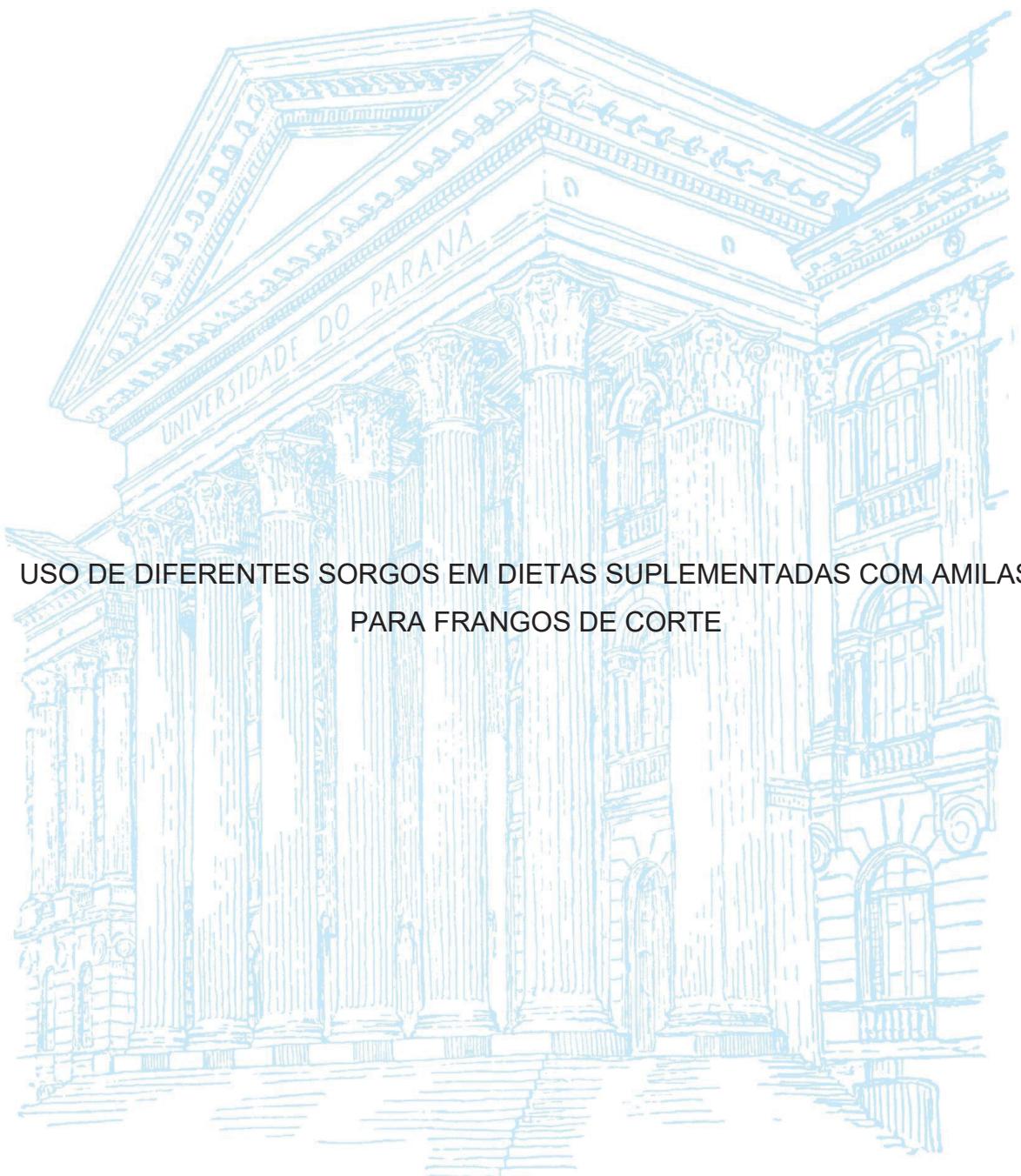


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ANA CAROLINA BRITTO DOI



USO DE DIFERENTES SORGOS EM DIETAS SUPLEMENTADAS COM AMILASE
PARA FRANGOS DE CORTE

CURITIBA

2025

ANA CAROLINA BRITTO DOI

**USO DE DIFERENTES SORGOS EM DIETAS SUPLEMENTADAS COM
AMILASE PARA FRANGOS DE CORTE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Zootecnia, Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Zootecnia.

Orientador: Prof. Dr. Alex Maiorka

CURITIBA

2025

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS

Doi, Ana Carolina Britto

Uso de diferentes sorgos em dietas suplementadas com amilase para frangos de corte / Ana Carolina Britto Doi. – Curitiba, 2025.

1 recurso online: PDF.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Zootecnia.

Orientador: Prof. Dr. Alex Maiorka

1. Sorgo. 2. Dieta. 3. Amilase. 4. Frango de Corte. I. Maiorka, Alex. II. Universidade Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Zootecnia. III. Título.

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ZOOTECNIA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **ANA CAROLINA BRITTO DOI**, intitulada: **Uso de diferentes sorgos em dietas suplementadas com amilase para frangos de corte**, sob orientação do Prof. Dr. **ALEX MAIORKA**, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestra está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 04 de Agosto de 2025.

Assinatura Eletrônica

25/08/2025 13:45:31.0

ALEX MAIORKA

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

25/08/2025 15:58:15.0

VINICIUS GONSALES SCHRAMM

Avaliador Externo (HUBBARD DO BRASIL)

Assinatura Eletrônica

25/08/2025 14:05:22.0

CHAYANE DA ROCHA

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço aos meus avós, que são a base da minha vida. Seu amor incondicional, carinho e generosidade foram e sempre serão fundamentais na minha vida.

Agradeço aos meus pais, Arthur e Marceli, por todo o apoio, incentivo e compreensão ao longo dessa jornada.

A Juba e ao Victor, meus irmãos, que sempre estiveram comigo, cada um do seu jeito, tornando tudo mais leve ao longo desse tempo.

Ao meu orientador, Alex Maiorka, pela orientação, paciência e confiança ao longo de todo esse processo. Foi uma grande oportunidade poder aprender e evoluir com sua orientação ao longo desse período.

Às professoras, Simone, Ananda e Chay, sou muito grata por todo o apoio, aprendizado e incentivo que recebi de vocês.

Aos meus colegas do LEPNAN, por toda ajuda e companheirismo durante todo o meu tempo de estágio e mestrado.

A Lorennna, minha melhor amiga, obrigada por estar ao meu lado em tantos momentos, por me ouvir, rir e caminhar junto comigo nessa jornada. Sua amizade é e sempre será tudo para mim.

A Mary, minha alma gêmea de vida, amiga para todas as horas, obrigada por ser abrigo, força e meu segundo neurônio. Ter você por perto tornou e torna tudo melhor.

Ao CNPq, pela concessão da bolsa de estudo.

A JBS e a DSM pelo fornecimento de insumos para a realização do insumo e apoia a pesquisa.

A todos que de alguma forma contribuíram e fizeram parte dessa jornada, muito obrigada!

“Nada que vale a pena é fácil”.
Nicholas Sparks

RESUMO

O uso de sorgo em dietas para frangos de corte tem se mostrado uma alternativa viável e eficiente, devido à sua disponibilidade e baixo custo, sendo uma fonte de energia para a alimentação de frangos de corte. Diante disso, o presente estudo foi conduzido com o objetivo de avaliar o efeito do uso de grãos de sorgo e a inclusão de amilase exógena em dietas para frangos de corte durante o período de 1 a 21 dias de idade. Um total de 256 frangos de corte machos de um dia de idade foram distribuídos aleatoriamente em 4 tratamentos com 8 repetições de 8 aves por unidade experimental em um delineamento inteiramente casualizado em esquema fatorial 2 x 2, sendo 2 variedades do grão de sorgo vermelho sem tanino (sorgo A e B), com ou sem a inclusão da enzima amilase (0 e 90 g/t) às dietas. As dietas experimentais eram a base de sorgo e farelo de soja e fornecidas sob a forma farelada. Aos 1, 7 e 21 dias de idade as aves, as rações e as sobras foram pesadas para determinar consumo de ração (CR), ganho de peso (GP) e conversão alimentar (CA). Aos 18, 19 e 20 dias de idade foram coletas das excretas para determinação dos parâmetros de digestibilidade metabolizável ileal aparente. Aos 21 dias de idade foi coletado digesta ileal de quatro aves por repetição para avaliar a digestibilidade ileal aparente da matéria seca (MS), proteína bruta (PB) e energia digestível ileal (EDI). Os dados foram submetidos a ANOVA e, quando significativo, as médias eram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de significância. O tipo de sorgo não afetou o desempenho e a digestibilidade dos frangos de corte. Houve interação entre os tratamentos para a variável de CA, onde os animais alimentados com o sorgo A e a inclusão da enzima amilase apresentaram uma melhor conversão alimentar que os animais alimentados com o mesmo sorgo sem a enzima ($P<0,05$) no período de 1 a 21 dias de idade. A suplementação com amilase na dieta foi a única variável que proporcionou melhora nos parâmetros de digestibilidade ileal aparente ($P<0,05$), evidenciada pela melhoria na digestibilidade da MS, PB e EDI nas aves. Para os coeficientes de digestibilidade metabolizável ileal aparente, só houve efeito da enzima amilase, havendo uma diminuição do coeficiente da MS e da PB.

Palavras-chave: Enzima exógena; Frangos de corte; Grão de sorgo; Kafirina.

ABSTRACT

The use of sorghum in broiler diets has proven to be a viable and efficient alternative due to its availability and low cost, serving as an energy source for broiler feed. Therefore, the present study was conducted to evaluate the effect of using sorghum grains and the inclusion of exogenous amylase in diets for broilers during the period from 1 to 21 days of age. A total of 256 one-day-old male broilers were randomly distributed into 4 treatments with 8 replicates of 8 birds per experimental unit in a completely randomized design in a 2 x 2 factorial scheme, consisting of 2 varieties of red, tannin-free sorghum grains (sorghum A and B), with or without the inclusion of amylase enzyme (0 and 90 g/t) in the diets. The experimental diets were based on sorghum and soybean meal and were provided in a ground form. At 1, 7, and 21 days of age, the birds, feed, and leftovers were weighed to determine feed intake (FI), weight gain (WG), and feed conversion ratio (FCR). On days 18, 19, and 20 of age, excreta were collected to determine apparent ileal metabolizable digestibility parameters. On day 21, ileal digesta from four birds per replicate were collected to evaluate apparent ileal digestibility of dry matter (DM), crude protein (CP), and ileal digestible energy (IDE). Data were analyzed by ANOVA and, when significant, means were compared using Tukey's test at 5% significance. Sorghum type did not affect the performance or digestibility of broilers. There was an interaction between treatments for FCR, where birds fed sorghum A with amylase inclusion showed better feed conversion than birds fed the same sorghum without the enzyme ($P<0.05$) during the period from 1 to 21 days of age. Enzyme supplementation was the only variable that improved apparent ileal digestibility parameters ($P<0.05$), evidenced by improvements in the digestibility of DM, CP, and IDE in the birds. For the apparent ileal metabolizable digestibility coefficients, only the amylase enzyme had an effect, resulting in a decrease in the coefficients for DM and CP.

Keywords: Broiler chickens; Exogenous enzyme; Grain sorghum; Kafirin.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema ilustrativo da estrutura e das frações do grão de sorgo. Fonte: Adaptado de Chandrashekhar & Mazhar, 1999.	21
Figura 2. A - Microscopia eletrônica de varredura do endosperma vítreo do sorgo mostrando o amido (s) e os corpos proteicos (pb) compactados. B – Microscopia eletrônica de varredura do endosperma farináceo mostrando o amido (s) e os corpos proteicos (pb) mais soltos. Fonte: Duodu et al. (2002).	24
Figura 3. Microscopia eletrônica de varredura (1000x) do endosperma vítreo (A) e farináceo (B) do sorgo. Fonte: Dados próprios.....	26
Figura 4. Desempenho zootécnico. Consumo de ração (A), ganho de peso (B) e conversão alimentar (C). A linha horizontal representa a média da variável e a linha vertical representa o desvio padrão.	50
Figura 5. Digestibilidade ileal aparente. Coeficiente de digestibilidade ileal aparente da matéria seca (A), coeficiente de digestibilidade ileal aparente da proteína bruta (B) e energia digestível ileal (C). A linha horizontal representa a média da variável e a linha vertical representa o desvio padrão.	52
Figura 6. Digestibilidade metabolizável ileal aparente. Coeficiente de digestibilidade metabolizável ileal aparente da matéria seca (A), coeficiente de digestibilidade ileal metabolizável aparente da proteína bruta (B) e energia metabolizável aparente (C). A linha horizontal representa a média da variável e a linha vertical representa o desvio padrão.	54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química dos sorgos A e B	40
Tabela 2 – Composição nutricional das dietas experimentais (baseada na matéria seca).....	41
Tabela 3 – Quantificação de kafirinas dos sorgos A e B.	47
Tabela 4. Dureza do sorgo A e sorgo B.	48
Tabela 5. Efeito do sorgo e da inclusão de amilase exógena na dieta no consumo de ração (CR), no ganho de peso (GP) e na conversão alimentar (CA) de frangos de corte de 1 a 21d de idade.....	49
Tabela 6 - Efeito do sorgo e da inclusão de amilase exógena na dieta no coeficiente de digestibilidade ileal aparente da matéria seca (CDIA MS), proteína bruta (CDIA PB) e energia digestível ileal (EDI) em frangos de corte de 1 a 21d de idade.	51
Tabela 7 - Efeito do sorgo e da inclusão de amilase exógena na dieta no coeficiente de digestibilidade metabolizável ileal aparente da matéria seca (CDMA MS), proteína bruta (CDMA PB) e energia metabolizável aparente (EMA) em frangos de corte de 1 a 21d de idade.	53

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

CA - Conversão alimentar

CDIA - Coeficiente de digestibilidade ileal aparente

CDMA – Coeficiente de metabolizabilidade ileal aparente

CIA – Cinzas insolúveis em ácido

CR - Consumo de ração

DGM – Diâmetro geométrico médio

DPG – Desvio padrão geométrico

EB – Energia bruta

EDI - Energia digestível ileal

EMA – Energia metabolizável aparente

FAOSTAT - Food and Agriculture Organization Statistics

GP - Ganho de peso

HCl - Ácido clorídrico

kcal - Quilocalorias

kg - Quilogramas

kgf - Quilograma-força

LSE – Laboratório de Segurança Alimentar

m – Metros

mg – Miligrama

ml - Mililitros

mm – Milímetros

MS - Matéria seca

nm – Nanômetros

PB - Proteína bruta

pH – Potencial de hidrogênio

pmol – Pico mol

rpm – Rotações por minuto

t – Toneladas

USDA – United States Department of Agriculture

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. CAPÍTULO 1 – REVISÃO DE LITERATURA	17
2.1. Grãos energéticos.....	17
2.2. Sorgo (<i>Sorghum bicolor</i>)	19
2.3. Kafirinas	22
2.4. Enzimas exógenas.....	25
REFERÊNCIAS.....	28
1. CAPÍTULO 2 – FORNECIMENTO DE SORGOS EM DIETAS PARA FRANGOS DE CORTE SUPLEMENTADAS OU NÃO COM AMILASE	35
1.1. INTRODUÇÃO	37
1.2. MATERIAL E MÉTODOS.....	39
1.2.1. ANIMAIS E INSTALAÇÕES	39
1.2.2. DELINEAMENTO EXPERIMENTAL.....	39
1.2.3. COMPOSIÇÃO NUTRICIONAL DOS SORGOS	40
1.2.4. DIETAS EXPERIMENTAIS	40
1.2.5. ANÁLISE DE TANINO.....	42
1.2.6. QUANTIFICAÇÃO DE KAFIRINAS	43
1.2.7. ANÁLISE DUREZA DOS SORGOS	45
1.2.8. DESEMPENHO ZOOTÉCNICO	45
1.2.9. ENSAIO DE DIGESTIBILIDADE ILEAL.....	45
1.2.10. ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	46
1.3. RESULTADOS.....	47
1.3.1. ANÁLISE DE TANINO.....	47
1.3.2. QUANTIFICAÇÃO DE KAFIRINAS	47
1.3.3. DUREZA DOS SORGOS	48
1.3.4. DESEMPENHO ZOOTÉCNICO	48

1.3.5.	DIGESTIBILIDADE ILEAL APARENTE	50
1.3.6.	DIGESTIBILIDADE METABOLIZÁVEL ILEAL APARENTE	52
1.4.	DISCUSSÃO	55
1.5.	CONCLUSÃO	60
	REFERÊNCIAS.....	61

1. INTRODUÇÃO

A elevada dependência da avicultura industrial pelo milho, principal cereal utilizado nas dietas convencionais de frangos de corte (Ahmad et al., 2024), gera vulnerabilidade econômica diante de flutuações de preço e disponibilidade no mercado interno e externo. Esse quadro é particularmente evidente em países que lideram tanto a produção de carne de frango quanto a de milho, como Brasil e Estados Unidos. No caso brasileiro, maior exportador mundial de frango e terceiro maior produtor de milho, estima-se que mais da metade da produção nacional do cereal seja destinada à alimentação animal, sobretudo aves e suínos, evidenciando a forte interdependência entre essas cadeias. Já nos Estados Unidos, também grandes produtores e exportadores de carne de frango, a avicultura mostra-se igualmente sensível às oscilações de preço e oferta do milho, agravadas pela competição do grão com outros usos, como a produção de etanol (ABPA, 2025; Embrapa, 2021).

Além disso, o cultivo do milho exige condições agronômicas mais favoráveis, como maior demanda hídrica, o que pode comprometer sua produtividade em regiões sujeitas à seca ou em expansão da fronteira agrícola (Amaral et al., 2016). Diante disso, cresce o interesse por diferentes fontes economicamente viáveis de energia, que possam substituir parcial ou totalmente o milho sem comprometer o desempenho produtivo das aves, como é o caso do sorgo (Batonon-Alavo et al., 2015a; Wang et al., 2025).

Considerando as demandas por fontes alternativas de energia e proteína, é fundamental que os ingredientes utilizados apresentem composição bromatológica que atenda os requerimentos nutricionais das aves, com adequada digestibilidade dos nutrientes, especialmente do amido, e baixa presença de fatores antqualitativos. A viabilidade nutricional e econômica desses ingredientes deve ser avaliada, levando-se em conta não apenas a qualidade nutricional, mas também aspectos como a disponibilidade regional, o custo de produção e as variações climáticas que possam influenciar sua oferta.

No entanto, diante das flutuações na disponibilidade de grãos e do aumento significativo nos custos dos ingredientes, torna-se imprescindível a busca por fontes alternativas de matérias-primas para mitigar os custos da

produção animal (Sasia et al., 2023). Nesse contexto, o grão de sorgo surge como uma alternativa promissora de fonte energética em dietas para frangos de corte.

O sorgo (*Sorghum bicolor*) apresenta menor valor de mercado que o milho e destaca-se como uma cultura resiliente à seca e altamente adaptável a diferentes condições climáticas (Bueno et al., 2024), onde sua rusticidade contribui para o seu menor custo de produção. O mesmo possui um perfil nutricional semelhante ao do milho (Fernandes et al., 2014; Moritz, Krombeen, et al., 2022), sendo uma boa alternativa como fonte de energia nas dietas de frangos de corte (Pereira Filho e Rodrigues, 2015; Ochieng et al., 2020). Entretanto, uma de suas principais limitações é a sua baixa digestibilidade (Selle et al., 2010). Estudos comparativos demonstram que o sorgo apresenta coeficientes de digestibilidade aparente inferiores aos do milho, tanto para a matéria seca (85,49% vs. 82,61%), quanto para a proteína bruta (82,80% vs. 76,56%) e para a energia bruta (83,37% vs. 79,44%) (Marques et al., 2007). Resultados semelhantes foram observados por Parreira Filho et al. (2020), que relataram coeficiente de digestibilidade da matéria seca (CDMS) de 85,90% para o milho e 81,83% para o sorgo, bem como menor coeficiente de digestibilidade da fibra em detergente neutro (CDFDN) de 74,75 vs 70,70.

Essa característica pode ser atribuída principalmente a presença das kafirinas, proteínas de reserva denominadas de prolaminas, que se encontram no endosperma do grão (Belton et al., 2006), associadas aos grânulos de amido através de ligações dissulfídicas covalentes que dificultam o acesso aos grânulos pelas enzimas endógenas e reduzem a sua digestibilidade (Santos, 2020).

Dessa forma, embora o sorgo seja uma fonte energética promissora, seu potencial nutricional para os frangos de corte pode ser limitado pela sua menor digestibilidade. Assim, torna-se necessário adotar estratégias que melhorem seu aproveitamento, sendo o uso de enzimas exógenas uma abordagem para otimizar esse processo. Durante as primeiras semanas de vida, o sistema digestório das aves ainda é imaturo, o que resulta em uma limitação na síntese de enzimas digestivas pancreáticas (Nitsan et al., 1991). Assim, a adição de enzimas exógenas pode compensar a menor secreção de enzimas endógenas,

favorecendo a digestão e o aproveitamento dos nutrientes presentes nos alimentos, incluindo o sorgo (Giacobbo et al., 2021).

O emprego crescente de enzimas exógenas, como a amilase e a protease, na alimentação de frangos de corte visa principalmente a otimização da digestibilidade dos nutrientes presentes na dieta (Leite et al., 2011). Sua ação engloba a capacidade de colaborar com as enzimas endógenas e, no caso da enzima amilase, por exemplo, favorecer o rompimento de amidos (Lima et al., 2007), proporcionando, assim, uma melhoria no desempenho dos animais (Gracia et al., 2003; Aderibigbe et al., 2020). Portanto, a inclusão da enzima amilase nas dietas à base de sorgo pode possuir o potencial de otimizar o desempenho das aves ao melhorar a digestibilidade do grão (Liu et al., 2015).

Considerando que a configuração do endosperma nos grãos de sorgo e a presença de kafirinas podem restringir a acessibilidade dos grânulos de amido, e levando em conta a limitação de pesquisas sobre o impacto da amilase em grãos de sorgo, o presente estudo tem como objetivo investigar o efeito do uso de sorgos na alimentação de frangos de corte e o efeito da inclusão enzima amilase nas dietas, com foco na digestibilidade das dietas e no desempenho dos animais.

2. CAPÍTULO 1 – REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Grãos energéticos

Na avicultura moderna, os ingredientes energéticos desempenham papel central na formulação de dietas balanceadas, sendo essenciais para atender às exigências fisiológicas e metabólicas dos frangos de corte em seus diferentes estágios de desenvolvimento. Embora não sejam nutrientes estritos, os ingredientes energéticos são o primeiro critério de ajuste nas formulações de rações, já que influenciam diretamente no consumo de alimento, no crescimento, na conversão alimentar e na eficiência produtiva das aves (Leeson & Summers, 2008; Sakomura & Rostagno, 2007).

Esses ingredientes são incorporados em elevadas proporções nas dietas, quando a exigência energética e proteica é mais intensa para sustentar o rápido desenvolvimento das aves. Nessas fases, a inclusão de milho, por exemplo, pode ultrapassar 60% da dieta (Rostagno et al., 2024). Esse alto nível de participação assegura adequada oferta de energia e proteínas, mas também exige atenção especial à qualidade nutricional dos ingredientes, à uniformidade da composição e à disponibilidade efetiva de nutrientes.

O amido, um carboidrato de reserva, é o principal componente energético nas dietas de frangos de corte, sendo encontrado em grandes quantidades nos grãos de cereais e tubérculos (Svihus, 2014; Valente Junior et al., 2024). O milho, devido à sua alta disponibilidade no Brasil, é o ingrediente energético mais utilizado nas formulações de rações para frangos de corte, apresentando uma composição rica em amido, que corresponde a cerca de 62% de sua composição. Além disso, alta densidade energética, com valores de energia metabolizável em torno de 3.296 kcal/kg (Rostagno et al., 2024).

Embora o milho apresente diversas vantagens, como alto teor de amido e excelente perfil energético, seu uso intensivo tem gerado desafios para a cadeia produtiva avícola brasileira. Fatores como as oscilações de preço, variações nas safras e a crescente demanda para a produção de biocombustíveis (ESALQ/BM&FBOVESPA, 2025; Zhang et al., 2022) têm contribuído para a instabilidade e pressão sobre a oferta do grão destinado à alimentação animal. Além disso, o aumento da demanda global por alimentos, combinado com o

crescimento populacional, tem levado ao aumento na produção de cereais, o que, por sua vez, eleva os preços desses ingredientes (Qi et al., 2022). Essa situação tem gerado grande impacto nos custos de produção, considerando que a alimentação representa cerca de 65-75% do custo total de produção na avicultura (Anjum et al., 2014).

Diante desse cenário, há um crescente interesse por ingredientes alternativos ou complementares que possam atender às exigências energéticas das aves com eficiência. Entre os principais grãos energéticos alternativos ao milho estão o sorgo, milheto, trigo e seus subprodutos, arroz quebrado, entre outros (Batonon-Alavo et al., 2015b; Leite et al., 2011; Truong et al., 2016; Wang et al., 2025). Os subprodutos de cereais apresentam composição nutricional e valor de energia metabolizável que variam de acordo com diversos fatores, como genética, ambiente, métodos de processamento e condições de armazenamento (Anjum et al., 2014). A inclusão de cereais alternativos e seus subprodutos nas dietas de frangos de corte, além de econômica, pode contribuir para a sustentabilidade do setor, atendendo à crescente demanda por alimentos sem sobrecarregar a produção de cereais principais, como milho, trigo e arroz (FAOSTAT, 2023).

Grãos como o sorgo, o trigo duro e o milheto possuem estruturas amiláceas mais resistentes à digestão, o que pode afetar a eficiência do aproveitamento energético, sendo importante que a digestibilidade desses ingredientes seja cuidadosamente avaliada nas dietas para garantir a eficácia energética (Selle et al., 2010; Truong et al., 2016). Essa resistência à digestão, frequentemente associada à presença de fatores antinutricionais pode interferir na absorção de nutrientes, reduzindo a eficácia do aproveitamento energético (Samtiya et al., 2020). A digestibilidade, portanto, deve ser um dos principais critérios na seleção de grãos energéticos alternativos para dietas de frangos de corte.

Além disso, a variação na energia metabolizável dos subprodutos de cereais pode ser influenciada por diversos fatores, como o método de processamento e as condições ambientais durante o cultivo e armazenamento (Anjum et al., 2014). Esses aspectos devem ser considerados ao determinar a

quantidade de subprodutos a ser incluída nas dietas, garantindo que as necessidades nutricionais das aves sejam atendidas de forma adequada.

Portanto, os ingredientes energéticos, incluindo cereais e seus subprodutos, desempenham papel central na formulação nutricional de frangos de corte. Sua seleção estratégica não só impacta diretamente os índices de produtividade e a eficiência de conversão alimentar, mas também pode ajudar a reduzir a dependência de um único grão, minimizando os impactos de flutuações de preço e variações sazonais, ao mesmo tempo que atende às exigências energéticas das aves

2.2. Sorgo (*Sorghum bicolor*)

O sorgo é o quinto cereal mais cultivado no Brasil, com produção de 4,9 milhões de toneladas na safra 2023/24, sendo os principais estados produtores Goiás, Minas Gerais e São Paulo. No cenário mundial, o Brasil ocupa a terceira posição entre os maiores produtores do grão, representando 8% do share mundial (USDA, 2024). O cereal é amplamente utilizado na alimentação humana em regiões como Ásia, África, China, Rússia e América Central; por outro lado, na América do Norte, América do Sul, Europa e Austrália, seu uso é prioritariamente destinado à alimentação animal (Fernandes et al., 2014).

A elevada resiliência agronômica do sorgo, decorrente de suas características xerofílicas, confere a essa cultura notável tolerância ao estresse hídrico, às altas temperaturas e à salinidade do solo. Tais atributos resultam em maior estabilidade produtiva em ambientes tropicais e semiáridos, como diversas regiões do Brasil (Francisco et al., 2017; Santos, 2020). Além disso, o sorgo apresenta ciclo relativamente curto, sistema radicular profundo e eficiente na exploração de água e nutrientes, bem como elevada eficiência no uso da água, fatores que explicam seu bom desempenho em condições de estresse climático (Guimarães et al., 2020). Essas características possibilitam seu cultivo em áreas marginais ou de menor aptidão agrícola, com menor necessidade de insumos e irrigação, o que o torna não apenas uma alternativa estratégica para a segurança alimentar, mas também uma opção economicamente atrativa para produtores em regiões suscetíveis à variabilidade climática.

Embora o sorgo não seja totalmente isento de micotoxinas, ele apresenta menor suscetibilidade à contaminação em comparação ao milho. Essa diferença decorre, em parte, de suas características morfofisiológicas, como o menor tamanho e a estrutura mais compacta do grão, além de ser cultivado com maior frequência em regiões de clima seco, menos favoráveis ao desenvolvimento de fungos toxigênicos. Ainda assim, espécies de *Fusarium*, *Aspergillus* e *Penicillium* podem colonizar o sorgo em condições de umidade elevada ou armazenamento inadequado, resultando na presença de fumonisinas, zearalenona e, em menor escala, aflatoxinas (Araújo et al., 2024). Portanto, embora represente uma alternativa mais segura frente ao milho, o uso do sorgo em rações animais continua a demandar monitoramento constante e práticas adequadas de manejo pós-colheita, assegurando sua qualidade e segurança como ingrediente na alimentação de aves. A utilização desse grão em fases críticas pode contribuir para otimizar os custos associados ao uso de aditivos ou adsorventes de micotoxinas, comumente empregados para mitigar riscos em dietas à base de milho.

Nutricionalmente, o sorgo apresenta composição química semelhante à do milho, embora variando conforme o genótipo e as condições de cultivo (Gomes, 2020). Seu teor de amido é, em média, de aproximadamente 66,6%, sendo predominantemente composto por amilopectina (70–80%) e amilose (20–30%). Além disso, a energia metabolizável do sorgo é estimada em cerca de 3.204 kcal/kg (Rostagno et al., 2024). A proteína bruta do grão varia entre 8% e 18%, enquanto o extrato etéreo pode variar de 1,7% a 3,7%. A fibra bruta no sorgo apresenta amplitude que vai de 0,35% a 6,6% (Antunes et al., 2007; Pereira Filho & Rodrigues, 2015). Esses valores tornam o sorgo uma excelente fonte energética, particularmente em dietas para frangos de corte. No entanto, é necessário realizar ajustes no perfil de aminoácidos digestíveis para otimizar seu aproveitamento nutricional pelas aves.

O grão de sorgo é morfológicamente composto por três principais estruturas: o pericarpo, o endosperma e o gérmen, cujas proporções típicas são, respectivamente, 6%, 84% e 10% (Pereira Filho & Rodrigues, 2015). O endosperma, a estrutura mais volumosa do grão, divide-se em duas frações: a farinácea, que é menos densa, e a vítreia, mais compacta e fisicamente

resistente. A fração vítreo concentra uma matriz proteica densa entrelaçada com polissacarídeos não amiláceos, o que dificulta a digestão das macromoléculas e, consequentemente, reduz a digestibilidade do amido (Sapaterro et al., 2011). Aproximadamente 80% das proteínas e 88% dos grânulos de amido estão localizados nesta região, o que a torna fator determinante na eficiência nutricional do grão (Scramin, 2013).

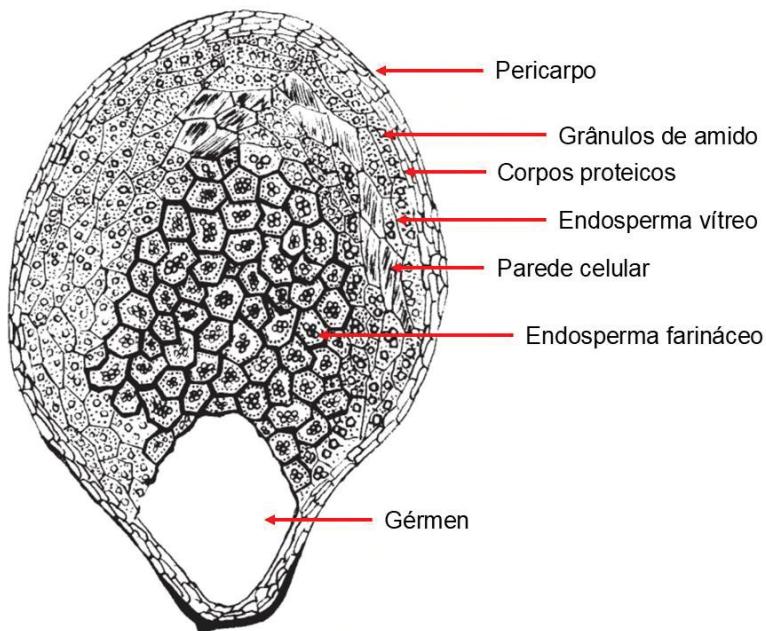


Figura 1. Esquema ilustrativo da estrutura e das frações do grão de sorgo. Fonte: Adaptado de Chandrashekhar & Mazhar, 1999.

Além disso, uma parte dos grânulos de amido está presente no mesocarpo, uma camada do pericarpo, o que contribui para o elevado conteúdo amiláceo do cereal (Nunes, 2000). No entanto, essa estrutura física compacta, especialmente em genótipos com maior proporção de endosperma vítreo, está associada à menor digestibilidade do amido, o que pode limitar o aproveitamento energético do sorgo em comparação ao milho (Cowieson, 2005; Svhuis, 2014).

A presença de taninos condensados em algumas cultivares pode reduzir a palatabilidade e interferir na digestibilidade das proteínas e do amido. Contudo, cultivares modernas de sorgo têm sido selecionadas com baixos teores de taninos, permitindo maior inclusão nas dietas sem prejuízo ao desempenho zootécnico (De souza et al., 2019; Ojediran et al., 2018). Para maximizar a utilização do sorgo em dietas de frangos, estratégias como processamento físico

(moagem e peletização) e o uso de enzimas exógenas específicas, como a amilase, têm sido empregadas com bons resultados (Abdollahi et al., 2018; Aderibigbe et al., 2020a)

Em formulações adequadas, o sorgo pode substituir parcial ou totalmente o milho sem prejuízo ao desempenho produtivo dos frangos, desde que a dieta seja ajustada quanto ao perfil de aminoácidos digestíveis, densidade energética e presença de aditivos tecnológicos. Estudos demonstram que a substituição de até 100% do milho por sorgo de boa qualidade não afeta significativamente o ganho de peso, a conversão alimentar e a viabilidade das aves (Ahmad et al., 2024; Liu et al., 2013; Sastré-Calderón et al., 2024), o que evidencia seu potencial como ingrediente estratégico, especialmente em contextos de pressão de custo.

Além dos aspectos nutricionais e econômicos, o sorgo também se destaca por suas vantagens ambientais, particularmente no que diz respeito à sustentabilidade. Uma de suas principais qualidades é a eficiência no uso da água, sendo significativamente mais eficiente que o milho, além dele também possuir uma notável tolerância à seca (Morgado, 2023). Além disso, o sorgo apresenta menor exigência de insumos químicos, como fertilizantes e pesticidas, quando comparado ao milho. Práticas de manejo integrado de pragas e o uso de biofertilizantes permitem reduzir a aplicação de agroquímicos, contribuindo para um menor impacto ambiental (Embrapa Milho e Sorgo, 2015). Sua resiliência climática também é outro ponto forte, pois o sorgo pode ser cultivado em condições climáticas variadas, incluindo regiões semiáridas, o que aumenta a segurança alimentar diante das mudanças climáticas (Pereira Filho & Rodrigues, 2015).

Diante disso, o sorgo configura-se como uma alternativa tecnicamente viável e agronomicamente resiliente ao milho na nutrição de frangos de corte.

2.3. Kafirinas

As proteínas vegetais são classificadas com base em sua solubilidade e estrutura, dividindo-se em albuminas, globulinas, glutelinas e prolaminas (Sim et al., 2021). As prolaminas, solúveis em soluções hidroetanólicas, são a principal classe de proteínas de reserva presentes nos grãos de cereais, como trigo, milho

e sorgo. No sorgo, essas prolaminas são chamadas de kafirinas, sendo a fração predominante da proteína total do grão (Ali et al., 2009; Carvalho, 2022). Além das kafirinas, o sorgo contém outras proteínas, como albuminas, globulinas e glutelinas, que, embora em menor quantidade, compõem a matriz proteica que interage com o amido e afeta a digestibilidade do grão (Carvalho, 2022).

As kafirinas são agrupadas em quatro subclasses principais: α -, β -, γ - e δ -kafirinas, que diferem em sua estrutura tridimensional, peso molecular e solubilidade. Essas variações impactam diretamente suas funcionalidades e digestibilidade (Abdelbost et al., 2023; Selle et al., 2010). A α -kafirina, a mais abundante, localiza-se no núcleo dos corpos proteicos, enquanto as γ - e β -kafirinas se concentram na periferia, formando uma barreira em torno do núcleo central (Abdelbost et al., 2023; Belton et al., 2006). Essas proteínas são altamente hidrofóbicas e apresentam várias ligações dissulfeto intra e intermoleculares, conferindo-lhes resistência estrutural e dificultando sua hidrólise enzimática no trato gastrointestinal (Monteiro, 2016).

No contexto nutricional para aves, a complexidade estrutural das kafirinas, combinada à sua baixa concentração de aminoácidos essenciais, especialmente a lisina, compromete a qualidade proteica do sorgo. A kafirina é particularmente rica em aminoácidos não polares, como prolina, leucina, alanina e ácido glutâmico, mas também apresenta deficiência de lisina, o que demanda suplementação específica na formulação das dietas para frangos de corte (de Mesa-Stonestreet et al., 2010).

Além de sua composição intrínseca, a organização espacial das kafirinas em corpos proteicos está intimamente associada à matriz do endosperma, particularmente à fração vítrea. Esses corpos se ligam aos grânulos de amido e à matriz de glutelinas, dificultando o acesso das enzimas digestivas tanto às proteínas quanto ao amido (Pasquali, 2014). Estudos indicam que cerca de 80% das α -kafirinas estão localizadas no núcleo desses corpos proteicos, enquanto as demais subclasses formam camadas periféricas, o que reforça a insolubilidade e a compactação da estrutura (Abdelbost et al., 2023).

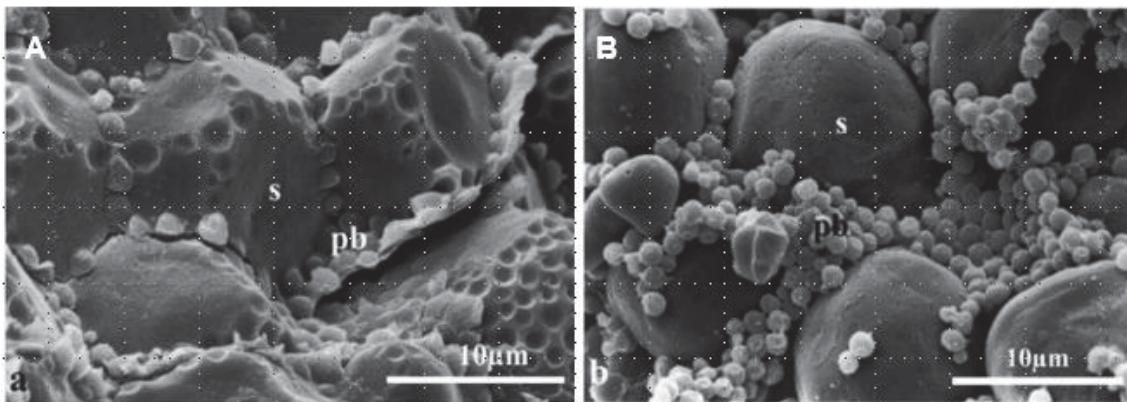


Figura 2. **A** - Microscopia eletrônica de varredura do endosperma vítreo do sorgo mostrando o amido (s) e os corpos proteicos (pb) compactados. **B** – Microscopia eletrônica de varredura do endosperma farináceo mostrando o amido (s) e os corpos proteicos (pb) mais soltos. Fonte: Duodu et al. (2002).

A digestibilidade das kafirinas é ainda mais prejudicada pela interação com compostos fenólicos, como os taninos condensados. Taylor et al. (2007) demonstraram que a γ -kafirina, devido à alta proporção de resíduos de prolina, forma ligações rápidas e estáveis com taninos, resultando em complexos proteína-polifenol que inibem a ação enzimática, dificultando a digestão não só da proteína, mas também do amido adjacente. A presença de kafirina ao redor dos grânulos de amido não só retarda a digestão, mas também limita a eficácia de enzimas exógenas adicionadas à dieta, exigindo estratégias de seleção de cultivares com menor vitreosidade e o uso criterioso de aditivos tecnológicos.

A concentração de kafirina no grão de sorgo varia amplamente entre cultivares, sendo influenciada tanto pelo genótipo quanto pelas condições agronômicas e metodologias analíticas. Em uma análise de 88 amostras de sorgo, Selle et al. (2010) observaram que a kafirina representava entre 37,5% e 72,9% do total de proteínas. Essa variação reflete diretamente no valor nutricional do grão, com cultivares com maior teor de kafirina e, especialmente, maior proporção de endosperma vítreo tendendo a apresentar menor digestibilidade ileal da proteína bruta e menor energia metabolizável aparente corrigida para nitrogênio (EMAn) em frangos de corte (Selle et al., 2014, 2020).

Essa baixa digestibilidade tem repercussões práticas importantes, já que aves alimentadas com sorgo de alto teor de kafirina apresentam redução no ganho de peso, piora na conversão alimentar e, em alguns casos, diminuição na retenção de nitrogênio. Isso implica a necessidade de ajustes nutricionais e tecnológicos, como a suplementação de enzimas exógenas (amilases e

proteases), modificação térmica do grão (extrusão, peletização) e a seleção de cultivares com maior proporção de endosperma farináceo e menor teor de kafirina (Selle et al., 2010; Taylor & Emmambux, 2010).

Portanto, a kafirina representa um dos principais desafios na utilização plena do sorgo na alimentação de frangos de corte. Seu papel como barreira física e bioquímica à digestão torna essencial a caracterização proteica do grão antes de sua inclusão em níveis elevados na dieta, especialmente em formulações que buscam otimizar o desempenho e o aproveitamento eficiente de nutrientes. A compreensão aprofundada da estrutura, distribuição e funcionalidade das kafirinas é crucial para o avanço do uso do sorgo como fonte energética e proteica na avicultura moderna.

2.4. Enzimas exógenas

As enzimas exógenas são classificadas como aditivos zootécnicos e desempenham papel essencial na suplementação da atividade digestiva de frangos de corte. Elas promovem a melhora na digestibilidade dos nutrientes, a quebra de fatores antinutricionais e o aumento do valor energético da dieta, contribuindo para o desempenho zootécnico e para a eficiência alimentar dos animais (Lima et al., 2007; Santos, 2020; Silva et al., 2016).

Sua utilização é especialmente estratégica durante as primeiras semanas de vida das aves, quando o trato gastrointestinal ainda se encontra em processo de maturação funcional. A síntese endógena de enzimas digestivas pancreáticas, como a amilase, é limitada até aproximadamente o 10º dia pós-eclosão, prejudicando a degradação eficiente de nutrientes nesse período (Nitsan et al., 1991). Dessa forma, a inclusão de enzimas exógenas nas dietas iniciais atua de forma complementar, compensando essa imaturidade fisiológica e favorecendo o aproveitamento nutricional dos ingredientes (Giacobbo et al., 2021).

Do ponto de vista microbiológico, as enzimas exógenas são geralmente produzidas por microrganismos do gênero *Bacillus*, com destaque para a amilase, que apresenta alta especificidade catalítica e estabilidade térmica, sendo adequada ao processamento industrial das rações, como a peletização (Oliveira et al., 2007). As principais enzimas utilizadas na avicultura incluem

carboidrases (amilases, xilanases, β -glucanases), proteases, fitases e, em menor escala, lipases (Cowieson & Roos, 2016; Lima et al., 2007).

A amilase exógena, em especial, tem sido amplamente utilizada em dietas contendo cereais alternativos ao milho, como o sorgo, devido à sua capacidade de hidrolisar ligações α -1,4 dos polissacarídeos amiláceos, liberando oligossacarídeos e glicose, que são prontamente absorvidos no intestino delgado (Selle et al., 2010). Essa ação é fundamental para dietas baseadas em sorgo, uma vez que o amido deste grão se encontra protegido por uma matriz proteica densa, composta majoritariamente por kafirinas e localizada em um endosperma vítreo altamente compactado, o que dificulta o acesso das enzimas endógenas ao substrato(Taylor et al., 2007).

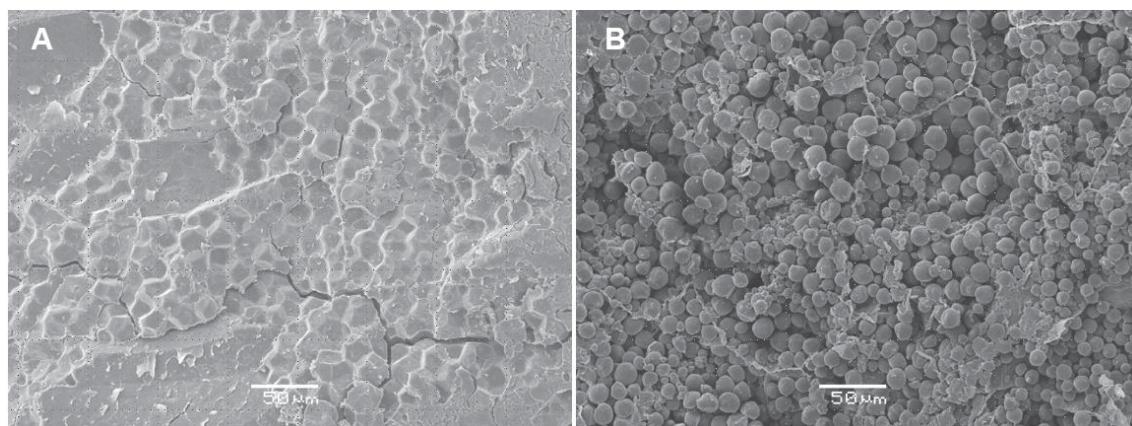


Figura 3. Microscopia eletrônica de varredura (1000x) do endosperma vítreo (A) e farináceo (B) do sorgo. Fonte: Dados próprios.

Estudos conduzidos por Selle et al. (2010, 2020) demonstraram que a adição de amilase a dietas contendo sorgo vítreo resultou em melhor digestibilidade ileal do amido, além de aumento da energia metabolizável aparente corrigida para nitrogênio (EMAn). Mesmo em dietas formuladas com sorgo de menor vitreosidade, a inclusão de amilase mostrou-se eficaz, indicando um benefício amplo e consistente. Além disso, a amilase também atua favorecendo a liberação dos grânulos de amido encapsulados na matriz proteica, aumentando a disponibilidade de energia (Selle et al., 2020).

A ação sinérgica entre amilase e protease também tem sido evidenciada. De acordo com Liu et al., (2015), essa combinação enzimática promove uma degradação simultânea das barreiras estruturais do endosperma, resultando em

maior digestão do amido e das proteínas, o que repercute positivamente no desempenho produtivo das aves.

No contexto da sustentabilidade da produção avícola, o uso de enzimas exógenas, como a amilase, contribui para reduzir a excreção de nitrogênio e fósforo, otimizar o uso de ingredientes locais e de menor custo, como o sorgo, e diminuir a dependência de matérias-primas de alto valor (Aderibigbe et al., 2020b). Portanto, a inclusão estratégica de amilase exógena não apenas melhora a eficiência energética das dietas, mas também representa uma ferramenta tecnológica indispensável para a viabilidade técnica, econômica e ambiental da avicultura moderna.

Assim, o sorgo pode ser considerado uma fonte energética de substituição ao milho na alimentação de frangos de corte, desde que se considerem suas limitações de digestibilidade associadas às kafirinas e ao endosperma vítreo. "Aditivos, como enzimas exógenas, têm demonstrado potencial para otimizar o aproveitamento nutricional, conciliando maior desempenho produtivo com a viabilidade econômica da produção.

REFERÊNCIAS

- ABDELBOST, L., MOREL, M. H., NASCIMENTO, T. P. DO, CAMERON, L. C., BONICEL, J., LARRAZ, M. F. S., & MAMERI, H. (2023). Sorghum grain germination as a route to improve kafirin digestibility: Biochemical and label free proteomics insights. *Food Chemistry*, 424.
- ABPA - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE PROTEÍNA ANIMAL, 2020. Relatório Anual 2020. Disponível em: <https://abpa-br.org/wp-content/uploads/2025/04/ABPA.-Relatorio-Anual-2025.pdf>. Acesso em: 17 ago. 2025.
- ABDOLLAHI, M. R., ZAEFARIAN, F., & RAVINDRAN, V. (2018). Feed intake response of broilers: Impact of feed processing. In *Animal Feed Science and Technology* (Vol. 237, p. 154–165). Elsevier B.V.
- ADERIBIGBE, A., COWIESON, A., SORBARA, J. O., & ADEOLA, O. (2020a). Intestinal starch and energy digestibility in broiler chickens fed diets supplemented with α -amylase. *Poultry Science*, 99(11), 5907–5914.
- ADERIBIGBE, A., COWIESON, A., SORBARA, J. O., & ADEOLA, O. (2020b). Intestinal starch and energy digestibility in broiler chickens fed diets supplemented with α -amylase. *Poultry Science*, 99(11), 5907–5914.
- AHMAD, A., SULTAN, A., NAZ, S., CHAND, N., ISLAM, Z., ALHIDARY, I. A., KHAN, R. U., ABDELRAHMAN, S. H., & DAI, S. (2024). Growth performance, nutrients digestibility, intestinal microbiota and histology altered in broilers fed maize- or sorghum-based diets. *Veterinary Quarterly*, 44(1), 1–8.
- ALI, N. M. M., EL TINAY, A. H., ELKHALIFA, A. E. O., SALIH, O. A., & YOUSIF, N. E. (2009). Effect of alkaline pretreatment and cooking on protein fractions of a high-tannin sorghum cultivar. *Food Chemistry*, 114(2), 646–648.
- AMARAL, T. A., ANDRADE, C. DE L. T. DE, SOUZA, V. F. DE, & PAIXÃO, J. DE S. (2016). Resposta de Cultivares de Milho ao Estresse Hídrico. Embrapa Brasileira de Pesquisa Agropecuário - Milho e Sorgo, 1–27.
- ANJUM, M. A., HUSSAIN, Z., KHAN, S. H., AHMAD, N., AMER, M. Y., & IFTIKHAR, N. (2014). Assessment of Poultry Feed Ingredients Used in Commercial Compound Feed. *Pakistan Journal of Life and Social Sciences*, 12(2), 69–73.
- ANTUNES, R. C., RODRIGUEZ, N. M., GONÇALVES, L. C., RODRIGUES, J. A. S., BORGES, I., BORGES, A. L. C. C., & SALIBA, E. O. S. (2007). Composição bromatológica e parâmetros físicos de grãos de sorgo com diferentes texturas do endosperma. *Arq. Bras. Med. Vet. Zootec* (Número 5).
- ARAÚJO, D. D. DA S., COTA, L. V., & DA COSTA, R. V. (2024). Micotoxinas em milho e sorgo. Repositório Alice - Embrapa, 122–132.
- BATONON-ALAVO, D. I., UMAR FARUK, M., LESCOAT, P., WEBER, G. M., & BASTIANELLI, D. (2015A). Inclusion of sorghum, millet and cottonseed meal in

broiler diets: A meta-analysis of effects on performance. *Animal*, 9(7), 1120–1130.

BATONON-ALAVO, D. I., UMAR FARUK, M., LESCOAT, P., WEBER, G. M., & BASTIANELLI, D. (2015B). Inclusion of sorghum, millet and cottonseed meal in broiler diets: A meta-analysis of effects on performance. *Animal*, 9(7), 1120–1130.

BELTON, P. S., DELGADILLO, I., HALFORD, N. G., & SHEWRY, P. R. (2006). Kafirin structure and functionality. *Journal of Cereal Science*, 44(3), 272–286.

BUENO, M. P., OLIVEIRA, E. A. DE, DIAS, F. X., SERANDIM, G. J., & VENTURA, R. (2024). Manejo de sorgo no Brasil: inovações tecnológicas e cultivares utilizadas. *International Journal of Scientific Management and Tourism*, 10(2), 01–25.

CARVALHO, M. D. DE. (2022). Proteínas do sorgo: extração e potencial aplicação como agente emulsificante.

CHANDRASHEKAR, A., & MAZHAR, H. (1999). The Biochemical Basis and Implications of Grain Strength in Sorghum and Maize. *Journal of Cereal Science*, 30, 193–207.

COWIESON, A. J. (2005). Factors that affect the nutritional value of maize for broilers. *Animal Feed Science and Technology*, 119(3–4), 293–305.

COWIESON, A. J., & ROOS, F. F. (2016). Toward optimal value creation through the application of exogenous mono-component protease in the diets of non-ruminants. *Animal Feed Science and Technology*, 221, 331–340.

DE MESA-STONESTREET, N. J., ALAVI, S., & BEAN, S. R. (2010). Sorghum proteins: The concentration, isolation, modification, and food applications of kafirins. *Journal of Food Science*, 75(5).

DE SOUZA, C. G., MOURA, A. K. B. DE, SILVA, J. N. P. DA, SOARES, K. O., SILVA, J. V. C. DA, & VASCONCELOS, P. C. (2019). Fatores antinutricionais de importância na nutrição animal: Composição e função dos compostos secundários. *Pubvet*, 13(05).

EMBRAPA MILHO E SORGO. (2015). Plantas daninhas - Cultivo do Sorgo (9º ed). Embrapa.

EMBRAPA. AGROENERGIA – ETANOL. Disponível em:
<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/agroenergia/alcool/materias-primas/milho/etanol>. Acesso em: 17 ago. 2025.

ESALQ/BM&FBOVESPA. Relatório sobre o Mercado de Milho e Biocombustíveis: Tendências e Desafios para a Cadeia Produtiva Avícola. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz/BM&FBOVESPA, 2025. Disponível em: www.esalq.usp.br. Acesso em: 15 jul. 2025.

FAOSTAT. Cereais - Produção e Comércio Mundial: Dados de 2023. Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2023. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#home>. Acesso em: 15 jul. 2025.

- FERNANDES, E. DE A., CARVALHO, C. M. C. DE, LITZ, F. H., MARTINS, J. M. DA S., SILVEIRA, M. M., SILVA, M. C. A., & BARBERO, L. M. (2014). Viabilidades técnica e econômica da utilização de grãos de sorgo para monogástricos. Em Sorgo: inovações tecnológicas (278o ed, Vol. 35, p. 22–32). EPAMIG - Informe Agropecuário.
- FRANCISCO, P. R. M., SANTOS, D., & LIMA, E. R. V. DE. (2017). Potencial pedoclimático do estado da Paraíba para a cultura do sorgo (*Sorghum bicolor*). Revista Brasileira de Geografia Física v, 10(3), 784–798.
- GIACOBBO, F. C. N., EYNG, C., NUNES, R. V., DE SOUZA, C., TEIXEIRA, L. V., PILLA, R., SUCHODOLSKI, J. S., & BORTOLUZZI, C. (2021). Different enzymatic associations in diets of broiler chickens formulated with corn dried at various temperatures. *Poultry Science*, 100(5).
- GOMES, A. C. B. (2020). Peptídeos e compostos bioativos do sorgo (*sorghum bicolor* (L.) Moench) em diferentes formas de consumo [mestrado]. Universidade vila velha.
- GRACIA, M. I., ARANÍBAR, M. J., LÁZARO, R., MEDEL, P., & MATEOS, G. G. (2003). α -Amylase Supplementation of Broiler Diets Based on Corn. *Poultry Science*, 82, 436–442.
- GUIMARÃES, D. P.; LANDAU, E. C.; DE MENEZES, C. B.; TARDIN, F. D. Zoneamento Agrícola de Risco Climático (Zarc) para o sorgo granífero no Brasil (2020). Embrapa Milho e Sorgo, Documentos 254, 1-19.
- LEESON, STEVEN., & SUMMERS, J. D. (2008). Commercial poultry nutrition (Third Edition). University Books.
- LEITE, P. R. DE S. DA C., LEANDRO, N. S. M., STRINGHINI, J. H., CAFÉ, M. B., GOMES, N. A., & JARDIM FILHO, R. DE M. (2011). Desempenho de frangos de corte e digestibilidade de rações com sorgo ou milheto e complexo enzimático. *Pesq. agropec. bras.*, 46(3), 280–286.
- LIMA, M. R. DE, SILVA, J. H. V. DA, ARAUJO, J. A. DE, LIMA, C. B., & OLIVEIRA, E. R. A. DE. (2007). Enzimas exógenas na alimentação de aves. *Acta Veterinaria Brasilica*, 1(4), 99–110.
- LIU, S. Y., CADOGAN, D. J., PÉRON, A., TRUONG, H. H., & SELLE, P. H. (2014). Effects of phytase supplementation on growth performance, nutrient utilization and digestive dynamics of starch and protein in broiler chickens offered maize-, sorghum- and wheat-based diets. *Animal Feed Science and Technology*, 197, 164–175.
- LIU, S. Y., CADOGAN, D. J., PÉRON, A., TRUONG, H. H., & SELLE, P. H. (2015). A combination of xylanase, amylase and protease influences growth performance, nutrient utilisation, starch and protein digestive dynamics in broiler chickens offered maize-, sorghum- and wheat-based diets. *Animal Production Science*, 55(10), 1255–1263.
- LIU, S. Y., FOX, G., KHODDAMI, A., NEILSON, K. A., TRUONG, H. H., MOSS, A. F., & SELLE, P. H. (2015). Grain Sorghum: A Conundrum for Chicken-Meat Production. *Agriculture (Switzerland)*, 5(4), 1224–1251.

- LIU, S. Y., SELLE, P. H., & COWIESON, A. J. (2013). Strategies to enhance the performance of pigs and poultry on sorghum-based diets. *Animal Feed Science and Technology*, 181(1–4), 1–14.
- LIU, S. Y., TRUONG, H. H., KHODDAMI, A., MOSS, A. F., THOMSON, P. C., ROBERTS, T. H., & SELLE, P. H. (2016). Comparative performance of broiler chickens offered ten equivalent diets based on three grain sorghum varieties as determined by response surface mixture design. *Animal Feed Science and Technology*, 218, 70–83.
- MAHAGNA, M., NIR, I., LARBIER, M., & NITSAN, Z. (1995). Effect of age and exogenous amylase and protease on development of the digestive tract, pancreatic enzyme activities and digestibility of nutrients in young meat-type chicks. *Reprod. Nutri. Dev.*, 35, 201–212.
- MARQUES, B. M. F. P. P., ROSA, G. B., HAUSCHILD, L., CARVALHO, A., & LOVATTO, P. A. (2007). Substituição de milho por sorgo baixo tanino em dietas para suínos: digestibilidade e metabolismo. *Arq. Bras. Med. Vet. Zootec.*, 59(3), 767–772.
- MONTEIRO, B. F. C. G. (2016). Avaliação do efeito do uso da farinha de sorgo como ingrediente em massa alimentícia e das informações nutricionais complementares associadas sobre a intenção de compras utilizando análise conjunta de fatores baseados em escolhas.
- MORGADO, L. B. (2023). Sorgo - Capítulo 8. Em *Metodologia para o Zoneamento Agrícola de Risco Climático da Produtividade do Milho*. Embrapa.
- MORITZ, A. H., KROMBEEN, S. K., PRESGRAVES, B., BLAIR, M. E., BURESH, R. E., KAMINSKI, R. M., BRIDGES, W. C., ARGUELLES-RAMOS, M., & WILMOTH, T. A. (2022). Apparent metabolizable energy and performance of broilers fed selected grain sorghum varieties. *Applied Animal Science*, 38(3), 268–278.
- NITSAN, Z., BEN-AVRAHAM, G., ZOREF, Z., & NIR, I. (1991). Growth and development of the digestive organs and some enzymes in broiler chicks after hatching. *British Poultry Science*, 32(3), 515–523.
- NUNES, C. A. P. da C. (2000). Contribuição para a caracterização da fracção de prolaminas de duas variedades de sorgo [Mestrado]. Universidade de Aveiro.
- OCHIENG, B. A., OWINO, W. O., KINYURU, J. N., MBURU, J. N., & GICHEHA, M. G. (2020). Effect of low tannin sorghum based feeds on broiler meat nutritional quality. *Journal of Agriculture and Food Research*, 2.
- OJEDIRAN, T. K., AJAYI, A. F., & EMIOLA, I. A. (2018). Condensed Tannin in Two Varieties of Sorghum (*Sorghum bicolor*): Effect on the Growth Performance and Nutrient Digestibility of Broiler Chickens. Em *Scientific Papers: Animal Science and Biotechnologies* (Número 2).
- OLIVEIRA, A. N. DE, OLIVEIRA, L. A. DE, ANDRADE, J. S., & CHAGAS-JÚNIOR, A. F. (2007). Produção de amilase por rizóbios, usando farinha de pupunha como substrato. *Ciênc. Tecnol. Aliment.*, 27(1), 61–66.

PASQUALI, G. A. M. (2014). Níveis De Inclusão De Sorgo E Adição De Enzimas Exógenas Em Dietas Para Frangos De Corte [Mestrado]. Universidade Estadual Paulista Faculdade De Medicina Veterinária E Zootecnia Câmpus De Botucatu.

PARREIRA FILHO, J. M., FERNANDES, E. A., GUIMARÃES, R. F. M., OLIVEIRA, C. B., FREITAS, B. B. B., SANTANA, L. F., FUDIMOTO, C., PARREIRA, I. F. B., & OLIVEIRA, P. M. L. (2020). Substituição do milho pelo sorgo sobre o desempenho zootécnico e na digestibilidade em coelhos. Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinaria e Zootecnia, 72(3), 993–999.

PEREIRA FILHO, I. A. I., & RODRIGUES, J. A. S. (2015). Sorgo - O produtor pergunta, a Embrapa responde (I. A. I. Pereira Filho & J. A. S. Rodrigues, Orgs.; 1a Edição, Vol. 1). Embrapa Milho e Sorgo.

QI, Y. Y., ZHANG, K. Y., TIAN, G., BAI, S. P., DING, X. M., WANG, J. P., PENG, H. W., LV, L., XUAN, Y., & ZENG, Q. F. (2022). Effects of dietary corn germ meal levels on growth performance, serum biochemical parameters, meat quality, and standardized ileal digestibility of amino acids in Pekin ducks. *Poultry Science*, 101(5).

ROSTAGNO, H. S., ALBINO, L. F. T., CALDERANO, A. A., HANNAS, M. I., SAKOMURA, N. K., PERAZZO, F. G., ROCHA, G. C., SARAIVA, A., ABREU, M. L. T. DE, GENOVA, J. L., & TAVERNARI, F. DE C. (2024). Tabelas Brasileiras para Aves e Suínos - Composição de Alimentos e Exigências Nutricionais.

SAKOMURA, N. K., & ROSTAGNO, H. S. (2007). Métodos de pesquisa em nutrição de monogástricos. FUNEP - Fundação de Apoio a Pesquisa, Ensino e Extensão.

SAMTIYA, M., ALUKO, R. E., & DHEWA, T. (2020). Plant food anti-nutritional factors and their reduction strategies: an overview. *Food Production, Processing and Nutrition*, 2(1), 1–14.

SANTOS, S. K. A. DOS. (2020). Exoenzima protease em rações base sorgo grão inteiro ou moído em dietas para frangos de corte e galinhas poedeiras. Universidade Federal de Uberlândia.

SAPATERRO, G. A., FRANCISCO, N. S., DA SILVA, J. P., BRAGA, M. P. P., LINO, K. A., & GOMES, C. F. (2011). Fatores que afetam a digestibilidade do amido.

SASIA, S., BRIDGES, W., LUMPKINS, B., & ARGUELLES-RAMOS, M. (2023). Effects of sorghum-based diets with phytase superdosing on broiler performance. *Applied Animal Science*, 39(6), 433–442.

SASTRÉ-CALDERÓN, N., GÓMEZ-VERDUZCO, G., CORTÉS-CUEVAS, A., JUÁREZ-RAMÍREZ, M., ARCE-MENOCAL, J., MÁRQUEZ-MOTA, C. C., SÁNCHEZ-GODOY, F., & ÁVILA-GONZÁLEZ, E. (2024). Growth Performance and Immunity of Broilers Fed Sorghum–Soybean Meal Diets Supplemented with Phytases and B-Mannanases. *Animals*, 14(6).

SCRAMIN, J. A. (2013). Desenvolvimento e avaliação toxicológica de filmes comestíveis hidrofóbicos com incorporação de nanopartículas de quitosana. [Doutorado]. Universidade Federal De São Carlos.

- SELLE, P. H., CADOGAN, D. J., LI, X., & BRYDEN, W. L. (2010). Implications of sorghum in broiler chicken nutrition. *Animal Feed Science and Technology*, 156(3–4), 57–74.
- SELLE, P. H., LIU, S. Y., CAI, J., CALDWELL, R. A., & COWIESON, A. J. (2014). Graded inclusions of sodium metabisulphite in sorghum-based diets: I. Reduction of disulphide cross-linkages in vitro and enhancement of energy utilisation and feed conversion efficiency in broiler chickens. *Animal Feed Science and Technology*, 190, 59–67. Selle, P. H., McInerney, B. V., McQuade, L. R., Khoddami, A., Chrystal, P. V., Hughes, R. J., & Liu, S. Y. (2020). Composition and characterisation of kafirin, the dominant protein fraction in grain sorghum. *Animal Production Science*, 60(9), 1163–1172.
- SELLE, P. H., MOSS, A. F., TRUONG, H. H., KHODDAMI, A., CADOGAN, D. J., GODWIN, I. D., & LIU, S. Y. (2018). Outlook: Sorghum as a feed grain for Australian chicken-meat production. *Animal Nutrition*, 4(1), 17–30.
- SILVA, D. M. DA, RODRIGUES, D. R., GOUVEIA, A. B. V. S., MESQUITA, S. A., SANTOS, F. R. DOS, & MINAFRA, C. S. (2016). Carboidrases em rações de frangos de corte. *Pubvet*, 10(11), 861–872.
- SIM, S. Y. J., SRV, A., CHIANG, J. H., & HENRY, C. J. (2021). Plant proteins for future foods: A roadmap. In *Foods* (Vol. 10, Número 8). MDPI AG.
- SVIHUS, B. (2014). Starch digestion capacity of poultry. *Poultry Science*, 93(9), 2394–2399.
- TAYLOR, J., BEAN, S. R., IOERGER, B. P., & TAYLOR, J. R. N. (2007). Preferential binding of sorghum tannins with γ -kafirin and the influence of tannin binding on kafirin digestibility and biodegradation. *Journal of Cereal Science*, 46(1), 22–31.
- TAYLOR, J. R. N., & EMMAMBUX, M. N. (2010). Developments in our understanding of sorghum polysaccharides and their health benefits. *Cereal Chemistry*, 87(4), 263–271.
- TAYLOR, J. R. N., SCHUSSLER, L., & VAN DER WALT, W. H. (1984). Fraction of proteins from low-tannin sorghum grain. *J. Agric. Food Chem.*, 32, 1045–1046.
- TRUONG, H. H., LIU, S. Y., & SELLE, P. H. (2016). Starch utilisation in chicken-meat production: The foremost influential factors. *Animal Production Science*, 56(5), 797–814.
- UNI, Z., GANOT, S., & SKLAN, D. (1998). Metabolism and nutrition: Posthatch Development of Mucosal Function in the Broiler Small Intestine. *Poultry Science*, 77, 75–82.
- USDA. World Agricultural Production - 2024. United States Department of Agriculture, 2024. Disponível em: <https://www.usda.gov>. Acesso em: 15 jul. 2025.
- VALENTE JUNIOR, D. T., GENOVA, J. L., KIM, S. W., SARAIVA, A., & ROCHA, G. C. (2024). Carbohydrases and Phytase in Poultry and Pig Nutrition: A Review beyond the Nutrients and Energy Matrix. *Animals*, 14(2).

WANG, M., TOGHYANI, M., MACELLINE, S. P., LEMME, A., HOLMES, A. J., SELLE, P. H., & LIU, S. Y. (2025). Sorghum surpasses wheat as a feed grain for broiler chickens following dietary crude protein reductions. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 16(1).

WONG, J. H., MARX, D. B., WILSON, J. D., BUCHANAN, B. B., LEMAUX, P. G., & PEDERSEN, J. F. (2010). Principal component analysis and biochemical characterization of protein and starch reveal primary targets for improving sorghum grain. *Plant Science*, 179(6), 598–611.

ZHANG, A. R., WEI, M., YAN, L., ZHOU, G. L., LI, Y., WANG, H. M., YANG, Y., YIN, W., GUO, J. Q., CAI, X. H., LI, J. X., ZHOU, H., & LIANG, Y. X. (2022). Effects of feeding solid-state fermented wheat bran on growth performance and nutrient digestibility in broiler chickens. *Poultry Science*, 101(1).

1. CAPÍTULO 2 – FORNECIMENTO DE SORGOS EM DIETAS PARA FRANGOS DE CORTE SUPLEMENTADAS OU NÃO COM AMILASE

Supply of sorghum in diets for broilers, supplemented or not with amylase

RESUMO

O presente estudo foi conduzido com o objetivo de avaliar o efeito do uso de grãos de sorgo e a inclusão de amilase exógena em dietas para frangos de corte durante o período de 1 a 21 dias de idade. Um total de 256 frangos de corte machos de um dia de idade foram distribuídos aleatoriamente em 4 tratamentos com 8 repetições de 8 aves por unidade experimental em um delineamento inteiramente casualizado em esquema fatorial 2 x 2, sendo 2 variedades do grão de sorgo vermelho sem tanino (sorgo A e B), com ou sem a inclusão da enzima amilase (0 e 90 g/t) às dietas. As dietas experimentais eram a base de sorgo e farelo de soja e fornecidas sob a forma farelada. Aos 1, 7 e 21 dias de idade as aves, as rações e as sobras foram pesadas para determinar consumo de ração (CR), ganho de peso (GP) e conversão alimentar (CA). Aos 18, 19 e 20 dias de idade foram coletas das excretas para determinação dos coeficientes de digestibilidade metabolizável ileal aparente. Aos 21 dias de idade foi coletado digesta ileal de quatro aves por repetição para avaliar a digestibilidade ileal aparente da matéria seca (MS), proteína bruta (PB) e energia digestível ileal (EDI). Os dados foram submetidos a ANOVA e, quando significativo, as médias eram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de significância. Houve interação entre os tratamentos para a variável de CA, onde os animais alimentados com o sorgo A e a inclusão da enzima amilase apresentaram uma melhor conversão alimentar que os animais alimentados com o mesmo sorgo sem a enzima ($P<0,05$) no período de 1 a 21 dias de idade. A suplementação com amilase na dieta foi a única variável que proporcionou melhora nos parâmetros de digestibilidade ileal aparente ($P<0,05$), evidenciada pela melhoria na digestibilidade da MS, PB e EDI nas aves. Não houve diferença estatística para a interação dos parâmetros e nem para os sorgos para os parâmetros de digestibilidade metabolizável ileal aparente ($P>0,05$). No entanto, a inclusão da enzima amilase resultaram em melhor digestibilidade metabolizável de MS e PB ($P<0,05$).

Palavras-chave: Enzima exógena; Frangos de corte; Grão de sorgo; Kafirina.

ABSTRACT

The present study was conducted to evaluate the effect of using sorghum grains and the inclusion of exogenous amylase in diets for broilers during the period from 1 to 21 days of age. A total of 256 one-day-old male broilers were randomly assigned to 4 treatments with 8 replicates of 8 birds per experimental unit in a completely randomized design in a 2×2 factorial arrangement, consisting of 2 varieties of red, tannin-free sorghum grains (sorghum A and B), with or without the inclusion of amylase enzyme (0 and 90 g/t) in the diets. The experimental diets were based on sorghum and soybean meal and were provided in a ground form. At 1, 7, and 21 days of age, the birds, feed, and leftovers were weighed to determine feed intake (FI), weight gain (WG), and feed conversion ratio (FCR). On days 18, 19, and 20, excreta were collected to determine apparent ileal metabolizable digestibility coefficients. On day 21, ileal digesta from four birds per replicate were collected to evaluate apparent ileal digestibility of dry matter (DM), crude protein (CP), and ileal digestible energy (IDE). Data were analyzed by ANOVA, and when significant, means were compared using Tukey's test at 5% significance. There was an interaction between treatments for FCR, where birds fed sorghum A with amylase inclusion showed better feed conversion than birds fed the same sorghum without the enzyme ($P<0.05$) during the period from 1 to 21 days of age. Enzyme supplementation was the only variable that improved apparent ileal digestibility parameters ($P<0.05$), evidenced by improvements in DM, CP, and IDE digestibility in the birds. There was no statistical difference for the interaction of parameters nor for the sorghum varieties regarding apparent ileal metabolizable digestibility ($P>0.05$). However, the inclusion of amylase resulted in improved metabolizable digestibility of DM and CP ($P<0.05$).

Keywords: Broiler chickens; Exogenous enzyme; Grain sorghum; Kafirin.

1.1. INTRODUÇÃO

O sorgo tem emergido como uma alternativa promissora ao milho na alimentação de frangos de corte, especialmente devido as características produtivas de maior resistência à seca e seu menor custo de produção (Bueno et al., 2024). Embora o grão de sorgo apresente um perfil nutricional semelhante ao do grão de milho, com uma boa quantidade de carboidratos, sua digestibilidade é uma das principais limitações que afetam seu uso em dietas para aves (Moritz, et al., 2022; Ochieng et al., 2020). Além disso, o sorgo apresenta variações em sua composição e estrutura, dependendo do tipo de endosperma presente no grão, o que pode influenciar ainda mais sua digestibilidade (Santos, 2020).

Um dos fatores que se atribui a baixa digestibilidade está associada à presença das kafirinas, proteínas de reserva que fazem parte das prolaminas do endosperma do grão. O endosperma de sorgo é predominantemente constituído por kafirinas, e as ligações dissulfídicas formadas entre essas proteínas e os grânulos de amido dificultam o acesso das enzimas endógenas, como a amilase, ao amido (Selle et al., 2010 e 2014), comprometendo o aproveitamento nutricional do sorgo pelos animais. Dessa forma, embora o sorgo seja uma excelente fonte energética, sua menor digestibilidade em relação ao milho torna-se um desafio para a produção animal.

A utilização de enzimas exógenas tem se mostrado como estratégia eficaz na otimização do aproveitamento do sorgo na alimentação animal. Entre as enzimas mais utilizadas na avicultura está a amilase, que auxilia na quebra dos amidos e melhora a sua digestibilidade (Giacobbo et al., 2021; Leite et al., 2011). O uso de amilase exógena é particularmente interessante em frangos de corte, considerando que o sistema digestivo das aves é imaturo nas primeiras semanas de vida, o que limita a produção de enzimas digestivas endógenas (Aderibigbe et al., 2020a). A suplementação com enzimas, como a amilase, pode compensar essa limitação e melhorar a digestão dos grãos de sorgo, potencializando o desempenho produtivo das aves.

Considerando que a configuração do endosperma nos grãos de sorgo e a presença das kafirinas podem restringir o acesso das enzimas aos grânulos de

amido, limitando a digestibilidade do sorgo, e levando em conta a escassez de pesquisas que abordem o impacto da suplementação de amilase em dietas à base de sorgo, o presente estudo tem como objetivo avaliar o uso do sorgo como ingrediente na alimentação de frangos de corte, investigando também o efeito da inclusão da enzima amilase nas dietas, focando na digestibilidade e desempenho dos animais.

1.2. MATERIAL E MÉTODOS

Todos os procedimentos experimentais realizados para obtenção dos dados desta pesquisa foram previamente aprovados pela Comissão de Ética no Uso de Animais da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná (014/2024).

1.2.1. ANIMAIS E INSTALAÇÕES

Foram utilizados um total de 256 frangos de corte machos da linhagem comercial (Ross 308 AP95®) oriundos de incubatório comercial (Castro, PR, Brasil), no período de 1 a 21 dias de idade.

As aves foram distribuídas em gaiolas para ensaio de metabolismo de quatro andares, divididas em duas gaiolas por andar (oito aves/gaiola), com dimensões de 0,98 x 0,90 x 0,50m (comprimento x largura x altura), equipadas com comedouros do tipo calha e bebedouros plásticos tipo *nipple*. Cada gaiola com 8 aves foi considerada como uma unidade experimental. A temperatura ambiente inicial foi fixada em 32°C e reduzida gradualmente para 22°C até o 21º dia, segundo o manual da linhagem. A manutenção da temperatura recomendada pelo manual da linhagem foi realizada pelo uso de aquecedores a gás e elétricos e a ventilação natural guiada através da abertura e fechamento das janelas da sala de metabolismo. O programa de iluminação artificial com luz incandescente aplicado durante o período experimental contou com 24 horas de luz até o 5º dia de idade das aves, alterando para 14h de luz e 10h de escuro do 6º ao 21º d.

Diariamente, foi realizado o manejo na instalação para verificar temperatura e umidade do ar, mensurados pelo uso de dois termo-higrômetros localizados em pontos diferentes da sala, conferência da mortalidade das aves, renovação da água e fornecimento de ração.

1.2.2. DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

Os animais foram distribuídos em um delineamento inteiramente casualizado em esquema fatorial 2 x 2, sendo duas variedades do grão de sorgo vermelho sem tanino (sorgo A e B), com (90 g/ton) ou sem a inclusão da enzima amilase, totalizando quatro tratamentos com oito repetições cada.

1.2.3. COMPOSIÇÃO NUTRICIONAL DOS SORGOS

A composição nutricional dos grãos de sorgo utilizados no estudo estão descritos na Tabela 1. As análises químicas dos ingredientes e das dietas foram conduzidas com o objetivo de determinar os teores de matéria seca (MS), proteína bruta (PB) e extrato etéreo (EE) conforme a AOAC (1995). A energia bruta (EB) foi determinada em bomba calorimétrica (Ika Werke C2000 Control Oxygen Bomb Calorimeter, Ika-Werke GmbH&Co, Staufen, Alemanha).

Além disso, foram utilizados 150 g de cada sorgo para determinar o diâmetro médio geométrico (DGM) e o desvio padrão geométrico (DPG) dos sorgos. Os mesmos foram secos em uma estufa de ventilação forçada a 105°C por 24 horas. Em seguida, as amostras foram passadas através de um kit de peneiras (Bertel Ind. Metalúrgica Ltda., Caieiras, SP, Brasil) com um conjunto de seis peneiras (4,0; 2,0; 1,2; 0,6; 0,3; 0,15 e 0,0 mm) e agitadas por 10 minutos. A quantidade de amostra retida em cada peneira foi pesada, e o DGM e o DPG foram calculados.

Tabela 1 – Composição química dos sorgos A e B

Análise	Sorgo A	Sorgo B
Matéria Seca (%)	87,57	87,36
Proteína Bruta (%)	7,84	9,66
Extrato Etéreo (%)	3,21	3,13
Energia Bruta (kcal)	3800	3840
DGM (μm) ¹	596	580
DPG ²	1,57	1,58

¹ Diâmetro geométrico médio

² Desvio padrão geométrico

1.2.4. DIETAS EXPERIMENTAIS

As dietas experimentais foram à base de sorgo e farelo de soja, e fornecidas na forma fareladas (Tabela 2). A ração e a água foram oferecidas *ad libitum* durante todo o período experimental. A fonte da enzima amilase foi a HiStarch (DSM Nutritional Products, Kaiseraugst, Switzerland), com atividade mínima de 900 unidades de amilase (KNU)/g de produto, obtida por meio da fermentação de *Bacillus licheniformis*, sendo que um KNU é definido como a

quantidade de enzima que libera 6 mol de nitrofenol por minuto a partir de 1.86 mM de substrato (etilideno-G7-p-nitrofenil-maltoheptaose) em pH 7,0 e 37°C.

Tabela 2 – Composição nutricional das dietas experimentais (baseada na matéria seca).

Ingredientes (g/kg)	Sorgo A	Sorgo B	Sorgo A	Sorgo B
Grão moído	58,96	58,96	58,95	58,95
Farelo de Soja	35,24	35,24	35,24	35,24
Óleo de Soja Degomado	0,89	0,89	0,89	0,89
Calcário Fino	1,34	1,34	1,34	1,34
Fosfato Bicálcico	0,87	0,87	0,87	0,87
Sulfato de Sódio	0,30	0,30	0,30	0,30
Sal Refinado Iodado	0,26	0,26	0,26	0,26
L-Lisina HCl	0,22	0,22	0,22	0,22
L-Treonina	0,25	0,25	0,25	0,25
DL-Metionina	0,33	0,33	0,33	0,33
L-Valina	0,04	0,04	0,04	0,04
Cloreto de Colina	0,09	0,09	0,09	0,09
Premix Vitamínico ¹	0,13	0,13	0,13	0,13
Premix Mineral ²	0,05	0,05	0,05	0,05
Amilase ³	0,000	0,000	0,009	0,009
Fitase ⁴	0,015	0,015	0,015	0,015
Xilanase ⁵	0,005	0,005	0,005	0,005
Protease ⁶	0,005	0,005	0,005	0,005
Marcador Indigestível ⁷	1,00	1,00	1,00	1,00
Composição química analisada				
Umidade (%)	10,92	10,91	10,84	11,20
Proteína Bruta (%)	22,24	22,05	21,80	24,26
Extrato etéreo (%)	3,02	4,84	4,65	3,96
Cinzas (%)	6,19	5,16	6,52	6,21

Fibra bruta (%)	2,03	2,50	1,97	1,93
Cálcio (%)	0,89	0,81	0,92	0,90
Fósforo (%)	0,53	0,58	0,54	0,58
Energia Metabolizável (kcal/kg)	3804	3816	3830	3868
Lisina digestível (%) ⁸	1,24	1,24	1,24	1,24
Metionina digestível (%) ⁸	0,60	0,60	0,60	0,60
Met + Cis digestível (%) ⁸	0,90	0,90	0,90	0,90
Triptofano digestível (%) ⁸	0,26	0,26	0,26	0,26
Treonina digestível (%) ⁸	0,95	0,95	0,95	0,95
Arginina digestível (%) ⁸	0,18	0,18	0,18	0,18

¹ Suplementação por kg da dieta: Vitamina A, 11.000.000 UI; Vitamina D3, 4.000.000 UI; Vitamina E, 55.000 UI; Vitamina K3, 3.000 mg; Vitamina B1, 2.300 mg; Vitamina B2, 7.000 mg; Ácido pantotênico, 12.000 mg; Vitamina B6, 4.000 mg; Vitamina B12, 25.000 mg; Ácido nicotínico, 60.000 mg; Ácido fólico, 2.000 mg; Biotina, 250 mg; Selênio, 300 mg.

² Suplementação por kg da dieta: Ferro, 100.000 mg; Cobre, 20.000 mg; Manganês, 130.000 mg; Zinco, 130.000 mg; Iodo, 2.000 mg.

³ Ronozyme® HiStarch (DSM- Firmenich).

⁴ Hiphorius (DSM-Firmenich).

⁵ Ronozyme® WX2.000 (DSM-Firmenich).

⁶ Ronozyme® ProAct (DSM-Firmenich).

⁷ Celite® Marcador indigestível (Celite® 400 - Celite Corp., Lompoc, US).AC

⁸ O perfil de aminoácidos não foi analisado diretamente, mas sim calculado por meio do programa Optimal Formula 2000.

1.2.5. ANÁLISE DE TANINO

A metodologia utilizada no estudo para a determinação de tanino nas amostras de sorgo foi realizada por meio do método colorimétrico vanilina-HCl no Laboratório de Segurança Alimentar (LSE) da Embrapa Milho e Sorgo - Sete Lagoas, Minas Gerais, Brasil. Para tanto, as amostras de cada sorgo foram pesadas individualmente em balança analítica, obtendo-se $0,300 \text{ g} \pm 0,003 \text{ g}$ de cada amostra em tubos de centrífuga de 50 ml. Cada grupo de amostras foi incluído um controle interno do laboratório (amostra controle ou triplicata de uma amostra) para assegurar a validade dos resultados.

Após pesadas, foram adicionados 8 ml de solução de extração (metanol 1% ácido clorídrico, v/v) com auxílio de um dispensador de volume aos tubos de centrífuga contendo as amostras. Os tubos foram tampados e submetidos a agitação por 20 minutos a 200 rpm em uma mesa agitadora (*shaker*).

Após a agitação, as amostras foram centrifugadas a 3000 rpm por 10 minutos. Em seguida, 1 ml do sobrenadante foi pipetado em duplicata e transferido para tubos de centrífuga de 15 ml.

Para a primeira alíquota (amostra), foram adicionados 5 ml de solução de vanilina reagente, seguida de agitação em vórtex por 10 segundos. Na segunda alíquota (branco da amostra), foram adicionados 5 ml de solução de 4% HCl em metanol e a mistura foi agitada em vórtex por 10 segundos. Ambas as alíquotas foram deixadas em repouso por 20 minutos para completar a reação.

Após a reação, as leituras de absorbância foram realizadas em um espectrofotômetro ajustado para o comprimento de onda de 500 nm. As absorbâncias foram registradas no formulário de cálculos. Além disso, uma leitura de Metanol PA foi realizada como branco para correção das absorbâncias.

A concentração de taninos nas amostras foi expressa em mg de catequina equivalente por grama de amostra (mg CE/g). Os cálculos foram realizados utilizando a seguinte fórmula:

$$C_{TAN} = \frac{((ABS_{amostra}) - ABS_{branco}) - b \times V_{ext} \times (1 + \left(\frac{U}{100}\right))}{a \times M_a}$$

Onde:

C_{TAN} = Concentração de Taninos na amostra (mg CE/g → miligrama de catequina equivalente por grama de amostra).

$ABS_{amostra}$ = Absorbância encontrada na amostra

ABS_{branco} = Absorbância encontrada no branco de cada amostra

b = coeficiente linear da equação da reta

V_{ext} = Volume de solução usada na extração da amostra (mL)

a = coeficiente angular da equação da reta

M_a = Massa de amostra pesada (g)

U = Umidade da amostra (%)

1.2.6. QUANTIFICAÇÃO DE KAFIRINAS

A extração da kafirina foi realizada de acordo com Wallace et al., (1990) e Hamaker et al. (1995). As amostras de sorgo foram previamente moídas até

1mm. Para a extração total da proteína, foi realizado 3 vezes a incubação de 100 mg da amostra moída durante 1 hora a temperatura ambiente com 1 ml de solução tamponante (borato de sódio 12,5 mM, pH 10,0, 1% SDS, 2% 2-mercaptoetanol), realizando a agitação da solução e posterior centrifugação por 15 minutos a 14.000 rpm. Os sobrenadantes foram misturados após essa etapa. Em seguida, foi adicionado 100% de butanol ao sobrenadante agrupado a uma concentração final de 60% e a amostra foi incubada por 30 minutos à temperatura ambiente (23°C) com agitação ocasional, a fim de isolar apenas a prolaminas kafirina. O extrato foi submetido à centrifugação a temperatura ambiente por um período de 15 minutos a uma velocidade de 9.500 rpm, resultando na formação de um pellet (constituído por componentes não kafirina) e de um sobrenadante contendo kafirina solúvel em álcool.

A quantificação da kafirina foi realizada por meio da análise de aminoácido, através de triplicadas de cada amostra. Para isso, foi realizada a hidrólise ácida do extrato de kafirina e das amostras de grãos de sorgo inteiros para liberar os aminoácidos presentes nas proteínas. O procedimento seguinte envolveu a derivatização pré-coluna com o reagente 6-aminoquinolil-N-hidroxisuccinimidil carbamato (AQC), seguida de análise utilizando cromatografia líquida de ultra eficiência (UPLC).

A quantificação da proteína total do sorgo foi realizada como uma etapa para a análise de kafirinas, feita através de uma hidrólise ácida (5,0 ml de HCl a 20% do sorgo moído com a adição de azoto (nitrogênio) durante 1 minuto) e a solução foi incubada a 110°C durante 24 horas. Posteriormente, antes da derivatização o hidrolisado foi diluído em 1/25 com água purificada Milli-Q® e foi adicionado um padrão interno (norvalina). Segundo os protocolos estabelecidos por Cohen (2001), a quantificação da kafirina foi realizada através da secagem sob vácuo de uma alíquota de 5 mL da fração alcoólica da kafirina e, depois, submetidas à hidrólise ácida em fase gasosa com HCl 6 M, a 110°C, durante 24 horas.

Os padrões de aminoácidos (Standard H, Pierce, Rockford, IL, EUA) e as amostras hidrolisadas foram submetidos à derivatização utilizando o reagente AQC, conforme as instruções do fabricante, por meio do kit de derivatização AccQ-Tag Ultra (Waters Corporation, Milford, MA, EUA).

O sistema ACQUITY UPLC (Waters Corporation) foi empregado para a realização da separação cromatográfica e da quantificação dos 16 aminoácidos presentes no hidrolisado ácido. Utilizando o software Empower 2 (Waters Corporation), os dados foram adquiridos e quantificados com base em padrões analíticos de 2,5, 10 e 50 pmol, aplicando-se um método de calibração com padrão interno.

1.2.7. ANÁLISE DUREZA DOS SORGOS

A análise de dureza foi realizada para determinar a resistência mecânica dos sorgos. Para isso, foram selecionados 50 grãos de cada sorgo (A e B), os quais foram submetidos à avaliação em um durômetro (Dur.298 DGP, Nova Ética®, Vargem Grande Paulista, SP, Brasil). Os valores obtidos foram expressos em quilograma-força (kgf).

1.2.8. DESEMPENHO ZOOTÉCNICO

O desempenho zootécnico foi avaliado nos períodos pré-inicial (0 a 7 dias de idade) e inicial (0 a 21 dias de idade). As aves foram pesadas por gaiola para determinar o peso corporal médio e calcular o ganho de peso (GP). A ração fornecida e as sobras de ração também foram pesadas nos mesmos períodos para calcular o consumo de ração (CR). A conversão alimentar (CA) foi calculada através da razão entre o CR e o GP, corrigido para o peso das aves mortas.

1.2.9. ENSAIO DE DIGESTIBILIDADE ILEAL

Aos 18, 19 e 20 dias de idade foi realizada uma coleta parcial das amostras de excretas (cerca de 30%) diretamente das bandejas de cada gaiola (32 amostras no total), no mesmo horário estabelecido, duas vezes ao dia – equilíbrio dinâmico, usando espátulas e pinças de plástico, evitando coleta de amostras contaminadas/sujas com ração e penas. As amostras de cada gaiola foram armazenadas em sacos plásticos identificados e congelados a -18°C.

Aos 21 dias de idade, quatro animais por repetição foram eutanasiados por deslocamento cervical, eviscerados e uma fração ileal foi separada para remoção do conteúdo, definida como 4 cm abaixo do divertículo da gema e 4 cm acima da junção íleo-ceco-cólica. A digesta ileal foi removida por leve pressão

manual da fração do intestino, homogeneizada e colocada em seus respectivos recipientes plásticos identificados e congelados a -18°C. Para as posteriores análises, os conteúdos do íleo foram secas em liofilizador (Liofilizador Modulyo D, Thermo Electron Corporation, Waltham, MA, USA) até a pressão de vácuo de 5×10^{-2} mbar.

As excretas foram descongeladas por meio de temperatura ambiente e, em seguida, secas em estufa a 65°C. As amostras de ração, excreta e conteúdo ileal foram moídas a 1 mm para determinar o conteúdo de matéria seca (MS), após secagem em estufa a 105°C por 12 horas, e proteína bruta (PB, método 954.01), de acordo com a AOAC (1995). A determinação de energia bruta (EB) foi feita com o uso de bomba calorimétrica (Ika Werke C2000 Control Oxygen Bomb Clorimeter – Ika-Werke GmH&Co, Staufen, Germany). O teor de cinzas insolúveis em ácido (CIA) foi usada como marcador insolúvel para os cálculos de digestibilidade e o conteúdo de CIA nas amostras foi determinado de acordo com Scott e Boldaji (1997). O fator de indigestibilidade (FI) era a razão entre CIA da dieta e a CIA do conteúdo ileal ou das excretas.

Com base nos resultados laboratoriais, o coeficiente de digestibilidade ileal aparente (CDIA) dos nutrientes foi calculado de acordo com a equação:

$$CDIA (\%) = \frac{(Nutriente\ da\ dieta) - (Nutriente\ da\ digesta\ ileal\ X\ FI)}{Nutriente\ da\ dieta}$$

A energia digestível ileal (EDI) foi calculada de acordo com a seguinte equação:

$$EDI (kcal/kg MS) = EB\ da\ dieta - (EB\ do\ conteúdo\ ileal\ X\ FI)$$

1.2.10. ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os dados obtidos foram inicialmente submetidos a identificação de pontos discrepantes (*outliers*). Posteriormente, a normalidade da distribuição dos dados foi avaliada utilizando o teste de Shapiro-Wilk. Os dados que apresentaram distribuição normal, conforme os critérios do teste, foram analisados por meio do

teste de comparação múltipla de Tukey. Para os dados que não atenderam os pressupostos de normalidade, foi aplicada a análise estatística não paramétrica, utilizando o teste de Mann-Whitney para comparações de uma via. Todos os testes foram realizados com nível de significância de 5%. Para as variáveis analisadas por meio da ANOVA de dois fatores, considerando os fatores principais "sorgos" e "inclusão ou não de amilase na dieta", bem como a interação entre esses fatores, foi utilizado o modelo linear do pacote ExpDes (Experimental Designs Package, E. B. Ferreira et al., Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil). Quando detectadas diferenças significativas, as médias foram comparadas utilizando o teste de Tukey, adotando-se o nível de significância de 5%. Todos os procedimentos estatísticos foram realizados utilizando o software R versão 4.4.0 (R Core TEAM, 2024). As figuras foram geradas no software *GraphPad Prism* versão 9.

1.3. RESULTADOS

1.3.1. ANÁLISE DE TANINO

Os sorgos experimentais utilizados nas dietas avaliadas, não apresentaram vestígios de taninos nas amostras (0,00 mg CE/g cada). Confirmado assim, a ausência de taninos nas variedades de sorgos do presente estudo.

1.3.2. QUANTIFICAÇÃO DE KAFIRINAS

Os resultados, apresentados na Tabela 3, demonstram que a quantidade de kafirina presente no sorgo A (2,68 mg) é menor do que a do sorgo B (3,42 mg). Além disso, o sorgo A também apresenta um menor percentual de kafirinas no total de proteínas do grão (44,0%) em comparação com o sorgo B (46,1%).

Tabela 3 – Quantificação de kafirinas dos sorgos A e B.

Sorgo	Kafirina (mg)*	% de kafirina no total de proteína do grão
A	2,68	44,0
B	3,42	46,1

*Média das triplicatas analisadas

1.3.3. DUREZA DOS SORGOS

Para os resultados de dureza, foi encontrado diferença estatística ($P<0,001$) entre os sorgos utilizados no estudo, onde o sorgo A apresentou maior valor em comparação ao sorgo B (Tabela 4).

Tabela 4. Dureza do sorgo A e sorgo B.

Análise	Sorgo A	Sorgo B
Dureza (kgf) ¹	6,85	5,68
EPM	0,25	0,19
P-valor	<0,0001	

¹Teste de Mann-Whitney.

EPM- erro padrão da média.

1.3.4. DESEMPENHO ZOOTÉCNICO

Durante o período de 1 a 21 dias de idade das aves, observou-se uma interação significativa entre os diferentes tipos de sorgo e a inclusão ou não da amilase na dieta para as variáveis de CR, GP e CA ($P<0,05$). No entanto, tanto os tipos de sorgo quanto a suplementação da enzima amilase na dieta não apresentaram efeito significativo ($P>0,05$) no desempenho dos frangos de corte nesta fase (Tabela 5).

Tabela 5. Efeito do sorgo e da inclusão de amilase exógena na dieta no consumo de ração (CR), no ganho de peso (GP) e na conversão alimentar (CA) de frangos de corte de 1 a 21d de idade.

Tratamento	Amilase (g/t)	CR(g)	GP(g)	CA(g)
Interação				
Sorgo A	0	1001	755	1,327 a
Sorgo B		1044	802	1,302 ab
Sorgo A	90	1037	808	1,287 b
Sorgo B		1032	787	1,315 ab
EPM		14,20	13,20	0,006
Efeito do sorgo				
Sorgo A		1019	781	1,307
Sorgo B		1038	795	1,308
Efeito da amilase				
	0	1023	779	1,301
	90	1035	797	1,315
P-valor				
Interação		0,422	0,210	0,031
Sorgo		0,517	0,621	0,915
Amilase		0,683	0,486	0,260

Dados representam a média de 8 repetições por tratamento (8 aves por repetição).

EPM- erro padrão da média.

¹ HiStarch (DSM Nutritional Products, Kaiseraugst, Switzerland).

Os resultados de desempenho zootécnico apresentados na Tabela 5 estão ilustrados graficamente na Figura 4.

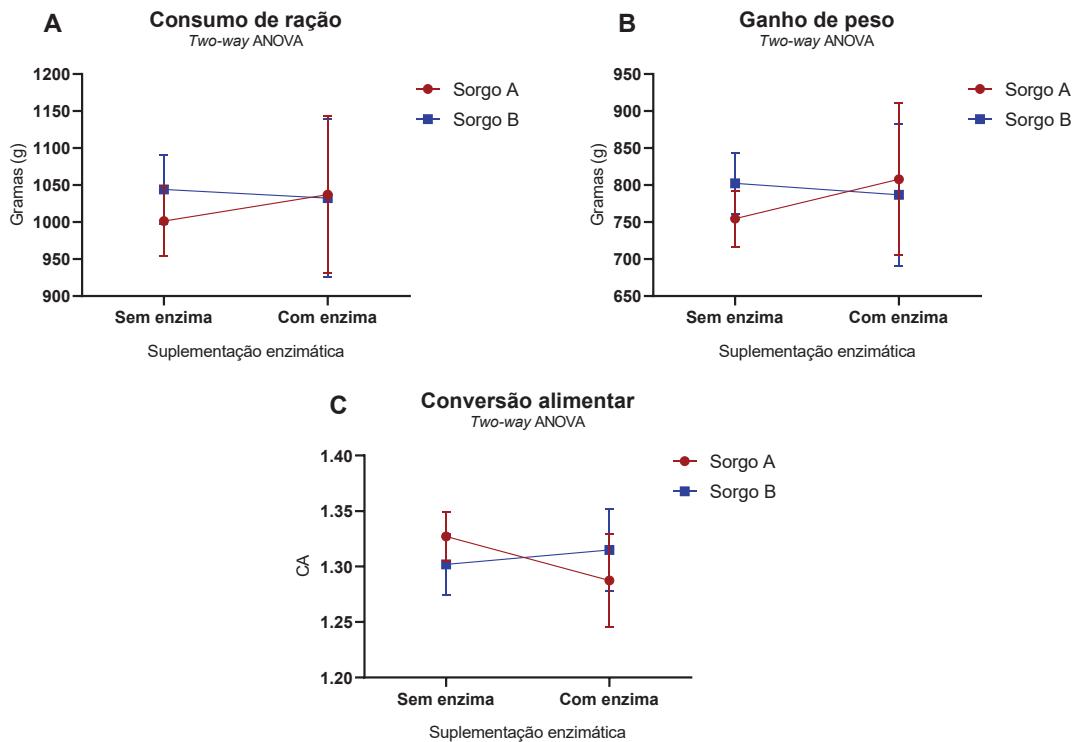


Figura 4. Desempenho zootécnico. Consumo de ração (A), ganho de peso (B) e conversão alimentar (C). A linha horizontal representa a média da variável e a linha vertical representa o desvio padrão.

1.3.5. DIGESTIBILIDADE ILEAL APARENTE

Não foi encontrado interação significativa para a digestibilidade da MS, PB e EDI ($P<0,05$). Quando analisadas as variáveis de forma isolada, o sorgo utilizado não teve efeito significativo nos parâmetros avaliados ($P>0,05$). Entretanto, a suplementação de amilase na dieta apresentou efeito significativo ($P<0,05$) para a digestibilidade da MS, PB e EDI, conforme demonstrado na Tabela 6.

Tabela 6 - Efeito do sorgo e da inclusão de amilase exógena na dieta no coeficiente de digestibilidade ileal aparente da matéria seca (CDIA MS), proteína bruta (CDIA PB) e energia digestível ileal (EDI) em frangos de corte de 1 a 21d de idade.

Tratamento		Amilase (g/t)	CDIA MS (%)	CDIA PB (%)	EDI (kcal)
Interação					
Sorgo A	0	66	83	3066	
Sorgo B		67	82	3098	
Sorgo A	90	69	85	3126	
Sorgo B		70	84	3183	
EPM		0,49	0,33	17,60	
Efeito do sorgo					
Sorgo A		68	84	3096	
Sorgo B		68	83	3141	
Efeito da amilase					
	0	66	82	3082	
	90	69	84	3155	
P-valor					
Interação		0,852	0,880	0,713	
Sorgo		0,550	0,054	0,194	
Amilase		0,002	0,001	0,038	

Dados representam a média de 8 repetições por tratamento (8 aves por repetição).

EPM, erro padrão da média.

¹ HiStarch (DSM Nutritional Products, Kaiseraugst, Switzerland).

Os resultados de digestibilidade ileal aparente apresentados na Tabela 6 estão ilustrados graficamente na Figura 5.

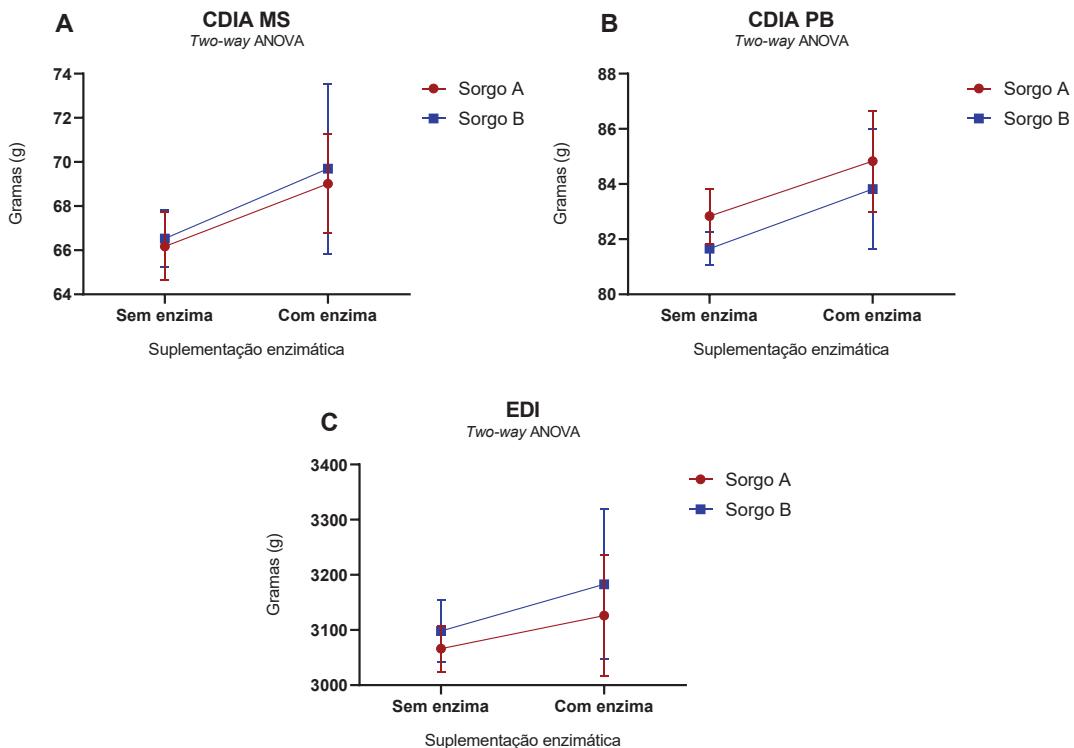


Figura 5. Digestibilidade ileal aparente. Coeficiente de digestibilidade ileal aparente da matéria seca (A), coeficiente de digestibilidade ileal aparente da proteína bruta (B) e energia digestível ileal (C). A linha horizontal representa a média da variável e a linha vertical representa o desvio padrão.

1.3.6. DIGESTIBILIDADE METABOLIZÁVEL ILEAL APARENTE

Os dados de digestibilidade metabolizável ileal aparente estão apresentados na Tabela 7. Não foi observada interação significativa entre os fatores sorgo e amilase sobre as variáveis de digestibilidade metabolizável ileal aparente analisadas ($P>0,05$). O sorgo também não exerceu efeito significativo sobre essas variáveis ($P>0,05$), apresentando uma redução da CDIA da PB do sorgo B em relação ao sorgo A, com um efeito marginalmente significativo ($P=0,054$). Já a inclusão da amilase na dieta resultou em efeito significativo para o CDMS e CDPB ($P<0,05$).

Tabela 7 - Efeito do sorgo e da inclusão de amilase exógena na dieta no coeficiente de digestibilidade metabolizável ileal aparente da matéria seca (CDMA MS), proteína bruta (CDMA PB) e energia metabolizável aparente (EMA) em frangos de corte de 1 a 21d de idade.

Tratamento	Amilase (g/t)	CDMA MS (%)	CDMA PB (%)	EMA (kcal)
Interação				
Sorgo A	0	69	70	3208
Sorgo B		68	69	3215
Sorgo A	90	67	69	3205
Sorgo B		67	67	3202
EPM		0,33	0,39	11,60
Efeito do tipo de sorgo				
Sorgo A		68	70	3211
Sorgo B		68	68	3203
Efeito da amilase				
	0	69	70	3211
	90	67	68	3203
P-valor				
Interação		0,798	0,953	0,835
Sorgo		0,433	0,105	0,943
Amilase		0,015	0,031	0,745

Dados representam a média de 8 repetições por tratamento (8 aves por repetição).

EPM, erro padrão da média.

¹ HiStarch (DSM Nutritional Products, Kaiseraugst, Switzerland).

Os resultados de digestibilidade metabolizável ileal aparente apresentados na Tabela 7 estão ilustrados graficamente na Figura 6.

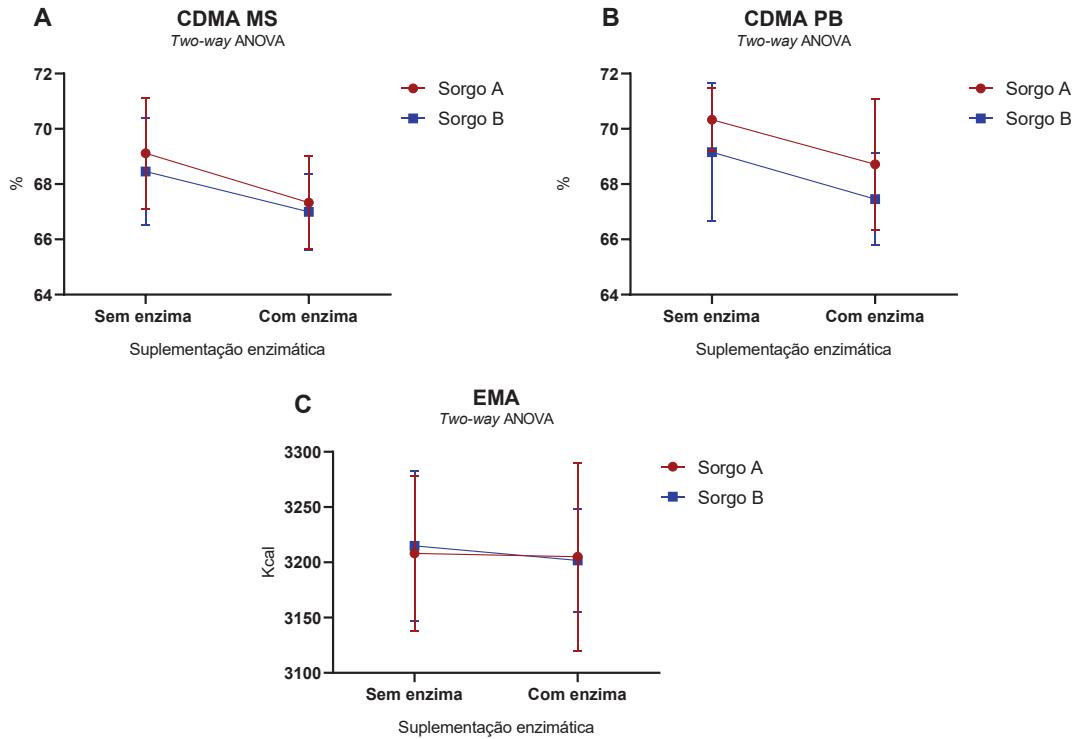


Figura 6. Digestibilidade metabolizável ileal aparente. Coeficiente de digestibilidade metabolizável ileal aparente da matéria seca (A), coeficiente de digestibilidade ileal metabolizável aparente da proteína bruta (B) e energia metabolizável aparente (C). A linha horizontal representa a média da variável e a linha vertical representa o desvio padrão.

1.4. DISCUSSÃO

O sorgo é uma importante fonte de energia e proteína para frangos de corte, mas sua digestibilidade pode ser comprometida pela dureza do grão, falta de processamento térmico do grão, kafirinas e outros fatores.

Em relação à dureza dos grãos, observou-se uma diferença estatisticamente significativa entre os dois tipos de sorgo, com o sorgo A apresentando maior dureza ($P < 0,001$) do que o sorgo B. A dureza do grão é um parâmetro importante, pois pode influenciar a capacidade das enzimas digestivas de acessar os nutrientes no interior do grão. Grãos mais duros podem apresentar maior resistência à quebra mecânica durante a digestão, o que pode dificultar a ação das enzimas. Essa relação entre dureza e digestibilidade é corroborada por estudos que apontam que a resistência mecânica do grão pode ser um fator limitante na digestibilidade, especialmente para grãos com alto teor de prolaminas (Hamaker et al., 1995). Nesse contexto, a maior dureza observada no sorgo A, que já possui menores concentrações de kafirinas, pode não ter sido um fator tão limitante para a digestibilidade, como se observa no sorgo B, com maior teor proteico e maior concentração de kafirinas.

Vale ressaltar que a dureza do grão está diretamente relacionada à sua vitreosidade, onde grãos mais duros apresentam estrutura endospérmica mais compacta e vítreia (Antunes et al., 2008; Maxton et al., 1971). Dessa forma, o sorgo A, caracterizado por maior dureza, apresenta maior grau de vitreosidade em comparação ao sorgo B, cujo endosperma é predominantemente farináceo.

Essa maior compactação do endosperma nos grãos vítreos tende a dificultar o acesso das enzimas digestivas, como a amilase, aos grânulos de amido, aumentando a proporção de amido (Piovesan et al., 2011). Assim, a relação entre dureza e vitreosidade influencia diretamente a digestibilidade do amido e, consequentemente, a eficiência energética do alimento para frangos de corte.

Analizando os resultados obtidos, observa-se que a amilase apresentou melhor atuação sobre o endosperma vítreo, sugerindo que, mesmo com a estrutura mais compacta, houve adaptação enzimática ou possível modificação física/química do amido, favorecendo sua hidrólise enzimática.

No presente estudo, a quantidade de kafirina foi diferente entre os dois tipos de sorgo, com o sorgo A apresentando menor teor (2,68 mg) em comparação com o sorgo B (3,42 mg). Esses resultados estão em linha com estudos anteriores que observaram uma correlação positiva entre o teor de proteína bruta (PB) e o conteúdo de kafirinas nos grãos de sorgo (Selle et al., 2010).

Estudos anteriores indicaram que o alto teor de proteína total no sorgo está associado a uma maior proporção de prolaminas no grão, denominadas de kafirinas (Taylor et al., 1984; Selle et al., 2010). As kafirinas, proteínas de reserva, constituem a fração proteica predominante nos grãos de sorgo, correspondendo entre 68% e 73% do total de proteínas e 77% a 82% das proteínas no endosperma (Hamaker et al., 1995; Ribeiro et al., 2022). Selle et al. (2020) observaram uma correlação linear positiva e significativa entre as concentrações de kafirina e o teor de PB em grão de sorgo, ou seja, à medida que a concentração de PB aumentava nas 33 variedades de sorgo analisadas, ocorria aumento proporcional nas concentrações de kafirina.

As prolaminas dos sorgos graníferos estão localizadas em corpos proteicos e incorporadas dentro da matriz de glutelinas, proteínas de armazenamento, situadas no endosperma do grão, juntamente com os grânulos de amido (Selle et al., 2018). As ligações cruzadas dissulfídicas covalentes que ligam as kafirinas aos grânulos de amido (Nunes et al., 2005; Belton et al., 2006; Taylor e Emmambux, 2010) formam uma barreira física que, possivelmente, impede o acesso das enzimas digestivas ao amido (Hamaker e Bugusu, 2003). A formação dessas ligações dissulfídicas no grão de sorgo é facilitada pelas frações β - e γ -kafirina, localizadas na periferia dos corpos proteicos, que são ricas em cisteína e, consequentemente, mais suscetíveis à formação de tais ligações (Selle et al., 2014).

O processamento do sorgo, como a moagem realizada nos sorgos do presente estudo, pode alterar a estrutura física do grão, influenciando diretamente na desestruturação do endosperma e na acessibilidade dos nutrientes, como o amido e as proteínas. A moagem quebra as camadas protetoras do grão permitindo que as enzimas digestivas acessem mais facilmente o amido, o que pode melhorar a digestibilidade do grão (Amerah et

al., 2007). Desse modo, fragmentar a estrutura do sorgo também pode afetar as interações entre as kafirinas e os grânulos de amido.

Os resultados deste estudo mostraram que tanto o tipo de sorgo utilizado nas dietas quanto a suplementação com amilase, isoladamente, não tiveram efeitos significativos no desempenho zootécnico dos frangos de corte, considerando as variáveis de GP, CR e CA. As alterações fisiológicas do trato gastrointestinal, como o aumento mais acentuado na altura dos vilos, ainda está em andamento na primeira semana de vida das aves (Macari et al., 2002). Assim, a ausência de respostas no desempenho de frangos de corte na fase inicial pode ser atribuída à imaturidade digestiva desses animais nesta fase inicial. No entanto, esses resultados contrastam com alguns encontrados na literatura, como o de Cadogan et al. (2005), que relataram melhorias no CR e no GP aos 21 dias de idade, já Leite et al. (2011) observaram efeito significativo apenas na CA, com uma redução dessa variável no período de 1 a 21 dias.

A análise dos resultados da interação entre os fatores sugere que a suplementação de amilase na dieta contendo sorgo A melhorou a conversão alimentar das aves alimentadas. Os resultados obtidos aos 21 dias de idade estão em concordância com os reportados por Moritz et al. (2023), que, ao avaliarem três variedades de sorgo isentas de tanino com composições químicas semelhantes às do presente estudo, não observaram efeito significativo sobre o CR e o GP de frangos de corte de 14 a 21 dias de idade, encontrando diferenças apenas na CA. Esse efeito sobre o sorgo A pode ser explicada pelo fato de que o sorgo A apresenta menores concentrações de kafirina, facilitando a ação da enzima amilase sobre os grânulos de amido, o que acabou resultando na melhora da CA. O maior teor proteico do sorgo B com a inclusão da enzima amilase pode ter resultado em uma matriz proteica mais densa envolvendo os grânulos de amido, que apresente alta resistência à digestão (Duodu et al., 2002), dificultando a ação da enzima amilase.

Embora não tenha havido efeito significativo sobre o desempenho, a inclusão de amilase nas dietas resultou em efeitos positivos de alguns parâmetros sobre a digestibilidade dos nutrientes. A suplementação de amilase na dieta melhorou a digestibilidade da matéria seca (MS), proteína bruta (PB) e energia digestível ileal (EDI). O sorgo granífero é utilizado nas dietas de frangos

de corte, principalmente, como fonte de energia devido ao seu elevado teor de amido. Entretanto, a eficiência na utilização do amido e da energia presentes no sorgo é frequentemente considerada subótima (Selle et al., 2018). Além disso, estudos indicam que a digestibilidade do amido de sorgo é inferior à do milho, conforme demonstrado em estudos *in vitro* (Giuberti et al., 2012) e *in vivo* (Liu et al., 2014; Truong et al., 2016). Essa redução da digestibilidade do sorgo está associada a presença de fatores antqualitativos, como as kafirinas. Na literatura há um consenso de que a kafirina exerce um impacto negativo na utilização de amido e na eficiência energética das dietas para frangos de corte (De Mesa-Stonestreet et al., 2010; Wong et al., 2010; Liu et al., 2013; Liu et al., 2016; Truong et al., 2016; Selle et al., 2018). A menor digestibilidade do sorgo tem sido amplamente atribuída às ligações covalentes das kafirinas por pontes dissulfeto.

A inclusão da amilase exógena melhorou a disponibilidade de energia, permitindo maior aproveitamento dos nutrientes contidos no grão e um aumento da energia digestível ileal (3082 vs 3155). A enzima age nos grânulos de amido, promovendo a clivagem das ligações α -1,4-glicosídicas da amilopectina e amilose presentes no endosperma, liberando oligossacarídeos e aumentando a disponibilidade de glicose, facilitando, assim, sua liberação e digestão (Stefanello et al., 2015; Aderibigbe et al., 2020). Esse resultado é consistente com os encontrados por Stefanello et al. (2019) que relataram uma melhoria na EDI com a adição de 80 KNU/kg (da ração) de amilase em dietas à base de milho, uma fonte energética similar ao sorgo. No entanto, Liu et al. (2015) não observaram diferenças significativas na energia digestível do jejuno e do íleo aos 27 dias de idade em dietas com o grão de sorgo.

Além das proteínas associadas aos grânulos de amido, cerca de até 1,7% de outros nutrientes, como gorduras, também se encontram encapsulados nesses grânulos (Schramm et al., 2021). Desse modo, a adição de amilase possivelmente promoveu a liberação eficiente desses nutrientes encapsulados nos grânulos de amido, resultando em um aumento no CDIA da MS (66 vs 69). Os dados do estudo corroboram com os obtidos por (Leite et al., 2011) que observaram que os CDIA da MS de frangos alimentados com dietas à base de sorgo suplementadas com amilase apresentaram um aumento (9%) no intervalo de 24 a 28 dias.

O aumento no CDIA da PB (82 vs 84), referente à suplementação de amilase, pode ser atribuído à maior digestibilidade do amido, o que promove maior liberação de proteínas contidas na matriz proteica que envolve os grânulos de amido facilitando, assim, a ação das enzimas endógenas na digestão dessas proteínas. Os resultados estão de acordo com o estudo de Liu et al. (2015), no qual a suplementação enzimática elevou significativamente a digestibilidade aparente do nitrogênio no jejuno distal e no íleo proximal de frangos de corte alimentados com dietas à base de sorgo aos 27 dias de idade. Já Mahagna et al. (1995) não encontraram diferenças no CDIA da proteína em frangos (21 dias de idade) com a suplementação de amilase em dietas contendo sorgo.

A suplementação de amilase nas dietas para frangos de corte reduziu de maneira significativa a CDMA da MS e da PB. Apesar disso, as variedades dos grãos de sorgo e a enzima na dieta não promoveram efeitos sobre a energia metabolizável aparente. Embora a suplementação com amilase tenha resultado em uma melhoria significativa na digestibilidade dos nutrientes, a EMA não apresentou alterações em função das variedades de sorgo utilizadas ou da adição da enzima. Este resultado está em linha com os achados por Moss et al., (2020), que também não observaram efeitos significativos do tipo de sorgo sobre a EMA em frangos com 7-9 dias e 33-34 dias de idade. Em contraste, Schramm et al. (2021) reportaram que a suplementação com diferentes doses de amilase (0, 40, 80, 120 e 160 KNU/kg) em dietas à base de milho resultou em um aumento significativo na EMA (kcal/kg de MS) apenas nas doses de 80 KNU/kg e superiores. Por outro lado, Stefanello et al. (2019) observaram uma relação linear positiva entre a EMA e a suplementação de amilase com as mesmas doses.

Embora a amilase suplementada na dieta tenha aumentado a digestibilidade no íleo (resultando em maior EDI), pode ser que o aumento da absorção de nutrientes no intestino delgado não tenha sido suficiente para melhorar a eficiência metabólica no uso dessa energia para processos como o crescimento ou produção. Isso pode ter ocorrido devido a perdas metabólicas adicionais ou a maior excreção de compostos nitrogenados. Esses processos podem resultar em uma discrepância entre a maior absorção de energia e a utilização metabólica dessa energia.

1.5. CONCLUSÃO

Os resultados deste estudo indicaram que o tipo de sorgo, quando utilizado isoladamente, não exerceu influência significativa sobre os parâmetros de desempenho e digestibilidade dos frangos de corte. Seu efeito só foi significativo quando associado a enzima amilase na dieta. No entanto, a suplementação com 90 KNU/kg de amilase nas dietas à base de sorgo resultou em uma melhor digestibilidade ileal da matéria seca (MS), proteína bruta (PB) e energia digestível ileal (EDI). A suplementação da enzima amilase na dieta também otimizou a digestibilidade metabolizável ileal aparente (CDMA) da MS e da PB, favorecendo o aproveitamento dos nutrientes pela ave. Por outro lado, não foram observadas alterações significativas na energia metabolizável aparente (EMA), o que sugere que, embora a enzima tenha promovido um aumento na digestibilidade dos nutrientes, as perdas energéticas subsequentes, não permitiram um efeito perceptível na EMA.

Em dietas nutricionalmente平衡adas, o sorgo pode substituir parcial ou totalmente o milho sem prejuízo ao desempenho produtivo e digestibilidade da dieta em frangos, demonstrando seu potencial como ingrediente estratégico, especialmente em contextos de custo elevado do milho.

REFERÊNCIAS

- ADERIBIGBE, A., COWIESON, A., SORBARA, J. O., & ADEOLA, O. (2020A). Intestinal starch and energy digestibility in broiler chickens fed diets supplemented with α -amylase. *Poultry Science*, 99(11), 5907–5914.
- AMERAH, A. M., RAVINDRAN, V., LENTLE, R. G., & THOMAS, D. G. (2007). Feed particle size: Implications on the digestion and performance of poultry. Em *World's Poultry Science Journal* (Vol. 63, Número 3, p. 439–455).
- ANTUNES, R. C., RODRIGUEZ, N. M., GONÇALVES, L. C., RODRIGUES, J. A. S., PEREIRA, L. G. R., FONTES, D. O., BORGES, I., BORGES, A. L. C. C., & SALIBA, E. O. S. (2008). Valor nutritivo de grãos de sorgo com diferentes texturas do endosperma para leitões. *Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinaria e Zootecnia*, 60(3), 713–718.
- AOAC - Association of Official Analytical Chemists. Official methods of analysis of the Association of the Analytical Chemists. 16th ed. Washington, 1995.
- BELTON, P. S., DELGADILLO, I., HALFORD, N. G., & SHEWRY, P. R. (2006). Kafirin structure and functionality. *Journal of Cereal Science*, 44(3), 272–286.
- CADOGAN, D. J.; SELLE, P. H.; CRESWELL, D.; PARTRIDGE, G. PHYTATE limits broiler performance and nutrient digestibility in sorghum-based diets. Book Chapter: Proceedings of the 17th Australian Poultry Science Symposium, Sydney, New South Wales, Australia, 7-9 February 2005, 2005, 39-43 ref. 6.
- DE MESA-STONESTREET, N. J., ALAVI, S., & BEAN, S. R. (2010). Sorghum proteins: The concentration, isolation, modification, and food applications of kafirins. *Journal of Food Science*, 75(5).
- DUODU, K. G., NUNES, A., DELGADILLO, I., PARKER, M. L., MILLS, E. N. C., BELTON, P. S., & TAYLOR, J. R. N. (2002). Effect of grain structure and cooking on sorghum and maize in vitro protein digestibility. *Journal of Cereal Science*, 35(2), 161–174.
- DURESSA, D., WEERASORIYA, D., BEAN, S. R., TILLEY, M., & TESSO, T. (2018). Genetic basis of protein digestibility in grain sorghum. *Crop Science*, 58(6), 2183–2199.
- GIUBERTI, G., GALLO, A., CERIOLI, C., & MASOERO, F. (2012). In vitro starch digestion and predicted glycemic index of cereal grains commonly utilized in pig nutrition. *Animal Feed Science and Technology*, 174(3–4), 163–173.
- HAMAKER, B. R., & BUGUSU, B. A. (2003). Overview: sorghum proteins and food quality. Em Afripro. Workshop on the Proteins of Sorghum and Millets Belton PS, Taylor JRN eds.

HAMAKER, B. R., MOHAMED, A. A., HABBEN, J. E., HUANG, C. P., & LARKINS, B. A. (1995). Efficient procedure for extracting maize and sorghum kernel proteins reveals higher prolamin contents than the conventional method. *Cereal Chem.*, 6(72), 583–588.

LEITE, P. R. DE S. DA C., LEANDRO, N. S. M., STRINGHINI, J. H., CAFÉ, M. B., GOMES, N. A., & JARDIM FILHO, R. DE M. (2011). Desempenho de frangos de corte e digestibilidade de rações com sorgo ou milheto e complexo enzimático. *Pesq. agropec. bras.*, 46(3), 280–286.

LIU, S. Y., CADOGAN, D. J., PÉRON, A., TRUONG, H. H., & SELLE, P. H. (2014). Effects of phytase supplementation on growth performance, nutrient utilization and digestive dynamics of starch and protein in broiler chickens offered maize-, sorghum- and wheat-based diets. *Animal Feed Science and Technology*, 197, 164–175.

LIU, S. Y., CADOGAN, D. J., PÉRON, A., TRUONG, H. H., & SELLE, P. H. (2015). A combination of xylanase, amylase and protease influences growth performance, nutrient utilisation, starch and protein digestive dynamics in broiler chickens offered maize-, sorghum- and wheat-based diets. *Animal Production Science*, 55(10), 1255–1263.

LIU, S. Y., FOX, G., KHODDAMI, A., NEILSON, K. A., TRUONG, H. H., MOSS, A. F., & SELLE, P. H. (2015). Grain Sorghum: A Conundrum for Chicken-Meat Production. *Agriculture (Switzerland)*, 5(4), 1224–1251.

LIU, S. Y., SELLE, P. H., & COWIESON, A. J. (2013). Strategies to enhance the performance of pigs and poultry on sorghum-based diets. *Animal Feed Science and Technology*, 181(1–4), 1–14.

LIU, S. Y., TRUONG, H. H., KHODDAMI, A., MOSS, A. F., THOMSON, P. C., ROBERTS, T. H., & SELLE, P. H. (2016). Comparative performance of broiler chickens offered ten equivalent diets based on three grain sorghum varieties as determined by response surface mixture design. *Animal Feed Science and Technology*, 218, 70–83.

MACARI, M.; FURLAN, R. L.; GONZALES, E. Fisiologia aviária aplicada a frangos de corte. Jaboticabal: FUNEP/UNESP, 2002.

MAHAGNA, M., NIR, I., LARBIER, M., & NITSAN, Z. (1995). Effect of age and exogenous amylase and protease on development of the digestive tract, pancreatic enzyme activities and digestibility of nutrients in young meat-type chicks. *Reprod. Nutri. Dev.*, 35, 201–212.

MAXTON, E. D., FRYAR, W. B., ROONET L. W., & KRISHNAPRASAD, N. K. (1971). Milling Properties of Sorghum Grain with Different Proportions of Corneous to Floury Endosperm. *American Association of Cereal Chemists*, 48, 478–490.

MORITZ, A. H., LUMPKINS, B., MATHIS, G. F., BRIDGES, W. C., WILSON, S., BLAIR, M. E., BURESH, R. E., STRICKLAND, J. R., & ARGUELLES-RAMOS, M. (2023). Comparative efficacy of tannin-free grain sorghum varieties for the control of necrotic enteritis caused by Clostridium perfringens in broiler chickens. *Poultry Science*, 102(2).

MOSS, A. F., KHODDAMI, A., CHRYSTAL, P. V., SORBARA, J. O. B., COWIESON, A. J., SELLE, P. H., & LIU, S. Y. (2020). Starch digestibility and energy utilisation of maize- and wheat-based diets is superior to sorghum-based diets in broiler chickens offered diets supplemented with phytase and xylanase. *Animal Feed Science and Technology*, 264.

NUNES, C. A. P. DA C. (2000). Contribuição para a caracterização da fracção de prolaminas de duas variedades de sorgo [Mestrado]. Universidade de Aveiro. Ochieng, B. A., Owino, W. O., Kinyuru, J. N., Mburu, J. N., & Gicheha, M. G. (2020). Effect of low tannin sorghum based feeds on broiler meat nutritional quality. *Journal of Agriculture and Food Research*, 2.

PIOVESAN, V., & DE OLIVEIRA, V. (2011). Milhos com diferentes texturas de endosperma e adição de alfa-amilase na dieta de leitões. *Ciência Rural*, 41(11), 2014–2019.

RIBEIRO, T. S., SCRMIN, J. A., RODRIGUES, J. A. S., FILHO, R. B., COLNAGO, L. A., & FORATO, L. A. (2022). ¹³C ss-NMR Singular value decomposition and fitting for sorghum proteins conformation elucidation. *Polimeros*, 32(1).

SANTOS, S. K. A. DOS. (2020). Exoenzima protease em rações base sorgo grão inteiro ou moído em dietas para frangos de corte e galinhas poedeiras. Universidade Federal de Uberlândia.

SASTRÉ-CALDERÓN, N., GÓMEZ-VERDUZCO, G., CORTÉS-CUEVAS, A., JUÁREZ-RAMÍREZ, M., ARCE-MENOCAL, J., MÁRQUEZ-MOTA, C. C., SÁNCHEZ-GODOY, F., & ÁVILA-GONZÁLEZ, E. (2024). Growth Performance and Immunity of Broilers Fed Sorghum–Soybean Meal Diets Supplemented with Phytases and B-Mannanases. *Animals*, 14(6).

SCHRAMM, V. G., MASSUQUETTO, A., BASSI, L. S., ZAVELINSKI, V. A. B., SORBARA, J. O. B., COWIESON, A. J., FÉLIX, A. P., & MAIORKA, A. (2021). Exogenous α-amylase improves the digestibility of corn and corn–soybean meal diets for broilers. *Poultry Science*, 100(4).

SCRMIN, J. A. (2013). Desenvolvimento e avaliação toxicológica de filmes comestíveis hidrofóbicos com incorporação de nanopartículas de quitosana. [Doutorado]. Universidade Federal De São Carlos.

SELLE, P. H., CADOGAN, D. J., LI, X., & BRYDEN, W. L. (2010). Implications of sorghum in broiler chicken nutrition. *Animal Feed Science and Technology*, 156(3–4), 57–74.

SELLE, P. H., LIU, S. Y., CAI, J., CALDWELL, R. A., & COWIESON, A. J. (2014). Graded inclusions of sodium metabisulphite in sorghum-based diets: I. Reduction of disulphide cross-linkages in vitro and enhancement of energy utilisation and feed conversion efficiency in broiler chickens. *Animal Feed Science and Technology*, 190, 59–67.

SELLE, P. H., MCINERNEY, B. V., MCQUADE, L. R., KHODDAMI, A., CHRYSSTAL, P. V., HUGHES, R. J., & LIU, S. Y. (2020). Composition and characterisation of kafirin, the dominant protein fraction in grain sorghum. *Animal Production Science*, 60(9), 1163–1172.

SELLE, P. H., MOSS, A. F., TRUONG, H. H., KHODDAMI, A., CADOGAN, D. J., GODWIN, I. D., & LIU, S. Y. (2018). Outlook: Sorghum as a feed grain for Australian chicken-meat production. *Animal Nutrition*, 4(1), 17–30.

STEFANELLO, C., VIEIRA, S. L., SANTIAGO, G. O., KINDLEIN, L., SORBARA, J. O. B., & COWIESON, A. J. (2015). Starch digestibility, energy utilization, and growth performance of broilers fed corn-soybean basal diets supplemented with enzymes. *Poultry Science*, 94(10), 2472–2479.

STEFANELLO, C., VIEIRA, S. L., SOSTER, P., SANTOS, B. M. D., DALMORO, Y. K., FAVERO, A., & COWIESON, A. J. (2019). Utilization of corn-based diets supplemented with an exogenous α -amylase for broilers. *Poultry Science*, 98(11), 5862–5869.

SVIHUS, B. (2014). Starch digestion capacity of poultry. *Poultry Science*, 93(9), 2394–2399.

TAYLOR, J., BEAN, S. R., IOERGER, B. P., & TAYLOR, J. R. N. (2007). Preferential binding of sorghum tannins with γ -kafirin and the influence of tannin binding on kafirin digestibility and biodegradation. *Journal of Cereal Science*, 46(1), 22–31.

TAYLOR, J. R. N., & EMMAMBUX, M. N. (2010). Developments in our understanding of sorghum polysaccharides and their health benefits. *Cereal Chemistry*, 87(4), 263–271.

TAYLOR, J. R. N., SCHUSSLER, L., & VAN DER WALT, W. H. (1984). Fraction of proteins from low-tannin sorghum grain. *J. Agric. Food Chem.*, 32, 1045–1046.

TRUONG, H. H., LIU, S. Y., & SELLE, P. H. (2016). Starch utilisation in chicken-meat production: The foremost influential factors. *Animal Production Science*, 56(5), 797–814.

WONG, J. H., MARX, D. B., WILSON, J. D., BUCHANAN, B. B., LEMAUX, P. G., & PEDERSEN, J. F. (2010). Principal component analysis and biochemical characterization of protein and starch reveal primary targets for improving sorghum grain. *Plant Science*, 179(6), 598–611.