

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO DEL-REI
CAMPUS TANCREDO DE ALMEIDA NEVES
CURSO DE BACHARELADO EM ZOOTECNIA

HARIANY ALMEIDA RIBEIRO

**SUBSTITUIÇÃO DO FARELO DE SOJA POR FARELO DE CANOLA: IMPACTOS NO
METABOLISMO DO NITROGÊNIO EM VACAS LEITEIRAS.**

SÃO JOÃO DEL-REI – MG
ABRIL 2025

HARIANY ALMEIDA RIBEIRO

SUBSTITUIÇÃO DO FARELO DE SOJA POR FARELO DE CANOLA: IMPACTOS NO
METABOLISMO DO NITROGÊNIO EM VACAS LEITEIRAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Bacharelado em Zootecnia, da
Universidade Federal de São João Del Rei -
Campus Tancredo de Almeida Neves, como parte
das exigências para a obtenção do diploma de
Bacharel em Zootecnia.

Orientador: Prof. Dr. Rafael Fernandes Leite (UFSJ/CTAN)

SÃO JOÃO DEL-REI – MG
SETEMBRO 2025

HARIANY ALMEIDA RIBEIRO

SUBSTITUIÇÃO DO FARELO DE SOJA POR FARELO DE CANOLA: IMPACTOS NO
METABOLISMO DO NITROGÊNIO EM VACAS LEITEIRAS

Defesa aprovada pela Comissão Examinadora em: 09/09/2025.

Comissão Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 **RAFAEL FERNANDES LEITE**
Data: 10/09/2025 08:01:31-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Rafael Fernandes Leite
Universidade Federal de São João del-Rei

Documento assinado digitalmente
 **LEILA DE GENOVA GAYA**
Data: 15/09/2025 10:22:09-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Leila de Gênova Gaya
Universidade Federal de São João del-Rei

Documento assinado digitalmente
 **LETICIA RODRIGUES FARIA**
Data: 12/09/2025 11:17:04-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dra. Leticia Rodrigues Faria
Universidade Federal de Lavras

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha profunda gratidão, em primeiro lugar, aos meus avôs, José João Ribeiro e Waldemar Cândido de Almeida, que, desde minha infância, me inspiraram a amar o meio rural e a bovinocultura de leite. À minha tia Janet, e minha tia Jaqueline, que compartilhou comigo seus conhecimentos sobre manejo, e ao meu tio Jésus, que me ensinou sobre sanidade animal, permitindo que, desde criança, eu cultivasse uma paixão pela área que escolhi para minha carreira profissional e para minha formação acadêmica.

Aos meus pais, meu alicerce inabalável, agradeço por todo o apoio, incentivo e amor ao longo dessa jornada, que me permitiram seguir em busca dos meus sonhos. Ao meu namorado, Pedro, e à sua família, minha sincera gratidão por serem meus companheiros nessa caminhada, oferecendo apoio e carinho em todos os momentos. E ao meu filho, José Álvaro, que se tornou minha maior motivação, me impulsionando a enfrentar cada desafio com ainda mais determinação e garra para concluir minha graduação.

Aos amigos que encontrei aqui em São João del-Rei, minha segunda família, que foram meu suporte, meu refúgio e minha fortaleza ao longo dessa trajetória acadêmica, minha eterna gratidão.

Agradeço, também, aos professores Rafael e Leila, e à doutora Letícia, que confiaram em meu potencial, abriram portas e me proporcionaram oportunidades valiosas para participar de diversas atividades acadêmicas e redigir meu Trabalho de Conclusão de Curso.

Por fim, minha fé e devoção me sustentaram nessa caminhada. À Nossa Senhora Aparecida e São Francisco de Assis, agradeço por me concederem forças para superar cada obstáculo e continuar trilhando esse caminho com fé e determinação.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processo de extração do óleo e obtenção do farelo de canola pelos métodos de extração por solvente ou mecânica.....	4
Figura 2 - Campo Experimental Risoleta Neves da Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (EPAMIG), localizado em São João del Rei, Minas Gerais.....	12
Figura 3 - Localização do Campo Experimental Risoleta Neves da EPAMIG.....	12
Figura 4 - Ordenha e registro da produção de leite.....	18
Figura 5 - Digestibilidade da FDN nos tratamentos farelo de soja (azul) ou farelo de canola (cinza). Médias a,b seguidas por letras minúsculas diferentes diferem dentro da semana. Médias A,B seguidas por letras maiúsculas diferentes diferem entre as semanas (tratamento × semana, $P < 0,01$). Barras de erro: erro padrão da média (EPM).....	20
Figura 6 - Nitrogênio ureico do leite (mg/dL) nos tratamentos farelo de soja (preto) ou farelo de canola (cinza). Médias a,b seguidas por letras minúsculas diferentes diferem dentro da semana. Médias A,B seguidas por letras maiúsculas diferentes diferem entre as semanas (tratamento × semana, $P \leq 0,10$). CV: Covariável. Barras de erro: erro padrão da média (EPM).....	22

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Composição de ingredientes dietéticos.....	13
Tabela 2. Composição de dietas contendo farelo de soja (FS) ou farelo de canola (FC) como fonte principal de proteína.....	14
Tabela 3. Partição de nitrogênio e produção de proteína microbiana nos tratamentos com farelo de soja (FS) e farelo de canola (FC).....	24

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

FDN	Fibra em detergente neutro
FDA	Fibra em detergente ácido
CNF	Carboidratos não fibrosos
PB	Proteína bruta
PNDR	Proteína não digerida no rúmen
PDR	Proteína digerida no rúmen
CMS	Consumo de matéria seca
LCG	Leite corrigido para gordura
LCE	Leite corrigido para energia
Kg	Quilogramas
EPAMIG	Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais
TMR	Total mixed ratio
FC	Farelo de canola
FS	Farelo de soja
EPM	Erro padrão médio
mL	Mililitros
g	Gramas
°C	Celsius
mmol/l	Milimol por litro
NUL	Nitrogênio Ureico no Leite
NUP	Nitrogênio Ureico no Plasma
BHB	Beta-hidroxibutirato
μL	Microlitro

SUMÁRIO

RESUMO	9
ABSTRACT	10
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	2
2.1. O Farelo de Canola.....	2
2.2. Diferenças Nutricionais entre o Farelo de Canola e o Farelo de Soja.....	5
2.3. A Utilização do Farelo de Canola em Substituição ao Farelo de Soja em Dietas de Vacas Leiteiras.....	6
2.3.1. Consumo de Matéria Seca e Produção de Leite	6
3. MATERIAIS E MÉTODOS	10
3.1. Vacas, Tratamentos Dietéticos e Desenho Experimental.....	10
3.2. Procedimentos Experimentais e Coletas de Amostras	13
3.2.1. Amostras de Alimentos e Sobras.....	13
3.2.2. Amostras de Fezes.....	15
3.2.3. Amostras de urina.....	15
3.2.4. Amostras de leite.....	16
3.2.5. Amostras de sangue.....	17
3.2.6. Metabolismo de nitrogênio.....	18
3.2.7. Amostras de fluido folicular.....	18
3.2.8. Análises estatísticas.....	19
4. RESULTADOS	21
4.1. Consumo de Nutrientes, Digestibilidade Aparente de Nutrientes no Trato Digestivo Total e Produção de Leite.....	21
4.2. Partição do Nitrogênio e Síntese de Proteína Microbiana.....	22
5. DISCUSSÃO.....	25
6. CONCLUSÕES.....	27
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	28

RESUMO

O objetivo deste estudo foi avaliar o efeito da substituição do farelo de soja (FS) pelo farelo de canola (FC) no metabolismo do nitrogênio de vacas leiteiras. Foram utilizadas 30 vacas mestiças Girolando, distribuídas em delineamento em blocos casualizados, recebendo dietas isoproteicas com silagem de milho como volumoso principal e FS ou FC como fonte proteica, oferecidas como ração total misturada durante oito semanas. Foram avaliados consumo de nutrientes, digestibilidade aparente, produção e composição do leite, bem como a partição do nitrogênio em leite, urina, fezes, plasma e fluido folicular. O consumo de matéria seca e a produção de leite não diferiram entre os tratamentos ($P > 0,05$). A digestibilidade da matéria orgânica e da fibra em detergente neutro foi maior nas vacas alimentadas com FS ($P \leq 0,02$). Entretanto, vacas alimentadas com FC apresentaram menores concentrações de nitrogênio ureico no leite (13,1 vs. 16,3 mg/dL; $P < 0,01$), sem alterações na excreção urinária e fecal de nitrogênio ou no nitrogênio ureico plasmático e no fluido folicular ($P > 0,05$). A substituição do FS pelo FC permitiu melhor aproveitamento do nitrogênio, refletido no aumento do peso corporal, mantendo o desempenho produtivo. Conclui-se que o farelo de canola é uma alternativa viável ao farelo de soja em dietas de vacas leiteiras, promovendo eficiência na utilização do nitrogênio e benefícios ambientais sem comprometer a produção de leite.

Palavras-chave: vacas leiteiras; farelo de soja; farelo de canola; eficiência do nitrogênio; sustentabilidade.

ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the effect of replacing soybean meal (SM) with canola meal (CM) on nitrogen metabolism in dairy cows. Thirty Girolando crossbred cows were used in a randomized block design, receiving isoproteic diets with corn silage as the main forage and SM or CM as the protein source, offered as a total mixed ration for eight weeks. Nutrient intake, apparent digestibility, milk yield and composition, as well as nitrogen partitioning in milk, urine, feces, plasma, and follicular fluid were evaluated. Dry matter intake and milk yield did not differ between treatments ($P > 0.05$). Apparent digestibility of organic matter and neutral detergent fiber was higher in cows fed SM ($P \leq 0.02$). However, cows fed CM showed lower milk urea nitrogen concentrations (13.1 vs. 16.3 mg/dL; $P < 0.01$), with no differences in urinary and fecal nitrogen excretion or plasma and follicular fluid urea nitrogen ($P > 0.05$). Replacement of SM with CM allowed for improved nitrogen utilization, reflected in increased body weight, while maintaining productive performance. In conclusion, canola meals are a viable alternative to soybean meal in dairy cow diets, promoting nitrogen-use efficiency and environmental benefits without compromising milk production.

Keywords: dairy cows; soybean meal; canola meal; nitrogen efficiency; sustainability.

1. INTRODUÇÃO

Devido à crescente demanda do mercado global por leite de qualidade e seus derivados, é preciso investir em dietas eficientes que garantam melhor desempenho das vacas leiteiras com maior produção de leite e eficiência na utilização de nitrogênio, visando a redução de custos oriundos da alimentação e danos ambientais.

O farelo de soja é a fonte de proteína vegetal mais utilizada nas dietas de animais ruminantes (Canola Council of Canada, 2019), devido ao alto teor de proteína e ao perfil de aminoácidos dessa fonte (NASEM, 2021). Entretanto, a dependência exclusiva desse alimento pode ser problemática devido à flutuação de preços do mercado global, disponibilidade alternante e, em alguns países, dependência da importação (Paula et al., 2019). Mediante esses fatores, a utilização de outras fontes alternativas pode ser uma estratégia interessante.

O farelo de canola, oriundo da extração do óleo de canola, tem se destacado como fonte alternativa ao farelo de soja na alimentação de vacas leiteiras. A canola é uma descendente da colza que possui baixos teores de fatores antinutricionais, como glicosinolatos e ácido erúico (Canola Council of Canada, 2019). O farelo de canola tem sido usado como substituto do farelo de soja na dieta de vacas leiteiras, com resultados similares ou superiores no consumo de matéria seca (CMS), na produção de leite e na eficiência de utilização de nitrogênio (Brito; Broderick, 2007; Huhtanen et al., 2011; Martineau et al., 2013; Martineau et al., 2014; Broderick et al., 2015; Paula et al., 2018; Benchaar et al., 2021).

Com relação ao metabolismo de nitrogênio, as dietas baseadas em farelo de canola tendem a diminuir a excreção de nitrogênio ureico no leite, na urina e no sangue (Paula et al., 2018; 2019; Sánchez-Duarte et al., 2019). Além de reduzir a excreção de nitrogênio no leite, urina e fezes, a utilização do farelo de canola pode reduzir o teor de nitrogênio ureico no fluido folicular beneficiando a reprodução de vacas leiteiras. Isso se deve ao perfil de aminoácidos essenciais mais adequado do farelo de canola, beneficiando o desenvolvimento oocitário e

embrionário (Sinclair et al., 2008; Read et al., 2021; Leese et al., 2021), além de reduzir o nitrogênio ureico no plasma (Paula et al., 2019).

Portanto, esse trabalho pretendeu avaliar a substituição do farelo de soja pelo farelo de canola e seu efeito no metabolismo do nitrogênio em vacas leiteiras. A nossa hipótese é que a utilização do farelo de canola na dieta pode reduzir a excreção de nitrogênio no leite, no sangue, no fluido folicular, na urina e nas fezes.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. O Farelo de Canola

A canola é uma cultivar pertencente à família das Brassicaceae, derivada da colza, desenvolvida com o objetivo de produzir um alimento com baixo teor de ácido erúico no óleo e reduzida concentração de glicosinolatos no farelo. Esses compostos presentes na colza tradicional limitam seu uso na alimentação humana e animal devido a efeitos antinutricionais (Przybylski & Mag, 2002; Canola Council of Canada, 2019). O desenvolvimento da canola teve início no Canadá, a partir da seleção de uma linhagem polonesa de colza (Bronowski), caracterizada por baixo teor de glicosinolatos, cujas características foram posteriormente incorporadas em cultivares de *Brassica napus* L. e *Brassica rapa* L. de baixo teor de ácido erúico (Gupta & Pratap, 2007; Przybylski & Mag, 2007). Em 1974, foi lançada a primeira variedade denominada “double-low”, com baixos teores de ácido erúico e glicosinolatos, padrão mantido em cultivares modernas por meio de técnicas de melhoramento genético, garantindo óleo com menos de 2% de ácido erúico e farelo com menos de 30 $\mu\text{mol/g}$ de glicosinolatos (Canola Council of Canada, 2019).

A produção de canola concentra-se principalmente na extração de óleo, que representa cerca de 44% da semente, resultando no farelo como coproduto. Este farelo, junto com o farelo de colza, é a segunda fonte proteica vegetal mais utilizada globalmente (Canola Council of Canada, 2019). A crescente demanda pelo óleo de canola, considerado saudável para uso

culinário, levou a um aumento expressivo na exportação da semente pelo Canadá nas últimas duas décadas. O farelo de canola é empregado em dietas de vacas leiteiras, bovinos de corte, aves e peixes, refletindo sua versatilidade nutricional (Canola Council of Canada, 2019).

O farelo de canola é obtido por dois principais métodos de extração de óleo: por solvente e por prensagem mecânica (Figura 1).

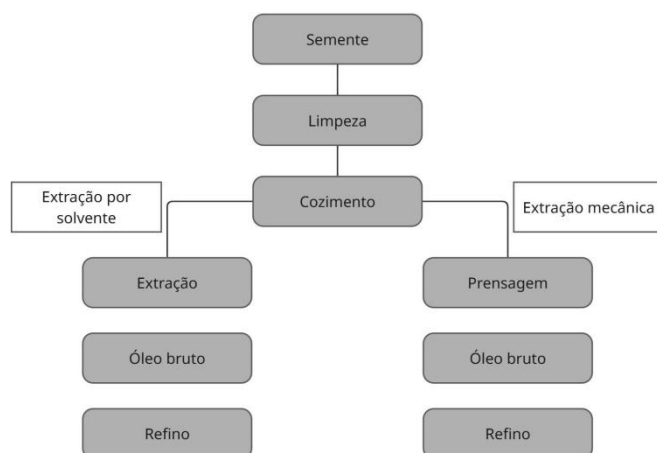


Figura 1 - Processo de extração do óleo e obtenção do farelo de canola pelos métodos de extração por solvente ou mecânica. Fonte: Canola Council of Canada (2019)

O método de extração por solvente é o mais utilizado, pois a remoção do óleo por esse método é maior do que no método por extração mecânica, produzindo um farelo com baixo teor de óleo na sua composição (Canola Council of Canada, 2019). No segundo método, o farelo produzido tem teor de óleo mais elevado, variando de 8 a 12%, resultando em um maior conteúdo de energia digestível e maior diluição de outros nutrientes no farelo (Canola Council of Canada, 2019). No geral, é mais interessante que o processo de extração de óleo seja mais eficiente, resultando no farelo com maiores níveis de proteína bruta e outros nutrientes. Nesse contexto, a extração do óleo de canola por meio da extração com solvente consiste em: limpeza das sementes, pré-condicionamento e descamação, cozimento, prensa mecânica para remover parte do óleo, extração com solvente na prensa para remover o restante do óleo, dessolventização e tostagem, secagem e resfriamento do farelo (Canola Council of Canada,

2019). Desse modo, é preciso ter atenção em tais processos, pois estes podem alterar a qualidade do produto final dependendo da maneira que forem executados. A temperatura, por exemplo, deve ser alta o suficiente para desativar a enzima de mirosinase, mas não por muito tempo, senão a qualidade da proteína será comprometida (Canola Council of Canada, 2019).

Com relação à composição nutricional, o farelo de canola tem maior teor de fibra do que outras fontes protéicas vegetais por causa da presença da casca, que não é possível de ser removida por completo no processo de extração (Canola Council of Canada, 2019). O teor de fibra em detergente neutro (FDN) corresponde a cerca de 29%, o de fibra de detergente ácido (FDA) de 20%, e 20% de carboidratos não fibrosos (CNF), sendo que a casca representa entre 14 e 16% da composição total do farelo (Paula et al., 2019). O farelo de canola é uma boa fonte de minerais, principalmente selênio e fósforo e não possui valores muito altos de vitaminas. O farelo de canola apresenta em média 41,5% de proteína bruta (PB), sendo 68% de proteína degradada no rúmen (PDR) e 32% de proteína não degradada no rúmen (PNDR) (NASEM, 2021). As duas principais proteínas de armazenamento na canola são napina e cruciferina. A primeira é solúvel, mas não é facilmente degradada no rúmen, consequentemente gerando altos níveis de PNDR (Canola Council of Canada, 2019). No geral, a PNDR do farelo de canola, que varia entre 41,8 a 56,3%, é mais elevada do que a do farelo de soja, que varia entre 27 e 45,2% (Canola Council of Canada, 2019). Esse é um ponto importante, pois a PNDR juntamente com a proteína microbiana após a digestão intestinal fornece o pool de aminoácidos disponíveis para serem utilizados pelos tecidos para as funções fisiológicas, denominada proteína metabolizável. Portanto, os alimentos com maior teor de PNDR podem impactar na quantidade de proteína metabolizável, de proteína metabolizável permissível para leite e no fluxo de aminoácidos essenciais em vacas leiteiras. Por isso, quando incluso na dieta, o farelo de canola pode gerar aumento na concentração de aminoácidos essenciais totais no plasma (Paula et al., 2019). O aumento das concentrações plasmáticas de aminoácidos essenciais, metionina e aminoácidos de cadeia ramificada estão diretamente associados com a estimulação da via mTOR, reguladora

da síntese de proteínas e proliferação celular (Coleman et al., 2020; Neinast et al., 2019). Além disso, a utilização de fontes proteicas com maior teor de PNDR e melhor perfil de aminoácidos pode aumentar o fluxo de proteína e aminoácidos metabolizáveis para o animal, reduzir o teor de nitrogênio ureico no sangue e no leite e, dessa forma, melhorar a eficiência de utilização do nitrogênio em vacas leiteiras (Paula et al., 2019).

2.2. Diferenças Nutricionais entre o Farelo de Canola e o Farelo de Soja

A fonte proteica mais utilizada no mundo é o farelo de soja, principalmente por causa da sua qualidade nutricional e disponibilidade (Canola Council of Canada, 2019). Entretanto, a dependência desse alimento pode ser prejudicial por causa da flutuação de preços do mercado global, disponibilidade alternante e, para alguns países, dependência na importação (Paula et al., 2019). Já o farelo de canola, que surge como um substituto para o farelo de soja, tem composição nutricional semelhante e é mais viável por causa de seu custo-benefício, principalmente quando há alta demanda global pela soja. Além disso, gera resultados similares ou até superiores no consumo de matéria seca, na produção de leite e na eficiência da utilização de nitrogênio (Brito & Broderick, 2007; Huhtanen et al., 2011; Martineau et al., 2013; Martineau et al., 2014; Broderick et al., 2015; Paula et al., 2018; Benchaar et al., 2021).

O farelo de soja tem, em média, 52,6% de PB, sendo 68% de PDR e 32% de PNDR (NASEM, 2021). Quanto ao perfil de aminoácidos, o farelo de soja possui concentrações de cerca de 6,16% de lisina, 1,38% de metionina, 2,64% de histidina, 4,54% de isoleucina, 7,63% de leucina, 4,76% de valina, 3,95% de treonina e 1,38% de triptofano, com relação à lisina e metionina de 4,46:1 (NASEM, 2021). Já o farelo de canola, possui 5,5% de lisina, 1,97% de metionina, 2,66% de histidina, 3,93% de isoleucina, 6,92% de leucina, 5,11% de valina, 4,43% de treonina e 1,34% de triptofano, com relação lisina e metionina de 2,8:1 (NASEM, 2021). O teor da FDN e da FDA do farelo de soja é 19,6% e 10,1%, respectivamente (NASEM, 2021) - valor inferior ao do farelo de canola, 29,0% e 20,3% -, devido à presença da casca, conforme

dito anteriormente. O teor de extrato etéreo do farelo de soja está entre 1,5 a 2% enquanto o do farelo de canola é cerca de 3,2%.

É importante destacar a influência da presença de fatores antinutricionais, principalmente os glicosinolatos, e seus efeitos negativos na saúde dos animais. Caso os níveis de glicosinolatos sejam muito altos, podem afetar negativamente a função da tireoide ao inibir a produção do hormônio tireoidiano e reduzir o consumo de matéria seca devido ao seu sabor amargo (Paula et al, 2019). Nesse contexto, o farelo de canola possui cerca de 2 $\mu\text{mol/g}$ de glucosinolatos na porção do farelo, dependendo do método de processamento da semente. Já o farelo de soja não possui quantidades significativas de glicosinolatos, já que esses compostos são característicos das plantas da família das brássicas.

2.3. A Utilização do Farelo de Canola em Substituição ao Farelo de Soja em Dietas de Vacas Leiteiras

Diversos estudos têm investigado o potencial do farelo de canola como alternativa ao farelo de soja na nutrição de vacas leiteiras. A literatura aponta que a inclusão desse ingrediente na dieta pode manter ou até mesmo melhorar indicadores produtivos, como o consumo de matéria seca e a produção de leite (Brito; Broderick, 2007; Huhtanen et al., 2011; Martineau et al., 2013; Martineau et al., 2014; Broderick et al., 2015; Paula et al., 2018; Benchaar et al., 2021). Além disso, há evidências de que o uso do farelo de canola contribui positivamente para a eficiência de utilização do nitrogênio, favorecendo um metabolismo mais equilibrado desse nutriente nos animais (Martineau et al., 2013; Broderick et al., 2015; Benchaar et al., 2021).

2.3.1. Consumo de Matéria Seca e Produção de Leite

Pesquisas sobre a substituição do farelo de soja pelo farelo de canola em dietas de vacas leiteiras apresentam resultados variados em relação ao consumo de matéria seca (CMS), mas, de modo geral, apontam efeitos positivos sobre a produção de leite (Canola Council of Canada, 2019; Martineau et al., 2013; Paula et al., 2019; Broderick et al., 2015; Huhtanen et al., 2011;

Paula et al., 2018; Martins, 2023; Brito; Broderick, 2007; Sánchez-Duarte et al., 2019). Em alguns estudos, como os de Paula et al. (2019) e Martineau et al. (2013), foi relatado incremento de aproximadamente 0,24 kg/dia no CMS em vacas alimentadas com farelo de canola, em comparação àquelas que receberam farelo de soja. De forma semelhante, Sánchez-Duarte et al. (2019) verificaram diferenças significativas tanto no CMS (26,8 vs. 27,7 kg/dia; $P < 0,05$) quanto na produção de leite (38,5 vs. 39,7 kg/dia; $P < 0,05$) entre os dois tratamentos.

Quanto à produção, Broderick et al. (2015) identificaram aumento de 0,9 kg/dia de leite em vacas que receberam farelo de canola, acompanhado por redução nas concentrações de nitrogênio ureico do leite (de 9,9 para 9,1 mg/dL; $P = 0,05$), sugerindo maior eficiência na utilização do nitrogênio. Paula et al. (2018) também observaram efeitos positivos, destacando acréscimo de 1,3 kg/dia na produção de leite, além de ganhos adicionais em leite corrigido para gordura (3%; 1,2 kg/dia) e em leite corrigido para energia (0,9 kg/dia). Esses efeitos têm sido atribuídos ao perfil mais equilibrado de aminoácidos essenciais do farelo de canola e ao seu maior teor de proteína não degradável no rúmen (PNDR), fatores que favorecem a síntese proteica e a eficiência metabólica. Segundo Huhtanen et al. (2011), esse fenômeno pode ser explicado pelo chamado “efeito pull”, no qual o fornecimento de aminoácidos mais adequados estimula a produção de leite, que por sua vez aumenta a ingestão de matéria seca.

De maneira geral, os resultados sugerem que o farelo de canola, além de manter o desempenho produtivo, pode promover benefícios adicionais à utilização do nitrogênio, configurando-se como alternativa promissora ao farelo de soja na nutrição de vacas leiteiras (Canola Council of Canada, 2019).

2.3.2. Eficiência de Utilização do Nitrogênio

O nitrogênio desempenha papel central na nutrição de ruminantes, sendo utilizado pelos microrganismos ruminais para crescimento e síntese de proteína microbiana. Esse nutriente

pode estar presente na dieta sob a forma de proteína verdadeira, como nos farelos de soja e de canola, ou em compostos nitrogenados não proteicos, como a ureia e a amônia (Alves et al., 2010). A amônia formada no rúmen, seja pela hidrólise de compostos nitrogenados não proteicos ou pela desaminação de aminoácidos, constitui importante fonte de nitrogênio para os microrganismos. No entanto, sua utilização eficiente depende da disponibilidade de energia proveniente da fermentação de carboidratos e de esqueletos de carbono. Além disso, certas espécies microbianas necessitam de peptídeos e aminoácidos adicionais para atingir máxima taxa de crescimento. Quando a concentração de amônia excede a capacidade de aproveitamento microbiano, o excesso é convertido em ureia e eliminado do organismo (Alves et al., 2010).

A eficiência do metabolismo de nitrogênio está diretamente relacionada à degradabilidade das fontes proteicas utilizadas na dieta. Proteínas de rápida degradação no rúmen podem gerar excesso de nitrogênio, aumentando as perdas e reduzindo a eficiência de utilização (Zeoula et al., 1998). Como a proteína é um dos componentes mais onerosos na formulação de dietas, a busca por fontes com menor degradação ruminal, que resultem em maior fluxo de proteína metabolizável e aminoácidos essenciais para o animal, tem sido prioridade. Nesse contexto, diversos estudos têm avaliado a substituição do farelo de soja pelo farelo de canola, com foco em melhorar a eficiência de utilização do nitrogênio (Martineau et al., 2013; Broderick et al., 2015; Benchaar et al., 2021; Hristov et al., 2004).

Evidências indicam que dietas contendo farelo de canola reduzem a excreção de nitrogênio ureico no leite, na urina e nas fezes (Paula et al., 2018; 2019; Sánchez-Duarte et al., 2019). Em comparação ao farelo de soja, o uso de farelo de canola resultou em menores valores percentuais de nitrogênio excretado na urina (69,2% vs. 72,2%) e nas fezes (29,2% vs. 31,6%), sugerindo maior retenção e aproveitamento do nutriente. Essa melhora na eficiência nitrogenada está associada ao aumento do aporte de proteína degradável no rúmen (PDR) e à maior síntese de proteína microbiana (Broderick et al., 2015).

Estudos experimentais também demonstraram que, em dietas isonitrogenadas, vacas alimentadas com farelo de canola apresentaram menores concentrações de nitrogênio ureico no leite e menor excreção total de nitrogênio em comparação às vacas alimentadas com farelo de soja. Por exemplo, Brito e Broderick (2007) observaram que vacas alimentadas com dietas contendo 15% de proteína bruta apresentaram valores de NUL de 9,9 mg/dL com farelo de soja e de 8,7 mg/dL com farelo de canola, além de redução do nitrogênio excretado na urina (105 g/dia vs. 86 g/dia, respectivamente). Em outro estudo, os mesmos autores verificaram maior consumo de matéria seca (24,8 vs. 24,2 kg/dia) nas vacas que receberam farelo de canola, embora a eficiência de utilização do nitrogênio não tenha diferido estatisticamente entre os tratamentos.

Resultados semelhantes foram relatados por Sánchez-Duarte et al. (2019), que encontraram CMS próximo entre os grupos, mas menores concentrações de NUL em vacas alimentadas com farelo de canola (11,2 mg/dL) em comparação às alimentadas com farelo de soja (12,4 mg/dL). Martineau et al. (2013), por sua vez, reportaram aumento de 0,24 kg/dia no CMS e acréscimo de 12 g de eficiência nitrogenada em vacas recebendo farelo de canola a 17,2% da dieta.

Embora existam trabalhos que não observaram efeito significativo da substituição sobre o metabolismo do nitrogênio (Paula et al., 2017), outros destacam maior concentração de aminoácidos essenciais no plasma de vacas alimentadas com farelo de canola (Paula et al., 2019; Huhtanen et al., 2011; Martineau et al., 2014). Essa diferença tem sido atribuída ao perfil de aminoácidos mais equilibrado e ao maior teor de proteína não degradável no rúmen (PNDR) do farelo de canola, fatores que favorecem maior aporte de proteína metabolizável e contribuem para a síntese proteica e desempenho produtivo.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo foi conduzido na Fazenda Experimental Risoleta Neves de propriedade da Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (EPAMIG) em São João del-Rei, MG, Brasil (Figuras 2 e 3). Os procedimentos experimentais foram aprovados pelo Comitê de Ética na Utilização de Animais da Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (Protocolo número 001/2023).



Figura 2 - Campo Experimental Risoleta Neves da Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (EPAMIG). Fonte: autoral

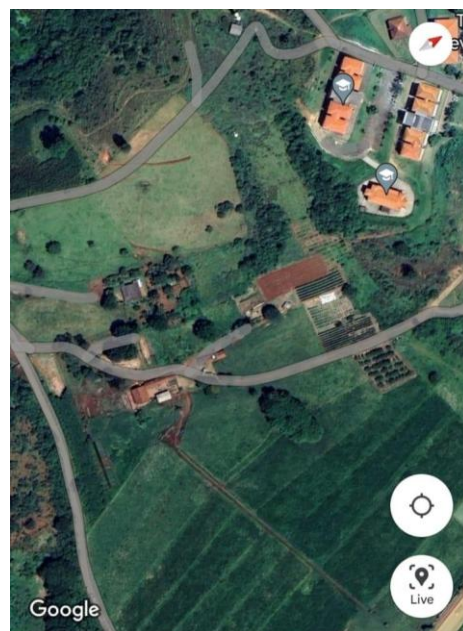


Figura 3 - Localização do Campo Experimental Risoleta Neves da EPAMIG. Fonte: Google Maps

3.1. Vacas, Tratamentos Dietéticos e Desenho Experimental

Trinta vacas mestiças Holandês-Gir (493 ± 51 kg de peso corporal; $11,7 \pm 3,2$ kg/dia de produção de leite; 168 ± 66 dias em lactação) foram selecionadas para o experimento. Os animais foram agrupados considerando composição genética ($\frac{3}{4}$ Holandês $\times$ $\frac{1}{4}$ Gir; $\frac{5}{8}$ Holandês $\times$ $\frac{3}{8}$ Gir; $\frac{7}{8}$ Holandês $\times$ $\frac{1}{8}$ Gir), paridade (10 primíparas e 20 multíparas com ≥ 2 partos) e produção de leite, e distribuídos em um delineamento em blocos casualizados, sendo alocados a um dos dois tratamentos: (1) dieta contendo farelo de soja ($n = 15$) e (2) dieta contendo farelo

de canola ($n = 15$). Antes do início do período experimental, todas as vacas receberam uma dieta controle durante uma semana de covariável, utilizada para medir o desempenho basal de cada animal, incluindo consumo de matéria seca, produção e composição do leite e peso corporal. Este período é essencial para ajustar os efeitos individuais e reduzir a variabilidade entre os animais, permitindo que cada vaca sirva como referência para seu próprio desempenho inicial, aumentando a precisão das comparações entre os tratamentos. Após essa fase de adaptação e coleta de covariáveis, as vacas foram transferidas para as dietas experimentais por um período de 8 semanas, durante o qual foram avaliados os parâmetros de desempenho produtivo, digestibilidade de nutrientes e metabolismo do nitrogênio.

As dietas experimentais foram oferecidas como ração total misturada – total mixed ration (TMR) com proporção de forragem e concentrado de 70:30, e a silagem de milho foi a única fonte de forragem utilizada nas dietas (Tabelas 1 e 2). As dietas foram formuladas para maximizar o uso de forragem e reduzir a inclusão de concentrado, devido à baixa produção de leite das vacas. As dietas foram formuladas para serem isoproteicas, com os mesmos ingredientes, variando apenas na fonte proteica (farelo de soja ou farelo de canola). O farelo de canola foi obtido por extração com solvente (NUTRITEC Nutrição Animal; Lajeado, RS, Brasil). A casquinha de soja foi o único ingrediente que variou em ambas as dietas. A casquinha de soja foi utilizada para manter o teor de proteína bruta nas dietas. Os outros ingredientes foram mantidos de forma constante nas dietas. As dietas foram oferecidas duas vezes ao dia, às 7h e às 14h, em quantidades iguais. Os ingredientes concentrados foram misturados em um misturador (Usibras, Patrocínio, MG, Brasil) e, em seguida, o concentrado foi misturado manualmente com a silagem de milho nos cochos. As vacas foram alojadas em quatro piquetes (um piquete com oito e outro com sete vacas por tratamento) e tiveram livre acesso à água. O ajuste do consumo diário, foi feito visando sobras entre 5 e 10% em relação à quantidade ofertada. As sobras de cada piquete foram coletadas e pesadas diariamente aproximadamente

às 6h. As amostras de silagem de milho foram coletadas semanalmente para determinação do teor de matéria seca em micro-ondas e posteriormente a TMR foi ajustada.

Tabela 1. Composição química dos ingredientes da dieta

Componente	Silagem de milho		Casquinha de soja		Milho moído		Farelo de soja		Farelo de canola	
	Média	EPM	Média	EPM	Média	EPM	Média	EPM	Média	EPM
MS, % com base na MN	28,6	2,53	89,6	0,53	88,4	0,30	89,1	0,26	88,6	0,39
MO, % da MS	93,9	0,09	95,2	0,11	98,1	0,06	93,3	0,06	90,5	0,35
PB, % da MS	9,1	0,60	12,2	0,18	9,0	.	51,2	0,51	42,9	3,21
FDN, % da MS	56,8	2,74	71,1	3,42	10,6	0,32	26,0	0,62	39,5	1,30
Amido, % da MS	29,7	1,06	0,6	0,05	71,3	2,07	1,6	0,16	1,5	0,10

¹MS = Matéria Seca; ²MO = Matéria Orgânica; ³PB = Proteína Bruta; ⁵FDN = Fibra em Detergente Neutro; ⁶EPM = Erro Padrão da Média; ⁷MN = Matéria Natural.

Tabela 2. Composição de dietas contendo farelo de soja (FS) ou farelo de canola (FC) como fonte principal de proteína

Item	FS	FC
Ingredientes, % de MS		
Silagem de milho	70,1	70,1
Casquinha de soja	6,4	3,1
Milho moído	9,6	9,6
Farelo de soja	11,3	-
Farelo de canola	-	14,7
Ureia	0,7	0,7
Calcário	0,2	0,2
Minerais e vitaminas ¹	1,7	1,7
Composição		
MS, % com base na matéria natural	42,0	45,2
MO, % de MS	92,7	92,2
PB, % de MS	16,1	16,2
PB do farelo de soja, % de MS	6,20	-
PB do farelo de canola, % de MS	-	6,73
FDN, % de MS	48,3	48,6
Forragem FDN, % de MS	39,3	38,3
Extrato etéreo, ² % de MS	2,7	3,0
CNF, ³ % de MS	26,8	25,7
Amido, % de MS	25,1	25,1
CNF sem amido, ⁴ % de MS	1,7	0,6

¹20,5% de Ca; 6,0% de P; 2,0% de Mg; 3,5% de K; 2,0% de S; 7,0% de Na; 15 mg/kg de Co; 700 mg/kg de Cu; 1600 mg/kg de Mn; 2500 mg/kg de Zn; 19 mg/kg de Se; 40 mg/kg de I; 200.000 UI/kg de vitamina A; 50.000 UI/kg de vitamina D; 1.500 UI/kg de vitamina E e 1.000 mg/kg de monensina.

²O teor de gordura dos ingredientes foi obtido na tabela de composição de nutrientes do NASEM (2021).

³CNF = 100 - cinzas - extrato etéreo - FDN - (PB – 0,64 × equivalente de PB na ureia). O ajuste para nitrogênio não protéico foi baseado no NASEM (2021).

⁴CNF sem amido = CNF - Amido.

3.2. Procedimentos Experimentais e Coletas de Amostras

3.2.1. Amostras de Alimentos e Sobras

As amostras de silagem de milho foram coletadas semanalmente, as amostras dos alimentos concentrados foram coletadas uma vez durante todo o experimento, e as amostras de sobras foram coletadas diariamente. Imediatamente após a coleta, as amostras de silagem de milho e de sobras foram congeladas (-20°C). As amostras de sobras foram agrupadas semanalmente, formando uma composta por lote e por semana. As amostras de silagem de

milho e de sobras foram submetidas ao processo de pré-secagem a 55°C por 72 horas e moídas em um moinho do tipo Wiley (Star FT 80, Fortinox - Indústria, Comércio e Serviços, Piracicaba, SP, Brasil) em peneira com malha de 2 mm. Posteriormente, metade de cada amostra foi novamente moída em peneira com malha de 1 mm. As amostras dos alimentos concentrados foram moídas diretamente, sem a realização do processo de pré-secagem, em razão do seu baixo teor de umidade, o que garante adequada estabilidade para armazenamento e análise. Além disso, a ausência de pré-secagem evita possíveis perdas de compostos voláteis e nutrientes sensíveis ao calor, assegurando a preservação da composição química original do material. As amostras a 2 mm foram utilizadas para a determinação do conteúdo de FDN não degradada a 240 horas (uFDN240). Após a moagem, as amostras a 2 mm foram colocadas em saquinhos de tecido não tecido (TNT; 100 g/m²) com dimensões de 5 cm × 5 cm (VALENTE et al., 2011). As amostras foram colocadas nos saquinhos mantendo uma proporção de 20 mg de MS/cm² de superfície (NOCEK, 1988). Essas amostras foram incubadas no rúmen de duas novilhas Nelore canuladas, por 240 horas (VALENTE et al., 2011). As novilhas Nelore (614 ± 4,2 kg de peso corporal) foram alojadas em piquetes individuais com livre acesso à água e alimentadas uma vez ao dia às 07h00. As dietas foram oferecidas como TMR com proporção de forragem e concentrado de 70:30 contendo (com base na MS) 60% de silagem de milho, 15% de milho moído, 20% de grãos secos de destilaria, 1% de ureia, 4% de premix mineral e vitaminas e 14,1% de proteína bruta. Após 240 horas, os saquinhos foram removidos do rúmen e imediatamente imersos em água com gelo para parar a atividade microbiana. Depois disso, os saquinhos foram lavados e secos, e o teor de FDN foi determinado (VAN SOEST et al., 1991). O uFDN240 foi determinado como a FDN que permaneceu nos saquinhos após extração com solução de detergente neutro (VALENTE et al., 2011). As amostras à 1 mm foram utilizadas para analisar o teor de MS (105°C por 24 horas), matéria mineral (queima completa da amostra em um forno de mufla a 600°C por 4 horas) e FDN (VAN SOEST et al., 1991). O teor de amido com a glicose livre foi medido com α -amilase e amiloglicosidase, seguindo a técnica

colorimétrica para glicose, adaptado de HALL et al. (2015). O teor de nitrogênio total foi analisado pelo método de DUMAS utilizando o equipamento Leco-FP 828 LC (LECO Corporation, St. Joseph, MI, EUA) e convertido em proteína bruta utilizando o fator de 6,25. Os carboidratos não fibrosos (CNF) foram calculados como $CNF = 100 - \text{matéria mineral} - \text{extrato etéreo} - \text{FDN} - (PB - 0,64 \times PB \text{ equivalente da ureia})$. O ajuste para nitrogênio não proteico foi feito de acordo com o NASEM (2021).

3.2.2. Amostras de Fezes

As amostras de fezes foram coletadas pela técnica *spot* diretamente do reto das vacas duas vezes ao dia, com um intervalo de 8 horas, durante três dias consecutivos nas semanas 3, 5 e 7. Posteriormente, uma amostra composta semanal foi preparada para cada vaca. As amostras de fezes foram secas, moídas e analisadas conforme descrito anteriormente para as amostras de silagem de milho e sobras. Uma subamostra das fezes úmidas foi utilizada para determinação do nitrogênio total pelo método de Dumas. Esse método baseia-se na combustão completa da amostra em atmosfera de oxigênio, liberando gases que são quantificados para estimar o teor de nitrogênio. O valor obtido foi convertido em proteína bruta utilizando o fator 6,25, que corresponde à relação média entre nitrogênio e proteína (aproximadamente 16% de N nas proteínas), permitindo assim expressar o resultado em termos nutricionais e facilitar a comparação com os demais componentes da dieta.

3.2.3. Amostras de urina

As amostras de urina foram coletadas pela técnica *spot* duas vezes ao dia, com um intervalo de 8 h, durante três dias consecutivos durante as semanas 3, 5 e 7. As amostras de urina foram filtradas através de tecido voal e o pH foi medido imediatamente com um medidor de pH de bancada. Depois disso, 60 mL de urina concentrada foram congelados (-20 °C) para a determinação subsequente da concentração total de nitrogênio e creatinina. Uma alíquota

adicional de 15 mL de amostra foi imediatamente acidificada em 60 mL de ácido sulfúrico 0,072 N (H_2SO_4) e posteriormente congelada a $-20\text{ }^\circ\text{C}$. A acidificação teve como objetivo reduzir o pH da amostra, evitando a ação de microrganismos e enzimas que poderiam degradar ou volatilizar compostos nitrogenados, como a ureia. Dessa forma, assegurou-se a preservação dos metabólitos até a análise laboratorial, que incluiu a determinação de derivados de purina (alantoína e ácido úrico) e ureia, utilizados como indicadores do metabolismo proteico e da síntese microbiana ruminal. O nitrogênio total foi analisado pelo método DUMAS e convertido para PB usando o fator de 6,25. Creatinina, ácido úrico e ureia foram analisados em um analisador bioquímico automático (AmaMedical, Osasco, SP, Brasil) por meio de *kits* comerciais colorimétricos (BIOCLIN, Belo Horizonte, MG, Brasil).

O volume de urina foi determinado considerando o peso corporal individual e usando uma taxa de excreção de creatinina de 29 mg/kg de peso corporal (Valadares et al., 1999). O volume de urina foi usado para calcular a excreção de nitrogênio, ureia, alantoína e ácido úrico. A excreção total de nitrogênio e ureia na urina (g/d), bem como de alantoína e ácido úrico (mmol/d), foi calculada multiplicando o volume de urina pelas concentrações correspondentes de nitrogênio, ureia, alantoína e ácido úrico. A produção de proteína microbiana foi estimada pela excreção (mmol/d) de DP na urina e pela relação DP e creatinina (Chizzotti et al., 2008). A eficiência do crescimento microbiano ruminal foi estimada como DP pelo consumo de matéria orgânica digestível (mmol/kg).

3.2.4. Amostras de leite

As vacas foram ordenhadas duas vezes ao dia (7h e 14h30) em uma sala de ordenha do tipo espinha de peixe. A produção de leite foi registrada diariamente durante todo o experimento e as médias de cada vaca foram utilizadas para comparar os tratamentos (Figura 4). As amostras de leite foram coletadas diariamente em proporção à produção de cada ordenha ao longo de três dias consecutivos durante as semanas 3, 5 e 7. As amostras foram

armazenadas em frascos contendo 2-bromo-2-nitropropano-1,3-diol sob refrigeração. As concentrações de gordura, PB, caseína, lactose, sólidos totais, contagem de células somáticas (CCS) e nitrogênio ureico no leite (NUL) foram analisadas em laboratório comercial (Clínica do Leite, Piracicaba, SP, Brasil). A secreção de leite corrigido para energia (LCE) (kg/d) foi calculada como: Secreção de energia do leite / 0,70 (assume 0,70 Mcal/kg de leite com 3,7% de gordura, 3,2% de proteína e 4,6% de lactose). As eficiências alimentares foram calculadas como produção de leite/CMS. O consumo de MO digestível (CMOD) foi estimado e a razão LCE/CMOD foi calculada como uma medida da eficiência do uso de energia.



Figura 4 - Ordenha e registro da produção de leite. Fonte: Autoral.

3.2.5. Amostras de sangue

As coletas de sangue foram realizadas às quartas-feiras, durante o período de covariável e nas semanas 3, 5 e 7 do experimento, sempre aproximadamente 4 h após a alimentação matinal. As amostras foram obtidas em tubos contendo EDTA (BIOCON, Belo Horizonte, MG, Brasil) destinados à determinação de ureia. Em seguida, os tubos foram centrifugados a $3.200 \times g$ por 15 min, e o plasma separado foi armazenado a $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ até a realização das análises laboratoriais. A concentração de ureia plasmática foi determinada em um analisador bioquímico automático, utilizando kits colorimétricos comerciais (BIOCLIN, Belo Horizonte, MG, Brasil).

O nitrogênio ureico plasmático (NUP) foi então calculado multiplicando-se a concentração de ureia pelo fator 0,4667.

3.2.6. Metabolismo de nitrogênio

As amostras fecais e de urina foram analisadas para nitrogênio total pelo método de DUMAS. O conteúdo de PB do leite foi analisado por análise de infravermelho. A secreção de PB do leite foi calculada multiplicando o conteúdo de PB do leite pela produção diária de leite de cada vaca. Posteriormente, a média semanal de secreção de PB do leite foi calculada. A secreção de nitrogênio do leite foi calculada dividindo a secreção de PB do leite por 6,34 (NASEM, 2021). A proporção de ingestão de N (% da ingestão diária) e excreção (g/d) de N fecal, N urinário e N do leite foram calculadas.

3.2.7. Amostras de fluido folicular

Dezenove vacas (FS: n = 8 e FC: n = 11) foram selecionadas para o processo de aspiração folicular para a obtenção do fluido folicular. As vacas leiteiras foram selecionadas com base no estágio de gestação. Somente vacas com menos de 4 meses de gestação foram aspiradas (vacas não gestantes: FS: n = 2 e FC: n = 4; vacas gestantes: FS: n = 6 e FC: n = 7). As vacas foram submetidas a duas sessões de aspiração folicular (OPU – *ovum pick up*) com intervalo de 15 dias, sendo a primeira sessão realizada no início da oitava semana do experimento e a segunda no final da nona semana. As vacas receberam as dietas experimentais até a segunda sessão de aspiração. Todas as OPUs foram realizadas com auxílio de ultrassonografia (ultrassom Mindray®, modelo Z-50 VET) com transdutor microconvexo de 7,5 MHz, acoplado a uma guia de aspiração e bomba de vácuo (WTA, Cravinhos, SP, Brasil).

O fluido do maior folículo presente nos ovários foi coletado em um microtubo. Após a coleta, o fluido folicular foi centrifugado ($3.000 \times g$ por 15 minutos). O sedimento foi descartado e o fluido foi armazenado (-80°C) até a análise laboratorial. As concentrações de

ureia no fluido folicular foram mensuradas em um analisador bioquímico automático, por meio de *kit* comercial (BIOCLIN, Belo Horizonte, MG, Brasil). O teor de nitrogênio ureico no fluido folicular foi calculado multiplicando-se a concentração de ureia por 0,4667.

3.2.8. Análises estatísticas

As análises estatísticas foram realizadas utilizando o software SAS (versão 9.4, SAS University Edition, Cary, EUA). Todas as variáveis relacionadas ao consumo de matéria seca (CMS) — como ingestão e digestibilidade aparente total dos nutrientes (FDN e amido), eficiências alimentares, ingestão de nitrogênio, nitrogênio da proteína do leite, nitrogênio urinário e fecal em proporção à ingestão, relação LCE/CMOD e relação DP/CMOD — foram analisadas considerando o piquete como unidade experimental, pois o CMS foi medido por piquete. As demais variáveis foram analisadas considerando a vaca como unidade experimental, visto que foram coletadas individualmente de cada animal. O modelo utilizado para produção de leite, produção e teores de gordura, proteína, lactose, caseína, sólidos totais e NUL incluiu o número de dias em lactação (DEL) e o valor da mesma variável ao final do período de covariância como efeitos de covariável. O modelo para peso corporal (PC) e metabólitos sanguíneos incluiu o valor da mesma variável ao final do período de covariância.

Antes das análises, todos os dados foram testados quanto à normalidade dos resíduos por meio do teste de Shapiro-Wilk, utilizando o procedimento UNIVARIATE. Os dados com distribuição normal (ingestão de FDN e amido, digestibilidade aparente total da MS, MO, FDN, PB e MO não FDN, eficiências alimentares, LCE/CMOD, teores de gordura, caseína, lactose e sólidos totais, produções de leite de gordura, proteína, lactose, caseína e sólidos totais, NUL, CCS linear, peso corporal, dados de comportamento alimentar e ruminação, partição da ingestão de N em leite, urina e fezes, ingestão de N, nitrogênio da proteína do leite, N urinário e fecal, relação DP/CMOD, pH fecal, NUP ao longo do experimento, glicose e ureia-N

plasmáticos durante as sessões de aspiração folicular para OPU e ureia-N no fluido folicular) foram analisados como medidas repetidas utilizando o procedimento MIXED.

Os dados com distribuição não normal (ingestão de MS, MO e PB, digestibilidade aparente total do amido, produção de leite, LCE, teor de proteína no leite, ganho de peso corporal, escore de condição corporal – ECC, excreção urinária de alantoína e ácido úrico, medidas do rendimento microbiano ruminal relativo, volume total de urina, concentração de ureia-N na urina, ureia-N urinária como % do N urinário total, pH urinário, concentrações plasmáticas de glicose e BHB ao longo do experimento e glicose no fluido folicular) foram analisados como medidas repetidas utilizando o procedimento GLIMMIX, ajustando uma distribuição Gama com função de ligação logarítmica.

O modelo incluiu o efeito aleatório de bloco (1–15) e piquete (1–4), e os efeitos fixos de tratamento (FS ou FC), semana (1–8) e a interação entre tratamento e semana ($T \times S$). A vaca dentro do tratamento foi considerada como sujeito na declaração de medidas repetidas. A melhor estrutura de covariância foi escolhida com base no menor valor do Critério de Informação de Akaike (AIC). As estruturas de covariância testadas foram: autorregressiva de primeira ordem, simetria composta e não estruturada.

O modelo utilizado para ganho de peso corporal incluiu apenas os efeitos aleatórios de bloco (1–15) e piquete (1–4), e o efeito fixo de tratamento (FS ou FC). O modelo utilizado para qualidade dos oócitos, atividade das enzimas antioxidantes e concentrações de metabólitos plasmáticos e do fluido folicular durante as sessões de OPU considerou apenas o efeito aleatório da vaca (1–19) e da OPU (primeira ou segunda), e o efeito fixo de tratamento (FS ou FC).

4. RESULTADOS

4.1. Consumo de Nutrientes, Digestibilidade Aparente de Nutrientes no Trato Digestivo Total e Produção de Leite

O consumo de matéria seca, de matéria orgânica, de proteína bruta, de fibra em detergente neutro (FDN), de matéria orgânica não proveniente de FDN e de amido não diferiu ($P \geq 0,21$) entre os tratamentos. O consumo de FDN ($1,5 \pm 0,05\%$) e de FDN de forragem (FNDF) como porcentagem do peso vivo ($1,3 \pm 0,05\%$) também não diferiu ($P \geq 0,26$) entre os tratamentos. Os consumos de matéria seca, de matéria orgânica, de proteína bruta, de FDN, de matéria orgânica não proveniente de FDN e de amido variaram ao longo do tempo ($P \leq 0,04$), mas não houve interação tratamento $\times$ semana ($P \geq 0,99$).

A digestibilidade aparente de matéria orgânica e da FDN foi maior nas vacas alimentadas com farelo de soja ($P \leq 0,02$), enquanto as digestibilidades da matéria seca, da proteína bruta, da matéria orgânica não proveniente de FDN e do amido não diferiram entre os tratamentos ($P \geq 0,12$). A digestibilidade aparente de matéria orgânica e da FDN foi menor nas vacas alimentadas com farelo de canola em comparação àquelas alimentadas com farelo de soja nas semanas 3 (46,0 vs. 49,4%) e 7 (34,2 vs. 36,1%), mas não diferiu na semana 5 (43,3 vs. 44,3%; $P < 0,01$ para a interação tratamento $\times$ semana; Figura 5). A digestibilidade aparente dos nutrientes variou ao longo do tempo ($P \leq 0,01$), com exceção da digestibilidade aparente da proteína bruta e do amido. Não houve efeito da interação tratamento $\times$ semana ($P \geq 0,54$) para a digestibilidade aparente dos nutrientes. A produção de leite não diferiu entre as vacas alimentadas com farelo de soja ou farelo de canola (12,6 vs. 13,5 kg/d; $P = 0,48$). Não houve efeito da interação tratamento $\times$ semana ($P = 0,54$) para a produção de leite.

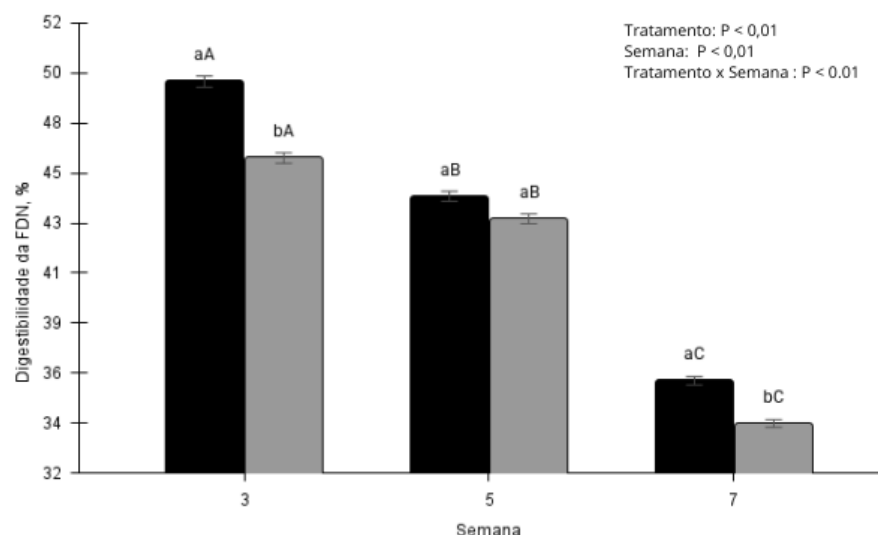


Figura 5- Digestibilidade da FDN nos tratamentos farelo de soja (preto) ou farelo de canola (cinza). ^{a,b} Médias seguidas por letras minúsculas diferentes diferem dentro da semana. ^{A,B} Médias seguidas por letras maiúsculas diferentes diferem entre as semanas (tratamento $\times$ semana, $P < 0,01$). Barras de erro: erro padrão da média (EPM).

4.2. Partição do Nitrogênio e Síntese de Proteína Microbiana

A partição da ingestão de nitrogênio em leite, urina e fezes, derivados de purinas e síntese de proteína microbiana está apresentado na Tabela 4. A ingestão de Nitrogênio, o Nitrogênio da proteína do leite (g/dia) e o N urinário e fecal (g/dia) não diferiu ($P \geq 0,29$) entre as vacas alimentadas com farelo de soja ou farelo de canola. A partição da ingestão de N em leite, urina e fezes não diferiu entre os tratamentos ($P \geq 0,37$). O volume total de urina, o N-ureico da urina, o N-ureico da urina como % do N urinário total, a excreção urinária de alantoína, ácido úrico, as medidas da produção relativa de produção microbiana e de derivados de purina/consumo de matéria orgânica não diferiu entre os tratamentos ($P \geq 0,12$). Não houve interação Tratamento $\times$ Semana ($P \geq 0,37$) para os parâmetros avaliados. Os efeitos do tempo foram observados ($P \leq 0,03$) para ingestão de N, N da proteína do leite como % da ingestão de N, volume total de urina, excreção de N fecal, excreção de N fecal como % da ingestão, produção microbiana relativa medida como DP/creatinina multiplicado pelo peso corporal (PC) e PC_{0,75}.

O teor de nitrogênio ureico no plasma (NUP) não diferiu ($P \geq 0,13$) entre os tratamentos. O teor de NUP foi maior ($P = 0,02$) na semana 5 ($18,0 \pm 0,20$ mg/dL) em comparação com a semana 7 ($17,4 \pm 0,22$ mg/dL), mas ambas não diferiram da semana 3 ($17,6 \pm 0,29$ mg/dL). O teor de nitrogênio ureico foi menor ($P < 0,01$) no leite (NUL) das vacas alimentadas com farelo de canola em comparação às vacas alimentadas com farelo de soja ($13,1$ vs. $16,3$ mg/dL). O NUL das vacas alimentadas com farelo de soja foi maior na semana 5 ($17,22 \pm 0,53$ mg/dL), em comparação com as semanas 3 ($16,04 \pm 0,51$ mg/dL) e 7 ($15,99 \pm 0,57$ mg/dL), enquanto o NUL das vacas alimentadas com farelo de canola foi menor na semana 5 ($12,26 \pm 0,53$ mg/dL) em comparação com as semanas 3 ($13,19 \pm 0,57$ mg/dL) e 7 ($13,45 \pm 0,51$ mg/dL; $P < 0,01$ para interação $T \times S$; Figura 6).

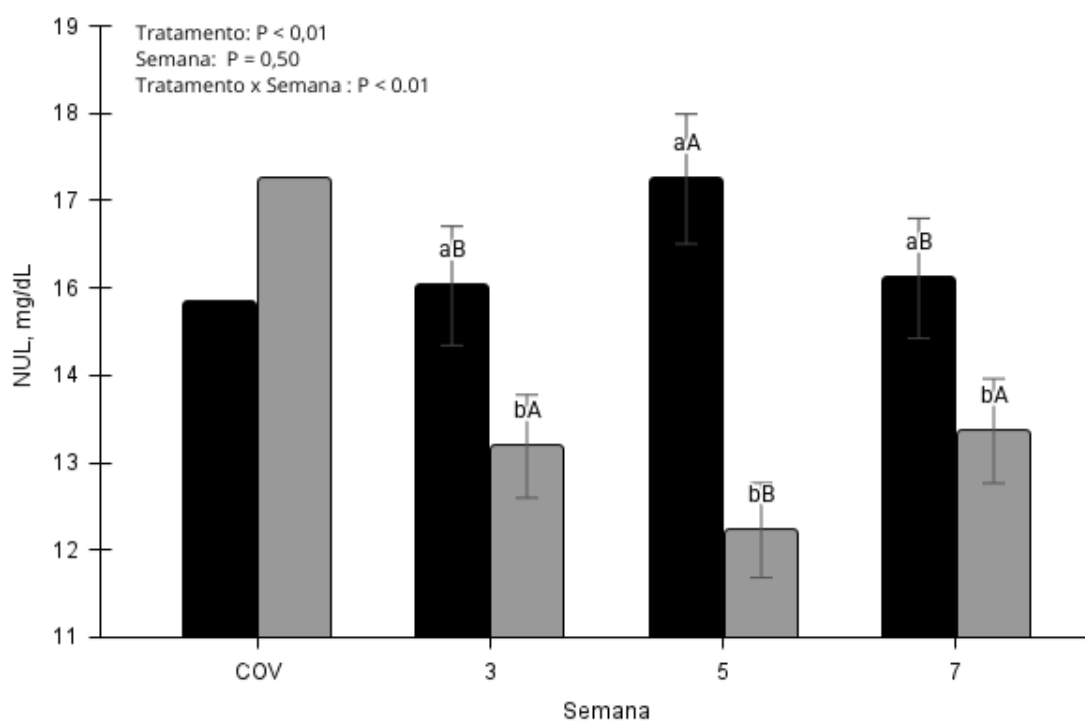


Figura 6- Nitrogênio ureico do leite (mg/dL) nos tratamentos farelo de soja (preto) ou farelo de canola (cinza).

^{a,b}Médias seguidas por letras minúsculas diferentes diferem dentro da semana. ^{A,B} Médias seguidas por letras maiúsculas diferentes diferem entre as semanas (tratamento $\times$ semana, $P \leq 0,10$). CV: Covariável. Barras de erro: erro padrão da média (EPM).

Tabela 4. Partição de nitrogênio e produção de proteína microbiana nos tratamentos com farelo de soja (FS) e farelo de canola (FC)¹

Item	Tratamentos		EPM	Valor de <i>P</i>		
	FS	FC		Tratamento	Semana	Tratamento × Semana
Consumo de N, g/d	405,9	447,2	20,34	0,29	0,03	0,43
N do leite, g/d	68,5	74,0	5,13	0,53	0,10	0,87
% do consumo de N	16,9	16,6	0,69	0,81	0,01	0,44
N na urina, g/d	287,3	254,9	45,93	0,67	0,81	0,97
% do consumo de N	7,1	57,2	7,90	0,37	0,47	1,00
Urea N, g/d	179,6	163,7	29,73	0,69	0,62	0,84
% do total de N na urina	67,4	71,0	3,86	0,51	0,99	0,83
N nas fezes, g/d	123,2	151,8	17,34	0,34	<0,01	0,70
% do consumo de N	29,7	33,6	2,82	0,41	<0,01	0,65
Excreção urinária						
Volume de urina, ² L/d	21,6	20,9	3,42	0,87	0,03	0,90
Alantoína, mmol/d	301,4	325,8	37,39	0,63	0,47	0,38
Ácido úrico, mmol/d	65,0	51,4	7,48	0,12	0,09	0,51
DP, ³ mmol/d	365,7	378,6	45,39	0,83	0,41	0,37
DP/creatinina × PC	1,952	1,986	225,2	0,92	0,01	0,52
DP/ creatinina × PC ^{0,75}	408	412	40,2	0,94	<0,01	0,52
DP/IMOD, ⁴ mmol/kg	41,5	44,3	3,76	0,64	0,48	0,70

¹A ingestão de N, o N da proteína do leite, o N urinário e fecal como proporção da ingestão, e a razão DP/IMOD foram analisados considerando o piquete como unidade experimental.

²Estimado a partir da concentração de creatinina em amostras pontuais de urina, assumindo uma excreção de 29 mg de creatinina/kg de peso corporal (Valadares et al., 1999).

³Alantoína mais ácido úrico.

⁴A razão DP/IMOD foi calculada como uma medida da eficiência do crescimento microbiano ruminal.

5. DISCUSSÃO

Em ambas as dietas, a silagem de milho foi a principal fonte de fibra, com valor de inclusão constante de 70,1%, conforme demonstrado na Tabela 2. A porcentagem de casquinha de soja foi maior na dieta de farelo de soja (FS) do que na de farelo de canola (FC), enquanto outros ingredientes, como ureia, calcário, minerais e vitaminas, mantiveram-se constantes entre as dietas. Observou-se que, na dieta de FS, a participação da FDN da casquinha de soja em relação à FDN total da fonte proteica foi superior, o que pode estar associado à maior digestibilidade da FDN presente nas dietas com FS (43,3%) em comparação às dietas com FC (41,2%), uma vez que a casquinha de soja possui FDN mais digestível que a do farelo de canola.

O consumo de matéria seca (CMS) não diferiu entre as vacas alimentadas com FS e FC, corroborando achados de Martineau et al. (2013), Paula et al. (2019), Broderick et al. (2015) e Huhtanen et al. (2011). Isso indica que a menor digestibilidade da FDN na dieta de FC não foi suficiente para limitar a ingestão voluntária de alimento pelas vacas. De forma similar, a produção de leite não apresentou diferenças entre os tratamentos, resultado consistente com Maxin et al. (2013), Weiss et al. (2015) e Paula et al. (2018). O conceito de “efeito pull” proposto por Huhtanen et al. (2011) sugere que o melhor perfil de aminoácidos essenciais do farelo de canola pode aumentar a demanda energética e, conseqüentemente, manter a produção de leite, mesmo com menor digestibilidade de fibra.

O nitrogênio ureico no leite (NUL) foi significativamente menor ($P < 0,01$) em vacas alimentadas com FC (13,1 mg/dL) em comparação às vacas alimentadas com FS (16,3 mg/dL), indicando maior eficiência na utilização do nitrogênio. Essa redução sugere que mais aminoácidos foram incorporados em proteínas corporais, refletindo-se no aumento do peso corporal observado nas vacas alimentadas com FC, enquanto as vacas alimentadas com FS mantiveram o peso corporal praticamente constante. O perfil de aminoácidos da canola favorece a incorporação de nitrogênio em proteínas musculares e tecidos corporais, além de não comprometer o microambiente folicular, como evidenciado pelo teor de nitrogênio no fluido

folicular que não diferiu entre os tratamentos. Dessa forma, a dieta com FC promoveu melhor aproveitamento do nitrogênio, permitindo direcioná-lo ao ganho de peso corporal e manutenção, sem prejuízo à produção de leite ou à função reprodutiva.

Apesar do consumo de nutrientes ter sido semelhante entre os tratamentos, a digestibilidade da FDN foi ligeiramente menor na dieta de FC, o que não limitou a energia disponível para manutenção e produção. A síntese de proteína microbiana ruminal, avaliada por derivados de purina, não apresentou diferenças significativas entre os tratamentos, indicando que a eficiência nitrogenada observada foi refletida principalmente na utilização de aminoácidos para ganho de peso corporal e manutenção proteica, sem alterar a excreção urinária ou fecal de nitrogênio.

É importante considerar que a eficiência de nitrogênio observada foi inferior ao esperado, possivelmente devido ao alto teor de proteína bruta e proteína degradável no rúmen das dietas, limitando a eficiência global do metabolismo de nitrogênio. Além disso, o estudo não avaliou marcadores hormonais ou metabólicos que poderiam fornecer informações adicionais sobre a função reprodutiva ou metabolismo proteico mais detalhado.

Por fim, do ponto de vista prático, a substituição do farelo de soja pelo farelo de canola nas dietas de vacas leiteiras mostrou-se viável, proporcionando redução do nitrogênio ureico no leite, aumento do peso corporal e manutenção da produção de leite, podendo ser considerada uma estratégia de alimentação eficiente, sustentável e economicamente interessante, especialmente em situações de variação de preços e disponibilidade do farelo de soja.

6. CONCLUSÕES

A substituição do farelo de soja pelo farelo de canola na dieta de vacas leiteiras não afetou o consumo de matéria seca, a produção de leite ou a eficiência alimentar. No entanto, a dieta com farelo de canola proporcionou redução do nitrogênio ureico no leite e melhor aproveitamento do nitrogênio dietético, refletindo-se no aumento do peso corporal das vacas, enquanto nas vacas alimentadas com farelo de soja o peso corporal permaneceu praticamente constante. O teor de nitrogênio no fluido folicular não foi alterado, indicando que a função reprodutiva não foi comprometida. A síntese de proteína microbiana, o consumo de nitrogênio, bem como a excreção urinária e fecal de nitrogênio, também não foi significativamente afetado pela substituição do farelo de soja pelo farelo de canola. Em resumo, o farelo de canola mostrou-se uma alternativa viável ao farelo de soja, promovendo melhor utilização do nitrogênio para manutenção e ganho de peso corporal, sem prejuízo à produção de leite ou à saúde reprodutiva das vacas, podendo ser considerado uma estratégia eficiente, sustentável e economicamente interessante na alimentação de vacas leiteiras.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRITO, A. F.; BRODERICK, G. A. **Effects of different protein supplements on milk production and nutrient utilization in lactating dairy cows.** Journal of Dairy Science, v. 90, n. 4, p. 1816-1827, 2007.

BRODERICK, Glen A.; FACIOLA, Antonio P.; ARMENTANO, Louis E. **Replacing dietary soybean meal with canola meal improves production and efficiency of lactating dairy cows.** Journal of Dairy Science, v. 98, n. 10, p. 5672-5687, 2015. American Dairy Science Association.

CANOLA COUNCIL OF CANADA. **Feed industry guide: 6th edition, 2019; canola meal dairy feed guide.** Winnipeg, Manitoba: [s.n.], 2019.

COLEMAN, D. N.; LOPREIATO, V.; ALHARTHI, A.; LOOR, J. J. **Amino acids and the regulation of oxidative stress and immune function in dairy cattle.** Journal of Animal Science, American Society of Animal Science, v. 98, supl. 1, p. S175-S193, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/jas/skaa138>. Acesso em: 15 abr. 2025.

HALL, M. B.; ARBAUGH, J.; BINKERD, K.; CARLSON, A.; DOAN, T.; GRANT, T.; HEUER, C.; INEROWICZ, H. D.; JEAN-LOUIS, B.; JOHNSON, R.; JORDAN, J.; KONDRATKO, D.; MACIEL, E.; MCCALLUM, K.; MEYER, D.; ODIJK, C. A.; PARGANLIJA-RAMIC, A.; POTTS, T.; RUIZ, L.; SNODGRASS, S.; TAYSOM, D.; TRUPIA, S.; STEINLICHT, B.; WELCH, D. **Determination of dietary starch in animal feeds and pet food by an enzymatic-colorimetric method: Collaborative study.** Journal of AOAC International, v. 98, p. 397-409, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.5740/jaoacint.15-012>. Acesso em: 9 abr. 2025.

HRISTOV, A. N.; ETTER, R. P.; ROPP, J. K.; GRANDEEN, K. L. **Effect of dietary crude protein level and degradability on ruminal fermentation and nitrogen utilization in lactating dairy cows.** Journal of Animal Science, v. 82, n. 11, p. 3219-3229, nov. 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.2527/2004.82113219x>. Acesso em: 9 abr. 2025.

HUHTANEN, P.; HETTA, M.; SWENSSON, C. **Evaluation of canola meal as a protein supplement for dairy cows: A review and a meta-analysis.** Canadian Journal of Animal Science, v. 91, n. 4, p. 529-543, 2011.

MARTINEAU, R.; OUELLET, D. R.; LAPIERRE, H. **Feeding canola meal to dairy cows: A meta-analysis on lactational responses.** Journal of Dairy Science, American Dairy Science Association, v. 96, n. 3, p. 1701-1714, 2013.

MARTINEAU, R.; OUELLET, D. R.; LAPIERRE, H. **The effect of feeding canola meal on concentrations of plasma amino acids.** Journal of Dairy Science, American Dairy Science Association, v. 97, n. 3, p. 1603-1610, 2014.

MARTINS, Vinícius Antônio. **O potencial do uso de farelo de canola em substituição ao farelo de soja na dieta de vacas leiteiras.** 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Zootecnia) – Universidade Federal de São João del-Rei, São João del-Rei, 2023.

MAXIN, G.; OUELLET, D. R.; LAPIERRE, H. **Effect of substitution of soybean meal by canola meal or distillers grains in dairy rations on amino acid and glucose availability.** Journal of Dairy Science, American Dairy Science Association, v. 96, n. 8, p. 7806-7817, 2013.

NATIONAL ACADEMIES OF SCIENCES, ENGINEERING AND MEDICINE. **Nutrient requirements of dairy cattle.** 8. ed. rev. Washington, DC: The National Academies Press, 2021.

NEINAST, M.; MURASHIGE, D.; ARANY, Z. **Branched chain amino acids.** Annual Review of Physiology, v. 81, p. 139–164, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1146/annurev-physiol-020518-114455>. Acesso em: 15 abr. 2025.

NOCEK, J. E. **In situ and other methods to estimate ruminal protein and energy digestibility: a review.** Journal of Dairy Science, v. 71, p. 2051–2069, 1988. Disponível em: [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(88\)79781-7](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(88)79781-7). Acesso em: 15 abr. 2025.

PAULA, Eduardo Marostegan; SILVA, Lorryny Galoro da; BRANDAO, Virginia Lucia Neves; DAI, Xiaoxia; FACIOLA, Antonio Pinheiro. **Feeding canola, camelina, and carinata meal to ruminants.** Animals, v. 9, p. 704, 20 set. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ani9100704>. Acesso em: 24 fev. 2025.

PAULA, E. M.; BRODERICK, G. A.; DANES, M. A. C.; LOBOS, N. E.; ZANTON, G. I.; FACIOLA, A. P. **Effects of replacing soybean meal with canola meal or treated canola meal on ruminal digestion, omasal nutrient flow, and performance in lactating dairy cows.** *Journal of Dairy Science*, v. 101, n. 4, p. 328-339, 2018.

PAULA, E.M.; MONTEIRO, H.F.; SILVA, L.G.; BENEDETI, P.D.B.; DANIEL, J.L.P.; SHENKORU, T.; BRODERICK, G.A.; FACIOLA, A.P. **Effects of replacing soybean meal with canola meal differing in rumen-undegradable protein content on ruminal fermentation and gas production kinetics using 2 in vitro systems.** *Journal of Dairy Science*, v. 100, n. 7, p. 5281-5292, 2017. American Dairy Science Association.

SÁNCHEZ-DUARTE, J. I.; KALSCHUR, K. D.; CASPER, D. P.; GARCIA, A. D. **Performance of dairy cows fed diets formulated at 2 starch concentrations with either canola meal or soybean meal as the protein supplement.** *Journal of Dairy Science*, v. 102, n. 9, p. 7970-7979, 2019.

VALENTE, T. N. P.; DETMANN, E.; QUEIROZ, A. C. de; VALADARES FILHO, S. C.; GOMES, D. I.; FIGUEIRAS, J. F. **Evaluation of ruminal degradation profiles of forages using bags made from different textiles.** *Revista Brasileira de Zootecnia*, v. 40, p. 2565–2573, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1516-35982011001100039>. Acesso em: 9 abr. 2025.

VAN SOEST, P. J.; ROBERTSON, J. B.; LEWIS, B. A. **Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition.** *Journal of Dairy Science*, v. 74, p. 3583–3597, 1991. Disponível em: [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(91\)78551-2](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(91)78551-2). Acesso em: 9 abr. 2025.

WEISS, W. P.; WYATT, D. J.; KLEINSCHMIT, D. H.; SOCHA, M. T. **Effect of including canola meal and supplemental iodine in diets of dairy cows on short-term changes in iodine concentrations in milk.** *Journal of Dairy Science*, v. 98, p. 4841–4849, 2015. Disponível em <https://doi.org/10.3168/jds.2014-9209>. Acesso em 15 abr. 2025.

ZEOULA, Lúcia Maria; SANTOS, Geraldo Tadeu dos; FREGADOLLI, Fábio Luiz; WATANABE, Marcio Munemori; MICHELAN, Andrea Cristiane; FRIDRICH, Daniele;

MORAIS, Reinaldo Gomes de. **Efeito das fontes de amido e nitrogênio de alta e baixa degradabilidade ruminal sobre a produção de leite.** Acta Scientiarum, v. 20, n. 2, p. 339-346, 1998. Departamento de Zootecnia, Universidade Estadual de Maringá, Maringá.