

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS  
RELACIONADAS CON EL MANEJO Y EL  
ALMACENAMIENTO DE LOS DDGS



**U.S. GRAINS**  
COUNCIL

# 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 ingrediente.

## PUENTE, 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.

## EFFECTOS 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”.

## EFFECTOS 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  $\mu\text{m}$ . 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.

## EFFECTOS 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/m<sup>3</sup> (Rosentrater, 2006) y de 490 a 590 kg/m<sup>3</sup> (Bhadra et al., 2009). Clementson e Ileleje (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).

## EFFECTOS DEL DISEÑO DE SILOS DE ALMACENAMIENTO Y DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA SOBRE LA CAPACIDAD DE FLUJO DE LAS DIETAS DE DDGS

### EFFECTOS 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)<sup>1</sup>**

**Experimento 1**

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

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

<sup>2</sup> Número de golpes necesarios al costado del silo para descargar.

<sup>3</sup> Calificación subjetiva asignada a la capacidad de flujo (1 = libre flujo, 10 = totalmente puenteado)

**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)<sup>1</sup>**

**Experimento 2**

<b>Medición</b>	<b>Steel60</b>		<b>Poly60</b>		<b>Steel67</b>	
	<b>Sin agitador</b>	<b>Con agitador</b>	<b>Sin agitador</b>	<b>Con agitador</b>	<b>Sin agitador</b>	<b>Con agitador</b>
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	827 <sup>a</sup>	827 <sup>a</sup>	831 <sup>a</sup>	970 <sup>b</sup>	807 <sup>a</sup>	880 <sup>a</sup>
Golpes necesarios <sup>2</sup>	2.1	2.0	5.2	2.5	3.2	2.0
Calificación de la capacidad de flujo <sup>3</sup>	2.3	2.6	4.2	2.9	3.7	2.3

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

<sup>2</sup> Número de golpes necesarios al costado del silo para descargar.

<sup>3</sup> Calificación subjetiva asignada a la capacidad de flujo (1 = libre flujo, 10 = totalmente puenteado)

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.

## EFFECTOS DEL TAMAÑO DE PARTÍCULAS

El tamaño de partícula entre las fuentes de DDGS es altamente variable, con un promedio de 660  $\mu\text{m}$  y una desviación estándar de 440  $\mu\text{m}$  (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  $\mu\text{m}$  = grueso, 594  $\mu\text{m}$  = mediano, y 308  $\mu\text{m}$  = 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  $\mu\text{m}$  en tamaño de partícula promedio (entre 818 y 308  $\mu\text{m}$ ) 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)**

<b>Especies fúngicas</b>	<b>Humedad relativa %</b>	<b>Contenido de humedad %</b>
<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 spp</i>	80 - 90	15 - 18

material extraño promueven el crecimiento de los hongo 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. s

## PEROXIDACIÓN DE LÍPIDOS DE LAS FUENTES DE DDGS

### EFFECTOS 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-hidroxinonanal 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)**

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

<sup>1</sup>TBARS = sustancias reactivas al ácido tiobarbitúrico

<sup>2</sup>L\* = un valor mayor indica un color más claro.

<sup>3</sup>a\* = un mayor valor positivo indica un color más rojizo.

<sup>4</sup>b\* = 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.

## EFFECTOS 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
<b>Índice de peróxido, meq/kg aceite</b>						
Día 14	7.1 <sup>a</sup>	3.1 <sup>bc</sup>	3.6 <sup>b</sup>	4.5 <sup>d</sup>	2.7 <sup>c</sup>	2.8 <sup>c</sup>
Día 28	31.4 <sup>a</sup>	13.9 <sup>bc</sup>	15.4 <sup>b</sup>	20.5 <sup>d</sup>	11.7 <sup>bc</sup>	13.6 <sup>bc</sup>
<b>TBARS<sup>1</sup>, mg MDA<sup>2</sup> Eq/kg de aceite</b>						
Día 14	5.1 <sup>a</sup>	2.9 <sup>cd</sup>	2.4 <sup>d</sup>	3.8 <sup>bc</sup>	2.4 <sup>d</sup>	2.3 <sup>d</sup>
Día 28	21.1 <sup>a</sup>	9.5 <sup>b</sup>	9.0 <sup>b</sup>	14.3 <sup>d</sup>	11.0 <sup>bc</sup>	10.1 <sup>bc</sup>
<b>Índice de p-anisidina<sup>3</sup></b>						
Día 14	3.9 <sup>a</sup>	1.0 <sup>b</sup>	1.0 <sup>b</sup>	3.8 <sup>a</sup>	0.7 <sup>b</sup>	1.0 <sup>b</sup>
Día 28	9.1 <sup>a</sup>	3.4 <sup>bc</sup>	2.9 <sup>bc</sup>	9.5 <sup>a</sup>	5.0 <sup>b</sup>	4.3 <sup>b</sup>

<sup>a,b,c,d</sup> Las medias dentro del mismo renglón con distintos superíndices son diferentes (P menor a 0.05).

<sup>1</sup>TBARS = sustancias reactivas al ácido tiobarbitúrico

<sup>2</sup>MDA= malondialdehído

<sup>3</sup>El índice de p-anisidina no cuenta con unidades