

ENZIMAS EN DIETAS PARA CERDOS – EVALUACIÓN CON SENTIDO PRÁCTICO.

José A. Cuarón Ibargüengoytia
Centro Nacional de Investigación en Fisiología Animal, INIFAP

INTRODUCCIÓN

En México el trabajo de investigación con enzimas exógenas*, aplicadas a la alimentación de los cerdos, ha sido muy limitado porque hay muy pocos investigadores (menos trabajando con esta orientación) y porque no se han destinado los recursos (en bienes, infraestructura y del capital) para esta actividad. Las muy escasas publicaciones han sido fundamentalmente para relatar esfuerzos de constatación con los productos disponibles en el mercado, pero hay algunas iniciativas para desarrollar o adaptar el conocimiento, la tecnología y los productos disponibles a la solución de problemas en nuestras condiciones de trabajo.

Hay cuatro conceptos que deben ser entendidos para usar cualquier enzima eficazmente:

Las enzimas son proteínas con una actividad específica: su función es desdoblar un sustrato en particular y no tiene actividad sobre otras moléculas. Si el sustrato no está presente, no se tendrá respuesta; si la concentración de este es baja, pueden no haber efectos. La nomenclatura identifica la actividad.

Las enzimas tienen condiciones particulares de trabajo, en lo grueso: humedad, pH, temperatura, presencia de iones. Si estas condiciones no se cumplen, la efectividad será menor o nula.

Las enzimas que son efectivas para mejorar la productividad animal no son aquellas que aumentan el potencial digestivo endógeno (propio al animal), pero sí las que complementan la actividad enzimática del animal.

Los efectos indirectos (de digestibilidad asociativa) de las enzimas pueden ser más relevantes que los directos, práctica, fisiológica y económicamente.

Entonces, antes de usar una enzima se necesita conocer al detalle la química de los ingredientes que se podrían incorporar a las dietas. Luego, se podrá calcular el impacto por la hidrólisis del sustrato y, finalmente, se deberán apreciar los efectos en el animal. Para esto hay una muy abundante literatura. Partiendo de la información existente, con estudios de gabinete se podrán resolver la mayoría de las dudas y llegar a la aplicación efectiva de las preparaciones enzimáticas disponibles y, ciertamente, se podrán

* Por enzimas exógenas deberá entenderse aquellas que son ajenas al animal, las que son adicionadas a la dieta para mejorar la digestibilidad de componentes de la misma, los que normalmente no son digeridos (al menos cuantitativamente) por los cerdos.

proyectar las demandas para desarrollar mejores productos. Así, el objetivo de este trabajo es discutir algunos principios que serán útiles para la toma de decisiones en el campo, como discernir la conveniencia de una enzima u otra y destacar los argumentos en demanda de investigación básica en el desarrollo actividades enzimáticas para atacar los problemas que no puedan ser resueltos con los productos y la tecnología existentes.

LOS SUSTRATOS, COMPOSICIÓN Y SUSCEPTIBILIDAD DE HIDRÓLISIS

Considerando la proporción de los ingredientes en los alimentos, es obvia la importancia primaria que tienen los granos de cereales; por eso, mucho del trabajo con enzimas se ha orientado a mejorar la digestibilidad de estos. La digestión de los almidones no es un problema grave y en el caso de la proteína, las enzimas endógenas parecen ser suficientes. El problema está con los hidratos de carbono y otros componentes de la pared celular, mismo que sucede con los suplementos proteicos de origen vegetal.

Los hidratos de carbono en el análisis químico proximal son la fibra cruda y los extractos libres de nitrógeno. Ya que en los granos de cereales importa el aporte de almidón (un polisacárido) y porque los hidratos de carbono estructurales son muy poco digestibles, se ha generalizado la tipificación de los ingredientes por el aporte relativo de polisacáridos no amiláceos (PSNA) o no-almidón, que en general son componentes de la pared celular (de ahí su denominación como hidratos de carbono estructurales). Las hemicelulosas son una parte importante de los PSNA y estas se asocian con pectinas, celulosa y otros compuestos. Porque la celulosa es de menor solubilidad, se hace una segunda clasificación en los polisacáridos no celulósicos, que incluye a los xilanos (arabinoxilanos y 4-O metil glucuronoxilanos), galactomananos, glucomananos, β -D-glucanos (con uniones 3 y 4) y xiloglucanos. Los glucanos y arabinoxilanos se aceptan como factores anti-nutricionales, particularmente por su capacidad para incrementar la viscosidad del contenido intestinal, lo que impide la digestión, bloquea la absorción y acelera la velocidad de tránsito de la ingesta. Los efectos en viscosidad del quimo explican parcialmente las fallas en digestibilidad de los ingredientes, particularmente en aves y, quizá, en lechones recién destetados, pero parece que no son de graves consecuencias en cerdos una vez pasados los primeros veintiún días después del destete.

Por su contenido y los componentes de los PSNA, los ingredientes proteicos de origen vegetal, quizá con la excepción de la pasta de soya, son más complejos de usar que otras fuentes de proteína. Por ejemplo, cerca de la tercera parte de la pasta de canola son sacarosa, oligosacáridos y PSNA (Figura 1 y Cuadro 1). En general, los hidratos de carbono de menor peso molecular son similares a los de la soya y no son una preocupación central, porque su concentración es baja y porque el impacto que tienen en digestibilidad es menor, pero un contenido mayor de PSNA reduce proporcionalmente el valor energético del ingrediente y complica la digestión del resto de los nutrientes, del ingrediente mismo y del resto de los que componen la dieta.

Relativo a los granos de cereales, el contenido y perfil de los hidratos de carbono es normalmente más diverso y complejo en las semillas de las oleaginosas y de las

leguminosas pero, en las últimas, la mayor proporción de la celulosa cristalina o insoluble y de los compuestos fenólicos se asocian a los vasos leñosos de la planta. Con las pastas de oleaginosas, las porciones lignino-celulósicas podrían separarse mecánicamente (con las “cascarillas”), resolviendo así parcialmente el problema, pero, como con los cereales, aún se tendría que lidiar con los PSNA de la pared celular y, como se encuentran en la mayoría de las oleaginosas y en las semillas de las leguminosas, con los PSNA del endospermo. La Figura 1, ilustra las diferencias en el contenido y proporciones de los tipos de hidratos de carbono de los granos de cereales y de algunos suplementos proteicos de origen vegetal.

Las semillas de las leguminosas deben considerarse aparte. Por ejemplo, el contenido lignino-celulósico es mucho menor que en las oleaginosas, y la proporción de hemicelulosa es menor que en los granos de cereales (Aguilera *et al.*, 1985), entonces los α -galactosanos y las pectinas (con ramificaciones β -1-4 galactano) deben ser de mayores consecuencias, por lo que serían necesarias preparaciones de actividad enzimática múltiple y, en estos casos, los beneficios se notarán por la reducción del potencial fermentativo.

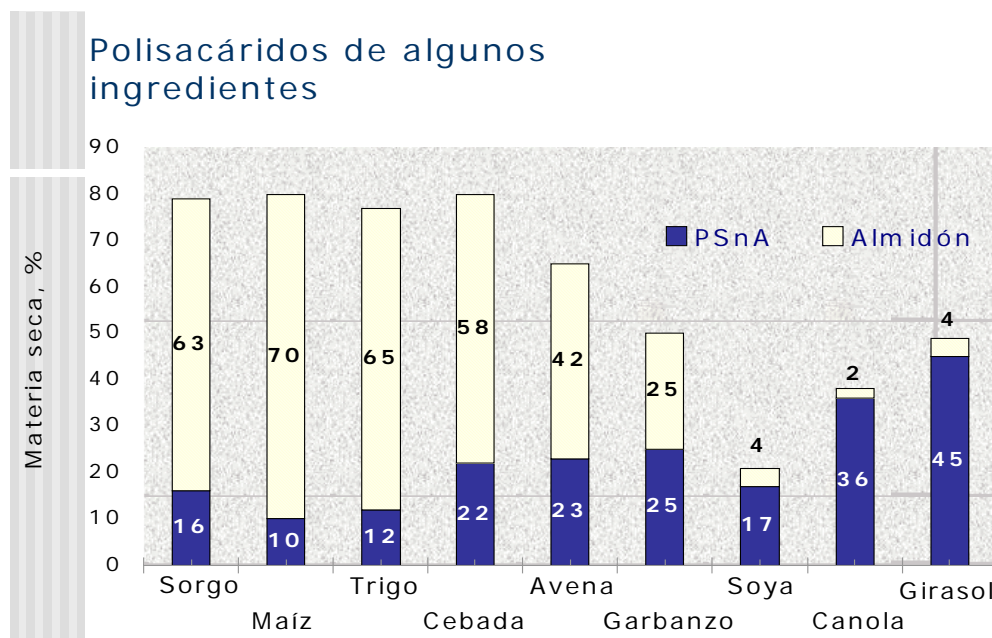


Figura 1. Proporción de almidón y polisacáridos no amilaceos (PSnA) en algunos granos de cereales y suplementos proteicos de origen vegetal.

Asociados al endospermo, los oligosacáridos rafinosa, estaquiosa y verbascosa suman el 2.5% de la pasta de canola y estos son los compuestos que se involucran en la mala digestibilidad del ingrediente. La ausencia de α -(1, 6)-galactosidasas en el tubo digestivo de los animales resulta en una alteración de la dinámica de fluidos, que se

acompaña de aumentos en la velocidad de tránsito de la ingesta. Normalmente estas fracciones de los oligosacáridos (también en el grano entero de Soya y otras oleaginosas) son susceptibles a la digestión fermentativa (en el tubo digestivo posterior), pero los productos de la digestión originan flatulencia, con pérdida de energía metabolizable (EM), lo que puede prevenirse con un lavado o extracción en etanol, particularmente de la pasta de canola.

Entonces, además del contenido, la solubilidad de los PSNA en los alimentos es un factor de consideración en la evaluación de la calidad nutritiva de los ingredientes. Por ejemplo, es indiscutible que la pasta de soya es nutritivamente mejor que la pasta de canola, porque la energía de la última es más baja y porque la digestibilidad de sus aminoácidos es menor. La diferencia radica en la solubilidad de los PSNA más que en el contenido (que es muy igual al de la Soya, Cuadro 1); en canola la solubilidad en agua de los PSNA es muy baja (Slominski *et al.*, 1994), por lo que no responden en digestión como los PSNA de los granos de cereales y es que, aún cuando se incrementa la digestibilidad de la porción fibrosa (por ejemplo, con el uso de galacturonasas se incrementa la hidrólisis de los polisacáridos no celulósicos del 5 al 45%), los beneficios pueden no ser demostrables al impedirse la absorción. En cambio, cuando se usan preparaciones con actividad enzimática múltiple (galacturonasa y fitasa) los efectos son notables. Por lo tanto, la diversidad y complejidad del arreglo de los PSNA en la pasta de canola exige una actividad enzimática peculiar. Como se verá más adelante, en el caso de canola los fitatos (que quizá se arrastren con los compuestos lignino-fenólicos) parecen jugar un papel central en la digestibilidad de los PSNA del ingrediente.

Cuadro 1. Contenido de hidratos de carbono en pastas de canola y de soya.

	Hidratos de carbono, % M.S.	
	Pasta de Canola	Pasta de Soya
Glucosa y fructosa	0.57	0.50
Sacarosa	8.75	6.90
Oligosacáridos	2.50	5.30
Almidones	2.55	0.70
Polisacáridos no amiláceos	19.78	20.30
Celulosa	5.30	5.50
Hemicelulosa y pectinas	14.35	14.80
Lignina y polifenoles	5.70	1.00
Hidratos de carbono totales	34.30	33.70

Slominski y Campbell, 1990 y 1991.

Algo similar sucede con el grano de sorgo. El contenido de fibra detergente neutro (FDN) y de fibra detergente ácido en el grano es muy igual al del grano de cebada (Cuadro 2), pero el impacto de las enzimas fibrolíticas disponibles (por ejemplo, β -glucanasas o xilanasas) es nulo con sorgo, porque los componentes de la pared celular

no incluyen cuantitativamente β -glucanos o xilanos (como en los cereales de grano pequeño como la cebada o el trigo). En el sorgo, una buena parte de los PSNA se puede explicar por compuestos asociados a las proteínas de almacén, a los taninos y a los fitatos (obviamente no asociados a P, porque su contenido es bajo), entonces el impacto de las fitasas debe ser mayor cuando se usen, por ejemplo, con grano de sorgo que con el grano de cebada.

De los párrafos anteriores puede concluirse que el concepto de fibra cruda es inoperante y que las fracciones de fibra parecen ser igualmente inútiles para describir los hidratos de carbono estructurales y su interacción con los animales de estómago simple, al menos para proyectar los beneficios o susceptibilidad de los sustratos a la acción de las enzimas. Quizá la fibra soluble e insoluble sea un mejor descriptor, pero las interacciones entre estos grupos se tendrán que investigar.

Para la aplicación de las enzimas a la nutrición animal, parece obligada la referencia al sustrato sobre el que actuará la enzima, o bien, se tendrán que encontrar los mejores elementos de predicción de la respuesta a un principio activo o modo de acción, quizá consecuencia de los fenómenos de digestibilidad asociativa, para medir o comparar la efectividad hidrolítica de una enzima. Como sea, hay un hueco analítico en la industria de alimentos para animales, porque el análisis independiente de un sustrato muy difícilmente se podrá justificar en las rutinas de constatación y porque los exámenes *in vitro* niegan todas las interacciones que suceden en el intestino de los animales y más con la respuesta metabólica y productiva. De aquí que se sugiera buscar modelos de predicción, incluyendo las técnicas del cercano-infrarrojo, que además incorporen la respuesta animal, esto es, la posible correlación entre la actividad digestiva y los parámetros mensurables objetivamente en la productividad animal.

Cuadro 2. Contenido de fracciones de fibra y disponibilidad de fósforo en ingredientes.

Ingrediente	FDN, %	FDA, %	Disponibilidad de P, %
Ajonjolí, pasta	18.00	13.20	31
Avena, grano	27.00	13.50	22
Canola, pasta	21.20	17.20	21
Cebada, grano	18.60	7.00	30
Chícharo, grano	12.70	7.20	39
Girasol, pasta	42.40	30.30	3
Girasol, pasta (sin cascarilla)	27.80	18.40	29
Maíz, grano	9.60	2.80	14
Maíz, grano de destilería	30.60	16.30	77
Sorgo, grano	18.02	8.30	20
Soya, pasta	9.20	6.30	27
Trigo, grano	13.10	4.00	50
Trigo, salvado	44.04	14.05	30

NRC, 1998

APLICACIÓN DE LAS ENZIMAS

Observar beneficios por la adición de enzimas a los alimentos depende de muchos factores, pero, incluso con las fitasas, la degradación de los PSNA y los efectos en digestibilidad asociativa son fundamentales para asegurar su efectividad. Por esto, el enfoque del trabajo con enzimas ha sido sobre los PSNA de los granos de cereales (se han desarrollado para trigo, cebada, avena, triticale y centeno), los fitatos, α -galactosanos y otros hidratos de carbono estructurales.

Dependiendo de la presencia de los sustratos, el uso de una o más actividades enzimáticas puede ser ventajoso porque finalmente los efectos de las enzimas obedecen a lo siguiente:

Rompimiento de la integridad de la pared celular, lo que conduce a la exposición de los nutrientes disponibles y a cambios físico-estructurales de los PSNA que alteran la mecánica del proceso digestivo, como sucede con la capacidad de retención de agua, presión osmótica y viscosidad.

Cambio del sitio de digestión – absorción tanto de los nutrientes disponibles, como de los PSNA (intestino delgado vs. ciego y colon, en los que sucede cuantitativamente la digestión fermentativa).

Alteración en el contenido y composición de la microbiota (por tipo y disponibilidad de sustratos).

Aumentos en la eficiencia de trabajo de las enzimas del mismo animal (al remover barreras físicas y químicas para su acción), reduciendo la carga en demandas para el mantenimiento.

Normalmente se espera que al adicionar una enzima al alimento se potencie la capacidad del animal para digerir. No sucede así. La digestibilidad es inherente a los ingredientes y, por más que se añadan enzimas (independientemente de su origen), la degradación sucederá hasta donde estas sean capaces de degradar los sustratos. Así, la mayor efectividad de las enzimas, como aditivos a los alimentos, se logra cuando las acciones complementan a las de las enzimas endógenas. Al analizar la información sobre algunas de las actividades enzimáticas sobre las que se han publicado resultados (Cuadro 3), es muy claro que las más efectivas han sido aquellas para las que los cerdos no tienen naturalmente enzimas y que, aún cuando exista cierta actividad (propia a la materia prima o por acción de la microbiota), esta es insuficiente para aprovechar los sustratos, porque uno de los cambios importantes que debe ocurrir para ganar el beneficio de la actividad enzimática es el sitio en el que ocurre la digestión.

También en el Cuadro 3 debe ser evidente que los efectos son más fácilmente detectados cuando se mide directamente la digestibilidad del sustrato y que la respuesta en la productividad de los animales puede ocultarse por la variación inherente, o porque finalmente el objeto de las enzimas es facilitar el uso de materias primas. Por lo tanto, en el proceso de formulación de los alimentos, bien se pueden estar aprovechando los efectos, o porque los productos de la hidrólisis enzimática

exógena contribuyen fundamentalmente con energía y una compensación en el consumo puede ocultar la respuesta. Entonces, cambios en la energía digestible (ED) pueden no ser suficientes para describir los alcances de la hidrólisis. Lo que sucede es que normalmente, los componentes PSNA de los ingredientes son de baja solubilidad y digestibilidad, por lo que estas fracciones del alimento son arrastradas al intestino posterior para la digestión fermentativa. Si la hidrólisis de la pared celular sucede, el aprovechamiento del contenido celular será parcial, porque ya no se tiene el potencial digestivo enzimático (localizado del estómago al íleon) y porque la hidrólisis bacteriana de estos almidones resultará en la producción de ácidos grasos volátiles, que en el mejor de los casos contribuyen con no más del 30% de la energía neta de mantenimiento. Además, por la estratificación y queratinización de los epitelios del intestino posterior (como sucede en el rumen), la absorción de aminoácidos y monosacáridos, si existe, es un proceso más bien ineficiente.

Cuadro 3. Respuesta a diferentes actividades enzimáticas, cuando las dietas con que se suministraron contenían el sustrato (del listado de literatura).

Actividad enzimática ^a	Eficacia relativa en digestión ^b	Eficacia relativa en producción ^c
Amilasa	0	0
Amiloglucosidasa	0	0
Arabinosinasa	1	0
α -glucosidasa	2	1
α -1-6-galactosidasa	3	2
β -1-4-galactomananasa	2	1
β -1-4-glucanasa	3	2
β -1-4-glucosidasa	2	0
β -1-4-mananasa	3	1
β -1-4-mananosidasa	2	0
Celobiasa	1	0
Celulasas	1	1
Di-sacaridasas	0	0
Fitasa	5	3
Glucuronasas	3	1
Hemicelulasas	3	1
Pectinasas	4	2
Pentosanasas	0	0
Xilanasas	3	2

^a Respuestas máximas promedio, cuando se usaron como única o actividad enzimática mayor.

^b Por la inducción de una mejor respuesta: 1 = 4% a 5 = 20% o más sobre el control.

^c Promedio de los efectos en ganancia de peso y eficiencia alimenticia. Estímulo de la respuesta: 1 = 2% a 5 = 10% o más sobre el control.

Lo anterior se ejemplifica bien con el trabajo de Taverner y Campbell (1988), en el que una β -glucanasa aparentemente no mejoró la digestibilidad cuando se midió al nivel fecal, pero la disponibilidad de la energía se aumentó en más de un 10% y la absorción de aminoácidos se pudo mejorar hasta en un 20%, lo que fue consecuencia del sitio en que sucedió la digestión (Cuadro 4); la β -glucanasa exógena permitió que la digestión sucediera en el intestino delgado y no en el grueso, porque los β -glucanos no son sustratos de la digestión enzimática endógena y su hidrólisis en el animal depende de la digestión fermentativa.

Cuadro 4. Desaparición de nutrientes del intestino de cerdos en crecimiento alimentados con dietas basadas en grano de cebada con o sin una β -glucanasa.

Sitio de digestión	Tratamiento	Desaparición de nutrientes	
		Energía, %	Nitrógeno, %
Intestino delgado	Control	61.2	63.7
	β -glucanasa	77.8	76.9
Intestino grueso	Control	17.3	11.0
	β -glucanasa	0.3	0.2
Total. Al nivel fecal	Control	78.4	74.7
	β -glucanasa	78.4	76.7

Taverner y Campbell, 1988.

Porque sabemos de la inmadurez digestiva de los lechones, enzimática y en capacidad de fermentación, y porque la esperanza de buenos resultados es alta, es muy frecuente el uso de enzimas en los primeros alimentos de los cerdos. Sin embargo, los resultados han sido consistentemente negativos. Al usar derivados lácteos y proteínas de baja antigenicidad (*i.e.*, “ingredientes de alta digestibilidad”), se evita la presencia del sustrato, tal vez con la excepción de los residuos de hemicelulosa y xilanos de la pared celular (por el potencial de alterar la viscosidad de la ingesta), pero la efectividad de las enzimas en dietas convencionales para lechones es muy pequeña o nula. Muchos de los trabajos que se han realizado con enzimas en México han sido con lechones como sujetos experimentales (tal vez por el costo de las dietas) y la conclusión de su análisis es que el costo de las dietas bien pudo reducirse sin tener que recurrir a las enzimas, porque la ausencia relativa del sustrato impidió la manifestación de sus efectos. Los resultados de Kim *et al.*, 2003 (Cuadro 5), por el grado de detalle en su publicación, bien ilustran esto.

Los efectos de las enzimas se manifestaron cuando se tuvo el sustrato para originar una respuesta conmensurable. Aquí (Cuadro 5), la ganancia de peso fue la misma, pero sutiles cambios en el consumo de alimento (desde la Fase 2), sugieren mayor disponibilidad de energía en respuesta a las enzimas exógenas. Porque el peso del intestino posterior (colon y ciego) fue 19% menor (o 13.59 vs. 15.80 cm/kg de peso) en los animales que recibieron la enzima ($P<0.06$) bien pueden hacerse inferencias similares a las derivadas del Cuadro 4: tal vez la digestión fermentativa fue menor al hidrolizarse antes los sustratos.

Cuadro 5. Efectividad de un complejo enzimático en lechones durante las tres primeras fases de alimentación.

Criterio	Control	Complejo enzimático ^a	
		0.1%	0.2%
Fase 1. Primera semana posdestete. Contenido de maíz y pasta de soya en la dieta = 52.85%			
Peso al destete, kg	6.26	6.32	6.29
Ganancia de peso, g/d	123	110	116
Ganancia/Consumo, g	0.65	0.67	0.73
Fase 2. Semanas 2 y 3 posdestete. Contenido de maíz y pasta de soya en la dieta = 72.44%			
Ganancia de peso, kg/d	344	327	345
Ganancia/Consumo, kg	0.61	0.65	0.63
Fase 3. Semanas 4 y 5 posdestete. Contenido de maíz y pasta de soya en la dieta = 95.70%			
Ganancia de peso, kg/d	504	531	514
Ganancia/Consumo, kg	0.54 ^b	0.59 ^c	0.57 ^{bc}

^a Productos de fermentación de *Aspergillus niger*, *A. oryzae* y malta de cebada germinada. Actividades principales de galactosidasas, mananasas y manosidasas.

^{b, c} Medias con diferentes literales difirieron, $P<0.05$.

Kim et al., 2003.

La importancia de identificar la presencia y de cuantificar el sustrato antes de decidir la inclusión de una enzima en los alimentos debe ser reiterada. Las enzimas más efectivas son aquellas que hidrolizan los PSNA de los granos de trigo, cebada, avena y centeno; no se tienen enzimas que hayan sido consistentemente eficaces con maíz (pobre aporte de PSNA) o con sorgo y la calidad de la soya en nuestro país se ha incrementado, por el proceso; la remoción de las cascarillas deja poco sustrato útil para las enzimas. Quizá nuestras dietas exijan el desarrollo de actividades enzimáticas particulares.

RESULTADOS DE LA ADICIÓN DE ENZIMAS A DIETAS PARA CERDOS

Probablemente la actividad enzimática exógena más difundida para la alimentación comercial de cerdos en México sea la fitasa[†], en menor medida se han usado xilanasas-glucanasas, particularmente en Sonora, siempre asociadas a la oferta local de grano de trigo. En la mayoría de los casos, la información disponible son los resultados de ensayos de campo para constatar, con el comportamiento productivo, los efectos difundidos por la literatura comercial. Por lo tanto, las posibilidades para desarrollar mejores usos, o para extender las aplicaciones de las enzimas son muy limitadas.

La gran adopción de la fitasa obedece a la efectividad y ventajas económicas que arroja. Ha estimulado a los usuarios el relativo alto costo del fósforo (que es uno de los nutrientes más caros), y el que se pueda trabajar con “seguridad” reduciendo los niveles de Ca y P en la dieta. Independientemente de la competencia entre las marcas (que ha reducido los precios de la enzima), bien se han podido identificar el objeto y los efectos de la enzima: hidrolizar los fitatos para liberar el fósforo fítico, lo que impacta positivamente con ingredientes de origen vegetal. Además, se aceptan los beneficios por la liberación de otros nutrientes, denotado por el muy común uso de las “matrices (de formulación) de nutrientes”, que es la asignación de valores nutritivos a la enzima por la esperanza de liberación de los mismos en los alimentos. Esto resulta fácil, y es conveniente cuando hay un universo limitado y constante de ingredientes, pero induce a errores cuando hay la posibilidad de incorporar otras materias primas (sustratos):

¿Es correcta una misma “matriz” cuando se usa trigo (P disponible al 50%) o sorgo (20%); pasta de soya (27%) o pasta de girasol entera (3%)?. ¿Son los fitatos de todas las materias primas de las mismas secuelas?. La respuesta para ambas preguntas es ¡NO!.

Siempre lo más apropiado es calcular la cantidad de sustrato presente y estimar (o medir) las consecuencias en digestibilidad asociativa.

El objeto fundamental de adicionar una fitasa al alimento es hidrolizar los fitatos, de lo que resulta la liberación del P, otros minerales, aminoácidos y energía, pero es importante recordar que la actividad fítica existe naturalmente en los ingredientes. Por lo tanto, la efectividad de la fitasa exógena dependerá de los niveles y formas de Ca y P, de la cantidad de sustrato hidrolizable (Cuadro 6), que obedece al tipo de ingredientes y la cantidad de fitatos endógenos que contengan, o por el total de los nutrientes que se liberen, pero también de las demandas del animal.

Para medir la respuesta a la adición de fitasa, Cromwell *et al.* (1993) usaron en cerdos de 250 a 1,000 U/kg de alimento y notaron incrementos lineales en el crecimiento, consumo de alimento y conversión alimenticia. Sin embargo, concluyeron como suficientes 500 U de fitasa/kg de alimento para generar el equivalente a 1 g de fósforo

[†] De las fitasas, se han reconocido (IUPAC-IUB, 1976) dos actividades fíticas: 3- (EC2.1.3.8), que hidroliza las uniones éster iniciando en la posición 3 y 6- (EC3.1.3.26), iniciando la hidrólisis en la posición 6. Ambos tipos de fitasas hidrolizan eventualmente los 6 fosfatos.

inorgánico. Entonces, ¿por qué la respuesta lineal en productividad animal? No pueden desdeñarse los efectos sobre la digestibilidad de la energía.

La hidrólisis de los fitatos no solo rinde P disponible; al romperse el complejo mioinositol se liberan otros nutrientes atados o quelatados por este, pero también se alteran los PSNA a los que estén asociados, creándose importantes efectos de digestibilidad asociativa, los que no se han cuantificado suficientemente. El Cuadro 7 resume los resultados por el uso de dos fitasas, a una misma actividad (500 U/kg de alimento), en la digestibilidad fecal aparente de dietas sorgo-pasta de canola. Con los datos en los Cuadros 2 y 6, pueden hacerse las siguientes conjeturas: con dietas sorgo-pasta de canola son una combinación especialmente susceptible a la acción de las fitasas. Con ambas fitasas, la digestibilidad de los nutrientes fue similar. Es claro que los efectos más notables de las enzimas fueron sobre los minerales objetivo, pero llama la atención el efecto detectado en la digestibilidad del nitrógeno y de la energía.

Cuadro 6. Contenido de fósforo fítico en varios ingredientes.

Ingrediente	Fósforo fítico, g/100 g de MS	Fósforo fítico, % del total
Maíz, grano	0.24	72
Trigo, grano	0.27	69
Cebada, grano	0.27	64
Sorgo, grano	0.28	67
Arroz, grano (sin pulir)	0.29	77
Chícharo, grano (bisalto)	0.24	50
Soya, pasta	0.39	60
Canola, pasta	0.70	59
Girasol, pasta	0.89	77

Aún cuando se han dado valores de mejoría en la digestibilidad de aminoácidos, el mérito de su liberación es de menores consecuencias en la nutrición de los animales, porque las cantidades desprendidas son muy pequeñas y porque, para aprovechar realmente a los aminoácidos, se tendría que mejorar su balance de la dieta. De hecho, los aminoácidos liberados no llegan a ser suficientes para corregir una deficiencia marginal (Augspurger y Baker, 2004). Entonces, las fitasas tienen que ser evaluadas primero por su capacidad para liberar el fósforo fítico, lo que se describe bien al trabajar con las “Unidades Fitasa” FTU[‡]).

[‡] Unidades FTU son la cantidad de enzima necesaria para liberar 1 μ mol de fósforo inorgánico por minuto a partir de fitato sódico, a una temperatura de 37°C y pH de 5.5.

Cuadro 7. Efecto de dos fitasas sobre los coeficientes de digestibilidad fecal aparente de la materia seca, proteína, Ca, P y energía.

%	Control	Fitasa 1	Fitasa 2	EEM
Materia seca	76.8	77.2	77.2	2.69
Proteína cruda	58.8	60.1	59.6	5.82
Ca	56.5	67.3	66.5	5.18
P	0	27.6	29.6	7.98
Energía	74.7	76.1	76.2	3.39

García B., G. *et al.*, 2003

Considerando la liberación del fósforo fítico, la adición de una fitasa a la dieta puede eliminar por completo la necesidad de incluir una fuente de fósforo inorgánico en la dieta y, en consecuencia, podrá alterar el perfil de ingredientes usados en la dieta. Si además, se otorga un “valor” energético al uso de la enzima, los efectos en alternancia de ingredientes son mayores. Por ejemplo, el precio de oportunidad de una fuente rica en P y relativamente baja en energía se incrementará importantemente. En consecuencia, la oferta de sustratos susceptibles a la acción de la enzima se incrementará y, por ende, el potencial de liberación de nutrientes (antes ligados) también.

La liberación de energía por las fitasas no puede explicarse sólo por la hidrólisis del sustrato (los fitatos), porque en el mejor de los casos (con las mayores concentraciones del complejo mioinositol) apenas se llegaría a un equivalente de 12 a 20 cal de ED/kg de alimento, pero los valores de energía asignados a la fitasa nunca son menores a las 40 kcal de ED/kg. Lo que sucede es que los fitatos contribuyen a la “fibra” del ingrediente y su hidrólisis favorece la digestión de estos componentes de la dieta en el intestino delgado. Valga la analogía con los resultados y comentarios derivados del Cuadro 4.

Por ejemplo, con los datos del Cuadro 7, y partiendo de una energía bruta (EB) en la dieta de 4.35 Mcal/kg, las fitasas resultarían en una ED aparente de 3.31 Mcal/kg, vs. las 3.25 Mcal/kg del control (*i.e.*, la hidrólisis liberó aproximadamente 60 kcal). Sin embargo, para aprovechar la mayor disponibilidad de P y energía generada por la enzima, se arreglarán las concentraciones relativas de los mismos ingredientes aumentando la concentración del sustrato de la fitasa. Entonces, podría requerirse un incremento en la cantidad de la enzima que se añadiera a la dieta, y la digestibilidad de la energía se podría llevar hasta la liberación (calculada) de 150 kcal de ED/kg de alimento (por la abundancia del sustrato), aún cuando se haya alcanzado la máxima separación del P fítico a concentraciones menores de la enzima (Figura 2).

La digestibilidad aparente de P se incrementó en casi un 50% al cambiar de 0 a 750 U/kg en el alimento, mientras que en el mismo rango de concentración de fitasa, la digestibilidad de la energía sólo se incrementó en un 6% pero, por la concentración relativa de la energía y el probable cambio del sitio de digestión, la liberación total

estaría prácticamente triplicándose, como se proyecta en la Figura 2. Los principios de digestibilidad asociativa, como se han venido discutiendo, se reiteran y bien se pueden argumentar cuando se usan dos actividades enzimáticas complementarias.

En el trabajo de Soria *et al.* (2003) se combinó factorialmente en las dietas una fitasa con un complejo enzimático fibrolítico (pectinasas, glucanasas y hemicelulasas). Los resultados, en el Cuadro 8, confirman la actividad de la fitasa: cuando se retiró el P inorgánico, el coeficiente de digestibilidad aparente del fósforo se incrementó del 16 al 38%, mismo que se observó con el complejo fibrolítico. Sin embargo, en la dieta de éste último tratamiento (sin fitasa, SI con el paquete fibrolítico), se partió de una menor dependencia por el P fítico, porque se mantuvo un aporte alto de fósforo disponible (0.22 vs. 0.12%), por lo que el impacto en digestibilidad del P es de menor cuantía (*i.e.*, es necesario considerar el aporte de origen inorgánico) y, si el coeficiente de digestibilidad es mayor al del control (sin ninguna de las actividades enzimáticas, con un nivel de P disponible alto), el efecto es consecuencia de una mejor digestibilidad asociativa y no, quizá, por la hidrólisis de los fitatos.

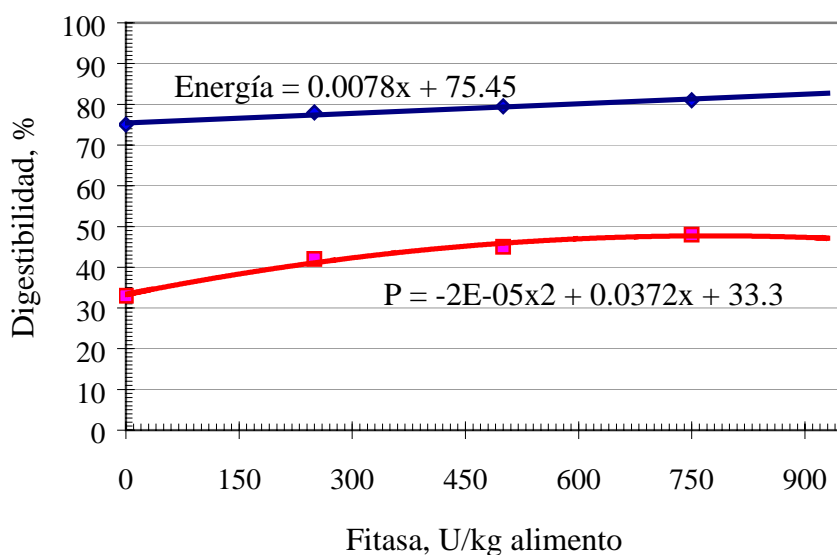


Figura 2. Tendencias de comportamiento de la digestibilidad de P y Energía con dietas sorgo-canola y cantidades crecientes de una fitasa.

Proyección con los datos de García B., G. *et al.*, 2003

Es notable que al combinar ambas actividades enzimáticas, aún evitando el P inorgánico, el efecto fue aún mayor que solo con la fitasa: una respuesta de digestibilidad en asociación.

Con los mismos datos (Cuadro 8), al estimar la liberación de energía, se alcanzaron proyecciones de hasta 100 kcal/kg, por efecto de cualquiera de las dos actividades enzimáticas (fitasa o el complejo multi-enzimático), pero cuando se usaron ambas en la misma dieta, se estimaron liberadas alrededor de 130 kcal/kg; una la complementación de la acción de ambas enzimas.

Para llevar hasta el ámbito de producción los resultados en los experimentos de digestibilidad, García *et al.* (2003) desafiaron la respuesta productiva de los cerdos cuando se incluyó una fitasa sólo para reducir el fósforo inorgánico, manteniendo constante la EM de la dieta, o bien, cuando además de los efectos sobre la disponibilidad de P, se calculó una liberación de 80 kcal de EM/kg de alimento (*i.e.*, una reducción en el aporte de EM, de 3.24 a 3.16 Mcal/kg). El ensayo se realizó con 265 cerdos, de los 32 a los 85 kg de peso corporal, en 8 repeticiones (corrales con un promedio de 11 cerdos) por cada uno de los tratamientos. Las dietas se formularon a costo mínimo usando libremente sorgo y las pastas de soya y de canola; los niveles de energía se ajustaron con el nivel de sebo y cuando se usó la fitasa, Ca y P se redujeron en aproximadamente 0.1 unidades porcentuales (*i.e.*, P disponible de 0.24 a 0.14% y de 0.20 a 0.08%, en dos fases de alimentación: 32 a 60 kg y 60 a 85 kg de peso). La Fitasa se incluyó para aportar 750 U/kg.

Cuadro 8. Coeficientes de digestibilidad aparente en respuesta a la adición de fitasa y un complejo fibrolítico a dietas sorgo-canola para cerdos en crecimiento.

Fitasa, U/kg	0	750	0	750	
Pectinasas, β -Glucanasas y Hemicelulasas (PGH)*	NO	NO	SI	SI	EEM
P disponible calculado, %	0.22	0.12	0.22	0.12	
Materia seca, % ^a	74.21	75.44	75.22	74.84	0.2335
Energía, % ^b	82.57	83.42	84.34	84.70	0.2635
Nitrógeno, % ^c	82.14	87.11	87.49	87.40	0.1327
Fibra detergente ácido, % ^d	55.32	55.88	56.34	58.10	0.9129
Fibra detergente neutro, % ^d	63.58	64.97	65.04	67.20	0.6896
Cenizas, % ^d	28.47	32.86	33.84	36.78	1.5881
Calcio, % ^e	41.18	50.73	51.38	60.76	1.9534
Fósforo, % ^f	15.45	38.06	38.15	40.31	2.3478

* Equivalente a 15,000 FBG/ton. y 1'500,000 PSU/ton.

^a Interacción fitasa×PGH (P<0.11)

^b Interacción fitasa×PGH (P<0.11). La adición de fitasa o PGH aumentó la ED (P<0.02) en 100 kcal/kg: ED = 3.3 Control, vs. 3.4 Mcal/kg para cada efecto promedio; ambas enzimas la incrementaron en 130 kcal/kg.

^c La adición de fitasa o PGH mejoró la digestibilidad (P<0.06).

^d P>0.36.

^e La adición de fitasa o PGH mejoró la digestibilidad (P<0.03).

^f La adición de fitasa o PGH mejoró la digestibilidad (P<0.02); las enzimas interactuaron (P<0.05).

Soria *et al.*, 2003.

No se encontraron diferencias (Cuadro 9), excepto en el consumo de EM. Los animales que recibieron la fitasa, con la dieta de mayor densidad energética, pudieron incrementar su consumo de EM en un 2%. En cambio, con la dieta Control (alta en energía), o con la dieta cuya concentración de energía se redujo, en la esperanza de liberación de energía por la fitasa, los consumos fueron iguales. Al final, la eficiencia energética (ganancia de peso en función del consumo de EM) fue idéntica: 0.12 kg/Mcal. Por supuesto que una mayor disponibilidad de energía, considerando las etapas de producción medidas, debió haber favorecido una mayor tasa de crecimiento magro y, potencialmente, se habría expresado el potencial para deposición de grasa, pero los efectos fueron menores, explicándose por la identidad en eficiencia de uso de la energía.

Cuadro 9. Respuesta energética en producción a la adición de una fitasa (750 U/kg) a la dieta de cerdos en crecimiento (medias de mínimos cuadrados).

	Control	Control + Fitasa	-EM + Fitasa	EEM	P>
EM calculada, Mcal/kg	3.24	3.24	3.16		
Consumo de alimento, kg/d	2.10	2.07	2.12	0.149	0.80
Ganancia de peso, kg/d	0.79	0.81	0.79	0.070	0.86
Ganancia / Consumo, kg	0.38	0.39	0.37	0.033	0.38
Grasa dorsal (P ₂ , última costilla), cm	1.52	1.62	1.55	0.180	0.27
Profundidad del lomo (P ₂ , última costilla), cm	4.96	5.03	4.91	0.583	0.88
Ganancia de tejido magro libre de grasa, kg/d	0.31	0.33	0.31	0.040	0.22
Consumo de EM, Mcal/d	6.52	6.68	6.52	0.001	0.01
GDP/EM, kg/Mcal	0.12	0.12	0.12	0.011	0.98

García B., G. *et al.*, 2003

En el mismo trabajo, los autores midieron el impacto en la excreción de nutrientes, encontrando que el potencial contaminante se reduce factorialmente, lo que tiene una correlación altísima con la mejoría en los coeficientes de digestibilidad de los grupos de nutrientes.

Aprovechando los resultados de Soria *et al.* (2003), recientemente se terminó una constatación de la proyección de sus valores de liberación de energía (Cuadro 10). En este trabajo, se usaron por 28 días cerdos con un peso inicial de 25 kg, pero las restricciones de formulación de los alimentos que se usaron correspondieron a las de un alimento para la fase de 40 a 60 kg de peso. Esto se hizo para imponer un desafío adicional, *i.e.*, se dudaba que la capacidad física de compensar el consumo (por las diluciones energéticas) se pudiera manifestar, particularmente por lo corto del período experimental. Todos los alimentos se formularon dejando libres sorgo, pastas de canola, ajonjolí y de soya, lo que resultó en la casi completa eliminación de la pasta de soya (Tratamientos 1 y 3). La concentración y los perfiles de aminoácidos digestibles

indispensables fueron idénticos, ajustando de fuentes cristalinas Lys, Thr, Trp y Met. Cuando se incluyó la fitasa, se redujeron los niveles de P disponible y de Ca en 0.1 unidades porcentuales. Todos los alimentos se produjeron industrialmente en forma de pellet en la Planta de alimentos de la Unión Ganadera Regional de Porcicultores del estado de Guanajuato, Irapuato, Gto. Los tratamientos fueron los siguientes:

Tratamiento 1: 3.16 Mcal de EM/kg, más los efectos de las enzimas (fitasa 750 U/kg, y pectinasas- β -glucanasas-hemicelulasas), para llegar a un valor calculado de 3.30 Mcal de EM/kg.

Tratamiento 2, control: 3.30 Mcal de EM/kg, por los efectos del proceso, sobre un valor de formula de 3.25 Mcal de EM/kg.

Tratamiento 3, control negativo: como 1, sin la adición de las enzimas, 3.16 Mcal de EM/kg.

Cuadro 10. Respuesta productiva a la adición de una fitasa y de un complejo pectinasas β -glucanasas-hemicelulasas, a la dieta de cerdos en crecimiento.

Tratamientos:	1	2	3		
Criterios de respuesta	Enzimas	Control	Control Negativo	EEM	P<
EM calculada, Mcal/kg	3.16	3.30	3.16		
Consumo de alimento, kg/d	1.890	1.850	2.000	0.1283	0.70
Ganancia de peso, kg/d	0.810	0.730	0.740	0.0453	0.47
Ganancia/Consumo, kg	0.430	0.400	0.380	0.0112	0.01
Consumo de EM, Mcal/d	6.230	6.090	6.310	0.4172	0.93
Eficiencia energética, kg/Mcal	0.131	0.121	0.119	0.0035	0.06
Consumo en 28 días, kg	52.900	51.760	55.930	3.5928	
Costo relativo del consumo en 28 días ^b	48.560	51.760	49.670		
Ganancia de peso en 28 días, kg	22.600	20.490	20.810		
Rentabilidad relativa, % ^c	46.440	39.550	41.890		

Medias de mínimos cuadrados.

Las celdas sombreadas representan diferencia entre las medias ($P < 0.04$).

^a Con un total de 24 unidades experimentales (120 cerdos). Peso inicial promedio de 24.7 ± 5.52 kg.

^b Asignando 100% al precio del alimento (costo de fórmula, ya que el proceso y otros costos fueron iguales). Los precios relativos fueron: tratamiento 1, 91.8%; tratamiento 2, 100% y tratamiento 3, 88.8%.

Precio relativo, % \times consumo total de alimento en el período.

^c Calculada con una relación 4.5:1 (precio del cerdo en pie : precio del alimento, kg). Se podrá extrapolar para calcular la rentabilidad real, por el uso de los alimentos, multiplicando por el porcentaje de los costos de producción que representen los alimentos (por ejemplo: 46.44×0.70 , si fueran los alimentos el 70% de los costos de producción, = 32.51%) y al costo de producción, restando además a la rentabilidad relativa la diferencia al 100%, del costo porcentual por los alimentos, (en el ejemplo anterior, un 30%), por ejemplo: $32.51 - (46.44 \times 0.30) = 18.58\%$. Con estos números, para el tratamiento 1., el retorno sobre la inversión en alimentos se estimó del 32.51% y sobre los costos totales de producción, del 18.58%.

Quizá por la corta duración del período, no se alcanzaron a distinguir diferencias estadísticamente significativas en el consumo de alimento o en la ganancia de peso, aunque ambas variables se combinaron para mejorar la eficiencia alimenticia (0.43 vs. 0.39 kg de peso ganado por kg de alimento consumido) con el tratamiento 1 (con enzimas). Aceptando las diferencias numéricas, el alimento con menor densidad energética (tratamiento 3) indujo un consumo compensatorio, resultando en igual consumo diario de EM. Esta similitud en el consumo calculado de energía corrobora la base de cálculo de los alimentos, *i.e.*, la efectividad de las enzimas, porque la energía disponible de una misma fórmula se incrementó en 90 a 140 Kcal/kg. Aún cuando la ganancia diaria de peso fue 9.5% mayor en respuesta al tratamiento 1, la diferencia no fue significativa por la gran variación (CV = 16.84%), probablemente inducida por el desafío y susceptibilidad de los individuos por haber usado una densidad de nutrientes menor a la requerida.

El mejor uso de la materia prima, planteado por el principio de aplicación de las enzimas, redujo el costo de los alimentos, fundamentalmente porque se relajó la restricción de energía, se invirtió menos en fósforo y porque se pudieron usar suplementos proteicos de menor precio (tratamientos 2 y 3). El tratamiento 1, en comparación con el 3, se encarece por el costo de las enzimas, pero siguió siendo menor que con el tratamiento 2. Por lo tanto, el mejor uso de la materia prima posibilita económicamente la aplicación del tratamiento enzimático exógeno. Cuando se estudió la rentabilidad de la tecnología aplicada es claro por qué, más que la reducción del costo de la unidad de alimento, interesa la efectividad del proceso. Solo por concepto de alimentación, la rentabilidad relativa fue mejor (con el tratamiento 1) en un 17%, cuando se comparó con el alimento más caro (tratamiento 2), o casi del 11% al comparar con el alimento más barato (tratamiento 3). Conviene subrayar que en gran parte el beneficio se obtuvo de la posibilidad de mantener la productividad animal.

DISCUSIÓN

La inconsistencia de las respuestas a las enzimas en productividad animal han puesto en duda las bondades de esta tecnología. Sin embargo, en todos los casos la ausencia de resultados puede acusarse a ligerezas en la consideración de la necesaria interacción entre la enzima y la presencia de los sustratos. Esto, además se complica por los efectos de los animales y los procedimientos de evaluación.

En aves, el efecto de reducción de la viscosidad de la digesta facilita la interpretación de la interacción entre la enzima y los sustratos, pero en cerdos las características del tubo digestivo y la actitud de consumo de alimento son diferentes. La microbiota del intestino delgado puede estar jugando un papel importante en la degradación de los PSNA, pero esto no se ha indagado suficientemente. Es claro que la rentabilidad del uso de enzimas en lechones recién destetados es cuestionable, pero pasados los primeros 21 días posdestete, los beneficios pueden ser importantes, aún en los casos en los que solo se ofrezca como sustrato a las paredes celulares de los granos de cereales, porque pequeñas mejoras en la eficiencia alimenticia tendrán una repercusión importante. El problema es que la medición de éste parámetro en el campo no se hace con la precisión o con la frecuencia necesaria.

Por las razones anteriores, la tecnología asociada al uso de las enzimas debe enfocarse a los mejores usos de la materia prima y, en esta, será de mayor relevancia el uso de proteínas “alternativas” de origen vegetal.

El problema de digerir las paredes celulares es que los sustratos no son tan específicos y menos generalizables. Si las glucanasas-xilanasas son muy efectivas con trigo o con cebada, con sorgo o con maíz no lo son. Entonces, se tendrán que desarrollar complejos enzimáticos diseñados para atacar sustratos objetivo. El desafío está en degradar los complejos PSNA, esperando los beneficios por la digestión “potenciada” del contenido celular y los polisacáridos, proteína y lignina. Es difícil diseñar mezclas de actividades enzimáticas efectivas porque la composición de los sustratos es variable entre ingredientes e incierta en cada uno. Las características de la estructura de las paredes celulares y sus implicaciones físico-químicas podrían determinarse por dos factores: el patrón con el que los PSNA y otros componentes se asocian y el tipo de las uniones entre las moléculas de los hidratos de carbono estructurales.

Las preparaciones enzimáticas comercialmente disponibles pueden ser efectivamente usadas para degradar algunos PSNA, incluyendo las fitasas, dependiendo de la presencia de los sustratos susceptibles. Esto último exige un conocimiento que no es abundante, ni generalizado, pero es obvia la necesidad de generar y difundir la información sobre la química de los PSNA para asegurar la efectividad de las preparaciones enzimáticas y su permanencia en el mercado (¿de quién es la responsabilidad de financiarlo?). Lo que es claro es que los beneficios potenciales por liberación de la energía admiten cualquier inversión, siempre que resulte en la producción de enzimas cuya acción hidrolítica sea adecuadamente orientada.

Una preocupación vigente, es la capacidad de las enzimas de soportar los procesos térmicos y que lleguen al intestino sin que la hidrólisis ácida estomacal altere su estabilidad. Aún cuando los fabricantes cuiden estos aspectos, entre otros, por la selección de las especies microbianas de origen de las enzimas, los procesos de producción y los vehículos, siempre se tendrá que verificar la actividad in situ del intestino de mayor interés (quizá hasta el ileon). En esto, los métodos de monitoreo son problemáticos porque hay tantos procedimientos como fabricantes de enzimas y la medición de la actividad enzimática en los alimentos y a su paso por el tubo digestivo es complicada. Por lo tanto, es muy importante desarrollar métodos confiables y consistentes para el control de calidad y la justipreciación de los productos que se ofrezcan.

Primero, la nomenclatura y unidades de medición debe estandarizarse para evitar confusiones en la evaluación documental de los productos. Luego, indudablemente la última decisión estará en la respuesta es la de los animales, por lo tanto, cualquier método de constatación deberá ir hasta la cuantificación de los efectos biológicos y no solo de las respuestas *in vitro*.

La constatación (apegada a los procesos de producción) es simple (si los procedimientos se conocen y se han practicado), pero no inmediata y no necesariamente barata.

La comparación entre productos se podrá hacer a la misma dosificación (en principio activo), usando cuando menos tres puntos de cada uno (*i.e.*, cuando se evalúen 2 productos, o se vaya contra un control, el mínimo de tratamientos será de 5, porque uno de los controles negativos se podría eliminar), hasta un nivel igual al 90% del límite de la porción lineal de la respuesta, por ejemplo (de la Figura 2), con fitasa, hasta 500 U/kg: 0, 250 y 500 U/kg. Con esto se podrán calcular las ecuaciones de regresión lineal y la relación entre pendientes describirá el aporte de uno con relación a un control, por ejemplo niveles de P inorgánico, o de la otra fitasa o enzima. Evidentemente, será más fácil hacer esto si se cuenta con la experiencia, las instalaciones y el equipo apropiados.

Algunas ideas para la constatación en pruebas de campo incluyen:

FITASA: Respuesta productiva, como se discutirá para otras enzimas que liberan energía, y verificación del contenido de cenizas en los carpos (recuperados de la línea de proceso en las empacadoras), quizá en respuesta a tres dietas: control (niveles altos de Ca y P), con la reducción de Ca y P por el uso de la enzima y como lo anterior sin la inclusión de la enzima. La concentración relativa de cenizas permitiría comparar entre productos y dosificaciones.

- **ENZIMAS QUE LIBERAN ENERGÍA:** con pruebas de comportamiento que incluyan cuando menos tres tratamientos (similares a los descritos en los Cuadros 8 y 9), con la condición de que el nivel de energía se reduzca en más de 150 kcal/kg con relación a los niveles convencionales de EM, con lo que se podrá asegurar la detección de las diferencias en la eficiencia alimenticia. Siempre será necesario medir además los cambios en la composición corporal (para tasar los destinos de la energía liberada por las enzimas). Obviamente, la esperanza de liberación de energía por la enzima debe ser similar a la reducción.
- **OXIDO DE CROMO:** como un marcador para medir la digestibilidad de aquello para lo que se tenga capacidad analítica (típicamente N, MS, Cenizas, Ca y P), o contratar las determinaciones que fueran necesarias, como las de energía.

CONCLUSIONES

1. El objeto central del uso de las enzimas debe ser los sustratos que impiden una mejor digestibilidad.
2. Los PSNA tienen una importancia fundamental en la efectividad de las enzimas, fundamentalmente por los fenómenos de digestibilidad asociativa.
3. Las glucanasas-xilanasas con trigo o cebada y más universalmente, las fitasas son preparaciones enzimáticas efectivas y rentables si se sabe usar de ellas.
4. El uso de 500 a 750 U/kg de fitasa equivale a 0.1% de Ca o P disponibles. Quizá la mayor ventaja de las fitasas esté en la concomitante liberación de energía: de 40 a 100 kcal/kg, dependiendo de los ingredientes y del nivel de la enzima. Los efectos serán mayores cuando se combinan fitasa y enzimas fibrolíticas efectivas.

5. Se requiere de mucho trabajo de investigación para aclarar los puntos críticos de aprovechamiento de las enzimas. Sobre todo, con relación a los PSNA.
6. Existen métodos efectivos para constatar y comparar los efectos de las enzimas, pero exigen un sólido diseño y rigurosa contrastación. Quizá no estén al alcance del trabajo habitual en producción, pero tampoco son una necesidad rutinaria.

LITERATURA

Aguilera, J.F.; Molina, E.; Prieto, C. 1985. Digestibility and energy value of sweet lupin seed (*Lupinus albus* var. *multolypa*) in pigs. *Animal Feed Science and Technology*, 12, 171–178.

Annison, G. 1991. The chemistry of dietary fibre. *In* Sammon, S.; Annison, G., ed., *Chemistry and nutritional effects of dietary fibre. Workshop Proceedings*, 7–8 Dec, Canberra, Australia. pp. 1–6.

Augspurger, N.R.; Baker, D.H. 2004. High dietary phytase levels maximize phytate phosphorus utilization but not affect protein utilization of chicks fed phosphorous- or amino acids deficient diets. *Journal of Animal Science*, 82, 1100-1107.

Augspurger, N.R.; Spencer, J.D.; Webel, D.M.; Baker, D.H. 2004. Pharmacological zinc levels reduce the phosphorus-releasing efficacy of phytase in young pigs and chicks. *Journal of Animal Science*, 82, 1732-1739.

ARC (Agricultural Research Council). 1981. The nutrient requirements of pigs. *In* Technical review by an Agricultural Research Council working party. Commonwealth Agricultural Bureau, Slough, UK. pp. 67–124.

Baker, D.H.; Chung, T.K. 1992. Ideal protein for swine and poultry. *Biokyowa Technical Review*, 4.

Bedford, M.R. 1995. Mechanism of action and potential environmental benefits from the use of feed enzymes. *Animal Feed Science and Technology*, 53, 145–155.

Bedford, M.R.; Patience, J.F.; Classen, H.L.; Inborr, J. 1992. The effect of dietary supplementation of rye- and barley-based diets on digestion and subsequent performance in weaning pigs. *Canadian Journal of Animal Science*, 72, 97–105.

Campbell, G.A.; Bedford, M.R. 1992. Enzyme application for monogastric feeds: a review. *Canadian Journal of Animal Science*, 72, 449–466.

Carre, B.; Brillouet, J.M.; Thibault, J.F. 1985. Characterization of polysaccharides from white lupin (*Lupinus albus* L.) cotyledons. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 33, 285–292.

Chesson, A. 1987. Supplementary enzymes to improve the utilization of pig and poultry diets. *In* Haresign, W.; Cole, D.J.A., ed., Recent advances in animal nutrition. Butterworths, London, UK. pp. 71–89.

Christensen, F.M. 1989. Enzyme technology vs engineering technology in the food industry. *Biotechnology and Applied Biochemistry*, 11, 249–265.

Cos, R.; Esteve-Garcia, E.; Brufau, J. 1993. Effect of α -glucanase in barley based diets and xylanase in wheat based diets for weaning piglets. *In* Wenk, C.; Boessinger, M., ed., Enzymes in animal nutrition. Kartause Ittingen, Thurgau, Switzerland. pp. 129–132.

Cromwell, G.L.; Stably, T.S.; Coffey, R.D.; Monegue, H.J.; Randolph, J.H. 1993. Efficacy of phytase in improving the bioavailability of phosphorus in soybean meal and corn-soybean meal diets for pigs. *Journal of Animal Science*, 71, 1831–1840.

Dale, N. 2003. β -mannans: an anti-production factor in feed ingredients. XI Congreso Nacional de la AMENA y I Congreso Latinoamericano de Nutrición Animal, Cancún, Q. Roo, México, 179-180.

Dierick, N.; Decuyper, J. 1996. Mode of action of exogenous enzymes in growing pig nutrition. *Pig News and Information*, 17(2), 41–48.

Fimbres, A.O.; Cervantes, L.J.; Araiza, S.A. 2003. Efecto de fitasas y glucanasas-xilanasas sobre el desempeño productivo de cerdos en crecimiento alimentados con dietas trigo-pasta de soya. XI Congreso Nacional de la AMENA y I Congreso Latinoamericano de Nutrición Animal, Cancún, Q. Roo, México, 337-338.

García, B.G.; Balderas O.M.; Mariscal, L.G.; Cuarón, I.J.A. 2003. Digestibilidad fecal aparente de nutrientes en cerdos alimentados con dietas adicionadas con fitasas. XI Congreso Nacional de la AMENA y I Congreso Latinoamericano de Nutrición Animal, Cancún, Q. Roo, México, 339-340.

Graham, H.; Fadel, J.G.; Newman, C.W.; Newman, R.K. 1989. Effect of pelleting and α -glucanase supplementation on the ileal and fecal digestibility of a barley-based diet in the pig. *Journal of Animal Science*, 67, 1293–1298.

Graham, H.; Löwgren, W.; Pettersson, D.; Åman, P. 1988. Effect of enzyme supplementation on digestion of a barley/pollard-based pig diet. *Nutrition Reports International*, 38, 1073.

Harper, A.F.; Kornegay, E.T.; Schell, T.C. 1997. Phytase supplementation of low-phosphorus growing-finishing pig diets improves performance, phosphorus digestibility, and bone mineralization and reduces phosphorus excretion. *Journal of Animal Science*, 75, 3174-3186.

Inbarr, J.; Bedford, M.R. 1993. Stability of feed enzymes to steam pelleting during feed processing. *Animal Feed Science and Technology*, 46, 179–196.

Inbarr, J.; Schmitz, M.; Aherne, F. 1993. Effect of adding fibre and starch degrading enzymes to a barley/wheat based diet on performance and nutrient digestibility in different segments of the small intestine of early weaned pigs. *Animal Feed Science and Technology*, 44, 113–127.

IUPAC–IUB (International Union of Pure and Applied Chemists – International Union of Biochemists). 1976. Enzyme nomenclature, corrections and additions. *Biochim. Biophys. Acta*, 429, 1–45.

Johnson, R.; Williams, P.; Campbell, R. 1993. Use of enzymes in pig production. *In* Wenk, C.; Boessinger, M., ed., *Enzymes in animal nutrition*. Kartause Ittingen, Thurgau, Switzerland. pp. 49–60.

Jongbloed, A.W.; Kemme, P.A. 1990. Effect of pelleting mixed feeds on phytase activity and the apparent absorbability of phosphorus and calcium in pigs. *Animal Feed Science and Technology*, 28, 233–242.

Jongbloed, A.W.; Mroz, Z.; Kemme, P.A. 1992. The effect of supplementary *Aspergillus niger* phytase in diets for pigs on concentration and apparent digestibility of dry matter, total phosphorus and phytic acid in different sections of the alimentary tract. *Journal of Animal Science*, 70, 1159–1168.

Kim, S.W.; Knabe, D.A.; Hong, K.J.; Easter, R.A. 2003. Use of carbohydrases in corn-soybean meal-based nursery diets. *Journal of Animal Science*, 81, 2496–2504.

Laar, van, H.; Tamminga, S.; Williams, B.A.; Verstegen, M.W.A. 2000. Fermentation of the endosperm cell walls of monocotyledon and dicotyledon plant species by faecal microbes from pigs. The relationship between cell wall characteristics and fermentability. *Animal Feed Science and Technology*, 88, 13–30.

López, A.; Cervantes, L.J.; Araiza, S.A. 2003. Efecto de pectinasas-glucanasas en dietas trigo-pasta de soya adicionadas con fitasas y xilanasas sobre el desempeño productivo de cerdos en finalización. XI Congreso Nacional de la AMENA y I Congreso Latinoamericano de Nutrición Animal, Cancún, Q. Roo, México, 343–344.

Lindeman, M.D.; Cornelius, S.G.; Kandelgy, S.M.; Moser, R.L.; Pettigrew, J.E. 1986. Effect of age, weaning and diet on digestive enzyme levels in the piglet. *Journal of Animal Science*, 62, 1298–1307.

Mroz, Z.; Jongbloed, A.W.; Kemme, P.A. 1994. Apparent digestibility and retention of nutrients bound to phytate complexes as influenced by microbial phytase and feeding regimen in pigs. *Journal of Animal Science*, 72, 126–132.

Mroz, Z.; Moeser, A.J.; Vreman, K.; van Diepen, J.T.M.; van Kempen, T.; Canh, T.T.; Jongbloed, A.W. 2000. Effects of dietary carbohydrates and buffering capacity on nutrient digestibility and manure characteristics in finishing pigs. *Journal of Animal Science*, 78, 3096–3106.

NRC. 1998. Nutrient Requirements of Swine, 9th Rev. Ed. National Research Council, National Academy Press, Washington, D.C.

Officer, D.I. 1995. Effect of multi-enzyme supplements on the growth performance of piglets during the pre- and post-weaning periods. *Animal Feed Science and Technology*, 55, 55–65.

Sands, J.S.; Ragland, D.; Baxter, C.; Joern, B.C.; Sauber, T.E.; Adeola, O. 2001. Phosphorous bioavailability, growth performance, and nutrient balance in pigs fed high available phosphorus corn and phytase. *Journal of Animal Science*, 79, 2134-2142.

Simons, P.C.M.; Versteegh, H.A.J.; Jongbloed, A.W.; Kemme, P.A.; Slump, P.; Bos, K.D.; Wolters, M.G.E.; Beudeker, R.F.; Verschoor, G.J. 1990. Improvement of phosphorus availability by microbial phytase in broilers and pigs. *British Journal of Nutrition*, 64, 525–540.

Soria, A.I.; Merino, B.; Urbano, C.; Ramírez, E.; Mariscal, G.; Cuarón, J.A. 2003. Digestibilidad de dietas sorgo-canola para cerdos: fitasas y enzimas fibrolíticas. XI Congreso Nacional de la AMENA y I Congreso Latinoamericano de Nutrición Animal, Cancún, Q. Roo, México, 341-342.

Stahl, C.H.; Roneker, K.R.; Pond, W.G.; Lei, X.G. 2004. Effects of combining three fungal phytases with a bacterial phytase on plasma phosphorous status of weanling pigs fed a corn-soy diet. 2004. *Journal of Animal Science*, 82, 1725-1731.

Suga, Y.; Kawai, M.; Noguchi, S.; Shimara, G.; Samejima, H. 1978. Application of cellulolytic and plant tissue macerating enzyme of *Irpex lacteus* Fr. as feed additive enzyme. *Agricultural Biology and Chemistry*, 42, 347–350.

Svihus, B.; Edvardse, D.H.; Bedford, M.R.; Gullord, M. 2000. Effect of methods of analysis and heat treatment on viscosity of wheat, barley and oats. *Animal Feed Science and Technology*, 88, 1-12.

Tangendjaja, B.; Johnson, Z.B.; Noland, P.R. 1988. Effect of cooking and addition of enzymes on feeding value of rice bran for swine. *Nutrition Reports International*, 37(6), 449–458.

Taverner, M.R.; Campbell, R.G. 1988. The effects of protected dietary enzymes on nutrient absorption in pigs. In Buraczewska, L.; Buraczewski, S.; Pastuszewska, B.; Zebrowska, T., ed., *Proceedings, 4th International Seminar on Digestive Physiology in the Pig*. Polish Academy of Science, Jablonna, Warsaw, Poland. p. 337.

Thacker, P.A.; Bell, J.M.; Classen, H.L.; Campbell, G.L.; Rossnagel, B.G. 1988. The nutritive value of hullless barley for swine. *Animal Feed Science and Technology*, 19, 191–196.

Thacker, P.A.; Campbell, G.L.; Groolwassink, J.W.D. 1992. Effect of salinomycin and enzyme supplementation on nutrient digestibility and the performance of pigs fed barley- or rye-based diets. *Canadian Journal of Animal Science*, 72, 117–125.

Thomke, S.; Rundgren, M.; Hesselman, K. 1980. The effect of feeding high viscosity barley for pigs. *European Association for Animal Production*, 31, 1–5.

Von Sheuermann, S.E.; Lantzo, H.J.; Marke, K.H. 1988. *In vitro* and *in vivo* experiments on the hydrolysis of phytate. Activity of plant phytase. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*, 60, 64–7