

**BACHARELADO EM ZOOTECNIA**

**ANALISE EXPLORATORIA DE METODO ALTERNATIVO PARA  
MENSURACÃO DE EMISSÃO DE METANO ENTERICO EM TEMPO  
REAL EM BOVINOS**

**ISADORA CAROLINA BORGES SIQUEIRA**

**Rio Verde, GO  
2026**

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO – CÂMPUS RIO  
VERDE**

**BACHARELADO EM ZOOTECNIA**

**ANALISE EXPLORATORIA DE METODO ALTERNATIVO PARA MENSURACÃO  
DE EMISSAO DE METANO ENTERICO EM TEMPO REAL EM BOVINOS**

**ISADORA CAROLINA BORGES SIQUEIRA**

Trabalho de Curso apresentado ao Instituto  
Federal Goiano – Câmpus Rio Verde, como  
requisito parcial para a obtenção do Grau de  
Bacharel em Zootecnia.

Orientador: Prof(a). Dr. Tiago do Prado Paim  
Co-orientador(a): Dr. Josiel B Ferreira

Rio Verde – GO

Março, 2026

**Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do  
Programa de Geração Automática do Sistema Integrado de Bibliotecas do IF Goiano - SIBi**

S618 Carolina Borges Siqueira, Isadora Carolina Borges Siqueira  
Análise exploratória de método alternativo para mensuração de  
emissão de metano entérico em tempo real em bovinos. /  
Isadora Carolina Borges Siqueira Carolina Borges Siqueira. Rio  
Verde 2026.  
  
30f. il.  
  
Orientador: Prof. Dr. Tiago do Prado Paim.  
Coorientador: Prof. Dr. Josiel Borges Ferreira.  
Tcc (Bacharel) - Instituto Federal Goiano, curso de 0220184 -  
Bacharelado em Zootecnia - Integral - Rio Verde (Campus Rio  
Verde).  
1. CH<sub>4</sub>. 2. CO<sub>2</sub>. 3. gases de efeito estufa. 4. melhoramento  
genético animal. I. Título.

# TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano a disponibilizar gratuitamente o documento em formato digital no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

## IDENTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

- ☐ Tese (doutorado)  
☐ Dissertação (mestrado)  
☐ Monografia (especialização)  
☒ TCC (graduação)

- ☐ Artigo científico  
☐ Capítulo de livro  
☐ Livro  
☐ Trabalho apresentado em evento

☐ Produto técnico e educacional - Tipo:

Nome completo do autor:

Isadora Carolina Borges Siqueira

Matrícula:

2020102201840429

Título do trabalho:

Análise exploratória de método alternativo para mensuração de emissão de metano entérico em tempo real em bovinos

## RESTRIÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial: ☒ Não ☐ Sim, justifique:

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano:  /  /

O documento está sujeito a registro de patente? ☐ Sim ☒ Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? ☐ Sim ☒ Não

## DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O(a) referido(a) autor(a) declara:

- Que o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- Que obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autoria, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- Que cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Documento assinado digitalmente  
  
ISADORA CAROLINA BORGES SIQUEIRA  
Data: 06/03/2026 10:43:29-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Rio Verde

Local

05 / 03 / 2026

Data

Assinatura de outor(es) detentor(es) dos direitos autorais

  
TIAGO DO PRADO PAIM  
Data: 06/03/2026 13:01:39-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Ciente e de acordo:

Assinatura do(a) orientador(a)



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA  
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Ata nº 2/2026 - GLEP-RV/DPGPI-RV/CMPRV/IFGOIANO

**ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CURSO**

Ao(s) cinco dia(s) do mês de março de dois mil e vinte e seis, às nove horas, reuniu-se a banca examinadora composta pelos docentes: Dr. Tiago do Prado Paim (orientador), Dr. Karen Martins Leão (Membro) e Dr. Tiago Pereira Guimarães (Membro) para examinar o Trabalho de Curso intitulado **Análise exploratória de método alternativo para mensuração de emissão de metano entérico em tempo real em bovinos** da estudante Isadora Carolina Borges Siqueira, Matrícula n. 2020102201840429 do Curso de Bacharelado em Zootecnia do IF Goiano - Campus Rio Verde. A palavra foi concedida ao estudante para a apresentação oral do TC, houve arguição do candidato pelos membros da banca examinadora. Após tal etapa, a banca examinadora decidiu pela **APROVAÇÃO** do estudante. Ao final da sessão pública de defesa foi lavrada a presente ata, que, após apresentação da versão corrigida do TC, foi assinada pelos membros da Banca Examinadora e Mediador de TC.

*(Assinado Eletronicamente)*

**Dr. Tiago do Prado Paim**  
**Orientador**

*(Assinado Eletronicamente)*

**Dr. Karen Martins Leão**  
**Membro**

*(Assinado Eletronicamente)*

**Dr. Tiago Pereira Guimarães**  
**Membro**

**Observação:**

( ) O(a) estudante não compareceu à defesa do TC.

Documento assinado eletronicamente por:

- **Tiago do Prado Paim**, **MEDICO VETERINARIO**, em 05/03/2026 14:13:13.
- **Tiago Pereira Guimaraes**, **PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 05/03/2026 16:38:25.
- **Karen Martins Leao**, **PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 05/03/2026 16:52:55.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 05/03/2026. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

**Código Verificador:** 796511

**Código de Autenticação:** 45202a2999



INSTITUTO FEDERAL GOIANO

Campus Rio Verde

Rodovia Sul Goiana, Km 01, Zona Rural, 01, Zona Rural, RIO VERDE / GO, CEP 75901-970

(64) 3624-1000

## RESUMO

A emissão de metano ( $\text{CH}_4$ ) pela fermentação entérica de bovinos representa uma das principais fontes de gases de efeito estufa provenientes da pecuária, especialmente em países tropicais como o Brasil. Nesse contexto, o desenvolvimento de metodologias práticas, acessíveis e precisas para mensurar o  $\text{CH}_4$  torna-se essencial para aprimorar estimativas nacionais, validar estratégias de mitigação e promover sistemas produtivos mais sustentáveis. Este estudo teve como objetivo avaliar a eficiência de um método alternativo para mensuração em tempo real de metano entérico em novilhos da raça Nelore, utilizando um analisador portátil de gases acoplado a cochos automatizados. O experimento foi conduzido na Fazenda Experimental do Instituto de Zootecnia, em Sertãozinho – SP, entre agosto e outubro de 2025, utilizando 55 bovinos machos, alimentados com dieta contendo relação volumoso:concentrado de 60:40. As concentrações de  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$  no cocho foram registradas a cada segundo pelo equipamento (LI-COR LI-7810, LI-COR Biosciences, EUA) instalado no cocho mais visitado, permitindo ampla coleta de dados sem interferência no comportamento alimentar dos animais. A concentração média registrada foi de  $762,05 \pm 219,52$  ppm para  $\text{CO}_2$  e  $12,4 \pm 4,94$  ppm para  $\text{CH}_4$ . Foi possível observar o comportamento de picos de concentração de metano durante a visita do animal condizente com a fisiologia de eructação esperada e observada em outros métodos de mensuração. A repetibilidade das medidas foi baixa (inferior a 0,06), evidenciando que a maior parte da variação observada ocorreu devido a outros fatores ambientais. A análise de componentes principais mostrou a primeira dimensão relacionada à intensidade das concentrações de gases e a segunda associada ao comportamento alimentar durante as visitas ao cocho. Conclui-se que o método avaliado é capaz de gerar grande volume de dados em tempo real, de forma contínua e sem interferir no comportamento dos animais, demonstrando viabilidade prática para uso em confinamento. Entretanto, a alta variabilidade e a baixa repetibilidade indicam que são necessárias múltiplas medições por animal para obter estimativas mais consistentes das emissões, especialmente quando o objetivo é comparação individual ou aplicação em programas de melhoramento genético.

**Palavras-chave:**  $\text{CH}_4$ ;  $\text{CO}_2$ ; gases de efeito estufa; melhoramento genético animal.

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabela 1</b> Proporções dos ingredientes e composição bromatológica da dieta ofertada durante os testes de eficiência alimentar.....                       | 11 |
| <b>Tabela 2</b> Estatística descritiva das variáveis mensuradas na metodologia de mensuração de gás carbônico e metano via LI-7810 em cochos automáticos..... | 16 |
| <b>Tabela 3</b> Estimativas de repetibilidade para as variáveis de emissão de CO <sub>2</sub> e CH <sub>4</sub> .....                                         | 20 |
| <b>Tabela 4</b> Seleção dos dez maiores e dez menores valores das variáveis de emissão de gases, organizados por animal avaliado .....                        | 21 |

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1</b> Representação esquemática do processo de fermentação ruminal em bovinos, destacando a digestão microbiana no rúmen e a produção de gases entéricos, com ênfase na emissão de metano (CH <sub>4</sub> ) durante a alimentação no cocho.....                                                                                                                                                                                      | 9  |
| <b>Figura 2</b> Sistema de mensuração de gases acoplado ao cocho GrowSafe. <b>(A)</b> Instalação do equipamento em baia experimental, com animal acessando o cocho contendo o sistema de monitoramento das emissões. <b>(B)</b> Detalhe do cocho instrumentado e do analisador de gases acondicionado em caixa térmica, conectado ao sistema de captação para registro das concentrações de CO <sub>2</sub> durante as visitas dos animais..... | 13 |
| <b>Figura 3</b> Exemplo das medições realizadas durante a visita (2041) de um animal (identificação 6802).....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 16 |
| <b>Figura 4</b> Matriz de correlação entre as variáveis considerando a análise de cada visita do animal ao cocho automático.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 18 |
| <b>Figura 5</b> Representação gráfica da contribuição das variáveis nas duas primeiras dimensões <b>(A)</b> e da terceira e quarta dimensão <b>(B)</b> da análise de componentes principais considerado as mensurações obtidas em cada visita dos animais ao cocho automático. Os valores entre parênteses no título dos eixos representam a proporção da variância explicada por cada componente principal.....                                | 19 |
| <b>Figura 6</b> Representação gráfica do tipo biplot apresentando a dispersão dos indivíduos e a contribuição das variáveis nas duas primeiras dimensões da análise de componentes principais considerado os valores do efeito animal para as variáveis obtidos via modelo misto. Os valores entre parênteses no título dos eixos representam a proporção da variância explicada por cada componente principal .....                            | 22 |

## **. SUMARIO**

|                                                                 |           |
|-----------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO.....</b>                                       | <b>09</b> |
| <b>2. REVISÃO DE LITERATURA.....</b>                            | <b>10</b> |
| 2.1 Emissão de metano via processo de digestão nos bovinos..... | 10        |
| 2.2 Métodos de mensuração de metano entérico em ruminantes..... | 11        |
| <b>3. MATERIAL E MÉTODOS.....</b>                               | <b>12</b> |
| 3.1 Local do experimento e período.....                         | 12        |
| 3.2 Animais e dieta experimental.....                           | 12        |
| 3.3 Mensuração da emissão entérica de metano.....               | 13        |
| 3.4 Formação do banco de dados e análises estatísticas.....     | 14        |
| <b>4. RESULTADOS.....</b>                                       | <b>16</b> |
| <b>5. DISCUSSÃO.....</b>                                        | <b>22</b> |
| <b>6. CONCLUSÃO.....</b>                                        | <b>25</b> |
| <b>7. REFERÊNCIAS.....</b>                                      | <b>27</b> |

## 1. INTRODUÇÃO

A pecuária de corte desempenha papel fundamental na economia e segurança alimentar do Brasil, detentor de um dos maiores rebanhos bovinos do mundo e líder global na produção de carne. Entretanto, o setor é reconhecido como importante fonte de emissões de gases de efeito estufa (GEE), destacando-se o metano ( $\text{CH}_4$ ), originado principalmente da fermentação entérica dos ruminantes. O  $\text{CH}_4$  apresenta elevado potencial de aquecimento global, sendo aproximadamente 28 vezes mais potente que o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), reforçando sua relevância nas discussões relacionadas às mudanças climáticas e sustentabilidade ambiental (ZHAO et al., 2020). Esse gás possui elevado potencial de aquecimento global. O metano está diretamente relacionado à eficiência digestiva e ao manejo alimentar dos animais, tornando-se um indicador importante para o desenvolvimento de sistemas produtivos mais sustentáveis (ROSENSTOCK et al., 2016).

O Brasil possui características peculiares de produção, com predomínio de sistemas a pasto e expressiva participação de bovinos zebuínos, como a raça Nelore. Embora o país desempenhe papel estratégico na pecuária mundial, ainda existem lacunas na quantificação precisa das emissões entéricas em condições tropicais, especialmente em sistemas a pasto. Conforme destacado por Rosenstock et al. (2016), a geração de dados robustos em países tropicais é limitada pela complexidade dos sistemas produtivos, por condições ambientais heterogêneas e pela necessidade de metodologias acessíveis e adaptadas à realidade local.

Diversas ferramentas estão disponíveis para mensuração de  $\text{CH}_4$  entérico, variando quanto à precisão, custo, aplicabilidade e necessidade de infraestrutura. Métodos considerados de referência, como as câmaras de respiração utilizadas nos estudos de Barbosa et al. (2024) e Crisóstomo et al. (2025), apresentam alta precisão, porém possuem elevado custo operacional e requerem ambiente controlado, o que dificulta sua aplicação em sistemas comerciais (ZHAO et al., 2020). Já a técnica do traçador hexafluoreto de enxofre ( $\text{SF}_6$ ) utilizada nos trabalhos de Sakamoto et al. (2021) e Gianvecchio et al. (2024) apresenta menor precisão, mas é a única alternativa amplamente utilizada para avaliação dos animais em pastejo. Em contrapartida, métodos alternativos, portáteis e de alta praticidade vem sendo desenvolvidos e adotados com o intuito de permitir mensurações em tempo real e em condições de campo, mantendo confiabilidade científica.

Assim, a avaliação e validação de tecnologias emergentes para mensuração de  $\text{CH}_4$  em bovinos tornam-se essenciais para o avanço do conhecimento sobre emissões de metano entérico em diferentes situações. O desenvolvimento e aprimoramento de técnicas alternativas, de baixo custo e aplicáveis a campo, contribuem para a redução das incertezas nas estimativas nacionais de emissões, e promovem sistemas produtivos mais eficientes e sustentáveis (TEDESCHI et al., 2022).

Nesse contexto, torna-se fundamental investigar métodos alternativos de mensuração de  $\text{CH}_4$  entérico em tempo real, possibilitando maior precisão, aplicabilidade prática e adequação às condições da pecuária

brasileira. Dessa forma, este estudo objetiva avaliar a eficiência de um método alternativo para quantificar as emissões de CH<sub>4</sub> em novilhos Nelore, contribuindo para o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis e para o aprimoramento da base científica relacionada às emissões entéricas na bovinocultura de corte.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Emissão de metano via processo de digestão nos bovinos

A emissão de metano entérico (CH<sub>4</sub>) pelos bovinos ocorre principalmente durante o processo de digestão, mais especificamente na fermentação entérica, que acontece no rúmen (Figura 1). Nesse ambiente, microrganismos anaeróbios, chamados arqueias metanogênicas, degradam parte dos alimentos fibrosos (como celulose e hemicelulose) consumidos pelos bovinos. Durante esse processo, são produzidos gases como dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e hidrogênio (H<sub>2</sub>). Esses gases servem como substrato para as arqueias formarem o CH<sub>4</sub>. O gás é então eliminado principalmente por eructação (arroto), mas também por flatulências, em menor escala. Esse processo representa uma perda de energia para o animal e uma fonte significativa de emissão de gases de efeito estufa para o meio ambiente (FERREIRA et al., 2024).

Os ruminantes domésticos, especialmente os bovinos, podem produzir de 250 a 500 litros de CH<sub>4</sub> por dia (JONHSON et al., 2022). A quantidade de CH<sub>4</sub> emitida pode variar de acordo com diversos fatores, incluindo composição e qualidade da dieta (KNAAP et al., 2014), proporção entre volumoso e concentrado (SANTANDER et al. 2023), características genéticas e fisiológicas do animal (SAKAMOTO et al. 2021), além da diversidade da microbiota ruminal (ANDRADE et al. 2022).



**Figura 1** Representação esquemática do processo de fermentação ruminal em bovinos, destacando a digestão microbiana no rúmen e a produção de gases entéricos, com ênfase na emissão de metano (CH<sub>4</sub>) durante a alimentação no cocho. Fonte arquivo pessoal.

## 2.2 Métodos de mensuração de metano entérico em ruminantes

A mensuração das emissões de CH<sub>4</sub> é fundamental para compreender e controlar os impactos ambientais da pecuária, especialmente em sistemas de produção com ruminantes. De acordo com Rosenstock et al. (2016) ao medir as emissões reais, é possível avaliar o efeito de práticas como alterações na dieta, manejo alimentar e melhoramento genético, visando reduzir a produção de metano entérico. Assim, a medição do CH<sub>4</sub> não apenas contribui para a mitigação das mudanças climáticas, mas também para a eficiência produtiva.

Para isso são usadas técnicas de quantificação das emissões entéricas de CH<sub>4</sub> que incluem a câmara de respiração em circuito aberto (RC) para animais individuais em ambiente interno e a técnica do traçador de hexafluoreto de enxofre (SF<sub>6</sub>) para animais individuais e rebanhos, tanto em ambientes internos quanto externos. Outras técnicas de medição, como GreenFeed (GF), método Sniffer, capuz ventilado, máscara facial, detector de CH<sub>4</sub> a laser (LMD) e câmara de acumulação portátil (PAC) também existem e já foram utilizadas (ZHAO et al., 2020).

De acordo com Goopy et al. (2016), a principal finalidade dessas medições é melhorar a precisão das estimativas de CH<sub>4</sub> entérico e, conseqüentemente, aperfeiçoar os inventários nacionais de emissões agropecuárias, especialmente nos países em desenvolvimento, onde há escassez de dados locais. Além disso, os autores ressaltam que a coleta de dados precisos permite compreender os fatores que influenciam a produção de CH<sub>4</sub>, como tipo de dieta, manejo e ambiente de criação, bem como avaliar e validar estratégias de redução das emissões, por meio de mudanças nutricionais, genéticas ou de manejo.

A produção de CH<sub>4</sub> varia conforme a espécie, a raça, a idade, o peso vivo e o nível de produtividade dos animais. Por isso, é indispensável que os rebanhos utilizados nos experimentos sejam agrupados segundo características fisiológicas e produtivas homogêneas, permitindo comparações adequadas entre sistemas e condições de manejo. Essa padronização é essencial para o desenvolvimento de modelos de predição confiáveis e para a calibração de fatores de emissão específicos, que refletem com maior exatidão a realidade dos sistemas de produção pecuária, especialmente nos países tropicais (CHARMLEY et al, 2016).

O apoio aos programas de melhoramento genético voltados à redução das emissões de metano em bovinos tem se mostrado uma estratégia promissora no contexto da sustentabilidade da produção animal. A emissão de CH<sub>4</sub>, um potente gás de efeito estufa, apresenta herdabilidade moderada (SOUZA et al., 2024), o que possibilita sua inclusão em programas de seleção genética sem comprometer o desempenho produtivo dos animais.

A identificação de traços fenotípicos relacionados à produção de metano, como a taxa de emissão por dia ou por unidade de produto, combinada ao uso de tecnologias de medição direta ou preditiva, permite

selecionar animais mais eficientes (KAMALANATHAN et al, 2023). Além disso, a integração de informações genômicas acelera os ganhos genéticos, possibilitando a identificação de marcadores associados à baixa emissão de metano (CARDOSO et al., 2025). Dessa forma, a seleção genética, aliada a estratégias nutricionais e de manejo, constitui uma ferramenta eficaz para reduzir o impacto ambiental da bovinocultura, promovendo uma produção mais sustentável e eficiente.

Portanto, esse trabalho teve como objetivo fazer uma análise exploratória de método alternativo para mensuração de emissão de metano entérico em tempo real em bovinos.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Local do experimento e período

O experimento foi conduzido na Fazenda Experimental do Instituto de Zootecnia (IZ), localizada no município de Sertãozinho, estado de São Paulo. O período experimental ocorreu entre os meses de agosto e outubro de 2025. Durante esse intervalo, foram realizadas coletas de dados referentes à emissão entérica de CH<sub>4</sub> e ao desempenho produtivo dos animais avaliados, dentro de um teste de eficiência alimentar.

O curral de alimentação era composto por quatro cochos automáticos do sistema GrowSafe, que permitiam o registro individualizado do consumo de alimento dos animais. Dentre os quatro cochos disponíveis, apenas um foi selecionado para a instalação do equipamento de medição de gases (LI-7810), com base na maior frequência de visitas pelos animais, determinado a partir dos registros automáticos do sistema.

#### 3.2 Animais e dieta experimental

Foram utilizados 29 (vinte e nove) novilhos machos em agosto e outros 26 (vinte e seis) em outubro, todos da raça Nelore, com 9 meses de idade e peso corporal inicial médio de aproximadamente 259 kg, mantidos em sistema de confinamento. Os animais receberam dieta formulada para atender às exigências nutricionais de bovinos em crescimento, composta por uma relação volumoso:concentrado de 60:40. O volumoso utilizado foi silagem de milho, enquanto o concentrado continha farelo de soja, milho moído, sal e ureia (Tabela 1).

**Tabela 1** Proporções dos ingredientes e composição bromatológica da dieta ofertada durante os testes de eficiência alimentar.

| Ingredientes         | Valor |
|----------------------|-------|
| Silagem de milho (%) | 60    |
| Farelo de soja (%)   | 13    |

|                       |       |
|-----------------------|-------|
| Milho moído (%)       | 25    |
| Sal mineral (%)       | 1.75  |
| Ureia (%)             | 0.25  |
| Análise bromatológica |       |
| Matéria seca (%)      | 88.12 |
| Proteína Bruta (%)    | 12.86 |
| FDN (%)               | 29.49 |
| FDA (%)               | 15.65 |
| Energia Bruta (MJ/kg) | 4.43  |
| Cinzas (%)            | 4.67  |

### 3.3 Mensuração da emissão entérica de metano

A emissão de CH<sub>4</sub> foi mensurada por meio de um equipamento de medição em tempo real (LI-COR LI-7810, LI-COR Biosciences, EUA), desenvolvido para monitorar continuamente a concentração de gás carbônico e metano. O aparelho foi acoplado ao chocho de alimentação GrowSafe mais visitado, permitindo a coleta das emissões durante o consumo voluntário de alimento, sem interferir no comportamento natural dos animais. A Figura 2 representa a junção dos dois equipamentos sendo visitado pelo animal.

**A**



**B**



**Figura 2** Sistema de mensuração de gases acoplado ao cocho GrowSafe. **(A)** Instalação do equipamento em baía experimental, com animal acessando o cocho contendo o sistema de monitoramento das emissões. **(B)** Detalhe do cocho instrumentado e do analisador de gases acondicionado em caixa térmica, conectado ao sistema de captação para registro das concentrações de CO<sub>2</sub> durante as visitas dos animais. Fonte arquivo pessoal.

O equipamento de medição permaneceu ligado continuamente durante duas semanas na fase final do teste de eficiência alimentar, possibilitando o registro das concentrações de CH<sub>4</sub> em diferentes momentos do dia e da noite. As medições eram realizadas em tempo real, com os resultados exibidos instantaneamente na interface do equipamento e sincronizados com um aplicativo de celular, permitindo o acompanhamento em tempo real dos dados de emissão.

### 3.4 Formação do banco de dados e análises estatísticas

A interface RStudio 2025.05.1 com o software R v.4.5.1 (R Core Team, 2025) foram utilizados para todo o processo de organização dos dados e análise estatística, utilizando os pacotes adequados para cada caso conforme descrito a seguir. O conjunto de dados utilizado neste experimento foi composto por dois períodos de coleta, correspondentes aos meses de agosto e outubro. Para cada período, os dados foram processados separadamente e, posteriormente, integrados em um único banco para análise. Foram utilizados dois tipos de arquivos: (a) arquivos gerados pelo equipamento LI-7810 de gases, contendo medições de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e metano (CH<sub>4</sub>) registradas a cada segundo; e (b) arquivos provenientes dos cochos automatizados Growsafe, contendo informações referentes às visitas dos animais, consumo de alimento e tempo de permanência.

Todos os arquivos provenientes do LI-7810 foram agrupados em um único banco de dados utilizando ferramentas do pacote dplyr (Wickam et al., 2023). Esses arquivos continham as concentrações de CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> e uma coluna de diagnóstico (AG), utilizada para identificação de erro, falha ou problema de leitura na medição. A coluna AG foi considerada critério de validação das medições, sendo que registros com a variável AG diferente de zero foram removidos por indicarem erro no equipamento, mantendo-se apenas os registros com AG igual a zero. Em seguida, os valores de CH<sub>4</sub>, originalmente expressos em ppb, foram convertidos para ppm, a fim de padronizar as unidades com as medições de CO<sub>2</sub>.

Paralelamente, os arquivos do Growsafe® foram organizados contendo identificação eletrônica dos animais, data e hora das visitas, consumo de alimento na visita (em gramas) e tempos de cabeça baixa (s) e cabeça alta (s). Os dados provenientes dos cochos foram inicialmente filtrados pelo campo status, mantendo-se apenas registros classificados como “ok”. Posteriormente, foi aplicado um segundo filtro, removendo-se visitas com duração inferior a 60 segundos.

As medições do LI-7810 foram registradas em formato de tempo absoluto (“seconds”), convertendo

tudo para Unix time, ficando possível alinhar exatamente o segundo da visita corresponde ao segundo da medição de gases. Os dados dos cochos foram convertidos para o mesmo padrão, considerando o fuso horário de Sertãozinho, SP.

Para cada visita válida ao cocho, foram criadas as variáveis: (a) start, representando o segundo inicial da visita; (b) end, representando o segundo final; e (c) ID da visita, identificador numérico único para cada visita. Dessa forma, foi possível associar as medições de CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> realizadas a cada segundo às respectivas visitas e animais. Para a análise das concentrações de gases ao longo das visitas ao cocho, apenas visitas com no mínimo 50 pontos de mensuração de concentração de gases foram mantidos. A partir da aplicação desse critério, foram identificadas 1634 visitas. Também foi adotado o critério de padronização da duração das visitas, considerando-se apenas os primeiros 600 segundos nos casos em que o tempo total de permanência excedeu esse valor. Essa abordagem permitiu uniformizar o número máximo de observações por visita, reduzindo a influência de visitas excessivamente longas sobre os resultados.

Cada linha do banco final passou a representar uma medição por segundo, contendo o identificador do animal, da visita e os valores de CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>. Para cada visita foram calculadas as seguintes estatísticas:

- Variáveis comportamentais:
  - duração total da visita (s),
  - tempo de cabeça baixa (Head Down),
  - tempo de cabeça alta (Head Up),
  - consumo (kg)
- Variáveis de gases (CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>):
  - média,
  - desvio padrão,
  - valor máximo,
  - valor mínimo,
  - média dos cinco maiores valores (TOP 5),
  - média dos cinco menores valores (BOTTOM 5);
  - diferença entre TOP 5 e BOTTOM 5 (DIF).
  - Razões entre CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>: razão simples (média CH<sub>4</sub>/média CO<sub>2</sub>), razão TOP e razão DIF.

A análise de correção entre as variáveis foi realizada utilizando a função rcorr do pacote Hmisc (Harrell, 2026). Em seguida, foi realizada Análise de Componentes Principais (PCA), utilizando os pacotes FactoMineR (Sebastien et al., 2008) e factoextra (Kassambara A, Mundt F (2020). Para remover as informações redundantes antes da PCA foram removidas uma variável de cada par com correlação maior que

0,95. As variáveis foram padronizadas para média zero e variância unitária, a fim de eliminar o efeito de diferentes escalas de mensuração. A interpretação dos resultados baseou-se nos componentes com maiores autovalores e maior proporção de variância explicada.

Para a estimação dos efeitos individuais dos animais, foi ajustado um modelo linear misto (função lmer do pacote lme4), considerando os efeitos aleatórios de animal e data, com o objetivo de separar a variação devida aos indivíduos daquela associada aos efeitos sistemáticos incluídos no modelo. A variância devido ao animal e ao dia foram obtidas, e consequentemente a repetibilidade foi calculada como a razão entre a variância do animal e a variância total (variância residual + variância da data + variância do animal).

A partir do modelo linear misto (BLUP), foi possível extrair o efeito do indivíduo sobre as variáveis, o que poderíamos considerar como o fenótipo do animal. Com base nesses efeitos estimados para cada indivíduo, foi realizada uma nova Análise de Componentes Principais (PCA), com o objetivo de avaliar a estrutura de variabilidade entre os animais e identificar possíveis padrões de agrupamento relacionados ao perfil de emissão de gases e comportamento alimentar.

## 4 RESULTADOS

No período compreendido entre 14 e 25 de agosto, foram registradas inicialmente 3510 visitas ao cocho pelos animais. Após a aplicação do filtro de qualidade dos dados, no qual foram consideradas apenas as visitas classificadas com *status* “ok”, esse número foi reduzido para 3225 visitas. Em uma segunda etapa de filtragem, foram desconsideradas as visitas com duração inferior a 60 segundos. Com a aplicação desse critério, o número final de observações válidas no período de agosto foi reduzido para 880 visitas. Observou-se que de 29 animais, 2 não realizaram nenhuma visita durante o período avaliado.

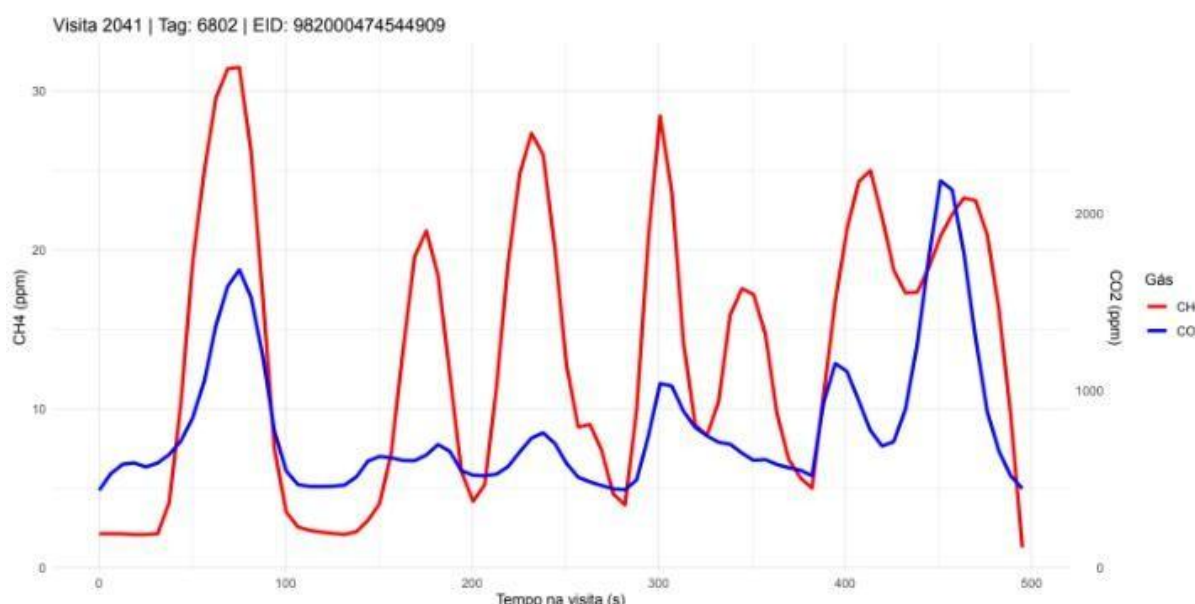
De forma semelhante, no período de 13 a 28 de outubro, foram registradas inicialmente 4.908 visitas ao cocho. Após a exclusão dos registros com erro, mantendo-se apenas aqueles com *status* “ok”, permaneceram 4.609 visitas. Posteriormente, ao aplicar o critério de duração mínima das visitas, o número de observações válidas foi reduzido para 1.173 no período de outubro. Observou-se que de 26 animais, todos realizaram a visita durante o período avaliado.

Em média, foram registradas  $3,3 \pm 2,26$  visitas por animal por dia (Tabela 2). O consumo alimentar foi de  $483,12 \pm 345,80$  g de dieta por visita. O tempo médio de permanência com a cabeça baixa durante as visitas válidas foi de  $82,09 \pm 82,59$  segundos. Além disso, a duração média das visitas foi de  $211,33 \pm 176,65$  segundos, demonstrando que, embora algumas visitas tenham sido prolongadas, outras ocorreram de forma mais rápida.

Esses resultados evidenciam heterogeneidade no padrão de alimentação dos animais, possivelmente associada a fatores individuais, sociais ou de manejo, os quais podem influenciar a frequência e a eficiência

de consumo ao longo do período experimental.

A concentração média de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) registrada durante as visitas foi de  $762,05 \pm 219,52$  ppm. Em relação ao metano (CH<sub>4</sub>), a concentração média observada foi de  $12,38 \pm 4,94$  ppm. Ao observarmos as flutuações na concentração dos gases durante as visitas dos animais foi possível observar o padrão de eructação dos animais com a presença de picos de concentração de metano conforme esperado (Figura 3).



**Figura 3** Exemplo das medições realizadas durante a visita (2041) de um animal (identificação 6802).

A matriz de correlação (Figura 43) indicou forte associação positiva entre as variáveis relacionadas à magnitude das emissões, especialmente entre CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>. As variáveis CH<sub>4</sub>\_mean, CH<sub>4</sub>\_max, CH<sub>4</sub>\_top5, CO<sub>2</sub>\_mean, CO<sub>2</sub>\_max e CO<sub>2</sub>\_top5 apresentaram altas correlações entre si, indicando visitas com maiores emissões médias também tendem a apresentar maiores valores máximos e maiores picos de emissão.

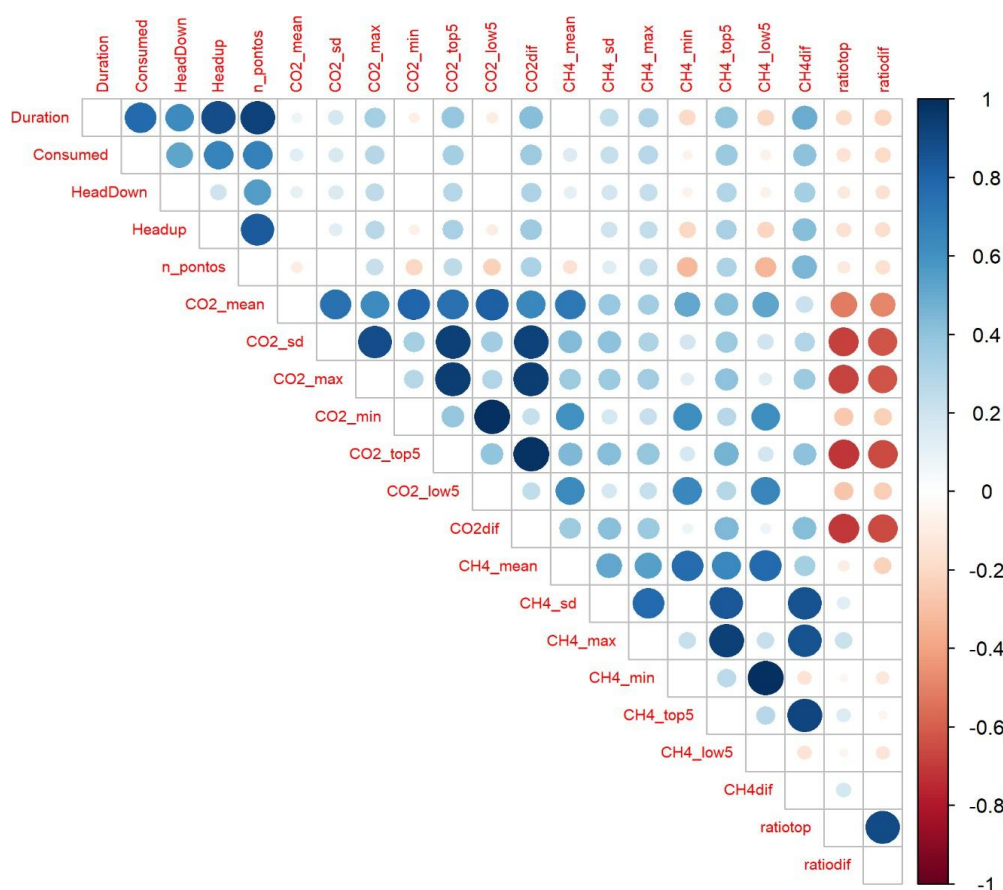
**Tabela 2** Estatística descritiva das variáveis mensuradas na metodologia de mensuração de gás carbônico e metano via LI-7810 em cochos automáticos.

|                       | Média  | Desvio-padrão | Mediana | Mínimo | Máximo  |
|-----------------------|--------|---------------|---------|--------|---------|
| Duration              | 211,33 | 176,65        | 146,00  | 61,00  | 1551,00 |
| Consumed              | 483,12 | 345,80        | 400,00  | 0,00   | 2840,00 |
| HeadDown              | 82,09  | 82,59         | 57,50   | 2,00   | 673,00  |
| CO <sub>2</sub> _mean | 762,05 | 219,52        | 716,40  | 415,54 | 1981,56 |

|          |         |        |         |        |         |
|----------|---------|--------|---------|--------|---------|
| CO2_sd   | 250,29  | 142,07 | 228,51  | 15,93  | 1520,67 |
| CO2_max  | 1788,76 | 765,82 | 1719,15 | 510,59 | 8369,14 |
| CO2_min  | 493,84  | 91,85  | 467,65  | 375,73 | 1170,08 |
| CO2_top5 | 1534,25 | 602,79 | 1459,60 | 497,94 | 6012,25 |
| CO2_low5 | 505,52  | 99,25  | 477,51  | 385,86 | 1199,44 |
| CH4_mean | 12,38   | 4,94   | 11,83   | 2,30   | 30,64   |
| CH4_sd   | 7,32    | 1,90   | 7,52    | 0,43   | 13,95   |
| CH4_max  | 33,78   | 5,76   | 35,65   | 4,98   | 39,45   |
| CH4_min  | 3,87    | 2,32   | 3,04    | 1,90   | 22,23   |
| CH4_top5 | 30,91   | 6,34   | 32,66   | 3,79   | 38,36   |
| CH4_low5 | 4,18    | 2,60   | 3,25    | 1,90   | 23,06   |
| CO2dif   | 1028,74 | 571,10 | 953,67  | 89,81  | 5403,73 |
| CH4dif   | 26,73   | 6,17   | 28,00   | 1,14   | 36,34   |
| ratiotop | 0,02    | 0,01   | 0,02    | 0,01   | 0,06    |
| ratiodif | 0,03    | 0,02   | 0,03    | 0,00   | 0,30    |

---

Variáveis analisadas: *Duration* = duração do período de monitoramento; *Consumed* = quantidade de alimento consumida; *HeadDown* = tempo de alimentação com a cabeça no cocho; *CO2\_mean*, *CO2\_sd*, *CO2\_max* e *CO2\_min* = média, desvio-padrão, valor máximo e mínimo da concentração de CO<sub>2</sub>; *CO2\_top5* e *CO2\_low5* = média dos cinco maiores e dos cinco menores valores de CO<sub>2</sub>; *CO2dif* = amplitude de variação do CO<sub>2</sub>; *CH4\_mean*, *CH4\_sd*, *CH4\_max* e *CH4\_min* = média, desvio-padrão, valor máximo e mínimo da concentração de CH<sub>4</sub>; *CH4\_top5* e *CH4\_low5* = média dos cinco maiores e dos cinco menores valores de CH<sub>4</sub>; *CH4dif* = amplitude de variação do CH<sub>4</sub>; *ratiotop* = razão CH<sub>4\_top5</sub>/CO<sub>2\_top5</sub>; *ratiodif* = razão CH<sub>4dif</sub>/CO<sub>2dif</sub>.

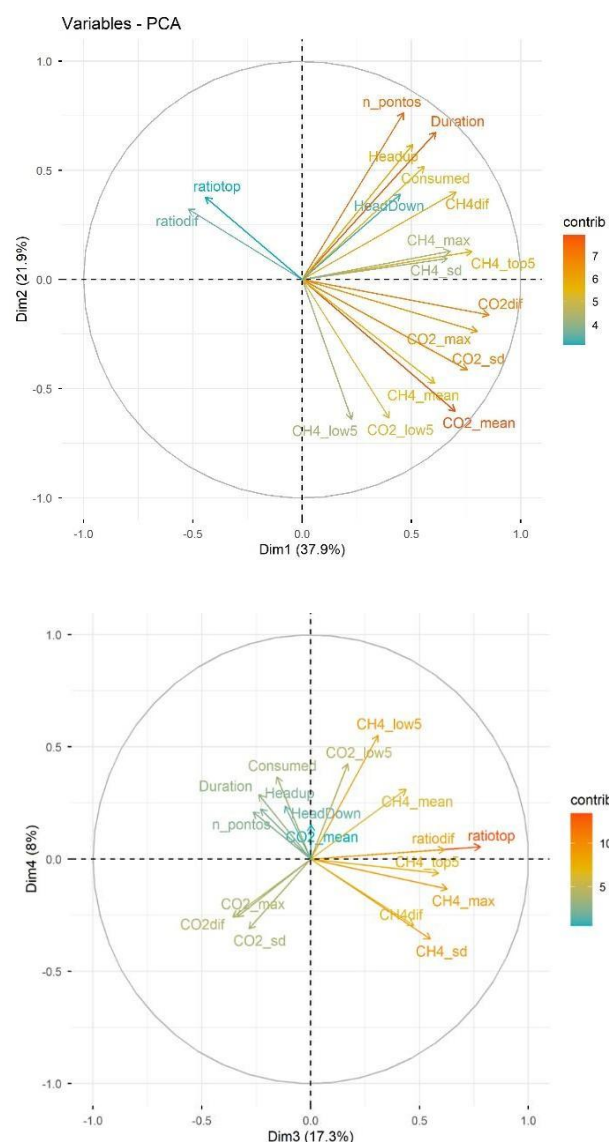


**Figura 4** Matriz de correlação entre as variáveis considerando a análise de cada visita do animal ao cocho automático.

A análise de componentes principais (PCA) foi aplicada para identificar os principais padrões de variação nos dados (Figura 5). Os dois primeiros componentes principais explicaram 88,5% da variância total, sendo 62,4% atribuídos à Dimensão 1 e 26,1% à Dimensão 2.

A Dimensão 1 foi fortemente associada às variáveis de gases, incluindo CH4\_mean, CH4\_max, CH4\_top5, CO2\_mean, CO2\_max e CO2dif. A Dimensão 2 esteve mais relacionada às variáveis comportamentais e operacionais da medição, como duração da medição (Duration), consumo (Consumed), número de pontos (n\_pontos) e posição da cabeça (HeadUp e HeadDown).

A



**Figura 5** Representação gráfica da contribuição das variáveis nas duas primeiras dimensões **(A)** e da terceira e quarta dimensão **(B)** da análise de componentes principais considerado as mensurações obtidas em cada visita dos animais ao cocho automático. Os valores entre parênteses no título dos eixos representam a proporção da variância explicada por cada componente principal.

Posteriormente, o efeito do indivíduo (animal) para as medidas de gases foi avaliado considerando todas as visitas existentes do mesmo indivíduo. A repetibilidade foi estimada como a proporção da variância atribuída ao efeito de animal em relação à variância total, com o objetivo de avaliar a consistência das medições ao longo do tempo. Os valores observados foram baixos para todas as variáveis, variando de 0,021 a 0,059 (Tabela 3).

Esses resultados indicam alta variabilidade intra-animal, sugerindo que as emissões de gases não são totalmente estáveis e podem ser influenciadas por fatores momentâneos, como ingestão alimentar, comportamento durante a medição e condições ambientais. Variáveis relacionadas a extremos e diferenças

apresentaram menor repetibilidade, evidenciando maior sensibilidade a flutuações durante o processo de medição.

**Tabela 3** Estimativas de repetibilidade para as variáveis de emissão de CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>.

| Variáveis | Repetibilidade |
|-----------|----------------|
| CO2_mean  | 0,0589         |
| CO2_max   | 0,0423         |
| CO2_top5  | 0,0468         |
| CH4_mean  | 0,0537         |
| CH4_max   | 0,0256         |
| CH4_top5  | 0,0286         |
| CO2dif    | 0,0453         |
| CH4dif    | 0,0210         |
| ratiotop  | 0,0412         |
| ratiodif  | 0,0356         |

Em continuidade, a Tabela 4 reúne as informações individuais utilizadas para descrever o perfil de emissão de cada animal, contemplando tanto a intensidade dos picos quanto a relação entre os gases avaliados,

Valores individuais das variáveis CO<sub>2</sub>\_top5, CH<sub>4</sub>\_top5, ratiotop e ratiodif, organizados por animal, identificado pela respectiva Tag. Cada linha corresponde a um indivíduo avaliado, enquanto as colunas representam as métricas calculadas a partir das mensurações de gases realizadas durante o período experimental com os 10 maiores e os 10 menores valores.

As variáveis CO<sub>2</sub>\_top5 e CH<sub>4</sub>\_top5 referem-se à média dos 5 maiores valores registrados para dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e metano (CH<sub>4</sub>), respectivamente. Essas métricas são utilizadas para representar os picos de emissão, permitindo caracterizar os momentos de maior liberação de gases por animal. Esse tipo de abordagem é empregado para reduzir a influência de valores extremos isolados e, ao mesmo tempo, manter o foco nos períodos de maior intensidade de emissão.

Além das medidas individuais de cada gás, a tabela também apresenta as variáveis ratiotop e ratiodif, que expressam a relação entre CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> sob diferentes critérios de cálculo. A variável ratiotop corresponde à razão entre os valores superiores (top 5) de metano e dióxido de carbono, enquanto ratiodif representa uma razão baseada na diferença entre as concentrações dos dois gases. Essas variáveis permitem avaliar não apenas a magnitude das emissões, mas também a proporção entre os gases liberados.

**Tabela 4** Seleção dos dez maiores e dez menores valores das variáveis de emissão de gases, organizados por animal avaliado.

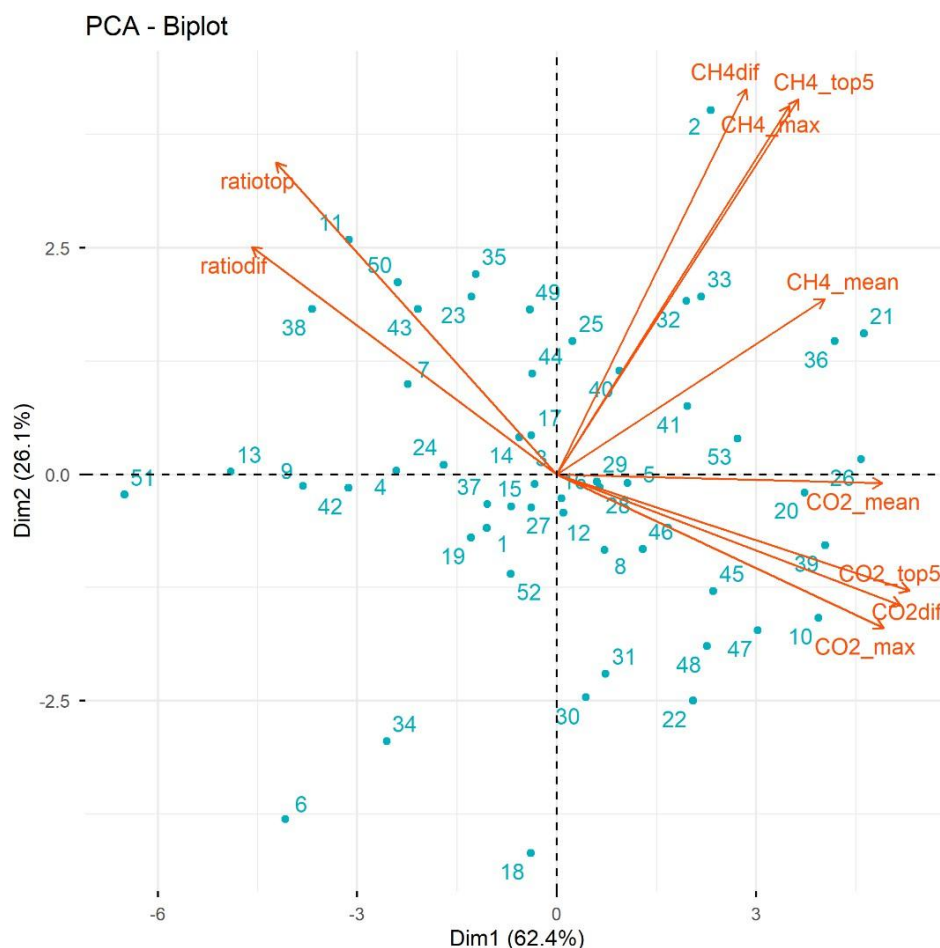
| Tag  | CO2_top5 | Tag  | CH4_top5 | Tag  | ratiotop | Tag  | ratiodif |
|------|----------|------|----------|------|----------|------|----------|
| 6772 | 1713,3   | 6719 | 32,6     | 6774 | 0,03     | 6774 | 0,05     |
| 6839 | 1697,0   | 6720 | 32,1     | 6890 | 0,03     | 6703 | 0,04     |
| 6914 | 1685,3   | 6721 | 32,0     | 6942 | 0,03     | 6719 | 0,04     |
| 6802 | 1684,3   | 6722 | 31,8     | 6703 | 0,02     | 6720 | 0,04     |
| 6892 | 1667,6   | 6723 | 31,8     | 6719 | 0,02     | 6722 | 0,04     |
| 6879 | 1648,5   | 6724 | 31,7     | 6720 | 0,02     | 6728 | 0,04     |
| 6804 | 1646,4   | 6725 | 31,4     | 6722 | 0,02     | 6750 | 0,04     |
| 6920 | 1639,6   | 6726 | 31,4     | 6728 | 0,02     | 6759 | 0,04     |
| 6949 | 1605,4   | 6727 | 31,3     | 6750 | 0,02     | 6763 | 0,04     |
| 6909 | 1603,6   | 6728 | 31,3     | 6759 | 0,02     | 6784 | 0,04     |
| 6750 | 1426,3   | 6729 | 30,3     | 6760 | 0,02     | 6760 | 0,03     |
| 6826 | 1417,4   | 6730 | 30,2     | 6763 | 0,02     | 6772 | 0,03     |
| 6722 | 1413,2   | 6731 | 30,1     | 6772 | 0,02     | 6778 | 0,03     |
| 6904 | 1409,5   | 6732 | 30,1     | 6778 | 0,02     | 6799 | 0,03     |
| 6898 | 1391,5   | 6733 | 30,0     | 6784 | 0,02     | 6802 | 0,03     |
| 6774 | 1388,7   | 6734 | 29,9     | 6790 | 0,02     | 6804 | 0,03     |
| 6763 | 1375,2   | 6735 | 29,5     | 6792 | 0,02     | 6805 | 0,03     |
| 6890 | 1360,1   | 6736 | 29,4     | 6793 | 0,02     | 6839 | 0,03     |
| 6784 | 1350,1   | 6737 | 29,4     | 6798 | 0,02     | 6847 | 0,03     |
| 6942 | 1274,9   | 6738 | 28,9     | 6799 | 0,02     | 6858 | 0,03     |

A Figura 6 apresenta o biplot da análise de componentes principais dos valores calculados para cada indivíduo, no qual as duas primeiras componentes explicaram 88,5% da variância total dos dados, sendo 62,4% representados pela Dimensão 1 (Dim1) e 26,1% pela Dimensão 2 (Dim2). Observa-se dispersão moderada dos indivíduos, sem formação evidente de grupos completamente distintos, porém com variação ao longo das duas dimensões principais,

As variáveis relacionadas à emissão de CH<sub>4</sub> apresentaram maiores cargas fatoriais e associação positiva com a Dim1, indicando maior contribuição para a variabilidade observada. As variáveis associadas ao CO<sub>2</sub> também contribuíram para a separação dos indivíduos, posicionando-se predominantemente no quadrante positivo da Dim1 e negativo da Dim2. Em contraste, as variáveis de razão apresentaram direção oposta, evidenciando associação negativa em relação às variáveis de emissão.

O comprimento dos vetores indicou que as variáveis de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> foram as que mais influenciaram a distribuição dos indivíduos no espaço multivariado. A disposição angular entre os vetores demonstrou correlação positiva entre variáveis de mesma natureza e correlação negativa entre variáveis de emissão e variáveis de razão. Esses resultados indicam que a variabilidade dos dados foi principalmente explicada

pelas diferenças nas características relacionadas à emissão de gases.



**Figura 6** Representação gráfica do tipo biplot apresentando a dispersão dos indivíduos e a contribuição das variáveis nas duas primeiras dimensões da análise de componentes principais considerado os valores do efeito animal para as variáveis obtidos via modelo misto, Os valores entre parênteses no título dos eixos representam a proporção da variância explicada por cada componente principal.

## 5 DISCUSSÃO

Os resultados evidenciaram alta variabilidade entre as variáveis relacionadas às emissões de metano ( $\text{CH}_4$ ), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e características comportamentais dos animais, acompanhada de baixa repetibilidade das mensurações por animal. Os coeficientes de repetibilidade observados foram inferiores a 0,06 para todas as variáveis, indicando que a maior parte da variação não foi explicada por diferenças consistentes entre indivíduos, mas sim por fatores ambientais, comportamentais e variações momentâneas durante as medições.

Em bovinos de corte, a repetibilidade de características fisiológicas dinâmicas, como emissões entéricas, tende a ser baixa quando comparada a características produtivas mais estáveis. Estudos relatam que a produção de metano apresenta grande variação temporal devido a alterações no consumo, padrão de

fermentação ruminal e atividade respiratória, reduzindo a consistência entre medições sucessivas (Hammond et al., 2016). Dessa forma, os baixos coeficientes observados neste estudo são compatíveis com a natureza altamente variável das emissões gasosas em bovinos de corte.

A baixa repetibilidade observada sugere elevada variabilidade temporal das emissões e de suas variáveis derivadas, sendo influenciadas por fatores como padrão de ingestão, tempo de permanência no sistema de medição, posicionamento da cabeça e dinâmica respiratória. Em bovinos de corte, especialmente em sistemas de alimentação intermitente, a produção de metano pode variar significativamente ao longo do dia e entre eventos de alimentação, refletindo mudanças no processo fermentativo ruminal (STARSMORE, K, et al, 2024).

A análise de correlação demonstrou forte associação entre variáveis do mesmo gás, como CH<sub>4</sub>\_mean, CH<sub>4</sub>\_max e CH<sub>4</sub>\_top5, bem como entre CO<sub>2</sub>\_mean, CO<sub>2</sub>\_max e CO<sub>2</sub>\_sd, indicando que essas métricas representam essencialmente a mesma dimensão biológica da emissão. Esse resultado sugere que diferentes estatísticas derivadas das concentrações de gases capturam o mesmo processo fisiológico de produção e liberação gasosa, refletindo a atividade fermentativa ruminal e a dinâmica respiratória dos animais. Altas correlações entre métricas derivadas de metano também foram relatadas por Negussie et al, (2017), indicando que medidas médias, máximas e de pico tendem a representar o mesmo fenômeno biológico de emissão gasosa.

Além disso, observou-se correlação positiva entre variáveis de consumo e duração da visita, sugerindo que maior tempo de permanência no sistema de medição está associado a maior registro de emissão de gases, o que é coerente com o aumento do número de respirações registradas. Estudos de mensuração de metano em bovinos demonstram que o tempo de visita ao equipamento e o padrão de alimentação influenciam diretamente a quantidade de gás registrada, indicando que parte da variabilidade observada está associada a fatores comportamentais e operacionais da mensuração, e não exclusivamente a diferenças fisiológicas entre animais (Negussie et al., 2017).

O comportamento distinto das variáveis relacionadas às razões entre gases (ratiotop e ratioidif), posicionando-se em direção oposta às variáveis de CO<sub>2</sub> na análise de componentes principais (PCA), sugere que essas métricas não refletem apenas a intensidade absoluta de emissão, mas sim uma relação proporcional entre produção de metano e ventilação respiratória. Esse achado é biologicamente plausível, uma vez que o CO<sub>2</sub> está diretamente relacionado ao metabolismo energético e à taxa respiratória do animal, enquanto o CH<sub>4</sub> é produto específico da fermentação ruminal. Assim, ao utilizar a razão CH<sub>4</sub>:CO<sub>2</sub>, parte da variação associada ao volume respiratório pode ser ajustada, permitindo captar diferenças fisiológicas relativas entre indivíduos (Madsen et al. 2010). Dessa forma, o posicionamento distinto dessas variáveis na PCA indica possível independência parcial em relação às emissões absolutas, sugerindo que métricas baseadas em razão podem fornecer informações complementares sobre a dinâmica fermentativa.

A análise de componentes principais demonstrou que os dois primeiros componentes explicaram a maior parte da variabilidade dos dados, evidenciando que as variáveis avaliadas se organizam em dimensões biológicas distintas. O primeiro componente (Dim1), fortemente associado às variáveis de emissão de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>, representou um gradiente geral de intensidade de emissão. Esse padrão é consistente com estudos de fenotipagem de metano em bovinos, nos quais variáveis relacionadas à produção gasosa tendem a se agrupar no principal eixo de variação, refletindo diferenças na atividade fermentativa ruminal e no nível de ingestão entre animais (Negussie et al. 2017).

Por sua vez, o segundo componente (Dim2) esteve mais associado às variáveis comportamentais e estruturais da mensuração, como duração da visita e consumo. Esse resultado indica que parte da variação nas emissões registradas está relacionada ao padrão de utilização do equipamento pelos animais. De acordo com Hammond et al, (2016), fatores como tempo de permanência no sistema de medição, frequência de visitas e comportamento alimentar influenciam diretamente a quantidade de gás registrada, evidenciando que uma parcela da variabilidade observada em estudos de metano entérico decorre de fatores operacionais e comportamentais, além das diferenças fisiológicas individuais.

Em conjunto, esses resultados demonstram que as emissões de gases em bovinos de corte são influenciadas tanto por fatores fisiológicos quanto comportamentais, sendo essencial considerar essa dualidade na interpretação dos dados e na definição de estratégias de avaliação e seleção de animais para menor emissão de metano.

A Análise de Componentes Principais apresentada na Figura 5 demonstrou que as duas primeiras dimensões explicaram 88,5% da variabilidade total dos dados (Dim1 = 62,4% e Dim2 = 26,1%), indicando forte estruturação multivariada das variáveis analisadas. A elevada proporção de variância explicada pelo primeiro componente sugere que a principal fonte de variação entre os animais está relacionada à intensidade absoluta de emissão de gases.

O agrupamento das variáveis de metano (CH<sub>4</sub>\_mean, CH<sub>4</sub>\_max, CH<sub>4</sub>\_top5 e CH<sub>4</sub>dif) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>\_mean, CO<sub>2</sub>\_max, CO<sub>2</sub>\_top5 e CO<sub>2</sub>dif) no mesmo quadrante e com vetores de orientação semelhante evidencia forte correlação positiva entre essas medidas. Esse resultado é biologicamente consistente, uma vez que a produção de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> está diretamente associada ao metabolismo energético dos ruminantes. O metano é produzido durante a fermentação entérica no rúmen, como subproduto da ação de microrganismos metanogênicos, enquanto o CO<sub>2</sub> é gerado tanto na fermentação ruminal quanto na respiração celular (ADESOGAN, T. et al, 2013). Dessa forma, animais com maior consumo alimentar e maior atividade fermentativa tendem a apresentar maiores emissões conjuntas desses gases.

Estudos têm demonstrado que há associação positiva entre ingestão de matéria seca, produção de energia fermentativa e emissão de metano, o que reforça a interpretação de que o Dim1 representa um gradiente geral de intensidade metabólica e produtiva (GERBER et al. 2013; KNAPP et al. 2014). Além disso, a

correlação entre CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> é frequentemente utilizada como base metodológica em sistemas de mensuração indireta de metano, nos quais o CO<sub>2</sub> é empregado como gás traçador para estimativa da produção entérica (MADSEN et al. 2010).

A separação das variáveis de razão em relação às emissões absolutas também pode indicar variações individuais no perfil fermentativo ruminal, na composição da microbiota ou na eficiência alimentar. Estudos demonstram que diferenças na população microbiana ruminal e na taxa de fermentação influenciam a proporção de hidrogênio direcionada à metanogênese, impactando a produção relativa de CH<sub>4</sub> (HOOK et al. 2010). Além disso, características associadas à eficiência alimentar apresentam correlação com emissões relativas de metano, sugerindo que animais mais eficientes podem emitir menor quantidade de CH<sub>4</sub> por unidade de consumo ou produção.

O segundo componente principal (Dim2), responsável por 26,1% da variação, contribuiu para discriminar diferenças adicionais entre os animais, possivelmente associadas a padrões individuais de emissão que não são explicados apenas pela intensidade absoluta. Essa dimensão pode refletir variações comportamentais durante a mensuração, como tempo de permanência no equipamento e padrão respiratório, fatores que influenciam a variabilidade dos registros em sistemas automatizados de monitoramento (HAMMOND et al. 2016).

De forma geral, os resultados indicam que a maior parte da variação observada entre os animais está associada à intensidade total de emissão de gases, mas também evidenciam a existência de uma dimensão complementar relacionada à proporção entre CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>. Essa distinção é particularmente relevante em estudos voltados à caracterização fenotípica e à seleção de bovinos de corte com menor impacto ambiental, pois sugere que medidas absolutas e relativas fornecem informações distintas e potencialmente complementares. Assim, a utilização de abordagens multivariadas, como a PCA, mostra-se adequada para compreender a complexidade biológica e técnica envolvida na mensuração de emissões entéricas.

## 6 CONCLUSÃO

O método alternativo de mensuração de metano em tempo real (analisador portátil LI-7810 acoplado a cochos automatizados) foi capaz de registrar, de forma contínua e sincronizada, as concentrações de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> durante as visitas dos animais ao cocho. A metodologia mostrou-se operacionalmente viável, não invasiva e compatível com a rotina de confinamento, possibilitando coleta de dados sem interferência no comportamento natural dos animais.

Observou-se elevada variabilidade nas concentrações de gases e nas variáveis comportamentais associadas às visitas, bem como baixa repetibilidade das medidas entre indivíduos. Esses achados indicam que as emissões entéricas, quando avaliadas por meio de visitas voluntárias ao cocho, sofrem forte influência

de fatores momentâneos, como padrão de ingestão, tempo de permanência no equipamento e dinâmica respiratória. Assim, embora o método apresente potencial para caracterização fenotípica das emissões, a variabilidade intra-animal sugere a necessidade de múltiplas medições ao longo do tempo para obtenção de estimativas mais consistentes.

De forma geral, o método avaliado apresenta potencial como ferramenta prática para mensuração de metano entérico em tempo real em sistemas de confinamento, contribuindo para a ampliação da base de dados nacionais sobre emissões em bovinos de corte. Assim, conclui-se que a tecnologia testada representa uma alternativa promissora para mensuração de metano entérico em condições comerciais, podendo contribuir para o avanço de estratégias voltadas à mitigação de emissões, aumento da eficiência produtiva e promoção da sustentabilidade na bovinocultura de corte brasileira.

## REFERÊNCIAS

- ADESOGAN, T, et al, Mitigation of methane and nitrous oxide emissions from animal—SPECIAL TOPICS, *J, Anim, Sci*, v, 91, p, 5045-5069, 2013.
- ANDRADE, Bruno G, N, *et al*, Stool and ruminal microbiome components associated with methane emission and feed efficiency in Nelore beef cattle, *Frontiers in Genetics*, v, 13, p, 812828, 2022.
- BARBOSA, Máira de Carvalho Porto et al, The use of infrared thermography as an indicator of methane production in hair sheep, *Tropical Animal Health and Production*, v, 56, n, 7, p, 249, 2024.
- CARDOSO, Tainã Figueiredo et al, Exploring genome, transcriptome, and microbiome interactions related to feed efficiency and methane emissions in *Bos indicus* through multi-omics network analysis, *Mammalian Genome*, p, 1–20, 2025.
- CHARMLEY, E, S, R, O, et al, A universal equation to predict methane production of forage-fed cattle in Australia, *Animal Production Science*, v, 56, n, 3, p, 169-180, 2016.
- CRISÓSTOMO, Charleni *et al*, Relationship between body temperature measured by infrared thermography and performance, feed efficiency and enteric gas emission of hair lambs, *Journal of Thermal Biology*, v, 127, p, 104070, 2025.
- GERBER, Pierre J, et al, Tackling climate change through livestock: a global assessment of emissions and mitigation opportunities, 2013.
- GIANVECCHIO, Sarah Bernardes et al, Is apparent digestibility associated with residual feed intake and enteric methane emission in Nelore cattle? *Revista Brasileira de Zootecnia*, v, 53, p, e20230121, 2024.
- HAMMOND, Kirsty J, et al, Review of current in vivo measurement techniques for quantifying enteric methane emission from ruminants, *Animal Feed Science and Technology*, v, 219, p, 13-30, 2016.
- HOOK, Sarah E.; WRIGHT, André-Denis G.; MCBRIDE, Brian W, Methanogens: methane producers of the rumen and mitigation strategies, *Archaea*, v, 2010, n, 1, p, 945785, 2010.
- JOHNSON, P, et al, Genetic parameters for residual feed intake, methane emissions and body composition in New Zealand maternal sheep, *Frontiers in Genetics*, v, 13, p, 1876, 2022.
- KAMALANATHAN, Stephanie et al, Genetic analysis of methane emission traits in holstein dairy cattle, *Animals*, v, 13, n, 8, p, 1308, 2023.
- Kassambara A, Mundt F (2020), *\_factoextra: Extract and Visualize the Results of Multivariate Data Analyses\_*, doi:10.32614/CRAN,package,factoextra <<https://doi.org/10.32614/CRAN,package,factoextra>>, R package version 1,0,7, <https://CRAN.R-project.org/package=factoextra> .
- KNAPP, Joanne R, et al, Invited review: Enteric methane in dairy cattle production: Quantifying the opportunities and impact of reducing emissions, *Journal of dairy science*, v, 97, n, 6, p, 3231-3261, 2014.
- MADSEN, Jørgen et al, Methane and carbon dioxide ratio in excreted air for quantification of the methane production from ruminants, *Livestock Science*, v, 129, n, 1-3, p, 223-227, 2010.
- MIN, Byeng-Ryel et al, Enteric methane emissions and animal performance in dairy and beef cattle production: Strategies, opportunities, and impact of reducing emissions, *Animals*, v, 12, n, 8, p, 948, 2022.
- NEGUSSIE, Enyew et al, Invited review: Large-scale indirect measurements for enteric methane emissions

in dairy cattle: A review of proxies and their potential for use in management and breeding decisions, *Journal of Dairy Science*, v, 100, n, 4, p, 2433-2453, 2017.

R Core Team (2025), *\_R: A Language and Environment for Statistical Computing\_*, R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, <https://www.R-project.org/>.

ROSENSTOCK, Todd S, et al, *Methods for measuring greenhouse gas balances and evaluating mitigation options in smallholder agriculture*, Cham: Springer Nature, 2016

SAKAMOTO, Leandro Sannomiya *et al*, Phenotypic association among performance, feed efficiency and methane emission traits in Nellore cattle, *PloS One*, v, 16, n, 10, p, e0257964, 2021.

Sebastien Le, Julie Josse, Francois Husson (2008), FactoMineR: An R Package for Multivariate Analysis, *Journal of Statistical Software*, 25(1), 1-18, 10.18637/jss.v025.i01 .

SOUZA, Luana Lelis *et al*, Heritability estimates and genome-wide association study of methane emission traits in Nellore cattle, *Journal of Animal Science*, v, 102, p, skae182, 2024.

STARSMORE, K, et al, Animal factors that affect enteric methane production measured using the GreenFeed monitoring system in grazing dairy cows, *Journal of Dairy Science*, v, 107, n, 5, p, 2930-2940, 2024.

TEDESCHI, Luis Orlindo *et al*, Quantification of methane emitted by ruminants: a review of methods, *Journal of Animal Science*, v, 100, n, 7, p, skac197, 2022.

Wickham H, François R, Henry L, Müller K, Vaughan D (2023), *\_dplyr: A Grammar of Data Manipulation\_*, doi:10.32614/CRAN,package,dplyr <<https://doi.org/10.32614/CRAN,package,dplyr>>, R package version 1.1.4, <<https://CRAN.R-project.org/package=dplyr>>.

ZHAO, Yiguang *et al*, A review of enteric methane emission measurement techniques in ruminants, *Animals*, v, 10, n, 6, p, 1004, 2020.