

**Efecto de la fitasa sobre la digestibilidad de los nutrientes y parámetros productivos en
pollos alimentados con dietas reducidas en energía metabolizable**

Andrés Felipe Gutiérrez Jiménez

Asesores

Diana Carolina Rodríguez Abello

Mayra Diaz Vargas

Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD

Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente - ECAPMA

Especialización en Nutrición y Alimentación Animal Sostenible

2025

Nota de Aceptación

Nombre Director de Trabajo de Grado

Jurado

Jurado

Agradecimientos

Agradezco a Dios por brindarme la oportunidad de adquirir nuevos conocimientos. A la empresa patrocinadora del proyecto por su apoyo y confianza. A la doctora Mayra Díaz, gracias por invitarme a ser parte de sus valiosas iniciativas investigativas. Asimismo, a la doctora Diana Rodríguez por su acompañamiento y gestión en los trámites.

Resumen

Este estudio evaluó el efecto de la inclusión de fitasa en dietas con reducción de energía metabolizable (EM) sobre el rendimiento productivo, la digestibilidad de nutrientes y la viabilidad económica en pollos de engorde. Se utilizaron cuatro tratamientos, incluyendo un control positivo (CP) con 1000 FTU/kg de fitasa y tres dietas experimentales (DE1, DE2, DE3) con reducciones progresivas de EM (-20, -40, -60 kcal/kg). Durante la fase de iniciación, la mayor ganancia de peso (GP) y la mejor conversión alimenticia (CA) se registraron en DE2. En el total del periodo, la CA mejoró linealmente ($p=0.0017$) a medida que se redujo la EM, destacando el tratamiento DE3 con la mejor eficiencia alimenticia, superando incluso al CP. En términos de digestibilidad ileal aparente a los 21 días, el coeficiente de digestibilidad de la proteína total (CDPT) presentó una respuesta lineal positiva ($p=0.0189$), mientras que el del extracto etéreo (CDEE) mostró una respuesta cuadrática significativa ($p=0.0060$), con un valor óptimo estimado a 2970.8 kcal/kg de EM. A los 42 días, el CDEE también mostró una respuesta cuadrática ($p=0.0109$), con punto óptimo en 3134.6 kcal/kg. La energía bruta también evidenció mejoras significativas. Económicamente, todas las dietas experimentales fueron más rentables que el control. La mayor utilidad por ave se obtuvo con DE3 (USD 0.345), representando un incremento del 13.1% respecto al CP, demostrando que la adición de fitasa permite reducir costos de alimentación sin comprometer el desempeño productivo

Palabras clave: Digestibilidad, Proteína, Energía, Metabolicidad, Fósforo.

Abstract

This study evaluated the effect of phytase supplementation in diets with reduced metabolizable energy (ME) on growth performance, nutrient digestibility, and economic viability in broiler chickens. Four treatments were used, including a positive control (PC) containing 1000 FTU/kg of phytase, and three experimental diets (ED1, ED2, ED3) with progressive reductions in ME (-20, -40, -60 kcal/kg). During the starter phase, the highest body weight gain (BWG) and best feed conversion ratio (FCR) were observed in ED2. Over the entire experimental period, FCR improved linearly ($p = 0.0017$) as dietary ME decreased, with ED3 showing the best feed efficiency, even outperforming the PC. At 21 days of age, the apparent ileal digestibility coefficient of total protein (AID-CP) exhibited a positive linear response ($p = 0.0189$), whereas the apparent digestibility of ether extract (AID-EE) showed a significant quadratic response ($p = 0.0060$), with an optimal ME level estimated at 2970.8 kcal/kg. At 42 days, AID-EE also followed a quadratic pattern ($p = 0.0109$), reaching its optimum at 3134.6 kcal/kg. Gross energy digestibility also showed significant improvements. From an economic standpoint, all experimental diets were more profitable than the control. The highest net profit per bird was obtained with ED3 (USD 0.345), representing a 13.1% increase over the PC. These findings demonstrate that phytase supplementation allows for reductions in dietary energy levels without compromising productive performance, contributing to more efficient and cost-effective poultry production.

Keywords: Digestibility, Protein, Energy, Metabolizability, Phosphorus.

Tabla de Contenido

Introducción	9
Justificación.....	11
Objetivos	12
Objetivo General.....	12
Objetivos Específicos.....	12
Marco Conceptual y Teórico.....	13
Fitasa: Definición y función.....	13
Evidencia científica de la utilización de fitasa en pollos de engorde.....	14
Materiales y Métodos	16
Declaración de ética y cuidado animal	16
Información técnica de la fitasa	16
Manejo animal y diseño experimental	16
Sacrificio de las Aves.....	17
Toma de muestras y análisis químico	19
Cálculo de los coeficientes de digestibilidad	19
Análisis estadístico.....	20
Viabilidad Económica.....	20
Resultados	22
Parámetros productivos.....	22
Coeficientes de Digestibilidad de los nutrientes	23
Viabilidad Económica.....	25
Discusión.....	27

Parámetros productivos.....	27
Digestibilidad de nutrientes	27
Viabilidad económica	28
Conclusiones	30
Recomendaciones.....	31
Referencias Bibliográficas.....	32

Lista de Tablas

Tabla 1 <i>Ingredientes y Composición Química de las Dietas para Cada una de las Fases</i>	18
Tabla 2 <i>Efectos de la Disminución de EM, en Dietas Suplementadas con Fitasa, Sobre los Parámetros Productivos en las Diferentes Fases Experimentales</i>	22
Tabla 3 <i>Efectos de la Disminución de EM, en Dietas Suplementadas con Fitasa, Sobre los Coeficientes de Digestibilidad de los Nutrientes a los 21 Días</i>	23
Tabla 4 <i>Efectos de la Disminución de EM, en Dietas Suplementadas con Fitasa, Sobre los Coeficientes de Digestibilidad de Los Nutrientes a los 42 Días</i>	24
Tabla 5 <i>Análisis Económico del Sistema Productivo</i>	25

Introducción

Las demandas actuales en la nutrición y alimentación de pollos de engorde requieren un enfoque que integre eficiencia y sostenibilidad (Wang et al, 2022). En este contexto, el uso de enzimas exógenas ha cobrado creciente importancia, dado que numerosos estudios han evidenciado su capacidad para mejorar la utilización de nutrientes y reducir los costos de alimentación (Giacobo et al, 2021; Bist et al, 2024).

Uno de los principales desafíos en la formulación de dietas para pollos de engorde es la limitada biodisponibilidad del fósforo (P) presente en los ingredientes vegetales, donde se encuentra predominantemente en forma de fitato (Mirabile et al., 2020; de Léo et al., 2025). Esta forma representa aproximadamente el 66 % del fósforo (P) total en estos insumos, pero su aprovechamiento es escaso, ya que las aves carecen de suficiente actividad de fitasa endógena, enzima encargada de liberar el P utilizable (Mirabile et al., 2020). Esta deficiencia puede comprometer el desarrollo óseo y muscular, afectando negativamente la eficiencia biológica del crecimiento (de Léo et al., 2025; Lee et al, 2024).

Diversos estudios han evaluado el efecto de la suplementación de dietas de pollos de engorde con fitasa exógena. Entre sus efectos positivos se destaca el incremento de la ganancia de peso (de Léo et al., 2025), el aumento en la concentración de ácidos grasos de cadena corta, particularmente acético, butírico y valérico en el contenido cecal (Trela et al., 2025), así como mejoras en los coeficientes de digestibilidad de proteína, fósforo (Mirabile et al., 2020; de Léo et al., 2025; Trela et al., 2025) y en la energía digestible ileal aparente (Trela et al., 2025). Además, en dietas con niveles reducidos de fósforo disponible, la adición de fitasa ha demostrado preservar la mineralización ósea, mitigar la respuesta fisiológica al estrés y mantener el

equilibrio oxidativo en la mucosa yeyunal (Lee et al, 2024), favoreciendo también la integridad histológica intestinal (de Léo et al., 2025).

Justificación

La alimentación representa el componente más significativo en los costos de producción avícola, lo que impulsa la búsqueda de estrategias que permitan reducir estos gastos sin comprometer la productividad, la salud y el bienestar de los animales, la calidad del producto final ni la seguridad alimentaria de los consumidores (Vlaicu et al, 2024)

En este contexto, la suplementación con fitasa en la dieta de pollos de engorde ofrece múltiples beneficios, ya que no solo mejora la disponibilidad de fósforo en el intestino delgado, sino que también reduce la interferencia del fitato en la digestión de proteínas y energía (Lim et al, 2024; Yun et al, 2024). Estudios previos han demostrado que la fitasa puede incrementar la digestibilidad de aminoácidos, carbohidratos y lípidos, mejorando así la eficiencia alimenticia y la conversión alimenticia (CA) (Rodehutschord et al., 2022), lo que subraya la necesidad de ajustar adecuadamente la formulación de las dietas para maximizar sus beneficios.

Si bien en contextos productivos se ha reportado que la inclusión de fitasa mantiene el crecimiento y la salud de pollos de engorde y cerdos, aún persisten incertidumbres técnicas sobre el ahorro real de energía y nutrientes que puede alcanzarse bajo esquemas de alimentación con menor aporte energético. Por tanto, el presente estudio se planteó con el objetivo de evaluar el efecto de la suplementación con fitasa en dietas con reducción de energía metabolizable. Para ello, se evaluó la ganancia de peso, la conversión alimenticia y los coeficientes de digestibilidad de la materia seca, proteína cruda, extracto etéreo y energía bruta, con el fin de determinar el nivel óptimo de inclusión de esta enzima en la formulación de dietas avícolas que favorecen para una producción más eficiente, rentable y ambientalmente sostenible.

Objetivos

Objetivo General

Evaluar el efecto de la inclusión de fitasa en dietas para pollos de engorde con reducción de energía metabolizable, con el fin de optimizar el aprovechamiento de los nutrientes y disminuir los costos de producción sin afectar el rendimiento productivo.

Objetivos Específicos

Analizar el impacto de la suplementación con fitasa en la dieta sobre los parámetros productivos.

Cuantificar el efecto de la inclusión de fitasa en los coeficientes de digestibilidad de la materia seca, proteína bruta y energía.

Determinar la reducción en la inclusión de energía metabolizable en la dieta, que asegure los beneficios productivos y económicos.

Marco Conceptual y Teórico

Fitasa: Definición y Función

Las fitasas son enzimas pertenecientes a la subfamilia de las fosfatasas ácidas cuya función principal es la descomposición del fitato, liberando el fósforo y otros minerales esenciales como calcio (Ca), zinc (Zn) y magnesio (Mg) para su absorción en el intestino delgado (Philippi et al, 2023). Estas enzimas pueden tener distintos orígenes: vegetal, animal o microbiano, siendo este último el más utilizado en la industria avícola debido a su alta eficiencia en la degradación del fitato dentro del tracto gastrointestinal de las aves (Abarca, 2021).

Las fitasas microbianas derivadas de *Escherichia coli* y *Bacillus subtilis* son las más utilizadas en la producción de aditivos para alimentos balanceados, dado su alto rendimiento y estabilidad en un amplio rango de pH intestinal (Rodehutschord et al, 2022; Ribeiro et al, 2016; Trela et al, 2024). Además de mejorar la biodisponibilidad del fósforo, la fitasa optimiza la digestión de proteínas y energía al reducir la formación de complejos indigestibles con el fitato, lo que contribuye a una mayor eficiencia alimenticia y conversión alimenticia (Philippi et al, 2023).

La inclusión de fitasa en la dieta de pollos de engorde tiene múltiples beneficios como:

- Mayor disponibilidad de fósforo y reducción en el uso de fosfatos inorgánicos: Al hidrolizar el fitato, la fitasa reduce la necesidad de suplementación con fuentes inorgánicas, disminuyendo así el costo de la alimentación y la excreción de este mineral al medio ambiente (Lim et al, 2024). Esto contribuye a minimizar la eutrofización de fuentes hídricas, un problema significativo en la producción intensiva (Philippi et al, 2023).
- Mejor digestibilidad de proteínas, carbohidratos y lípidos: La fitasa rompe los enlaces del fitato con proteínas y almidones, evitando la formación de complejos insolubles que

reduzcan la absorción de los nutrientes (Mirabile et al, 2020). Esto permite un mejor aprovechamiento de la energía dietética y mejora la eficiencia alimenticia (França et al., 2023).

- Reducción del costo de alimentación y optimización de la energía metabolizable: Al mejorar la digestión y absorción de los nutrientes, es posible disminuir la inclusión de ingredientes energéticos en la dieta sin afectar el rendimiento productivo, lo que representa un beneficio económico para los productores (Rodehutscord et al., 2022).
- Impacto positivo en la salud intestinal: Estudios recientes han demostrado que la fitasa favorece la salud intestinal al reducir la proliferación de bacterias patógenas que dependen del fitato como sustrato, promoviendo un microbioma intestinal más equilibrado (Lee et al, 2024; de Léo et al, 2025). Además, facilita la recuperación de las aves tras desafíos sanitarios, mejorando su respuesta inmunológica y su bienestar general (Paul et al, 2025)

Evidencia Científica de la Utilización de Fitasa en Pollos de Engorde

La inclusión de fitasa en la alimentación de aves de corral ha sido ampliamente documentada con evidencia científica reciente, tanto por su impacto positivo en el aprovechamiento de nutrientes como por su contribución a la sostenibilidad ambiental. França et al. (2023) reportaron que la suplementación con fitasa en dietas con baja densidad energética permite mantener el rendimiento productivo en pollos de engorde, en dietas con reducción de 200 kcal/kg en la energía metabolizable comparada con dieta con 100% de los requerimientos nutricionales, observándose mejoras tanto en la morfometría intestinal como en la utilización de la energía digestible ileal aparente.

En línea con estos resultados, Sureshkumar et al. (2023) destacaron en su revisión que la fitasa, además de liberar fósforo del fitato, contribuye significativamente a la digestibilidad de proteínas, carbohidratos y lípidos, gracias a su capacidad para evitar la formación de complejos

insolubles entre el fitato y dichos nutrientes. Esto repercute en una mejor absorción de nutrientes esenciales y en una mayor eficiencia alimenticia.

Por su parte, Philippi et al. (2023) reportaron que la suplementación con fitasa incrementa notablemente la digestibilidad ileal aparente de minerales como el zinc, y favorece la retención total de este mineral en el organismo de las aves, al tiempo que se reduce la excreción fecal. Este efecto resulta clave en el control del impacto ambiental de la avicultura, al disminuir la carga contaminante de fósforo y metales pesados en los residuos.

Además, en condiciones de superdosificación, el uso de fitasa a niveles de 2,000 FTU/kg en combinación con aceites esenciales o probióticos mostró ser una alternativa eficaz a los promotores de crecimiento a base de antibióticos, mejorando la ganancia de peso y reduciendo la mortalidad, como evidenciaron Paul et al. (2025) en un estudio controlado con pollos de engorde. Asimismo, Chicaiza y Leiva (2020) evaluaron el desempeño productivo y la biodisponibilidad de calcio y fósforo en pollos alimentados con diferentes niveles de fitasa (1000 a 4000 FYT). Se encontró que la inclusión de 2000 FYT (Unidad de Fitasa) mejoró significativamente la ganancia de peso, la conversión alimenticia y el rendimiento en canal, además de generar un beneficio económico notable para el productor.

Estos resultados consolidan el valor de la fitasa como aditivo estratégico en la formulación de dietas avícolas, permitiendo reducir la dependencia de fosfatos inorgánicos, optimizar el uso de nutrientes y mitigar la contaminación ambiental asociada a la excreción excesiva de fósforo.

Materiales y Métodos

Declaración de Ética y Cuidado Animal

El manejo de los animales y las técnicas experimentales empleadas en este estudio se realizaron en estricto cumplimiento de los lineamientos establecidos por el Comité de Bioética Animal del Área de Ciencias Agropecuarias de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales (U.D.C.A).

Información Técnica de la Fitasa

La enzima es una 6-fitasa micro granulada termoestable, producida por fermentación sumergida de una cepa de *Escherichia coli* (*E. coli*) de alto rendimiento. La adición de 6-fitasa a las dietas de animales en producción permite sustituir directamente parte del fósforo inorgánico añadido al alimento y no se degrada con las temperaturas de peletización.

Manejo Animal y Diseño Experimental

El estudio se llevó a cabo en la Unidad Experimental Avícola de la Universidad de Ciencias Aplicadas y Ambientales (U.D.C.A), situada a una altitud de 2.560 msnm en Bogotá D.C. Se utilizaron 240 pollos Ross 308 distribuidos en 4 tratamientos con 60 repeticiones cada uno, estos fueron criados en un ambiente controlado, equipado con sensores de humedad y temperatura, calentadores y extractores de aire. Alojados durante 42 días en baterías de jaulas dispuestas en tres niveles, cada una con dimensiones de 1,60 × 0,40 × 0,45 m (longitud, profundidad y altura, respectivamente). Cada jaula equipada con 4 plazas individuales, un comedero de canal y un bebedero tipo niple. El protocolo de bioseguridad fue implementado mediante un programa de desinfección con amonio cuaternario y glutaraldehído. El programa de iluminación consistió en 23 horas de luz y 1 hora de oscuridad durante la primera semana de vida, seguido de 18 horas de luz y 6 horas de oscuridad hasta el final del ensayo. Se aplicó el

plan nacional de vacunación, incluyendo la vacuna contra Marek el día 1, Gumboro los días 3 y 10, Newcastle + Bronquitis Infecciosa el día 7, y un refuerzo de Newcastle el día 15.

Se evaluaron 4 tratamientos, el control positivo (CP) que consistió en una dieta suplementada con 1.000 FTU/kg de fitasa, considerando una matriz nutricional equivalente a 0,16% de fósforo disponible. Las dietas experimentales (DE) DE1, DE2 y DE3 fueron formuladas de manera equivalente al CP pero con reducciones progresivas de energía metabolizable (EM) de -20, -40 y -60 kcal/kg. Todas las dietas se ofrecieron en forma de harina y se dividieron en dos fases: fase de inicio (días 1 al 21) y fase de engorde (días 22 al 42) (Tabla 1). Durante el periodo experimental, se registraron variables productivas como la ganancia de peso (GP), el consumo de alimento y la conversión alimenticia (CA) al inicio y final de cada fase.

Sacrificio de las Aves

A los 21 y 42 días de edad, se seleccionaron ocho aves por tratamiento para ser procesadas conforme a la normativa colombiana vigente en bienestar animal. Este protocolo exige que el método empleado garantice la pérdida inmediata de la consciencia y que esta se mantenga hasta la muerte por exanguinación. Las aves fueron sumergidas en una tina con agua durante 46 segundos y expuestas a una corriente alterna sinusoidal de 50 Hz, con un voltaje de 50 V y una intensidad de 150 a 300 miliamperios (mA), asegurando así una insensibilización eficaz. Posteriormente, se realizó un corte cervical dorso-lateral, seccionando la arteria carótida externa y la vena yugular, lo que permitió un sangrado continuo durante 1 a 2 minutos. Este procedimiento propició una caída rápida de la presión sanguínea, induciendo una anemia cerebral irreversible y cumpliendo con los criterios de bienestar establecidos para el procesamiento humanitario de aves.

Tabla 1 *Ingredientes y composición química de las dietas para cada una de las fases*

Item	Fase 1: Inicio				Fase 2: Engorde			
	CP ¹	DE1	DE2	DE3	CP	DE1	DE2	DE3
Ingrediente (%)								
Maíz amarillo	61,5	62,1	62,7	63,2	64,3	64,9	65,4	65,9
Torta de soya	23,1	24,1	25,2	25,1	16,2	16,9	17,2	17,5
Soya integral 34%	3,00	1,50	0,00	0,00	7,00	6,00	5,50	5,00
Gluten de maíz	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
Hemoglobina	2,00	2,00	2,00	2,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Aceite de palma	1,11	0,97	0,83	0,39	2,48	2,24	1,91	1,56
Carbonato de calcio	1,21	1,21	1,21	1,21	1,19	1,19	1,19	1,19
Fosfato bicálcico	0,99	1,00	1,00	1,00	0,79	0,79	0,79	0,79
DL metionina	0,44	0,44	0,44	0,44	0,39	0,39	0,39	0,39
L-lisina HCcl	0,32	0,32	0,33	0,33	0,37	0,37	0,38	0,38
Px Tekzol pollo	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20
Sal	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18
L-treonina	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19
L-valina	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Colina cloruro 60%	0,12	0,12	0,12	0,12	0,10	0,10	0,10	0,10
L-arginina	0,12	0,12	0,12	0,12	0,10	0,10	0,10	0,10
Virginiamicina	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Sulfato de sodio	0,30	0,31	0,31	0,31	0,30	0,30	0,30	0,30
6-fitasa	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Diatomita	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Composición Calculada (%)								
Energía metabolizable (Kcal/kg)	3000	2980	2960	2940	3150	3130	3110	3090
Proteína bruta	20,9	20,9	20,9	20,9	18,4	18,4	18,4	18,5
Grasa	4,05	3,65	3,25	2,83	6,17	5,76	5,35	4,94
Fibra bruta	2,22	2,19	2,15	2,16	2,28	2,26	2,25	2,25
Cenizas	5,31	5,31	5,31	5,32	4,82	4,82	4,83	4,83
Almidón	38,8	39,2	39,5	39,8	40,4	40,7	41,1	41,4
Calcio	0,90	0,90	0,90	0,90	0,84	0,84	0,84	0,84
Fosforo disponible	0,40	0,40	0,40	0,40	0,36	0,36	0,36	0,36
Sodio	0,23	0,23	0,23	0,23	0,22	0,22	0,22	0,22
Cloro	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Potasio	0,69	0,68	0,67	0,67	0,65	0,64	0,64	0,64
Lisina total	1,33	1,33	1,33	1,33	1,18	1,18	1,18	1,19
Lis digestible	1,18	1,18	1,18	1,18	1,06	1,06	1,06	1,06
Metionina digestible	0,74	0,74	0,74	0,74	0,65	0,65	0,65	0,65
Metionina + cisteína digestible	1,00	1,00	1,00	1,00	0,90	0,90	0,90	0,90
Treonina digestible	0,86	0,86	0,86	0,86	0,77	0,77	0,77	0,77
Triptófano digestible	0,22	0,22	0,22	0,22	0,18	0,18	0,18	0,18
Arginina digestible	1,23	1,23	1,23	1,23	1,07	1,07	1,07	1,07
Isoleucina digestible	0,72	0,72	0,72	0,72	0,65	0,65	0,65	0,65

Leucina digestible	1,92	1,92	1,92	1,92	1,70	1,70	1,70	1,70
Valina digestible	1,02	1,02	1,02	1,02	0,88	0,88	0,88	0,88

Nota. ¹⁾ CP: Control positivo; DE1: Control positivo – 20 kcal/kg EM; DE2: Control positivo – 40 kcal/kg EM; Control positivo – 60 kcal/kg EM

Toma de Muestras y Análisis Químico

Después del sacrificio, se recolectó la digesta ileal de la mitad inferior del íleon, aplicando una presión suave para extraer el contenido. Se definió el segmento intestinal desde el divertículo de Meckel hasta 40 mm antes de la unión ileocecal. Las muestras fueron congeladas y posteriormente deshidratadas en un horno con ventilación forzada a 60°C durante 72 horas y se redujo el tamaño de partícula hasta pasar por un tamiz de 1 mm en un molino Wiley (Thomas Willey, Laboratory Mill, modelo 4, Thomas Scientific).

Para el análisis químico, las muestras fueron procesadas conforme a los métodos oficiales descritos por la AOAC (2016). La materia seca se determinó mediante secado en estufa a 105 °C durante 24 horas (AOAC 930.15). La proteína bruta se analizó utilizando el método de Kjeldahl, empleando un factor de conversión de nitrógeno a proteína de 6,25 (AOAC 984.13). El contenido graso se cuantificó mediante extracción con éter utilizando un sistema automático tipo Soxhlet (Soxtec™ 255, Foss Analytical, Hillerød, Dinamarca), conforme al método AOAC 920.39. Finalmente, la energía bruta (EB) se determinó por combustión completa en una bomba calorimétrica (C 5000, IKA®-Werke GmbH & Co. KG, Staufen, Alemania), acoplada a un sistema de refrigeración por circulación de agua (IKA® R 5 basic chiller, IKA®-Werke GmbH & Co. KG, Staufen, Alemania), siguiendo el método AOAC 990.05.

Cálculo de los Coeficientes de Digestibilidad

Para evaluar la digestibilidad ileal de los nutrientes, se calcularon los coeficientes de la materia seca, proteína, extracto etéreo y energía. Primero, se determinó el factor de indigestibilidad (FI) mediante la siguiente ecuación:

$$FI = \frac{\% \text{ del indicador en la dieta evaluada}}{\% \text{ del indicador en el contenido ileal}}$$

Luego, se calculó el coeficiente de digestibilidad aparente (CDA) de cada nutriente utilizando la fórmula:

$$CDA = \frac{\% \text{ nutriente en la dieta} - (\% \text{ nutriente en el contenido ileal} * FI)}{\% \text{ nutriente en la dieta} * 100}$$

Análisis Estadístico

Los datos experimentales fueron sometidos a un análisis estadístico mediante un diseño completamente aleatorizado, utilizando el procedimiento de Modelo Lineal General (GLM) del software estadístico SAS (SAS Institute Inc., Cary, NC, EE. UU.). Las comparaciones entre medias se realizaron mediante la prueba de Tukey para detectar diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0.05$). Además, se usaron modelos de regresión lineal y/o cuadrática, según correspondiera, con el objetivo de evaluar la respuesta de las variables a los diferentes niveles de inclusión evaluados. Ambos análisis fueron desarrollados empleando las herramientas analíticas disponibles en SAS 9.4.

Viabilidad Económica

La viabilidad económica fue calculada de acuerdo con el flujo de caja, teniendo en cuenta los ingresos y egresos del proyecto, y por ende la rentabilidad (Angulo, 2016). Estos valores se expresaron en dólares de acuerdo al promedio de la tasa representativa del mercado (TRM) durante el periodo comprendido entre enero de 2024 y junio de 2025 con un valor de USD 4112.85 (Banco de la República, 2025). Para determinar los egresos se determinó el costo del kg de cada una de las dietas, para esto se utilizaron los precios de los insumos de la región central de Colombia del último año siendo para la fitasa USD 9,872/kg, maíz amarillo USD 0,608/kg, harina de soya USD 0,081/kg, soya integral (34%) USD 0,292/kg, gluten de maíz USD

2,249/kg, hemoglobina USD 0.705/kg, aceite de palma USD 1,799/kg, fosfato bicálcico (DHR) USD 1,162/kg, carbonato de calcio fino USD 0,389/kg, Premix Vit-Min USD 2,431/kg, DL-metionina (99%) USD 4,133/kg, sal USD 0,195/kg, L-lisina (98%) USD 3,355/kg, L-arginina USD 4.073 /kg, Virginiamicina USD 9,446/kg, sulfato de sodio USD 0,389/kg ,cloruro de colina (60%) USD 0,729/kg, L-treonina USD 4.377/kg, L-valina USD 3,380/kg y diatomita USD 4.133/kg. En los egresos fue tenido en cuenta como otros gastos el costo de luz, agua, gas, arriendo del galpón, mantenimiento y cama del galpón, además de animales, vacunas e implementos de desinfección, lo cual equivalía a USD 0,02/día. Para los ingresos fue tenido en cuenta la ganancia de peso (kg) y el precio promedio del kilogramo de pollo (USD 2,871/kg) durante el periodo comprendido entre Enero de 2024 y Febrero de 2025 (FENAVI, 2025). Al final se determinó la utilidad bruta de las dietas (ingresos – egresos) y se compararon con la dieta control.

Resultados

Parámetros Productivos

Los efectos de la fitasa en dietas para pollos de engorde con reducción de la energía metabolizable (EM) sobre los parámetros productivos se presentan en la Tabla 2. Durante la fase de iniciación, la GP y CA fueron significativamente mejores ($p < 0.05$) en el tratamiento DE2 en comparación con las demás dietas. Aunque el tratamiento DE3 mostró valores de GP y CA estadísticamente similares al control positivo (CP), el tratamiento DE1 presentó una reducción en la GP del 5,09% respecto al CP y del 11,96% en comparación con DE2. Asimismo, la CA en DE1 se incrementó en un 5,14% y 13,28% frente al CP y DE2, respectivamente. En esta etapa no se observaron efectos significativos en la prueba de regresión.

Durante la fase de engorde no se observaron diferencias significativas en la GP ni en la CA, ni se evidenciaron efectos relevantes en la prueba de regresión. En cuanto al periodo total del ensayo, la GP no presentó diferencias significativas entre tratamientos; sin embargo, la CA fue significativamente mejor ($p < 0.05$) en el tratamiento DE3 en comparación con los demás, seguido por DE1 y DE2, los cuales mostraron valores similares entre sí. La conversión más alta se registró en el grupo control positivo (CP), siendo un 6,67% superior a la de DE3. La CA mostró una tendencia lineal decreciente ($p = 0,0017$).

Tabla 2

Efectos de la Disminución de EM, en Dietas Suplementadas con Fitasa, Sobre los Parámetros Productivos en las Diferentes Fases Experimentales

Tto	1 a 21 días		21 - 42 días		1- 42 días	
	GP (g)	CA	GP (g)	CA	GP (g)	CA
CP ¹	748,65 ± 16,44 ^{ab}	1,36 ± 0,04 ^{ab}	1193,35 ± 22,21	1,79 ± 0,05	1931,49 ± 21,88	1,65 ± 0,02 ^a
DE1	710,47 ± 18,80 ^b	1,43 ± 0,04 ^a	1298,94 ± 35,60	1,74 ± 0,05	2026,22 ± 31,03	1,59 ± 0,02 ^{ab}
DE2	807,03 ± 11, 22 ^a	1,24 ± 0,02 ^b	1233,14 ± 18,55	1,93 ± 0,02	1919,29 ± 32,29	1,60 ± 0,02 ^{ab}
DE3	749,92 ± 18,67 ^{ab}	1,35 ± 0,04 ^{ab}	1262,41 ± 41,56	1,82 ± 0,09	2025,51 ± 33,26	1,54 ± 0,02 ^b
CV	12,43	15,44	15,89	20,50	9,71	8,08
REG	0,5892	0,5983	0,3133	0,5935	0,2033	0,0017 ²

Nota. CV: Coeficiente de variación; GP: Ganancia de Peso; CA: Conversión Alimenticia; REG: Regresión. CP: Control positivo; DE1: Control positivo – 20 kcal/kg EM; DE2: Control positivo – 40 kcal/kg EM; Control positivo – 60 kcal/kg EM

1) Diferencias significativas para $p < 0.05$ en prueba de regresión, resultado lineal $y = -0,032x + 1,675$; $R^2 = 0,8393$

ac Las medias con diferentes superíndices dentro de una misma columna son significativamente diferentes ($p < 0.05$) para la prueba de Tukey

Coefficientes de Digestibilidad de los Nutrientes

A los 21 días de edad, se evaluó el efecto de las dietas sobre los coeficientes de digestibilidad de la proteína total (CDPT), extracto etéreo (CDEE), materia seca (CDMS) y energía bruta (CDEB) en pollos de engorde, los resultados se resumen en la Tabla 3. El CDPT presentó una respuesta lineal creciente ($p = 0.0189$) a la disminución de la EM. Para el CDEE, se evidenció un comportamiento cuadrático en la regresión ($p = 0.0060$), con un valor máximo estimado al reducir la EM en 29.2 kcal/kg, correspondiente a una EM óptima de 2970.8 kcal/kg.

Al comparar los tratamientos en el CDPT se observó el mayor valor en el tratamiento DE3, mientras que los valores más bajos se registraron en CP y DE2, los cuales no difirieron significativamente entre sí; en el CDEE el tratamiento DE2 mostró la mayor digestibilidad, mientras que CP y DE3 presentaron valores significativamente inferiores. En el caso del CDMS, no se evidenció un efecto significativo en la regresión ($p = 0.5462$), sin embargo, CP y DE2 presentaron los valores más altos, en contraste con DE1, que mostró el menor coeficiente de digestibilidad de este nutriente. Finalmente, el CDEB exhibió una respuesta lineal creciente a la reducción de EM ($p = 0.0170$), en cuanto a la comparación de medias se observó que el valor más alto fue en DE2 y el más bajo en CP.

Tabla 3

Efectos de la Disminución de EM, en Dietas Suplementadas con Fitasa, Sobre los Coeficientes de Digestibilidad de los Nutrientes a los 21 Días

Tto	EM Kcal/kg	CDPT	CDEE	CDMS	CDEB
CP ¹	3000	84,33 ± 1,27 ^b	79,42 ± 0,78 ^b	96,07 ± 0,02 ^a	81,49 ± 0,21 ^b
DE1	2980	86,76 ± 0,40 ^{ab}	83,49 ± 1,04 ^{ab}	95,10 ± 0,07 ^c	82,02 ± 0,18 ^{ab}
DE2	2960	85,89 ± 0,87 ^b	89,43 ± 1,28 ^a	96,04 ± 0,05 ^a	82,38 ± 0,17 ^a
DE3	2940	89,13 ± 0,15 ^a	76,22 ± 2,62 ^b	95,56 ± 0,04 ^b	82,22 ± 0,14 ^{ab}
CV	-	2,133	4,487	0,115	0,495
REG	-	0,0189 ²⁾	0,0060 ³⁾	0,5462	0,0170 ⁴⁾

Nota. CV: Coeficiente de variación; REG: Regresión; CDPT: Coeficiente de digestibilidad de la Proteína Total; CDEE: Coeficiente de digestibilidad del extracto etéreo; CDMS: Coeficiente de Digestibilidad de la Materia Seca; CDEB: Coeficiente de digestibilidad de la Energía Bruta

1) CP: Control positivo; DE1: Control positivo – 20 kcal/kg EM; DE2: Control positivo – 40 kcal/kg EM; Control positivo – 60 kcal/kg EM

2) Diferencias significativas para $p < 0.05$ en prueba de regresión, resultado lineal $y = -0,0677x + 287,45$; $R^2 = 0,7588$

3) Diferencias significativas para $p < 0.05$ en prueba de regresión, resultado cuadrático $y = -0,0108x^2 + 64,17x - 95233$; $R^2 = 0,7732$; Punto máx: 2970,8 Kcal/kg

4) Diferencias significativas para $p < 0.05$ en prueba de regresión, resultado lineal $y = -0,0128x + 119,9$; $R^2 = 0,7221$

ac Las medias con diferentes superíndices dentro de una misma columna son significativamente diferentes ($p < 0.05$) para la prueba de Tukey

La digestibilidad de PT, EE, MS y EB a los 42 días de edad de las aves se presentan en la Tabla 4. El CDPT no presentó una relación significativa con la disminución de EM en el análisis de regresión ($p=0.1296$), aunque el tratamiento DE1 registró el valor más alto, en contraste con DE2 y DE3, que mostraron una reducción en el CDPT. Para el CDEE, se observó una respuesta cuadrática ($p=0.0109$), indicando un Coeficiente de digestibilidad máximo estimado a una EM de 3134.6 kcal/kg. En la comparación de medias en el CDEE el tratamiento DE2 presentó el valor más alto, mientras que DE3 mostró la menor digestibilidad lipídica. En cuanto al CDMS el tratamiento DE2 mostró el mayor valor, mientras que CP y DE1 presentaron digestibilidades similares y levemente inferiores. Finalmente, en el CDEB el tratamiento DE3 presentó el valor más alto, seguido de DE1 y CP, mientras que DE2 presentó el menor CDEB

Tabla 4

Efectos de la Disminución De EM, en Dietas Suplementadas con Fitasa, Sobre los Coeficientes de Digestibilidad de los Nutrientes a los 42 Días

Tto	EM Kcal/kg	CDPT	CDEE	CDMS	CDEB
CP ¹⁾	3150	79,51 ± 0,72 ^{ab}	87,62 ± 0,59 ^b	95,51 ± 0,08 ^b	80,22 ± 0,15 ^{ab}
DE1	3130	81,85 ± 0,48 ^a	89,51 ± 2,50 ^{ab}	95,60 ± 0,06 ^b	80,56 ± 0,27 ^{ab}
DE2	3110	76,01 ± 1,11 ^b	94,53 ± 0,26 ^a	96,09 ± 0,04 ^a	79,84 ± 0,22 ^b
DE3	3090	76,59 ± 0,54 ^b	84,37 ± 0,71 ^b	95,8 ± 0,11 ^{ab}	80,84 ± 0,12 ^a
CV	-	2,218	3,478	0,190	0,567

REG	-	0,1296	0,01091 ²⁾	0,2832	0,0752
-----	---	--------	-----------------------	--------	--------

Nota. CV: Coeficiente de variación; REG: Regresión; CDPT: Coeficiente de digestibilidad de la Proteína Total; CDEE: Coeficiente de digestibilidad del extracto etéreo; CDMS: Coeficiente de Digestibilidad de la Materia Seca; CDEB: Coeficiente de digestibilidad de la Energía Bruta

1) CP: Control positivo; DE1: Control positivo – 20 kcal/kg EM; DE2: Control positivo – 40 kcal/kg EM; Control positivo – 60 kcal/kg EM

2) Diferencias significativas para $p < 0.05$ en prueba de regresión, resultado cuadrático $y = -0,0075x^2 + 47,019x - 73293$; $R^2 = 0,6906$; Punto máx: 3134,6

ac Las medias con diferentes superíndices dentro de una misma columna son significativamente diferentes ($p < 0.05$) para la prueba de Tukey

Viabilidad Económica

Los resultados del análisis económico se muestran en la tabla 4. El costo por kg de DE3 representa una reducción de 1.55% respecto a CP1, lo cual impacta positivamente en la eficiencia económica sin comprometer los ingresos de la producción, pese a la disminución progresiva del costo por Kg se observa una variabilidad en el costo por animal, siendo mas bajo para DE2 seguido de DE3, lo cual es respaldado por la GP y CA. Los egresos disminuyen en los tratamientos experimentales, siendo más bajos en DE2 (USD 2.820) y DE3 (USD 2.837), comparados con CP1 (USD 2.912). Esto refleja un control eficiente del costo total, derivado principalmente del menor costo de alimentación.

Tabla 5

Análisis Económico del Sistema Productivo

ITEM (USD)	CP ¹	DE1	DE2	DE3
Costo kg Alimento	0,656	0,653	0,650	0,646
Costo alimento/ Animal	2,090	2,105	1,997	2,014
Otros costos	0,862	0,862	0,862	0,862
Egresos totales	2,952	2,967	2,859	2,876
Ingresos venta	5,546	5,818	5,511	5,816
Utilidad bruta	2,593	2,851	2,652	2,940
Ganancia con relación a CP	-	0,258	0,059	0,346

Nota. Representación de los costos, egresos totales e ingresos, para la estimación de la utilidad bruta en el sistema productivo

1) CP: Control positivo; DE1: Control positivo – 20 kcal/kg EM; DE2: Control positivo – 40 kcal/kg EM; Control positivo – 60 kcal/kg EM

En los ingresos de venta DE1 y DE3 presentan un incremento cercano al 5 % frente a CP, lo cual es significativo en términos económicos. DE2, a pesar de tener un costo más bajo, genera un ingreso ligeramente menor (-0.63 %) que el control, lo que puede explicarse por una menor ganancia de peso. Las utilidades por pollo producido son mayores para todas las dietas experimentales, especialmente para DE1 y DE3, esto debido a que la reducción en la inclusión de materias primas energéticas y la adición de fitasa en las dietas elevó la GP y disminuyó la CA de las aves. El aumento en la utilidad con respecto al control positivo es de USD 0.258 para DE1 lo que representa un 9.79% y de USD 0.345 para DE3 incrementándose en un 13.10%.

Discusión

Parámetros Productivos

En el presente estudio, la suplementación con fitasa en dietas reducidas en energía metabolizable mejoró significativamente el rendimiento productivo de los pollos de engorde. Los tratamientos con fitasa mostraron una mayor ganancia de peso (GP) y mejor conversión alimenticia (CA) en comparación con las dietas sin enzima, lo cual es consistente con diversas investigaciones que han reportado mejoras similares en dietas con restricción energética suplementadas con fitasa, como el estudio realizado por Ennis et al., (2020) quienes evidenciaron el efecto positivo de la fitasa sobre los parámetros productivos, ya que al incluir fitasa en dietas con reducciones de hasta 100 kcal/kg de energía metabolizable, no se vio comprometido el crecimiento ni la eficiencia alimenticia de las aves. Esta capacidad de la fitasa para sustituir parcialmente la densidad energética de la dieta, se debe a que aumenta la disponibilidad de nutrientes endógenos, ya que contribuye a la liberación de fósforo, calcio y otros nutrientes ligados al fitato, mejorando la biodisponibilidad de dichos elementos, y favoreciendo una digestión más eficiente.

Asimismo, otros estudios reportan que se han observado que la combinación de fitasa con carbohidrasas puede generar sinergias funcionales, especialmente en dietas a base de maíz y soya, al permitir una mejor ruptura de la matriz vegetal y facilitar el acceso de la fitasa a sus sustratos (França et al., 2023). Por lo tanto, la inclusión de fitasa en dietas de bajo costo que tengan deficiencia de energía representa una alternativa viable y eficiente para mantener el rendimiento zootécnico.

Digestibilidad de Nutrientes

Los coeficientes de digestibilidad obtenidos a los 21 días en este estudio reflejan un impacto positivo de la fitasa sobre la digestibilidad de la proteína total (CDPT), el extracto etéreo

(CDEE) y la energía bruta (CDEB). Estos hallazgos coinciden con trabajos recientes en los que la fitasa incrementó la digestibilidad ileal estandarizada de aminoácidos esenciales y mejoró la retención energética y se deben a la liberación de fósforo y minerales asociados a los complejos de fitato, los cuales interfieren negativamente con la absorción de aminoácidos y la eficiencia enzimática digestiva energética (Thanabalan et al., 2021). También, la mejora en el CDEE sugiere que la acción enzimática sobre el fitato favorece indirectamente la absorción lipídica, posiblemente al modular la disponibilidad de calcio en el lumen intestinal, el cual es un elemento esencial para la emulsificación de grasas.

Por otro lado, a los 42 días de edad, los efectos positivos de la fitasa sobre la digestibilidad tendieron a atenuarse, lo cual podría deberse a una mayor eficiencia enzimática endógena o al efecto decreciente del fitato con la madurez intestinal. No obstante, algunos nutrientes como el extracto etéreo y la energía bruta continuaron mostrando mejoras con la suplementación enzimática, lo que sugiere que el efecto de la fitasa puede mantenerse en parte durante todo el ciclo productivo.

El comportamiento cuadrático observado en el CDEE a los 42 días indica que existe una dosis óptima de fitasa a partir de la cual no se obtienen beneficios adicionales, lo cual fue reportado por Cozannet et al., (2023) al evaluar diferentes niveles de fitasa y su efecto dosis-respuesta, observando que la saturación en la acción enzimática con dosis elevadas en dosis mayores a 2000 FTU, lo que también fue respaldado en otros estudios con pollos de engorde donde se evaluaron dosis mayores a 2500 FTU (House et al, 2024; Sobotik et al, 2023).

Viabilidad Económica

La mayor utilidad por ave obtenida en los tratamientos experimentales puede explicarse por la combinación de una mejor eficiencia alimenticia y una reducción efectiva en los egresos,

sin detrimento del ingreso por venta. Este resultado está respaldado por estudios previos donde se ha demostrado que la fitasa permite reducir la inclusión de fosfatos inorgánicos sin comprometer el rendimiento (House et al., 2024), lo cual representa una ventaja competitiva en relación con el precio de insumos principalmente cuando estos se encuentran elevados.

Adicionalmente, la mejora en la eficiencia de absorción del fósforo y otros nutrientes reduce la carga de excreción de estos elementos al medio ambiente, disminuyendo el impacto ambiental de la producción. Esta ventaja no es solo económica sino también ambiental, especialmente en países con regulaciones ambientales estrictas sobre la contaminación por fósforo en suelos y aguas. En consecuencia, la fitasa no solo representa una herramienta para la eficiencia productiva, sino también para la sostenibilidad ambiental del sistema avícola (Sacakli et al., 2025).

Conclusiones

La inclusión de la fitasa en las dietas de pollos de engorde, mejora la digestión de nutrientes como la proteína, extracto etéreo y energía, teniendo un efecto positivo sobre el desempeño productivo y la rentabilidad económica lo que hace de esta enzima una herramienta estratégica para optimizar la eficiencia del sistema productivo

Reducir la energía metabolizable de la dieta a 2970.8 kcal/kg en la fase de iniciación (1-21 días) y a 3134.6 kcal/kg en la fase de engorde (21 a 42 días) permite alcanzar el mayor coeficiente de digestibilidad de la grasa bruta (extracto etéreo), valor determinado a partir de la respuesta cuadrática observada en los datos experimentales. Además, esta reducción energética favorece un incremento progresivo en el coeficiente de digestibilidad de la proteína, el cual mostró una respuesta lineal en función de la disminución de la energía metabolizable según el modelo de regresión

Las dietas experimentales DE1 y DE3 mostraron una clara ventaja económica sobre el tratamiento control, combinando menores egresos con mayores ingresos de venta. En particular, DE3 resulta ser la opción más rentable, con la mayor utilidad bruta (USD 2.979) y la mayor ganancia adicional frente a CP1 (+USD 0.345), sin aumentar los costos de producción. Esto sugiere que la estrategia de formulación de DE3 podría adoptarse como una alternativa económicamente viable en sistemas de producción similares.

Recomendaciones

Se recomienda para nuevas investigaciones, evaluar la dosis de inclusión, teniendo en cuenta que entre 1000 y 1500 FTU/kg se puede favorecer la relación costo-beneficio, mientras que dosis más altas pueden perjudicar el desempeño productivo.

Se recomienda implementar un análisis de flujo de caja proyectado para evaluar la rentabilidad de dietas avícolas suplementadas con fitasa y reducidas en energía metabolizable, considerando las variaciones regionales en costos y precios de venta. Esta herramienta permite estimar indicadores clave como la utilidad por ave, el costo por kilo producido y el punto de equilibrio, proporcionando una visión integral del desempeño económico del sistema.

Referencias Bibliográficas

- Abarca Alulema, L. A. (2021). Efectos de las enzimas digestivas en la producción de pollos de engorde [Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. Repositorio ESPOCH. <http://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/15644>
- Angulo, L. (2016). Proyectos formulación y evaluación. Perú. Editorial MACRO EIRL
- AOAC International. (2016). Official methods of analysis of AOAC International (20th ed.). AOAC Int.
- Banco de la República. (2025). Tasa de cambio del peso colombiano (TRM) frente al dólar estadounidense (USD) [Base de datos]. https://suameca.banrep.gov.co/estadisticas-economicas/informacionSerie/1/tasa_cambio_peso_colombiano_trm_dolar_usd
- Bist, R. B., Bist, K., Poudel, S., Subedi, D., Yang, X., Paneru, B., Mani, S., Wang, D., & Chai, L. (2024). Sustainable poultry farming practices: A critical review of current strategies and future prospects. *Poultry Science*, 103(12), 104295. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2024.104295>
- Chicaiza Tenorio, M y Leiva Pacheco, A. (2020). Evaluación del efecto de cuatro niveles de fitasa exógena sobre el desempeño productivo y biodisponibilidad de P y Ca en pollos broilers línea Ross 308. Quito: UCE. Disponible en: <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/22192>
- Choi, P., Tajudeen, H., Mun, J., et al. (2025). Phytase and nutrient-energy matrix: A strategic approach to enhancing the performance of broiler chickens fed a corn-soybean meal-based diet. *Animal Bioscience*, 38(3), 522–529. <https://doi.org/10.5713/ab.24.0565>
- Cozannet, P., Jlali, M., Moore, D., Archibeque, M., & Preynat, A. (2023). Evaluation of phytase dose effect on performance, bone mineralization, and prececal phosphorus digestibility in

- broilers fed diets with varying metabolizable energy, digestible amino acids, and available phosphorus concentration. *Poultry Science*, 102(7), 102755.
<https://doi.org/10.1016/j.psj.2023.102755>
- de Léo, R. A. R., Valentim, J. K., de Sousa Ferreira, R., de França, T. P., Ribeiro, A. M., Gomes, K. M., de Almeida, A. A., & Calderano, A. A. (2025). Comparative efficacy of commercial phytases on phosphorus availability for broilers. *Tropical Animal Health and Production*, 57(2), 93. <https://doi.org/10.1007/s11250-025-04343-5>
- Dersjant-Li, Y., Abdollahi, M. R., Bello, A., Waller, K., Marchal, L., & Ravindran, V. (2022). Effects of a novel consensus bacterial 6-phytase variant on the apparent ileal digestibility of amino acids, total tract phosphorus retention, and tibia ash in young broilers. *Journal of Animal Science*, 100(2), skac037. <https://doi.org/10.1093/jas/skac037>
- Ennis, C. E., Jackson, M., Gutierrez, O., Cantley, S., & Wamsley, K. G. S. (2020). Phytase and carbohydrase inclusion strategies to explore synergy within low-energy diets to optimize 56-day male broiler performance and processing. *Journal of Applied Poultry Research*, 29(4), 1045–1067. <https://doi.org/10.1016/j.japr.2020.09.013>
- FENAVI, Federación Nacional de Avicultores de Colombia. (2025). Precios mayoristas de pollo y huevo en centrales mayoristas. <https://fenavi.org/estadisticas/precios-mayoristas-pollo-y-huevo-p/#1633701522780-959e502a-6d35>
- França, T. P., Ferreira, R. S., Leo, R. A. R., de Oliveira, C. H., Dias, K. M. M., Gomes, K. M., Costa, L. S., & Teixeira Albino, L. F. (2023). Effects of carbohydrase and phytase enzymes supplementation within low energy diets on performance and energy utilization of broiler chickens. *Livestock Science*, 274, 105271.
<https://doi.org/10.1016/j.livsci.2023.105271>

- Giacobbo, F. C. N., Eyng, C., Nunes, R. V., de Souza, C., Teixeira, L. V., Pilla, R., Suchodolski, J. S., & Bortoluzzi, C. (2021). Influence of enzyme supplementation in the diets of broiler chickens formulated with different corn hybrids dried at various temperatures. *Animals*, 11(3), 643. <https://doi.org/10.3390/ani11030643>
- House, G. M., Stiewert, A. M., Bello, A., Dersjant-Li, Y., Marchal, L., & Archer, G. S. (2024). Effects of a novel consensus bacterial 6-phytase variant on growth performance and bone ash of broilers fed complex diets highly deficient in minerals, digestible amino acids, and energy through 42 days of age. *Animals*, 14(11), 1563. <https://doi.org/10.3390/ani14111563>
- Lee, C., Kim, H. W., Kwon, C. H., Han, G. P., Lee, J. H., & Kil, D. Y. (2024). Effects of decreasing phosphorus concentrations in diets and phytase supplementation on growth performance, stress response, and intestinal health in broiler chickens. *Poultry Science*, 103(12), 104418. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2024.104418>
- Lim, C. I., Choo, H. J., & Park, J. H. (2024). Effect of phytase supplementation on performance, fecal excretion, and compost characteristics in broilers fed diets deficient in phosphorus and calcium. *Journal of Animal Science and Technology*, 66(1), 93–102. <https://doi.org/10.5187/jast.2023.e59>
- Mirabile, C. G., Rocha, G. C., Albino, L. F. T., Tavernari, F. C., Brito, C. O., Nunes, R. A., Oliveira, C. H., Dias, K. M. M., Vale, B. G., & Calderano, A. A. (2020). True ileal phosphorus digestibility of soybean meal for male and female broiler chickens. *Animal Feed Science and Technology*, 270, 114649. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2020.114649>

- Paul, S. S., Rao, S. V. R., Chatterjee, R. N., Raju, M. V. L. N., Prakash, B., Yadav, S. P., Kannan, A., Reddy, G. N., Kumar, V., & Kumar, P. S. P. (2025). Evaluation of phytase superdosing and its combinations with other additives as an alternative to antibiotic growth promoters in broiler chickens raised under deep litter system. *Frontiers in Animal Science*, 6, Article 1539543. <https://doi.org/10.3389/fanim.2025.1539543>
- Philippi, H., Sommerfeld, V., Windisch, W., Olukosi, O. A., Monteiro, A., & Rodehutschord, M. (2023). Interactions of zinc with phytate and phytase in the digestive tract of poultry and pigs: A review. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 103(15), 7333–7342. <https://doi.org/10.1002/jsfa.12879>
- Ribeiro, V., Salguero, S. C., Gomes, G., Barros, V. R. S. M., Silva, D. L., Barreto, S. L. T., et al. (2016). Efficacy and phosphorus equivalency values of two bacterial phytases (*Escherichia coli* and *Citrobacter braakii*) allow the partial reduction of dicalcium phosphate added to the diets of broiler chickens from 1 to 21 days of age. *Animal Feed Science and Technology*, 221(Pt A), 226–233. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2016.09.008>
- Rodehutschord, M., Sommerfeld, V., Kühn, I., & Bedford, M. R. (2022). Phytases: Potential and limitations of phytate degradation in the digestive tract of pigs and poultry. In CABI (Ed.), *Phosphorus and phytase in animal nutrition* (pp. 124–152). CABI. <https://doi.org/10.1079/9781789241563.0008>
- Sacakli, P., Ramay, M. S., Ceylan, A., Çınar, Ö. Ö., Elibol, F. K. E., Harijaona, J. A., Shastak, Y., Ader, P., Feuerstein, D., & Calik, A. (2025). Effects of supplemental hybrid bacterial 6-phytase in low-energy, inorganic phosphorus-free hen diets on laying performance, egg

quality, and bone strength. *PLoS ONE*, 20(4), e0322135.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0322135>

Sobotik, E. B., House, G. M., Stiewert, A. M., Bello, A., Dersjant-Li, Y., Shoesmith, E., Remus, J., & Archer, G. S. (2023). Evaluating a novel consensus bacterial 6-phytase variant on growth performance of broilers fed U.S. commercial diets deficient in nutrients and energy through 63 days of age. *Journal of Animal Science*, 101(1), skac407.

<https://doi.org/10.1093/jas/skac407>

Sureshkumar, S., Song, J., Sampath, V., & Kim, I. H. (2023). Exogenous enzymes as zootechnical additives in monogastric animal feed: A review. *Agriculture*, 13(12), 2195.

<https://doi.org/10.3390/agriculture13122195>

Thanabalan, A., Mohammadigheisar, M., & Kiarie, E. G. (2021). Amino acids and energy digestibility in extruded or roasted full fat soybean fed to broiler chickens without or with multienzyme supplement containing protease, phytase, and fiber degrading enzymes.

Poultry Science, 100(12), 101511. <https://doi.org/10.1016/j.psj.2021.101511>

Trela, J., Kierończyk, B., Aslam, M. R., Szymkowiak, P., Rawski, M., Juśkiewicz, J., & Józefiak, D. (2024). *Bacillus licheniformis* and phytase combination in broiler chicken diets: Effects on growth performance, digestibility coefficients, gut microbiome activities, and bone quality. *Livestock Science*, 289, 105586.

<https://doi.org/10.1016/j.livsci.2024.105586>

Vlaicu, P. A., Untea, A. E., & Oancea, A. G. (2024). Sustainable poultry feeding strategies for achieving zero hunger and enhancing food quality. *Agriculture*, 14(10), 1811.

<https://doi.org/10.3390/agriculture14101811>

- Wang, C., Yuan, T., Yang, J., Zheng, W., Wu, Q., Zhu, K., Mou, X., Wang, L., Nie, K., Li, X., & Zhu, Y. (2022). Responses of combined non-starch polysaccharide enzymes and protease on growth performance, meat quality, and nutrient digestibility of yellow-feathered broilers fed with diets with different crude protein levels. *Frontiers in Veterinary Science*, 9, 946204. <https://doi.org/10.3389/fvets.2022.946204>
- Yu, M., Oketch, E. O., Hong, J.-S., Chaturanga, N. C., Seo, E., Park, H., Vasanthakumari, B. L., Lee, H., & Heo, J.-M. (2024). Efficacy and equivalency of phytase for available phosphorus in broilers fed an available phosphorus-deficient diet. *Animals*, 14(1), 41. <https://doi.org/10.3390/ani14010041>