

**Aspectos históricos, estado actual y futuro de las enzimas en alimentación de cerdos:  
Una revisión sistemática**

Yeisson Alejandro Varón Lopez

Universidad Cooperativa de Colombia

Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia

Ibagué – Tolima

2021



**Aspectos históricos, estado actual y futuro de las enzimas en alimentación de cerdos:  
Una revisión sistemática.**

Trabajo de grado para optar por el título de Médico Veterinario Zootecnista  
Modalidad Revisión Sistemática de Literatura

Yeisson Alejandro Varón Lopez

Código 374158

María del Rocío Pérez Rubio

Asesora

Universidad Cooperativa de Colombia

Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia

Ibagué – Tolima

2021



## Tabla de contenido

<b>Agradecimientos</b> .....	7
<b>Resumen</b> .....	8
<b>Abstract</b> .....	9
<b>1. Introducción</b> .....	10
<b>2. Justificación</b> .....	12
<b>3. Objetivos</b> .....	14
<b>3.1 Objetivo General</b> .....	14
<b>3.2 Objetivo específico</b> .....	14
<b>4. Metodología</b> .....	15
<b>5. Resultados encontrados en el uso de enzimas exógenas en la alimentación de cerdos.</b> 16	
<b>5.1 Aspectos históricos</b> .....	16
<b>5.2 Carbohidrasas</b> .....	20
<b>5.2.1 Amilasas:</b> .....	20
<b>5.2.2 PNA'sas:</b> .....	22
<b>5.3 Fitasas</b> .....	32
<b>5.4 Proteasas</b> .....	35
<b>5.5 Lipasas</b> .....	37
<b>6 Conclusiones</b> .....	40
<b>Referencias Bibliográficas</b> .....	42

## Lista de tablas

<b>Tabla 1.</b> Enzimas comerciales en alimentación animal y sustrato objetivo, .....	19
<b>Tabla 2.</b> Clasificación de enzimas despolimerizadoras de polisacáridos no amiláceos de uso común en dietas para animales. ....	24



## Lista de figuras

<b>Figura 1.</b> Clasificación de Polisacáridos no Amiláceos.....	22
<b>Figura 2.</b> Beneficios de la suplementación de fitasas en dietas de cerdos .....	34



## Dedicatoria

Dedico este trabajo a mi familia y a mis profesores que fueron los que me guiaron por este largo camino. A la vida y a mi dios por darme la oportunidad de compartir mis conocimientos.



## Agradecimientos

Agradezco a la profesora Maria del Rocio Perez por el apoyo y el tiempo dedicado en mi trabajo de grado a mis padres por la confianza y los recursos prestados.



## Resumen

Debido a los efectos lesivos de la producción animal sobre el medio ambiente, en la actualidad, el interés es identificar alternativas que permitan aumentar la sostenibilidad ambiental y a su vez logren obtener una rentabilidad económica, siendo una de estas alternativas el uso de las enzimas en la nutrición de los cerdos. Además, otro enfoque de aplicación de las enzimas en la producción porcina es el mejorar la eficiencia alimenticia al optimizar la digestibilidad de los nutrientes, e incluso permitir una disminución de los requerimientos nutricionales en la dieta, optimizando las materias primas y a su vez mitigando el impacto ambiental, siendo el caso de las proteasas y las fitasas, las cuales mejoran la digestibilidad y absorción de las proteínas y de algunos minerales. La presente revisión tiene como objetivo identificar la evolución de la aplicación de las enzimas en la alimentación de los cerdos, su efecto sobre el medio ambiente, y rendimiento productivo, así como perspectivas futuras de aplicación. En conclusión, se identificó los principales focos de aplicación de las enzimas en la nutrición de cerdos, siendo la disminución de los requerimientos nutricionales (proteína) y minerales (calcio, fosforo, magnesio y zinc) los enfoques que priman. En un principio se consideró con un gran potencial la implementación de estos catalizadores en dietas compuestas por materias primas no convencionales o poco implementadas según la región de producción (cebada, sorgo, trigo), sin embargo en la actualidad, incluso en dietas compuesta por las principales fuentes de alimento, maíz y soya se justifica su aplicación, optimizando sus nutrientes y mitigando sus factores antinutricionales, de importancia en la actualidad por la tendencia al alza del precio de estas materias primas.





**Palabras clave:** Enzima, carbohidrasas, PNA'sas, fitasas, lipasas, proteasas

### **Abstract**

Due to the harmful effects of animal production for the environment, currently, interest is directed to identify alternatives that allow increasing environmental sustainability and also obtaining economic profitability, one of these alternatives is the use of enzymes in the nutrition of pigs. In addition to this, the other approach to the application of enzymes in pig production is to improve feed efficiency by optimizing the digestibility of nutrients, also allowing a decrease in nutritional requirements in the diet, optimizing raw materials and mitigating the environmental impact. Such is the case of proteases and phytases that improve the digestibility and absorption of proteins and some minerals. The objective of this review is to identify the evolution of the application of enzymes in pig feed, the effect it has on the environment and productive performance, as well as future prospects for its application. In conclusion, the main sources of application of enzymes in pig nutrition were identified, with the reduction of nutritional requirements (protein) and minerals (calcium, phosphorus, magnesium and zinc) being the main approaches. At the beginning, the implementation of these catalysts in diets made with unconventional raw materials or little implemented according to the production region (barley, sorghum, wheat) was considered with great potential, however at present, even in diets composed of the main sources of food, corn and soybeans, their application is justified, optimizing their nutrients and mitigating their



antinutritional factors, which are important today due to the upward trend in the price of these raw materials.

**Keywords:** Enzyme, carbohydrases, NSPases, phytases, lipases, proteases

## 1. Introducción

Las enzimas corresponden a moléculas proteicas que se encargan de aumentar la velocidad de las reacciones químicas dentro de los organismos vivos, denominada acción catalítica (1). Su uso se ha destacado en diferentes industrias, abarcando desde la alimentación humana y el procesamiento del cuero, hasta la obtención de biocombustibles (2), (3), (4). Dado los altos costos de alimentación en la producción animal (5), (6) y, el impacto de los desechos de nutrientes no digeridos de manera adecuada por parte de los animales sobre el medio ambiente, las enzimas se contemplan en la actualidad como una herramienta que permita tornar la alimentación animal en un proceso de mayor eficiencia (7).

La suplementación de enzimas exógenas específicas dentro de las raciones alimenticias de los animales permite optimizar el valor nutricional, así como degradar factores antinutricionales presentes en materias primas, y en general, se les atribuye la función de aumentar la eficiencia digestiva (8). Los altos costos de la alimentación en la porcicultura es un tema que afecta a poricultores a nivel nacional e internacional, llegando a representar hasta el 80% de los costes productivos (9). El enfoque de la aplicación en dietas para monogástricos va desde el provecho de

materias primas fibrosas mejorando su digestibilidad (10), hasta la optimización nutricional de materias primas estándares de referencia, como es el caso del maíz y la soya (11), (12).

Universalmente las enzimas de mayor uso en la alimentación animal corresponden a enzimas degradantes de polisacáridos no amiláceos “PNA’sas” y fitasas en mayor proporción, sin embargo, las amilasas y proteasas presentan un uso significativo en la industria de alimentos (13). A pesar de 40 años de estudio en el campo de la alimentación animal, los resultados obtenidos por el rendimiento de los animales suplementados con enzimas son inconclusos, y la comprensión de los mecanismos por los cuales las enzimas realizan su actividad y poseen efecto sobre los animales, especialmente las PNA’sas no han manifestado resultados concluyentes a pesar de su uso diseminado en la industria de balanceados (13), sin embargo, se ratifica claramente que presentan efectos sobre el bienestar animal, el medio ambiente, la eficiencia productiva y la economía de los productores (8).



## 2. Justificación

A la actividad productiva de la cría de animales durante varios años e incluso décadas, se le ha atribuido efectos adversos sobre el medio ambiente en función de la escala productiva y el manejo inadecuado de los desechos, a los cuales las autoridades nacionales e internacionales en algunos países han instaurado control mediante legislaciones. Producto de estas legislaciones y la concientización sobre su efecto al medio ambiente, se han propuesto y desarrollado una serie de diversas soluciones que permiten mitigar su efecto sobre el medio ambiente (20), (21).

La principal y una de las más importantes soluciones durante varios años ha sido, la manipulación o el manejo adecuado de las dietas en los animales, principalmente en la cría de animales monogástricos. La implementación de una eficiente nutrición de los animales ha permitido optimizar la digestión y de esa forma, mitigar el efecto de las excretas que contaminan el ambiente. Dentro de estas estrategias, las enzimas permiten hacer más eficiente el proceso de alimentación animal y a su vez mitigar el efecto de los nutrientes mal digeridos que se degradan en el medio ambiente, haciendo de la nutrición un proceso con mayor eficacia (7)

Debido al panorama descrito, se hace necesario realizar una revisión de la información disponible que, permita identificar la evolución sobre una línea de tiempo en la aplicación de enzimas en la alimentación animal, enfatizada en los cerdos, su efecto sobre el medio ambiente y el rendimiento productivo, que permita alcanzar un panorama para identificar posibles puntos de mejora en su implementación en la alimentación porcina.

Este obra está bajo una [licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).



### 3. Objetivos

#### 3.1 Objetivo General

Determinar los antecedentes históricos del uso de enzimas exógenas en la alimentación de porcinos, definiendo su utilidad en función de su actividad.

#### 3.2 Objetivo específico

**3.2 1.** Establecer una línea de tiempo y las motivaciones del uso de enzimas exógenas en la alimentación de cerdos

**3.2.2.** Establecer el tipo de enzimas exógenas empleadas en la alimentación de cerdos y su aplicación.

## 4. Metodología

Se realizó una revisión de literatura en las bases de datos de Scopus y Dialnet implementando los siguientes caracteres de búsqueda, enzimas exógenas en alimentación de cerdos; además de búsquedas por la actividad específica de cada uno de los grupos de enzimas, carbohidrasas, fitasas, lipasas y proteasas exógenas.

Los criterios de selección se basaron en la importancia histórica no limitando un rango de fecha y su relevancia e innovación en la alimentación porcina, así como título, objetivos de los trabajos publicados hasta el momento y enfoque de aplicación, desarrollando la compilación bajo el método cualitativo.

En el caso particular de la implementación de lipasa en cerdos, se requirió la búsqueda en una tercera base de datos, National Library of Medicine, debido a los resultados insuficientes provenientes de las bases de datos implementadas para la búsqueda preliminar.

Con la presente revisión de literatura se realiza un acercamiento al estado del uso de enzimas en la alimentación de los cerdos, evidenciando su potencial y perspectivas futuras de aplicación.



## 5. Resultados encontrados en el uso de enzimas exógenas en la alimentación de cerdos.

### 5.1 Aspectos históricos

Los datos históricos de la implementación de enzimas exógenas en dietas para monogástricos fueron fuertemente desarrollados en aves de corral con el fin de reducir la viscosidad de la digesta, siendo poco los reportes en la alimentación de cerdos. El primer reporte de aplicación de enzimas en dietas para animales monogástricos data del año 1926, Clickner et al. (14) suplementaron en la dieta enzimas con actividad amilolítica y proteolítica procedente del *Aspergillus oryzae* en aves, quienes obtuvieron un mejor rendimiento productivo de los individuos. No fue hasta 1991 que se realizó uno de los primeros trabajos reportados e implementados en cerdos, Thacker et al. (15) implementaron enzimas con actividad pentosanasa en cerdos alimentados en base a harina de centeno, quienes observaron que los cerdos presentaron una mejora en el coeficiente de digestibilidad del sustrato, aunque sin efectos sobresalientes en el rendimiento de los animales.

En 1996 Thacker et al. (16) estudiaron el efecto del pH gástrico sobre la pentosanasa, un factor clave para su implementación en los cerdos, debido a que el pH bajo en el estómago posiblemente limitaría su acción durante el pasaje gástrico y pre gástrico, conduciendo incluso a una desnaturalización de la enzima. En conclusión, el autor demuestra que la enzima implementada presentó una actividad en el intestino delgado, aun tras el pasaje gástrico; sin embargo, concluye que el pH es un factor determinante y perjudicial para la óptima actividad



de la pentosanasa; en cuanto al rendimiento de los animales, estos últimos no mostraron diferencias estadísticas, aunque el autor la propone como una alternativa con potencial en la nutrición de cerdos.

En 1998, se publica uno de los primeros documentos que recopila una serie de trabajos realizados en la alimentación de animales monogástricos, suplementados con enzimas exógenas y, en donde se discuten sus mecanismo de acción; además, destaca aspectos que a un se discrepan en la actualidad y que intervienen sobre el efecto y la actividad enzimática, como son la fuente de la enzima, el sustrato sobre el que actúa, la interacción con otros ingredientes dietéticos y las condiciones de producción de la enzima (17).

Desde ese entonces (1998), el autor contempla el potencial uso de las enzimas en la alimentación animal, destacando los beneficios de su aplicación, como son la destrucción de paredes celulares, aprovechamiento del fósforo fítico, mejora en la digestibilidad de las proteínas y beneficios para la microflora de los individuos, e incluso propone que, a futuro, la industria tratara la mayoría de los alimentos balanceados con enzimas exógenas (17).

En la actualidad estos compuestos se constituyen en un foco importante de estudio y aplicabilidad, para hacer más eficiente la alimentación animal, incluso, se contempla como una herramienta para la reducción de diarreas en lechones, con impactos significativos sobre la salud de los animales (18); sin embargo, se cuestionan algunos aspectos de evaluación en los que se medía el efecto benéfico de la actividad enzimática sobre los animales, dejando de utilizarse la digestibilidad de los nutrientes como una medida de eficacia, pasando a ser una

cuestión informativa, siendo necesario contemplar aspectos como el rendimiento, el crecimiento, la ingesta y el rendimiento de la canal, como factores para valorar la eficiencia de estos biocatalizadores de una manera holística (19).

Actualmente, otro aspecto en el que se inculca la aplicación de las enzimas es la reducción del impacto ambiental, siendo uno de los motores para el desarrollo de una de las enzimas más difundida actualmente, la fitasa, que aparece como resultado del aumento de la concentración del fosforo en la tierra, a consecuencia de la producción de animales monogástricos, conduciendo a la eutrofización de las fuentes hídricas. Hacia los años 90, esta situación en los Países Bajos, motivo a las autoridades al desarrollo de una legislación que contemplaba la reducción del 25-30% de la población animal para controlar dicha problemática; años más tarde, se inicia la difusión del uso de esta enzima, implementándose en países como Alemania y Estados Unidos (20). Además de la reducción del efecto del fosforo sobre el medio ambiente, la fitasa ofrece el beneficio de mejorar la digestibilidad de la proteína, al disminuir los complejos proteína-fitato en el tracto digestivo, mitigando la pérdida endógena de aminoácidos por el aumento de la secreción de enzimas digestivas a causa del efecto directo del fitato (21).

En la actualidad, además de la rebaja en la excreción de fosforo al medio ambiente, el segundo compuesto que se busca reducir en excreción es el nitrógeno, para lo cual se contempla nuevamente a las enzimas como herramienta para disminuir su efecto nocivo en el medio ambiente, garantizando a su vez un descenso de los costos, mediante interacciones dietéticas (22). Un recuento de las enzimas implementadas en la alimentación animal la observamos en

la tabla 1, en donde se sintetiza la enzima, el sustrato de acción y pienso o materia prima a la cual se dirige su uso.

**Tabla 1.** Enzimas comerciales en alimentación animal y sustrato objetivo,

<b>Enzima</b>	<b>Sustrato objetivo</b>	<b>Materia prima</b>
Fitasas	Ácido fítico	Ingredientes derivados de plantas
$\beta$ -Glucanasas	$\beta$ -glucano	Cebada, avena y centeno
Xilanasas	Arabinoxilano	Trigo, centeno, triticale, cebada, materias vegetales fibrosas
$\alpha$ -Galactosidasas	Oligosacáridos	Harina de soja, legumbres de grano
Proteasas	Proteínas	Fuentes de proteínas vegetales
Amilasa	Almidón	Granos de cereales y legumbres de grano
Lipasas	Lípidos	Lípidos en ingredientes de la ración
Mananasas, celulasas, hemicelulasas y pectinasas	Matriz de pared celular (componentes de fibra)	Ingredientes derivados de plantas, materiales vegetales fibrosos

**Fuente:** Tomado de Revindran (23). Feed enzymes: The science, practice, and metabolic realities; 2013.

## 5.2 Carbohidrasas

Este grupo de enzimas tienen como finalidad obtener monómeros u oligómeros mediante la hidrólisis de los enlaces químicos de la macromolécula, considerándose las enzimas del futuro, no solamente para la industria de la alimentación animal (24).

### 5.2.1 Amilasas:

Junto con la celulosa, el almidón se considera el biopolímero más abundante en la naturaleza (24). Estas enzimas recibieron su nombre debido a la capacidad que tienen para escindir o romper el enlace glucosídico en la cadena del almidón (8); a su vez se subdividen en exoamilasas y endoamilasas, las cuales actúan hidrolizando los extremos de la cadena del almidón y de forma aleatoria en el interior respectivamente, dando como resultado oligosacáridos o monosacáridos de glucosa, fructosa o galactosa; a su vez las  $\alpha$ -amilasas actúan dentro de la cadena del almidón y las  $\beta$ -amilasas actúan en los extremos liberando maltosa (24), (8).

En general, estas enzimas se consideran de fácil aplicación, gracias a disponibilidad y bajo precio, caso contrario al de las celulasas (24), (25); sin embargo, se considera y se ha demostrado que los cerdos presentan una buena producción de amilasa endógena, gracias a sus hábitos alimenticios en la naturaleza y cuestiones de evolución (24), requiriéndose su aplicación en condiciones particulares de producción (26), siendo su implementación en los cerdos de baja aplicación como única enzima aditiva en el alimento.

En un estudio reciente, desarrollado bajo la premisa de que, las condiciones de producción y manejo intensivo conducen a estrés y este, a su vez conlleva a alteraciones y disfunción del tracto gastrointestinal en cerdos jóvenes que, a su vez se refleja en afectaciones del crecimiento de los cerdos producidos en estas condiciones. Los autores establecieron un modelo de estudio porcino sobre el que realizaron ligadura del conducto pancreático en cerdos canulados, suministrando a los cerdos de enzimas pancreáticas exógenas en la ración, amilasa (30.000 unidades), lipasa (260.000 unidades) y proteasas (200.000), permitiendo una mejora de la digestibilidad de la grasa y proteína con actividades similares a la enzimas endógenas y con efecto significativo sobre el peso de los animales, considerándose estas enzimas exógenas microbianas como una medida para mitigar los efectos del estrés en el manejo de los cerdos en condiciones de producción intensiva (26).

Sin embargo, en contraste al estudio anterior, Cency et al. (27) implementaron amilasa (0,06%) junto con proteasa (0,12%) exógena en dietas para lechones en dos etapas diferentes de vida, esta suplementación no condujo a una diferencia o mejora sobre el coeficiente de digestibilidad en dietas a base de maíz.

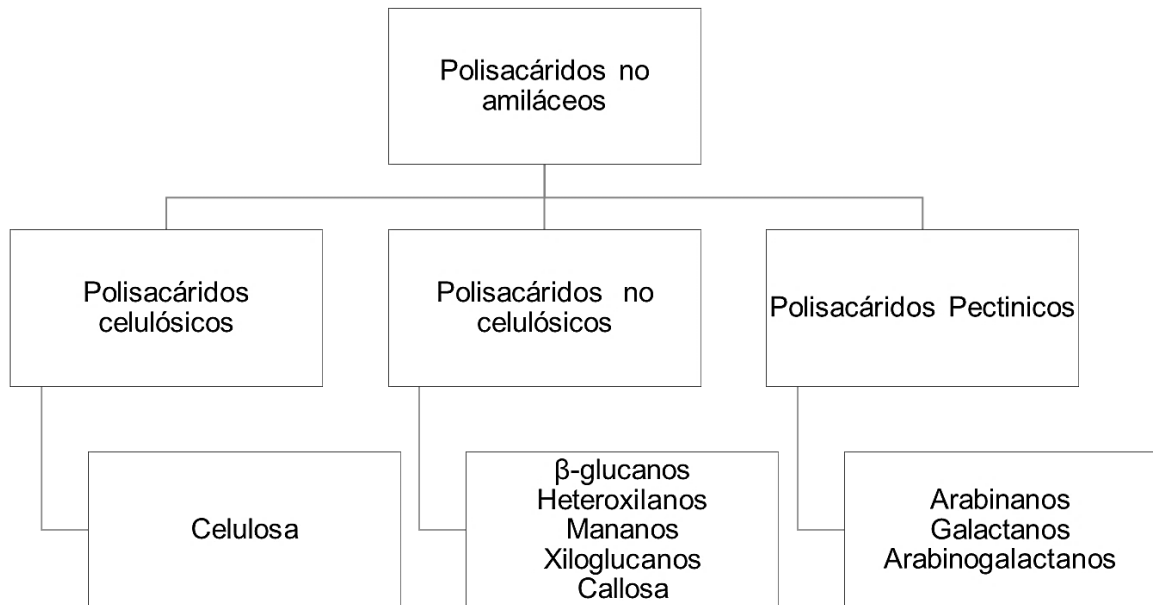
La aplicación de esta enzima junto con otras carbohidrasas ha demostrado en condiciones *in vitro* una mejora sobre la digestibilidad de la materia seca de maíz y trigo. En 2016, Ree et al. (28) observaron que la adición de un complejo de enzimas compuesta por  $\beta$ -pentosanasa (6.000 unidades),  $\beta$ -glucanasa (32.000 unidades),  $\alpha$ -amilasa (17.600 unidades) y proteasa (142 unidades) condujo a un aumento de la digestibilidad de la materia seca del maíz

en todo el tracto intestinal, aunque no se evidencio diferencia significativa sobre otros ingredientes alimenticios como el trigo, cebada y canola, entre otros.

### 5.2.2 PNA'sas:

La función principal de las enzimas PNA'sas es hidrolizar el complejo de polisacáridos no amiláceos presentes en fuentes de alimentos vegetales que los animales monogástricos son incapaces de hidrolizar mediante el sistema enzimático endógeno (29), sin embargo, se contempla además de la destrucción o hidrolisis de la pared celular, la reducción de la viscosidad intestinal y una acción prebiótica, a esta última se le ha atribuido poca importancia, pese a ser un efecto de gran relevancia para la nutrición animal en la actualidad (12).

**Figura 1.** Clasificación de Polisacáridos no Amiláceos



**Fuente:** Adaptado de Habte-Tsion et al. (30). Nonstarch polysaccharide enzymes - general aspects., Enzymes in Human and Animal Nutrition: Principles and Perspectives. Elsevier - Academic Press; 2018.

Los polisacáridos no amiláceos (PNA) más abundantes en las paredes celulares corresponden a celulosa, hemicelulosa y pectinas, siendo los fructanos, los glucomanos y galactomananos los de menor proporción, cuya función es ser polisacáridos de almacenamiento. Su clasificación suele ser diversa de acuerdo a varios factores y propiedades fisicoquímicas, sin embargo, una de las clasificaciones más claras corresponde a la subdivisión de polisacáridos celulósicos, comprendido exclusivamente por la celulosa y degradado por las celulasas, los polisacáridos no celulósicos comprendidos por  $\beta$ -glucanos, heteroxilanos, mananos, xiloglucanos y la callosa o calosa vegetal, degradados principalmente por xilanasas, glucanasas y mananasas; finalmente los polisacáridos pectínicos, comprendidos por los arabinanos, galactanos y arabinogalactanos degradados por pectinasas (30). Un resumen de las enzimas PNA'sas utilizadas en la alimentación animal la podemos contemplar en la tabla 2.



**Tabla 2.** Clasificación de enzimas despolimerizadoras de polisacáridos no amiláceos de uso común en dietas para animales.

<b>Enzima PNA</b>	<b>Categoría</b>	<b>Residuo monomérico</b>	<b>Enlace</b>	<b>Alimento</b>
Celulasa	Arabinoxilanos  Polímeros no celulósicos	Glucosa	$\beta$ -(1-4)	Cereales (cebada, maíz, trigo) y legumbres (haba de soja, semilla de algodón, colza / canola, lupino)
Xilanasas	Arabinoxilanos	Arabinosa y xilosa	Enlaces $\beta$ -(1-4)-unidos a xilosa	Cereales (cebada, maíz, trigo, avena, sorgo)
$\beta$ -glucanasa	$\beta$ -glucanos de enlaces mixtos	Glucosa	Enlaces $\beta$ -(1-3) y $\beta$ -(1.4)	Avena y cebada
$\beta$ -mananasa	Mananos	Manosa	Enlaces $\beta$ -(1.4)	Semilla de café
$\beta$ -mananasa	Galactomananos	Galactosa y mananos	Cadenas de manano de enlace $\beta$ -(1-4) con grupos laterales de galactosilo unidos a $\alpha$ -(1-6)	Goma de algarrobo y goma guar.
$\beta$ -mananasa	Glucomananos  polisacáridos pectínicos	Glucosa y mananos	Cadena de manano con enlaces $\beta$ -(1-4) con residuos de glucosa intercalados en la cadena principal	Pulpa de remolacha azucarera.
Pectinasa	Arabinanos	Arabinosa	$\alpha$ -(1-5)	Coproductos de cereales



Enzima PNA	Categoría	Residuo monomérico	Enlace	Alimento
Pectinasa	Galactanos	Galactosa	$\beta$ -(1-4)	Pulpa de remolacha azucarera
Pectinasa	Arabinogalactanos (tipo I)	Arabinosa y galactosa	$\beta$ -(1-4)	Granos de leguminosas (soya)
Pectinasa	Arabinogalactanos (tipo II)	Arabinosa y galactosa	$\beta$ -(1-3,6)	Canola/colza

**Fuente:** Tomado de Habte-Tsion y Kumar (30). Nonstarch polysaccharide enzymes - general aspects, *Enzymes in Human and Animal Nutrition: Principles and Perspectives*. Elsevier - Academic Press; 2018.

#### 5.2.2.1 Celulasas:

La celulosa se considera un recurso prometedor con un papel económico importante para el futuro, compuesta por monómeros de glucosa y unido por cadenas de enlaces  $\beta$ -1,4, liberándose la celobiosa y glucosa por acción de las enzimas específicas sobre este sustrato (25). Su implementación en la alimentación animal ha sido discutida, evidenciando con su uso beneficios para el rendimiento productivo y en otros casos estando ausente este efecto benéfico; además, se discute que el sistema gastrointestinal y sus condiciones conducen a un bajo rendimiento de esta enzima (30).

Para las celulasas podemos encontrar una subdivisión o subclasificación, las exoglucanasas y endoglucanasas, la primera realiza la escisión de los enlaces extremos, efectuando la reducción o no del extremo reductor de la cadena dando como producto celobiosa o glucosa y la segunda, se encarga de efectuar escisiones de los enlaces de la celulosa de manera aleatoria (8).

Al igual que con la aplicación de la amilasa, los reportes de la aplicación de celulasas como única fuente de enzima son pocos, y los resultados encontrados durante la revisión corresponden generalmente a la aplicación de un complejo enzimático. Long et al. (31) concluyeron que la suplementación de celulasa en harina de colza condujo a un aumento significativo de las abundancias de grupos funcionales microbianos relacionados con la degradación de la fibra y la producción de ácidos grasos volátiles de cadena corta, efectos que no se manifestaron cuando se suplementaron las dietas con dos tipos de pectinasas comerciales con efectos mínimos sobre la comunidad microbiana del tracto gastrointestinal, y en general permitieron un aumento sobre la digestibilidad de esta materia prima.

Recientemente se evaluó el efecto de un complejo enzimático compuesto por celulasa, xilanasas y  $\beta$ -glucanasa sobre la digestibilidad de diferentes fuentes fibrosas. El estudio comprendió como fuentes fibrosas el salvado de maíz, la pulpa de remolacha y cascarilla de soja, y los tratamientos correspondieron con o sin la suplementación del complejo enzimático, con una tasa de aplicación de enzimas  $1 \times 10^4$  U/g de celulasa,  $1 \times 10^5$  U/g de xilanasas y  $1 \times 10^4$  U/g de  $\beta$ -glucanasa, siendo la fuente de enzimas el *Aspergillus niger*. Para el estudio se implementaron 36 cerdos con peso promedio de 41 kg con canulados en el íleo distal (32).

En conclusión los autores manifestaron que el complejo enzimático condujo a una mejora en la eficiencia en la utilización de la energía por parte de los animales y un efecto significativo sobre los aminoácidos; de igual forma, las enzimas condujeron a una mayor concentración de ácidos grasos volátiles de cadena corta en el intestino grueso de los animales, variando en proporción de acuerdo a la fuente de fibra insoluble, siendo la cascarilla de soja el

sustrato fibroso que condujo a mayores concentraciones tanto de acetato como de propionato, butirato y valerato (32).

La fuente de estas enzimas corresponde a fuentes microbianas las cuales conducen a respuestas benéficas por parte de los animales fisiológicamente hablando. Recientemente un estudio realizó la prospección de celulasa procedente de *Bacillus amyloliquefaciens* a partir de la microflora fecal de cerdos, la cual produce una celulasa ácida que podría considerarse como un recurso eficiente para el aprovechamiento de materias primas fibrosas en la alimentación de cerdos (33).

#### 5.2.2.2 Xilanasas

Estas enzimas tienen como objetivo y función degradar el xilano, un compuesto hemicelulósico de importancia en las paredes celulares de los cereales; estas enzimas se subclasifican en  $\beta$ -1-4-endoxilansa y  $\beta$ -xilosidasa, las  $\beta$ -1-4-endoxilasas y se encargan de hidrolizar los enlaces internos del xilano, dando como producto xilooligosacaridos; por otro lado, las  $\beta$ -xilosidasas actúa sobre los xilooligómeros dando como producto la xilosa (unidades monoméricas) (30).

Martínez-Aisouri et al. (34), evaluaron el efecto de suplementar xilanasas en dietas con alta proporción de salvado de trigo y dos niveles energéticos. En sus resultados manifestaron que la reducción de 75 kcal y la suplementación de enzima xilanasas permitió compensar este déficit, no obstante, la dieta con salvado de trigo suplementada con xilanasas condujo a una reducción de la ganancia de peso independiente del nivel de energía. Sin embargo, de acuerdo

con los resultados, los autores manifiestan que, en dietas con alta incorporación de salvado de trigo, la enzima reduciría los efectos adversos sobre la productividad de los animales.

Un estudio reciente elaborado por Lyu, et al. (35) evaluó el efecto de suplementar el salvado de avena y salvado de trigo con inclusión o no de xilanasa, identificando su impacto sobre la energía neta, la digestibilidad de los nutrientes y la actividad de la comunidad bacteriana. Un total de 60 cerdos fueron repartidos en las dietas experimentales, una dieta control, dos niveles de salvado de trigo y dos niveles de salvado de avena suplementadas con 5000 u/kg de enzima. En general los autores demostraron que las dietas fibrosas conducen al crecimiento de bacterias despolimerizadoras de fibra, con un impacto significativo sobre la comunidad bacteriana, dependiendo ésta de la fuente de sustrato fibroso, siendo el filo *Firmicutes* el de mayor abundancia en los cerdos alimentados con salvado de avena. En general la suplementación enzimática permitió una mejora sobre la digestibilidad de los nutrientes y, en cuanto a los valores energéticos, las dietas compuestas por salvado de trigo al 27% manifestaron únicamente una mejora sobre los valores de energía, aunque los valores no fueron significativos.

Un estudio mediante técnicas *in vitro*, evaluó el efecto de diferentes xilanasas sobre la degradación de los arabinosidos y la liberación de arabinosa, empleando contenido estomacal como fuente de inóculo y su efecto sobre la capacidad de actividad de las fuentes de enzimas; en conclusión, los autores manifestaron que las condiciones ácidas del estómago no alteraban la actividad enzimática, siendo este un método para realizar la preselección de enzimas con potencial para la industria de la alimentación de monogástricos (36).

### 5.2.2.3 $\beta$ -glucanasa

Los  $\beta$ -glucanos corresponden a polisacáridos compuestos por moléculas de glucosa de cadenas largas y de difícil digestión, su principal efecto adverso es el aumento de la viscosidad en dietas compuestas principalmente por cebada, trigo y centeno, conduciendo a una reducción de la peristalsis y disminución de la disponibilidad de nutrientes (8). Estas enzimas se encargan de hidrolizar los enlaces  $\beta$ -1,4 o 1,3 en glucanos mixtos, permitiendo alterar la integridad de la pared celular endospermica, además, en la digestión de los cereales suplementados con la enzima  $\beta$ -glucanasa hay una optimización de la liberación de proteína y permite obtener energía de mayor calidad; en general, se concluye que su efecto en la ración se manifiesta con la revitalización de la peristalsis del tracto gastro intestinal al disminuir la viscosidad del contenido intestinal y aumentar el valor nutricional de las dietas constituidas principalmente por estos cereales (8).

Kiarie, et al. (37) manifestaron que la adición de  $\beta$ -glucanasa y xilanasas en dietas cuyos componentes incluían subproductos de granos con deficiencia energética mejoraban en los cerdos la eficiencia energética hasta cierto punto, dependiendo de la etapa de crecimiento de los animales. Sin embargo, la suplementación con estas enzimas no condujo a un mejor rendimiento de los animales independientemente del sexo.

Recientemente un estudio desarrollado por Trindade et al. (38) evidenció que la suplementación con un complejo enzimático de carbohidrasas comprendido por  $\alpha$ -galactosidasa, (700 unidades) galactomanasa (2.200 unidades), xilanasas (3.000 unidades),  $\beta$ -glucanasa (22.000 unidades) por kilogramo y suplementación con fitasa (500 unidades por

kilogramo) en dietas con salvado de arroz, aumentó la digestibilidad de nutrientes y energía en cerdos jóvenes, con repercusiones positivas sinérgicas sobre la energía al adicionar en las dietas fibrosas la enzima fitasa.

Por otro lado Li, et al., (39) demostraron que la adición de un complejo enzimático compuesto por  $\beta$ -glucanasa, xilanasa y pectinasa en dietas con fuentes de fibra soluble e insoluble en 60 cerdos desafiados con *Echerichia coli* enterotoxigénica F18, permitió una mejora en el rendimiento de cerdos siempre y cuando el desafío sanitario fuese moderado, otro aspecto destacable en la investigación, es que la fuente de fibra más la adición del complejo enzimático permitió una disminución de la respuesta inflamatoria en dietas compuestas por fibra insoluble, respuesta que no se obtuvo o se manifestó cuando la fuentes de fibra soluble, identificándose este efecto con la disminución de la expresión de la proteína C reactiva.

#### 5.2.2.5 Pectinasa

Las pectinas corresponden a un grupo diverso de glucanos representado por galactanos, arabinogalactanos, galacturonanos, arabinogalactanos y ranmogalacturonanos I y II. Estos compuestos realizan la reticulación de la celulosa y la hemicelulosa brindando resistencia a la estructura vegetal. Las enzimas despolimerizadoras de estos enlaces permiten mejorar el acceso de las celulasas al sustrato diana (30).

Un trabajo reciente desarrollado por Long et al. (40) evaluó el efecto de enzimas sobre la fermentación de la fibra y su impacto sobre la comunidad microbiana en el intestino grueso, dentro de las enzimas implementadas se administraron dos pectinasas, cuyo sustrato estaba

constituido por harina de colza. Los autores destacan que las pectinasas, al igual que la otra enzima implementada en el estudio (celulasa) aumentaron la degradabilidad de la fibra presente en la harina sustrato, de igual forma aumentaron la capacidad de producción de ácidos grasos volátiles de cadena corta. En cuanto a la modulación del microbioma, los autores evidenciaron que las enzimas mostraron un efecto poco significativo, sin embargo, se destacó los géneros *Ruminococcaceae*, *Bifidobacterium* y *Christensenellaceae*, entre otros.

En 2015, Jakobsen et al. (41) evaluaron el efecto de la adición de un complejo enzimático compuesto por  $\beta$ -glucanasa, xilanasa y pectinasa y la fermentación de la dieta sobre la digestibilidad de los polisacáridos no amiláceos, la proteína cruda y fósforo. Las dietas evaluadas incluían una dieta líquida no fermentada basada en harina de trigo, cebada y soja como dieta control, una segunda dieta líquida fermentada compuesta por maíz, torta de colza y guisantes a la que se le añadió o no el complejo enzimático. Los autores manifestaron que el proceso de fermentación permitió una reducción del fosforo fítico; por otro lado, la adición de las enzimas permitió un aumento en la digestibilidad de los polisacáridos no amiláceos, así como una mejora en la eficiencia energética. En cuanto al efecto sobre la población microbiana, la fermentación permitió una reducción de las enterobacterias en el íleo y con respecto al efecto de la adición de las enzimas a la dieta fermentada, esta permitió niveles significativamente más bajos de bacterias ácido lácticas en el íleo.

Con respecto a la adición de un complejo enzimático a dietas bajas en energía, 75 kcal/kg y aminoácidos 3%, que se incluían 6.000 unidades de pectinasa por kilogramo de una dieta constituida por maíz, granos secos de destilería con solubles y harina de maíz y soja,

permitió un aumento sobre la digestibilidad de los polisacáridos no amiláceos, así como de los aminoácidos, energía y fósforo, y por lo tanto se contempla como una herramienta que permita disminuir los requerimientos de nutrientes en las dietas para animales (42), siendo de interés en la actualidad al disminuir los nutrientes mal digeridos depositados al medio ambiente que son fuente de contaminación.

### **5.3 Fitasas**

El ácido fítico corresponde a un compuesto vegetal que funciona como una forma de almacenamiento del fósforo y se comporta como un factor anti-nutricional, al disminuir la absorción de nutrientes como la proteína, minerales y aminoácidos específicos, así como de inhibir enzimas endógenas como la tripsina (43).

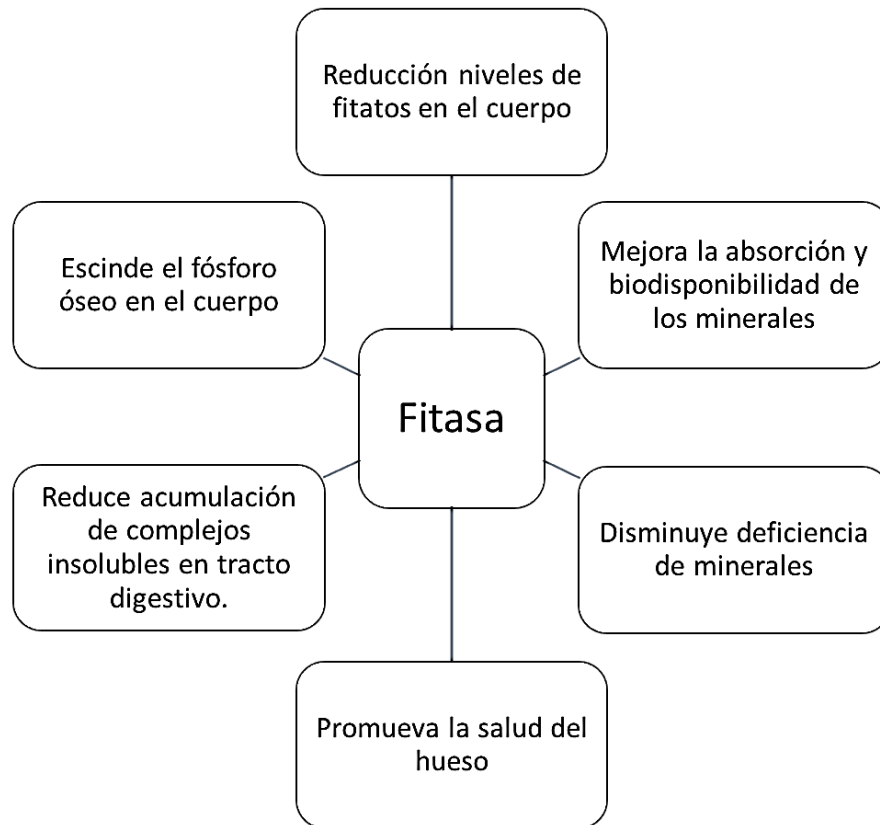
La fitasa es una enzima cuya función es hidrolizar el ácido fítico en las materias primas vegetales, reduciendo así los efectos inhibitorios en el sistema gastrointestinal y mejorando el desempeño de los animales, sin embargo, es un enzima sensible a los niveles excesivos de calcio, fósforo y zinc dentro de la dieta, factor que conduce a la reducción de su actividad (43). El efecto de suplementar esta enzima conduce a una serie de efectos benéficos, entre los que se destacan principalmente la mejora sobre la absorción y biodisponibilidad del fósforo y mejora en la salud del hueso, de igual forma, otros de sus efectos benéficos son la reducción de complejos, como el complejo proteína-fitato y minerales-fitato, los cuales disminuyen la digestibilidad de los nutrientes (43), (44). Ver Figura 2.



Recientemente Batson, et al. (45) investigaron el efecto de dosis crecientes de fitasa (0, 1.000 y 3.000 unidades/kg) sobre la duración del parto y rendimiento de la cerda y su camada, para el que se utilizaron 109 cerdas con aproximadamente 107 días de gestación alimentadas con dietas basadas en maíz y soya y tres niveles de fitasas. Los autores manifestaron que la enzima no influyo sobre el número de cerdos nacidos, así como variables a la edad destete de los cerdos, el peso y número de cerdos destetados por hembra, sin embargo, se destaca una supervivencia mayor conforme se aumenta lo dosis de fitasa; en conclusión, de acuerdo a los resultados manifestados por los autores, el principal efecto de la dosis creciente en cerdas gestantes estuvo sobre la ingesta de alimento, aumentándose linealmente conforme se suministraba la enzima.



**Figura 2.** Beneficios de la suplementación de fitasas en dietas de cerdos



**Fuente:** Adaptado de 2018, Kumar et al. (44). General aspects of phytases. Enzymes in Human and Animal Nutrition: Principles and Perspectives. Elsevier - Academic Press; 2018.

Schlegel et al. (46) evaluaron el efecto del carbonato de calcio y un alga de la familia *Corallinaceae* (*Lithothamnium calcareum*) como fuente de calcio en la dieta, dos niveles de inclusión del calcio (4,7 y 10 g/kg) y suplementados con fitasa exógena (2,9 g/kg) en lechones de 7,9 kg en promedio, analizando el rendimiento de los cerdos, la solubilidad del mineral y la fuerza ósea; además analizaron en un experimento anexo la digestibilidad del calcio. En conclusión, los autores destacan la importancia del calcio para la optimización del fosforo en

dietas con niveles reducidos de fosforo y suplementadas con fitasa exógena, siendo los niveles excesivos de calcio un factor que conduce a la deficiencia de fosforo y reducción de la utilización del magnesio.

Por otro lado, Lee et al. (47) comprobaron que la digestibilidad del calcio no varía de acuerdo con las diferentes fuentes de calcio utilizadas, estando la digestibilidad del calcio y el fosforo influenciada por la fitasa (500 U/kg) indiferentemente de cual fuese la fuente del mineral utilizada.

#### **5.4 Proteasas**

El principal objetivo de la implementación de estas enzimas en la alimentación animal es la mejora en la digestibilidad de los aminoácidos, aminorando así el depósito de la proteína dietaria al medio ambiente y la excreción de nitrógeno en heces y orina. De acuerdo con Viner citado por Philipps-Wiemman (48), las proteasas se definen como aquellas enzimas que digieren las proteínas, y junto con las peptidasas se encargan de iniciar el catabolismo de las proteínas mediante la hidrolisis de enlaces peptídicos.

Estas enzimas están catalogadas en el grupo 3, hidrolasas, de acuerdo con la Comisión de Enzimas, y en el subgrupo 4, las cuales hidrolizan enlaces peptídicos; estas últimas a su vez se dividen en endopeptidasas y exopeptidasas de acuerdo con su lugar de acción. Por otro lado, las proteasas se clasifican en seis grupos, de acuerdo con el tipo catalítico, como metaloproteinasas, serin-proteasas, aspartil-proteasas, cisteína proteasas, treonina proteasas y glutamato carboxipeptidasa (48).

Un factor de importancia de estas enzimas en la nutrición animal es su compatibilidad con las enzimas endógenas, para una buena acción y resultados, debido al rol primordial en los procesos fisiológicos; siendo la fuente de proteína y el grado de hidrólisis, un elemento clave para la elección de la enzima (49).

En cerdos, la aplicación de estas enzimas se ha implementado con el objetivo de mejorar la digestibilidad de la proteína o permitir la inclusión de materias primas alternativas en la dieta, sin embargo, el dilema en la actualidad es la poca publicación en la especie porcina en comparación con las aves de corral, considerándose los resultados poco concluyentes (49). Evidenciándose este panorama en el trabajo desarrollado por Morales, et al. (50) quienes evaluaron el efecto de suplementar dietas compuestas por trigo con proteasa de origen fúngico sobre la digestibilidad ileal de aminoácidos y el comportamiento productivo, utilizando 4 cerdas canuladas para la digestibilidad ileal y 28 cerdos para identificar el efecto sobre el comportamiento productivo, concluyendo el efecto inexistente de la enzima sobre las variables estudiadas.

Recientemente Park et al. (51) evaluó el efecto de una proteasa bacteriana sobre el rendimiento, crecimiento, digestibilidad de nutrientes y morfología intestinal en lechones destetos. Los autores manifiestan que la proteasa suplementada en dietas con bajo nivel de proteína (22.51% frente a 24,49%), permitió una mejora sobre el rendimiento de los animales manifestándose con una ganancia diaria de peso sostenida durante todo el periodo experimental, mejorando la digestibilidad de la materia seca y la proteína cruda. En cuanto a los efectos sobre la morfología intestinal, la suplementación de la enzima condujo a una mayor

relación entre las alturas de las vellosidades y la profundidad de la cripta, factor que está relacionado con la capacidad de digestión y absorción de nutrientes.

Tactanan et al. (52), además de identificar el efecto de la proteasa sobre la digestibilidad de nutrientes y rendimiento de los animales, evaluaron su efecto en los perfiles sanguíneos, microflora fecal, emisión de gases y puntuaciones fecales en 50 lechones con 28 días de edad. En cuanto a la respuesta de la proteasa, los perfiles sanguíneos manifestaron un descenso de la creatinina en sangre, al igual que un descenso sobre las emisiones de amoníaco, convirtiéndose en una herramienta para mitigar los efectos nocivos sobre el medio ambiente.

Al valorar la suplementación con enzimas y sus interacciones (proteasa, carbohidrasas y fitasa) en dietas a base de colza y granos secos de destilería con solubles, sobre la digestibilidad ileal *in vitro*, el crecimiento y densidad ósea en cerdos, como era de esperarse, la suplementación con proteasa mejora la digestibilidad *in vitro* de la proteína cruda, sin embargo, el efecto de las enzimas individuales o sus interacciones no mejora el rendimiento de los animales y mineralización ósea (53).

## 5.5 Lipasas

Al igual que las proteasas, las publicaciones de trabajos desarrollados con la suplementación de lipasas en dietas porcinas es reducida. Estas enzimas denominadas de igual forma como acil-ester-hidrolasa, permiten la hidrólisis de triglicéridos (58), atribuyéndoseles

en general la función de catalizar la hidrólisis de enlaces esteres (59). En el año 2004, Dierick et al. (54) evidenciaron que la implementación lipasa en dietas con semillas de plantas del género *Cuphea*, como fuente de ácidos grasos de cadena media y alternativa a los antimicrobianos, permitió beneficios en el rendimiento de los animales. En conclusión, los autores manifestaron que estos factores permitieron una estabilidad de la comunidad microbiana al mitigar comunidades de *Lactobacillus*, así como una mayor altura de las vellosidades y profundidad de las criptas intestinales.

Pierzynowski et al. (26), en su estudio identificaron que las enzimas exógenas presentaban la capacidad de imitar funcionalmente las enzimas endógenas, mejorando la digestión de las grasas y proteína sobre un modelo porcino con insuficiencia pancreática exocrina por ligadura de los conductos pancreáticos; contemplándose como una herramienta para estimular el crecimiento en lechones en el periodo posterior al destete, los cuales presentan desafíos por las condiciones de estrés durante el manejo y trastornos metabólicos subsiguientes (26)

La implementación de 200 gramos por tonelada de lipasa en raciones para cerdos permitió una mejora de la ganancia de peso en cerdos. En el tracto gastrointestinal los efectos fueron una mejora estructural en la morfología intestinal, la cual condujo hacia una mayor profundidad en las criptas duodenales; su efecto sobre la comunidad microbiana permitió una mayor diversidad en el ciego. De igual forma la dosis utilizada en el estudio condujeron a la reducción de triglicéridos y lipoproteínas de baja densidad, resultados que están condicionados a los niveles de inclusión de grasas en la dieta (55).

Este obra está bajo una [licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).



## 6 Conclusiones

Con la culminación de la presente revisión bibliográfica se identifican claramente los enfoques de aplicación de las enzimas en la alimentación de cerdos, siendo inicialmente la disminución de los efectos nocivos sobre el medio ambiente por el inadecuado manejo de ciertos nutrientes, el motor para la industrialización de las enzimas; para monogástricos como tal, la aplicación data para el año 1926 en aves, y propiamente en porcicultura, su uso se identifica en 1991, ambos trabajos enfocados en la mejora productiva. Otro de los enfoques ampliamente efectuados en la alimentación de cerdos es la promoción de la salud intestinal, evidenciándose claros resultados prometedores y con potencial, incluso convirtiéndose en posibles herramientas para disminuir los requerimientos nutricionales dentro de la ración, enfoque que es sincrónico con mejorar la respuesta productiva de los animales.

Finalmente, en cuanto al tipo de enzimas implementadas en la alimentación porcina, las lipasas y proteasas presentan un bajo porcentaje de aplicación y estudios publicados, siendo estas implementadas en momentos determinados y críticos de la producción, caso contrario a lo ocurrido con las fitasas y carbohidrasas. En el caso de las fitasas, su uso se encuentra diseminado en la industria y con objetivos muy específicos; de igual forma, y no menos importante las carbohidrasas son de gran interés, permitiendo esclarecer el rol y potencial que presentan los polisacáridos no amiláceos en la alimentación animal, dejando de percibirse como factores antinutricionales y distinguiéndose como alimentos funcionales de interés para la reducción de antibióticos, promoviendo la salud intestinal.





Este obra está bajo una [licencia de Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).



## Referencias Bibliográficas

1. Kumar A, Rani R, Pandey A. Production, Purification, and Application of Microbial Enzymes. En Brahmachari G. Biotechnology of Microbial Enzymes, Production, Biocatalysis and Industrial Applications.: Academic Press; 2017. p. 13-14.
2. Souza F, Gutterres M. Application of enzymes in leather processing: a comparison between chemical and coenzymatic processes. Brazilian Journal of Chemical Engineering. 2012; 29(3): p. 473-482.
3. Hirose Y. Enzymes for Human Nutrition and Health. En Vogel A, May O. Industrial Enzyme Applications.: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA; 2019. p. 203-217.
4. Moreira K, Moura L, Monteiro R, Oliveira A, Valle C, Freire T, et al. Optimization of the Production of Enzymatic. Catalysts. 2020; 10(4): p. 414-434.
5. Porcicultura Colombiana. ¿Cómo le fue a la porcicultura colombiana en el 2015? Porcicultura Colombiana. 2016; 5(1): p. 7-17.
6. Porcicultura Colombiana. Análisis de coyuntura del sector porcícola Primer semestre 2016. Porcicultura Colombiana. 2016; 5(7): p. 16-22.
7. Aguirre P. Efecto de las enzimas en la alimentación de cerdos. [Online]; 2020. Disponible en: <https://bmeditores.mx/porcicultura/efecto-de-las-enzimas-en-la-alimentacion-de-cerdos/>.
8. Imran M, Nazar M, Saif M, Ashan M, Sanahullah , Vardan M, et al. Role of Enzymes in Animal Nutrition: A Review. PSM Veterinary Research. 2016; 1(2): p. 38-45.



9. Cardoso L. Custos de produção de suínos sobem 10,93% em julho. [Online]; 2020. Disponible en: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/55034075/custos-de-producao-de-suinos-sobem-1093-em-julho>.
10. Kerr B, Shurson G. Strategies to improve fiber utilization in swine. *Journal of Animal Science and Biotechnology*. 2013; 4(1): p. 11-23.
11. Dourado L, Sakomura N, Barbosa N, Bonato M, Kawauchi I, Fernandes J, et al. Corn and soybean meal metabolizable energy with the addition of exogenous enzymes for poultry. *Brazilian Journal of Poultry Science*. 2009; 11(1): p. 51-55.
12. Park K, Sol C, Gyun B. An enzyme complex increases in vitro dry matter digestibility of corn and wheat in pigs. *Springerplus*. 2016; 5: p. 598.604.
13. Bedford M. The evolution and application of enzymes in the animal feed industry: the role of data interpretation. *British Poultry Science*. 2018; 59(5): p. 486-493.
14. Clickner F, Follwell E. Application of “Protozyme” (*Aspergillus orizae*) to Poultry Feeding. *Poultry Science*. 1926; 5(5): p. 241-247.
15. Thacker P, Campbell G, GrootWassin J. The effect of enzyme supplementation on the nutritive value of rye-based diets for swine. *Canadian Journal of Animal Science*. 1991; 71(2).
16. Thacker P, Baas T. Effects of gastric pH on the activity of exogenous pentosanase and the effect of pentosanase supplementation of the diet on the performance of growing-finishing pigs. *Animal Feed Science and Technology*. 1996; 63(1-4): p. 187-200.
17. Bedford M, Schulze H. Exogenous enzymes for pigs and poultry. *Nutrition Research Reviews*. 1998; 11(1): p. 91-114.



18. Vangroenweghe F, Poulsen K, Thas O. Supplementation of a  $\beta$ -mannanase enzyme reduces post-weaning diarrhea and antibiotic use in piglets on an alternative diet with additional soybean meal. *Porcine Health Management*. 2021; 7(1): p. 8-19.
19. Walk C, Bedford M. Application of exogenous enzymes: Is digestibility an appropriate response variable? *Animal Production Science*. 2020; 60(8): p. 993-998.
20. Bedford M, Masey H. Introduction. En Simoes C, Vikas K. *Enzymes in Human and Animal Nutrition*.: Elsevier; 2018. p. xxxii - xxxvi.
21. Selle P, Ravindran V, Caldwell A, Bryden W. 2000. *Nutrition Research Reviews*. 2000; 13(2): p. 255-278.
22. Wang H, Long W, Chadwick D, Velthof G, Oenema O, Ma W, et al. Can dietary manipulations improve the productivity of pigs with lower environmental and economic cost? A global meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 2020; 289: p. 106748.
23. Revindran V. Feed enzymes: The science, practice, and metabolic realities. *Journal of Applied Poultry Research*. 2013; 22(3): p. 628-636.
24. Kumar S, Chakravarty S. Amylases. En Simoes C, Kumar V. *Enzymes in Human and Animal Nutrition: Principles and Perspectives*.: Elsevier - Academic Prees; 2018. p. 163-175.
25. Simoes C. Depolymerizing enzymes—cellulases. En Simoes C, Kumar V. *Enzymes in Human and Animal Nutrition: Principles and Perspectives*.: Elsevier - Academic Prees; 2018. p. 107-126.



26. Pierzynowski S, Szwiec K, Valverde J, Gruijc D, Szymanczyk S, Swieboda P, et al. Exogenous pancreatic-like enzymes are recovered in the gut and improve growth of exocrine pancreatic insufficient pigs. *Journal of Animal Science*. 2012; 90(4): p. 324-326.
27. Cency de Barro P, Oliveira V, Eliseu C, Vianna R. Effect of enzymes addition on the total tract apparent digestibility of piglet diets. *Semina Ciencias Agrarias*. 2014; 35(4): p. 2211-2218.
28. Ree K, Sol C, Gyun B. An enzyme complex increases in vitro dry matter digestibility of corn and wheat in pigs. *SpringerPlus*. 2016; 5: p. 598.
29. Habte-Tsion H, Kumar V, Rossi W. Perspectives of nonstarch polysaccharide enzymes in nutrition. En Simoes C, Kumar V. *Enzymes in Human and Animal Nutrition: Principles and Perspectives.*: Elsevier - Academic Press; 2018. p. 239-249.
30. Habte-Tsion H, Kumar V. Nonstarch polysaccharide enzymes—general aspects. En Simoes C, Kumar V. *Enzymes in Human and Animal Nutrition: Principles and Perspectives.*: Elsevier - Academic Press; 2018. p. 183-203.
31. Long C, Rösch C, Vries S, Schols H, Venema K. Cellulase and Alkaline Treatment Improve Intestinal Microbial Degradation of Recalcitrant Fibers of Rapeseed Meal in Pigs. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2020; 68(39): p. 11011-11025.
32. Zhao J, Zhang G, Liu L, Wang J, Zhang S. Effects of fibre-degrading enzymes in combination with different fibre sources on ileal and total tract nutrient digestibility and fermentation products in pigs. *Archives of Animal Nutrition*. 2020; 74(6): p. 309-324



33. Hoon S, Kyoung J, Ho Y, Kang D. Complete genome sequence of the acidic cellulase producer *Bacillus amyloliquefaciens* ATC6. *Journal of Animal Science and Technology*. 2020; 62(5): p. 761-763.
34. Martínez-Aispuro J, Figueroa-Velasco J, Cordero-Mora J, Sánchez-Torres-Esqueda M, Martínez-Aispuro M. Martínez-Aispuro. *Ecosistema y recursos agropecuarios*. 2017; 4(10): p. 73-80
35. Lyu Z, Wang L, Wang J, Wang Z, Zhang S, Wang J, et al. Oat bran and wheat bran impact net energy by shaping microbial communities and fermentation products in pigs fed diets with or without xylanase. *Journal of Animal Science and Biotechnology*. 2020; 11: p. 99-114.
36. Pedersen N, Azem E, Broz J, Guggenbuhl P, Le D, Fojan P, et al. The degradation of arabinoxylan-rich cell walls in digesta obtained from piglets fed wheat-based diets varies depending on digesta collection site, type of cereal, and source of exogenous xylanase. *Journal of Animal Science*. 2012; 90(4): p. 149-151.
37. Karie E, Owusu-Asiedu A, Péron A, Simmins P, Nyachoti C. Efficacy of xylanase and  $\beta$ -glucanase blend in mixed grains and grain co-products-based diets for fattening pigs. *Livestock Science*. 2012; 148(1-2): p. 129-133.
38. Trindade M, Dadalt J, Gallardo C. Nutrient and energy balance, and amino acid digestibility in weaned piglets fed wheat bran and an exogenous enzyme combination. *Animal*. 2020; 14(3): p. 499-507.
39. Li Q, Burrough E, Gabler N, Loving C, Sahin O, Gould S, et al. A soluble and highly fermentable dietary fiber with carbohydrases improved gut barrier integrity markers and



growth performance in F18 ETEC challenged pigs. *Journal of Animal Science*. 2019; 97(5): p. 2139–2153.

40. Logn C, Venema K. Pretreatment of Rapeseed Meal Increases Its Recalcitrant Fiber Fermentation and Alters the Microbial Community in an in vitro Model of Swine Large Intestine. *Frontiers in Microbiology*. 2020; 11: p. 2692.

41. Jakobsen G, Jensen B, Bach K, Canibe N. Fermentation and addition of enzymes to a diet based on high-moisture corn, rapeseed cake, and peas improve digestibility of nonstarch polysaccharides, crude protein, and phosphorus in pigs. *Journal of Animal Science*. 2015; 93(5): p. 2234-2245.

42. Wook J, Patterson R, Rogiewicz A, Woyengo T. Nutrient digestibility of multi-enzyme supplemented low-energy and AA diets for grower pigs. *Journal of Animal Science*. 2019; 97(7): p. 2979–2988.

43. Romano N, Kumar V. Phytase in animal feed. En Simoes C, Kumar V. *Enzymes in Human and Animal Nutrition: Principles and Perspectives.*: Elsevier - Academic Press; 2018. p. 73 - 81.

44. Kumar V, Sinha A. General aspects of phytases. En Simoes C, Kumar V. *Enzymes in Human and Animal Nutrition: Principles and Perspectives.*: Elsevier - Academic Press; 2018. p. 53-67.

45. Batson K, Calderón H, Goodband R, Woodworth J, Tokach M, Dritz S, et al. Effect of high-phytase supplementation in lactation diets on sow and litter performance. *Translational Animal Science*. 2021; 5(1): p. 227.



46. Schlegel P, Gutzwiller A. Effect of dietary calcium level and source on mineral utilisation by piglets fed diets containing exogenous phytase. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*. 2017; 101(5): p. 165-174.
47. Lee S, Lagos L, Walk C, Stein H. Standardized total tract digestibility of calcium varies among sources of calcium carbonate, but not among sources of dicalcium phosphate, but microbial phytase increases calcium digestibility in calcium carbonate. *Journal of Animal Science*. 2019; 97(8): p. 3440–3450.
48. Philipps-Wiemann P. Proteases—general aspects. En Simoes C, Kumar V. *Enzymes in Human and Animal Nutrition: Principles and Perspectives.*: Elsevier - Academic Press; 2018. p. 257-264.
49. Philipps-Wiemann P. Proteases—animal feed. En Simoes C, Kumar V. *Enzymes in Human and Animal Nutrition: Principles and Perspectives.*: Elsevier - Academic Press; 2018. p. 279-292.
50. Morales M, Cervantes M, Cuca M, Figueroa J, Pro A, Araiza B, et al. Digestibilidad ileal de aminoácidos y comportamiento productivo de cerdos alimentados con dietas a base de trigo, adicionadas con una proteasa fungal. *Agrociencia*. 2002; 36(5): p. 515-522.
51. Park S, Jae J, Mo B, Ho J, Kim S, Kang J, et al. Dietary protease improves growth performance, nutrient digestibility, and intestinal morphology of weaned pigs. *Journal of Animal Science and Technology*. 2020; 62(1): p. 21-30.





52. Tactacan G, Cho S, Cho J, Kim I. Performance Responses, Nutrient Digestibility, Blood Characteristics, and Measures of Gastrointestinal Health in Weanling Pigs Fed Protease Enzyme. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*. 2016; 29(7): p. 998-1003.
53. Torres-Pitarch A, McCormack U, Beattie V, Magowan E, Gardiner G, Pérez-Vendrell A, et al. Effect of phytase, carbohydrase, and protease addition to a wheat distillers dried grains with solubles and rapeseed based diet on in vitro ileal digestibility, growth, and bone mineral density of grower-finisher pigs. *Livestock Science*. 2018; 216: p. 94-99.
54. Dierick N, Decuypere J, Degeyter I. THE COMBINED USE OF WHOLE CUPHEA SEEDS CONTAINING MEDIUM CHAIN FATTY ACIDS AND AN EXOGENOUS LIPASE IN PIGLET NUTRITION. *Archives of Animal Nutrition*. 2003; 57(1): p. 49-63.
55. Zhang S, Zhang X, Qiao H, Chen J, Fang C, Deng Z, et al. Effect of timing of post-weaning supplementation of soybean oil and exogenous lipase on growth performance, blood biochemical profiles, intestinal morphology and caecal microbial composition in weaning pigs. *Italian Journal of Animal Science*. 2018; 17(4): p. 967-975.
56. Nutrinews. Uso de enzimas en la alimentación animal. Un proceso de innovación. [Online]: 2014. Disponible en: <https://nutricionanimal.info/introduccion-al-uso-de-enzimas-en-la-alimentacion-animal-un-proceso-de-innovacion/>
57. Valdivia A, Matos M, Rodríguez Z, Pérez Y, Rubio Y, Vega J. Los aditivos enzimáticos, su aplicación en la crianza animal. *Cuban Journal of Agricultural Science*. 2019; 53(4): p. 341-352.



58. Kurtovic I, Marshall S, Zhao X, Simpson B. Lipases from Mammals and Fishes. Reviews in Fisheries Science. 2009; 17(1): p. 18-40.

59. Sindhu R, Shiburaj S, Sabu A, Fernandes P, Singhal R, Mathew G, Mair I... Pandey, A. Enzyme Technology in Food Processing: Recent Developments and Future Prospects. En Knoerzer K, Muthukumarappan K. Innovative Food Processing Technologies: Elsevier; 2021: p. 191-215.

