

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**

Escola de Veterinária

Programa de Pós-Graduação em Zootecnia

Rafael Araújo de Menezes

**ESTUDO DE META-ANÁLISE: EFEITO DO MILHO OU SORGO FLOCULADO  
EM DIETAS DE CONFINAMENTO DE GADO DE CORTE**

Belo Horizonte, 2024

Rafael Araújo de Menezes

**ESTUDO DE META-ANÁLISE: EFEITO DO MILHO OU SORGO FLOCULADO  
EM DIETAS DE CONFINAMENTO DE GADO DE CORTE**

Tese apresentada ao Departamento de Zootecnia da Escola de Veterinária da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor em Zootecnia.

Área de concentração: Nutrição de Ruminantes.

Orientador: Lúcio Carlos Gonçalves

Coorientador: Diogo Gonzaga Jayme

Belo Horizonte - MG

2024

M543e Menezes, Rafael Araújo de, 1994 -  
Estudo de meta-análise: efeito do milho ou sorgo floculado em dietas de confinamento de gado de corte/ Rafael Araújo de Menezes.- 2024.  
48f: il.

Orientador: Lúcio Carlos Gonçalves  
Coorientador:  
Diogo Gonzaga Jayme

Tese (Doutorado) apresentada à Escola de Medicina Veterinária da UFMG, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Zootecnia.

Área de Concentração: Nutrição de Ruminantes.

Inclui Bibliografias.

1. Bovino de corte - Teses - 2. Ruminante – Alimentação e rações - Teses – 3. Dieta em animais – Teses - I. Gonçalves, Lúcio Carlos - II. Jayme, Diogo Gonzaga – III. Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Veterinária - IV. Título.

CDD – 636.213

Bibliotecária responsável Cristiane Patrícia Gomes  
CRB 2569 Biblioteca da Escola de Veterinária,  
UFMG.



Escola de Veterinária  
UFMG

ESCOLA DE VETERINÁRIA DA UFMG  
CAMPUS DE PIRACARAÍ DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ZOOTECNIA  
Av. Antônio Carlos 6627 - CP 567 - CEP 30123-970 - Belo Horizonte - MG  
TELEFONE: (31) 3409-2171

www.vet.ufmg.br/academicos/pos-graduacao  
E-mail: eppavet@vet.ufmg.br

**ATA DE DEFESA DE TESE DO ALUNO RAFAEL ARAUJO DE MENEZES**

As 08:30 horas do dia 29 de maio de 2024, reuniu-se, a Comissão Examinadora de Tese, aprovada em reunião ordinária no dia 03/04/2024, para julgar, em exame final, a defesa da tese intitulada: ESTUDO DE META-ANÁLISE - RÍCIDIO EM MILHO DO TIPO FLOCU- SADO EM DIFERENTES DE CONTINUAÇÃO DE GADO DE CORTE

como requisito final para a obtenção do Grau de Doutor em

Zootecnia, área de concentração Produção Animal.

Aberto a sessão, o Presidente da Comissão, Prof. Lúcio Carlos Gonçalves, após dar a conhecer aos presentes o teor das Normas Regulamentares da Defesa de Tese, passou a palavra ao (a) candidato (a), para apresentação de seu trabalho. Seguiu-se a arguição pelos examinadores, com a respectiva defesa do candidato (a). Logo após, a Comissão se reuniu, sem a presença do candidato e do público, para julgamento da tese, tendo sido atribuídas as seguintes indicações:

	Aprovada	Reprovada
Prof.(a)/Dr.(a) <u>Guilherme Lobato Menezes</u>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Prof.(a)/Dr.(a) <u>Alex de Matos Teixeira</u>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Prof.(a)/Dr.(a) <u>Lúcio Carlos Gonçalves</u>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Prof.(a)/Dr.(a) <u>Ricardo Reis e Silva</u>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Prof.(a)/Dr.(a) <u>Eloísa de Oliveira Simões Saliba</u>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Pelas indicações, o (a) candidato (a) foi considerado (a):  
 Aprovado (a)  
 Reprovado (a)

Para concluir o Doutorado, o(a) candidato(a) deverá entregar 03 volumes encadernados da versão final da tese acatando, se houver, as modificações sugeridas pela banca, e a comprovação de submissão de pelo menos um artigo científico em periódico recomendado pelo Colegiado dos Cursos. Para tanto terá o prazo máximo de 60 dias a contar da data defesa.

O resultado final, foi comunicado publicamente ao (a) candidato (a) pelo Presidente da Comissão. Nada mais havendo a tratar, o Presidente encerrou a reunião e lavrou a presente ata, que será assinada por todos os membros participantes da Comissão Examinadora e encaminhada juntamente com um exemplar da tese apresentada para defesa.

Belo Horizonte, 29 de maio de 2024.

Documento assinado digitalmente  
gov.br  
GUILHERME LOBATO MENEZES  
Data: 29/05/2024 12:00:42 -0300  
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Documento assinado digitalmente  
gov.br  
ALEX DE MATOS TEIXEIRA  
Data: 29/05/2024 16:28:15 -0300  
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Documento assinado digitalmente  
gov.br  
RICARDO REIS E SILVA  
Data: 29/05/2024 17:52:24 -0300  
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Ricardo Carlos Gonçalves

## AGRADECIMENTOS

Todo o trabalho e todas as conquistas até então tiveram participações de inúmeras pessoas, cada uma com a sua importância. Meus sinceros agradecimentos a cada um de vocês.

Especialmente, agradeço à minha família pelo suporte e apoio imensuráveis concedidos durante a minha jornada. Vocês me oferecem diariamente toda a base necessária para ser quem sou e chegar aos meus objetivos. Um agradecimento especial também ao professor Lúcio, o qual me ensinou além da teoria acadêmica e me impulsionou para um futuro profissional de sucesso – você honra a difícil tarefa de orientar estudantes.

Aos meus amigos, os quais estão sempre presentes, não importa a situação. Obrigado por deixar meus dias mais leves e divertidos. Vocês comprovam que a distância é um mero detalhe.

Agradeço aos meus amigos e colegas de trabalho, tanto da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) quanto da Universidade de New Hampshire (UNH), com os quais compartilhei aprendizados e momentos marcantes. Sorte a minha ter me desenvolvido junto aos membros do memorável Grupo da Forragem.

## RESUMO

A presente tese teve o seguinte objetivo: realizar uma revisão sistemática e meta-análise para comparar a eficácia do processo de floculação a vapor em grãos de milho ou sorgo (FV) com moagem e laminação a seco (MLS). O consistiu inicialmente em uma pesquisa sistemática com as palavras-chave "corn" or "sorghum", "beef cattle", and "steam-flaked" nos bancos de dados Scopus, Embase, Web of Science e PubMed. Foi realizada uma meta-análise abrangente, utilizando-se a diferença média aleatória entre os grupos de tratamento com um intervalo de confiança de 95%. As variáveis foram categorizadas com base em covariáveis como país do estudo, dias de alimentação, dias de adaptação à dieta e peso corporal inicial. Essas covariáveis foram posteriormente submetidas à análise de meta-regressão. Sempre que uma covariável teve efeito significativo no Teste do Moderador, foi realizada uma análise de subgrupo. Os bovinos que consumiram dietas FV apresentaram maior digestibilidade total de amido e matéria orgânica em comparação com dietas PO. O confinamento produziu 11,6% menos amido fecal e teve consumo diário de matéria seca reduzido em 0,422 kg/d. Como resultado, apresentaram ganho médio diário (GMD) superior de 42 g/d e eficiência alimentar (EA) de 11,8 g de peso vivo por kg de MS ingerida a mais em comparação com bovinos que consumiram dietas com milho ou sorgo submetidos a MLS. Uma melhor EA é fundamental para melhorar a rentabilidade e a sustentabilidade dos sistemas pecuários. O melhor desempenho de bovinos de corte que consumiram dietas FV proporcionou 4,85 kg a mais de peso de carcaça quente (PCQ) em comparação aos animais que consumiram dietas MLS. Em síntese, a incorporação de milho e sorgo em flocos a vapor nas dietas de bovinos de corte pode aumentar a EA, o GMD e o PCQ.

**Palavras-chave:** amido; concentrado; confinamento; grão inteiro; grão laminado; processamento.

## ABSTRACT

The objective of this study was to perform a systematic review and meta-analysis to compare the effectiveness of steam-flaked (SF) corn or sorghum with dry-rolled or milled (DRM) grains. Initially, a systematic search was conducted using keywords such as "corn" or "sorghum", "beef cattle", and "steam-flaked" in the Scopus, Embase, Web of Science, and PubMed databases. A comprehensive meta-analysis was performed using the random mean difference between treatment groups with a 95% confidence interval. The variables were categorized based on covariates such as the study's country, feeding days, diet adaptation days, and initial body weight. These covariates were subsequently subjected to meta-regression analysis. Whenever a covariate had a significant effect in the Moderator Test, a subgroup analysis was conducted. Cattle consuming SF diets showed higher total tract starch digestibility and organic matter digestibility compared to DRM diets. Feedlot cattle on SF diets produced 11.6% less fecal starch and had a reduced daily dry matter intake (DMI) by 0.422 kg/day. As a result, they had a higher average daily gain (ADG) by 42 g/day and feed efficiency (FE) of 11.8 g of body weight per kg of dry matter intake (DMI) more compared to cattle on DRM diets. Improved FE is crucial for enhancing the profitability and sustainability of livestock systems. The superior performance of beef cattle consuming SF diets resulted in 4.85 kg more hot carcass weight (HCW) compared to animals on DRM diets. In summary, incorporating steam-flaked corn and sorghum in beef cattle diets can increase FE, ADG, and HCW.

**Keywords:** concentrate; confinement; processing; rolled grain; starch; whole grain.

## LISTA DE FIGURAS E TABELAS

Figure 1. Flowchart of the selection process of studies included in the meta-analysis .....	50
Table 1. Ingredients used in all diets provided in the selected studies .....	51
Table 2. Chemical composition of the all diets provided in the selected studies .....	52
Table 3. Effect of corn and sorghum grain processing on digestibility and performance variables in beef cattle .....	53
Table 4. Effect of covariables on the digestibility and performance variables comparing steam-flaked with dry-rolled or milled corn and sorghum grains .....	54
Figure 2. Row mean difference (RMD) of subgroup analysis showing the influence of covariates significant in the meta-regression on digestibility and performance parameters .....	55
Figure 3. Funnel plots exhibit the effect of steam-flaking process of corn or sorghum grains .....	56

## LISTA DE ABREVIATURAS

CMS	Consumo de Matéria Seca
MLS	Moagem e Laminação a Seco
EA	Eficiência Alimentar
MS	Matéria Seca
<i>P</i>	Probabilidade estatística (p-value, nível de significância em testes estatísticos)
rpm	Rotações por minuto
FV	Floculação a Vapor
USDA	United States Department of Agriculture

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO GERAL.....</b>	<b>12</b>
Uso de milho floculado em sistema de confinamento de gado de corte .....	12
Referências .....	14
<b>REVISÃO DE LITERATURA SOBRE MILHO FLOCULADO.....</b>	<b>15</b>
Processamento de grãos .....	15
<b>Moagem.....</b>	<b>15</b>
<b>Laminação a seco.....</b>	<b>16</b>
<b>Floculação a Vapor .....</b>	<b>16</b>
<b>Silagem de grão úmido e Silagem de grão reidratado .....</b>	<b>17</b>
<b>Extrusão .....</b>	<b>17</b>
Milho Floculado como Ingrediente Energético na dieta de ruminantes .....	18
Resultados de experimentos a campo.....	21
Considerações finais.....	23
Referências.....	24
<b>ARTIGO REDIGIDO NAS NORMAS DE <i>JOURNAL OF ANIMAL SCIENCE</i> .....</b>	<b>28</b>
ABSTRACT.....	30
LIST OF ABBREVIATIONS: .....	31

INTRODUCTION .....	32
MATERIALS AND METHODS .....	32
<b>Literature search</b> .....	<b>33</b>
<b>Eligibility criteria</b> .....	<b>33</b>
<b>Study selection and data collection process</b> .....	<b>34</b>
<b>Statistical Analysis</b> .....	<b>34</b>
RESULTS AND DISCUSSION .....	37
<b>Systematic Review</b> .....	<b>37</b>
<b>Meta-analysis</b> .....	<b>38</b>
<b>Bias Publication Risk, Heterogenicity, and Adjusted R</b> .....	<b>41</b>
CONCLUSIONS.....	42
LITERATURE CITED .....	44

## INTRODUÇÃO GERAL

### Uso de milho floculado em sistema de confinamento de gado de corte

O milho (*Zea mays*) é uma das culturas mais conhecidas e é utilizada mundialmente tanto na alimentação humana quanto animal, desempenhando um papel crucial como de energia ao metabolismo. Na alimentação de ruminantes, a planta de milho também é fonte de fibras, proteínas, minerais e vitaminas contribuindo para satisfazer as necessidades nutricionais dos animais. Em 2023, a produção global da cultura do milho atingiu 1,12 bilhões de toneladas, em que os Estados Unidos lideram com 32% do total, seguido pela China 23% e pelo Brasil com 10% (USDA, 2023a). Esta produção vasta é majoritariamente destinada à alimentação animal, influenciando diretamente a produção de carne, leite e derivados. A versatilidade desta planta permite inclusão nas dietas em diversas formas (silagem, grão, palha, coprodutos) adaptando-se a vários regimes nutricionais e estratégias de manejo, o que facilita a formulação de dietas balanceadas que otimizam a eficiência alimentar e promovem o crescimento saudável.

O grão de milho é a principal fonte de energia consumida pelos animais domésticos dentro dos sistemas de produção. Nos Estados Unidos, por exemplo, aproximadamente 40% da produção do grão de milho é destinada à alimentação animal (USDA, 2023b). Tal magnitude de produção, bem como sua posição indispensável nesses sistemas se deve, principalmente, a alta densidade energética do milho (cerca de 80% do grão é composto por amido; Giuberti et al., 2013), o que favorece o ganho de peso e a eficiência alimentar animal (Jiang et al., 2020).

A eficiência do milho como fonte de energia para ruminantes e sua digestibilidade variam significativamente conforme o tipo de grão, seja dentado ou duro (também chamado de '*flint*'), e o método de processamento utilizado, incluindo moagem, floculação a vapor ou ensilagem. Os

métodos de processamento buscam aprimorar a disponibilidade do amido para fermentação no rúmen e a digestibilidade total no trato gastrointestinal. A escolha do método, quando utilizado, deve ser cuidadosa e considerar os objetivos propostos. O papel da pesquisa científica contínua é fundamental para melhor compreender essas dinâmicas e orientar práticas de manejo nutricional eficazes. Todavia, existem desafios para a utilização do grão de milho como ingrediente na dieta de ruminantes. Caso não forem adotadas dietas balanceadas e estratégias de manejo nutricional adequadas, doenças como a acidose ruminal poderão ocorrer, gerando prejuízos zootécnicos e financeiros.

Entre as diferentes formas de processamento do milho, a floculação a vapor se destaca por seu potencial de melhorar a eficiência nutricional e produtiva em dietas de bovinos. No entanto, ainda é discutível os exatos efeitos desse método e suas implicações a campo. A necessidade de uma análise aprofundada sobre o uso de milho floculado, particularmente para gado de corte, se torna evidente diante da variação de resultados encontrados na literatura. Isso enfatiza a importância de conduzir mais estudos capazes de fornecer uma base sólida para tomada de decisões, cenário este em que o estudo de meta-análise é uma oportunidade de sumarizar resultados divergentes e melhor direcioná-los para tomada de decisão.

Deste modo, a presente tese teve os seguintes objetivos: (a) comparar a eficácia do processo de floculação a vapor em grãos de milho ou sorgo com outros métodos de processamento quanto a parâmetros de digestibilidade e desempenho em gado de corte confinado, considerando-se as diferenças nos sistemas de pecuária de corte como localização, dias de adaptação à dieta, dias de alimentação e peso corporal inicial; (b) avaliar a eficiência de utilização de diferentes categorias de suplementos quanto ao desempenho produtivo de vacas leiteiras criadas a pasto.

## Referências

Giuberti, G., Gallo, A., Moschini, M., Cerioli, C., & Masoero, F. (2013). Evaluation of the impact of maize endosperm vitreousness on in vitro starch digestion, dry matter digestibility and fermentation characteristics for pigs. *Animal Feed Science and Technology*, 186(1-2), 71–80. doi:10.1016/j.anifeedsci.2013.08.011

Jiang, Z., Liu, C., Ganapathysubramanian, B., Hayes, D. e Sarkar, S., 2020. Predicting county-scale maize yields with publicly available data. *Sci. Rep.*, 10. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-71898-8> [Acesso em: 30 março 2024].

USDA, 2023a. Crop Explorer. Disponível em: <https://ipad.fas.usda.gov/cropexplorer/cropview/commodityView.aspx?cropid=0440000> [Acesso em: 30 março 2024].

USDA, 2023b. Feed Grains Sector at a Glance. Disponível em: <https://www.ers.usda.gov/topics/crops/corn-and-other-feed-grains/feed-grains-sector-at-a-glance/#:~:text=Feed%20use%2C%20a%20derived%20demand%2C%20is%20closely%20related,about%2040%20percent%20of%20total%20domestic%20corn%20use> [Acesso em: 30 março 2024].

## REVISÃO DE LITERATURA SOBRE MILHO FLOCULADO

### Processamento de grãos

Os métodos de processamento de grãos, particularmente de milho e de sorgo, desempenham um papel fundamental para otimizar a disponibilidade de nutrientes, como o amido, para os animais, em especial os bovinos de corte. Esses métodos modificam a estrutura físico-química dos grãos, influenciando significativamente a digestibilidade, a fermentação no rúmen e, por consequência, o desempenho dos animais. Existem uma gama de técnicas para o tratamento de grãos, incluindo a pulverização, a extrusão e a torra, embora sejam menos comuns em comparação com métodos tradicionais. As práticas mais utilizadas nas dietas de ruminantes envolvem o uso de grãos inteiros, processamento seco, umedecimento, reidratação e laminação. Abaixo, os principais métodos de processamento do milho são descritos a seguir, considerando-se suas implicações nutricionais e práticas para a alimentação de ruminantes.

#### *Moagem*

A trituração do grão de milho altera sua estrutura física, rompendo o endosperma e aumentando a área de superfície do amido exposta e disponível para a ação dos microrganismos e enzimas. Tal modificação aumenta a digestibilidade ruminal do amido, contribuindo para aproveitamento nutricional energético da dieta. Notoriamente, a digestão da matéria seca é mais efetiva quando o milho é finamente triturado em comparação com sua forma integral, o que também contribui para a redução de grãos não digeridos nas fezes (Richards & Hicks, 2007; Pereira et al., 2009).

### *Laminação a seco*

O processo de laminação a seco envolve a quebra do grão em pedaços menores através de um par de rolos compressores, cuja configuração determina o grau de fragmentação. Semelhante à moagem, essa técnica altera apenas a estrutura física do grão. Isso resulta em uma digestibilidade ruminal superior em comparação ao grão inteiro, embora seja inferior àquela observada com a moagem. A utilização de concentrados que incluam grãos processados dessa forma leva a um aumento na quantidade de amido que alcança o intestino delgado. No entanto, a disponibilidade de amido pode ser limitada, já que apresenta uma área de contato reduzida para a ação das amilases (Richards & Hicks, 2007; Pereira et al., 2009).

### *Floculação a Vapor*

A floculação a vapor envolve a exposição do milho à umidade seguida de aquecimento e prensagem entre rolos compressores para formar flocos. Este processo proporciona as mesmas mudanças físicas que a laminação a seco, mas promove também a reação de gelatinização do amido. Essa reação se refere à solubilização parcial do amido pela quebra de ligações intermoleculares, permitindo intensa hidratação, inchaço irreversível e ruptura (Zinn et al., 2002). Isso facilita o acesso bacteriano e a ação de amilases. Entretanto, a exposição prolongada ao calor durante o armazenamento pode reverter esse processo e reduzir a disponibilidade do amido (Trotta et al., 2021).

No método de floculação a vapor, os grãos inteiros são submetidos a cozimento por aproximadamente 60 minutos em uma câmara de vapor vertical, onde há elevação da umidade para níveis entre 18-20%. Após serem cozidos, esses grãos são processados por um moinho de rolos ajustado a uma temperatura aproximada de 105°C, resultando em flocos com densidade

aproximada de 390 a 415 g/L (Pereira et al., 2009). A floculação demonstrou melhorar a digestibilidade do amido no rúmen, aumentando assim a eficiência alimentar e o desempenho dos animais. A densidade dos flocos é um aspecto crítico, com flocos menos densos associados a uma maior digestibilidade do amido (Rahimi et al., 2020).

### *Silagem de grão úmido e Silagem de grão reidratado*

Colher o grão com maior teor de umidade ou adicionar umidade após a colheita (reidratação) tende a aprimorar sua digestibilidade e valor nutricional. A faixa de umidade recomendada varia entre 25% e 33%. Os grãos colhidos geralmente são processados por laminação ou moagem para assegurar um empacotamento eficaz (Richards & Hicks, 2007). A conservação ocorre por meio da fermentação anaeróbia dos grãos ensilados, processo no qual a solubilização parcial do amido e de outros componentes dos grãos pode favorecer a digestibilidade e o desempenho animal (Godoi et al., 2021). O intervalo ideal para a colheita do milho destinado ao armazenamento úmido varia entre sete a catorze dias, ao passo que para o sorgo, esse período é mais breve, durando apenas dois a cinco dias, devido à maior exposição desta cultura ao ambiente. Tal diferença faz com que o milho seja predominantemente escolhido e guardado em condições úmidas. Já o sorgo, em virtude de sua curta janela temporal ideal para a colheita, com frequência passa por um processo de reidratação para facilitar a fermentação (Richards & Hicks, 2007).

### *Extrusão*

A extrusão expõe o milho a alta pressão e temperatura, passando-o através de um orifício para moldar o produto final (Richards & Hicks, 2007). Han et al. (2022) fizeram a extrusão de grãos de milho a temperatura de 130–140 °C utilizando-se uma extrusora de rosca única, com

velocidade do fuso de 400 rpm, e diâmetro de 3 mm. Os autores observaram que a extrusão causou expansão do grão e baixa cristalinidade do amido, o que aumentou o seu grau de gelatinização e digestibilidade. A extrusão pode melhorar ainda mais o valor nutricional dos grãos para animais jovens ou de alta produção, os quais demandam mais energia.

Cada um destes processos de manejo de grãos possui atributos particulares que podem influenciar a nutrição e a performance de ruminantes de formas variadas. A opção mais benéfica depende dos objetivos produtivos específicos, das características do rebanho e de deliberações práticas como gastos e disponibilidade de equipamentos.

### **Milho Floculado como Ingrediente Energético na dieta de ruminantes**

As pesquisas científicas sobre o uso da floculação a vapor em grãos de milho na alimentação de bovinos iniciaram no final da década de 1980 como alternativa ao milho laminado (Ramírez et al., 1985; Zinn, 1987). Estes e outros trabalhos desenvolvidos em seguida, demonstraram que as maiores vantagens da floculação a vapor do grão de milho seria a redução do consumo de matéria seca e o aumento da eficiência alimentar para a criação de gado de leite e de gado de corte (Yu et al., 1997; Yu et al., 1998, Theurer et al., 1999). Essas parecem ser as duas vantagens principais da floculação de grãos, as quais até hoje são testadas, vantagens essas que suportariam, em tese, a razão e a viabilidade de investir em um floculador no sistema de confinamento. A partir do século XXI, diversos experimentos foram conduzidos a fim de entender melhor a utilização de grãos floculados, incluindo o milho e o sorgo, avaliando as variações de processamento do floco e os níveis de inclusão na dieta sobre o consumo e desempenho animal. Então, novos estudos deram sequência abordando aspectos mais específicos deste processamento

de grãos, como o teor de umidade e a densidade do floco (Sindt et al., 2006), bem como a digestibilidade e a cinética de degradação ruimal (Xu et al., 2018).

Atualmente já se sabe que durante o processo de floculação ocorrem mudanças físicas importantes para melhorar a digestibilidade dos grãos: a ruptura do pericarpo e ao rompimento parcial da matriz proteica aumenta a área de superfície dos grânulos de amido (Xu et al., 2018; McAllister & Ribeiro, 2013) e a umidificação e o calor promovem a gelatinização do amido e, secundariamente, a solubilização dos componentes orgânicos não amiláceos dos grãos (Zinn et al., 2002). Essas mudanças convergem para o aumento do valor energético do grão em 18% (Zinn et al., 2002) e a melhora da conversão alimentar da dieta superior a 10%, em comparação os grãos submetidos à laminação a seco (Owens et al., 1997), assim como pode, ainda, reduzir a pegada de carbono da alimentação do gado (Cole et al., 2020).

A densidade do floco pode variar de acordo com a metodologia de processamento aplicada. Embora algumas recomendações se divirjam entre autores, sugere-se que a densidade entre 0.26 e 0.36 kg/L é a mais favorável para otimizar o desempenho animal e a eficiência do sistema de confinamento (Brown et al., 2000). Entretanto, existe uma tendência majoritária de se propor a densidade do floco a 360g/L (Zinn, 1990; Theurer et al., 1999; Hales et al., 2010) já que densidades muito baixas podem ser indesejáveis. Por exemplo, Sindt et al. (2006) avaliaram o teor de umidade e a densidade do milho flocado a vapor no local e extensão da digestibilidade e valor nutricional para bovinos em terminação e concluíram que processar milho de forma mais extensiva do que o 360g/L pode ser desnecessário e ter um custo inviável. Além disso, a umidificação prévia do grão aumentou a disponibilidade de amido no rumen, embora resultou em poucas diferenças no desempenho ou digestibilidade.

Acompanhada da metodologia teórica, é importante que medidas práticas de ação e monitoramento do processo de floculação sejam adotadas a fim de facilitar e garantir os resultados. Uma destas medidas é regular a densidade do floco pela espessura do floco pelos rolos compressores. [Ahn et al. \(2020\)](#) avaliaram a espessura ideal dos flocos de milho produzidos usando a câmara de vapor pressurizada. A conclusão foi que a espessura ideal seja de 2,5 a 3,0 mm levando-se em consideração a eficiência da produção e a viabilidade econômica. Outro estudo realizado por [Franco-Hernández et al. \(2023\)](#) comparou diferentes densidades e espessuras de floculação e a reatividade de amiloglucosidase como preditores da degradação ruminal do amido. Descobriu-se que a fermentação no rúmen e a digestibilidade total do amido eram mais bem previstas pelo teor de amido fecal, demonstrando-se a importância da qualidade do processamento do milho floculado sobre a eficiência da digestão de amido em dietas de terminação para gado de corte. Isso corrobora com a recomendação de [Zinn et al. \(2002\)](#) de que o processo de floculação a vapor seja otimizado com base na análise de amido fecal.

Todavia, é preciso atentar aos efeitos colaterais que o aumento da digestibilidade do amido e a produção de ácidos no rumen pelo uso de grãos floculados pode causar, como por exemplo o risco de acidose ruminal. A acidose ocorre quando a produção de ácidos (como propionato e lactato) proveniente dessa eficiente fermentação supera a capacidade tampão do rumen, o pH do meio pode cair drasticamente, ([Krause & Oetzel, 2006](#)), causando redução do consumo, perdas produtivas e financeiras. Essa condição se torna, então, mais perceptível à medida que aumentamos a inclusão de grãos floculados na dieta. Essa é uma preocupação constante em confinamentos de gado de corte, uma vez que as dietas nesses sistemas são, muitas vezes, desafiadoras do ponto de vista fisiológico. Não é raro encontrarmos altas inclusões de concentrado nessas dietas, acima de 80%. Por exemplo, países que são referências na produção de carne, como os Estados Unidos e o

Brasil, utilizam cerca de 90% e 83% de alimentos concentrados nas dietas de terminação, respectivamente, em que os principais grãos energéticos são o milho e o sorgo (Samuelson et al., 2016; Silvestre & Millen, 2021).

Outro aspecto nutricional a ser considerado é a sincronização entre a disponibilidade de energia e de proteína degradável no rumen. Para se fazer jus ao aproveitamento do conteúdo energético contido nos flocos, as bactérias ruminais necessitam de nitrogênio em forma de amônia ou aminoácidos essenciais em período e intensidade proporcionais. Ao contrário, o excesso de energia será desperdiçado e utilizado predominantemente por bactérias produtoras de ácido láctico. Por outro lado, a manipulação adequada da relação proteína degradável no rúmen para proteína não degradável no rúmen, em combinação com milho floculado, pode otimizar ainda mais o a síntese microbiana e a saúde ruminal, sugerindo que a estratégia adotada para a formulação de dietas utilizando-se grãos floculados é um fator chave no sucesso da atividade (Ahmadi et al., 2020).

### **Resultados de experimentos a campo**

Apesar de que há trabalhos que confirmam os efeitos favoráveis da floculação a vapor do milho e sorgo como componente energético das dietas, a inconsistência nos resultados ainda é questão de debate. Um estudo de meta-análise e meta-regressão sobre o uso do grão de milho floculado a vapor ou inteiros em dieta de ruminantes já foi publicado. Entretanto, o foco desse trabalho foi em vacas leiteiras. O estudo mostrou que a substituição de grãos de milho finamente moído por grãos floculados a vapor não alterou o pH ruminal nem a produção de leite (tendência a um aumento de 0,195 kg/d;  $P=0,077$ ), porém aumentou o teor de proteína do leite (Rafiee &

[Darabighane, 2021](#)). Em um experimento a campo com novilhos de corte em fase de terminação, [McDaniel et al. \(2021\)](#) testaram a substituição de 20% do milho floculado a vapor por milho inteiro na dieta dos animais. Não foi encontrada diferença ( $P > 0.10$ ) entre os tratamentos quanto ao desempenho geral e características de carcaça, apenas a redução de 0,65 kg/d no CMS uma tendência ( $P = 0,07$ ) em diminuir a qualidade das carcaças segundo o sistema de classificação americano *USDA Choice*. Já [González-Vizcarra et al. \(2017\)](#) observaram resultados favoráveis ( $P < 0.01$ ) para o milho laminado a seco comparado com o milho floculado a vapor. Os autores concluíram que a substituição aumentou o ganho médio diário sem afetar o consumo de matéria seca, resultando em uma eficiência de ganho de 10,7%. Estes resultados diferem dos resultados encontrados em outros estudos, dietas a base de milho floculado a vapor foram comparados com animais recebendo dietas a base de milho grão inteiro ([Meier et al., 2022](#)), moído ([Wang et al., 2018](#); [Melo et al., 2019](#)) ou laminado a seco ([Corona et al., 2005](#)). Nestes outros estudos, os animais que consumiram o milho floculado apresentaram melhores resultados, como redução de 7% ( $P = 0,001$ ) no consumo de matéria seca e aumentos de 9% ( $P < 0.05$ ) no ganho no peso médio diário, 17% ( $P < 0.01$ ) na eficiência alimentar, 1,5% ( $P < 0.01$ ) no peso de carcaça e 1,5% ( $P < 0.01$ ) no acabamento de carcaça.

Assim, percebe-se que existe algumas lacunas a serem preenchidas acerca da eficácia deste processamento no sistema de confinamento de bovinos de corte. Isso exige uma análise cuidadosa sob duas perspectivas que, embora estejam intimamente ligadas, são aparentemente distintas. Primeiramente, devemos considerar os efeitos nutricionais versus produtivos dessa prática e, em segundo lugar, considerar se estamos comparando a floculação a vapor com qualquer outro método tradicional de processamento ou se estamos comparando com algum método específico, como moagem, a laminação a seco ou a moagem. Outra questão importante é quantificar esses possíveis

ganhos que o processo de floculação a vapor pode gerar. Obter valores médios e parâmetros mais sólidos do quanto a digestibilidade, desempenho animal e características de carcaça podem ser afetadas, será crucial para a avaliação da viabilidade do investimento e dar confiança aos produtores na tomada de decisão. Essa abordagem é crucial para uma compreensão aprofundada dos benefícios e potenciais limitações da floculação a vapor na nutrição de ruminantes, permitindo uma estimativa mais precisa e embasada.

### **Considerações finais**

Em geral, o processamento do grão de milho aumenta a fermentabilidade do amido no rumen, absorção intestinal e a disponibilidade de energia metabolizável. A floculação a vapor é um dos mais eficientes tipos de processamento, senão o melhor, para promover tais melhorias. Todavia, seus efeitos sobre parâmetros de digestibilidade e de desempenho em gado de corte confinado ainda necessita ser estudado com o objetivo de sanar dúvidas de resultados controversos da literatura e proporcionar respostas mais concretas para a aplicação prática a campo.

## Referências

A. Rahim, A.A. Naserian, R. Valizadeh, A.M. Tahmasebi, H. Dehghani, K.I. Sung, J. Ghassemi Nejad. Effect of different corn processing methods on starch gelatinization, granule structure alternation, rumen kinetic dynamics and starch digestion. *Animal Feed Science and Technology*, Volume 268, October 2020, 114572.

Ahmadi, F., G. R. Ghorbani, A. Sadeghi-Sefidmazgi, M. Heydari, H. Rafiee, and K. A. Beauchemin. 2020. Performance and feeding behavior of dairy cows fed high-concentrate diets containing steam-flaked or ground corn varying in particle size. *J. Dairy Sci.* 103:3191–3203. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-17344>.

C. B. Theurer, J. Huber, A. Delgado-Elorduy and R. Wanderley. "Invited review: summary of steam-flaking corn or sorghum grain for lactating dairy cows." *Journal of dairy science*, 82 9 (1999): 1950-9. [https://doi.org/10.3168/JDS.S0022-0302\(99\)75431-7](https://doi.org/10.3168/JDS.S0022-0302(99)75431-7).

Franco-Hernández, M., Corona, L., Plascencia, A., & Zinn, R., 2023. Practical parameters for assessing starch digestion and feeding value of steam-flaked corn in finishing diets for feedlot cattle. *Journal of Applied Animal Research*, 51, pp. 24 - 30. <https://doi.org/10.1080/09712119.2022.2149537>.

Godoi LA, Silva BC, Silva FAS, Pucetti P, Pacheco MVC, Souza GAP, Lage BC, Rennó LN, Schoonmaker JP and Valadares Filho SC (2021a) Effect of flint corn processing methods on intake, digestion sites, rumen pH, and ruminal kinetics in finishing Nellore bulls. *Animal Feed Science and Technology* 271, 114775.

Han, Chengxing, Yanli Guo, Xiaofang Cai, and Ruixing Yang. 2022. "Starch Properties, Nutrients Profiles, In Vitro Ruminant Fermentation and Molecular Structure of Corn Processed in Different Ways" *Fermentation* 8, no. 7: 315. <https://doi.org/10.3390/fermentation8070315>.

J. Ahn, J. Shin, Min-Ji Kim, G. Son, Deok-Yun Gil, E. Kwon and B. Park. "A study on the optimal thickness of corn flakes produced by using the pressurized steam chamber." *Journal of Animal Science and Technology*, 62 (2020): 475 - 484. <https://doi.org/10.5187/jast.2020.62.4.475>.

K. Hales, J. McMeniman, J. Leibovich, J. Vasconcelos, M. Quinn, M. May, N. Dilorenzo, D. Smith and M. Galyean. "Effects of varying bulk densities of steam-flaked corn and dietary roughage concentration on in vitro fermentation, performance, carcass quality, and acid-base balance measurements in finishing steers." *Journal of animal science*, 88 3 (2010): 1135-47. <https://doi.org/10.2527/jas.2009-2400>.

Krause, K.M., Oetzel, G.R., 2006. Understanding and preventing subacute ruminal acidosis in dairy herds: A review. *Anim. Feed Sci. Technol.* 126, 215–236.

L. Corona, S. Rodriguez, R.A. Ware, R.A. Zinn PAS. Comparative Effects of Whole, Ground, Dry-Rolled, and Steam-Flaked Corn on Digestion and Growth Performance in Feedlot Cattle. *The Professional Animal Scientist*, Volume 21, Issue 3, June 2005, Pages 200-206.

McAllister, T. A., and G. Ribeiro, (2013). Microbial strategies in the ruminal digestion of starch. In: Proc. 50th, Sociedade Brasileira de Zootecnia, Campinas, SP, Brazil. (CD-ROM).

McDaniel, M., Tracey, L., Cole, N., Ivey, S., & Löest, C. (2021). Evaluation of whole corn substitution in diets based on steam-flaked corn containing different concentrations of wet distillers grains with solubles for beef cattle, 37, 140-154. <https://doi.org/10.15232/AAS.2020-02124>.

Melo, A., Marques, R., Gouvêa, V., Souza, J., Batalha, C., Basto, D., Millen, D., Drouillard, J., & Santos, F., 2019. Effects of dietary roughage neutral detergent fiber levels and flint corn processing method on growth performance, carcass characteristics, feeding behavior and rumen morphometrics of *Bos indicus* cattle. *Journal of animal science*. <https://doi.org/10.1093/jas/skz197>.

N Andy Cole, David B Parker, Michael S Brown, Jenny S Jennings, Kristin E Hales, Stacey A Gunter, Effects of steam flaking on the carbon footprint of finishing beef cattle., *Translational Animal Science*, Volume 4, Issue Supplement\_1, December 2020, Pages S84–S89, <https://doi.org/10.1093/tas/txaa110>

Nolan R. Meier, Karla Wilke, Galen E. Erickson, Pablo Loza, University of Nebraska-Lincoln. Effects of Corn Processing and Silage Inclusion Levels in Feedlot Diets on Steer Performance. *J. Anim. Sci* Vol. 100, Suppl. S2. 2022.

Owens FN, Secrist DS, Hill WJ, et al. The effect of grain source and grain processing on performance of feedlot cattle: a review. *J Anim Sci* 1997; 75:868–79.

P. Yu, J. Huber, C. B. Theurer, K. Chen, L. Nussio and Z. Wu. "Effect of steam-flaked or steam-rolled corn with or without *Aspergillus oryzae* in the diet on performance of dairy cows fed during hot weather." *Journal of dairy science*, 80 12 (1997): 3293-7. [https://doi.org/10.3168/JDS.S0022-0302\(97\)76304-5](https://doi.org/10.3168/JDS.S0022-0302(97)76304-5).

Pereira, L.G.R. et al. 2009. O milho na alimentação de gado de leite. In.: Gonçalves, L.C., Borges, I., Ferreira, P.D.S. Alimentos para Gado de Leite. FEPMVZ-Editora, Belo Horizonte, 2009. 568 p.

R. Zinn. "Influence of flake density on the comparative feeding value of steam-flaked corn for feedlot cattle." *Journal of animal science*, 68 3 (1990): 767-75. <https://doi.org/10.2527/1990.683767X>.

R. Zinn. "Influence of lasalocid and monensin plus tylosin on comparative feeding value of steam-flaked versus dry-rolled corn in diets for feedlot cattle." *Journal of animal science*, 65 1 (1987): 256-66. <https://doi.org/10.2527/JAS1987.651256X.P>.

Rafiee, H., & Darabighane, B. (2021). A meta-analysis and meta-regression of the effect of substitution of steam-flaked corn instead of finely ground corn on dry matter intake, nutrients digestibility, lactation performance, and rumen fermentation in dairy cows. *Animal Feed Science and Technology*, 280, 115043. doi:10.1016/j.anifeedsci.2021.115043.

Richards, C. J., & Hicks, B. (2007). Processing of Corn and Sorghum for Feedlot Cattle. *Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice*, 23(2), 207–221. doi: 10.1016/j.cvfa.2007.05.006

Ronald J Trotta, Kelly K Kreikemeier, Randy F Royle, Todd Milton, David L Harmon, Flake density and starch retrogradation influence in situ ruminal degradability characteristics of steam-flaked corn and predicted starch digestibility and energetic efficiency, *Journal of Animal Science*, Volume 99, Issue 11, November 2021, skab298, <https://doi.org/10.1093/jas/skab298>

Ronald J Trotta, Kelly K Kreikemeier, Randy F Royle, Todd Milton, David L Harmon, Flake density and starch retrogradation influence in situ ruminal degradability characteristics of steam-flaked corn and predicted starch digestibility and energetic efficiency, *Journal of Animal Science*, Volume 99, Issue 11, November 2021, skab298, <https://doi.org/10.1093/jas/skab298>

Samuelson, K. L., Hubbert, M. E., Galyean, M. L., Löest, C. A. (2016). Nutritional recommendations of feedlot consulting nutritionists: The 2015 New Mexico State and Texas Tech University survey1. *Journal of Animal Science*, 94(6), 2648–2663. doi:10.2527/jas.2016-0282.

Silvestre, A. M. and Millen, D. D. (2021). The 2019 Brazilian survey on nutritional practices provided by feedlot cattle consulting nutritionists. *Revista Brasileira de Zootecnia* 50:e20200189. <https://doi.org/10.37496/rbz5020200189>.

Sindt, J., Drouillard, J., Titgemeyer, E., Montgomery, S., Loe, E., Depenbusch, B., & Walz, P. (2006). Influence of steam-flaked corn moisture level and density on the site and extent of digestibility and feeding value for finishing cattle. *Journal of animal science*, 84 2, 424-32. <https://doi.org/10.2527/2006.842424X>.

Víctor Manuel González-Vizcarra, Alejandro Plascencia, Daniel Ramos-Aviña, and Richard Avery Zinn. Influence of substituting steam-flaked corn for dry-rolled corn on feedlot cattle growth performance when cattle are allowed either ad libitum or restricted access to the finishing diet. *Asian-Australas J Anim Sci*. 2017 Nov; 30(11): 1563–1567.

Wang, C., Liu, Q., Guo, G., Huo, W. J., Zhang, Y. L., Pei, C. X., ... Wang, H. (2018). Effects of substituting corn with steam-flaked sorghum on growth, digestion and blood metabolites in young cattle fed feedlot diets. *Animal Production Science*, 58(2), 299. doi:10.1071/an16265

Xu, N., Liu, J., & Yu, P. (2018). Alteration of biomacromolecule in corn by steam flaking in relation to biodegradation kinetics in ruminant, revealed with vibrational molecular spectroscopy. *Spectrochimica acta. Part A, Molecular and biomolecular spectroscopy*, 191, 491-497. <https://doi.org/10.1016/j.saa.2017.10.040>.

Yu, J. Huber, F. Santos, J. Simas and C. B. Theurer. "Effects of ground, steam-flaked, and steam-rolled corn grains on performance of lactating cows." *Journal of dairy science*, 81 3 (1998): 777-83. [https://doi.org/10.3168/JDS.S0022-0302\(98\)75634-6](https://doi.org/10.3168/JDS.S0022-0302(98)75634-6).

Zinn RA, Owens FN, Ware RA. Flaking corn: processing mechanics, quality standards, and impacts on energy availability and performance of feedlot cattle. *J Anim Sci* 2002; 80: 1145–56.

**ARTIGO REDIGIDO NAS NORMAS DE *JOURNAL OF ANIMAL SCIENCE***

## Steam-flaked corn or sorghum in feedlot diets: systematic review and meta-analysis

Rafael Araujo de Menezes\* § ¶

\* Department of Animal Science, Federal University of Minas Gerais, 31270-901, Belo Horizonte, MG, Brazil.

§ Department of Agriculture, Nutrition, and Food Systems, University of New Hampshire, 31270-901, Durham, New Hampshire, United States.

¶ Corresponding author. Email: [rarael.menezes@unh.edu](mailto:rarael.menezes@unh.edu)

## ABSTRACT

Starch digestibility is enhanced by steam flaking process applied to corn and sorghum grains. However, it remains uncertain to what extent steam flaking can improve animal performance. This study aimed to evaluate potential differences in starch digestibility and production performance parameters in feedlot cattle fed diets containing steam-flaked (SF) compared to those fed dry-rolled or milled (DRM) corn or sorghum grains through a systematic review and meta-analysis. Peer-reviewed journals were used for constructing the data sets resulting in 18 articles selected for the meta-analysis, which was performed using the randomized mean difference between treatment groups with a 95% confidence interval. The variables were categorized based on the covariates: country where the study was conducted, number of days on feed, number of days for diet adaptation, and initial body weight. These covariates were subsequently subjected to a meta-regression analysis. A subgroup analysis was performed whenever a covariate showed a significant effect based on the Moderator Test. Cattle fed SF diets exhibited greater total-tract digestibility of starch and organic matter than diets with DRM. Feedlot cattle fed SF excreted 13% less fecal starch and had a 0.494 kg/d lower DMI. As a result, they achieved an increase of 0.04 kg/d in ADG and improvement in feed efficiency by 13 g BW/kg DM compared with cattle fed DRM. This higher ADG and feed efficiency observed in beef cattle consuming SF diets resulted in an increase of 4.88 kg in hot carcass weight compared to those fed DRM diets. Overall, the incorporation of SF grains, particularly corn, in beef cattle diets can enhance feed efficiency, average daily gain, and hot carcass weight.

**Keywords:** concentrate, confinement, processing, rolled grain, starch, whole grain.

**LIST OF ABBREVIATIONS:**

ADG: Average Daily Gain

BW: Body Weight

DAD: Adaptation Days of the Diets

DMI: Dry Matter Intake

DOF: Days on Feed

DRM: Dry-Rolled or Milled

FAO: Food and Agriculture Organization

HCW: Hot Carcass Weight

IBW: Initial Body Weight

PICO: Population, Intervention, Comparison, and Outcome

RMD: Raw Mean Difference

SF: Steam-Flaked

T<sup>2</sup>: Tau-Squared

USDA: United States Department of Agriculture

## INTRODUCTION

Corn and sorghum are the most common ingredients in beef cattle finishing diets in the United States and Brazil (USDA, 2024; Silvestre & Millen, 2021). To enhance their starch digestibility and animal performance, grain processing methods are widely used, primarily dry-rolling, steam-flaking, and fine grinding (Zinn et al., 2011; Moya et al., 2015; Rahimi et al., 2020). Among these methods, steam-flaking has been noticed due to its great capacity to increase starch availability for rumen fermentation and starch digestion. The steam-flaking process consists of exposing grains to steam at 90-100°C under 2-3 atm pressure (Matsushima, 2006). This process induces major structural changes in the starch granules, leading to the so-called “gelatinization state”. However, the effectiveness of SF grains in improving beef cattle performance over those other methods remains inconclusive. While some studies report significant benefits over other dry-rolling or milling (Macken et al., 2004), others show minimal or no differences (Melo et al., 2019). This inconsistency may be due to variability in experimental conditions, grain type, feeding strategies, or animal characteristics. Understanding these differences is important for nutritionists and farmers when making feeding decisions. The objective of this study was to compare the potential differences between steam-flaking and dry-rolling or milling of corn or sorghum grains, considering differences in beef cattle systems such as location, days of diet adaptation, days on feed, and initial body weight.

## MATERIALS AND METHODS

This study followed the recommendations of the guidelines proposed by the Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (Moher et al., 2009).

### *Literature search*

The systematic review search for articles was conducted using the databases: Scopus, Embase, Web of Science, and PubMed. Additionally, references cited in articles selected through the systematic review were checked to see if they fit the study eligibility criteria (see below). The literature search included combinations of the following terms and keywords: “corn” or “sorghum”, and “beef cattle”, and “steam-flaked”. The detailed search strategy is shown in figure 1.

### *Eligibility criteria*

The inclusion criteria in our systematic review was restricted to studies that used beef cattle consuming diets containing SF corn or SF sorghum. The Population, Intervention, Comparison, and Outcome (PICO) template, as proposed by Thomas et al. (2019), was employed as follows: Population- beef cattle; Intervention- steam-flaked corn or sorghum grains (SF); Comparison- diets with corn or sorghum grains processed as dry-rolled or milled (DRM) method; Outcomes- dry matter intake (DMI, kg/d), ADG (kg/d), feed efficiency [kg of body weight (BW)/kg DMI], hot carcass weight (kg), fat thickness (cm), Longissimus dorsi muscle area (cm<sup>2</sup>), total-tract digestibility of organic matter (% OM), total tract digestibility of starch (% of starch intake) and fecal starch concentration (%). The secondary outcomes were processing type, number of days on feed, length of treatments adaptation, initial BW, and country. The search encompassed papers published from 1st March 1947 to 16th April 2022 in Portuguese or English.

### *Study selection and data collection process*

After removing all duplicates using the EndNote® software (EndNote X1, 2007), the articles were imported to Excel (Microsoft, 2021) for the peer-revision and selection according our eligibility criteria. First, we read the titles and abstracts. Then, the articles selected from the screen process were subjected to a in-depth reading. The mean reasons for excluding studies involved population (e.g., studies that did not include male animals), the absence of data on animal performance and nutrient digestibility, and the lack of providing details on the grain processing methods used.

### *Statistical Analysis*

Data analysis was conducted using the packages “meta” and “metafor” of RStudio software (R Core Team, 2019). A general meta-analysis was performed when three or more comparisons evaluated the same processing. Raw mean difference (RMD) was used as a dependent variable in the mixed meta-regression models (Viechtbauer, 2010) to identify the effect of each covariate on digestibility and animal performance variables according to the model:

$$\theta_i = \beta_0 + \beta_{ibw} + \beta_{pt} + \beta_{dad} + \beta_{dof} + \beta_{coun} + u_i$$

where:  $\theta_i$  refers to the true overall effect,  $\beta_0$  refers to the overall mean,  $\beta_{ibw}$  refers to the effect of the covariate initial body weight for the  $i$ -th study,  $\beta_{pt}$  refers to the effect of the covariate processing type for the  $i$ -th study,  $\beta_{dad}$  refers to the effect of the covariate diet adaptation days for the  $i$ -th study,  $\beta_{dof}$  refers to the effect of the covariate days on feed for the  $i$ -th study,  $\beta_{coun}$  refers to the effect of the covariate of country for the  $i$ -th study, and  $u_i \sim N(0; I_2)$  with  $I_2$  referring to the amount of residual heterogeneity among the true effects.

Wald's multiparametric test was used to test the effects of covariates on responses (Viechtbauer, 2010). The adjusted coefficient of determination (R<sup>2</sup>) value was calculated by eq (1):

$$R^2 (\%) = (\sigma_0^2 - \sigma^2) / \sigma_0^2$$

where: R<sup>2</sup> refers to variation between studies,  $\sigma_0^2$  refers to variation between studies without the covariate in the models, and  $\sigma^2$  refers to variation between studies with the covariate in the models. When a covariate had a significant effect on the response, subgroup analysis was performed.

For all variables, a subgroup analysis was performed when p-values were less than 0.05 using the secondary outcomes as covariates. Since the number of comparisons in the dependent variables was lower than three, all the covariates were treated as factors. We considered the median as a limit for separating subgroups to ensure the balance between the number of comparisons in each group. Outliers were found using "influence" and "baujat" tests and removed whenever the standardized residuals for comparisons between treatment and control groups was more than 2 or less than -2.

For the overall metaanalysis and for subgroup analysis the weights assigned to each study were calculated using the inverse of the variance. As the random-effects model was used in addition to considering the variability of the estimates for each study caused by the error, it was also necessary to calculate the variance between the estimates of the studies, known as the tau-squared (T<sup>2</sup>) value (Borenstein et al., 2009). Because continuous variables were analyzed, the results were expressed as the RMD using a random-effects model with a 95% confidence interval (P < 0.05). The random-effects model (1), summary intervention effect estimate (2), and the difference in means (3) were calculated using the following equations:

$$Y_i = \mu + \xi_i + \epsilon_i$$

(1)

where:  $\xi_i$  is the difference between the grand mean ( $\mu$ ) and the true mean ( $\theta_i$ ) for study  $i$  ( $\xi_i = \theta_i - \mu$ ) and  $\epsilon_i$  is the difference between the true mean for study  $i$  ( $\theta_i$ ) and the observed mean ( $Y_i$ ) for study  $i$  ( $\epsilon_i = Y_i - \theta_i$ ) (Borenstein et al., 2010).

$$M = \left( \sum_{i=1}^k [Y_i W_i] \right) / \left( \sum_{i=1}^k W_i \right)$$

(2)

where:  $Y_i$  is the intervention effect estimated in the  $i$ -th study,  $W_i$  is the weight assigned to the  $i$ -th study, and the summation is across all studies (Deeks et al., 2019).

$$RMD_i = M1_i - M2_i$$

(3)

where: the subscripts  $M1_i$  and  $M2_i$  represent the mean values of the treatment and control groups, respectively. When significant, positive values favor the treatment group (SF), and negative values favor the control group (DRM) (Deeks et al., 2019).

Heterogeneity ( $I^2$ ) means that the confidence intervals for the results of individual studies overlap poorly, which generally indicates the presence of statistical heterogeneity.  $I^2$  describes the percentage of variability in the effect estimates due to heterogeneity rather than sampling error (chance). Heterogeneity was calculated using the following equation:

$$I^2 = ((Q - df) / Q) \times 100\%$$

where:  $Q$  is the  $\chi^2$  statistic and  $df$  is the degree of freedom (Higgins et al., 2003; Higgins & Thompson, 2002). Heterogeneity was evaluated based on the following criteria:  $I^2 < 30\%$ ,  $I^2$  between 31 % and 75%, and  $I^2 > 75\%$  indicated low, moderate, and high heterogeneity, respectively (Deeks et al., 2019). An error rate lower than 10% was used, indicating significant

heterogeneity. The importance of I<sup>2</sup> depends on the magnitude, direction of effects, and strength of evidence for heterogeneity (e.g., P-value) from the  $\chi^2$  test or a confidence interval for I<sup>2</sup>. When the number of studies is small, the uncertainty in the value of I<sup>2</sup> is substantial and should be interpreted with care.

The publication bias (Fig. 3) was assessed by testing the symmetry between the standard deviation (SD) as accuracy parameter and RMD as true effect parameter using funnel plots (Higgins et al., 2019) and Egger's regression method between RMD and SD (Egger et al., 1997) using the “meta” package of the RStudio software (2019).

## RESULTS AND DISCUSSION

### *Systematic Review*

The systematic review revealed the increasing of publications regarding SF grains in the last fifteen years, and the predominance using corn as a grain of choice. From the 18 articles selected for this study, 27.8% were published before 2000, 27.8% from 2000 to 2010, and 44,4% after 2010. Most studies (17) were conducted with corn grain, and one was conducted with sorghum. We decided to maintain this study in the meta-analysis once both corn and sorghum SF grains have similar energy value (Brandt et al., 1992). All studies offered the diet as total mix ration (TMR) to animals, with overall similarity in the diet ingredients and diet composition. Nevertheless, it could be observed a variability among studies for hay as ingredient (table 1) and for fiber-related components, such as NDF and ADF, as chemical components (table 2). The hay was used more often for diets containing SF grains, likely due to the requirement of higher inclusion of physically effective fiber to counterbalance the increased ruminal starch degradability in these diets. This

pattern is expected given the differences in roughage sources, processing methods, and forage-to-concentrate ratios across studies. The number of comparisons, inclusion levels, and the descriptive statistic of ingredients and chemical composition are presented in Tables 1 and 2, respectively. The main breeds used to evaluate animal performance were crossbreed and Nellore.

### *Meta-analysis*

Corn and sorghum averaged 75% of the feedlot cattle diets due to their high energy value and availability (Table 1). Considering that 75 to 80% of the feed cost for feedlot cattle comes from dietary ingredients (Richards & Hicks, 2007), these grains account for approximately 64% of feed costs in beef cattle systems. It makes their efficiency of use essential to improve feed efficiency and reduce feed costs, especially in large-scale production systems. For instance, a decrease of one unit in feed intake (kgDM/d/animal) with no change in ADG was linked to an average increase of \$7.92 in net returns and a reduction of 20.08 tons in methane emissions by 5,600 animals receiving finishing diets (Boaitey et al., 2017). Our meta-analysis demonstrated that feedlot cattle fed SF corn or sorghum grains exhibited higher feed efficiency (RMD = -0.012;  $P < 0.001$ ) than those fed DRM grains, particularly for feeding periods shorter than 110 days. This improvement is primarily due to a reduction in DMI by 0.42 kg/day ( $P < 0.001$ ) and an increase in ADG by 0.04 kg/day ( $P = 0.01$ ). Boaitey et al. (2017) evaluated the feed efficiency changes in a simulated feedlot with 5,600 animals considering economic and environmental outcomes. Based on literature estimations, the decrease in the DMI found in our study may correspond to a daily saving of \$3.33 per day in feed costs. This result suggest improvements not only in the feed

efficiency and economic returns but also in the sustainability of the production system. Also, the same reduction in DMI would represent 8.42 tons less methane emissions in the atmosphere.

The simultaneous demand for corn and sorghum in human and animal nutrition highlights the importance of plant-based resources allocated to livestock production. Thus, maximizing starch utilization in the grains becomes a primary goal, as it ensures both competitiveness and environmental responsibility of the beef industry. The presence of starch in the feces of feedlot cattle indicates inefficiency in starch digestion, which can lead to substantial economic environmental losses and ecological impacts. Dry-processed corn grains show an average fecal loss of 19%, potentially reaching up to 36% (Schwandt et al., 2015). This loss is higher than the average for other grain processings, such as high-moisture and SF corn. Our meta-analysis revealed that cattle fed SF corn or sorghum had an increase of 8.3 percentage units in the total tract starch digestibility ( $P < 0.001$ ), along with a 11.6 percentage units ( $P < 0.001$ ) of reduction in fecal starch excretion. These results indicate greater efficiency in the utilization of dietary starch. In addition to starch, organic matter digestibility was also improved (RMD = -7.20;  $P < 0.001$ ) with the use of SF grains. The higher efficiency on nutrient digestion in the feedlot system can reduce enteric methane, nitrous oxide, and carbon dioxide emissions, thereby decreasing the total carbon footprint by 9-13% per animal (Cole et al., 2020). The subgroup analysis suggested that animals fed for a longer period, as well as those with higher body weight, had better nutrient digestibility as seen by the higher organic matter (RMD = 2.91;  $P = 0.001$ ) and total-tract starch digestibility (RMD = 12.1;  $P < 0.001$ ) along with smaller fecal starch concentration (RMD = 10.1;  $P < 0.001$ ) in figure 2. Animals fed for less than 110 days with SF grains had more fecal starch excretion (RMD = 13.34;  $P < 0.001$ ) compared with those fed with DRM grains (RMD = 5.68;  $P < 0.001$ ). In shorter feeding periods, the diets composition usually differ more abruptly. Consequently, there

is no sufficient adaptation period of the ruminal microbiota (Zinn et al., 2002) combined with the higher passage rate and physiological limits of post ruminal start digestion to a highly available starch sources diet. Although steam-flaking increases starch availability and dietary net energy, the benefits are more evident in longer feeding periods when adaptation is complete (Barajas et al. 1998). This could explain the reason for animals presented higher starch losses in shorter finishing periods, despite the greater processing intensity. Furthermore, subgroup analysis revealed that animals with initial body weight over 360 kg fed SF diets exhibited higher organic matter digestibility and total-tract starch digestibility compared with lighter animals. In ruminants, increasing body weight is typically associated with enhance in digestive capacity (Udén and Van Soest, 1982). Accordingly, cattle in the heavier group likely expressed a more developed ability to utilize nutrients, which may explain the enhanced digestibility values observed. However, a greater number of comparisons for each group would be beneficial for a better understanding of subgroup results.

Beef production is essential in supplying protein and other nutrients source for human consumption, with global demand of beef continuously growing and expected to increase by 41 kilotons in the next 10 years (FAO, 2023). Thus, the increase in final live weight and hot carcass weight in animals fed SF grains diets aligns with market expectations. Animals fed SF diets gained 0.42 kgBW/day more and presented hot carcass weight 4.4 kg ( $P < 0.0001$ ) heavier than the animals fed DRM grains. Considering the price of live weight beef in the US at \$6.58 per kilogram (USDA, 2025), the gain of 6.53 kg in the final live weight ( $P < 0.001$ ) would increase individual profit by \$42.97. Beyond the observed increase in meat production, the present study indicates that SF grains in the diet also influenced positively fat thickness (RMD = -0.089;  $P < 0.001$ ) without affecting the *Longissimus dorsi* muscle area ( $P = 0.55$ ). Fat thickness is a fundamental requirement

for overall consuming experience, as it is directly related to post-mortem processes, such as carcass protection during cooling, and organoleptic characteristics of the meat. It is suggested that carcasses should have at least 5.00 mm of fat thickness for optimal beef quality, and higher values have been related to greater tenderness and palatability of cooked beef (Dolezal et al., 1982; Baldassini et al., 2016).

In our understanding, despite the published studies which explored the effect of flaking processing on feedlot cattle nutrition, none have comprehensively presented average results and summarized the impact of this processing on animal performance. This is an important point that can significantly affect the decision to acquire a flaker. For example, the number of farms using flakers and its cost of investment in Brazil, or the United States are different, which would be relevant information to better understand the benefits and risks of SF grains usage, depending on the local and situation. The advantages of grain processing are a known by producers, and the use of processed grain, as well as the intensity of processing has increased, especially in countries that use flint grain, such as Brazil (Santos et al., 2016; Pinto and Millen, 2019). Therefore, obtaining average results from different feeding trials based on a thorough evaluation is essential to provide substantial data for planning and predicting the investment's feasibility securely.

#### *Bias Publication Risk, Heterogenicity, and Adjusted R*

The funnel plot (Fig. 3) illustrates the distribution of studies included in the meta-analysis regarding publication bias, where the x-axis represents the mean difference between the treatment groups and control for the variable, and the y-axis indicates the study precision (standart error). Overall, funnel plots for feed efficiency, ADG, hot carcass weight, and Longissimus dorsi muscle area, and organic matter digestibility appeared relatively asymmetrical, and Egger's regression test

did not indicate evidence of publication bias ( $P > 0.10$ ). In meta-analysis, this asymmetry is common to observed since smaller studies deviate more from the overall mean, a phenomenon known as small-study effects. This pattern was evident in some outcomes, suggesting that smaller trials reported more extremes. Although final body weight and fat thickness exhibited funnel plot asymmetry and a potential publication bias ( $P < 0.05$ ), the degree of dispersion range among studies was not substantial. These outcomes therefore represent an opportunity for further investigation as the true effect between treatments may be more difficult to detect and requires additional comparisons to be fully elucidated. Consistently, the heterogeneity analysis demonstrated high variability for fecal starch and organic matter digestibility and low variability for final body weight and hot carcass weight, which suggest greater consistency across studies. The meta-analysis further revealed that part of this variability could be explained by study-level covariates, with the initial body weight accounting for a large proportion of the variance in TTSD ( $R^2 = 89.2\%$ ) and OMD ( $R^2 = 82.4\%$ ), and the days on feed explaining part of the variance in FS ( $R^2 = 49.3\%$ ). Altogether, these results indicate that despite some evidences of small-study effects and high heterogeneity in certain traits, the main outcomes in this meta-analysis remain reliable, with variability partially explained by biological and experimental covariates.

## CONCLUSIONS

In conclusion, steam-flake processing improved feed efficiency at average of 12 grams of BW per kg of DMI in feedlot cattle, by reducing DMI in 0.42 kg/d and increasing ADG in 42 g/d. Feeding SF grains increased starch and organic matter digestibility while reducing fecal starch excretion. These improvements might have potential economic and environmental implications,

as greater nutrient use efficiency is often associated with lower costs and methane emissions reduction. Additionally, the observed increases in final live weight (6.53 kg) and hot carcass weight (4.84 kg) align with market demands, making SF grain a valuable strategy for maximizing profitability and meeting the growing demand for high-quality beef.

**LITERATURE CITED**

Allen, M. S. 2020. Review: Control of feed intake by hepatic oxidation in ruminant animals: Integration of homeostasis and homeorhesis. *Anim.* 14(S1):s55–s64. doi:10.1017/s1751731119003215.

Allen, M. S., B. J. Bradford, and M. Oba. 2009. Board-invited review: The hepatic oxidation theory of the control of feed intake and its application to ruminants. *J. Anim. Sci.* 87:3317–3334. doi:10.2527/jas.2009-1779.

Barajas, R., and R. A. Zinn. 1998. Feeding value of dry-rolled and steam-flaked corn in finishing diets for feedlot cattle: Influence of protein supplementation. *J. Anim. Sci.* 76:1744–1752. doi:10.2527/1998.7671744x.

Bevans, D. W., K. A. Beauchemin, K. S. Schwartzkopf-Genswein, J. J. McKinnon, and T. A. McAllister. 2005. Effect of rapid or gradual grain adaptation on subacute acidosis and feed intake by feedlot cattle. *J. Anim. Sci.* 83:1116–1132. doi:10.2527/2005.8351116x.

Boaitey, A., E. Goddard, S. Mohapatra, and J. Crowley. 2017. Feed efficiency estimates in cattle: The economic and environmental impacts of reranking. *Sustain. Agric. Res.* 6:35–47. doi:10.5539/sar.v6n2p35.

Borenstein, M., L. V. Hedges, J. P. T. Higgins, and H. R. Rothstein. 2009. *Introduction to meta-analysis*. Wiley, New York, NY, USA.

Brown, M. S., C. H. Ponce, and R. Pulikanti. 2006. Adaptation of beef cattle to high-concentrate diets: Performance and ruminal metabolism. *J. Anim. Sci.* 84(E-Suppl.):E25–E33. doi:10.2527/2006.8413\_supplE25x.

Cernicchiaro, N., M. Corbin, M. Quinn, F. Prouty, M. Branine, and D. G. Renter. 2016. Meta-analysis of the effects of laidlomycin propionate, fed alone or in combination with chlortetracycline, compared with monensin sodium, fed alone or in combination with tylosin, on growth performance, health, and carcass outcomes in finishing steers in North America. *J. Anim. Sci.* 94:1662–1676.

Cole, N. A., D. B. Parker, M. S. Brown, J. S. Jennings, K. E. Hales, and S. A. Gunter. 2020. Effects of steam flaking on the carbon footprint of finishing beef cattle. *Transl. Anim. Sci.* 4(Suppl. 1):S84–S89. doi:10.1093/tas/txaa110.

Córdova-Noboa, H. A., E. O. Oviedo-Rondón, A. Ortiz, Y. Matta, J. S. Hoyos, G. D. Buitrago, et al. 2021. Effects of corn kernel hardness and grain drying temperature on particle size

and pellet durability when grinding using a roller mill or hammermill. *Anim. Feed Sci. Technol.* 271:114715. doi:10.1016/j.anifeedsci.2021.114715.

Deeks, J. J., J. P. T. Higgins, and D. G. Altman. 2019. Analysing data and undertaking meta-analyses. In: J. P. T. Higgins, J. Thomas, J. Chandler, M. Cumpston, T. Li, M. J. Page, and V. A. Welch, editors. *Cochrane handbook for systematic reviews of interventions*. The Cochrane Collaboration, London, UK. p. 241–284.

Dehghan-banadaky, M., R. Corbett, and M. Oba. 2007. Effects of barley grain processing on productivity of cattle. *Anim. Feed Sci. Technol.* 137:1–24. doi:10.1016/j.anifeedsci.2006.11.021.

Drouillard, J. S. 2018. Current situation and future trends for beef production in the United States of America—A review. *Asian-Australas. J. Anim. Sci.* 31:1007–1016. doi:10.5713/ajas.18.0428.

Egger, M., G. D. Smith, M. Schneider, and C. Minder. 1997. Bias in meta-analysis detected by a simple, graphical test. *BMJ* 315:629–634. doi:10.1136/bmj.315.7109.629.

Galyean, M. L., and M. E. Hubbert. 2014. Review: Traditional and alternative sources of fiber—Roughage values, effectiveness, and levels in starting and finishing diets. *Prof. Anim. Sci.* 30:571–584. doi:10.15232/pas.2014-01329.

Gao, P., S. Tian, Y. Chen, and J. Lu. 2023. Mechanical properties of corn: Correlation with endosperm hardness. *J. Food Process Eng.* 46:e14491. doi:10.1111/jfpe.14491.

Giuberti, G., A. Gallo, F. Masoero, L. F. Ferraretto, P. C. Hoffman, and R. D. Shaver. 2013. Factors affecting starch utilization in large animal food production systems: A review. *Starch* 66:72–90. doi:10.1002/star.201300177.

González, L. A., X. Manteca, S. Calsamiglia, K. S. Schwartzkopf-Genswein, and A. Ferret. 2012. Ruminant acidosis in feedlot cattle: Interplay between feed ingredients, rumen function and feeding behavior (a review). *Anim. Feed Sci. Technol.* 172:66–79. doi:10.1016/j.anifeedsci.2011.12.009.

Gouvêa, V. N., F. Batistel, J. Souza, L. J. Chagas, C. Sitta, P. R. B. Campanili, D. B. Galvani, A. V. Pires, F. N. Owens, and F. A. P. Santos. 2016. Flint corn grain processing and citrus pulp level in finishing diets for feedlot cattle. *J. Anim. Sci.* 94(2):665–674. doi:10.2527/jas.2015-9459.

Higgins, J. P. T., and S. G. Thompson. 2002. Quantifying heterogeneity in a meta-analysis. *Stat. Med.* 21:1539–1558. doi:10.1002/sim.1186.

Higgins, J. P. T., S. G. Thompson, J. J. Deeks, and D. G. Altman. 2003. Measuring inconsistency in meta-analyses. *BMJ* 327:557–560. doi:10.1136/bmj.327.7414.557.

Jennings, T., and A. Green-Miller. 2019. PSXIV-1 Effects of passage rate on forage intake and digestion in beef cattle. *J. Anim. Sci.* 97:377. doi:10.1093/jas/skz258.751.

Llonch, L., L. Castillejos, and A. Ferret. 2020. Increasing the content of physically effective fiber in high-concentrate diets fed to beef heifers affects intake, sorting behavior, time spent ruminating, and rumen pH. *J. Anim. Sci.* 98:skaa192. doi:10.1093/jas/skaa192.

Luebke, M. K., J. M. Patterson, K. H. Jenkins, E. K. Buttrey, T. C. Davis, B. E. Clark, F. T. McCollum III, N. A. Cole, and J. C. MacDonald. 2012. Wet distillers grains plus solubles concentration in steam-flaked-corn-based diets: Effects on feedlot cattle performance, carcass characteristics, nutrient digestibility, and ruminal fermentation characteristics. *J. Anim. Sci.* 90:1589–1602. doi:10.2527/jas2011-4567.

Macken, C. N., G. E. Erickson, T. J. Klopfenstein, C. T. Milton, and R. A. Stock. 2004. Effects of dry, wet, and rehydrated corn bran and corn processing method in beef finishing diets. *J. Anim. Sci.* 82:3543–3548. doi:10.2527/2004.82123543x.

Manríquez, O. M., M. F. Montaña, J. F. Calderón, J. A. Valdez, J. O. Chirino, V. M. Gonzalez, J. Salinas-Chavira, G. D. Mendoza, S. Soto, and R. A. Zinn. 2016. Influence of wheat straw pelletizing and inclusion rate in dry-rolled or steam-flaked corn-based finishing diets on characteristics of digestion for feedlot cattle. *Asian-Australas. J. Anim. Sci.* 29(6):823–829. doi:10.5713/ajas.15.0062.

Matsushima, J. K. 2006. History of feed processing. *Cattle Grain Processing Symposium*. Oklahoma State Univ., Stillwater, OK, USA. p. 1–16.

Melo, A. H. F. de, R. S. Marques, V. N. Gouvêa, J. Souza, C. D. A. Batalha, D. C. Basto, D. D. Millen, J. S. Drouillard, and F. A. P. Santos. 2019. Effects of dietary roughage neutral detergent fiber levels and flint corn processing method on growth performance, carcass characteristics, feeding behavior, and rumen morphometrics of *Bos indicus* cattle. *J. Anim. Sci.* 97(8):3562–3577. doi:10.1093/jas/skz197.

Mertens, D. R. 1994. Regulation of forage intake. In: G. C. Fahey, Jr., editor. *Forage quality, evaluation, and utilization*. Am. Soc. Agron., Madison, WI, USA. p. 450–493. doi:10.2134/1994.foragequality.c11.

Mertens, D. R., and R. J. Grant. 2020. Digestibility and intake. In: K. J. Moore, M. Collins, C. J. Nelson, and D. D. Redfearn, editors. *Forages: The science of grassland agriculture*. Wiley, Hoboken, NJ, USA. p. 609–631. doi:10.1002/9781119436669.ch34.

Meyer, N. F., and T. C. Bryant. 2017. Diagnosis and management of rumen acidosis and bloat in feedlots. *Vet. Clin. North Am. Food Anim. Pract.* 33(3):481–498. doi:10.1016/j.cvfa.2017.06.005.

Moya, D., M. He, L. Jin, Y. Wang, G. Penner, K. Schwartzkopf-Genswein, and T. McAllister. 2015. Effect of grain type and processing index on growth performance, carcass quality, feeding behavior, and stress response of feedlot steers. *J. Anim. Sci.* 93(6):3091–3100. doi:10.2527/jas.2014-8680.

NRC (National Research Council). 2016. Nutrient requirements of beef cattle. 8th rev. ed. National Academies Press, Washington, DC, USA.

OECD/FAO. 2022. Agricultural outlook 2023–2032: Meat. Paris, France. 359 p. ISBN 978-92-5-137923-3.

Owens, F. N., R. A. Zinn, and Y. K. Kim. 1986. Limits to starch digestion in the ruminant small intestine. *J. Anim. Sci.* 63(5):1634–1648. doi:10.2527/jas1986.6351634x.

Pinto, A., and D. Millen. 2019. Nutritional recommendations and management practices adopted by feedlot cattle nutritionists: The 2016 Brazilian survey. *Can. J. Anim. Sci.* doi:10.1139/cjas-2018-0031.

Plaizier, J. C., S. Li, A. M. Danscher, H. Derakhshani, P. H. Andersen, and E. Khafipour. 2017. Changes in microbiota in rumen digesta and feces due to a grain-based subacute ruminal acidosis (SARA) challenge. *Microb. Ecol.* 74(2):485–495. doi:10.1007/s00248-017-0940-z.

Rahimi, A., A. A. Naserian, R. Valizadeh, A. M. Tahmasebi, H. Dehghani, K. I. Sung, and J. G. Nejad. 2020. Effect of different corn processing methods on starch gelatinization, granule structure alteration, rumen kinetic dynamics, and starch digestion. *Anim. Feed Sci. Technol.* 114572. doi:10.1016/j.anifeedsci.2020.114572.

Richards, C., and B. Hicks. 2007. Processing of corn and sorghum for feedlot cattle. *Vet. Clin. North Am. Food Anim. Pract.* 23(2):207–221. doi:10.1016/j.cvfa.2007.05.006.

Samuelson, K. L., M. E. Hubbert, M. L. Galyean, and C. A. Löest. 2016. Nutritional recommendations of feedlot consulting nutritionists: The 2015 New Mexico State and Texas Tech University survey. *J. Anim. Sci.* 94(6):2648–2663. doi:10.2527/jas.2016-0282.

Santos, F., R. Marques, and J. Dórea. 2016. Grain processing for beef cattle. pp. 213–241. doi:10.1007/978-3-319-30533-2\_8.

Schwandt, E., D. Thomson, S. Bartie, and C. Reinhardt. 2015. A survey of dry-processed-corn particle size and fecal starch in Midwestern United States feedlots. *Prof. Anim. Sci.* 31:467–472. doi:10.15232/PAS.2015-01392.

Silvestre, A. M., and D. D. Millen. 2021. The 2019 Brazilian survey on nutritional practices provided by feedlot cattle consulting nutritionists. *Rev. Bras. Zootec.* 50:e20200189. doi:10.37496/rbz5020200189.

Thomas, J., D. Kneale, J. E. McKenzie, S. E. Brennan, and S. Bhaumik. 2019. Determining the scope of the review and the questions it will address. In: J. P. T. Higgins, J. Thomas, J. Chandler, M. Cumpston, T. Li, M. J. Page, and V. A. Welch, editors. *Cochrane handbook for systematic reviews of interventions*. Wiley, Hoboken, NJ, USA. p. 13–31.

Torres, R. D. N. S., J. P. A. Bertoco, M. C. G. Arruda, L. D. M. Coelho, J. R. Paschoaloto, J. M. B. Ezequiel, and M. T. C. Almeida. 2021. The effect of dietary inclusion of crude glycerin on performance, ruminal fermentation, meat quality, and fatty acid profile of beef cattle: Meta-analysis. *Res. Vet. Sci.* 140:171–184.

Udén, P., and P. J. Van Soest. 1982. Comparative digestion of timothy (*Phleum pratense*) fibre by ruminants, equines and rabbits. *Br. J. Nutr.* 47(2):267–272. doi:10.1079/bjn19820035.

U.S. Department of Agriculture, Economic Research Service (USDA-ERS). 2024. Feed Grains Database. Available at: <https://www.ers.usda.gov/data-products/feed-grains-database/>

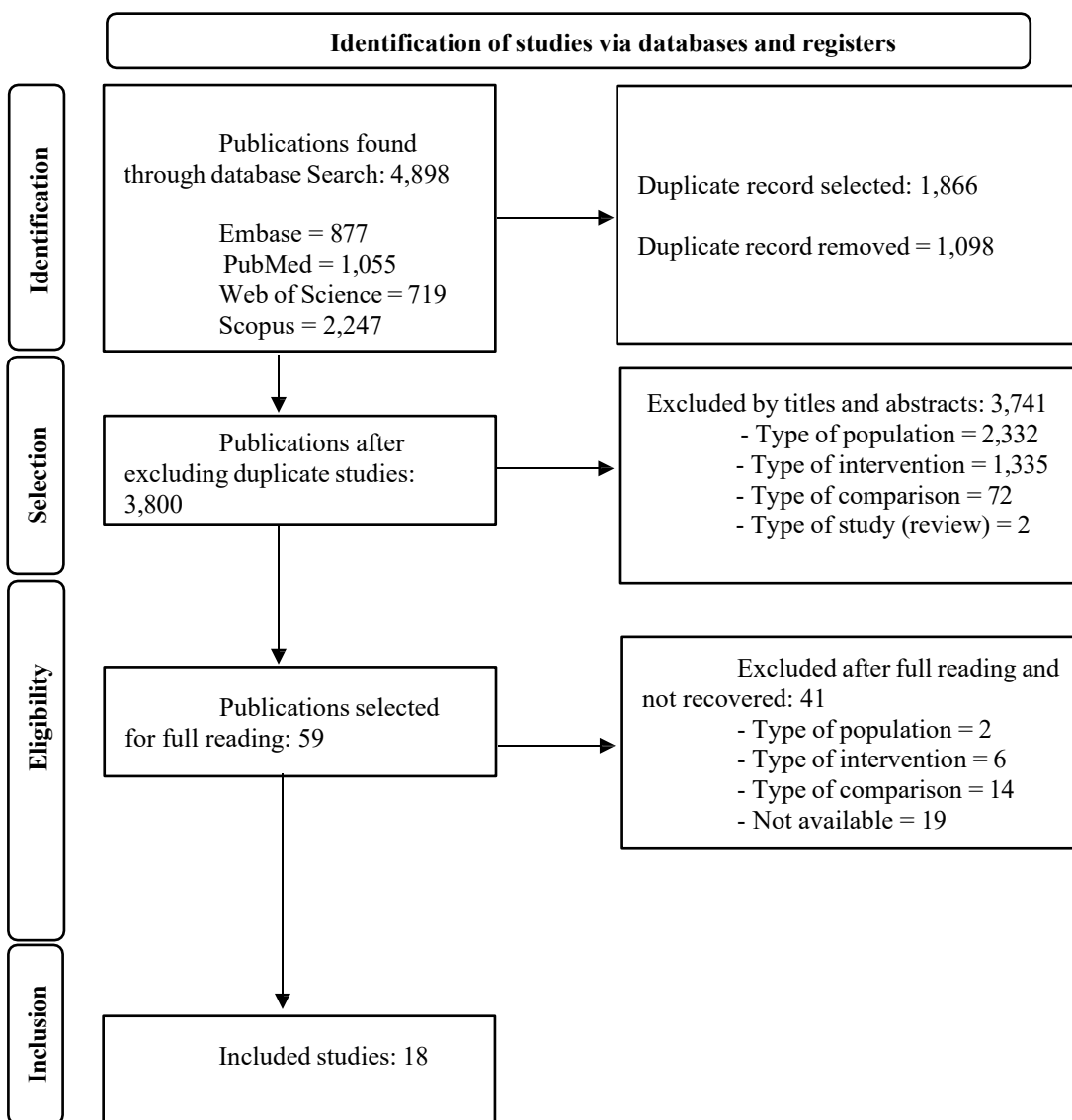
Viechtbauer, W. 2010. Conducting meta-analysis in R with the metafor package. *J. Stat. Softw.* 36:1–48.

Xu, N., J. Liu, and P. Yu. 2017. Alteration of biomacromolecule in corn by steam flaking in relation to biodegradation kinetics in ruminant, revealed with vibrational molecular spectroscopy. *Spectrochim. Acta A Mol. Biomol. Spectrosc.* 183:161–171. doi:10.1016/j.saa.2017.10.040.

Yang, C., J. Zhang, A. Ahmad, P. Bao, X. Guo, R. Long, and P. Yan. 2019. Dietary energy levels affect growth performance through growth hormone and insulin-like growth factor 1 in yak (*Bos grunniens*). *Animals* 9(2):39. doi:10.3390/ani9020039.

Zinn, R. A., A. Barreras, L. Corona, F. N. Owens, and A. Plascencia. 2011. Comparative effects of processing methods on the feeding value of maize in feedlot cattle. *Nutr. Res. Rev.* 24(2):183–190. doi:10.1017/S0954422411000096.

Zinn, R. A., F. N. Owens, and R. A. Ware. 2002. Flaking corn: Processing mechanics, quality standards, and impacts on energy availability and performance of feedlot cattle. *J. Anim. Sci.* 80(5):1145–1156. doi:10.2527/2002.8051145x.



**Figure 1.** Flowchart of the selection process of studies included in the meta-analysis

**Table 1.** Ingredients used in all diets provided in the selected studies

Item	Steam Flaked						Others Processing					
	N	Mean	Median	SD	Min	Max	N	Mean	Median	SD	Min	Max
<i>Roughage (% of DM)</i>												
<b>Roughage inclusion</b>	23	10.4	12.0	2.30	5.00	12.0	15	8.39	9.81	3.40	2.55	12.00
<b>Hay</b>	22	10.0	0.12	0.02	0.05	0.12	14	8.13	8.91	3.38	2.55	12.00
<b>Sugarcane bagasse</b>	1	12.0	12.0	0.00	12.0	12.0	1	12.0	12.0	0.00	12.0	12.0
<i>Concentrate (%)</i>												
<b>Corn</b>	20	75.7	76.5	4.32	64.1	81.8	14	74.33	76.28	5.15	64.05	81.75
<b>Sorghum</b>	3	75.9	74.9	2.06	74.1	78.8	-	-	-	-	-	-
<b>Wheat</b>	1	0.50	0.50	0.00	0.50	0.50	1	0.50	0.50	0.00	0.50	0.50
<b>Cottonseed meal</b>	2	1.84	1.15	1.90	0.00	10.0	6	6.29	6.94	2.91	1.90	10.0
<b>Molasses</b>	22	4.75	4.43	1.88	2.00	8.00	14	4.47	4.00	1.64	2.00	8.00
<b>Fishmeal</b>	-	-	-	-	-	-	1	1.50	1.50	0.00	1.50	1.50
<b>Limestone</b>	19	1.41	1.50	0.39	0.72	1.80	11	1.27	1.34	0.31	0.73	1.65
<b>Phosphate</b>	2	0.73	0.73	0.03	0.70	0.75	2	0.12	0.12	0.00	0.12	0.12
<b>Magnesium oxide</b>	10	0.20	0.20	0.02	0.15	0.20	4	0.19	0.20	0.02	0.15	0.20
<b>Premix</b>	41	0.89	0.50	1.15	0.20	5.27	15	0.99	0.40	1.08	0.20	3.08
<b>Sodium bicarbonate</b>	2	0.73	0.73	0.03	0.70	0.75	2	0.73	0.73	0.03	0.70	0.75
<b>Chromic oxide</b>	4	0.29	0.30	0.02	0.25	0.30	4	0.29	0.30	0.02	0.25	0.30
<b>Urea</b>	21	1.21	1.10	0.28	0.80	2.00	21	1.21	1.10	0.28	0.80	2.00
<b>Monensin</b>	1	0.02	0.02	0.00	0.02	0.02	1	0.02	0.02	0.00	0.02	0.02
<b>Potassium chloride</b>	1	0.12	0.12	0.00	0.12	0.12	1	0.12	0.12	0.00	0.12	0.12
<b>Ammonium sulfate</b>	5	0.19	0.24	0.10	0.00	0.24	5	0.19	0.24	0.10	0.00	0.24
<b>Bakery waste</b>	1	10.0	10.0	0.00	10.0	10.0	-	-	-	-	-	-
<b>Fat</b>	25	3.01	2.63	1.02	2.00	5.00	10	2.51	2.63	0.95	0.10	3.50
<b>Soybean meal</b>	6	2.91	2.35	0.97	2.35	5.00	4	3.19	2.71	1.09	2.34	5.00
<b>Cottonseed meal</b>	5	4.70	3.50	2.89	1.90	10.0	6	6.29	6.94	2.91	1.90	10.0

DM, dry matter, Max, maximum, Min, minimum, N, number of observations, SD, standard deviation.

**Table 2.** Chemical composition of the all diets provided in the selected studies

Item	Steam Flaked						Others Processing					
	N	Mean	Median	SD	Min	Max	N	Mean	Median	SD	Min	Max
<b>DM (%)</b>	3	81.8	82.3	0.81	80.7	82.5	3	84.8	85.7	1.72	82.4	86.3
<b>CP (%)</b>	22	12.9	12.6	0.94	11.5	15.0	14	13.1	12.9	0.98	11.5	15.2
<b>NDF (%)</b>	5	16.3	13.7	3.53	13.5	22.4	5	14.1	13.7	0.75	13.4	15.5
<b>SDF (%)</b>	10	8.81	9.10	1.22	6.90	11.1	6	9.34	9.35	0.91	7.80	10.9
<b>Starch (%)</b>	5	52.1	52.1	3.48	45.8	55.7	5	53.0	54.5	3.36	48.6	57.6
<b>EE (%)</b>	10	6.15	5.80	0.64	5.70	7.80	6	6.37	6.29	0.76	5.50	7.80
<b>TDN (%)</b>	2	80.8	80.8	0.65	80.1	81.4	-	-	-	-	-	-
<b>Ash (%)</b>	4	4.10	4.10	0.07	4.00	4.20	2	4.20	4.20	0.10	4.10	4.30
<b>NEm (Mcal/Kg)</b>	6	2.25	2.25	0.05	2.18	2.31	4	2.09	2.09	0.01	2.07	2.10
<b>Neg (Mcal/Kg)</b>	6	1.56	1.57	0.04	1.50	1.61	4	1.43	1.43	0.01	1.41	1.44
<b>S (%)</b>	2	0.18	0.18	0.02	0.16	0.20	4	0.19	0.20	0.02	0.16	0.21
<b>Ca (%)</b>	15	0.68	0.70	0.10	0.53	0.82	11	0.71	0.71	0.11	0.52	0.89
<b>P (%)</b>	15	0.32	0.28	0.12	0.22	0.75	11	0.35	0.32	0.13	0.27	0.75

DM, dry matter; CP, crude protein; EE, ether extract; NDF, neutral detergent fiber; ADF, acid detergent fiber; TDN, total digestible nutrients; Ca, calcium; P, phosphorus; NEm, net energy for maintenance, NEg, net energy for gain.

Max, maximum; Min, minimum; N, number of observations; SD, standard deviation.

**Table 3.** Effect of corn and sorghum grain processing on digestibility and performance variables in beef cattle

Item <sup>1</sup>	N	RMD (95% CI)		Heterogeneity	
		Random effect	P-value	$I^2$ (%)	P-value
TTSD (%)	16	-8.30 [-11.6; -5.00]	< 0.001	0.98	< 0.001
FS (%)	11	11.6 [9.28; 13.9]	< 0.001	95.8	< 0.001
OMD (%)	13	-7.20 [-8.9; -5.50]	< 0.001	84.7	< 0.001
DMI (kg/day)	26	0.422 [0.242; 0.602]	< 0.001	77.7	< 0.001
ADG (kg/day)	25	-0.042 [-0.074; -0.009]	0.01	58.7	0.001
FBW (kg)	26	-6.53 [-9.70; -3.37]	< 0.001	13.5	0.271
FE (kgBW/kgDM)	24	-0.012 [-0.017; -0.007]	< 0.001	77.3	< 0.001
HCW (kg)	22	-4.84 [-6.71; -2.98]	< 0.001	7.30	0.362
FT (cm)	15	-0.089 [-0.136; -0.042]	0.00	25.9	0.169
LMA (cm <sup>2</sup> )	20	0.322 [-0.729; 1.37]	0.55	82.5	< 0.001

<sup>1</sup> ADG = average daily gain, DMI = dry matter intake, FBW = final body weight, FE = feed efficiency, FS = fecal starch, FT = fat thickness, HCW = hot carcass weight, LMA = *Longissimus dorsi* muscle area, NDFD = total tract digestibility of neutral detergent fiber, OMD = total tract digestibility of organic matter, TTSD = total tract digestibility of starch.

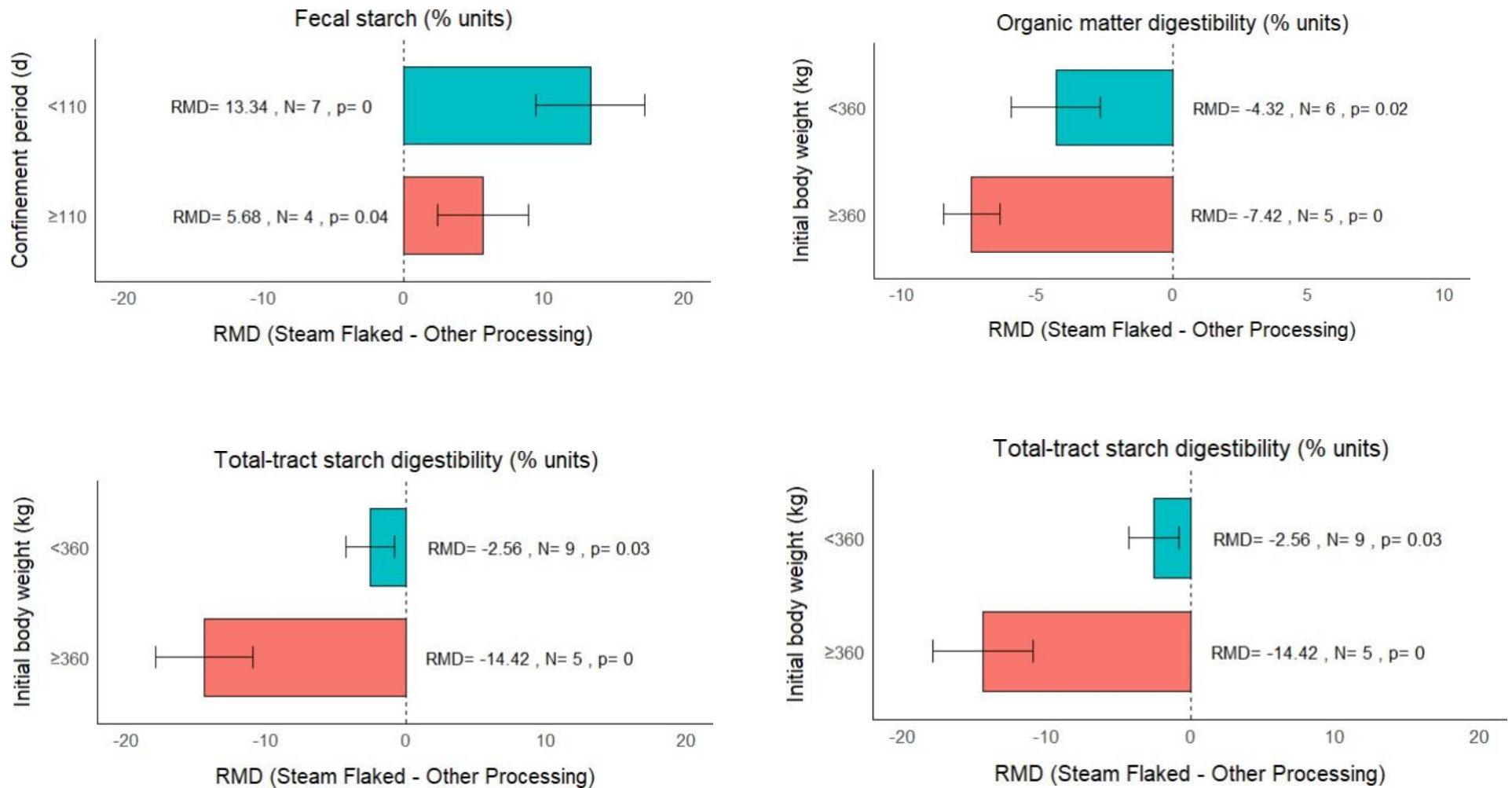
N = Number of comparisons, RMD = Raw mean differences between control (others processing) and steam flaked processing, CI = Confident Interval,  $I^2$  = Proportion of total variation of size effect estimates due to heterogeneity.

**Table 4.** Effect of covariables on the digestibility and performance variables comparing steam-flaked with dry-rolled or milled corn and sorghum grains

Item <sup>1</sup>	N	Meta-regression parameters (P-value)					Intercept	Adjusted R
		Initial body weight	Processing type	Days on feed	days of adaptation	Country		
<b>TTSD</b>	16	12.1 (<0.001)	-	-	-	-	-14.8 (<0.001)	89.2
<b>FS</b>	6	-	-	10.1 (<0.001)	-	-	5.68 (<0.001)	49.3
<b>OMD</b>	13	2.91 (0.001)	-	-	-	-	-7.29 (<0.001)	82.4
<b>DMI</b>	17	-0.053 (0.94)	0.597 (0.276)	-0.204 (0.760)	-0.356 (0.306)	-0.713 (0.339)	0.603 (0.312)	55.9
<b>ADG</b>	16	-0.350 (0.055)	-0.130 (0.284)	-0.308 (0.046)	0.084 (0.337)	-0.355 (0.051)	0.205 (0.128)	2.5
<b>FBW</b>	16	-33.5 (0.193)	-13.9 (0.478)	-32.0 (0.168)	7.78 (0.423)	-30.1 (0.179)	22.1 (0.301)	0.0
<b>FE</b>	16	-0.025 (0.768)	-0.020 (0.811)	-0.015 (0.859)	0.010 (0.598)	-0.025 (0.772)	0.005 (0.954)	0.0
<b>HCW</b>	15	-19.2 (0.228)	-4.01 (0.738)	-20.2 (0.156)	4.95 (0.379)	-	11.3 (0.398)	17.2
<b>FT</b>	15	-0.712 (0.185)	-0.151 (0.720)	-0.598 (0.267)	0.008 (0.891)	-	0.571 (0.288)	100.0
<b>LMA</b>	15	-2.12 (0.533)	-1.92 (0.510)	-0.872 (0.801)	0.222 (0.877)	0.950 (0.533)	1.57 (0.630)	0.0

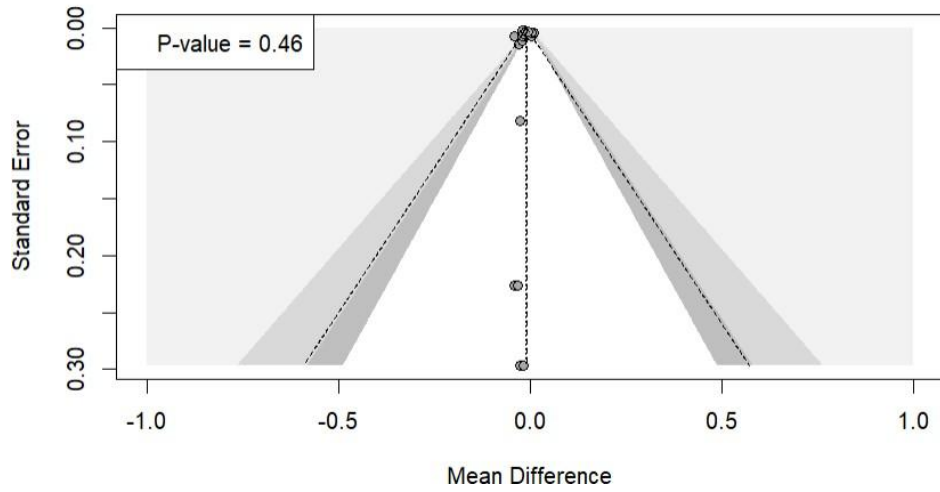
<sup>1</sup> ADG = average daily gain (kg/day), DMI = dry matter intake (kg/day), FBW = final body weight (kg), FE = feed efficiency (kgBW/kgMS), FS = fecal starch (% units), FT = fat thickness (cm), HCW = hot carcass weight (kg), LMA = *Longissimus dorsi* muscle area cm<sup>2</sup>, OMD = total tract digestibility of organic matter (% units), TTSD = total tract digestibility of starch (% units).

N = number of comparisons, Adjusted R (%) = proportion of the between-study variance (heterogeneity) explained by the covariates: initial body weight, processing type, days on feed, days of adaptation and country.

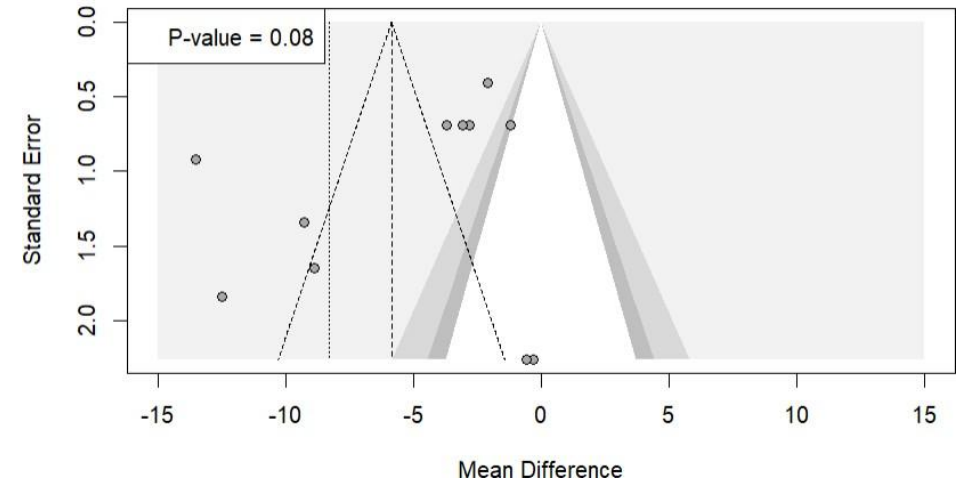


**Figure 2.** Row mean difference (RMD) of subgroup analysis showing the influence of covariates significant in the meta-regression on digestibility and performance parameters.

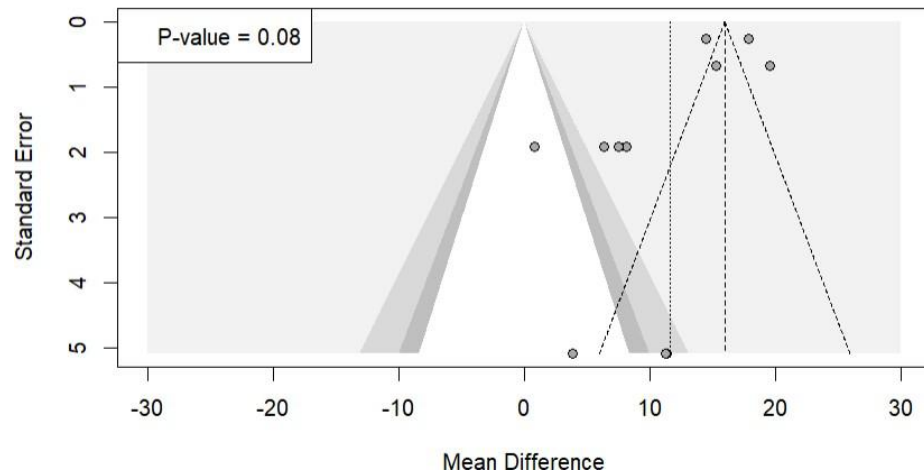
FE (kgBW/kgMS)



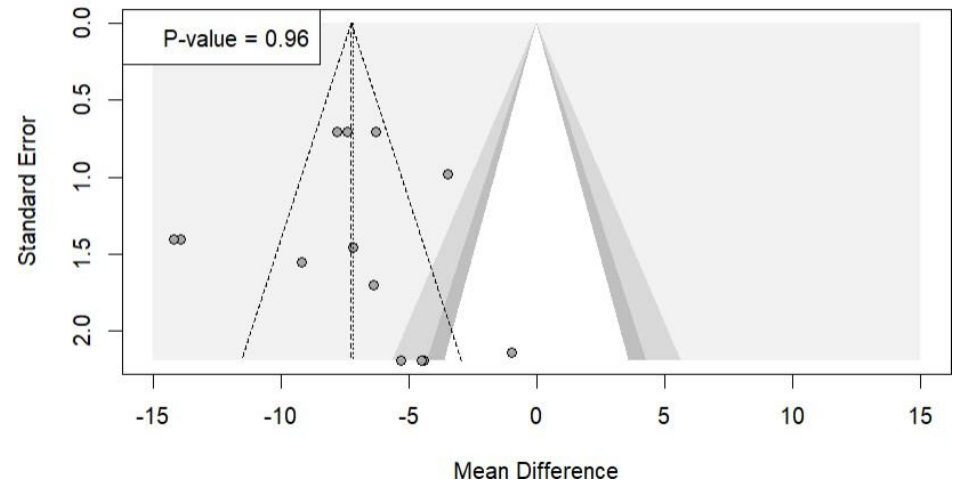
TSD (% units)

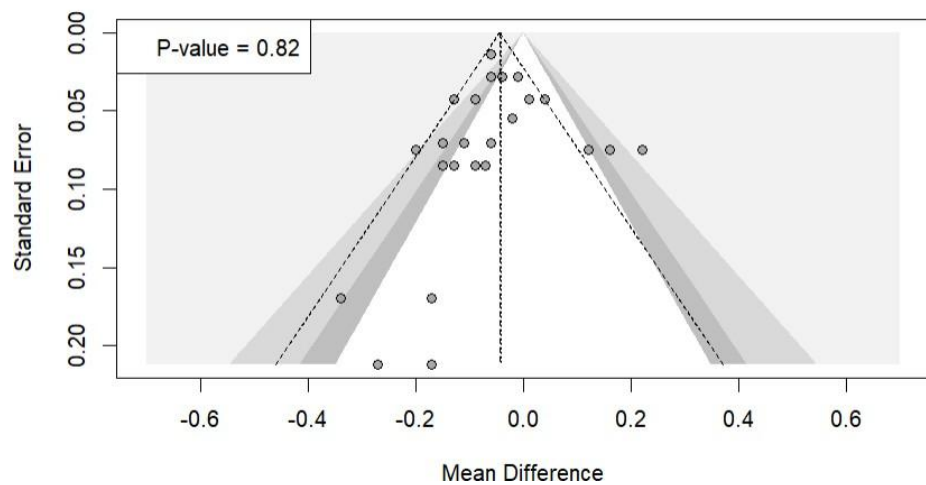
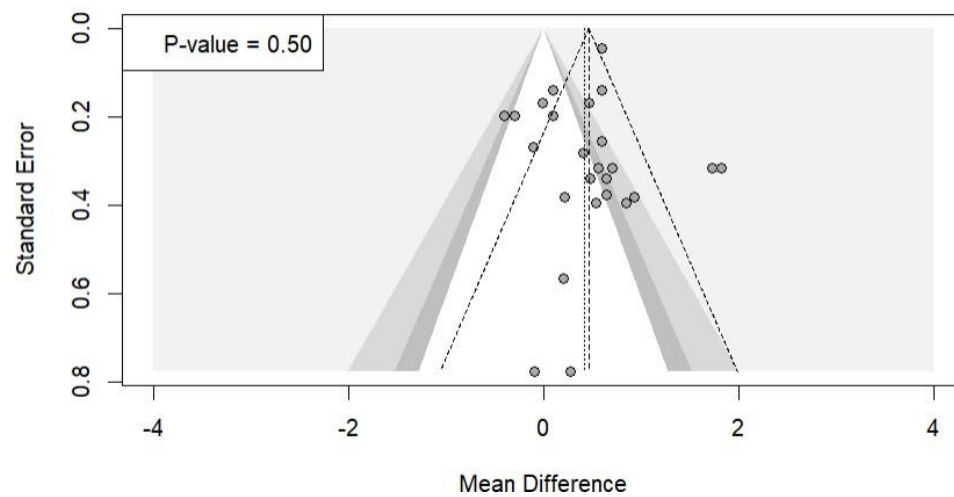
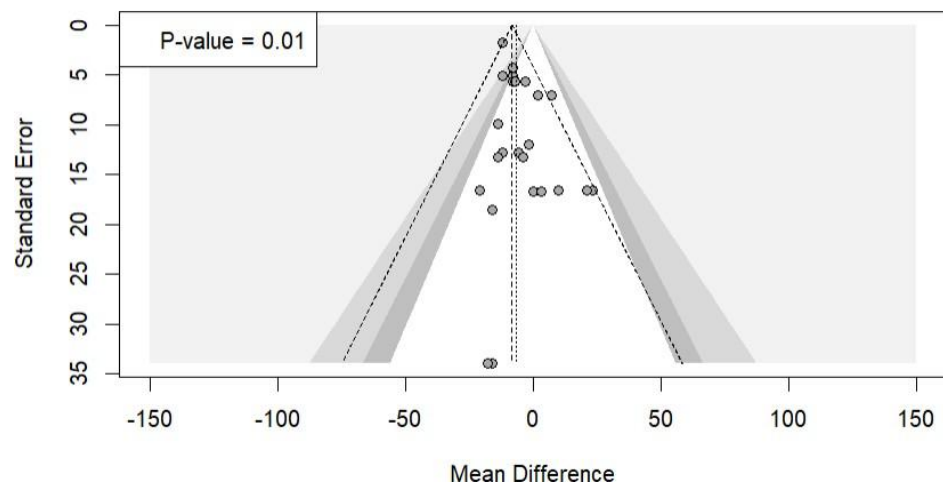
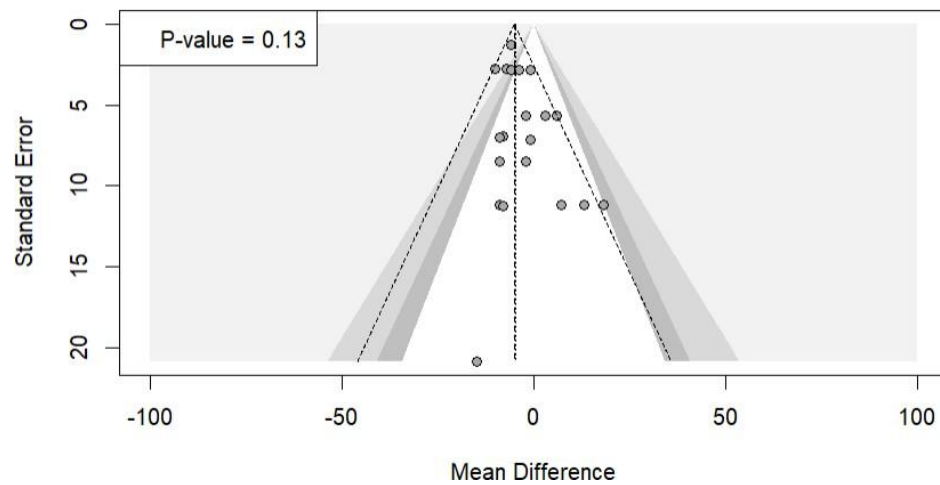


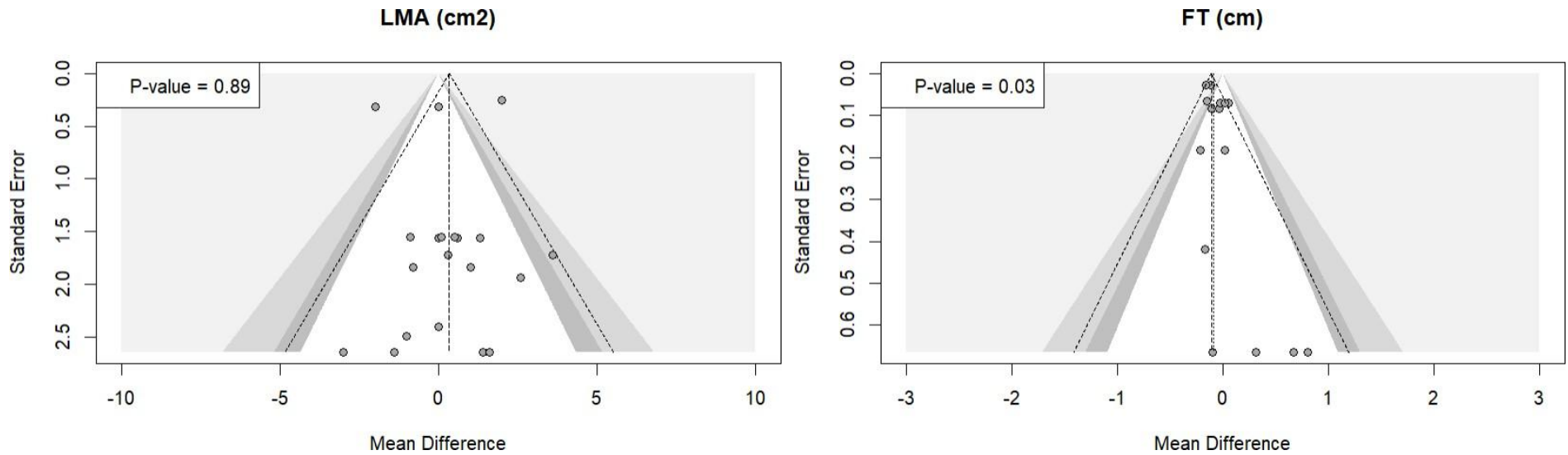
FS (% units)



OMD (% units)



**ADG (kg/d)****DMI (kg/d)****FBW (kg)****HCW (kg/d)**



**Figure 3.** Funnel plots exhibit the effect of steam-flaking process of corn or sorghum grains ADG (average daily gain), DMI (dry matter intake), FBW (final body weight), FE (feed efficiency), FS (fecal starch), FT (fat thickness), HCW (hot carcass weight), LMA (*Longissimus dorsi* muscle area), OMD (total tract digestibility of organic matter), TTSD (total tract digestibility of starch). The x-axis represents the raw mean difference (RMD) between steam-flaked and control diets, and the y-axis represents the standard error (SE) of each study, indicating study precision. *P*-value refers to the Egger's regression test for funnel plot asymmetry which is indicative of publication bias.

