



THAYNAN FERREIRA DE ARAÚJO

**FAZENDAS LEITEIRAS COM MAIOR EFICIÊNCIA
ZOOTÉCNICA E ECONÔMICA TEM POTENCIAL MENOR
INTENSIDADE DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO
ESTUFA**

**LAVRAS – MG
2026**

THAYNAN FERREIRA DE ARAÚJO

**FAZENDAS LEITEIRAS COM MAIOR EFICIÊNCIA ZOOTÉCNICA E
ECONÔMICA TEM POTENCIAL MENOR INTENSIDADE DE EMISSÕES DE
GASES DE EFEITO ESTUFA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da produção animal, para a obtenção do título de Mestre.

Orientador: **DANIEL RUME CASAGRANDE**

LAVRAS – MG

2026

**Ficha Catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração
de Ficha Catalográfica da Biblioteca Universitária da UFLA, com
dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Araújo, Thaynan Ferreira.

Fazendas leiteiras com maior eficiência zootécnica e econômica tem potencial menor intensidade de emissões de gases de efeito estufa / Thaynan Ferreira Araújo. - 2026.

43 p.

Orientador: Daniel Rume Casagrande

Dissertação (Mestrado Profissional) - Universidade Federal de Lavras, 2026.
Bibliografia.

1. Pecuária leiteira de baixa emissão de gases de efeito estufa. 2. Eficiência zootécnica e econômica influencia a pegada de carbono da propriedade. 3. A distribuição das emissões em sistemas mais intensivos tendem a se deslocar para a produção de alimentos. I. Casagrande, Daniel Rume. II. Universidade Federal de Lavras. III. Título.

THAYNAN FERREIRA DE ARAÚJO

**FAZENDAS LEITEIRAS COM MAIOR EFICIÊNCIA ZOOTÉCNICA E
ECONÔMICA TEM POTENCIAL MENOR INTENSIDADE DE EMISSÕES DE
GASES DE EFEITO ESTUFA**

**DAIRY FARMS WITH GREATER ZOOTECHNICAL AND ECONOMIC
EFFICIENCY HAVE THE POTENTIAL FOR LOWER GREENHOUSE GAS
EMISSION INTENSITY**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia da produção animal, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 28 de maio de 2026.
Dr. Daniel Rume Casagrande - UFLA
Dr. Adenilson José Paiva - UFLA
Dr. Giovani da Costa Caetano - UFV

Documento assinado digitalmente
 **DANIEL RUME CASAGRANDE**
Data: 20/10/2026 16:04:06-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.(a) Dr.(a) DANIEL RUME CASAGRANDE
Orientador(a)

**LAVRAS – MG
2026**

Dedico este trabalho às pessoas mais importantes da minha vida.

À minha mãe, Leonor, por todo amor, dedicação e por jamais medir esforços para me proporcionar oportunidades e apoiar meus sonhos. Sua força e cuidado foram fundamentais em cada etapa da minha caminhada.

Ao meu pai, Raniel, que hoje descansa ao lado de Deus, mas que enquanto esteve neste plano foi o alicerce da nossa família. Obrigado por sempre acreditar em mim, apoiar minhas decisões e me ensinar o valor do trabalho, da honestidade e da perseverança.

Ao meu irmão Thulio, pela amizade, parceria e companheirismo de toda a vida.

E ao meu irmão Mardhen, que também hoje está junto de Deus e do nosso pai. Sua amizade, presença e lembranças permanecerão para sempre em meu coração.

À minha namorada, Mariana, pelo companheirismo, paciência e incentivo em todos os momentos. Obrigado por ser meu porto seguro, meu apoio emocional e meu grande amor.

Às minhas avós, Lia e Terezinha, pelo amor, carinho e cuidado incondicional durante toda a minha vida.

Aos meus tios e tias, que sempre foram e continuam sendo verdadeiros amigos, pessoas com quem sempre pude contar ao longo da vida.

A vocês, todo meu amor, gratidão e esta conquista.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela vida, pela saúde e por sustentar minha caminhada até aqui. O período do mestrado coincidiu com o momento mais difícil da minha vida, e foi através da fé que encontrei forças para continuar, superar os desafios e não desistir nos dias mais difíceis. Sou grato a Deus por colocar chão firme em cada passo da minha trajetória e por me permitir chegar até este momento.

Agradeço à minha família pelo amor, amizade, companheirismo e por me fazer compreender que, independentemente das dificuldades ou dos resultados, eu jamais estaria sozinho. Obrigado por me darem forças para seguir em frente em todos os momentos. Essa conquista também é de vocês.

Aos produtores rurais que participaram da pesquisa, meu sincero agradecimento pela receptividade nas propriedades e pela disponibilidade em fornecer os dados e contribuir voluntariamente para a realização deste trabalho.

Agradeço aos amigos Cassiano Lobo, Daiana Lelis e Paulo Henrique Martins pelo apoio técnico e pelas contribuições com o desenvolvimento da pesquisa.

À COOPEL, empresa onde trabalhava quando iniciei esta jornada, agradeço pela compreensão e pela liberação durante os períodos de aulas presenciais.

À Labor Rural, empresa onde trabalho atualmente, agradeço pelo apoio durante o mestrado, pela compreensão nas demandas acadêmicas e pelo incentivo para a conclusão deste trabalho.

Agradeço à Heloíse Duarte pelo suporte técnico na utilização da ferramenta PEC Calc e pelas importantes contribuições na organização e verificação da consistência dos dados.

Ao professor orientador Daniel Rume Casagrande, agradeço pela disponibilidade, orientação e contribuições fundamentais para os direcionamentos desta pesquisa.

À Universidade Federal de Lavras e ao Projeto Rural Sustentável – Cerrado, em parceria com o IABS, agradeço pela oportunidade ímpar de realização deste mestrado e pelo incentivo ao desenvolvimento científico voltado à sustentabilidade da agropecuária brasileira.

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi investigar a relação existente entre a emissão de gases de efeito estufa, a eficiência produtiva e a viabilidade econômica de fazendas leiteiras situadas no Centro-Oeste de Minas Gerais. A pesquisa foi conduzida *in loco* em unidades produtivas com acompanhamento técnico e gerencial prévio mínimo de 12 meses. A intensidade de emissão foi mensurada por meio da ferramenta *PecCalc (ESGpec)*, sendo os dados de emissão cruzados com indicadores zootécnicos (produção diária por vaca, proporção de vacas em lactação pelo total de vacas e do rebanho e produtividade por área) e indicadores econômicos (margem bruta, líquida e lucratividade). Os resultados revelaram uma intensidade média de emissão de 1,52 kg CO₂e/Kg FPCM. Constatou-se que a produção de alimentos e o manejo de pastagens representaram a maior porcentagem de emissão (48,2%), superando o metano entérico (43,4%). A análise estatística evidenciou uma forte correlação negativa entre a emissão por litro de leite e a lucratividade, comprovando que a eficiência técnica e o sucesso financeiro atuam de forma associada na mitigação das emissões por litro de leite produzido. No entanto, observou-se uma dualidade territorial, em que a intensificação necessária para reduzir a intensidade das emissões por unidade de produto e aumentar a lucratividade exigiu maiores taxas de lotação, resultando no incremento das emissões absolutas por hectare. Alinhado às diretrizes do Projeto Rural Sustentável – Cerrado e do Plano ABC+, o estudo permite concluir que propriedades mais eficientes conseguem produzir leite com menor impacto ambiental e maior lucro. Entretanto, cuidados extras como o manejo da terra ainda são necessários para garantir que a produção continue sustentável no futuro.

Palavras-chave: Ecoeficiência; Gases de efeito estufa; Intensificação zootécnica; Lucratividade; Pecuária leiteira.

ABSTRACT

The objective of this study was to investigate the relationship between greenhouse gas (GHG) emissions, production efficiency, and the economic viability of dairy farms located in the Central-West region of Minas Gerais. The research was conducted *in loco* across production units with a minimum of 12 months of prior technical and managerial monitoring. Emission intensity was measured using the *PecCalc (ESGpec)* tool, and the emission data were cross-referenced with zootechnical indicators (daily production per cow, proportion of lactating cows, and productivity per area) and economic indicators (gross margin, net margin, and profitability). The results revealed an average emission intensity of 1.52 kg CO₂e/Kg FPCM of milk. It was found that feed production and pasture management accounted for the largest share of emissions (48.2%), surpassing enteric methane (43.4%). Statistical analysis revealed a negative correlation between emissions per liter and profitability, demonstrating that technical efficiency and financial success work in tandem to mitigate emissions per liter of milk produced. However, a territorial duality was observed, wherein the intensification required to increase profitability demanded higher stocking rates, consequently leading to an increase in absolute emissions per hectare. Aligned with the guidelines of the Sustainable Rural Project – Cerrado (*Projeto Rural Sustentável – Cerrado*) and the ABC+ Plan (*Plano ABC+*), this study concludes that more efficient farms are capable of producing milk with a lower environmental impact and higher profitability. Nevertheless, additional measures, such as proper land management, remain necessary to ensure the long-term sustainability of production.

Keywords: Eco-efficiency; Greenhouse gases; Zootechnical intensification; Profitability; Dairy farming.

INDICADORES DE IMPACTO

O presente estudo apresenta os impactos tecnológicos, econômicos e socioambientais para a pecuária leiteira na região Centro-Oeste de Minas Gerais. Sob a perspectiva tecnológica, o trabalho quantificou a intensidade de emissão média em 1,52 kg CO₂e/Kg FPCM, evidenciando que em sistemas intensificados o foco da gestão deve transcender o metano entérico e focar na base agronômica e nutricional, que representou 48,2% das emissões totais. Do ponto de vista econômico, a comprovação de uma forte correlação negativa ($r = -0,873$) entre a intensidade de emissão por kg de FPCM e a lucratividade contesta a percepção de que a sustentabilidade ambiental configura um custo adicional, posicionando a redução das emissões de gases de efeito estufa por unidade de produto como um possível indicador de sucesso financeiro. O caráter extensionista do estudo é demonstrado pela execução da pesquisa *in loco* em parceria com unidades produtoras que possuem assistência técnica e gerencial, utilizando a ferramenta *Pec Calc* da *ESGpec* para converter dados brutos em indicadores de emissões de gases de efeito estufa, aplicáveis à tomada de decisão no campo. As ações impactam diretamente os produtores rurais, inserindo-se nas áreas temáticas de Meio Ambiente, Tecnologia e Produção, e Trabalho da Política Nacional de Extensão. Ademais, os resultados alinham-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU, especificamente aos ODS 8, 12 e 13, ao promover o crescimento econômico aliado à produção responsável e ao combate às mudanças climáticas, validando as premissas do Projeto Rural Sustentável – Cerrado e do Plano ABC+ no fortalecimento de uma agropecuária rentável e de baixa emissão de carbono.

IMPACT INDICATORS

This study presents the technological, economic, and socio-environmental impacts on dairy farming in the Central-West region of Minas Gerais. From a technological perspective, the study quantified the average emission intensity at 1,52 kg CO₂e/kg FPCM, demonstrating that in intensified systems, management focus must transcend enteric methane and target the agronomic and nutritional base, which accounted for 48.2% of total emissions. From an economic standpoint, the evidence of a strong negative correlation ($r = -0.873$) between emission intensity per kg of FPCM and profitability challenges the perception that environmental sustainability constitutes an additional cost, positioning the reduction of greenhouse gas (GHG) emissions per unit of product as a potential indicator of financial success.

The extensionist nature of the study is demonstrated by conducting on-site research in partnership with production units that receive technical and managerial assistance, utilizing the ESGpec Pec Calc tool to convert raw data into GHG emission indicators applicable to field-level decision-making. These actions directly impact rural producers, aligning with the thematic areas of Environment, Technology and Production, and Work within the National Extension Policy. Furthermore, the results align with the UN Sustainable Development Goals (SDGs), specifically SDGs 8, 12, and 13, by promoting economic growth coupled with responsible production and climate action, thereby validating the premises of the Projeto Rural Sustentável – Cerrado and the ABC+ Plan in strengthening a profitable and low-carbon agriculture.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	11
1.1 Hipótese.....	12
1.2 Objetivos	12
1.2.1 Objetivo geral.....	12
1.2.2 Objetivos específicos	12
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	13
3 MATERIAIS E MÉTODOS	16
3.1 Área de estudo e critérios de seleção	16
3.2 Coleta de Dados e Protocolo de Campo.....	17
3.3 Estimativa da Intensidade de Emissão (PEC Calc)	17
3.4 Indicadores de Eficiência Produtiva e Econômica	18
3.5 Análise de Dados e Delineamento Estatístico	19
4 RESULTADOS.....	22
5 DISCUSSÃO.....	36
6 CONCLUSÕES.....	39
7 IMPLICAÇÕES E CONTEXTUALIZAÇÃO NO ÂMBITO DO PRS – CERRADO .	40
REFERÊNCIAS.....	41

1 INTRODUÇÃO

Estima-se que a demanda global por alimentos continuará em crescimento nas próximas décadas, consequência direta de uma população mundial que ultrapassará 9,5 bilhões de indivíduos até 2050 (ONU, 2022). Diante disso, a expansão horizontal da agropecuária encontra limitações devido à escassez de recursos naturais e à urgência na preservação ambiental, tornando o aumento da produtividade vertical a estratégia-chave para garantir a segurança alimentar (FAO, 2018). Contudo, a atividade agropecuária opera sob a influência direta das instabilidades climáticas, como secas e alterações térmicas, ao mesmo tempo que é apontada como uma das principais fontes emissoras de gases de efeito estufa (MOGOLLÓN et al., 2026).

No Brasil, a pecuária leiteira destaca-se pela sua relevância socioeconômica, estando presente em aproximadamente 1,17 milhão de estabelecimentos rurais (IBGE, 2017). Entretanto, o setor é marcado por heterogeneidade, com a produtividade média entre 2.300 e 2.600 litros/vaca/ano (IBGE, 2022). Este cenário de baixa produtividade resulta em elevada intensidade de emissões de gases de efeito estufa por unidade de produto, uma vez que os recursos alimentares são direcionados prioritariamente para as necessidades de manutenção dos animais em detrimento da síntese láctea (OLIVEIRA et al., 2025). Inversamente, a melhoria dos índices produtivos promove a diluição dessas demandas metabólicas por litro de leite, mitigando a intensidade de emissão por unidade de leite gerada (CAPPER, 2011).

Nesse contexto, a adoção de tecnologias que auxiliam a redução de emissão de carbono, tais como o manejo intensivo de pastagens e a gestão de dejetos, atua elevando a eficiência biológica dos sistemas de produção (FAO, 2018). Todavia, persiste entre muitos produtores a visão tradicional de que a sustentabilidade ambiental configura um dreno nos custos operacionais (OLIVEIRA et al., 2025). Essa percepção desconsidera o potencial de ganhos em rentabilidade e eficiência técnica que o uso racional de recursos e a redução de desperdícios proporcionam ao sistema produtivo (CAPPER, 2011). Consequentemente, deixa-se de observar que a otimização econômica e o incremento produtivo da atividade caminham em paralelo com a redução do impacto ambiental por produto gerado.

Diante da necessidade de conciliar o suprimento de alimentos com a estabilização climática, a compreensão da dinâmica entre o desempenho ambiental e o êxito econômico torna-se fundamental para o desenvolvimento da atividade (FAO, 2018). Parte-se do princípio de que a redução na intensidade de emissões de gases de efeito estufa não constitui apenas uma meta ecológica, mas reflete a excelência gerencial das propriedades, onde a otimização dos

índices técnicos reduz os custos de produção e os desperdícios biológicos (CAPPER, 2011; OLIVEIRA et al., 2025). Desse modo, justifica-se a relevância de avaliar esses indicadores em sistemas de produção localizados na região Centro-Oeste de Minas Gerais, mapeando como os fatores de produtividade e rentabilidade se comportam diante do desafio da descarbonização da atividade leiteira.

1.1 Hipótese

A hipótese deste estudo é que a melhoria do desempenho zootécnico e econômico na pecuária leiteira está associada à redução da intensidade de emissões de gases de efeito estufa por unidade produzida. A dinâmica ocorre porque a maior produtividade animal e a eficiência gerencial promovem a diluição dos insumos necessários para manutenção dos animais e dos custos fixos por litro de leite, tornando os sistemas de menor impacto relativo também os mais rentáveis.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é avaliar a relação entre a intensidade de emissão de gases de efeito estufa (GEE) e o desempenho zootécnico e econômico de propriedades leiteiras localizadas na região Centro-Oeste de Minas Gerais.

1.2.2 Objetivos específicos

- Mensurar a intensidade de emissão de gases de efeito estufa (GEE) por unidade de leite produzido nas propriedades amostradas;
- Determinar os índices zootécnicos e de produtividade do rebanho;
- Determinar os indicadores de desempenho econômico das fazendas avaliadas;
- Associar, por meio de análises estatísticas de correlação, a intensidade de emissão de gases de efeito estufa aos resultados zootécnicos e econômicos obtidos pelos sistemas de produção.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A literatura científica destaca que a mensuração da intensidade de emissão em sistemas leiteiros deve basear-se em metodologias de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) padronizadas, sendo o uso de calculadoras digitais uma estratégia crescente para converter dados de manejo em indicadores de sustentabilidade. De acordo com a IDF (2015), a utilização da produção de leite corrigido para gordura e proteína (FPCM) como métrica é essencial para permitir a comparação equitativa entre diferentes sistemas produtivos e níveis de intensificação tecnológica. O refinamento dessas estimativas fundamenta-se nas diretrizes do IPCC (2019), que orientam a quantificação sistemática de emissões a partir de dados operacionais fidedignos. Nesse contexto, a FAO (2018) reforça que o setor leiteiro global desempenha um papel crucial na transição para uma economia de baixo carbono, onde a precisão dos inventários, dependente de dados quantitativos e qualitativos rigorosos, é o primeiro passo para a identificação de práticas mitigadoras que conciliem a preservação ambiental com a eficiência do setor.

A produção de leite é uma atividade de grande importância econômica e social, mas também apresenta desafios ambientais significativos (FAO, 2018). A pecuária leiteira é uma das principais fontes de emissão de gases de efeito estufa (GEE) no agronegócio, incluindo metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) e óxido nitroso (N_2O) (IPCC, 2019). Estes gases contribuem para o aquecimento global e as mudanças climáticas, tornando essencial a adoção de práticas sustentáveis na atividade (FAO, 2018).

As emissões de GEE na pecuária leiteira derivam de diferentes fontes. O metano constitui um dos principais pontos críticos de impacto ambiental, sendo derivado fundamentalmente de dois processos distintos: a fermentação entérica e o manejo de dejetos (FAO, 2018). A fermentação entérica é um processo biológico intrínseco ao sistema digestivo dos ruminantes, ocorrendo majoritariamente no rúmen (IPCC, 2019). Nesse compartimento, microrganismos simbiontes realizam a degradação da dieta em ambiente anaeróbico, gerando o metano como subproduto metabólico que é expelido pelo animal principalmente via eructação (OLIVEIRA et al., 2025). O manejo de resíduos animais contribui para o balanço de gases do sistema quando fezes e urina são armazenadas em condições de ausência de oxigênio, como em esterqueiras líquidas ou lagoas de decantação, ambiente no qual a decomposição microbiana da matéria orgânica resulta na liberação de CH_4 para a atmosfera (IPCC, 2019).

Referente ao impacto climatológico, o metano possui um Potencial de Aquecimento Global (GWP) estimado entre 27 e 30 vezes superior ao do dióxido de carbono em um horizonte

temporal de 100 anos (IPCC, 2021). Embora apresente um tempo de residência na atmosfera menor quando comparado ao CO₂, sua eficiência radiativa no curto prazo é significativamente mais elevada, o que intensifica o aquecimento global e reforça a relevância de estratégias voltadas à sua mitigação (IPCC, 2021; FAO, 2018).

Além do metano, a matriz de emissões da pecuária leiteira é significativamente composta por outros dois Gases de Efeito Estufa (GEE) de grande relevância: o óxido nitroso (N₂O) e as fontes antrópicas do próprio dióxido de carbono (CO₂) (IDF, 2015). A contribuição do N₂O decorre de práticas da decomposição do esterco e da aplicação de fertilizantes nitrogenados nas áreas de pastagem e nas lavouras destinadas à produção de forragem (IPCC, 2019). O CO₂ inserido no balanço da atividade resulta maioritariamente da queima de combustíveis fósseis, como o uso de maquinário agrícola e o transporte, bem como o custo de carbono embutido na produção industrial de insumos externos, a exemplo de fertilizantes sintéticos e rações concentradas (IDF, 2015).

A adoção de práticas sustentáveis na pecuária leiteira pode reduzir a emissão de GEE e aumentar a eficiência produtiva (FAO, 2018). Algumas estratégias incluem o manejo nutricional, com dietas balanceadas para aumentar a produtividade e aditivos que reduzem a produção de metano entérico (OLIVEIRA et al., 2025), tecnologias para tratamento de dejetos, como biodigestores para a geração de biogás e redução de metano (IPCC, 2019), eficiência energética, visando a otimização do uso de maquinário e fontes renováveis de energia (IDF, 2015), e o manejo do solo e pastagem via rotação de culturas e plantio direto (OLIVEIRA et al., 2025).

A implantação de práticas sustentáveis pode resultar na redução da intensidade de emissão das fazendas leiteiras, sem comprometer a produtividade (FAO, 2018). O uso de biodigestores, por exemplo, permite o aproveitamento do metano como fonte de energia, reduzindo os custos operacionais e as emissões de GEE (IPCC, 2019). Além disso, a melhoria na nutrição animal pode aumentar a eficiência alimentar e reduzir a liberação de metano (OLIVEIRA et al., 2025). Dessa forma, a adoção de estratégias sustentáveis não apenas contribui para a preservação ambiental, mas também pode proporcionar ganhos econômicos para os produtores (FAO, 2018).

Acredita-se que o aumento da eficiência zootécnica em fazendas produtoras de leite está diretamente relacionado à redução do metano (CH₄), do dióxido de carbono (CO₂) e do óxido nitroso (N₂O) (FAO, 2018). Essa correlação se dá porque ao melhorar o desempenho produtivo dos animais e a gestão dos recursos, é possível produzir mais leite com melhor eficiência no

consumo de insumos e menor geração de resíduos por unidade produzida (CAPPER, 2011; IDF, 2015).

Animais mais eficientes, ou seja, com maior produção de leite, melhor conversão alimentar, menor intervalo entre partos e maior longevidade produtiva, diluem as emissões ao longo de uma maior quantidade de produto final (kg de leite) (CAPPER, 2011). Isso significa que, embora o animal continue emitindo GEE durante o seu ciclo de vida, essas emissões são divididas por uma produção maior, reduzindo a intensidade de emissão por Kg de leite (CAPPER, 2011; IDF, 2015).

Além disso, práticas zootécnicas como o melhoramento genético, o controle sanitário e o manejo reprodutivo eficiente contribuem para a melhoria da produtividade e da saúde do rebanho, o que também resulta em menor perda de recursos e menor necessidade de substituição de animais (OLIVEIRA et al., 2025).

Portanto, ao investir em eficiência zootécnica, os produtores não apenas aumentam a rentabilidade da atividade, mas também contribuem significativamente para a sustentabilidade ambiental, promovendo uma produção de leite de baixo carbono (FAO, 2018).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

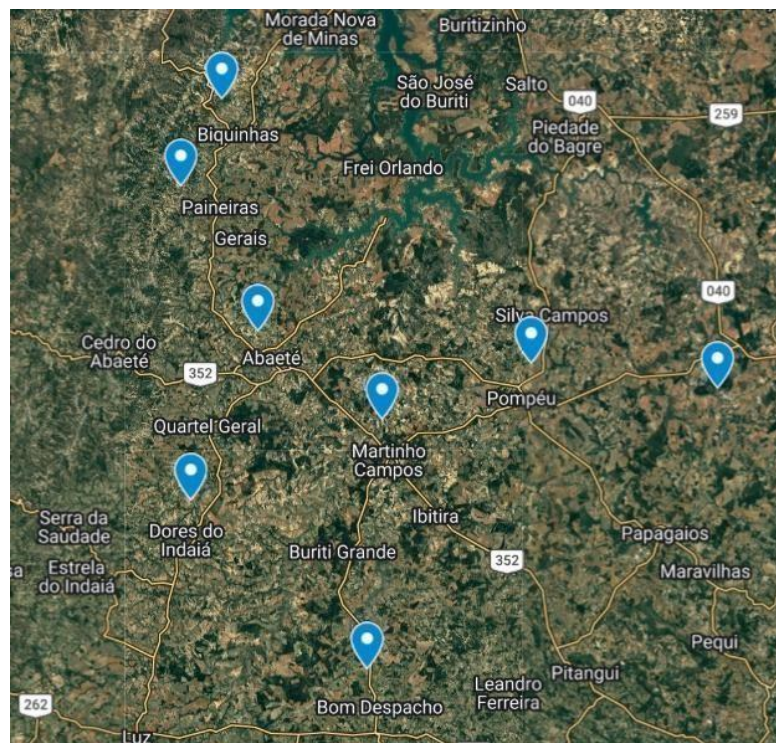
3.1 Área de estudo e critérios de seleção

O estudo foi conduzido em propriedades leiteiras localizadas na região Centro-Oeste de Minas Gerais, inseridas no bioma Cerrado. Foram selecionadas 26 propriedades seguindo critérios de elegibilidade:

Histórico de assistência técnica e gerencial contínua por período mínimo de 12 meses;
Disponibilidade de registros zootécnicos e econômicos completos.

Tais critérios foram adotados para garantir a autenticidade dos dados e a consistência das informações em um ciclo produtivo fechado. As unidades avaliadas possuíam rebanhos de raças Girolando e Holandesa, operando em sistemas semi-confinados e confinados (com e sem *Compost Barn*).

Figura 1 - Região onde estão as fazendas da amostra.



Fonte: Adaptado de Google Maps (2026).

3.2 Coleta de Dados e Protocolo de Campo

A coleta de informações ocorreu entre novembro de 2024 e agosto de 2025 e os dados coletados foram referentes ao período de 12 meses (julho de 2023 a junho de 2024). O levantamento de dados foi realizado *in loco* por meio de visitas técnicas, utilizando-se um formulário estruturado padrão, da ferramenta *PecCalc*, para a coleta de perguntas qualitativas e quantitativas, diretamente com os produtores e consultores. Este formulário permitiu a extração direta de dados dos sistemas de controle gerencial das fazendas, abrangendo inventário de rebanho, manejo alimentar, áreas da fazenda, histórico de compras de insumos, manejo de dejetos e indicadores econômicos. Previamente ao processamento, os dados foram submetidos a um protocolo de revisão, e quando necessário, foi realizada a consulta com os consultores e proprietários das fazendas para assegurar a autenticidade técnica dos parâmetros.

3.3 Estimativa da Intensidade de Emissão (PEC Calc)

A quantificação das emissões de gases de efeito estufa (GEE) foi realizada por meio da ferramenta *PEC Calc (ESGpec)*, fundamentada nos princípios da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) com limite do sistema *cradle-to-farm gate* (produção de insumos até a porteira da fazenda). A ferramenta utiliza o modelo matemático de estimativa baseado nas diretrizes do IPCC (2019) (Nível Tier 2 para emissões entéricas) e nas recomendações da IDF (2015).

Os inputs inseridos no sistema foram classificados em três dimensões principais:

A primeira dimensão compreende os dados do rebanho, incluindo o peso vivo médio, a taxa de crescimento, a produção de leite e a composição da dieta, que são variáveis essenciais para a estimativa da fermentação entérica. No que se refere ao manejo de insumos, foram contempladas as quantidades de fertilizantes nitrogenados aplicados, o volume de combustíveis fósseis utilizados e o consumo de energia elétrica da propriedade. Por fim, a terceira dimensão abrangeu os dados de dejetos, com a definição do sistema de armazenamento (como esterqueiras, lagoas ou deposição direta) para o cálculo preciso das emissões de metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O).

Os resultados das emissões totais calculados pela ferramenta foram expressos e analisados através de três indicadores complementares, utilizando o método de alocação biológica conforme preconizado pela FAO (2018). CO_2 equivalente (CO_2eq) é uma unidade utilizada para expressar o efeito de diferentes gases de efeito estufa em uma única medida,

convertendo suas emissões para o impacto equivalente ao do dióxido de carbono (CO_2). O primeiro é a intensidade de emissão, calculada em quilogramas de dióxido de carbono equivalente por quilograma de leite corrigido para gordura e proteína ($\text{kg CO}_2\text{eq/kg FPCM}$). O segundo indicador corresponde à emissão por área, expressa em toneladas de dióxido de carbono equivalente por hectare ao ano ($\text{t CO}_2\text{eq/ha/ano}$), refletindo a pressão ambiental por unidade de superfície destinada à atividade. Por fim, o terceiro indicador refere-se à emissão por animal, mensurada em quilogramas de dióxido de carbono equivalente por animal ao ano ($\text{kg CO}_2\text{eq/animal/ano}$), que quantifica o impacto individual médio do rebanho no sistema produtivo.

3.4 Indicadores de Eficiência Produtiva e Econômica

Os indicadores produtivos e econômicos foram determinados individualmente a partir das variáveis brutas consolidadas nas planilhas de coleta. No âmbito da eficiência produtiva, mensurou-se a produção de leite por vaca (L/vaca/dia), calculada pela divisão do volume total de leite produzido anualmente pelo número médio de vacas em lactação no mesmo período, e a produtividade por área (L/ha/ano), obtida dividindo-se o volume total anual de leite pela área em hectares efetivamente destinada à atividade leiteira.

No âmbito econômico, as variáveis foram detalhadas de forma a identificar os componentes dos custos fixos, custos variáveis e indicadores econômicos das propriedades. A Receita Bruta Total foi composta pelo somatório das vendas de leite, animais e subprodutos da atividade. O Custo Operacional Efetivo (COE) foi quantificado pela soma dos desembolsos com alimentação do rebanho, sanidade, reprodução, energia, combustíveis, impostos e mão de obra contratada, ou seja, são os custos variáveis. A partir dessas variáveis, calculou-se a Margem Bruta por litro de leite ($\text{R\$/L}$) por meio da subtração do Custo Operacional Efetivo da Renda Bruta Total, dividindo-se o montante pelo volume anual produzido.

Para o cálculo da Margem Líquida por litro de leite ($\text{R\$/L}$), subtraiu-se da Margem Bruta os custos fixos correspondentes à depreciação dos bens de capital (máquinas, benfeitorias e equipamentos) e ao custo de oportunidade da mão de obra familiar. Por fim, a Lucratividade (%) foi calculada como uma variável percentual, expressa pela razão direta entre a Margem Líquida Total e a Receita Bruta Total, multiplicada por cem, explicitando a eficiência ganha por unidade de faturamento do sistema produtivo.

3.5 Análise de Dados e Delineamento Estatístico

O conjunto de dados mapeado foi composto por informações estruturadas provenientes de 26 fazendas leiteiras, representando os diferentes cenários de produção da região. A caracterização inicial e o levantamento do perfil das propriedades foram consolidados a partir de um formulário de coleta dividido em seções temáticas, englobando: Identificação do produtor e a localização da propriedade; os dados gerais do sistema de produção; a área total destinada à atividade leiteira; e a infraestrutura instalada. Adicionalmente, quantificaram-se o efetivo do rebanho, discriminado pelas categorias de vacas em lactação, vacas secas, novilhas e bezerras, bem como os índices de produção diária de leite e a composição detalhada da dieta fornecida aos animais. Coletaram-se dados brutos referentes ao manejo de dejetos e ao consumo anual de insumos operacionais, incluindo o volume de combustíveis fósseis, a quantidade de energia elétrica consumida e o total de fertilizantes nitrogenados aplicados nas lavouras e pastagens. Por fim, foram coletados dados econômicos da atividade leiteira. Essas variáveis brutas foram posteriormente agrupadas em três categorias analíticas: indicadores produtivos, econômicos e de emissões de gases de efeito estufa (GEE). Todas as análises estatísticas foram realizadas utilizando o software SAS versão 9.4 (SAS Institute Inc., Cary, NC, EUA).

Inicialmente, foi realizada a análise descritiva dos dados com o objetivo de caracterizar o conjunto amostral e avaliar a distribuição e variabilidade das variáveis estudadas. Foram obtidas medidas de tendência central (média e mediana) e de dispersão (desvio-padrão, valores mínimos e máximos) por meio do procedimento PROC MEANS. Posteriormente, realizaram-se análises de correlação de Pearson utilizando o procedimento PROC CORR, visando avaliar as associações entre as diferentes variáveis relacionadas às emissões de GEE, bem como entre as variáveis de emissões e os indicadores produtivos e econômicos. Os coeficientes de correlação foram interpretados quanto à magnitude e à direção das associações.

Na sequência, foram realizadas análises de regressão utilizando o procedimento PROC REG para investigar a relação entre as variáveis de emissão de GEE (variáveis dependentes) e os indicadores de eficiência produtiva e econômica (variáveis independentes). Foram testados modelos lineares de primeiro grau e quadráticos de segundo grau. A escolha dos modelos baseou-se na significância dos parâmetros de regressão, no coeficiente de determinação (R^2) e na distribuição dos resíduos. Os efeitos foram considerados significativos quando $P \leq 0,05$.

Tabela 1 - Dados coletados para a pesquisa.

Sequência	Etapa	Perguntas
1	Dados gerais da propriedade	Nome da fazenda Nome do produtor Cadastro Ambiental Rural (CAR) Data inicial do período Data final do período Estado Área total da propriedade (hectares) Produção total de leite da propriedade no período (kg de leite/ano) Leite fornecido para bezerras (litros/dia/bezerra) Proteína (% média anual) Gordura (% média anual) Sistema de produção
2	Manejo de dejetos	Tipos de manejo de dejetos utilizados (por categoria animal)
3	Pastagem (Apenas se os animais pastarem ou consumirem forragem verde cortada)	Tipo de pastagem forrageira de verão Realiza sobressemeadura (aveia e/ou azevém) no inverno? Produção de matéria seca por hectare (MS/ha/ano) Área total de pastagem (hectares) Fertilização orgânica (kg ha/ano) Quantidade anual de fertilizante nitrogenado total (kg N/ha/ano) Quantidade de Ureia utilizada (kg/ano) Quantidade de Dolomita aplicada (kg/ano) Quantidade de Calcário aplicado (kg/ano)

Sequência	Etapa	Perguntas
4	Informações do rebanho	Número de vacas em lactação (cabeças) Número de vacas secas (cabeças) Número de novilhas (cabeças) Número de bezerras (cabeças) Número de touros (cabeças) Saída de vacas adultas (cabeças) Saída de novilhas (cabeças) Saída de touros (cabeças) Peso médio - Vacas em lactação (kg) Peso médio - Vacas secas (kg) Peso médio - Novilhas (kg) Peso médio - Bezerras (kg) Peso médio - Touros (kg) Quantidade de nascimentos de fêmeas (cabeça) Quantidade de nascimentos de machos (cabeça) Número de lactações por vaca (média) Intervalo entre partos (médio em dias) Duração da lactação (média em dias) Destino de bezerros machos
5	Combustíveis e Energia	Diesel (l/ano) Gasolina (l/ano) Biodiesel (l/ano) Etanol anidro (l/ano) Etanol hidratado (l/ano) Rede/Grid (Kwh/ano) Eólica (Kwh/ano) Solar (Kwh/ano) Biogás (Kwh/ano)
6	Alimentação	Vacas em lactação (média kg/animal/dia) Vacas secas (média kg/animal/dia) Novilhas (média kg/animal/dia) Bezerras (média kg/animal/dia) Bezerros (média kg/animal/dia) Touros (média kg/animal/dia) Utiliza aditivos para redução de emissão entérica?
7	Detalhamento de ingredientes	Para cada ingrediente da dieta
8	Margem Bruta por litro de leite	
9	Margem Líquida por litro de leite	
10	Lucratividade	

Fonte: Dados da pesquisa (2026).

4 RESULTADOS

A intensidade média de emissão das propriedades leiteiras avaliadas foi de 1,52 kg de CO₂ equivalente por kilo de leite (kg CO₂eq/Kg FPCM). Quando analisadas sob a perspectiva territorial e por animal, as emissões absolutas atingiram a média de 9,99 toneladas de CO₂eq/ha/ano e 4,58 toneladas de CO₂eq/UA/ano (unidade animal), respectivamente. Em relação à partição das fontes geradoras de gases de efeito estufa (GEE), a produção de alimentos e o manejo de pastagens representaram a maior fração do impacto, respondendo por 48,2% do balanço total. O metano entérico foi a segunda fonte mais representativa, sendo responsável por 43,4% das emissões. Esse comportamento demonstra que o manejo nutricional do rebanho e a base agrícola de suprimentos constituem as principais fontes de intensidade de emissões nos sistemas de produção avaliados.

Tabela 2 - Estatística descritiva e caracterização da intensidade das emissões de gases de efeito estufa nas propriedades leiteiras avaliadas.

	n	Média	Mínimo	Máximo	Desvio padrão	CV%
Intensidade de emissão por produto	26	1,52	1,00	2,42	0,408	26,8
Intensidade de emissão por área	26	9,99	3,35	30,0	7,46	74,7
Emissão por Unidade animal	26	4,58	2,68	6,79	1,05	23,0

Fonte: Dados da pesquisa (2026).

Tabela 3 - Estatística descritiva e caracterização da composição de emissões de gases de efeito estufa nas propriedades leiteiras avaliadas.

	n	Média	Mínimo	Máximo	Desvio padrão	CV%
Manejo de dejetos (%)	26	6,62	2,41	11,5	2,40	36,1
Metano entérico (%)	26	43,4	31,4	61,5	7,55	17,4
Alimentação pastagem (%)	26	48,2	25,13	63,7	8,96	18,6

Fonte: Dados da pesquisa (2026).

Houve correlação negativa entre a participação de Alimentação e Pastagens nas emissões totais e a intensidade por produto ($r = -0,608$; $P = 0,001$). Já o metano entérico correlacionou-se positivamente com a emissão por produto ($r = 0,593$; $P = 0,001$), mas foi negativo quando avaliado em relação à intensidade por área ($r = -0,597$; $P = 0,001$).

Essa inversão justifica pela correlação negativa entre o metano entérico e a alimentação ($r = -0,981$; $P < 0,001$). À medida que o sistema se intensifica, com maior foco no aporte nutricional e manejo agrônômico, o perfil de impacto da propriedade muda. A relevância do metano diminui proporcionalmente, enquanto os impactos associados a pastagens e insumos crescem, o que acaba elevando a intensidade de emissão por hectare.

Tabela 4 - Correlações entre as métricas de intensidade de emissão e as proporções de partição dessas emissões nas propriedades leiteiras avaliadas.¹

	Emissão por área	Emissão por UA	% Partição da emissão – Combustíveis e energia	% Partição da emissão – Manejo de dejetos	% Partição da emissão – Metano Entérico	% Partição da emissão – Alimentação e pastagens
Intensidade de emissão por produto	-0,438 0,025	-0,500 0,009	-0,151 0,460	0,477 0,013	0,593 0,001	-0,608 0,001

¹ Em cada cruzamento de variáveis, o valor superior corresponde ao coeficiente de correlação de Pearson (r) e o valor inferior corresponde à significância estatística (P -valor).

Intensidade de emissão por área	-	0,832 <0,001	0,469 0,015	-0,627 <0,001	-0,597 0,001	0,610 <0,001
Emissão por Unidade animal	-	-	0,482 0,012	-0,699 <0,001	-0,647 <0,001	0,669 <0,001
Combustíveis e energia (%)	-	-	-	-0,462 0,017	0,072	-0,065 0,751
Manejo de dejetos (%)	-	-	-	-	0,486 0,018	-0,617 <0,001
Metano entérico (%)	-	-	-	-	-	-0,981 <0,001

Fonte: Dados da pesquisa (2026).

As propriedades leiteiras avaliadas apresentaram variabilidade em suas estruturas físicas e no tamanho dos rebanhos. A área total das propriedades registrou média de 110 hectares, compreendendo desde unidades com 14 hectares até sistemas de grande escala com 310 hectares. O tamanho do rebanho seguiu comportamento análogo de dispersão, registrando média de 231 UA, com amplitude de 27,6 a 1.049 UA. Em função dessas características, a taxa de lotação média fixou-se em 2,02 UA/ha, oscilando entre os limites de 0,80 e 4,42 UA/ha.

A produção diária de leite obteve média de 2.587 litros, englobando sistemas com escalas que variaram de 154 a 14.746 litros/dia. Consequentemente, a produtividade anual por área apresentou média de 7.581 litros/ha/ano (com amplitude de 1.583 a 22.710 litros/ha/ano), enquanto o rendimento individual das matrizes foi de 20,2 litros/vaca/dia, variando entre os limites de 9,77 e 33,6 litros/vaca/dia. No que se refere aos índices do rebanho, a relação média de vacas em lactação sobre o total de animais foi de 0,413 (mínima de 0,256 e máxima de 0,507), e a proporção calculada de vacas em lactação sobre o total de vacas atingiu a média de 0,827, com variação de 0,625 a 0,923.

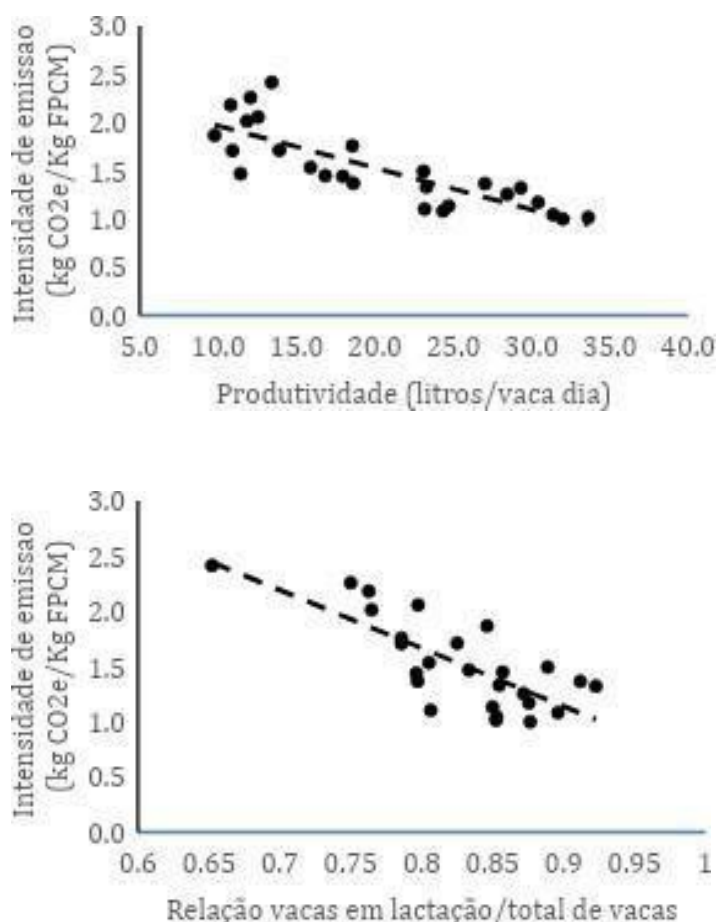
Tabela 5 - Estatística descritiva dos indicadores de área, índices zootécnicos, produtividade e qualidade do leite das propriedades avaliadas.

	n	Média	Mínimo	Máximo	Desvio padrão	CV%
Área da propriedade (ha)	26	110	14,0	310	64,2	58,0
Rebanho em Unidade Animal	26	231	27,6	1049	217	94,0
Taxa de lotação (UA/ha)	26	2,02	0,80	4,42	1,05	52,0
Produção de leite (litros/dia)	26	2.587	154	14.746	3271	126,4
Produtividade por área (litros/ha/ano)	26	7.581	1.583	22.710	6658	87,8
Produtividade por vaca (litros/vaca/dia)	26	20,2	9,77	33,6	7,72	38,2
Relação de vacas lactação em relação ao rebanho	26	0,413	0,256	0,507	0,062	15,1
Relação de vacas lactação em relação ao total de vacas	26	0,827	0,625	0,923	0,059	7,14
Proteína no leite (%)	26	3,35	3,05	3,50	0,11	3,41
Gordura no leite (%)	26	3,78	3,60	4,10	0,13	3,31

Fonte: Dados da pesquisa (2026).

A eficiência técnica do rebanho revelou-se um fator determinante na mitigação do impacto ambiental por unidade de produto. A análise da Tabela 6 evidenciou a existência de uma forte regressão linear negativa entre a intensidade de emissão por kilo de leite e a produtividade diária por animal ($r = -0,822$), tendência que é visualmente corroborada pela dispersão dos dados na Figura 2. O comportamento da linha de tendência demonstra na prática que propriedades com maior proporção de vacas em lactação ($r = -0,761$) e maior rendimento produtivo individual conseguem diluir as emissões de GEE por unidade de produto associados a manutenção do rebanho. Consequentemente, à medida que esses indicadores zootécnicos avançam positivamente, observa-se uma queda progressiva e consistente na curva de emissão de CO₂ equivalente, atestando a relação entre o aprimoramento do manejo técnico e a ecoeficiência do sistema.

Figura 2 - Regressão linear da intensidade de emissão (kg de CO₂ equivalente por kilo de leite) em função da produtividade animal (litros/vaca/dia) (A) e da proporção de vacas em lactação em relação ao total de vacas (B).



Fonte: Dados da pesquisa (2026).

Tabela 6 - Correlações entre as intensidades de emissões e as características estruturais, produtivas e zootécnicas nas propriedades avaliadas.

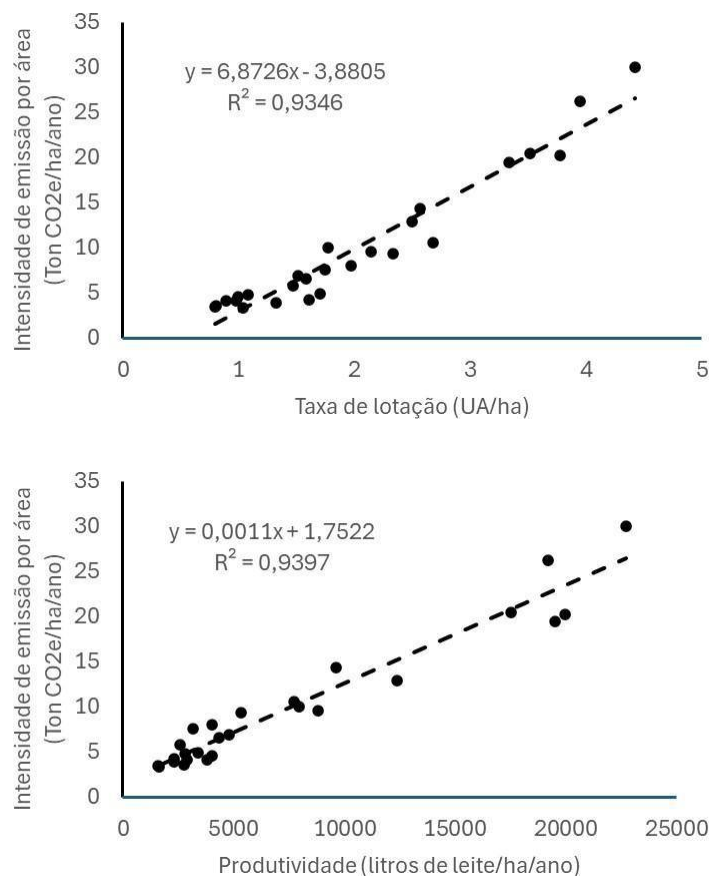
	Área da propriedade (ha)	Taxa de lotação (UA/ha)	Tamanho do Rebanho (animais)	Produção da Fazenda (litros/dia)	Produtividade de leite (Litros/ha/ ano)	Produtividade por animal (litros/vaca/ dia)	Relação vacas lactação/total do rebanho	Relação vacas lactação/Total de vacas	Proteína no Leite (%)	Gordura no Leite (%)
Intensidade de emissão por produto	-0,288 0,154	-0,410 0,037	-0,393 0,046	-0,464 0,016	-0,589 0,001	-0,822 <0,001	-0,446 0,022	-0,761 <0,001	-0,149 0,467	0,146 0,477
Intensidade de emissão por área	0,248 0,221	0,967 <0,001	0,877 <0,001	0,909 <0,001	0,722 <0,001	0,318 0,112	0,585 0,001	0,585 0,001	-0,076 0,710	-0,497 0,009
Emissão por Unidade animal	0,365 0,066	0,696 <0,001	0,727 <0,001	0,787 <0,001	0,822 <0,001	0,814 <0,001	0,401 0,041	0,575 0,002	-0,135 0,508	-0,572 0,002
Combustível e energia (%)	0.06818 0.7407	0.47783 0.0136	0.32743 0.1025	0.32664 0.1034	0.46866 0.0157	0.47438 0.0143	-0.21413 0.2935	0.02964 0.8857	-0.58762 0.0016	-0.09653 0.6390

	Área da propriedade (ha)	Taxa de lotação (UA/ha)	Tamanho do Rebanho (animais)	Produção da Fazenda (litros/dia)	Produtividade de leite (Litros/ha/ ano)	Produtividade por animal (litros/vaca/dia)	Relação vacas lactação/total do rebanho	Relação vacas lactação/Total de vacas	Proteína no Leite (%)	Gordura no Leite (%)
Manejo de dejetos (%)	-0.30763 0.1263	-0.53698 0.0047	-0.58105 0.0019	-0.62763 0.0006	-0.66015 0.0002	-0.60329 0.0011	-0.38883 0.0496	-0.41517 0.0349	0.10468 0.6108	0.42458 0.0306
Metano entérico (%)	-0.40885 0.0381	-0.50870 0.0080	-0.60007 0.0012	-0.64496 0.0004	-0.63297 0.0005	-0.64761 0.0003	-0.55692 0.0031	-0.75039 <.0001	-0.27064 0.1811	0.63404 0.0005
Alimentação e pastagens (%)	0.41781 0.0337	0.51064 0.0077	0.61868 0.0008	0.66904 0.0002	0.64941 0.0003	0.64579 0.0004	0.60051 0.0012	0.73918 <.0001	0.27541 0.1733	-0.63512 0.0005

Fonte: Dados da pesquisa (2026).

A avaliação da Figura 3 indicou que a taxa de lotação exibiu uma correlação linear fortemente positiva com a intensidade de emissão por área ($r = 0,967$). A dispersão dos dados ilustra que a intensificação do uso da terra, caracterizada pela concentração de um maior número de animais por hectare, aumentando a carga de gases de efeito estufa lançada no ambiente local. Visualmente, a linha de tendência ascendente corrobora que a busca pelo adensamento do rebanho resultou no acúmulo das emissões de GEE por área.

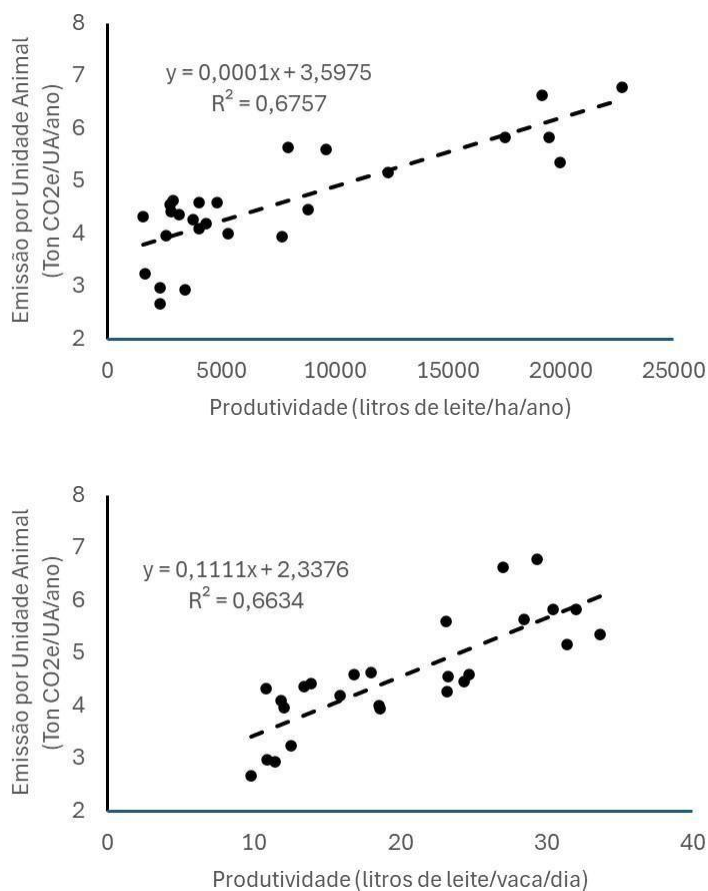
Figura 3 - Regressão linear da intensidade de emissão por área (toneladas de CO₂ equivalente/ha/ano) em função da taxa de lotação (UA/ha) (A) e da produtividade por área (litros de leite/ha/ano) (B).



Fonte: Dados da pesquisa (2026).

Esse padrão de intensificação foi corroborado pela relação com os índices de produtividade, conforme exposto na Figura 4. Tanto a produtividade por área quanto a produtividade por animal estiveram associadas positivamente à emissão medida por Unidade Animal, apresentando correlações expressivas de $r = 0,822$ e $r = 0,814$, respectivamente. A leitura conjunta destes gráficos permite inferir que vacas de alto rendimento inseridas em sistemas intensivos demandam maior aporte nutricional e energético, o que eleva as emissões absolutas de GEE emitida por cada indivíduo do rebanho, ainda que a intensidade de emissões por litro de leite produzido seja menor.

Figura 4 - Regressão linear da emissão por Unidade Animal (toneladas de CO₂ equivalente/UA/ano) em função da produtividade por área (litros de leite/ha/ano) (A) e da produtividade animal (litros de leite/vaca/dia) (B).



Fonte: Dados da pesquisa (2026).

Houve convergência entre o sucesso econômico e a eficiência climática por unidade de produto. Inicialmente, a caracterização de indicadores econômicos na Tabela 7 demonstrou que as fazendas avaliadas operaram com uma Margem Bruta Média de R\$ 0,48 por litro, Margem Líquida de R\$ 0,29 por litro e uma Lucratividade Geral de 11,5%. Ao confrontar esses índices de rentabilidade com a intensidade de emissão, a Tabela 8 e a distribuição visual da Figura 5 evidenciaram fortes correlações lineares negativas entre a intensidade de emissão por kilo de leite e as variáveis econômicas. O declínio de regressão demonstra que propriedades capazes de gerar margens financeiras otimizadas são, simultaneamente, aquelas que apresentam a menor emissão de GEE por litro de leite, consolidando a hipótese da ecoeficiência na produção de leite.

Tabela 7 - Estatística descritiva dos indicadores econômicos de Margem Bruta, Margem Líquida e Lucratividade das propriedades leiteiras avaliadas.

	n	Média	Mínimo	Máximo	Desvio padrão	CV%
Margem Bruta (R\$/litro)	26	0,48	0,06	0,92	0,26	51,9
Margem Líquida	26	0,29	-0,22	0,72	0,25	87,7
Lucratividade e (%)	26	11,5	-8,56	31,0	10,9	94,8

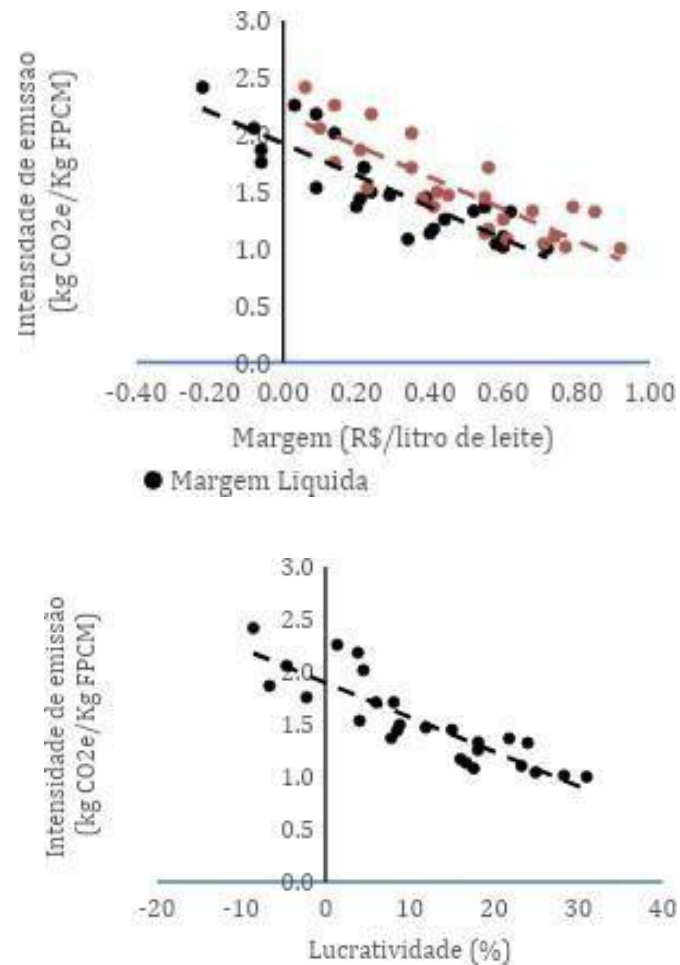
Fonte: Dados da pesquisa (2026).

Tabela 8 - Correlações entre as intensidades e frações de partição das emissões de gases de efeito estufa e os indicadores econômicos nas propriedades leiteiras avaliadas.

	Margem bruta	Margem Líquida	Lucratividade
Intensidade de emissão por produto	-0,842 <0,001	-0,861 <0,001	-0,873 <0,001
Intensidade de emissão por área	0,604 0,001	0,557 0,003	0,572 0,002
Emissão por Unidade animal	0,685 <0,001	0,658 <0,001	0,676 <0,001
Combustível e energia (%)	0.11811 0.5655	0.08624 0.6753	0.17666 0.3880
Manejo de dejetos (%)	-0.49741 0.0097	-0.45392 0.0198	-0.50340 0.0088
Metano entérico (%)	-0.69867 <0.0001	-0.65673 0.0003	-0.64521 0.0004
Alimentação e pastagens (%)	0.70625 <0.0001	0.66339 0.0002	0.65530 0.0003

Fonte: Dados da pesquisa (2026).

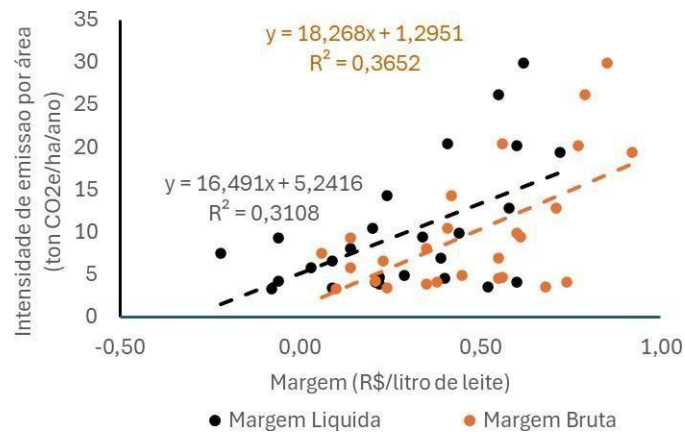
Figura 5 - Regressão linear da intensidade de emissão (kg de CO₂ equivalente por kilo de leite) em função dos valores de margem bruta e margem líquida (A) e da lucratividade das propriedades leiteiras avaliadas (B).

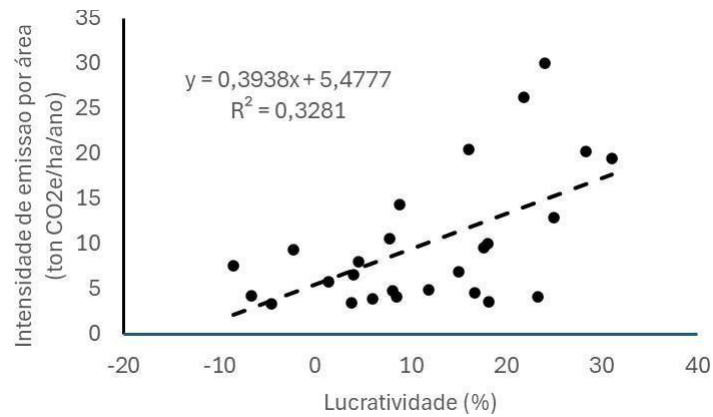


Fonte: Dados da pesquisa (2026).

Entretanto, quando os indicadores econômicos foram confrontados com as emissões absolutas nas perspectivas espacial e individual, a relação inverteu-se. A Figura 6 demonstra que o acréscimo nas margens e na lucratividade exigiu uma escala paralela nas emissões geradas por hectare, apresentando coeficientes de correlação (r) variando entre 0,557 e 0,604. Esse mesmo comportamento de incremento simultâneo refletiu-se na avaliação por Unidade Animal (Figura 7), onde a melhoria dos indicadores econômicos apresentou correlações positivas (r variando entre 0,658 e 0,685) com a intensidade de emissão individual. A análise conjunta destes gráficos evidencia que o aumento da viabilidade econômica nas fazendas pode estar intrinsecamente atrelado à intensificação dos sistemas de produção. Ou seja, vacas e áreas mais produtivas processam um volume substancialmente maior de insumos nutricionais e tecnológicos, o que resulta na elevação do volume total de carbono emitido por indivíduo e concentrado na propriedade.

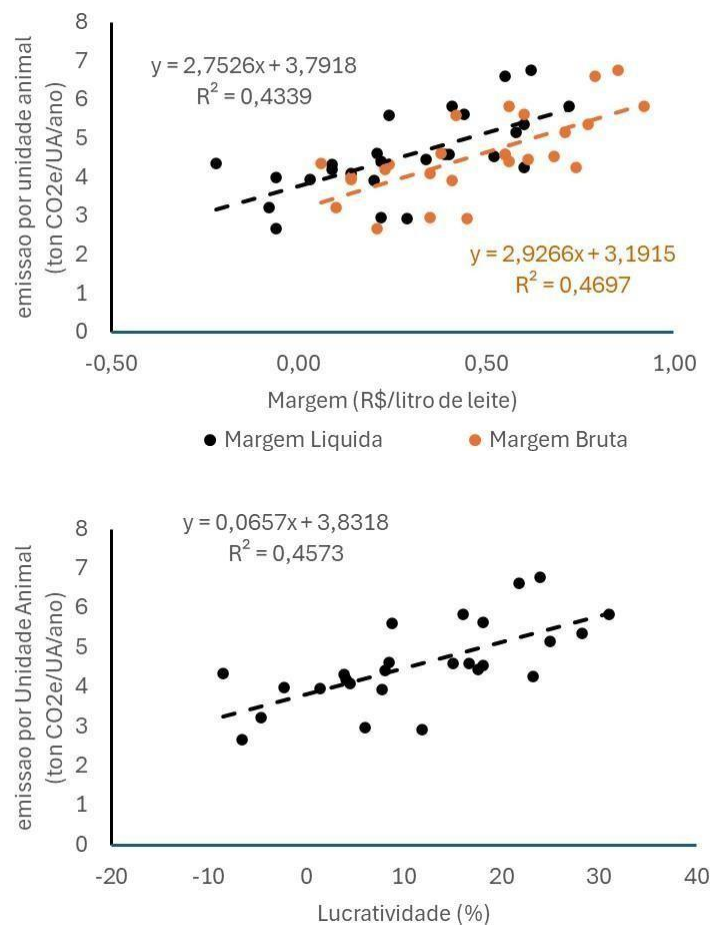
Figura 6 - Regressão linear da intensidade de emissão por área (toneladas de CO₂ equivalente/ha/ano) em função dos valores de margem bruta e margem líquida (A) e da lucratividade das propriedades leiteiras avaliadas (B).





Fonte: Dados da pesquisa (2026).

Figura 7 - Regressão linear da emissão por Unidade Animal (toneladas de CO₂ equivalente/UA/ano) em função dos (A) valores de margem bruta e margem líquida e da (B) lucratividade das propriedades leiteiras avaliadas.



Fonte: Dados da pesquisa (2026).

5 DISCUSSÃO

A intensidade média de emissão analisada nas propriedades leiteiras do Centro-Oeste de Minas Gerais evidenciou um nível de tecnificação e eficiência ambiental superior quando contrastada com as médias históricas de sistemas extensivos da América Latina (FAO, 2010). O desempenho alcançado por esse grupo produtivo demonstra que a adoção de tecnologias de manejo permite que a pecuária leiteira regional se aproxime dos padrões de eficiência observados em sistemas intensivos de referência internacional (PILVERE, 2025). Essa realidade pode ser explicada pelo impacto da incorporação de capital e assistência técnica ao longo dos anos, neste grupo de produtores, consolidando o entendimento de que a modernização da atividade leiteira é um vetor viável para a redução de intensidade de emissão por unidade de produto gerado.

A alteração na composição quantitativa das fontes emissoras revela uma quebra do padrão convencional da pecuária leiteira de baixa produtividade, na qual o metano entérico é amplamente dominante. O fato da produção de alimentos e o manejo de pastagens despontarem como a maior fração das emissões, ultrapassando a fermentação entérica e atingindo picos de até 61% da intensidade de emissão total em determinadas propriedades, decorre do processo de intensificação agrônômica. A produção de metano por unidade de alimento consumido varia dentro de limites biológicos estreitos, contudo, a busca por altas produtividades exige um aporte de insumos externos, como fertilizantes nitrogenados na produção de volumosos e o fornecimento de rações concentradas comerciais. Esse cenário desloca a principal carga ambiental do metabolismo direto do animal para a base agrícola extrativa, demandando alta energia fóssil e uso intensivo da terra para sustentar o suprimento nutricional do rebanho (MOGOLLÓN et al., 2026; OLIVEIRA et al., 2025).

Esse deslocamento para a base alimentar justifica o papel do incremento da fração de alimentos concentrados como um diluidor da intensidade de emissão por litro de leite. Trata-se da aplicação prática do princípio biológico da diluição das necessidades fisiológicas de manutenção (CAPPER, 2011). Ao elevar a densidade energética da dieta com alimentos de alta digestibilidade, uma proporção substancialmente maior dos nutrientes consumidos é direcionada para a síntese láctea em detrimento do metabolismo basal de sobrevivência do animal. Embora o consumo absoluto de insumos aumente, o volume de metano entérico gerado é distribuído por uma quantidade significativamente maior de leite ordenhado, reduzindo o impacto ambiental relativo por litro comercializado.

Além do manejo nutricional, a estrutura do rebanho consolidou-se como um pilar biológico para a mitigação das emissões de GEE nas propriedades. A estreita associação encontrada entre a emissão por produto e a proporção de vacas em lactação reforça que a ineficiência reprodutiva atua como um severo passivo ambiental e econômico. Sistemas de produção que mantêm uma baixa relação de vacas em lactação sobre o total do efetivo carregam o custo energético e ambiental de uma massa de animais improdutivos (vacas secas com períodos de serviço prolongados, novilhas com idade ao primeiro parto atrasada e bezerras com baixo desenvolvimento), os quais emitem gases diariamente sem gerar produto para diluir o impacto basal do rebanho. A otimização dos índices reprodutivos atua, portanto, eliminando o desperdício de energia biológica circulante no sistema de produção (PILVERE, 2025).

A intersecção dessas dinâmicas biológicas com os indicadores financeiros valida a premissa de que o sucesso econômico e a responsabilidade ambiental caminham de forma integrada na pecuária leiteira em sistemas produtivos intensificados. As fortes correlações negativas obtidas entre a emissão por kilo de leite e as margens econômicas (bruta e líquida), bem como com a lucratividade, revelam que a mitigação do carbono é o reflexo direto de uma excelência gerencial. Propriedades que alcançam alta eficiência zootécnica convertem insumos (como concentrados e fertilizantes) em produto faturável de forma mais eficaz. Inversamente, sistemas com baixa produtividade desperdiçam recursos financeiros em dietas de baixa conversão, gerando simultaneamente prejuízo contábil ao produtor e maior liberação residual de poluentes por unidade produzida.

No entanto, a avaliação da expressão territorial desses sistemas mostra uma dualidade crítica inerente à intensificação. A intensificação produtiva, embora reduza a intensidade de emissão por quilograma de leite devido à diluição pela maior produtividade animal e reduza a necessidade de abertura de novas áreas para produção de alimento, induz o aumento substancial nas emissões absolutas por hectare, em função da elevação da taxa de lotação. Esse paradoxo territorial implica que a maximização da rentabilidade, no modelo de produção vigente, pode elevar a pressão ambiental por unidade de área a patamares que desafiam a capacidade de suporte local. Na prática, a busca por maiores margens econômicas exige o adensamento do rebanho e o uso concentrado de insumos na mesma superfície útil, o que resulta em uma elevada liberação global de gases de efeito estufa e de dejetos no território. Caso esse limite ecossistêmico seja negligenciado, a intensificação contínua contribuirá para a degradação ambiental local, gerando passivos como a compactação do solo e a eutrofização de corpos

d'água, o que acaba por retroagir sobre a própria atividade, comprometendo a sustentabilidade e a eficiência futura dos sistemas leiteiros (MOGOLLÓN et al., 2026).

Diante dessa dualidade, torna-se evidente que o avanço sustentável da pecuária leiteira no Centro-Oeste de Minas Gerais não pode se basear unicamente no incremento isolado da produção. É necessário o desenvolvimento de políticas públicas integradas, como a expansão das linhas de crédito do Plano ABC+ e programas estaduais que subsidiem o produtor na transição para tecnologias de intensificação sustentável. Paralelamente, o setor empresarial e as cooperativas de laticínios devem liderar esforços na difusão de assistência técnica e gerencial focada na economia circular, estimulando a agricultura regenerativa, o manejo conservacionista de pastagens, a integração lavoura-pecuária e o uso de separador de sólidos e biodigestores para a gestão de resíduos. Através do fortalecimento dessa rede de apoio institucional será possível canalizar os ganhos de lucratividade das fazendas para investimentos estruturais, garantindo que a redução da intensidade de emissão de GEE por unidade de produto resulte também na preservação real e duradoura do território, permitindo sempre alcançar altas produtividades.

6 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste estudo demonstram que o sucesso financeiro e a ecoeficiência na pecuária leiteira caminham de forma integrada, confirmando a hipótese de que a melhoria dos índices produtivos e gerenciais reduz diretamente a intensidade de emissões de gases de efeito estufa por kilo de leite produzido. No entanto, para que as estratégias de mitigação ambiental sejam eficazes na prática, o planejamento do setor não deve se limitar ao controle isolado da digestão dos animais. O avanço na tecnificação desloca a maior parte dos impactos para a base agrônômica das propriedades, o que exige dos técnicos e produtores intervenções direcionadas no manejo correto das pastagens, no uso racional de insumos e na escolha estratégica dos alimentos que compõem a dieta do rebanho.

Além disso, o planejamento territorial e as tomadas de decisão no campo precisam enfrentar o paradoxo da intensificação convencional, uma vez que o aumento da produção concentrada na mesma área útil eleva significativamente as emissões absolutas por hectare, ao mesmo passo que reduz a necessidade de abertura de novas áreas para produção de alimentos. Para mitigar esse impacto local, torna-se indispensável o fortalecimento de políticas públicas e de ações conjuntas entre cooperativas e indústrias de laticínios, fortalecendo a assistência técnica e direcionando linhas de fomento e crédito, para dar suporte técnico ao produtor. O apoio financeiro e o ganho em escala devem estar condicionados à adoção de práticas de economia circular, tratamento eficiente de resíduos e conservação do solo, garantindo sempre altas produtividades da terra e que a lucratividade da atividade cresça em harmonia com a preservação e a capacidade de suporte dos ecossistemas da região.

7 IMPLICAÇÕES E CONTEXTUALIZAÇÃO NO ÂMBITO DO PRS – CERRADO

Este trabalho foi desenvolvido com o propósito de avaliar a correlação entre sustentabilidade ambiental e rentabilidade na atividade leiteira no Centro-Oeste de Minas Gerais. A execução da pesquisa, que compreendeu a coleta de dados relativos ao período entre julho de 2023 a junho de 2024, permitiu validar as premissas estabelecidas pelo Projeto Rural Sustentável (PRS – Cerrado).

Os produtos e resultados gerados por este estudo confirmam que fazendas com indicadores zootécnicos e econômicos superiores apresentam, efetivamente, uma menor intensidade de emissão por unidade de produto. Tal evidência é fundamental para desmistificar a percepção de que o investimento em tecnologias ambientalmente sustentáveis e em técnicas de manejo para mitigação de gases de efeito estufa representa um custo desnecessário. Pelo contrário, os dados demonstram que essas práticas são aliadas estratégicas no aumento da produtividade e da margem líquida do produtor.

Dessa forma, o presente estudo pretende contribuir com evidências técnicas para o favorecimento de políticas públicas e estratégias de assistência técnica e gerencial no bioma Cerrado. Os impactos esperados incluem o fortalecimento da pecuária de baixa emissão de carbono, provando que a prosperidade do agronegócio regional depende indissociavelmente do equilíbrio entre a conservação ambiental, a responsabilidade social e a excelência na eficiência técnica e gestão econômica.

REFERÊNCIAS

- ABRAMOVAY, R. Desenvolvimento sustentável: qual a estratégia para o Brasil?. **Novos Estudos CEBRAP**, São Paulo, n. 87, p. 97-113, 2010.
- AVILA, S. R. S. A. D.; AVILA, M. L. D.; ALTAFIN, I. G. Expansão canavieira no cerrado goiano: crescimento econômico é desenvolvimento?. **Organizações Rurais & Agroindustriais**, Lavras, v. 13, n. 3, p. 317-329, 2011.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Ferramenta de Cálculo Brasil: guia metodológico para quantificação de emissões de gases de efeito estufa na agropecuária**. Brasília: MAPA, 2023.
- CAPPER, J. L. The environmental sustainability of dairy production: replacing rose-tinted spectacles with a high-resolution lens. **Journal of Animal Science**, Champaign, v. 89, n. 12, p. 4198-4206, 2011.
- CAPPER, J. L. The relationship between cow production and environmental impact. **Advances in Dairy Technology**, Edmonton, v. 23, p. 81-93, 2011.
- DE MELLO, J. S.; GOMES, E. G. Eficiências aeroportuárias: uma abordagem comparativa com análise de envoltória de dados. **Revista de Economia e Administração**, São Paulo, v. 3, n. 1, p. 1-15, 2004.
- FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **The future of food and agriculture: Alternative pathways to 2050**. Rome: FAO, 2018.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). **Greenhouse gas emissions from the dairy sector: a life cycle assessment**. Rome: FAO, 2010. 98 p. Disponível em: <https://www.fao.org/4/k7930e/k7930e00.pdf>. Acesso em: 27 abr. 2026.
- GERBER, P. J.; HENDERSON, B.; MOTTET, A. **Mitigation of greenhouse gas emissions in livestock production: a review of technical options for non-CO₂ emissions**. Rome: FAO, 2013.
- GOMES, S. T. **Análise histórica e perspectivas da oferta e da demanda do leite do Brasil**. Viçosa: UFV, 1995. 12 p.
- GOMES, S. T. A viabilidade do leite em São Paulo. **Leite B**, São Paulo, v. 11, n. 123, p. 10-21, 1997.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Agropecuário 2017: Resultados Definitivos**. Rio de Janeiro: IBGE, 2017. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br>. Acesso em: 21 jun. 2026.
- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pesquisa da Pecuária Municipal 2022**. Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br>. Acesso em: 21 jun. 2026.

IDF – INTERNATIONAL DAIRY FEDERATION. The IDF common carbon footprint approach for the dairy sector: bulletin of the International Dairy Federation n. 479/2015. Brussels: IDF, 2015.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Geneva: IPCC, 2019.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.

LANA, C. M. Sistema de apoio à decisão no planejamento da produção de leite na região de Viçosa, Minas Gerais. 2002. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2002.

LOPEZ-VILLALOBOS, N. et al. Prediction of effects of dairy selection indexes on methane emissions. **Journal of Dairy Science**, Champaign, v. 102, n. 11, p. 10123-10134, 2019. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31587912/>. Acesso em: 27 abr. 2026.

MOGOLLÓN, J. M. et al. Broad bidirectional effects of global food production on the environment. **Nature Reviews Earth & Environment**, London, v. 7, p. 1-18, 2026. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s43017-026-00778-y>. Acesso em: 18 maio 2026.

ONU – ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. World Population Prospects 2022: Summary of Results. New York: United Nations, 2022.

OLIVEIRA, P. P. A. et al. (ed.). Protocolos de boas práticas para a mitigação de gases do efeito estufa em sistemas de produção de bovinos. Brasília, DF: Embrapa, 2025. 165 p. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1181285/1/2025-cppse-livro-ppao-protocolos-boas-praticas-mitigacao-gases-efeito-estufa-sistemas-producao-bovinos.pdf>. Acesso em: 27 abr. 2026.

PENIDO, C. Caderno da pecuária sustentável. **AgroANALYSIS**, São Paulo, v. 39, n. 11, p. 34-38, 2019.

PILVERE, A. Efficiency and emissions performance in Latvian dairy farming: an LCA-based comparison across farm sizes. **Agriculture**, Basel, v. 15, n. 11, art. 2201, p. 1-21, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agriculture15212201>. Acesso em: 27 abr. 2026.

SAS INSTITUTE INC. SAS/STAT software: version 9.4. Cary, NC: SAS Institute Inc., 2013.

ROCHA, D. S. D. Potencialidades do uso de um sistema WebGIS na pecuária de

precisão: Estudo de caso Embrapa Pecuária Sul. 2014. Monografia (Especialização em Geomática) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

RUSSELL, S.; PARSONS, S. **Nova ferramenta para agropecuária de baixo carbono no Brasil**. Rio de Janeiro: World Resources Institute (WRI) Brasil, 2015.