo energético (Traylor, 1997).

La calidad física del pélet se refiere a su capacidad de permanecer intacto durante el ensacado, almacenamiento y transporte hasta llegar a los comederos en las granjas, minimizando al mismo tiempo la cantidad de finos (Cramer et al., 2003; Amerah et al., 2007). Normalmente la durabilidad se mide por el índice de durabilidad del pélet (PDI; ASAE, 1997). Existen cinco importantes mecanismos de aglutinación para lograr un alto PDI, tales como: formación de puentes sólidos, fuerzas de atracción entre partículas sólidas, uniones mecánicas de interconexión, fuerzas de adhesión y cohesión, así como fuerzas interfaciales y presión capilar (Thomas y van der Poel, 1996; Kaliyan y Morey, 2006).

Parecido a la calidad del pélet, el consumo energético de la peletizadora depende de variables como el diámetro y velocidad del dado, proporción L a D y la humedad y composición química de los ingredientes (Tumuluru et al., 2016). El uso de electricidad en las peletizadoras se cuantifica como unidades de energía por unidad de producción o tiempo, que comúnmente se describe como kilovatio hora por ton (kWh/ton; Fahrenholz, 2012). Es posible minimizar el consumo energético por tonelada de alimento peletizado maximizando la tasa de producción, la cual se ve afectada por las características de la dieta y el volumen del dado (Fahrenholz, 2012).

La tasa de producción de la peletizadora es otro factor importante que influye en el PDI y el consumo energético. Stark (2009) mostró que al aumentar la producción de la peletizadora de 545 kg/hr a 1646 kg/hr se incrementó la eficiencia de 73.3 a 112.4 kg/caballos de fuerza hora y disminuyó linealmente el PDI de 55.4 a 30.2 por ciento.

Se considera que el factor más importante para lograr una alta durabilidad del pélet es el acondicionamiento con vapor de la harina. Las altas temperaturas de acondicionamiento aumentan el PDI y disminuyen el consumo energético (Pfost, 1964) debido a una menor fricción mecánica (Skoch et al., 1981). Conforme aumenta la temperatura de acondicionamiento, disminuye la gelatinización del almidón (Abdollahi et al., 2011). Para aumentar el tiempo de retención (calor) y aumentar el PDI (Gilpin et al., 2002) es posible cambiar la inclinación de las paletas del acondicionador (Briggs et al., 1999). Sin embargo, los efectos de la presión al vapor para mejorar el PDI son inconsistentes. Cutlip et al. (2008) notificaron que el aumento de la presión del vapor dio como resultado solo pequeñas mejoras de PDI, mientras que Thomas et al. (1997) notificaron que no existía una clara relación entre ambos. También se observó esta mala relación en un estudio anterior, en el que la presión del vapor no tuvo efecto en el PDI o la tasa de producción (Stevens, 1987). Como resultado, Briggs et al. (1999) concluyeron que el uso de 207-345 kilopascales parece ser suficiente presión de vapor para conseguir un alto PDI en el pélet.

Muchos fabricantes de alimentos balanceados se dan cuenta de que el tamaño de partícula en la dieta tiene una influencia significativa en el PDI de los pélets, pero no hay suficientes investigaciones que lo avalen. Teóricamente, las partículas más grandes ocasionan fracturas del pélet, lo que los vuelve más propensos al rompimiento (California Pellet Mill Co., 2016). Sin embargo, Stevens (1987) mostró que el tamaño de partícula del maíz molido no tuvo efecto en la tasa de producción o el PDI. De la misma forma, Stark et al. (1994) notificaron que la reducción de 543 a 233 micrones del tamaño de partícula en la dieta solo aumentó ligeramente el PDI. De la misma forma, Reece et al. (1985) mostraron que el aumento de 670 a 1289 micrones del tamaño de partícula solo disminuyó ligeramente el PDI.

Aunque el tamaño de partícula en la dieta no es un factor importante para lograr la calidad del pélet y la eficiencia en la fabricación deseadas, la composición de la dieta sí lo es debido a sus efectos en la lubricación y abrasión del dado, así como en la densidad de masa del alimento (Behnke, 2006). Como resultado, se han caracterizado varios ingredientes de alimentos con base en factores de peletabilidad (Payne et al., 2001). Aunque teóricamente es posible usar estos factores relativos de peletabilidad de los ingredientes como limitantes en la formulación de dietas, en la práctica es inviable porque el objetivo principal de la formulación es cubrir las necesidades nutricionales de las aves a un costo bajo, en lugar de manipular la formulación para optimizar el PDI.

El contenido de almidón en las dietas avícolas desempeña un papel importante en la determinación del PDI después del peletizado. Se puede conseguir el máximo PDI en dietas con 65 por ciento de almidón, mientras que las bajo almidón y alto contenido de proteína disminuyen la durabilidad del pélet (Cavalcanti y Behnke, 2005a). De hecho, se ha mostrado que el contenido de almidón y proteína en la dieta tiene un efecto mayor en el PDI que la temperatura de acondicionamiento (Wood, 1987). El aumento del contenido de lípidos en la dieta disminuye el PDI (Cavalcanti y Behnke (2005a), además de que se ha comprobado que la adición de 1.5 a 3 por ciento de grasa disminuye el PDI en 2 y 5 por ciento, respectivamente (Stark et al., 1994). Además, la adición de grasa a la dieta previo al peletizado no siempre reduce el consumo de energía durante el proceso, porque hay muchas interacciones entre los componentes químicos (Briggs et al., 1999). Por ejemplo, Cavalcanti y Behnke (2005b) mostraron que al aumentar el contenido de proteína en las dietas de maíz, harina de soya y aceite de soya aumentó el PDI.

Otro factor importante que contribuye a la durabilidad del pélet y al consumo energético durante el peletizado es el contenido de humedad de la harina. Gilpin (2002) mostró que al aumentar el contenido de humedad de la harina se incrementó el PDI y se redujo el consumo de energía. Además, la adición de cinco puntos porcentuales de humedad en la harina previo al peletizado se ha mostrado que aumenta el PDI al peletizar dietas con alto contenido de grasa (Moritz et al., 2002).

Medición de la calidad del pélet

La durabilidad del pélet se puede medir con distintas pruebas de rotación, como las de tambor rotatorio mecánico y el neumático, e incluyen el Tablet Hardness Tester de Stoke®, prueba de tambor rotatorio y el Holman Pellet Tester (Behnke, 2001; Winowski et al., 1962). La prueba de durabilidad estándar del pélet utilizada en la industria de los alimentos balanceados es la ASAE S269.4 (ASAE Standards, 2003). Este método determina el PDI, que se define como el porcentaje de pélets enteros que quedan después de que una muestra cribada pasa por un tambor rotatorio. Otro método que se usa con menor frecuencia es el de los probadores de pélets (pellet testers) Holmen fabricados por TekPro (Norfolk, Reino Unido). Los probadores de Holmen agitan los pélets en una cámara perforada de forma piramidal y los finos salen de la cámara en un período entre 20 y 120 segundos para ser cuantificados. Solo dos estudios han comparado el uso del método ASAE S269.4 con los probadores de pélets Holmen. Winowski (1998) notificó que los resultados de ambos métodos estaban correlacionados y Fahrenholz (2012) también notificó lo mismo, pero mostró que el uso del método ASAE del tambor rotatorio proporcionó resultados más consistentes y repetibles para medir el PDI, que en los probadores Holmen. Fahrenholz (2012) también mostró que aunque hubo relaciones significativas entre dureza, densidad, tiempo de retención del pélet y la humedad inicial/final en el PDI, estas fueron débiles y no pueden usarse como predictores de PDI.

Características químicas de los DDGS

Los cambios en la composición química de los DDGS siguen en evolución conforme la industria del etanol de EE. UU. adopta nuevos procesos para mejorar los ingresos de la producción de etanol y sus coproductos. Debido a que la composición química de los DDGS es un factor importante que afecta a la calidad del pélet, es de gran utilidad comprender la variabilidad entre las fuentes y el impacto de la extracción parcial del aceite. Tradicionalmente, la composición de nutrientes de los DDGS (Spiehs et al., 2002; Belyea et al., 2004) era de concentraciones mayores de grasa cruda, FND y almidón, pero con un contenido de proteína cruda menor que el de los DDGS reducidos en aceite que se producen en la actualidad (Kerr et al., 2013;

cuadro 1). Sin embargo, pese a estos cambios de composición química, los DDGS tienen muy poco almidón y un contenido de grasa cruda y FND relativamente altos en comparación con otros ingredientes comunes, lo que hace que sea un reto en la fabricación de alimentos avícolas peletizados de alta calidad con altas tasas de inclusión de DDGS, porque estos componentes químicos tienen efectos negativos para lograr el PDI deseado.

California Pellet Mill Company (2016) clasificó varios ingredientes comunes con base en sus características de “peletabilidad”. Los granos de destilería se clasifican con un grado bajo de peletabilidad y un grado medio de abrasividad en el dado de salida. Hay varias razones por las que los DDGS se clasifican de baja peletabilidad (**cuadro 2**). Primero, los DDGS tienen un contenido de humedad relativamente bajo, por lo que para conseguir una buena calidad del pélet van a requerir la adición de humedad en la dieta además del vapor proporcionado en la peletizadora, pero dependerá de la tasa de inclusión y el contenido de humedad general de la dieta. No obstante, aunque el contenido de proteína relativamente alto de los DDGS participe en plastificar la proteína durante el peletizado, lo que mejora la calidad del pélet, su contenido de aceite relativamente alto contribuye a reducirla, aunque depende de la tasa de inclusión y la calidad de otras grasas o aceites que completen las dietas. En contraste, el beneficio del contenido de aceite relativamente alto de los DDGS es que contribuye a mejorar la tasa de producción de la peletizadora. Algunos tipos de fibra de los ingredientes contienen aglutinantes naturales que contribuyen a pélets de buena calidad, aunque hay ingredientes como los DDGS, con cantidades relativamente altas de fibra, que de hecho reducen las tasas de producción de las peletizadoras, porque es difícil de comprimir la fibra en el pélet. El contenido de almidón de los DDGS es bajo y es posible que durante el proceso de producción se gelatinice parcialmente, lo cual no es propicio para una mejor calidad del pélet. Además, los DDGS tienen una densidad de masa moderada, lo que contribuye a disminuir las tasas de producción, en función de la densidad y cantidades de los otros ingredientes en la formulación del alimento. El tamaño de partícula de los DDGS varía de 294 a 1,078 μm entre fuentes (Kerr et al., 2013). Un tamaño de partícula de fino a mediano brinda una mayor superficie de contacto para la absorción de humedad del vapor,

Cuadro 1. Comparación del promedio, rango y cambios en la composición de nutrientes de los DDGS que resultan de la extracción parcial de aceite (base materia seca)

Nutriente	DDGS de maíz (>10 % de aceite)	DDGS de maíz (< 10 % de aceite) ³
Humedad %	11.1 (9.8-12.8) ¹	12.5 (10-14.5)
Proteína cruda, %	30.8 (28.7-33.3) ^{1,2}	31.2 (29.8-32.9)
Grasa cruda %	11.5 (10.2-12.6) ^{1,2}	8 (4.9-9.9)
FND %	41.2 (36.7-49.1) ¹	32.8 (30.5-33.9)
Almidón %	5.3 (4.7-5.9) ²	2.4 (0.8-3.4)
Cenizas %	5.2 (4.3 – 6.7) ^{1,2}	5.4 (4.9-6.1)

¹Spiehs et al. (2002)

²Belyea et al. (2004)

³Kerr et al. (2013)

lo que resulta en mayores cambios químicos, mejora la calidad del pélet y previene que las partículas grandes funcionen como puntos de ruptura naturales para la producción de finos. Igualmente, los ingredientes y dietas con un tamaño de partícula de pequeño a mediano mejoran la lubricación del dado de salida y aumenta las tasas de producción.

Dietas peletizadas con DDGS para aves

Beneficios y limitaciones de las dietas avícolas peletizadas

En general, las dietas avícolas peletizadas resultan en un mejor desempeño del crecimiento comparadas con las dietas en harina. Jafarnejad et al. (2010) compararon el desempeño del crecimiento del pollo de engorde al alimentar dietas peletizadas/en migajas vs. en harina y demostraron mejor ganancia de peso corporal y conversión alimenticia con las dietas en migajas. Estudios anteriores también han mostrado resultados similares al alimentar pollo de engorde con pélets de alta calidad (Jensen et al., 1962; Nir et al., 1994). Gran parte de las mejores tasas de crecimiento y conversión alimenticia con la alimentación de pélets es resultado de un mayor consumo de alimento (Engberg et al., 2002; Svihus et al., 2004; Abdollahi et al., 2011). La calidad del pélet es importante para lograr un consumo de alimento óptimo, porque conforme aumenta la proporción de pélets intactos (menor porcentaje de finos), aumenta el consumo de alimento y la ganancia de peso (Lily et al., 2011). Además, se estima que en las dietas 100% pélets (sin finos) el peletizado contribuye con 197 kcal/kg al contenido de EMA_n de la dieta, pero aunque este último disminuya conforme aumente el porcentaje de finos, las dietas con 20% de pélets (80 por ciento de finos) siguen proporcionando una mejora de 76 kcal/kg de EMA_n (McKinney y Teeter, 2004). De forma similar, Skinner-Noble et al. (2005) notificaron que los pélets aumentan en 151 kcal/kg el contenido de EMA_n comparado con las dietas en harina. Parte de esta mejora en la utilización de la energía es atribuida a un menor incremento de calor y mayor uso de

energía para el crecimiento, comparado con las dietas en harina (Latshaw y Moritz, 2009). Las dietas peletizadas para pollos reducen también el desperdicio de alimento (Jensen, 2000), lo cual se atribuye en parte a que se previene la separación de las partículas más grandes de las más pequeñas y a minimizar los efectos negativos en el desempeño del crecimiento que pueden haber cuando no se consume una dieta equilibrada (Falk, 1985). Además, las aves alimentadas con dietas peletizadas pasan menos tiempo consumiendo alimento y obtienen más energía y nutrientes por unidad de energía gastada durante el consumo, comparado con las dietas en harina (Jensen et al., 1962; Jones et al., 1995; Vilarino et al., 1996). De hecho, Nir et al. (1994) notificaron que las aves (de 28 a 40 días de edad) eran menos activas y pasaron un tercio del tiempo consumiendo alimento peletizado, en comparación con las alimentadas con dietas en harina. Sin embargo, hay pocas investigaciones en lo que respecta al tamaño y longitud óptimas del pélet para conseguir el mayor desempeño del crecimiento. Abdollahi y Ravindran (2013) compararon la alimentación de pollos con pélets que tenían 3, 5 o 7 mm de longitud y mostraron que a mayor longitud mejoró el PDI y la dureza, pero la alimentación con pélets de 3 mm resultó en el mayor consumo de alimento con una ganancia de peso similar, en comparación con los pélets de mayor longitud. Por último, el peletizado minimiza la segregación de ingredientes (Greenwood y Beyer, 2003) y aumenta la densidad de masa para tener un transporte y almacenamiento más eficientes, reduciendo al mismo tiempo el polvo en las plantas de alimentos y granjas de producción avícola.

Aunque por lo general la temperatura usada en el acondicionamiento es entre 89 y 90°C, la necesidad de reducir los patógenos como la *salmonella* y *campylobacter* y al mismo tiempo lograr una calidad de pélet deseada, a menudo lleva al uso de mayores temperaturas de acondicionamiento (Abdollahi et al., 2013), lo que reduce la digestibilidad de la energía y los nutrientes (Abdollahi et al., 2011), así como la actividad de las enzimas exógenas y vitaminas sintéticas (Abdollahi et al., 2013). Los resultados de las investigaciones sobre la temperatura óptima

Cuadro 2. Resumen de las características de los ingredientes y su impacto en la calidad del pélet y la producción de la peletizadora (adaptado de California Pellet Mill Co., 2016)

Características del ingrediente	Impacto de la calidad del pélet	Impacto en la tasa de producción de la peletizadora
Humedad	Mayor humedad incrementa la calidad del pélet	N/D
Proteína	Alto contenido de proteína incrementa la calidad del pélet	N/D
Grasa	Un contenido de lípidos mayores al 2 por ciento disminuye la calidad del pélet	Un alto contenido de lípidos incrementa la tasa de producción
Fibra	Un alto contenido de fibra puede mejorar la calidad del pélet	Un alto contenido de fibra disminuye la tasa de producción
Almidón	El alto contenido de almidón reduce la calidad del pélet, a menos que durante el peletizado se gelatinice con temperaturas y humedad altas	N/D
Densidad de masa	N/D	Una alta densidad incrementa la tasa de producción
Tamaño de partícula	Las partículas medianas o finas mejoran la calidad del pélet	Las partículas medianas o finas incrementan la tasa de producción

de acondicionamiento para la eliminación de patógenos del alimento son algo inconsistentes, pero se ha notificado que las temperaturas de acondicionamiento entre 80°C (Veldry matteran et al., 1995) y 85°C (Jones y Richardson, 2004) son eficaces para la producción de alimento sin salmonella. McCapes et al., (1989) indicaron que son necesarios 14.5 por ciento de humedad, 85.7°C de temperatura de acondicionamiento y un tiempo de calentamiento de 4.1 minutos para la inactivación total de la *salmonella* y *E. coli*. El alimento peletizado implica la combinación de corte, calor, tiempo de residencia y humedad, lo cual resulta en la desnaturalización parcial de la proteína en el alimento (Thomas et al., 1998) que reduce la solubilidad y mejora la digestibilidad (Voragen et al., 1995). Desafortunadamente, si se usan altas temperaturas para el procesamiento de ingredientes con bajo contenido de humedad, pueden haber reacciones de Maillard (encafecimiento o pardeamiento no enzimático), lo cual resulta en menor digestibilidad de las proteínas y carbohidratos (Pickford, 1992; Hendriks et al., 1994; Thomas et al., 1998), en especial la lisina. Sin embargo, Hussar y Robblee (1962) indicaron que es probable que las temperaturas típicas usadas en el peletizado tengan efectos mínimos en la digestibilidad de la lisina.

A menudo el peletizado reduce la actividad enzimática porque las enzimas exógenas son susceptibles al tratamiento térmico. Inbarr y Bedford (1994) evaluaron el peletizado de alimento para pollo de engorde a temperaturas de acondicionamiento de 75, 85 o 95°C durante 30 segundos o 15 minutos sobre la actividad de la β -glucanasa, almidón, β -glucanos totales y solubles y polisacáridos no almidonosos, así como sus efectos en el desempeño de las aves. En general, hubo un efecto cuadrático negativo de la temperatura de acondicionamiento y un efecto lineal positivo del nivel de enzimas en la conversión alimenticia y ganancia de peso. Específicamente, la actividad de la β -glucanasa en el alimento peletizado disminuyó 66 por ciento a una temperatura de acondicionamiento de 75°C al estar expuesto durante 30 segundos. Esto indica que el peletizado ocasiona la inactivación parcial de enzimas, aunque el desempeño del crecimiento del pollo solo se impactó cuando la temperatura de acondicionamiento fue mayor a 85°C (Inbarr y Bedford, 1994).

Dietas avícolas peletizadas con DDGS

La peletización de dietas con DDGS puede ser un reto si contienen más del 5 a 7 por ciento, ya que su adición incrementa el contenido de lípidos, pero proporciona el mínimo de almidón, necesario para la aglutinación de partículas durante el proceso (Behnke, 2007). Shim et al. (2011) notificaron que la adición del 8 por ciento de DDGS en dietas de crecimiento y 16 por ciento en finalización de pollo de engorde disminuyó la durabilidad del pélet. Sin embargo, en este estudio, se añadieron cantidades crecientes de grasa suplementaria a las dietas conforme aumentaron las tasas de inclusión de DDGS, lo cual probablemente contribuyó a la disminución de la durabilidad del pélet.

En contraste, varios estudios mostraron que es posible lograr dietas peletizadas con mayores tasas de inclusión de DDGS para apoyar el desempeño aceptable del crecimiento en pollo

de engorde. Wang et al. (2007a,b,c) llevaron a cabo pruebas de alimentación en pollos con dietas peletizadas con hasta 30 por ciento de DDGS. Aunque en estas pruebas no se midió la durabilidad del pélet, notificaron que su calidad en las dietas con 15 por ciento de DDGS fue similar a los de la dieta control, pero la peletización de las dietas con 30 por ciento resultó en una alta proporción de de finos, incluso con un aglutinante de pélets (Wang et al., 2007a,b).

Min et al. (2008) alimentaron pollo de engorde de 0 a 42 días de edad con dietas avícolas oleosas, peletizadas, isocalóricas de maíz-harina de soya con 0, 15 y 30 por ciento de DDGS (8.9 por ciento de grasa cruda) con o sin 5 por ciento de glicerina. Las dietas de iniciación se peletizaron con un dado de 2.38 mm mientras que las de crecimiento y finalización con uno de 4.76 mm. El porcentaje de finos aumentó conforme aumentaba el nivel de inclusión de DDGS (**cuadro 3**). Sin embargo, a pesar del aumento de finos, a los 14 días mejoró el peso corporal de las aves alimentadas con 15 y 30 por ciento de DDGS y la tasa de inclusión no tuvo efecto de los 28 o 42 días de edad. Además, no hubo diferencias en la conversión alimenticia de las aves alimentadas con 0 por ciento (1.65) y 15 por ciento (1.64) de DDGS, pero la alimentación de dietas con 30 por ciento incrementó el consumo de alimento y redujo la conversión alimenticia (1.71), lo que es de suponer que se debió al aumento de finos. La alimentación de dietas con 30 por ciento de DDGS redujo el porcentaje de rendimiento de la canal, pero no tuvo efectos en el rendimiento de la carne de pechuga.

En un estudio subsiguiente, Min et al. (2009) mostraron que el aumento hasta el 25 por ciento en las tasas de inclusión de DDGS en la dieta incrementó el porcentaje de finos de 1.49 a 10.81 por ciento. No obstante, la adición de lignosulfonato a la dieta como aglutinante fue eficaz para mejorar la calidad del pélet y reducir el porcentaje de finos.

El primer estudio integral para evaluar la eficiencia de los DDGS en la fabricación de pélets para dietas avícolas lo desarrollaron Loar et al. (2010). Se peletizaron dietas con 0, 15 y 30 por ciento de DDGS y 30 por ciento de DDGS con 2 por ciento de arena (tamaño de partícula de 450 μ m), junto con 1.90 a 3.88 por ciento de grasa avícola, con un dado de 30.48 cm de diámetro, 0.476 x 4.496 cm. La temperatura de acondicionamiento de la harina fue 82°C y se usó una presión al vapor de 262 kPa en la válvula esférica. Como se muestra en el **cuadro 4**, el porcentaje de finos aumentó y disminuyó el PDI con el aumento de los niveles de DDGS, al tiempo que la adición de 2 por ciento de arena a las dietas con 30 por ciento de DDGS no mejoró las mediciones de calidad del pélet comparado con el peletizado de las dietas con 30 por ciento de DDGS sin arena. Probablemente estos cambios se debieron al menor contenido de almidón conforme aumentaba la tasa de inclusión de DDGS, junto con la inclusión de grasa avícola suplementaria en la mezcladora previo al peletizado.

Salmon (1985) mostró que la adición de mayores concentraciones de grasa en las dietas de pollo de engorde disminuyó la calidad del pélet. Con el incremento de niveles de DDGS disminuyó también la densidad de masa, lo cual se debió

Cuadro 3. Efecto de la tasa de inclusión de DDGS en la calidad del pélet en dietas de pollos (adaptado de Min et al., 2008)

Tipo de alimento	% de DDGS	% finos ¹		
		Promedio	DE	CV
Iniciador ²	0	1.05	0.67	63.32
	15	4.29	0.30	7.02
	30	12.04	2.40	19.90
Crecimiento ²	0	10.53	3.02	28.66
	15	18.96	7.94	41.88
	30	26.89	3.38	12.58
Finalizador ³	0	12.83	6.34	49.40
	15	26.60	11.55	43.43
	30	42.64	16.68	39.11

¹Porcentaje de pélets que pasan por una malla de 2 mm.

²Peletizado con un dado de 2.38 mm.

³Peletizado con un dado de 4.76 mm.

Cuadro 4. Efectos de la tasa de inclusión de DDGS en la dieta en la calidad del pélet, tasa de producción y uso de energía eléctrica (adaptado de Loar et al., 2010)¹

DDGS %	Finos ² %	PDI ³ %	Densidad de masa, kg/m ³	Tasa de producción total, ton/hr	Uso de energía eléctrica relativa del acondicionador, kWh/ton	Uso de energía eléctrica relativa de la peletizadora, kWh/ton
0	30.8 ^c	74.4 ^a	631.8 ^a	1.211	0.659 ^{bc}	6.531 ^a
15	41.7 ^b	66.8 ^b	622.8 ^b	1.266	0.646 ^c	5.127 ^b
30	54.2 ^a	62.1 ^c	618.3 ^b	1.143	0.749 ^a	4.775 ^c
30 + arena ⁴	54.5 ^a	62.3 ^c	616.9 ^b	1.149	0.723 ^{ab}	5.019 ^{bc}

^{a,b,c} Las medias en una columna que no comparten superíndice en común difieren ($P < 0.05$)

¹Medias de cuatro lotes de repeticiones.

²Porcentaje de finos presentes en el alimento peletizado total.

³Índice de durabilidad del pélet determinado por la norma ASAE S269.4 (ASAE, 1997).

⁴Se añadió dos por ciento de arena a costa de todos los ingredientes.

a la menor densidad de masa de los DDGS comparada con la del maíz, que se sustituyó parcialmente en estas dietas. Sin embargo, la tasa de producción de la peletizadora fue similar a la fabricación de dietas con 0, 15 y 30 por ciento de DDGS. Estos investigadores indicaron que la reducción numérica en la tasa de producción en las dietas con 30 por ciento de DDGS es atribuible a la reducción de fósforo inorgánico suplementario en dichas dietas, lo cual tuvo un efecto de pulido al interior de los dados de salida. La adición de DDGS a las dietas avícolas reduce la cantidad de fósforo inorgánico suplementario necesario para cubrir los requerimientos de este mineral, porque contienen una cantidad importante de fósforo disponible. Fue mayor uso de electricidad en el acondicionador para la fabricación de la dieta con 30 por ciento de DDGS, pero con el nivel creciente de DDGS en la dieta disminuyó su uso en la peletizadora. Estas diferencias de uso de energía quizá se deban a la cantidad de grasa añadida en estas dietas, porque se ha demostrado que esto último incrementa la producción en

la peletizadora (Thomas et al., 1998). Aunque comúnmente se piensa que al añadir arena puede mejorar la calidad y eficiencia en la fabricación, en este estudio no afectó ninguna medida de fabricación. Curiosamente, al alimentar con dietas de iniciación (de 0 a 14 días de edad) en migaja con 0 a 8 por ciento de DDGS, y dietas de crecimiento (de 14 a 28 días de edad) peletizadas con 0, 7.5, 15, 22.5 o 30 por ciento de DDGS, no hubo efecto en el desempeño del crecimiento a los 14 o 28 días de edad. Sin embargo, la adición de más de 15 por ciento de DDGS en dietas de crecimiento, se redujo el peso corporal y consumo de alimento de los 14 a los 28 días de edad.

En un estudio más reciente, Wamsley et al. (2013) demostraron que el incremento de tasas de inclusión de DDGS en la dieta no tendió a afectar la calidad del pélet hasta la fabricación de dietas con 10 y 20 por ciento de DDGS en la fase de finalización, que fue cuando aumentó la tasa de producción (**cuadro 5**). De manera interesante, el aumento de los niveles

de DDGS en la dieta tendió a reducir el consumo de energía en la peletizadora, aunque no está claro si las diferencias en la calidad del pélet, la tasa de producción y el uso de electricidad se debieron a los DDGS o la grasa suplementaria.

Algunos estudios recientes evaluaron el peletizado de DDGS reducidos en aceite (menos del 10 por ciento de grasa cruda) en dietas de pollo de engorde. Dozier et al. (2015) llevaron a cabo un estudio para evaluar el desempeño del crecimiento y composición de la canal de pollo alimentado con dietas de 5, 7 o 9 por ciento de DDGS en iniciación, crecimiento y finalización, respectivamente, con fuentes de DDGS con bajo (5.4 por ciento de grasa cruda) medio (7.8 por ciento de grasa cruda) y alto (10.5 por ciento de grasa cruda) contenido de aceite. Se agregaron a las dietas cantidades crecientes de grasa avícola al añadir fuentes de DDGS con contenido de grasa cruda reducido. Se recolectaron muestras de las dietas de finalización peletizadas para determinar el PDI mediante un nuevo probador de pélets New Holmen. Aunque las dietas con las tres fuentes de DDGS tuvieron un PDI variable, el de las dietas con 9 por ciento fue de 75.6, 70.8 y 88.3 por ciento para las dietas DDGS con bajo, medio y alto contenido de aceite, respectivamente. Estos investigadores sugirieron que la mayor tasa de inclusión de grasa avícola en las dietas de DDGS con bajo y medio contenido de aceite resultó en una reducción numérica del PDI. Sin embargo, de igual que los resultados notificados por Shim et al. (2011), la disminución del PDI con tasas crecientes de inclusión de DDGS en la dieta no afectó adversamente el desempeño del crecimiento.

Kim et al. (2016) llevaron a cabo un estudio para determinar las tasas máximas de inclusión de DDGS reducidos en aceite (7.4 por ciento de grasa cruda) en dos dietas de finalización alimentadas de los 28 a 42 días de edad (finalización 1) y

de los 43 a los 56 días de edad (finalización 2). Las dietas de finalización 1 contenían 0, 8, 16, 18, 24 o 30 por ciento de DDGS y 0, 8, 16 y 24 por ciento de DDGS en las de finalización 2. Todas las dietas experimentales se peletizaron a una temperatura de acondicionamiento de 85°C y en un dado con dimensiones de 0.476 × 3.81 cm. Aunque en este estudio no se midió la calidad del pélet, no hubo diferencia en el desempeño del crecimiento y características de la canal del pollo alimentado con hasta 24 por ciento de DDGS en la dieta de finalización 1 (de los 28 a los 42 días) y la de finalización 2 (de los 43 a los 56 días). Estos resultados indican que aunque no se logre la calidad óptima del pélet, las tasas de inclusión relativamente altas (24 por ciento) de DDGS en la dieta apoyan a un desempeño del crecimiento y composición de la canal aceptables.

Por último, solo un estudio evaluó los efectos de la extrusión de las dietas avícolas con DDGS. Oryschak et al. (2010) formularon dietas con 0, 15 o 30 por ciento de DDGS de trigo o de maíz. Las dietas se extruyeron con un extrusor de doble tornillo, que aumentó la digestibilidad ileal aparente (DIA) de aminoácidos en los DDGS de maíz (10 por ciento) y de trigo (34 por ciento). La DIA de lisina, treonina, valina y arginina aumentaron 31, 26, 23 y 21 por ciento, respectivamente de las dietas de extrusión con 15 por ciento de DDGS de maíz y trigo. Además, la DIA de energía bruta y proteína cruda fue similar entre las dietas con DDGS de trigo y maíz no extruidas, pero mayor para las dietas extruidas de DDGS de maíz, comparadas con los de trigo. Estos resultados indican que con la extrusión es posible mejorar la digestibilidad de aminoácidos en las dietas con DDGS de maíz y trigo. Además, la extrusión ha demostrado ser un método de procesamiento eficaz para la eliminación de la contaminación microbiana (Said, 1996).

Cuadro 5. Efectos de la tasa de inclusión de DDGS en la dieta en la calidad del pélet, tasa de producción y uso de energía eléctrica (adaptado de Wamsley et al., 2013)

Dieta	DDGS %	Grasa añadida¹ %	Finos² %	PDI³ %	Tasa de producción total, ton/hr	Uso de energía eléctrica relativa del acondicionador, kWh/ton	Uso de energía eléctrica relativa de la peletizadora, kWh/ton
Iniciador	0	1.25	12.2	86.7	0.712	0.170	6.36
	4	1.38	15.1	85.2	0.824	0.042	5.35
	10	1.81	14.6	81.2	0.789	0.043	4.93
Crecimiento	0	1.45	11.4	78.4	0.819	0.059	5.56
	5	1.63	6.8	78.8	0.816	0.067	5.58
	10	1.81	14.6	81.2	0.789	0.043	4.93
Finalizador	0	1.59	6.7	71.1	1.22	0.116	4.94
	10	1.96	11.2	64.3	1.20	0.144	4.87
	20	2.43	10.0	65.8	1.18	0.117	4.12

¹Grasa suplementaria total añadida a la mezcladora previo al peletizado.

²Porcentaje de finos presentes en el alimento peletizado recolectado en el enfriador.

³Índice de durabilidad del pélet determinado en muestras del tambor rotatorio Pfast durante 10 min a 50 rpm.

Ecuaciones de predicción para mejorar la calidad del pélet de dietas avícolas con DDGS

Los resultados inconsistentes notificados sobre la durabilidad del pélet, tasa de producción y uso de energía entre los estudios publicados de cerdos y aves indican que existen muchas interacciones entre los diferentes factores que afectan a estas importantes mediciones. Para encarar la complejidad de estas interacciones y predecir los efectos de la adición de DDGS a las dietas porcinas y avícolas, Fahrenholz (2012) desarrolló unas ecuaciones de predicción para predecir el PDI y consumo energético:

$$\text{PDI} = 53.90 - (0.04 \times \text{tamaño de partícula del maíz, micrones}) - (6.98 \times \text{porcentaje de grasa}) - (1.12 \times \text{porcentaje de DDGS}) - (1.82 \times \text{tasa de producción, kg/hr}) + (0.27 \times \text{temperatura de acondicionamiento, } ^\circ\text{C}) + (0.04 \times \text{tiempo de retención, segundos}) + (1.78 \times \text{L:D del dado}) + (0.006 \times \text{tamaño de partícula} \times \text{L:D del dado}) - (0.23 \times \text{porcentaje de grasa} \times \text{porcentaje de DDGS}) + (0.06 \times \text{porcentaje de grasa} \times \text{temperatura de acondicionamiento}) + (0.15 \times \text{porcentaje de DDGS} \times \text{L:D del dado})$$

Esta ecuación de predicción tuvo un $R^2 = 0.92$ y la diferencia entre el PDI predicho y real fue de 1.1 (una variación cercana al 1 por ciento). La proporción L:D del dado tiene el mayor efecto sobre el PDI, en donde la disminución de grosor del dado de 8:1 (el común de la industria) a 5.6:1 hizo que disminuyera el PDI en 10.9 unidades. El aumento de la temperatura de acondicionamiento de 65 a 85°C incrementó 7 unidades el PDI y la disminución de 3 a 1 por ciento del contenido de aceite de soya suplementario aumentó el PDI en 5.4 unidades. La disminución del tamaño de partícula del maíz molido de 462 μm a 298 μm contribuyó a un pequeño aumento de 0.5 unidades del PDI. De forma similar, la reducción de 1,814 a 1,360 kg/hr en la tasa de producción aumentó el PDI en solo 0.6 unidades y tuvo un efecto mínimo en el PDI.

$$\text{kWh/ton} = 55.93 - (0.01 \times \text{tamaño de partícula de maíz, micrones}) + (1.88 \times \text{porcentaje de grasa}) - (0.05 \times \text{porcentaje de DDGS}) - (30.90 \times \text{tasa de producción, kg/hr}) - (0.41 \times \text{temperatura de acondicionamiento, } ^\circ\text{C}) + (0.17 \times \text{tiempo de retención, segundos}) - (1.20 \times \text{L:D del dado}) + (0.02 \times \text{tamaño de partícula de maíz, micrones} \times \text{tasa de producción, kg/hr}) - (0.0001 \times \text{tamaño de partícula de maíz, micrones} \times \text{temperatura de acondicionamiento, } ^\circ\text{C}) - (1.41 \times \text{porcentaje de grasa} \times \text{tasa de producción, kg/hr}) - (0.01 \times \text{porcentaje de grasa} \times \text{porcentaje de DDGS}) - (0.21 \times \text{porcentaje de DDGS} \times \text{tasa de producción, kg/hr}) + (0.004 \times \text{porcentaje de DDGS} \times \text{temperatura de acondicionamiento, } ^\circ\text{C}) + (0.22 \times \text{tasa de producción, kg/hr} \times \text{temperatura de acondicionamiento, } ^\circ\text{C}) - (0.11 \times \text{tasa de producción, kg/hr} \times \text{tiempo de retención, segundos}) + (1.21 \times \text{tasa de producción, segundos} \times \text{L:D del dado})$$

Esta ecuación de predicción tuvo un $R^2 = 0.95$ y la diferencia entre los kWh/ton predichos y reales fue de 0.3 (una variación cercana al 3 por ciento). El aumento de 65 a 85°C en la temperatura de acondicionamiento tuvo el mayor efecto para reducir el consumo de energía (2.7 kWh/ton), mientras que una proporción L:D del dado más fina (5.6:1) redujo en 1.3 kWh/ton del uso de la energía. Ningún otro factor (tamaño de partícula de maíz – 462 a 298 micrones, porcentaje de aceite de soya = grasa – 1 a 3 por ciento, porcentaje de DDGS – de 0 a 10 por ciento, tasa de producción – de 1,360 a 1,814 kg/hr o tiempos de retención – de 30 a 60 segundos) afectó el consumo de energía en más de 1 kWh/ton. Como lo muestran las ecuaciones, hay múltiples interacciones entre los factores. Por lo tanto, si las condiciones de peletización actuales no producen el PDI o consumo energético deseados, hay que modificar otros factores para lograr mejores resultados.

Bibliografía

- Abdollahi, M.R., and V. Ravindran. 2013. Influence of pellet length on pellet quality and performance of broiler diets. *J. Appl. Poult. Res.* 22:516-522.
- Abdollahi, M.R., V. Ravindran, and B. Svihus. 2013. Pelleting of broiler diets: An overview with emphasis on pellet quality and nutritional value. *Anim. Feed Sci. Technol.* 179:1-23.
- Abdollahi, M.R., V. Ravindran, T.J. Wester, G. Ravindran, and D.V. Thomas. 2012. The effect of manipulation of pellet size (diameter and length) on pellet quality and performance, apparent metabolizable energy and ileal nutrient digestibility in broilers fed maize-based diets. *Anim. Prod. Sci.*, 53:114-120.
- Abdollahi, M.R., V. Ravindran, T.J. Webster, G. Ravindran, and D.V. Thomas. 2011. Influence of feed form and conditioning temperature on performance, apparent metabolizable energy and ileal digestibility of starch and nitrogen in broiler starters fed wheat-based diet. *Anim. Feed Sci. Technol.* 168:88-99.
- All About Feed. 2012. AllAboutFeed - The better the pellet, the better the performance <http://www.allaboutfeed.net/Nutrition/Research/2012/2/The-better-the-pellet-the-better-the-performance-AAF012746W/> (accessed 9-21-17).
- Amerah, A.M., V. Ravindran, R.G. Lentle, and D.G. Thomas. 2007. Feed particle size: Implications on the digestion and performance of poultry. *World's Poult. Sci. J.* 63:439-455.
- ASAE. 1997. S269.4. Cubes, pellet and crumbles definitions and methods for determining density durability and moisture content. St Joseph, MI.
- ASAE Standards. 2003. S269.4. Cubes, pellet, and crumbles definitions and methods for determining density durability and moisture content. St. Joseph, MI.

- Behnke, K.C. 2014. Pelleting with Today's Ingredient Challenges. Kansas State University, Manhattan, Kansas.
- Behnke, K.C. 2007. Feed manufacturing considerations for using DDGS in poultry and livestock diets. In: Proceedings of the 5th Mid-Atlantic Nutrition Conference, N.G. Zimmerman (Ed.), Maryland Feed Industry Council and Dept. of Animal and Avian Sciences, University of Maryland, College Park. pp. 77-81.
- Behnke, K.C. 2006. The art (science) of pelleting. Tech. Rep. Series: Feed Tech. American Soya Association, Singapore.
- Behnke, K.C. 2001. Factors influencing pellet quality. *Feed Tech.* 5:19-22.
- Belyea, R.L., K.D. Rausch, and M.E. Tumbleson. 2004. Composition of corn and distillers dried grains with solubles from dry grind ethanol processing. *Bioresource Tech.* 94:293-298.
- Briggs, J.L., D.E. Maier, B.A. Watkins, and K.C. Behnke. 1999. Effect of ingredients and processing parameters on pellet quality. *Poult. Sci.* 78:1464-1471.
- California Pellet Mill Co., 2016. The Pelleting Process. [https://www.cpm.net/downloads/Animal Feed Pelleting.pdf](https://www.cpm.net/downloads/Animal%20Feed%20Pelleting.pdf) (accessed 11-11-17).
- Cavalcanti, W.B., and K.C. Behnke. 2005a. Effect of composition of feed model systems on pellet quality: A mixture experimental approach. I. *Cereal Chem.* 82:462-467.
- Cavalcanti, W.B., and K.C. Behnke. 2005b. Effect of composition of feed model systems on pellet quality: A mixture experimental approach. II. *Cereal Chem.* 82:462-467.
- Cramer, K.R., K.J. Wilson, J.S. Moritz, and R.S. Beyer. 2003. Effect of sorghum-based diets subjected to various manufacturing procedures on broiler performance. *J. Appl. Poult. Res.* 12:404-410.
- Cutlip, S.E., J.M. Hott, N.P. Buchanan, A.L. Rack, J.D. Latshaw, and J.S. Moritz. 2008. The effect of steam-conditioning practices on pellet quality and growing broiler nutritional value. *J. Appl. Poult. Res.* 17:249-261.
- Dozier III, W.A., and J.B. Hess. 2015. Growth and meat yield responses of Hubbard × Cobb 500 male broilers fed diets formulated with distillers dried grains with solubles varying in ether extract content and inclusion rate from 1 to 33 days of age. *J. Appl. Poult. Res.* 24:436-450.
- Engberg, R.M., M.S. Hedemann, and B.B. Jensen. 2002. The influence of grinding and pelleting of feed on the microbial composition and activity of the digestive tract of broiler chickens. *Br. Poult. Sci.* 43:569-579.
- Fahrenheit, A. 2012. Evaluating factors affecting pellet durability and energy consumption in a pilot feed mill and comparing methods for evaluating pellet durability. Ph.D. Thesis, Kansas State University, Manhattan, Kansas, 92 pages.
- Falk, D. 1985. Pelleting cost centre. In: *Feed manufacturing Technology III*, R.R. McElhiney (Ed.). American Feed manufacturers Association, Arlington, VA, pp. 167-190.
- Gilpin, A.S., T.J. Herrman, K.C. Behnke, and F.J. Fairchild. 2002. Feed moisture, retention time, and steam as quality and energy utilization determinants in the pelleting process. *Appl. Engineering Agricult.* 18:331-340.
- Greenwood, M.W., and R.S. Beyer. 2003. Effect of feed manufacturing practices on nutrient availability and feed quality. In: *Proc. 30th Annual Carolina Poultry Nutrition Conference*, Raleigh, NC, pp. 7-16.
- Hendriks, W.H., P.J. Moughan, H. Boer, and A.F.B. van der Poel. 1994. Effects of extrusion on the dye-binding, fluorodinitrobenzene-reactive and total lysine content of soybean meal and peas. *Anim. Feed Sci. Technol.* 48:99-109.
- Hussar, N., and A.R. Robblee. 1962. Effect of pelleting on the utilization of feed by the growing chicken. *Poult. Sci.* 41:1489-1493.
- Inbarr, J., and M.R. Bedford. 1994. Stability of feed enzymes to steam pelleting during feed processing. *Anim. Feed Sci. Technol.* 46:179-196.
- Jafarnejad, S., M. Farkhoy, M. Sadegh, and A.R. Bahonar. 2010. Effects of crumble-pellet and mash diets with different levels of dietary protein and energy on the performance of broilers at the end of the third week. *Vet. Med. Intl.* Vol 2010, Article ID 328123, 5 pages, doi:10.4061/2010/328123.
- Jensen, L.S. 2000. Influence of pelleting on the nutritional needs of poultry. *Asian-Aust. J. Anim. Sci.* 13:35-46.
- Jensen, L.S., L.H. Merrill, C.V. Reddy, and J. McGinnis. 1962. Observations on eating patterns and rate of food passage of birds fed pelleted and unpelleted diets. *Poult. Sci.* 41:1414-1419.

- Jones, F.T., K.E. Anderson, and P.R. Ferket. 1995. Effect of extrusion on feed characteristics and broiler chicken performance. *J. Appl. Poult. Res.* 4:300-309.
- Kaliyan, N., and R.V. Morey. 2006. Factors affecting strength and durability of densified products. In: 2006 ASAE Annual Meeting (p. 1). American Society of Agricultural and Biological Engineers.
- Kerr, B.J., W.A. Dozier III, and G.C. Shurson. 2013. Effects of reduced-oil corn distillers dried grains with solubles composition on digestible and metabolizable energy value and prediction in growing pigs. *J. Anim. Sci.* 91:3231-3243.
- Kim, E.J., J.L. Purswell, and S.L. Branton. 2016. Effects of increasing inclusion rates of a low-fat distillers dried grains with solubles (LF-DDGS) in finishing broiler diets. *Int. J. Poult. Sci.* 15:182-187.
- Latshaw, J.D., and J.S. Moritz. 2009. The partitioning of metabolizable energy by broiler chickens. *Poult. Sci.* 88:98-105.
- Lily, K.G. S., C.K. Gehring, K.R. Beaman, P.J. Turk, M. Sperow, and J.S. Moritz. 2011. Examining relationships between pellet quality, broiler performance and bird sex. *J. Appl. Poult. Res.* 20:231-239.
- Loar II, R.E., J.S. Moritz, J.R. Donaldson, and A. Corzo. 2010. Effects of feeding distillers dried grains with solubles to broilers from 0 to 28 days posthatch on broiler performance, feed manufacturing efficiency and selected intestinal characteristics. *Poult. Sci.* 89:2242-2250.
- McCapes, R.H., H.E. Ekperigin, W.J. Cameron, W.L. Ritchie, J. Slagter, V. Stangeland, and K.V. Nagaraja. 1989. Effect of a new pelleting process on the level of contamination of poultry mash by *Escherichia coli* and *Salmonella*. *Avian Diseases* 33:103-111.
- McKinney, L.J., and R.G. Teeter. 2004. Predicting effective caloric value of non-nutritive factors: I. Pellet quality and II. Prediction of consequential formulation dead zones. *Poult. Sci.* 83:1165-1174.
- Min, Y.N., A. Hancock, F. Yan, C. Lu, C. Coto, A. Karimi, J.H. Park, F.Z. Liu, and P.W. Waldroup. 2009. Use of combinations of canola meal and distillers dried grains with solubles in broiler starter diets. *J. Appl. Poult. Res.* 18:725-733.
- Min, Y.N., F.Z. Liu, Z. Wang, C. Coto, S. Serrate, F.P. Costa, F. Yan, and P.W. Waldroup. 2008. Evaluation of distillers dried grains with solubles in combination with glycerin in broiler diets. *Int. J. Poult. Sci.* 7:646-654.
- Moritz, J. S., K.J. Wilson, K.R. Cramer, R.S. Beyer, L.J. McKinney, W.B. Cavalcanti, and X. Mo. 2002. Effect of formulation density, moisture and surfactant on feed manufacturing, pellet quality and broiler performance. *J. Appl. Poult. Res.* 11:155-163.
- Nir, I., I. Twina, E. Grossman, and Z. Nitsan. 1994. Quantative effects of pelleting on performance, gastrointestinal tract and behavior of meat-type chickens. *Br. Poult. Sci.* 35:589-602.
- NRC. 2012. Nutrient requirements of swine. 11th ed. Natl. Acad. Press, Washington, DC.
- Oryschak, M., D. Korver, M. Zuidhof, X. Meng, and E. Beltranena. 2010. Comparative feeding value of extruded and nonextruded wheat and corn distillers dried grains with solubles for broilers. *Poult. Sci.* 89:2183-2196.
- Payne, J.D., 2004. Predicting pellet quality and production efficiency. *World Grain* 3, 68-70.
- Payne, R.L., T.D. Bidner, L.L. Southern, and K.W. McMillin. 2001. Dietary effects of soy isoflavones on growth and carcass traits of commercial broilers. *Poult. Sci.* 80:1201-1207.
- Pfost, H.B. 1964. The effect of lignin binders, die thickness and temperature on the pelleting process. *Feedstuffs* 36:20-54.
- Pickford, J.R. 1992. Effects of processing on the stability of heat labile nutrient in animal feeds. In: *Recent Advances in Animal Nutrition*, P.C. Garnsworthy, W. Haresign, and D.J. A. Cole (Eds.), Butterworth Heinemann, Oxford, UK. Pp. 177-192.
- Reece, F.N., B.D. Lott, and J.W. Deaton. 1985. The effects of feed form, grinding method, energy level and gender on broiler performance in a moderate (21 C) environment. *Poult. Sci.* 64:1834-1839.
- Richert, B.T., and J.M. DeRouchey. 2010. Swine feed processing and manufacturing. In: D. J. Meisinger, editor, *National swine nutrition guide*. Pork Center of Excellence, Ames, IA. p. 245-250.
- Robinson, R. 1976. Pelleting-introduction and general definitions. *Feed manufacturing technology*. Feed Production Council, American Feed Manufacturing Association, Inc., Chicago, Ill, 96-103.
- Said, N.W. 1996. Extrusion of alternative ingredients: An environmental and nutrition solution. *J. Appl. Poult. Res.* 5:395-407.
- Salmon, R.E. 1985. Effects of pelleting, added sodium bentonite and fat in a wheat-based diet on performance and carcass characteristics of small white turkey. *Anim. Feed Sci. Technol.* 12:223-232.

- Shim, M.Y., G.M. Pesti, R.I. Bakalli, P.B. Tillman, and R.L. Payne. 2011. Evaluation of corn distillers grains with solubles as an alternative ingredient for broilers. *Poult. Sci.* 90:369-376.
- Skinner-Noble, D.O., L.J. McKinney, and R.G. Teeter. 2005. Predicting effective caloric value of non-nutritive factors: III. Feed form affects broiler performance by modifying behavior patterns. *Poult. Sci.* 84:403-411.
- Skoch, E.R., S.F. Binder, C.W. Deyoe, G.L. Allee, and K.C. Behnke. 1983. Effects of steam pelleting condition and extrusion cooking on a swine diet containing wheat middlings. *J. Anim. Sci.* 57:929-935.
- Skoch, E.R., K.C. Behnke, C.W. Deyoe, and S.F. Binder. 1981. The effect of steam-conditioning rate on the pelleting process. *Anim. Feed Sci. Technol.* 6:83-90.
- Smallman C. 1996. Maximizing conditioning potential. *Feed Milling International* 190:16-19.
- Spiehs, M.J., M.H. Whitney, and G.C. Shurson. 2002. Nutrient database for distillers dried grains with solubles produced from new plants in Minnesota and South Dakota. *J. Anim. Sci.* 80:2639-2645.
- Stark, C.R. 2009. Effect of die thickness and pellet mill throughput on pellet quality. Abstract T89. Southern Poult. Sci. Soc. Meeting.
- Stark, C.R., K.C. Behnke, J.D. Hancock, S.L. Traylor, and R.H. Hines. 1994. Effect of diet form and fines in pelleted diets on growth performance of nursery pigs. *J. Anim. Sci.* 72(Suppl 1):214.
- Stevens, C.A. 1987. Starch gelatinization and the influence of particle size, steam pressure and die speed on the pelleting process. Ph.D. Thesis, Kansas State Univ., Manhattan.
- Svihus, B., K.H. Kløvstad, V. Perez, O. Zimonjia, S. Sahlstrom, R.B. Schuller, W.K. Jeksrud, and E. Prestløkken. 2004. Physical and nutritional effects of pelleting broiler chicken diets made from wheat ground to different coarsenesses by the use of roller mill and hammer mill. *Anim. Feed sci. Technol.* 117:281-293.
- Thomas, M., and A.F.B van der Poel. 1996. Physical quality of pelleted animal feed 1. Criteria for pellet quality. *Anim. Feed Sci. Technol.* 61:89-112.
- Thomas, M., T. van Vliet, and A.F.B van der Poel. 1998. Physical quality of pelleted animal feed: 3. Contribution of feedstuff components. *Anim. Feed sci. Technol.* 70:59-78.
- Thomas, M., D.J. van Zuilichem, and A.F.B. van der Poel. 1997. Physical quality of pelleted animal feed. 2. contribution of processes and its conditions. *Anim. Feed Sci. Technol.* 64:173-192.
- Traylor, S.L. 1997. Effects of feed processing on diet characteristics and animal performance. Master's thesis. Kansas State Univ., Manhattan.
- Tumuluru, J.S., C.C. Conner, and A.N. Hoover. 2016. Method to produce durable pellets at lower energy consumption using high moisture corn stover and a corn starch binder in a flat die pellet mill. *J. Vis. Exp.* 112:1-13.
- Veldry matteran, A., H.A. Vahl, G.J. Borggreve, and D.C. Fuller, D.C. 1995. A survey of the incidence of Salmonella species and Enterobacteriaceae in poultry feeds and feed components. *Vet. Rec.* 136:169-172.
- Vilarino, M., M.J. Picard, J.P. Melcion, and J.M. Faure. 1996. Behavioural adaptation of laying hens to dilution of diets under mash and pellet form. *Br. J. Poult. Sci.* 37:895-907.
- Voragen, A.G.J., H. Gruppen, G.J.P. Marsman, and A.J. Mul. 1995. Effect of some manufacturing technologies on chemical, physical and nutritional properties of feed. In: *Recent Advances in Animal Nutrition*, P.C. Garnsworthy and D.J.A. Cole (Eds.), Feed Manufacturers Conference 1995, University of Nottingham, Nottingham University Press, pp. 93-126.
- Wamsley, K.G.S., R.E. Loar II, K.Karges, and J.S. Moritz. 2013. The use of practical diets and regression analyses to determine the utilization of lysine and phosphorus in corn distillers dried grains and solubles using Cobb 500 male broilers. *J. Appl. Poult. Res.* 22:279-297.
- Wang, Z., S. Cerrate, C. Coto, F. Yan, and P.W. Waldroup. 2007a. Effect of rapid and multiple changes in level of distillers dried grain with solubles (DDGS) in broiler diets on performance and carcass characteristics. *Int. J. Poult. Sci.* 6:725-731.
- Wang, Z., S. Cerrate, C. Coto, F. Yan, and P.W. Waldroup. 2007b. Use of constant or increasing levels of distillers dried grains with solubles (DDGS) in broiler diets. *Int. J. Poult. Sci.* 6:501-507.
- Wang, Z., S. Cerrate, C. Coto, F. Yan, and P.W. Waldroup. 2007c. Utilization of distillers dried grains with solubles (DDGS) in broiler diets using a standardized nutrient matrix. *Int. J. Poult. Sci.* 6:470-477.

- Winowiski, T. 1998. Examining a new concept in measuring pellet quality: Which test is best? *Feed Mgmt.* 49:23-26.
- Winowiski, B.Y.T., E. By, C. Stark, A. Fahrenholz, and C. Jones. 1962. Measuring the physical quality of pellets. American Soybean Association. LingoTech USA, Inc.
- Wood, J.F. 1987. The functional properties of feed raw materials and their effect on the production and quality of feed pellets. *Anim. Feed Sci. Technol.* 18:1-17.
- Wondra, K.J., J.D. Hancock, K.C. Behnke, R.H. Hines, and C.R. Stark. 1995. Effects of particle size and pelleting on weanling pig performance and nutrient digestibility. *J. Anim. Sci.* 73:757-763.
- Zimonja, O., A. Stevnebø, and B. Svihus. 2007. Nutritional value of diets for broiler chickens as affected by fat source, amylose level and diet processing. *Can. J. Anim. Sci.* 87:553-562.