



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Câmpus de São José do Rio Preto (IBILCE)/
Araraquara (FCF)

Sophia Aparecida Morro Chamilete

Balanço de Gases de Efeito Estufa em Sistemas Leiteiros de Clima Tropical

Araraquara
2024

Sophia Aparecida Morro Chamilete

Balço de Gases de Efeito Estufa em Sistemas Leiteiros de Clima Tropical

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Alimentos e Nutrição, junto ao Programa de Pós-Graduação de Alimentos, Nutrição e Engenharia de Alimentos, do Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas e Faculdade de Ciências Farmacêuticas da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Câmpus de São José do Rio Preto e Araraquara.

Financiadora: CNPq – Proc. 131266/2022-5

Orientadora: Dr^a. Renata Tiekó Nassu

Coorientadora: Dr^a. Teresa Cristina Alves

Araraquara
2024

C448b Chamilete, Sophia Aparecida Morro
Balanço de Gases de Efeito Estufa em Sistemas Leiteiros de Clima Tropical / Sophia Aparecida Morro Chamilete. – Araraquara, 2024.
115 f. : il.

Orientadora: Renata Tieko Nassu.
Coorientadora: Teresa Cristina Alves.

Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação de Alimentos, Nutrição e Engenharia de Alimentos, do Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas e Faculdade de Ciências Farmacêuticas da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"

1. Bovinocultura leiteira. 2. Mudança climática. 3. Segurança alimentar. I. Nassu, Renata Tieko, orient. II. Alves, Teresa Cristina, coorient. II. Título.

Diretoria do Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação - Faculdade de Ciências Farmacêuticas
UNESP - Campus de Araraquara

CAPES: 33004153070P3
Esta ficha não pode ser modificada

Sophia Aparecida Morro Chamilete

Balço de Gases de Efeito Estufa em Sistemas Leiteiros de Clima Tropical

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Alimentos e Nutrição, junto ao Programa de Pós-Graduação de Alimentos, Nutrição e Engenharia de Alimentos, do Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas e Faculdade de Ciências Farmacêuticas da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Câmpus de São José do Rio Preto e Araraquara.

Financiadora: CNPq – Proc. 131266/2022-5

Comissão Examinadora

Dr^a. Renata Tieko Nassu
Embrapa Pecuária Sudeste
Orientadora

Dr^a. Patrícia Perondi Anção Oliveira
Embrapa Pecuária Sudeste

Dr. André Luiz Monteiro Novo
Embrapa Pecuária Sudeste

Araraquara
18 de Julho de 2024

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus, pela resiliência para chegar até aqui.

Aos meus pais por todo apoio e incentivo indispensáveis nessa jornada.

Aos meus colegas Jaqueline Bruno, Henrique Felipe e Althieres Furtado por todo apoio e auxílio.

Ao meu namorado Caique Matheus Canonico Bróis por todo apoio.

Às minhas orientadoras, Dra. Renata Tiekko Nassu e Dra. Teresa Cristina Alves pelos muitos ensinamentos e conselhos dados, assim como pela confiança depositada.

Aos membros da banca avaliadora, pelo tempo dedicado para o enriquecimento deste trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa concedida.

À toda equipe de pesquisadores da Embrapa Pecuária Sudeste, que contribuíram para a realização deste projeto, agradeço pelos ensinamentos tanto pessoais como profissionais.

Aos funcionários do setor de bovinocultura leiteira da Embrapa Pecuária Sudeste pelos valiosos ensinamentos durante minha trajetória.

À toda equipe da indústria de laticínios Nestlé que colaboraram de forma empenhada para a realização deste projeto, além dos ensinamentos adquiridos.

A todos que de alguma forma contribuíram nessa jornada, direta ou indiretamente.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

A TODOS, MEUS SINCEROS AGRADECIMENTOS!

RESUMO

A pecuária leiteira brasileira é atividade relevante em termos econômicos e sociais. A agropecuária nacional é responsável por 28,5% das emissões brasileiras de gases de efeito estufa (GEE), sendo a atividade leiteira responsável por cerca de 3% das emissões de GEE do Brasil em 2020. O objetivo deste estudo foi estimar o potencial de emissão de metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O) e dióxido de carbono (CO_2), remoção de GEE e balanço de carbono na produção primária, bem como a composição química e padrões higiênico-sanitários de leite de propriedades leiteiras em condições tropicais, considerando os diferentes sistemas de produção. Foram selecionadas 18 propriedades leiteiras, de acordo com seu sistema de produção, classificadas em sistemas com acesso ao pasto (AP) e confinados (C). Foi realizada uma visita em cada propriedade para aplicação de questionário e coleta de dados. A metodologia utilizada para obtenção das estimativas de emissões e remoções de GEE apresentadas, neste estudo, fundamentou-se nas diretrizes do Inventário Nacional de Gases de Efeito Estufa, do Painel Intergovernamental sobre Mudança Climáticas e do Quarto Inventário Nacional de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa. Após o cálculo das emissões de GEE, foram contabilizadas as remoções de GEE e, posteriormente, calculou-se o balanço de carbono dos sistemas de produção. Por fim, foi calculada a quantidade de árvores necessárias para a neutralização do sistema de produção. Ademais, foram analisados dados de composição e padrões higiênico-sanitários do leite. Inicialmente, foram realizadas análises descritivas no R com o auxílio do *software* RStudio. Em seguida, realizou-se o teste de Monte Carlo com o objetivo de avaliar o efeito dos sistemas de produção. Os sistemas AP foram caracterizados como semi-intensivos, apresentando média de 97,68 hectares (ha), menor produtividade de 6.213,33 kg leite/lactação ($p < 0,001$) e 19,13 litros leite/dia ($p < 0,001$), maior teor de gordura do leite (3,93%) ($p = 0,007$) e maior relação concentrado:leite (média 0,46 kg concentrado/litro leite) ($p = 0,045$) comparados aos sistemas C. Além disso, apresentaram menor emissão de CH_4 entérico (134,48 kg CH_4 /vaca/ano) ($p = 0,017$), de CH_4 dos dejetos (43,24 kg CH_4 /vaca/ano) ($p = 0,042$), de N_2O direto dos dejetos (0,61 kg N_2O /vaca/ano) ($p = 0,015$), N_2O indireto dos dejetos (0,84 kg N_2O /vaca/ano) ($p = 0,035$), menor intensidade de emissão de GEE provenientes dos dejetos (1.839,18 kg CO_2eq /vaca lactante/ano) ($p = 0,025$), bem como maior intensidade de remoção de GEE, média de 0,175 kg CO_2eq /kg FPCM comparados aos sistemas confinados. Os sistemas C, por sua vez, foram caracterizados como sistemas intensivos, apresentando média de 95,80 ha, com maior produtividade (10.089,92 kg leite/lactação) ($p < 0,001$) e 31,67 litros leite/dia ($p < 0,001$). Além disso, sistemas C apresentaram menores intensidade de emissão

proveniente do CH₄ entérico (0,557 kg CO₂eq/kg FPCM) (p <0,001), produção e aquisição de alimentos (0,361 kg CO₂eq/kg FPCM) (p=0,009), intensidade de emissão de GEE (1,173 kg CO₂eq/kg FPCM) (p<0,001) e, conseqüentemente, menor intensidade do balanço de carbono (1,137 kg CO₂eq/kg FPCM) (p<0,001) comparados aos sistemas AP. Em relação à composição e padrões higiênico-sanitários, todas as propriedades apresentaram-se dentro do padrão estabelecido pela IN 58, referente ao leite cru refrigerado. Para ambos os sistemas, verificou-se que a maior fonte de GEE foi a fermentação entérica (47,4%), seguida da produção e aquisição de alimentos (33,8%) e dejetos (18,8%). Em conclusão, os sistemas de produção AP e C demonstraram desempenhos semelhantes em termos de volume anual de leite produzido e eficazes em manter padrões higiênico-sanitários. No entanto, sistemas AP apresentaram maior teor de gordura no leite. Os sistemas C demonstraram-se mais sustentáveis em relação à intensidade de emissão de GEE por leite produzido e corrigido para gordura e proteína, embora sistemas AP tenham apresentado maior capacidade de remoção de GEE, além de área disponível para plantio de árvores em comparação com sistemas C, podendo contribuir positivamente para a mitigação das mudanças climáticas, desde que sejam adotadas práticas de manejo adequadas.

Palavras-chave: Bovinocultura leiteira; Mudança climática; Segurança alimentar.

ABSTRACT

Brazilian dairy farming is an activity of great economic and social relevance. National agriculture is responsible for 28.5% of Brazilian greenhouse gas (GHG) emissions, with dairy farming accounting for around 3% of Brazil's GHG emissions in 2020. The objective of this study was to estimate the potential for methane (CH₄), nitrous oxide (N₂O), and carbon dioxide (CO₂) emissions, GHG removal, and carbon balance in primary production, as well as the chemical composition and hygienic-sanitary standards of milk from dairy farms in tropical conditions, considering different production systems. Eighteen dairy farms were selected, according to their production system, classified into pasture access (PA) and confined (C) systems. A visit was made to each property to apply a questionnaire and collect data. The methodology used to obtain the emission estimates presented in this study was based on the guidelines of the National Greenhouse Gas Inventory, the Intergovernmental Panel on Climate Change, and the Fourth National Inventory of Anthropogenic Emissions and Removals of Greenhouse Gases. After calculating GHG emissions, soil GHG removals were accounted for, and then the carbon balance of the production systems was calculated. Finally, the number of trees needed to neutralize the system was counted. In addition, data on the composition and hygienic-sanitary standards of milk were analyzed. Initially, descriptive analyzes were performed in R with the aid of the RStudio software, followed by the Monte Carlo test to evaluate the effect of production systems. PA systems were characterized as semi-intensive, presenting an average of 97.68 hectares (ha), lower productivity of 6,213.33 kg milk/lactation ($p < 0.001$) and 19.13 liters milk/day ($p < 0.001$), higher milk fat content (3.93%) ($p = 0.007$) and higher concentrate:milk ratio (average 0.46 kg concentrate/liter milk) ($p = 0.045$) compared to C systems. In addition, they presented lower enteric CH₄ emission (134.48 kg CH₄/cow/year) ($p = 0.017$), manure CH₄ (43.24 kg CH₄/cow/year) ($p = 0.042$), direct N₂O from manure (0.61 kg N₂O/cow/year) ($p = 0.015$), indirect N₂O from manure (0.84 kg N₂O/cow/year) ($p = 0.035$), lower GHG emission intensity from manure (1,839.18 kg CO₂eq/lactating cows/year) ($p = 0.025$), as well as higher GHG removal intensity (average of 0.175 kg CO₂eq/kg FPCM) compared to confined systems. C systems, on the other hand, were characterized as intensive systems, presenting an average of 95.80 ha, with higher productivity of 10,089.92 kg milk/lactation ($p < 0.001$) and 31.67 liters milk/day ($p < 0.001$) compared to PA. In addition, C systems presented lower emission intensity from enteric CH₄ (0.557 kg CO₂eq/kg FPCM) ($p < 0.001$), production and acquisition of food (0.361 kg CO₂eq/kg FPCM) ($p = 0.009$), as well as lower GHG emission intensity (1.173 kg CO₂eq/kg FPCM) ($p < 0.001$) and, consequently, lower

carbon balance intensity (1.137 kg CO₂eq/kg FPCM) (p<0.001) compared to PA. In terms of composition and hygienic-sanitary standards, all properties were found to be within the standard established by IN No. 58, regarding refrigerated raw milk. For both systems, it was found that the major source of GHG was enteric fermentation (47.4%), followed by food production and acquisition (33.8%) and manure (18.8%). PA and C production systems showed similar performances in terms of annual volume of milk produced and were effective in maintaining hygienic-sanitary standards. However, PA systems had a higher milk fat content. C systems are more sustainable in relation to the intensity of GHG emissions per milk produced and corrected for fat and protein, although pasture systems have a greater capacity for GHG removal, in addition to the area available for planting trees compared to C systems, and can contribute positively to climate change mitigation, provided that proper management practices are adopted.

Keywords: Climate change; Dairy cattle farming; Food security.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Proporção de vacas adultas (%) e recria (%) em relação ao rebanho total, dos sistemas de produção AP (n=6) e C (n=12) visitados nas regiões de São Paulo, Minas Gerais e Goiás, no ano de 2023.....	61
Figura 2 – Proporção da emissão das vacas lactantes em relação ao rebanho total, provenientes do CH ₄ entérico e dejetos dos sistemas de produção de leite AP (n=6) e C (n=12) visitados das regiões de São Paulo, Minas Gerais e Goiás, no ano de 2023.....	62
Figura 3 – Médias das intensidades de emissões de GEE por vaca lactante (kg CO ₂ eq/vaca lactante/ano) provenientes da fermentação entérica, dejetos e produção e aquisição de alimentos dos sistemas de produção de leite AP (n=6) e C (n=12) visitados das regiões de São Paulo, Minas Gerais e Goiás, no ano de 2023.	67
Figura 4 – Médias das intensidades de emissões de GEE, remoções de GEE e balanço de carbono por vacas lactantes no rebanho (kg CO ₂ eq/vaca lactante/ano) dos sistemas de produção de leite AP (n=6) e C (n=12) visitados das regiões de São Paulo, Minas Gerais e Goiás, no ano de 2023.	69
Figura 5 – Médias de intensidades de emissões de CH ₄ entérico, dejetos e produção e aquisição de alimentos por leite produzido e corrigido para gordura e proteína (kg CO ₂ eq/kg FPCM) dos sistemas de produção de leite AP (n=6) e C (n=12) visitados das regiões de São Paulo, Minas Gerais e Goiás, no ano de 2023.	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Fator de conversão de CH ₄ , porcentagem da energia bruta ingerida por ruminantes convertida em CH ₄	39
Tabela 2 – Fator de emissão direta de N ₂ O (EF ₃) para estimativa das emissões de sistemas de manejo de dejetos de bovinos leiteiros, conforme propriedades visitadas.	42
Tabela 3 – Fator de perda de nitrogênio por volatilização (Frac _{Gas} MS) e lixiviação (Frac _{Leach} MS) para cada manejo de dejetos para bovinos leiteiros.	44
Tabela 4 – Fatores para emissões de N ₂ O provenientes da volatilização e lixiviação.	45
Tabela 5 – Fatores de emissão de N ₂ O direto e indireto provenientes dos dejetos depositados a pasto, não manejados.	47
Tabela 6 – Dados referentes à produção e qualidade do leite dos sistemas de produção com acesso ao pasto (n=6) e confinados (n=12), que foram visitados nas regiões de São Paulo, Minas Gerais e Goiás, no ano de 2023.	58
Tabela 7 – Parâmetros da dieta das vacas lactantes alocadas nos sistemas de produção de leite AP (n=6) e C (n=12) visitados nas regiões de São Paulo, Minas Gerais e Goiás, no ano de 2023.	62
Tabela 8 – Emissões da vaca lactante provenientes do CH ₄ entérico e dejetos dos animais dos sistemas de produção de leite AP (n=6) e C (n=12) visitados nas regiões de São Paulo, Minas Gerais e Goiás, no ano de 2023.	65
Tabela 9 – Médias de intensidades de emissão e remoção de GEE, e balanço de carbono por hectare (kg CO ₂ eq/ha/ano) dos sistemas de produção de leite AP (n=6) e C (n=12) visitados das regiões de São Paulo, Minas Gerais e Goiás, no ano de 2023.	70
Tabela 10 – Médias das intensidades de emissão e remoção de GEE total, além de intensidade do balanço de carbono por leite produzido e corrigido para gordura e proteína (kg CO ₂ eq/kg FPCM) dos sistemas de produção de leite AP (n=6) e C (n=12) visitados das regiões de São Paulo, Minas Gerais e Goiás, no ano de 2023.	73

LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS

GEE	Gases de Efeito Estufa
COP-26	26ª Conferência das Partes
Plano ABC+	Plano Setorial para Adaptação à Mudança do Clima e Baixa Emissão de Carbono na Agropecuária com Vistas ao Desenvolvimento Sustentável
ESG	Environment, Social and Governance (Ambiental, Social e de Governança)
IN 58	Instrução Normativa nº 58
MAPA	Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento
CCS	Contagem de Células Somáticas
CPP	Contagem Padrão em Placas
ST	Sólidos Totais
SD	Sólidos Desengordurados
AGRE CALC	Agriculture Resource Farm Calculator
COMET-FARM	Carbon Management Evaluation Tool
CFT	Cool Farm Tool
AFOLU	Agriculture, Forestry, and Other Land Use (Agricultura, Floresta e Outro Uso da Terra)
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas)
ONU	Organização das Nações Unidas
FE	Fator de emissão
EUA	Estados Unidos da América
FAO	Food and Agriculture Organization (Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura)
FPCM	Fat and Protein Corrected Milk (Leite Produzido e Corrigido para Gordura e Proteína)
ILP	Integração Lavoura-Pecuária
IPF	Integração Pecuária-Floresta
ILF	Integração Lavoura-Floresta
ILPF	Integração Lavoura-Pecuária-Floresta
MO	Matéria Orgânica
PC	Pegada de Carbono

ONG	Organização Não Governamental
EST	Extrato Seco Total
ESD	Extrato Seco Desengordurado
AP	Sistemas de Produção à Base de Pasto
C	Sistemas Confinados
MG	Minas Gerais
SP	São Paulo
GO	Goiás
NE_m	Net Energy for Maintenance (Energia Líquida de Manutenção)
NE_a	Net Energy for Activity (Energia Líquida de Atividade)
NE_g	Net Energy for Growth (Energia Líquida de Crescimento)
NE_l	Net Energy for Lactation (Energia Líquida para Lactação)
NE_{work}	Net Energy for Work (Energia Líquida para Trabalho)
NE_p	Net Energy for Pregnancy (Energia Líquida para Gestação)
REM	Ratio of Net Energy Available in Diet for Maintenance to Digestible Energy Consumed (Taxa de Energia Líquida Utilizada para a Manutenção)
REG	Ratio of Net Energy Available for Growth in a Diet to Digestible Energy Consumed (Taxa de Energia Líquida Utilizada para Crescimento)
GE	Gross Energy (Ingestão da Energia Bruta)
DE	Digestible Energy (Energia Digestível)
NRC	National Research Council (Conselho Nacional de Pesquisa)
EF	Emission Factor (Fator de Emissão)
Y_m	Taxa de Conversão de Metano
FDN	Fibra em Detergente Neutro
N	Número de Cabeça Animal
T	Categoria Animal
P	Sistema de Produção
S	Sistema de Manejo de Dejetos
N_{ex}	Annual Average N Excretion (Excreção Anual de N)
N_{intake}	Intake of N (Ingestão de N)
N_{retention}	Retention of N (Retenção de N)
AWMS	Animal Waste Management System (Sistema de Manejo de Dejeção Animal)
EF₃	Emission Factor for Direct N ₂ O (Fator de Emissão Direta de N ₂ O)

N₂O_D	Emissões Diretas de N ₂ O Provenientes do Manejo de Dejetos
Frac_{Gas}MS	Fraction of Managed Manure N Lost by Volatilisation as NH ₃ or NO _x (Fração de N do Dejeito Manejado Volatilizado como NH ₃ e NO _x)
N_{volatilization}-MMS	Manure N Lost Volatilisation (N do Dejeito Volatilizado)
N_{leaching}-MMS	Manure N Lost Leaching (N do Dejeito Lixiviado)
Frac_{Leach}MS	Fraction of Managed Manure N Lost by Leaching (Fração de N do Dejeito Manejado que é Lixiviado)
N₂O_G	Emissões Indiretas de N ₂ O Devido à Volatilização de N do Manejo de Dejetos
EF₄	Fator para Emissões de N ₂ O da Deposição Atmosférica de N nos Solos e na Superfície da Água (N volatilizado)
N₂O_L	Emissões Indiretas de N ₂ O Devido à Lixiviação de N do Manejo de Dejetos
EF₅	Fator para Emissões de N ₂ O da Deposição Atmosférica de N nos Solos e na Superfície da Água (N lixiviado)
F_{PRP}	Urine and Dung N Deposited on Pasture by Grazing Animals (N da Urina e Esterco Depositado por Animais a Pasto)
MS_{PRP}	N Excretion Deposited on Pasture (Excreção de N Depositada no Pasto)
N₂O-N_{PRP}	Emissão Anual Direta de N ₂ O-N da Urina e Esterco Depositada no Solo por Animais em Pastejo
EF_{3PRP, CPP}	Fator para Emissões de N ₂ O da Urina e Esterco de Bovinos Depositado em Pastagens
N₂O_(vol)-N	N ₂ O-N Volatilizado da Urina e Esterco Depositado por Animais em Pastejo
Frac_{GASM}	Fraction of Applied of Urine and Dung N Deposited by Grazing Animals (Fração de N Depositada no solo da Urina e Esterco por Animais a Pasto)
N₂O_(L)-N	N ₂ O-N Lixiviado da Urina e Esterco Depositado por Animais em Pastejo
Frac_{LEACH}(H)	Fraction of Added/Mineralized N from Managed Soils that Leaches from N Deposited by Grazing Animals (Fração de N Adicionado/Mineralizado de Solos Manejados que Lixivia a partir do N Depositado por Animais em Pastejo)
GWP	Global Warming Potential (Potencial de Aquecimento Global)
AR6	Sixth Assessment Report (Sexto Relatório de Avaliação)
WDG	Wet Distillers Grains (Milho Grão Úmido de Destilaria)

DDG	Dried Distillers Grains (Milho Grão Seco de Destilaria)
MUT	Mudança de Uso da Terra
SOC	Soil Organic Carbon (Carbono Orgânico do Solo)
F	Fator de Emissão Relacionado à Mudança de Uso da Terra
D	Tempo para Equilíbrio do Carbono no Solo
Nº árvores	Número de Árvores
IDF	International Dairy Federation (Federação Internacional de Laticínios)
GL	Média Anual do Teor de Gordura do Leite no Tanque Coletada na Propriedade
GP	Média Anual do Teor de Proteína do Leite no Tanque Coletada na Propriedade
ISO	International Organization for Standardization (Organização Internacional para Padronização)
MS	Matéria Seca
PCH₄VL	Proporção da Produção de CH ₄ Entérico das Vacas Lactantes em Relação ao Rebanho Total
PDejVL	Proporção da Produção de Dejetos das Vacas Lactantes em Relação ao Rebanho Total
PB	Proteína Bruta
NDT	Nutrientes Digestíveis Totais
ECM	Energy Corrected Milk (Leite Corrigido para Energia)
CMS	Consumo de Matéria Seca

LISTA DE UNIDADE DE MEDIDAS

litros/habitante/ano	Litros por habitante por ano
%	Porcentagem
litros/vaca	Litros por vaca
ha	Hectares
litros leite/dia	Litros de leite por dia
litros/vaca/dia	Litros por vaca por dia
kg CO₂eq/vaca	Quilograma de dióxido de carbono equivalente por vaca
t CO₂eq/vaca/ano	Tonelada de dióxido de carbono equivalente por vaca por ano
t CO₂eq/ha/ano	Tonelada de dióxido de carbono equivalente por hectare por ano
kg de CO₂eq/kg de FPCM	Quilograma de dióxido de carbono equivalente por quilograma de leite corrigido para gordura e proteína
g/kg de CMS	Gramas por quilograma de consumo de matéria seca
kg CO₂eq kg⁻¹ ECM	Quilograma de dióxido de carbono equivalente por quilograma de leite corrigido para energia
g CH₄/kg FPCM	Gramas de metano por quilograma de leite corrigido para gordura e proteína
kg CH₄/vaca/ano	Quilograma de metano por vaca por ano
kg leite/vaca/ano	Quilograma de leite por vaca por ano
kg N-NH₃/vaca/ano	Quilograma de nitrogênio amoniacal por vaca por ano
kg N-NH₂/vaca/ano	Quilograma de nitrogênio de óxido nitroso por vaca por ano
kg CO₂eq kg⁻¹	Quilograma de dióxido de carbono equivalente por quilograma
t C/ha	Tonelada de carbono por hectare
Pg C/ano	Petagrama de carbono por ano
t C/ha/ano	Tonelada de carbono por hectare por ano

g/g	Gramas por grama
UFC/mL	Unidade formadora de colônia por mililitro
células/mL	Células por mililitro
MJ dia⁻¹	Megajoule por dia
kg CH₄ cabeça⁻¹ ano⁻¹	Quilograma de metano por cabeça por ano
MJ cabeça⁻¹ ano⁻¹	Megajoule por cabeça por ano
MJ/kg CH₄	Megajoule por quilograma de metano
kg/cabeça/ano⁻¹	Quilograma por cabeça por ano
GG CH₄ ano⁻¹	Gigagrama de metano por ano
kg N animal⁻¹ ano⁻¹	Quilograma de nitrogênio por animal por ano
kg N animal⁻¹ dia⁻¹	Quilograma de nitrogênio por animal por dia
kg N₂O ano⁻¹	Quilograma de óxido nitroso por ano
kg N-N₂O/kg N	Quilograma de nitrogênio de óxido nitroso por quilograma de nitrogênio
N-N₂O (mm)	Massa molecular de nitrogênio de óxido nitroso
N₂O (mm)	Massa molecular de óxido nitroso
kg N ano⁻¹	Quilograma de nitrogênio por ano
kg N-N₂O (kg N-NH₃ + N-NO_x volatilizado)⁻¹	Quilograma de nitrogênio de óxido nitroso por quilograma de nitrogênio amoniacal e óxidos de nitrogênio volatilizados
kg N-N₂O (kg N lixiviado)⁻¹	Quilograma de nitrogênio de óxido nitroso por quilograma de nitrogênio lixiviado
kg N-N₂O ano⁻¹	Quilograma de nitrogênio de óxido nitroso por ano
kg N-N₂O (kg N)⁻¹	Quilograma de nitrogênio de óxido nitroso por quilograma de nitrogênio
kg N-NH₃ + N-NO_x volatilizado (kg N depositado)⁻¹	Quilograma de nitrogênio amoniacal e óxidos de nitrogênio volatilizados por quilograma de nitrogênio depositado
kg N-N₂O (kg N depositado)⁻¹	Quilograma de nitrogênio de óxido nitroso por quilograma de nitrogênio depositado
kg CO₂eq/ kg produto	Quilograma de dióxido de carbono equivalente por quilograma de produto
kg CO₂eq kg MS⁻¹	Quilograma de dióxido de carbono equivalente por quilograma de matéria seca

kg CO₂eq árvore⁻¹ ano⁻¹	Quilograma de dióxido de carbono equivalente por árvore por ano
kg CO₂eq ano⁻¹	Quilograma de dióxido de carbono equivalente por ano
kg de leite ano⁻¹	Quilograma de leite por ano
kg CO₂eq vaca lactante⁻¹ ano⁻¹	Quilograma de dióxido de carbono equivalente por vaca lactante por ano
kg CO₂eq ha⁻¹ ano⁻¹	Quilograma de dióxido de carbono equivalente por hectare por ano
kg leite/lactação	Quilograma de leite por lactação
t leite/ano	Toneladas de leite por ano
mil cs/mL	Mil células por mililitro
mil UFC/mL	Mil unidade formadora de colônia por mililitro
litros leite/vaca/dia	Litros de leite por vaca por dia
kg leite/dia	Quilograma de leite por dia
kg MS	Quilograma de matéria seca
kg concentrado/litros leite	Quilograma de concentrado por litros de leite
kg N₂O/vaca/ano	Quilograma de óxido nitroso por vaca por ano
kg leite/vaca/ano	Quilograma de leite por vaca por ano
kg NH₃/vaca/ano	Quilograma de amônia por vaca por ano
kg CO₂eq/vaca/ano	Quilograma de dióxido de carbono por vaca por ano
kg FPCM	Quilograma de leite corrigido para gordura e proteína

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	20
2	REVISÃO DE LITERATURA	22
2.1	Panorama do setor lácteo nacional	22
2.2	A emissão de gases de efeito estufa na pecuária leiteira	24
2.3	Emissão de metano entérico	26
2.4	Emissão do manejo de dejetos.....	28
2.5	Emissão da produção e aquisição de alimentos.....	30
2.6	Remoção de gases de efeito estufa na pecuária leiteira.....	31
2.7	Anseios dos consumidores e qualidade do leite	33
3	OBJETIVOS.....	36
3.1	Objetivo geral	36
3.2	Objetivos específicos.....	36
4	MATERIAL E MÉTODOS.....	36
4.1	Caracterização das propriedades	36
4.2	Coleta de dados.....	37
4.3	Contabilização de gases de efeito estufa na produção primária do leite	37
4.3.1	Emissão de metano entérico	37
4.3.2	Emissão do manejo de dejetos.....	40
4.3.3	Emissão da produção e aquisição de alimentos.....	48
4.4	Remoção de gases de efeito estufa na produção primária do leite	49
4.4.1	Remoção de GEE pela mudança de uso da terra.....	49
4.4.2	Remoção de GEE pelo plantio de árvores	49
4.5	Balanco e neutralização de gases de efeito estufa na produção primária do leite	50
4.6	Intensidade de emissão de GEE por leite produzido e corrigido para gordura e proteína.....	50
4.6.1	Intensidade de emissão da fermentação entérica.....	51
4.6.2	Intensidade de emissão do manejo de dejetos	52
4.6.3	Intensidade de emissão da produção e aquisição de alimentos	52
4.6.4	Intensidade de emissão de GEE total da propriedade.....	52
4.6.5	Intensidade de remoção de GEE total da propriedade.....	53
4.6.6	Intensidade do balanço de carbono da propriedade.....	53
4.7	Intensidade de emissão de GEE por vaca lactante no rebanho.....	54
4.8	Intensidade de emissão de GEE por hectare.....	54
4.9	Qualidade do leite.....	54
4.10	Análise estatística	55
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
6	CONCLUSÃO.....	76

1 INTRODUÇÃO

A pecuária leiteira brasileira é uma atividade de grande importância econômica e social, envolvendo mais de um milhão de produtores no campo, além de proporcionar empregos nos demais segmentos da cadeia (Rocha *et al.*, 2020). O Brasil é o terceiro maior produtor mundial de leite (IBGE, 2020), porém considerando um consumo *per capita* de 167 litros/habitante/ano (ABVL, 2022), ainda é necessária a importação de lácteos para suprir a demanda nacional (Embrapa, 2023). Os sistemas de produção brasileiros são heterogêneos em rebanho, raça, dieta e gerenciamento (Assis *et al.*, 2005; Agostinho *et al.*, 2019), sendo necessária análise mais aprofundada dos impactos existentes.

A agropecuária nacional é responsável por 28,5% das emissões brasileiras de gases de efeito estufa (GEE). Dentro do setor agropecuária, 57% das emissões de GEE foram provenientes da fermentação entérica, em que o rebanho bovino contribuiu com 96,8% das emissões de metano (CH₄) entérico, sendo 88,4% proveniente do rebanho de corte e 8,4% do gado leiteiro (Brasil, 2020). Em relação à pegada de carbono (PC) do leite, a fermentação entérica e práticas desenvolvidas na produção primária de fazendas leiteiras são as principais contribuintes para as emissões de GEE durante o ciclo de vida do mesmo (Rotz, 2018). Dentre as fontes de emissões de GEE importantes nas propriedades leiteiras, incluem o CH₄, o óxido nitroso (N₂O) e o dióxido de carbono (CO₂) provenientes da fermentação entérica (39-70%), produção e aquisição de alimentos (20-50%) e armazenamento e gerenciamento de dejetos (5-15%) (Rotz, 2018; Embrapa, 2023).

Na 26ª Conferência das Partes (COP-26), o governo brasileiro assumiu voluntariamente reduzir 50% das emissões de GEE até 2030, baseando-se no ano de 2005. Como estratégia de mitigação das emissões e prevenção do aquecimento global, o Brasil estabeleceu, em 2021, o Plano Setorial para Adaptação à Mudança do Clima e Baixa Emissão de Carbono na Agropecuária com Vistas ao Desenvolvimento Sustentável (ABC+). Dentre as ações vigentes, estão o incentivo à implantação de sistemas integrados, a realização de plantio direto, a fixação biológica de nitrogênio, o incentivo ao plantio de árvores, a recuperação de pastagens degradadas e o tratamento de dejetos animais (Brasil, 2021).

Considerando os efeitos provocados pelas mudanças climáticas, o mercado financeiro vem passando por uma revolução focada na sustentabilidade (Eccles; Klimenko, 2019). Com isso, investidores estão cada vez mais interessados não apenas em questões ambientais, como também em investimentos socialmente responsáveis. Dessa forma, o fundamento Ambiental,

Social e de Governança - *Environment, Social and Governance* (ESG), caracteriza-se por um conjunto de fatores usados para medir os impactos não financeiros de investimentos e empresas (Bergman *et al.*, 2020).

Em adição às questões sustentáveis, com o objetivo de padronizar o leite produzido no país, o Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento (MAPA) publicou em 2019, a Instrução Normativa nº 58 (IN 58) (Brasil, 2018), que determina a identidade e as características de qualidade, como teores de gordura e proteína, sólidos totais (ST), sólidos desengordurados (SD), contagem de células somáticas (CCS) e contagem padrão em placas (CPP), que devem apresentar o leite cru refrigerado, o leite pasteurizado e o leite pasteurizado tipo A. Além disso, as indústrias de laticínios vêm implementando programas de pagamento baseado na qualidade, tal fato, permite que os produtores recebam bonificação monetária de acordo com melhores parâmetros do leite (Nightingale *et al.*, 2008; Botaro *et al.*, 2013).

Essas práticas proporcionam que o setor de laticínios atenda às demandas de qualidade exigidas pelo consumidor, que estão cada vez mais conscientes das questões relacionadas ao leite com valor agregado, às certificações de produtos (Ravaglia; Famiglietti; Valentino, 2018), ao balanço de carbono, à pegada ambiental (Cunha *et al.*, 2016; Famiglietti *et al.*, 2019) e aos regulamentos de bem-estar animal (Franchi *et al.*, 2014).

Vários modelos em escala agrícola foram desenvolvidos para quantificar as emissões de GEE dos sistemas de produção de leite de clima temperado, como *Agriculture Resource Farm Calculator - AgRE Calc* (Reino Unido), *Carbon Management Evaluation Tool - COMET-Farm* (Estados Unidos) e *Cool Farm Tool - CFT* (Inglaterra) (Rotz, 2018), porém, ferramentas semelhantes são inexistentes para o clima tropical. Dessa forma, há a necessidade da quantificação de GEE de propriedades leiteiras alocadas em clima tropical, para determinar estratégias de mitigação de GEE e aumento da remoção desses gases da atmosfera. Visto o efeito das emissões de GEE nos próximos anos, a conscientização do consumidor e a implantação do fundamento ESG pelas empresas. Além disso, estes fatores devem ser atrelados a um leite de qualidade, garantindo, assim, segurança alimentar para as próximas gerações. Pesquisas que abordem tanto a contabilização de GEE, como a qualidade do leite dos sistemas de produção de clima tropical são escassos, portanto, justifica-se a realização do presente estudo.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Panorama do setor lácteo nacional

O complexo agroindustrial do leite se destaca dentre os diversos no país (Mori *et al.*, 2020), devido a importância na dieta dos brasileiros, variedade de produtos oferecidos e participação na economia do Brasil. A produção de leite foi estimada em 35,3 bilhões de litros entre os anos de 2020 e 2021, estando presente em 98% dos municípios brasileiros. Atualmente, os estados com maior produção leiteira são Minas Gerais, Paraná e Rio Grande do Sul, apresentando, respectivamente, 27,1%, 12,4% e 12,3% do volume total de leite no país (IBGE, 2020).

A produtividade de leite média no Brasil ainda é relativamente baixa, porém, nos últimos 10 anos, apresentou aumento em torno de 60% por vaca, resultando, no ano de 2021, 2.200 litros de leite por vaca. Tal fato, sinaliza a mudança tecnológica que vem ocorrendo nos últimos anos, necessária para manter a atividade de forma competitiva no mercado (Carvalho *et al.*, 2023).

O Brasil apresenta grande potencial a ser explorado ainda, podendo se tornar um dos protagonistas no mercado global de leite e seus derivados (Rocha *et al.*, 2020). A maioria dos sistemas leiteiros é de pequeno e médio porte (MAPA, 2022). Segundo o censo agropecuário realizado no ano de 2017, cerca de 81,5% das propriedades brasileiras possuem de 1 a 50 hectares (ha) (IBGE, 2017). Devido a extensão territorial e alta variabilidade dessas propriedades, sua classificação é essencial para identificação de gargalos e intervenções específicas para cada sistema de produção.

Considerando que a produtividade animal se caracteriza por um conjunto de tecnologias, segundo Agostinho *et al.* (2019), os sistemas leiteiros são definidos em cinco grupos, conforme o grau de intensificação, nível de produtividade e alimentação: os grupos G1 e G2 representam sistemas semi-intensivos, sendo o primeiro caracterizado pelo alto uso de insumos (ração), produzindo cerca de 4.400 litros de leite/dia, com média de 21 litros/vaca/dia, e manejo de pastagem em piquetes, sistema raramente encontrado no Brasil. O Grupo G2 representa um sistema de pequeno porte, produzindo 360 litros de leite/dia, contando com manejo de pastagem, realização de suplementação alimentar, alcançando produtividade de 12 litros/vaca/dia. O Grupo G3 é um sistema extensivo, caracterizado por menor intensidade na produção de leite. São propriedades que apresentam pasto degradado, com suplementação de forragens durante o inverno; sua produção é de 33 litros de leite/dia e a produtividade é de 5,5

litros/vaca/dia. Já os grupos G4 e G5, são classificados como intensivos, contendo alimentação baseada em concentrado e volumoso durante todo o ano. A diferença entre G4 e G5 está na quantidade de insumos e na tecnologia utilizada. O G5 produz 3.500 litros de leite/dia, com média de 32 litros/vaca/dia, enquanto, o G4 apresenta menor uso de tecnologia e mão de obra, produzindo 1.060 litros de leite/dia e 20 litros/vaca/dia (Agostinho *et al.*, 2019).

Segundo Luiz *et al.* (2023), a utilização de fontes locais de ingredientes alimentares, como alimentação baseada em silagem e pastagens, pode aumentar o nível de sustentabilidade das explorações leiteiras. Além disso, o sistema integrado de produção, manejado de forma adequada, é considerado sustentável, contribuindo para manter a atividade viável para pequenos agricultores. Outro aspecto importante é o relacionado às adversidades externas que influenciam a produção de leite. Os sistemas que são altamente dependentes de recursos externos não renováveis são menos resilientes e podem enfrentar problemas na manutenção do seu funcionamento num cenário com pressões negativas, como por exemplo, perturbações econômicas, menor disponibilidade de recursos, questões sociais (como as relacionadas com a disponibilidade de mão-de-obra) e oscilação do mercado (Agostinho *et al.*, 2019).

Vogel *et al.* (2023) analisaram a eficiência ambiental de propriedades leiteiras baseadas em pastagem no estado de Minas Gerais e verificaram que a melhora no manejo de pastagens apresentou influência positiva na eficiência ambiental. Pastagens melhoradas produzem mais forragem por unidade de terra, reduzindo o uso da terra. Além disso, pastagens melhoradas tendem a ter maior digestibilidade e menor fibra em detergente neutro (FDN), contribuindo para menor produção de CH₄ entérico. A intensificação sustentável de pastagens degradadas e de baixa qualidade contribui para preservação da terra, armazenamento de carbono no solo e redução da intensidade de GEE do gado de corte e leite (O'Brien *et al.*, 2016; IPCC, 2019a; Oliveira *et al.*, 2021).

No mesmo estudo, constataram que ajustar a estrutura do rebanho para alcançar melhor desempenho produtivo melhora a eficiência ambiental de fazendas leiteiras (Vogel *et al.*, 2023). A proporção de vacas em lactação em relação ao rebanho é um importante indicador e deve ser em torno de 84%; no entanto, grande parte dos sistemas leiteiros no Brasil ainda não atingiu esse nível (Bachman; Schairer, 2003; Kuhn; Hutchison; Norman, 2006; Vogel *et al.*, 2023).

Ademais, Vogel e colaboradores (2023) observaram que a adoção de vacas mais produtivas dentro da propriedade aumenta não só a eficiência, como também o risco de produção. Animais mais produtivos são mais suscetíveis a doenças e distúrbios metabólicos, provocando reduções abruptas e inesperadas na produção, além do aumento de gastos com tratamentos (Knaus, 2009; Brito *et al.*, 2021). Estes animais são nutricionalmente mais

exigentes, necessitando de melhor gestão para fornecimento de alimentação balanceada durante todo o ano, conforme as categorias dos animais e o ciclo produtivo (Brito *et al.*, 2021; Hoischen-Taubner *et al.*, 2021). Dessa forma, o capital investido em animais mais produtivos é maior, aumentando também as perdas em caso de abate inesperado (Hoischen-Taubner *et al.*, 2021).

2.2 A emissão de gases de efeito estufa na pecuária leiteira

A pecuária leiteira moderna está associada a grandes desafios de sustentabilidade, dentre os principais, a emissão de gases de efeito estufa (GEE) para a atmosfera (Segerkvist *et al.*, 2020). O setor Agricultura, Floresta e Outro Uso da Terra - *Agriculture, Forestry and Other Land Use* (AFOLU) gerou cerca de 18% das emissões de GEE no mundo, dos quais 6% foram resultantes da pecuária, sendo 2,2% atribuídos à atividade leiteira. No ano de 2020, a produção de leite correspondeu a aproximadamente 3% das emissões de GEE do Brasil (IFCN, 2021).

Considerável empenho tem sido empregado na tentativa de mensurar as emissões de GEE provenientes de cada fonte significativa em sistemas de produção de leite. No entanto, monitorar e quantificar de maneira simultânea todas as emissões de uma propriedade específica apresenta desafios substanciais tanto em termos de complexidade, quanto de custos (Rotz, 2018).

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas - *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) é um órgão científico sob o cuidado da Organização das Nações Unidas (ONU), responsável por desenvolver e refinar a metodologia para cálculo e elaboração de relatórios de emissões e remoções nacionais de GEE (MCTI, 2019). As emissões são calculadas considerando dados das práticas desenvolvidas nas propriedades e seus respectivos fatores de emissão (FE). Somente o conhecimento detalhado das fontes e FE permite o desenvolvimento, aplicação e execução de medidas de mitigação direcionadas (Reidy *et al.*, 2008; Bell; Cloy; Rees, 2014; Smith *et al.*, 2014).

O IPCC traz diretrizes precisas, principalmente, fornecendo níveis de metodologia para uso por diferentes países, dependendo de sua capacidade para produzir seus próprios dados empíricos. O Nível 1 (*Tier 1*) é o método mais simples, que utiliza valores padrão para FE e equações para cada subcategoria animal, enquanto o Nível 2 (*Tier 2*) é uma abordagem mais detalhada que requer informações específicas do país ou propriedade, sobre a pecuária e o manejo de dejetos (IPCC, 2019a). O Nível 3 (*Tier 3*) permite que os países façam análises e modelagens mais sofisticadas, possibilitando a contabilidade de emissões mais precisas dentro das propriedades (IPCC, 2019a).

Modelos matemáticos também têm sido desenvolvidos para a quantificação e avaliação dessas emissões, desde os mais simples baseados nos inventários do IPCC, onde os dados de atividade animal são multiplicados por fatores de emissão, a processos muito detalhados, que capturam as características cinéticas dos processos subjacentes às emissões (Rotz, 2018).

Cunha *et al.* (2016) avaliaram dois sistemas de produção de leite no estado de Minas Gerais: sistema intensivo (animais semiconfinados em tempo integral) e sistema semi-intensivo (sistema silvipastoril com uso exclusivo de pastagem na estação das águas e cana-de-açúcar e silagem de milho na estação seca). As duas propriedades forneciam suplementação de concentrado. Nesse estudo, os autores verificaram emissão de GEE (CH₄ entérico, dejetos, adubação nitrogenada, transporte e energia) de 3,21 t CO₂eq/vaca/ano para o sistema intensivo e 3,18 t CO₂eq/vaca/ano para o sistema semi-intensivo. A produção anual de leite pode ser responsável por parte da diferença entre as emissões de CH₄ dos rebanhos de ambas as propriedades. Para as demais emissões, o maior valor foi associado à fertilização de pastagens nas propriedades e também à maior exigência nutricional em relação às demais culturas e às emissões adicionais causadas pela incorporação de dejetos animais.

Oliveira *et al.* (2022) observaram resultados semelhantes para sistema de produção de leite com pastejo rotacionado irrigado e alta taxa de lotação apresentando emissão de 3,97 t CO₂eq/vaca/ano, e sistema de pastejo contínuo e baixa taxa de lotação resultando em uma emissão de 3,52 t CO₂eq/vaca/ano.

Calcular a intensidade de emissão de GEE por unidade de área é importante para a identificação de fontes de CO₂ atmosférico e desenvolvimento de estratégias para mitigação de gases por ha. Em estudo realizado na Embrapa Pecuária Sudeste, pesquisadores demonstraram a contribuição do CH₄ entérico e dos GEE do sistema solo-planta na composição das emissões de dois níveis de intensificação em sistemas de manejo de pastejo. Nesta pesquisa, foi verificada emissão de 29,25 t CO₂eq/ha/ano para sistema intensivo a pasto rotacionado e irrigado com alta taxa de lotação, e 7,5 t CO₂eq/ha/ano para sistema extensivo de pastejo contínuo com baixa taxa de lotação (Oliveira *et al.*, 2022).

Calcular a intensidade de emissão por leite produzido e corrigido para gordura e proteína (*Fat and Protein Corrected Milk*; FPCM) ou corrigido para energia (*Energy Corrected Milk*; ECM), significa considerar não apenas a quantidade de GEE emitida durante a produção de leite, como também ajustar essas emissões com base nos componentes e energia contidos no leite produzido. Tais medidas possibilitam comparação mais justa entre diferentes sistemas de produção. Neste contexto, o melhor cenário é a mínima emissão de GEE aliada à máxima produtividade do leite, desencadeando menor intensidade de emissão (Oliveira *et al.*, 2022).

De acordo com Rotz e Thoma (2017), propriedades bem gerenciadas normalmente apresentam intensidade de emissão por leite corrigido para gordura e proteína de 0,8 a 1,2 kg CO₂eq/kg FPCM. A FAO (Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura) relatou, em 2018, diferenças nas intensidades de emissão de GEE entre as regiões do mundo, variando de 1,29 a 6,67 kg de CO₂eq/kg de FPCM para leite produzido na América do Norte e África Subsaariana, respectivamente. Para as Américas do Sul e Central, região que compreende o Brasil, o valor relatado foi de 3,36 kg de CO₂eq/kg de FPCM, sendo a média global de 2,40 kg de CO₂eq/kg de FPCM (FAO, 2010, 2018).

A futura expansão e desenvolvimento do setor de laticínios no Brasil, inevitavelmente, passará pela intensificação da produção. Para alcançar as metas de mitigação de GEE no setor pecuário, será essencial a implantação de estratégias baseadas na intensificação sustentável e eficiência da produção (Vogel; Beber, 2022). Dentre essas metas, destacam-se as ações para aumentar o desempenho dos animais e rebanhos, melhorar a produção e o gerenciamento de alimentos, otimizar o manejo de dejetos, e aumentar a eficiência energética pelos animais (Gerber *et al.*, 2011; Herrero *et al.*, 2016).

2.3 Emissão de metano entérico

O metano (CH₄) entérico é produzido como subproduto da fermentação entérica, no qual os carboidratos são decompostos por microrganismos em moléculas simples para serem absorvidas na corrente sanguínea. A quantidade de CH₄ liberada depende da idade, peso do animal, qualidade e quantidade de alimento consumido (IPCC, 2006a). Supõe-se que dietas à base de pastagem promovam maior produção de CH₄ (g/kg de CMS) quando comparadas a dietas que contêm quantidades maiores de carboidratos altamente fermentáveis, como concentrados (Thompson; Rowntree, 2020), em parte, devido a mudanças no perfil ruminal de ácidos graxos voláteis em relação ao propionato. No entanto, espera-se que as diferenças no propionato ruminal diminuam se o concentrado for substituído por espécies forrageiras altamente digestíveis (Beauchemin; McAllister; McGinn, 2009).

O aumento de forragem na dieta pode favorecer a produção de acetato e butirato, que liberam íons hidrogênio, enquanto o propionato age como sumidouro líquido de hidrogênio. Conseqüentemente, dietas que aumentam o propionato e diminuem o acetato ruminal estão, frequentemente, associadas à redução na metanogênese, visto que menos hidrogênio está

disponível para os metanógenos reduzirem o CO₂ a CH₄ (Beauchemin; McAllister; McGinn, 2009).

A emissão de CH₄ entérico, normalmente, é a maior fonte de GEE dentro da propriedade. A intensidade de emissão de CH₄ entérico (kg CO₂eq/kg FPCM) é indicador que reflete a maximização da energia consumida pelo gado na produção de leite ou menor fator de conversão de energia bruta em CH₄ entérico (Villanueva; Ibrahim; Catillo, 2023). Ribeiro-Filho *et al.* (2020) relataram que a intensidade de CH₄ entérico (kg CO₂eq/kg ECM) variou de 0,53 a 0,62 em sistema leiteiro com pastagens anuais tropicais e temperadas em uma região subtropical. O grande efeito destas emissões na PC, segundo o autor, era esperado, pois o impacto do CH₄ entérico nas emissões de GEE da produção de leite em diferentes sistemas leiteiros é estimado entre 44 e 60% do CO₂ total (Gollnow *et al.*, 2014; O'Brien *et al.*, 2014, 2016; Jayasundara *et al.*, 2019).

Segundo Reichenbach *et al.* (2024), a maior intensidade de emissão de CH₄ entérico foi de 1,38 kg CO₂eq/kg ECM para um sistema leiteiro semi-intensivo B (que apresentava compra de animais), quando comparado a um sistema leiteiro extensivo com dieta de boa qualidade e pasto (0,79 kg CO₂eq/kg ECM). Intensidades intermediárias foram calculadas para um sistema semi-intensivo A (sem compra de animais) (1,04 kg CO₂eq/kg ECM) e intensivo (1,21 kg CO₂eq/kg ECM).

As intensidades de emissão de CH₄ entérico (g CH₄/kg FPCM) podem ser linearmente menores, devido ao aumento do fornecimento de concentrado na dieta e FPCM, no entanto, este aumento pode provocar redução dos sólidos totais do leite, além de elevar os custos de produção (Arndt *et al.*, 2022; Boshier *et al.*, 2023). Contudo, a suplementação de concentrado à base de grãos precisa ser limitada, pois esse aumento de ração na dieta pode provocar acidose ruminal subaguda. Esta é uma doença metabólica causada pela nutrição encontrada, principalmente, em confinamentos bovinos leiteiros de alta produtividade (Abdela *et al.*, 2016).

De acordo com o IPCC (2019a), a produção de CH₄ entérico é cerca de 138 kg CH₄/vaca/ano em sistemas leiteiros norte-americanos, apresentando média de produção de 10.250 kg leite/vaca/ano e 103 kg CH₄/vaca/ano para animais produzindo 3.400 kg leite/vaca/ano na América Latina. Pedreira *et al.* (2009) verificaram que vacas leiteiras holandesas com peso médio de 571 kg apresentaram maior emissão (108,34 kg CH₄/vaca/ano), quando comparadas a vacas mestiças (¾ Holandês ¼ Gir), que apresentaram emissão de 96,43 kg CH₄/vaca/ano. Segundo metanálise realizada por Brito, Almeida e Oliveira (2022), foi verificada maior produção de CH₄ entérico para sistemas confinados devido à maior ingestão

de matéria seca pelas vacas, com média de 165,34 kg CH₄/vaca/ano em relação a sistemas a pasto, que apresentaram média de 134,32 kg CH₄/vaca/ano.

Dentre as alternativas que podem ser adotadas para a redução de CH₄, estão melhorar a qualidade do alimento, especialmente alimentos fibrosos (Beauchemin; McAllister; McGinn, 2009); aumentar a densidade energética da dieta (Immig, 1996), manipular a digestibilidade e composição química da dieta (Knapp *et al.*, 2014), aumentar adequadamente o teor de amido dietético (Peterson; Mitloehner, 2021), incluir leguminosas (McCaughey; Wittenberg; Corrigan, 1999) e lipídios (Histrov *et al.*, 2013), além de aditivos alimentares, como o 3-nitrooxipropanol (3-NOP) (Duin *et al.*, 2016), nitratos (Van Zijderveld *et al.*, 2011), taninos, saponinas (Waghorn *et al.*, 2008; Beauchemin; McAllister; McGinn, 2009) e óleos essenciais (Rossi *et al.*, 2022).

2.4 Emissão do manejo de dejetos

Sistemas de manejo de dejetos em condições anaeróbicas como estocagem líquida, fossas e lagoas anaeróbicas, produzem mais CH₄. Ao contrário, os gerenciamentos que envolvem contato do esterco com o ar, dentre eles a dispersão de dejetos diretamente em culturas ou pastoreio, têm limitado o potencial de produção de CH₄ (Demarchi, 2009). Além disso, há as emissões direta e indireta de óxido nitroso (N₂O) referentes ao nitrogênio e carbono disponíveis nos dejetos, tempo de estocagem e tipo de tratamento (Brasil, 2010).

A composição do dejetos varia de acordo com a dieta animal, ou seja, animais alimentados com dieta de alta qualidade apresentam dejetos altamente biodegradável, com maior potencial de produzir CH₄ e N₂O, da mesma forma que animais alimentados com dietas mais fibrosas produzirão dejetos menos biodegradáveis, contendo material orgânico mais complexo, tal como celulose, hemicelulose e lignina. As maiores emissões de CH₄ e N₂O provenientes de dejetos estão associadas a sistemas intensivos (Demarchi, 2009).

No caso de animais a pasto, os dejetos não são armazenados nem tratados, mas depositados diretamente no solo; dessa forma, suas emissões são contabilizadas como sendo do solo (MCT, 2010). As transformações de nitrogênio no solo incluem processos de nitrificação e desnitrificação, que geram N₂O. A nitrificação é um processo aeróbico que oxida amônio (NH₄) em nitrato (NO₃), com produção de óxido nítrico (NO) e N₂O como intermediários. A desnitrificação é um processo microbiano que reduz NO₃ a dinitrogênio (N₂). Conforme as condições do solo, este processo pode ser incompleto, produzindo NO e N₂O (Rotz, 2018).

As emissões de CH₄ dos dejetos variam de 48 kg CH₄/vaca/ano (Norte) a 78 kg CH₄/vaca/ano (Sul) nos Estados Unidos (EUA) e apresentam média em torno de 27 kg CH₄/vaca/ano para animais alocados em sistemas a pasto na Nova Zelândia (IPCC, 2006a). De acordo com o Quarto Inventário Nacional de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa (2020), o Brasil apresentou média de emissão de CH₄ proveniente dos dejetos de 9,47 kg CH₄/vaca/ano para vacas leiteiras de alta produção e 3,04 kg CH₄/vaca/ano para vacas leiteiras de baixa produção.

Almeida (2018) verificou que a emissão de amônia (NH₃) de vacas leiteiras mantidas em cama sobreposta de palha foi de 14,67 kg N-NH₃/vaca/ano e 1,94 kg N-N₂O/vaca/ano. Segundo Ribeiro-Filho *et al.* (2020), as intensidades de emissões de dejetos aumentaram à medida que houve aumento da ingestão de pastagem e diminuição de concentrado, variando de 0,20 a 0,22 kg CO₂eq/kg ECM. Tal fato, ocorreu pois o pasto apresentou maior teor de proteína bruta e, conseqüentemente, maior excreção urinária de nitrogênio, provocando aumento das emissões de N-N₂O.

A otimização da dieta animal para melhorar a eficiência do uso de nitrogênio e reduzir a excreção do mesmo é eficaz na mitigação das emissões indiretas de N₂O (Chiavegato; Powers; Palumbo, 2015). A utilização de gerenciamentos secos proporciona menores emissões em comparação com dejetos líquidos (Liu; Liu, 2018). A compostagem e o uso de cobertura em dejetos armazenados são práticas comuns que podem ser utilizadas para mitigar emissões de GEE, além do benefício do controle de odores. A redução no tempo de armazenamento, temperatura e prevenção de condições anaeróbicas ajudam a minimizar as emissões desses gases para a atmosfera (Monteny; Bannink; Chadwick, 2006; Philippe *et al.*, 2007; Li; Xin, 2010). A implementação de biodigestores também tem sido alternativa na mitigação de GEE, segundo Battini *et al.* (2014), podem reduzir aproximadamente 30% dessas emissões.

Quando os dejetos são adequadamente manejados e reciclados no solo, deixam de ser fontes de emissão e se transformam em valiosos recursos para a produção agrícola sustentável. O processo de gerenciamento e reciclagem dos resíduos auxilia na redução da emissão de GEE e possibilita a recuperação dos nutrientes presentes nos alimentos dos animais para a produção de biomassa. Isso, por sua vez, contribui para preservar e melhorar as características físicas, químicas e biológicas do solo, promovendo um sistema agrícola altamente produtivo e equilibrado. À medida que se busca economizar em fertilizantes químicos importados, que são geralmente derivados do petróleo e representam fonte cara de energia, esses métodos de tratamento se tornam ainda mais importantes (Campos, 2021).

2.5 Emissão da produção e aquisição de alimentos

Para a produção agrícola são geradas emissões diretas e indiretas de N₂O decorrentes da aplicação de fertilizantes nitrogenados, sintéticos e orgânicos, da renovação de pastagens, e da deposição de dejetos animais diretamente no solo (dejetos não manejados). Além disso, é emitido CO₂ proveniente da calagem e aplicação de ureia no solo (Fontana *et al.*, 2021).

Segundo Tubiello *et al.* (2021), nos últimos 30 anos, à medida que houve desenvolvimento econômico, ocorreu alteração das emissões de GEE provenientes da produção alimentar. Os mesmos pesquisadores sugerem que as emissões referentes a conversão de ecossistemas naturais diminuíram, sendo contrabalançadas por aumentos nas emissões dos processos pré e pós-produção.

As intensidades de emissões estão relacionadas ao conceito de PC, ou seja, assume-se que é uma quantidade de emissões de GEE que se refere a uma atividade, por exemplo, a produção de alimentos (Durojaye; Laseinde; Oluwafemi, 2019). Assim, quanto menor for a intensidade de emissão do sistema de produção alimentar, menores serão as emissões por unidade de produção. Dessa forma, é possível determinar o desempenho ambiental da produção de alimentos (Mrówczyńska-Kamińska *et al.*, 2021).

As emissões da produção de alimentos podem ser a fonte mais importante de GEE quando os fatores de emissão dos alimentos concentrados são superiores a 0,7 kg CO₂eq/kg FPCM (Baek; Lee; Park, 2014). Ribeiro-Filho *et al.* (2020) verificaram que as intensidades de emissões provenientes da produção de alimentos diminuíram à medida que a proporção da ingestão de concentrado reduziu, variando de 0,23 a 0,21 kg CO₂eq/kg ECM.

Foi relatado que, até 2050, a produção global de energia dependerá de combustíveis fósseis, que representam grande proporção das emissões de GEE provenientes da produção de alimentos nas propriedades (Edenhofer *et al.*, 2014; Bennetzen; Smith; Porter, 2016). Para minimizar essas emissões, podem ser introduzidos incentivos para a utilização de fontes de energia renováveis no futuro, promovendo aumento da participação de energia limpa (Hou *et al.*, 2020).

Da mesma forma, para a mitigação de GEE, a melhoria na gestão das terras agrícolas, a redução do desmatamento, e a proteção dos ecossistemas naturais na interface entre terras gerenciadas e não gerenciadas precisarão ser aceleradas (Searchinger *et al.*, 2018). O objetivo é converter as emissões atuais de terras agrícolas em remoções líquidas, avançando assim para um sistema alimentar neutro em carbono (Tubiello *et al.*, 2021).

Além dessas práticas, evitar desperdício de alimentos e melhorar a eficiência alimentar também são formas para a mitigação de GEE, provenientes da produção de alimentos para animais. Avanços constantes na eficiência da produção têm potencial de diminuir a área de terra necessária por unidade de produção de alimentos, e melhorias na eficiência de produção animal podem reduzir a quantidade de alimento necessária por animal (Liu; Liu, 2018).

2.6 Remoção de gases de efeito estufa na pecuária leiteira

Políticas públicas com a finalidade de evitar a degradação dos recursos naturais e estimular a produção em sistemas mais resilientes são essenciais para reduzir os impactos ambientais (Joseph *et al.*, 2019). Dentre as alternativas para produção leiteira sustentável destacam-se os sistemas integrados (Kichel *et al.*, 2019).

Segundo Balbino, Barcellos e Stone (2011), os sistemas de produção em integração podem ser classificados em quatro modalidades: integração lavoura-pecuária (ILP) ou sistema agropastoril, caracterizados como sistema de produção que integra componentes agrícola e pecuário em rotação, consórcio ou sucessão, na mesma área, no mesmo ano agrícola ou múltiplos anos; integração pecuária-floresta (IPF) ou sistema silvipastoril, sendo o sistema de produção que integra os componentes pecuário (pastagem e animal) e florestal em consórcio; integração lavoura-floresta (ILF) ou sistema silviagrícola, um sistema de produção que integra componentes florestal e agrícola pela consorciação de espécies arbóreas com cultivos agrícolas (anuais ou perenes); e, por fim, integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF) ou sistema agrossilvipastoril, caracterizando-se como sistema de produção que integra componentes agrícola, pecuário e florestal em rotação, consórcio ou sucessão, na mesma área.

A ILP proporciona benefícios recíprocos entre a lavoura e a pecuária, reduzindo as causas da degradação física, química e biológica do solo (Kluthcouski; Stone, 2003). Nestes sistemas, principalmente na rotação lavoura-pasto, ocorre aumento da produtividade de grãos cultivados após a pastagem (Salton *et al.*, 2015). Já os sistemas IPF e ILPF, proporcionam microclima favorável, aumentando o conforto térmico e o desempenho dos animais. A ILPF, um avanço do ILP, melhora as condições físicas, químicas e biológicas do solo, aumentando a ciclagem e a eficiência de utilização dos nutrientes. Além disso, esse sistema reduz os custos de produção, diversifica e estabiliza a renda na propriedade rural, viabiliza a recuperação de áreas com pastagens degradadas, e proporciona conforto animal (Carvalho; Alvim; Carneiro, 2001; Macedo, 2009; Silva *et al.*, 2011; Salton *et al.*, 2014; Oliveira *et al.*, 2020).

Sistemas integrados têm potencial para mitigar as emissões de GEE removendo carbono da atmosfera e armazenando-o na biomassa e no solo, principalmente quando o componente arbóreo está presente (Balbino; Barcellos; Stone, 2011; Serra *et al.*, 2012). Árvores plantadas gerenciadas de forma intensiva crescem rapidamente e, conseqüentemente, produzem mais biomassa, como resultado da realização da fotossíntese. Devido a esse fato, florestas plantadas têm maior potencial de sequestro de carbono do que florestas nativas (Evans; Turnbull, 2004; IPCC, 2007; Kaul; Mohren; Dadhwal, 2010).

De acordo com Oliveira *et al.* (2022), foram necessárias 33 árvores por vaca para neutralizar o balanço de carbono de um sistema de produção de leite de pastejo contínuo com baixa taxa de lotação e 52 árvores por vaca em um sistema de pastejo rotacionado irrigado com alta taxa de lotação. Segundo Pezzopane *et al.* (2021), um sistema agroflorestal composto por pastagem de capim-marandu (*Urochloa Brizantha* “BRS Piatã”) e árvores de eucalipto (*Eucalyptus urograndis*), acumulou 64,5 t C/ha (toneladas de carbono por hectare) na biomassa de árvores apresentando em média oito anos.

O sequestro de carbono pelo solo também contribui para mitigação de GEE considerando que mais de dois terços das reservas de carbono terrestre são encontradas no solo (IPCC, 2000; Solomon *et al.*, 2007). Este sequestro é finito, não permanente, difícil de quantificar e de ser verificado a longo prazo, podendo ser considerada estratégia arriscada para minimizar os efeitos climáticos em comparação com a redução das emissões (IPCC, 2000). Estudos demonstram que o solo tem baixo potencial para acumular carbono (Lehmann; Gaunt; Rondon, 2006). No entanto, a curto prazo, pode ser essencial para reduzir as concentrações atmosféricas de CO₂ (Smith, 2004). O equilíbrio entre as entradas e saídas de carbono no solo é influenciado pelas mudanças no uso da terra até que o equilíbrio seja alcançado novamente. Durante este processo, o solo pode atuar como fonte ou sumidouro de carbono (Guo *et al.*, 2002).

O solo armazena carbono na forma de matéria orgânica (MO), que, por sua vez, é influenciada por fatores como tipo de rocha-mãe, temperatura, precipitação e manejo do solo (Klein *et al.*, 2016). A MO deriva de várias fontes, como materiais vegetais e animais em decomposição, microrganismos e carbonatos (Berner; American, 1989). Com o tempo, a MO sofre transformações bioquímicas, levando à formação de húmus (forma estável) (Kwiatkowska-Malina, 2018). O carbono inorgânico do solo consiste, principalmente, de carbonatos, fração significativa do reservatório global de carbono (Alongi *et al.*, 2016). A formação de carbono inorgânico, denominada carbonatação do solo, envolve a reação do CO₂

com óxidos e hidróxidos de metais básicos existentes no solo (Manning *et al.*, 2013), contribuindo ainda mais para o sequestro de CO₂ atmosférico.

Estudos indicam que existem muitos benefícios no sequestro de carbono pelo solo, incluindo a compensação de emissões antrópicas, redução da concentração de CO₂ atmosférico, aumento da qualidade do solo, dos recursos hídricos e das suas funções no ecossistema (diminuindo as perdas de nutrientes), redução de erosão, melhora dos *habitats* (aumentando a retenção de água), recuperação de solos degradados e aumento da eficiência do uso da terra (Lal *et al.*, 2007, 2008).

No Brasil, em sistemas de manejo baseados no preparo convencional com intenso revolvimento do solo, geralmente, ocorre perda do estoque original da MO em aproximadamente 50% (Pöttker, 1977; Bayer *et al.*, 2003). Além disso, esses sistemas são comumente mais predispostos à erosão, que, de acordo com Lal (2003), é responsável por emissões globais de até 1,0 Pg C/ano (petagrama de carbono por ano).

Segundo Cerri *et al.* (2007), os solos brasileiros acumulam, em média, 0,5 t C/ha/ano. Entretanto, em estudos realizados no sul do Brasil, comparando sistema de plantio direto com plantio convencional, indicaram sequestro de carbono variando de 0,12 a 1,6 t C/ha/ano (Bayer *et al.*, 2000; Amado *et al.*, 2001, 2006), demonstrando a variabilidade que os diferentes sistemas de manejo proporcionam no acúmulo de carbono no solo.

Pastagens tropicais bem manejadas são capazes de aumentar os estoques de C no solo, enquanto solos mal manejados podem perder C quando comparados aos solos da vegetação original (floresta) (Braz *et al.*, 2013). As melhorias de manejo identificadas como contribuintes para aumento do sequestro de carbono pelo solo, de acordo com metanálise realizada por Conant, Paustian e Elliot (2001), foram: fertilização (300 kg CO₂eq/ha/ano), manejo eficiente de pastagem (350 kg CO₂eq/ha/ano), conversão de áreas de cultivo em pastagens (1.010 kg CO₂eq/ha/ano), conversão de vegetação nativa em pastagens (350 kg CO₂eq/ha/ano), introdução de leguminosas (750 kg CO₂eq/ha/ano), uso de gramíneas melhoradas (3.040 kg CO₂eq/ha/ano) e práticas de irrigação (110 kg CO₂eq/ha/ano).

2.7 Anseios dos consumidores e qualidade do leite

A importância de promover e desenvolver atividades sustentáveis tem sido apoiada por diversos projetos e iniciativas europeias (ECO, 2020), considerando que adotar consumo de alimentos mais sustentável pode ajudar a reduzir significativamente as emissões de GEE (Poore; Nemecek, 2018). Além disso, a crescente conscientização do consumidor está

estimulando a indústria em direção a práticas com baixo impacto ambiental (Miranda-Ackerman; Azzaro-Pantel, 2017). Esse processo baseia-se na tomada de decisão levando em consideração não apenas a segurança do alimento, necessidades e desejos individuais, como também a responsabilidade social (Canavari; Coderoni, 2020).

Dessa forma, ao longo da última década, diversos rótulos foram desenvolvidos para auxiliar os consumidores em escolhas mais sustentáveis (Grunert *et al.*, 2014). Dentre eles, a rotulagem de pegada de carbono (PC), que foi desenvolvida no Reino Unido em 2007, e definida como medida das emissões totais de dióxido de carbono (CO₂) e outros gases de efeito estufa (GEE), como óxido nitroso (N₂O) e metano (CH₄) causadas por um determinado produto ao longo de seu ciclo de vida (Wiedmann; Minx, 2007).

De acordo com Canavari e Coderoni (2020), consumidores de lácteos na Itália apresentaram-se interessados em produtos com rótulos ou selos de PC. Além disso, aqueles que atribuíram alta importância a alimentos produzidos com baixo impacto ambiental mostraram-se dispostos a pagar valor superior por estes produtos (Canavari; Coderoni, 2020). Porém, segundo Sánchez-Bravo *et al.* (2020), conforme pesquisa realizada com 3.600 participantes de seis países (Brasil, China, Índia, México, Espanha e EUA), a escolha por produtos lácteos mais sustentáveis variaram de acordo com o país, a idade e educação (Sánchez-Bravo *et al.*, 2020).

Desde 2020, na Nova Zelândia, realiza-se a produção do leite SimplyMilk™ certificado como carbono zero pela compra de crédito de carbono da *Toitū Envirocare*, uma subsidiária integral da *Manaaki Whenua - Landcare Research*, instituto de pesquisa de propriedade governamental (Fonterra, 2020). No Brasil, a fazenda Guaraci Agropastoril (Itirapina, SP) realiza a produção do leite NoCarbon™, desde 2021. Além de garantir a neutralidade no balanço de carbono, assegurado pela Organização Não Governamental (ONG) Iniciativa Verde por meio do selo *Carbon Free*, os lácteos NoCarbon™ são certificados pelo Instituto *Certified Humane Brasil*, por apresentar produção que garante o bem-estar animal, e pelo Instituto Biodinâmico, devido a sua produção orgânica. A propriedade utiliza o plantio de árvores como estratégia para neutralizar o excedente de carbono na atmosfera (NoCarbon, 2021).

Atualmente, a indústria de laticínios *Nestlé* lançou o projeto de agricultura regenerativa, que consiste na adoção de práticas agrícolas mais sustentáveis com intuito de proteger os recursos naturais como água, solo e biodiversidade, além de reduzir as emissões de GEE. São mais de seis mil produtores engajados no projeto que, de acordo com o desenvolvimento adequado de práticas regenerativas, recebem 0,15 centavos a mais por litro de leite vendido (Nestlé, 2024). Da mesma forma, o grupo *Lactalis* lançou, em outubro de 2023, um plano global cuja meta é que sua produção total se torne carbono neutro até 2050 (Lactalis, 2023).

À medida que a população aumenta, o acesso a dietas sustentáveis, nutricionalmente equilibradas, economicamente viáveis e produzidas com qualidade, é crucial para garantir segurança alimentar às gerações futuras (Miller; Auestad, 2013; Garcia *et al.*, 2020). O leite é um alimento rico, composto por água (87,1%), lactose (4,6%), lipídeos (4,0%), proteínas (3,3%), sais minerais (0,7%), vitaminas e enzimas (0,3%) (Walstra; Wouters; Geurts, 2006). Essa composição varia de acordo com raça, período de lactação, dieta, saúde, ciclo estral, idade, características individuais, clima, intervalo entre as ordenhas e estação do ano (Venturini *et al.*, 2007).

Dentre os parâmetros que avaliam a qualidade do leite estão sua composição química e seus padrões higiênico-sanitários. A composição está relacionada ao teor de gordura, proteína, extrato seco total (EST) e desengordurado (ESD). Além disso, são considerados padrões higiênico-sanitários como contagem padrão em placas (CPP) e contagem de células somáticas (CCS) (Dias; Antes, 2014).

A composição do leite é determinada por diferenças genéticas e nutricionais (Costa; Teixeira, 2007). Segundo a IN 58, o leite cru refrigerado deve apresentar teor mínimo de gordura de 3g/100g e teor mínimo de proteína de 2,9g/100g (Brasil, 2018). O EST, ou sólidos totais (ST), é a somatória da concentração de todos os componentes do leite, exceto a água, enquanto o ESD, ou sólidos desengordurados (SD), é a diferença entre o EST e o teor de gordura (Dias; Antes, 2014) que, de acordo com a IN 58, devem apresentar, no mínimo, 11,4g/100g e 8,4g/100g, respectivamente (Brasil, 2018).

Em relação aos padrões higiênicos-sanitários, a CPP refere-se à contaminação microbiana do leite que resulta das condições de higiene na obtenção e das condições de estocagem e armazenamento da matéria-prima. As células somáticas são constituídas, principalmente, por leucócitos, e tem por objetivo a defesa do organismo. Quando há uma agressão física, química ou infecciosa na glândula mamária, a maioria dos leucócitos migram do sangue para ela, provocando aumento na CCS (Dias; Antes, 2014). Conforme a IN 58, o leite cru refrigerado deve apresentar CPP de, no máximo, 300.000 UFC/mL, e CCS de 500.000 células/mL (Brasil, 2018).

Diversos países produtores de leite têm adotado o sistema de pagamento por qualidade, considerando bonificações e penalizações sobre o preço do leite, com base em critérios de qualidade como teores de gordura, CPP e CCS (Dias *et al.*, 2016). O Brasil, da mesma forma, vem adotando tais programas de pagamento baseado na qualidade do leite, permitindo que seja um produto competitivo no mercado internacional, além de atender às demandas do consumidor.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo geral

O objetivo deste estudo foi estimar o potencial de emissão e remoção de GEE e balanço de carbono na produção primária, bem como avaliar a composição química e padrões higiênico-sanitários do leite de propriedades leiteiras em condições tropicais, considerando os diferentes sistemas de produção: com acesso ao pasto (AP) e confinado (C).

3.2 Objetivos específicos

- a) Categorizar dados de entrada e respectivos resultados inerentes aos sistemas de produção de leite;
- b) Avaliar o efeito do sistema de produção na emissão e remoção de GEE, além do balanço de carbono;
- c) Avaliar o efeito do sistema de produção na composição química e padrões higiênicos-sanitários do leite.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Caracterização das propriedades

Este estudo foi realizado devido ao projeto “Diretrizes para leite de baixa emissão de carbono em áreas tropicais” da Embrapa Pecuária Sudeste em conjunto com a Nestlé. Dessa forma, foram realizadas visitas à 25 propriedades leiteiras para aplicação de questionário, coleta de dados e desenvolvimento de ferramenta de contabilização de GEE para propriedades leiteiras alocadas em áreas tropicais. Estes sistemas estavam ligados a um programa inovador de agricultura regenerativa e baixa emissão de carbono, o qual foi concebido e implementado pela indústria de laticínios.

Foram selecionadas 18 propriedades leiteiras por apresentarem todas as informações necessárias para a contabilização de GEE deste estudo. As propriedades selecionadas foram divididas em dois grupos, de acordo com seus sistemas de produção, classificadas em: sistemas com acesso ao pasto (AP), sendo propriedades a pasto e semiconfinadas, e sistemas confinados

(C), considerando propriedades de *compost barn*. Estas propriedades estão localizadas nos estados de Minas Gerais (MG), São Paulo (SP) e Goiás (GO).

4.2 Coleta de dados

Foram realizadas visitas às propriedades leiteiras para coleta de dados. As visitas ocorreram no ano de 2023 durante quatro semanas, sendo de 06 a 09 de fevereiro para a região de Ibiá (MG), 14 a 16 de fevereiro para a região de Montes Claros (MG), 22 a 24 de fevereiro para a região de Araçatuba (SP), e 28 de fevereiro a 03 de março para a região de Goiânia (GO). O questionário continha perguntas fechadas e abertas, relacionadas à unidade produtiva, ao rebanho leiteiro, a composição da dieta total, ao manejo de dejetos, a produção e aquisição de alimentos e mudança de uso da terra. Estas informações eram referentes ao ano de 2022 completo (Anexo A).

4.3 Contabilização de gases de efeito estufa na produção primária do leite

A metodologia utilizada para a obtenção das estimativas de emissões apresentadas neste estudo fundamentou-se nas diretrizes do Inventário Nacional de Gases de Efeito Estufa, do Painel Intergovernamental sobre Mudança Climáticas (IPCC, 2019a; 2019b) e do Quarto Inventário Nacional de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa (Brasil, 2020).

A escolha dos níveis metodológicos (*Tiers*) a serem utilizados foi definida a partir da complexidade e importância de cada emissão (IPCC, 2006a). Emissões mais representativas devem adotar um detalhamento mais aprofundado e elaborado, conforme *Tier 2* (Brasil, 2020). Neste estudo, o rebanho foi dividido em seis categorias para a realização dos cálculos, sendo: bezerras em aleitamento (machos e fêmeas do nascimento à desmama), bezerras desmamadas (da desmama a 12 meses), novilhas (12 meses ao primeiro parto), vacas em lactação, vacas secas e touro.

4.3.1 Emissão de metano entérico

4.3.1.1 Ingestão de energia bruta (GE)

Para os cálculos da ingestão de energia bruta (*Gross energy*; GE) foi utilizado o método Tier 2 (IPCC, 2019a). Os dados coletados foram acrescentados às equações referentes a Energia Líquida de Manutenção (*Net Energy for Maintenance*; NE_m), Energia Líquida de Atividade (*Net Energy for Activity*; NE_a), Energia Líquida de Crescimento (*Net Energy for Growth*; NE_g), Energia Líquida para Lactação (*Net Energy for Lactation*; NE_l), Energia Líquida para Trabalho (*Net Energy for Work*; NE_{work}), Energia Líquida para Gestação (*Net Energy for Pregnancy*; NE_p), Taxa de Energia Líquida Utilizada para a Manutenção (% da energia digestível; *Ratio of Net Energy Available in Diet for Maintenance to Digestible Energy Consumed*; REM) e Taxa de Energia Líquida Utilizada para Crescimento (% da energia digestível; *Ratio of Net Energy Available for Growth in a Diet to Digestible Energy Consumed*; REG), de acordo com cada categoria animal. As equações e tabelas referentes a todos estes itens estão apresentadas no Anexo B. A partir dos resultados, calculou-se GE para cada categoria animal, conforme a equação 4.3.1.1.1 (IPCC, 2019a; Brasil, 2020):

$$GE = \left[\frac{\left(\frac{(NE_m + NE_a + NE_l + NE_{work} + NE_p)}{REM} \right) + \left(\frac{NE_g}{REG} \right)}{DE} \right] \quad (4.3.1.1.1)$$

Sendo:

GE : ingestão de energia bruta, MJ dia⁻¹;

NE_m : energia líquida para a manutenção animal, MJ dia⁻¹;

NE_a : energia líquida para atividade animal, MJ dia⁻¹;

NE_l : energia líquida para lactação, MJ dia⁻¹;

NE_{work} : energia líquida para trabalho, MJ dia⁻¹;

NE_p : energia líquida para gestação, MJ dia⁻¹;

REM: taxa de energia líquida utilizada para a manutenção (% da energia digestível);

NE_g : energia líquida necessária para crescimento, MJ dia⁻¹;

REG: taxa de energia líquida utilizada para o crescimento (% da energia digestível);

DE: digestibilidade dos alimentos expressa como uma fração da energia bruta, %.

4.3.1.2 Fator de emissão e cálculo metano entérico

O presente trabalho adotou, para o cálculo da fermentação entérica, o método *Tier 2* (IPCC, 2019a). Inicialmente, calculou-se o fator de emissão de CH₄ para cada categoria animal, conforme a equação 4.3.1.2.1:

$$EF = \left[\frac{\left(GE \times \left(\frac{Y_m}{100} \right) \times 365 \right)}{55,65} \right] \quad (4.3.1.2.1)$$

Sendo:

EF: fator de emissão, kg CH₄ cabeça⁻¹ ano⁻¹;

GE: ingestão de energia bruta, MJ cabeça⁻¹ ano⁻¹;

Y_m: fator de conversão de metano, porcentagem da energia bruta na alimentação convertida em metano, conforme tabela 1;

365: dias em um ano;

55,65: teor de energia do metano, MJ kg CH₄⁻¹.

Tabela 1 – Fator de conversão de CH₄, porcentagem da energia bruta ingerida por ruminantes convertida em CH₄.

Categorias	Descrição	Características dieta (%)	Y_m (%)
Demais categorias	> 75% de forragem	DE ≤ 62	7,00
	> 75% de forragem de alta qualidade da dieta total; Dieta contendo forragem entre 15 e 75% misturada com silagem e ou grãos	DE 62-71	6,30
	Confinamento (0 a 15% de forragem)	DE ≥ 72	4,00
Vacas lactantes	Alta produção (>8500 kg/cabeça/ano ⁻¹)	DE ≥ 70 FDN ≤ 35 com uso de aditivo na dieta	5,70
	Alta produção (>8500 kg/cabeça/ano ⁻¹)	DE ≥ 70 FDN ≤ 35	6,00
	Média produção (5000 – 8500 kg/cabeça/ano ⁻¹)	DE 63-70 FDN >37	6,30
	Baixa produção (<5000 kg/cabeça/ano ⁻¹)	DE ≤ 62 FDN >38	6,50

*DE: digestibilidade dos alimentos expressa como uma fração da energia bruta; FDN: fibra em detergente neutro; Y_m: porcentagem da energia bruta na alimentação convertida em metano.

Fonte: Adaptado de IPCC (2019a).

Em seguida, foi calculada a emissão de CH₄ entérico para cada categoria animal, de acordo com a equação 4.3.1.2.2:

$$Emissões = EF_{(T,P)} \times \left(\frac{N_{(T,P)}}{10^6} \right) \quad (4.3.1.2.2)$$

Sendo:

Emissões: emissões de metano da fermentação entérica, GG CH₄ ano⁻¹;

EF_(T,P): fator de emissão definido para bovinos, de acordo com classificação de sistema de produção P, kg CH₄ cabeça⁻¹ ano⁻¹;

N_(T,P): número de cabeças da categoria T, classificada de acordo com sistema de produção P;

T: categoria animal;

P: sistema de produção.

Por fim, os resultados de emissão de cada categoria foram somados para obter-se o total de emissão referente à fermentação entérica da propriedade, como realizado pelo Inventário Nacional de Gases de Efeito Estufa, do Painel Intergovernamental sobre Mudança Climáticas (IPCC (2019a), e pelo Quarto Inventário Nacional de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa (Brasil, 2020).

4.3.2 Emissão do manejo de dejetos

Foram calculadas as emissões de CH₄ e N₂O direto e indireto provenientes do gerenciamento de dejetos, cujas metodologias utilizadas foram os *Tiers* 1 e 2 (IPCC, 2019a). Foi considerado, para sistemas AP, 80% de dejetos depositado a pasto e 20% manejado em lagoa anaeróbica, enquanto para sistemas C, 80% do dejetos manejado como *compost barn* e 20% em lagoa anaeróbica. Estes valores foram definidos conforme o padrão encontrado durante as visitas às propriedades.

Para os dejetos manejados em *compost barn*, foram utilizados os valores padrão de compostagem leira intensiva com mistura e aeração frequente, definidos pelo IPCC (2019a; 2019b), conforme realizado pelo Departamento de Agricultura dos EUA (Leytem *et al.*, 2024).

4.3.2.1 Emissão de CH₄ pelo manejo de dejetos

Para o cálculo do CH₄ do manejo de dejetos, foi considerada população animal, sólidos voláteis, percentual de utilização de cada tipo de tratamento, e condições climáticas (Anexo C)

(IPCC, 2019a; Brasil, 2020). Posteriormente, calculou-se a emissão de CH₄ para cada categoria animal, de acordo com a equação 4.3.3.1.1:

$$Emissões = EF_{(T)} \times \left(\frac{N_{(T)}}{10^6} \right) \quad (4.3.3.1.1)$$

Sendo:

Emissões: emissões de metano provenientes do manejo de dejetos, GG CH₄ ano⁻¹;

EF_(T): fator de emissão definido para bovinos, kg CH₄ cabeça⁻¹ ano⁻¹;

N_(T): número de cabeças da categoria T;

T: categoria animal.

Os resultados de emissão de cada categoria foram somados para obter-se o total de emissão referente ao CH₄ do manejo de dejetos, como realizado pelo Inventário Nacional de Gases de Efeito Estufa, do Painel Intergovernamental sobre Mudança Climáticas (IPCC, 2019a) e pelo Quarto Inventário Nacional de Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa (Brasil, 2020).

4.3.2.2 Taxa de excreção anual de nitrogênio

Inicialmente, foram determinadas as taxas anuais de excreção de nitrogênio para cada categoria animal, considerando a quantidade de nitrogênio ingerido e retido, de acordo com a equação 4.3.3.2.1:

$$N_{ex(T)} = (N_{intake(T)} - N_{retention(T)}) \times 365 \quad (4.3.3.2.1)$$

Sendo:

N_{ex(T)}: excreção anual de N para animais da categoria T, kg N animal⁻¹ ano⁻¹;

N_{intake(T)}: ingestão diária de N por cabeça da categoria animal T, kg N animal⁻¹ dia⁻¹ (cálculo apresentado no Anexo D);

N_{retention(T)}: quantidade de N que é ingerida diariamente e retida por cabeça da categoria animal T, kg N animal⁻¹ dia⁻¹ (cálculo apresentado no Anexo D);

365: dias em um ano.

4.3.2.3 Emissão de N₂O direto proveniente dos dejetos manejados

Calculou-se a emissão de N₂O direto da propriedade proveniente dos dejetos que são manejados, exceto dejetos depositados a pasto, de acordo com cada categoria animal e tipo de gerenciamento de dejetos conforme a equação 4.3.3.3.1:

$$N_2O_{D(MM)} = \left[\sum_{(S)} \left[\sum_{(T,P)} \left((N_{(T,P)} \times Nex_{(T,P)}) \times AWMS_{(T,S,P)} \right) \right] \times EF_{3(S)} \right] \times \frac{44}{28} \quad (4.3.3.3.1)$$

Sendo:

$N_2O_{D(MM)}$: emissões diretas de N₂O provenientes do manejo de dejetos, kg N₂O ano⁻¹;

$N_{(T,P)}$: número de cabeças da categoria T, classificada de acordo com sistema de produção P;

$Nex_{(T,P)}$: excreção anual de nitrogênio por cabeça da categoria T, conforme sistema de produção P, kg N animal⁻¹ ano⁻¹;

$AWMS_{(T,S,P)}$: fração de esterco da categoria de animais T manejado com sistema de manejo de dejetos S, conforme sistema de produção P;

$EF_{3(S)}$: fator de emissão para emissões diretas de N₂O do sistema de manejo de dejetos S, kg N-N₂O/kg N excretado no sistema de manejo de dejetos S, conforme Tabela 2;

S: sistema de manejo de dejetos;

T: categoria animal;

P: sistema de produção;

44/28: conversão de emissões de N-N₂O (mm) em emissões de N₂O (mm).

Tabela 2 – Fator de emissão direta de N₂O (EF₃) para estimativa das emissões de sistemas de manejo de dejetos de bovinos leiteiros, conforme propriedades visitadas.

Sistema de manejo de dejetos	EF ₃ (kg N-N ₂ O/kg N excretado)
Lagoa anaeróbica	0
Armazenamento sólido	0,0100
Biodigestor	0,0006
Compostagem	0,0050

*EF₃: fator de emissão direta de N₂O.

Fonte: Adaptado de IPCC (2019a).

4.3.2.4 Emissão de N₂O indireto proveniente dos dejetos manejados

Inicialmente, calculou-se a quantidade de nitrogênio que é volatilizada nas formas de amônia (NH₃) e óxidos de nitrogênio (NO_x), proveniente dos dejetos manejados na propriedade para cada categoria animal (IPCC, 2019a; Brasil, 2020), conforme equação 4.3.3.4.1:

$$N_{volatilization-MMS} = \sum_{(S)} \left[\sum_{(T)} \left[\left((N_{(T,P)} \times Nex_{(T,P)}) \times AWMS_{(T,S,P)} \right) \times (FracGasMS)_{(T,S)} \right] \right] \quad (4.3.3.4.1)$$

Sendo:

$N_{volatilization-MMS}$: quantidade de nitrogênio do dejetos que é perdida devido à volatilização de NH₃ e NO_x, kg N ano⁻¹;

$N_{(T,P)}$: número de cabeças da categoria T, classificada de acordo com sistema de produção P;

$Nex_{(T,P)}$: média anual de excreção de nitrogênio por cabeça da categoria T, conforme sistema de produção P, kg N animal⁻¹ ano⁻¹;

$AWMS_{(T,S,P)}$: fração de esterco da categoria de animais T manejado com sistema de manejo de dejetos S, conforme sistema de produção P;

$FracGasMS_{(T,P)}$: porcentagem do N do dejetos gerenciado para animais de categoria T que se volatiliza como NH₃ e NO_x no sistema de manejo de dejetos S, %, conforme Tabela 3;

S: sistema de manejo de dejetos;

T: categoria animal;

P: sistema de produção.

Posteriormente, calculou-se as perdas de nitrogênio devido à lixiviação, de acordo com o gerenciamento de dejetos, conforme equação 4.3.3.4.2:

$$N_{leaching-MMS} = \sum_{(S)} \left[\sum_{(T)} \left[\left((N_{(T,P)} \times Nex_{(T,P)}) \times AWMS_{(T,S,P)} \right) \times (FracLeachMS)_{(T,S)} \right] \right] \quad (4.3.3.4.2)$$

Sendo:

$N_{leaching-MMS}$: quantidade de nitrogênio do esterco que é perdida devido à lixiviação, kg N ano⁻¹;

$N_{(T, P)}$: número de cabeças da categoria T, classificada de acordo com sistema de produção P;

$N_{ex(T, P)}$: excreção anual de nitrogênio por cabeça da categoria T, conforme sistema de produção P, kg N animal⁻¹ ano⁻¹;

$AWMS_{(T,S,P)}$: fração de esterco da categoria de animais T manejado com sistema de manejo de dejetos S, conforme sistema de produção P;

$Frac_{Leach}MS_{(T, P)}$: porcentagem do nitrogênio lixiviado do dejetos gerenciado para animais de categoria T no sistema de manejo de dejetos S, %, conforme Tabela 3;

S: sistema de manejo de dejetos;

T: categoria animal;

P: sistema de produção.

Tabela 3 – Fator de perda de nitrogênio por volatilização ($Frac_{Gas}MS$) e lixiviação ($Frac_{Leach}MS$) para cada manejo de dejetos para bovinos leiteiros.

Sistema de manejo de dejetos	$Frac_{Gas}MS$ (Vacas em lactação)	$Frac_{Gas}MS$ (Demais categorias)	$Frac_{Leach}MS$ (Todas categorias)
Lagoa anaeróbica	0,35	0,35	0
Armazenamento sólido	0,30	0,45	0,02
Biodigestor	0,28	0,28	0
Compostagem	0,50	0,65	0,06

* $Frac_{Gas}MS$: porcentagem do nitrogênio do dejetos de animais gerenciado que se volatiliza como NH_3 e NO_x ;

$Frac_{Leach}MS$: porcentagem do nitrogênio lixiviado do dejetos de animais gerenciado.

Fonte: Adaptado de IPCC (2019a).

Os resultados das perdas de nitrogênio devido à volatilização foram incorporados à equação 4.3.3.4.3 para calcular a emissão de N_2O indireto por categoria animal:

$$N_2O_{G(MM)} = (N_{volatilization-MMS} \times EF_4) \times \frac{44}{28} \quad (4.3.3.4.3)$$

Sendo:

$N_2O_{G(MM)}$: emissões indiretas de N_2O devido à volatilização de nitrogênio proveniente do manejo de dejetos, kg N_2O ano⁻¹;

$N_{volatilization-MMS}$: quantidade de nitrogênio do esterco que é perdida devido à volatilização de NH_3 e NO_x , kg N ano⁻¹;

EF_4 : fator para emissões de N_2O provenientes da deposição atmosférica de nitrogênio nos solos e na superfície da água, $kg\ N-N_2O\ (kg\ N-NH_3 + N-NO_x\ volatilizado)^{-1}$ (Tabela 4);

44/28: conversão de emissões de $N-N_2O$ (mm) em emissões de N_2O (mm).

Da mesma forma, os resultados das perdas de nitrogênio devido à lixiviação foram incorporados à equação 4.3.3.4.5 para o cálculo da emissão de N_2O indireto por categoria animal:

$$N_2O_{L(MM)} = (N_{leaching-MMS} \times EF_5) \times \frac{44}{28} \quad (4.3.3.4.5)$$

Sendo:

$N_2O_{L(MM)}$: emissões indiretas de N_2O devido à lixiviação de nitrogênio proveniente do manejo de dejetos, $kg\ N_2O\ ano^{-1}$;

$N_{leaching-MMS}$: quantidade de nitrogênio do esterco que é perdida devido à lixiviação, $kg\ N\ ano^{-1}$;

EF_5 : fator para emissões de N_2O provenientes da deposição atmosférica de nitrogênio nos solos e na superfície da água, $kg\ N-N_2O\ (kg\ N\ lixiviado)^{-1}$ (Tabela 4);

44/28: conversão de emissões de $N-N_2O$ (mm) em emissões de N_2O (mm).

Tabela 4 – Fatores para emissões de N_2O provenientes da volatilização e lixiviação.

Fatores de emissão		Unidade de medida
EF_4	0,010	$kg\ N_2O-N\ (kg\ NH_3-N + NO_x-N\ volatilizado)^{-1}$
EF_5	0,011	$kg\ N_2O-N\ (kg\ N\ lixiviado)^{-1}$

* EF_4 : fator para emissões de N_2O provenientes da deposição atmosférica de nitrogênio nos solos e na superfície da água; EF_5 : fator para emissões de N_2O provenientes da deposição atmosférica de nitrogênio nos solos e na superfície da água.

Fonte: Adaptado de IPCC (2019a).

4.3.2.5 Emissão de N_2O direto proveniente dos dejetos depositados a pasto

Inicialmente, calculou-se a quantidade anual depositada de nitrogênio proveniente da urina e esterco de animais alocados em pastagens, conforme equação 4.3.3.5.1, segundo IPCC (2019b):

$$F_{PRP} = \left[\sum_{(T)} \left[(N_{(T)} \times Nex_{(T)}) \times MS_{(PRP)} \right] \right] \quad (4.3.3.5.1)$$

Sendo:

F_{PRP} : quantidade anual de nitrogênio de urina e esterco dos animais depositada em pastagens, kg N ano⁻¹;

$N_{(T)}$: número de cabeças da categoria T;

$Nex_{(T)}$: excreção anual de nitrogênio por cabeça da categoria T, kg N animal⁻¹ ano⁻¹;

$MS_{(PRP)}$: fração da excreção de nitrogênio anual da categoria que é depositada no pasto, %;

Em seguida, a partir dos resultados anteriores, foi calculada a emissão de óxido nitroso (N₂O) direto de animais alocados em pastagens, de acordo com a equação 4.3.3.5.2:

$$N_2O - N_{PRP} = \left[(F_{(PRP, CPP)} \times EF_{3 PRP, CPP}) \times \frac{44}{28} \right] \quad (4.3.3.5.2)$$

Sendo:

$N_2O - N_{PRP}$: emissão anual direta de N-N₂O proveniente da urina e esterco depositados no solo por animais em pastejo, kg N-N₂O ano⁻¹;

$F_{PRP, CPP}$: quantidade anual de nitrogênio de urina e esterco de bovinos depositada em pastagens, kg N ano⁻¹ (Tabela 5);

$EF_{3 PRP, CPP}$: fator para emissões de N₂O provenientes da urina e esterco de bovinos depositados em pastagens, kg N-N₂O (kg N)⁻¹ (Tabela 5);

44/28: conversão de emissões N-N₂O (mm) em emissões de N₂O (mm).

4.3.2.6 Emissão de N₂O indireto proveniente dos dejetos depositados a pasto

Foi calculada, também, a emissão de N₂O indireto proveniente da volatilização nas formas de amônia (NH₃) e óxidos de nitrogênio (NO_x), conforme a equação 4.3.3.6.1:

$$N_2O_{(vol)} - N_{\square} = \left[(F_{PRP} \times Frac_{GASM}) \times EF_4 \right] \times \frac{44}{28} \quad (4.3.3.6.1)$$

Sendo:

$N_2O_{(vol)-N}$: quantidade anual de N-N₂O volatilizado proveniente da urina e esterco depositados por animais em pastagem, kg N-N₂O ano⁻¹;

F_{PRP} : quantidade anual de nitrogênio de urina e esterco de bovinos depositada em pastagens, kg N ano⁻¹;

$Frac_{GASM}$: fração de nitrogênio depositada no solo proveniente da urina e esterco de animais a pasto, que volatiliza como NH₃ e NO_x, kg N-NH₃ + N-NO_x volatilizado (kg N depositado)⁻¹ (Tabela 5);

EF_4 : fator para emissões de N₂O provenientes da deposição atmosférica de nitrogênio nos solos e na superfície da água, kg N-N₂O (kg N-NH₃ + N-NO_x volatilizado)⁻¹ (Tabela 4);

44/28: conversão de emissões de N-N₂O (mm) em emissões de N₂O (mm).

Por fim, calculou-se as emissões de N₂O indireto proveniente da lixiviação de nitrogênio de animais a pasto, de acordo com a equação 4.3.3.6.2:

$$N_2O_{(L)-N} = \left[\left(F_{PRP} \times Frac_{LEACH-(H)} \right) \times EF_5 \right] \times \frac{44}{28} \quad (4.3.3.6.2)$$

Sendo:

$N_2O_{(L)-N}$: quantidade anual de N-N₂O lixiviado proveniente da urina e esterco depositados por animais em pastagem, kg N-N₂O ano⁻¹;

F_{PRP} : quantidade anual de nitrogênio de urina e esterco de bovinos depositada em pastagens, kg N ano⁻¹;

$Frac_{LEACH-(H)}$: fração de nitrogênio que lixivia a partir da urina e esterco de animais a pasto depositados no solo, que, kg N-N₂O (kg N depositado)⁻¹ (Tabela 5);

EF_5 : fator para emissões de N₂O provenientes da deposição atmosférica de nitrogênio nos solos e na superfície da água, kg N-N₂O (kg N lixiviado)⁻¹ (Tabela 4);

44/28: conversão de emissões de N-N₂O (mm) em emissões de N₂O (mm).

Tabela 5 – Fatores de emissão de N₂O direto e indireto provenientes dos dejetos depositados a pasto, não manejados.

Fatores de emissão		Unidade de medida
$EF_{3PRP, CPP}$	0,004	kg N ₂ O-N (kg N) ⁻¹
$Frac_{GASM}$	0,210	kg N-NH ₃ + N-NO _x volatilizado (kg N depositado) ⁻¹
$Frac_{LEACH-(H)}$	0,240	kg N-N ₂ O (kg N depositado) ⁻¹

* $EF_{3PRP, CPP}$: fator para emissões de N_2O provenientes da urina e esterco de bovinos depositados em pastagens; $Frac_{GASM}$: fração de nitrogênio depositada no solo proveniente da urina e esterco de animais a pasto, que volatiliza como NH_3 e NO_x ; $Frac_{LEACH-(H)}$: fração de nitrogênio que lixivia a partir da urina e esterco de animais a pasto depositados no solo.

Fonte: Adaptado de IPCC (2019b).

Para obter-se o total das emissões de N_2O direto e indireto proveniente dos dejetos manejados em diferentes tipos de gerenciamentos e/ou depositados a pasto, foram somadas as emissões de GEE de cada categoria.

As emissões em CO_2 equivalente (CO_2eq) foram calculadas multiplicando as emissões de CH_4 e N_2O pelo seu potencial de aquecimento global a 100 anos (GWP100), com base no sexto relatório de avaliação do IPCC (AR6, 2021). Os valores de GWP100 são 27 e 273 para CH_4 e N_2O , respectivamente.

4.3.3 Emissão da produção e aquisição de alimentos

A emissão proveniente da produção e aquisição de alimentos foi calculada por meio da multiplicação da quantidade anual do produto (kg), utilizada na dieta das categorias animais, pela pegada de carbono (PC) de cada alimento (kg CO_2eq/kg de produto). Estas pegadas foram disponibilizadas pela base de dados *Ecoinvent 3.8* considerando a análise de ciclo vida de cada alimento (Anexo E - Tabela 6).

Alguns alimentos não foram encontrados na base de dados *Ecoinvent 3.8*; dessa forma, utilizou-se a PC de alimentos similares como substitutos. Para *Panicum spp.*, *Brachiaria spp.*, *Cynodon spp.* e *Opuntia cochenillifera*, foi utilizada PC para pastagem tropical anual (0,147 kg $CO_2eq kg MS^{-1}$), valor encontrado por Ribeiro-Filho *et al.* (2020). Para milho grão úmido de destilaria (*Wet Destillers Grains*; WDG) foi utilizada a PC de milho grão seco de destilaria (*Dried Destillers Grains*; DDG; 0,029 kg $CO_2eq kg MS^{-1}$). Da mesma forma fez-se com brique de algodão, sendo considerada a PC de caroço de algodão (0,422 kg $CO_2eq kg MS^{-1}$). Além disso, para feno *Cynodon cv. Tifton* foi adotado o valor de silagem de capim (0,102 kg $CO_2eq kg MS^{-1}$). Por fim, para propriedades que utilizavam ração comercial, foi calculada a PC com base na proporção de uma ração padrão contendo milho e soja (1,451 kg $CO_2eq kg MS^{-1}$).

4.4 Remoção de gases de efeito estufa na produção primária do leite

4.4.1 Remoção de GEE pela mudança de uso da terra

A remoção de GEE, que ocorre devido ao acúmulo de carbono no solo por meio das mudanças de uso da terra (MUT), foi calculada de acordo com o IPCC (2006c). Segundo as diretrizes do IPCC (2006c), a quantidade de carbono armazenada, emitida ou removida, depende do tipo de cultura, práticas de gestão, tipo de solo e variáveis climáticas. Inicialmente, foram definidas MUT, de acordo com o manejo do solo realizado nas propriedades visitadas, considerando um período de 20 anos; em seguida, foram determinados fatores de emissão para cada MUT, conforme Anexo F.

Posteriormente, realizou-se o cálculo de valores anuais de remoção dividindo-se pelo período em que os reservatórios de carbono levam para atingir o equilíbrio após a conversão (20 anos), conforme a equação 4.4.1.1 (IPCC, 2006c):

$$\Delta C = \frac{(SOC_0 - (SOC_0 \times F))}{D} \quad (4.4.1.1)$$

Sendo:

ΔC : variação dos estoques de carbono do solo (SOC) para determinado uso do solo (t C/ha);

SOC_0 : estoque de carbono associado ao ano de referência do uso da terra (t C/ha);

F : fator de emissão relacionado à MUT (Anexo F);

D : tempo para que a condição de equilíbrio de carbono do solo seja atingida, ou seja, 20 anos.

Em seguida, o resultado foi multiplicado pela área total da propriedade, pelo fator de conversão de CO₂ (44/12) e, por fim, transformado em quilograma (kg) para obter-se a remoção total pela MUT da propriedade.

4.4.2 Remoção de GEE pelo plantio de árvores

A remoção de GEE por meio do plantio de árvores foi estimada utilizando a média de remoção para *Eucalyptus* spp. com aproximadamente 7,5 anos, conforme descrito por

Tsukamoto Filho (2003), Muller *et al.* (2009) e Pezzopane *et al.* (2021). Estes estudos indicam que árvores de *Eucalyptus* spp. nessa faixa etária apresentam uma taxa média de remoção de 71,57 kg CO₂eq por árvore por ano. Dessa forma, foi realizado o cálculo de acordo com a equação 4.4.2.1:

$$\text{Remoção árvores} = N^{\circ} \text{ árvores} \times 71,57 \quad (4.4.2.1)$$

Sendo:

Remoção árvores: remoção de GEE proveniente do plantio de árvores na propriedade kg CO₂eq/ano;

Nº árvores: número de *Eucalyptus* spp. apresentando em média 7,5 anos na propriedade;

71,57: remoção em kg CO₂eq/árvore/ ano.

4.5 Balanço e neutralização de gases de efeito estufa na produção primária do leite

O balanço de carbono foi determinado como a diferença entre as emissões de GEE contabilizadas dentro do sistema de produção e as remoções de GEE (ambos em CO₂eq), que ocorreram por meio da mudança de uso da terra (MUT) e plantio de árvores. A partir deste cálculo, estimou-se o número de árvores necessário para a neutralização das emissões de GEE dos sistemas de produção de leite, considerando que *Eucalyptus* spp. com aproximadamente 7,5 anos remove cerca de 71,57 kg CO₂eq/árvore/ ano.

4.6 Intensidade de emissão de GEE por leite produzido e corrigido para gordura e proteína

Após o cálculo das emissões e remoções de GEE, além de balanço de carbono, foram quantificadas seis intensidades por leite produzido e corrigido para gordura e proteína, sendo: intensidade de emissão de CH₄ entérico (kg CO₂eq/kg FPCM), intensidade de emissão por dejetos (kg CO₂eq/kg FPCM), intensidade de emissão da produção e aquisição de alimentos (kg CO₂eq/kg FPCM), intensidade de emissão de GEE total da propriedade (kg CO₂eq/kg FPCM), intensidade de remoção de GEE total da propriedade (kg CO₂eq/kg FPCM) e intensidade do balanço de carbono (kg CO₂eq/kg FPCM).

4.6.1 Intensidade de emissão da fermentação entérica

Inicialmente, a produção de leite (litros/ano) foi corrigida para 1 kg de leite cru com média de gordura (4%) e proteína (3,3%) (*Fat and Protein Corrected Milk*; FPCM), conforme a equação 4.6.1.1. Este fator de correção está de acordo com as diretrizes da Federação Internacional de Laticínios (*International Dairy Federation*; IDF, 2015) e é utilizado para a padronização de resultados, com o intuito de viabilizar comparações entre produtos (IDF, 2015).

$$FPCM = P \times (0.1226 \times GL + 0.0776 \times PL + 0.2534) \quad (4.6.1.1)$$

Sendo:

FPCM: 1 kg de leite corrigido para gordura e proteína (kg de leite/ano);

P: produção de leite na fazenda (kg/ano);

GL: média anual do teor de gordura do leite no tanque coletada na propriedade (%);

PL: média anual do teor de proteína do leite no tanque coletada na propriedade (%).

Posteriormente, calculou-se a intensidade de emissão de CH₄ entérico por leite produzido e corrigido para gordura e proteína (kg CO₂eq/kg FPCM), de acordo com a equação 4.6.1.2:

$$Intensidade\ CH_4\ entérico = \left(\frac{Emissão\ anual\ CH_4\ entérico}{FPCM} \right) \quad (4.6.1.2)$$

Sendo:

Intensidade CH₄ entérico: emissões anuais de CH₄ entérico da propriedade por leite produzido e corrigido para gordura e proteína (kg CO₂eq/kg FPCM);

Emissão anual CH₄ entérico: emissões anuais do CH₄ proveniente da fermentação entérica (kg CO₂eq/ano);

FPCM: 1 kg de leite corrigido para gordura e proteína (kg de leite/ano).

4.6.2 Intensidade de emissão do manejo de dejetos

Calculou-se a intensidade de emissão de dejetos por leite produzido e corrigido para gordura e proteína (kg CO₂eq/kg FPCM), conforme a equação 4.6.2.1:

$$\text{Intensidade dejetos} = \left(\frac{\text{Emissão anual dejetos}}{\text{FPCM}} \right) \quad (4.6.2.1)$$

Sendo:

Intensidade dejetos: emissões anuais de GEE de dejetos da propriedade por leite produzido e corrigido para gordura e proteína (kg CO₂eq/kg FPCM);

Emissão anual dejetos: emissões anuais de GEE provenientes do manejo de dejetos (kg CO₂eq/ano);

FPCM: 1 kg de leite corrigido para gordura e proteína (kg de leite ano⁻¹).

4.6.3 Intensidade de emissão da produção e aquisição de alimentos

A partir das emissões anuais de GEE provenientes da produção e aquisição de alimentos, calculou-se a intensidade de emissão (kg CO₂eq/kg FPCM), de acordo com a equação 4.6.3.1:

$$\text{Intensidade alimentos} = \left(\frac{\text{Emissão anual alimentos}}{\text{FPCM}} \right) \quad (4.6.3.1)$$

Sendo:

Intensidade alimentos: emissões anuais de GEE da produção e aquisição de alimentos da propriedade por leite produzido e corrigido para gordura e proteína (kg CO₂eq/kg FPCM);

Emissão anual alimentos: emissões anuais de GEE provenientes da produção e aquisição de alimentos (kg CO₂eq/ano);

FPCM: 1 kg de leite corrigido para gordura e proteína (kg de leite/ano).

4.6.4 Intensidade de emissão de GEE total da propriedade

Em seguida, foi calculada a intensidade de emissão de GEE total da propriedade por leite produzido e corrigido para gordura e proteína (kg CO₂eq/kg FPCM), de acordo com a equação 4.6.4.1:

$$\text{Intensidade de emissão GEE total} = \left(\frac{\text{Emissão anual } CH_4 \text{ entérico} + \text{Emissão anual dejetos} + \text{Emissão anual alimentos}}{FPCM} \right) \quad (4.6.4.1)$$

Sendo:

Intensidade de emissão de GEE total: emissões anuais de GEE totais da propriedade por leite produzido e corrigido para gordura e proteína (kg CO₂eq/kg FPCM);

Emissão anual CH₄ entérico: emissões anuais provenientes da fermentação entérica (kg CO₂eq/ano);

Emissão anual dejetos: emissões anuais provenientes do manejo de dejetos (kg CO₂eq/ano);

Emissão anual alimentos: emissões anuais provenientes da produção e aquisição de alimentos (kg CO₂eq/ano);

FPCM: 1 kg de leite corrigido para gordura e proteína (kg de leite/ano).

4.6.5 Intensidade de remoção de GEE total da propriedade

Considerando a remoção de GEE da propriedade, foi calculada a intensidade por leite produzido e corrigido para gordura e proteína (kg CO₂eq/kg FPCM), de acordo com a equação 4.6.5.1:

$$\text{Intensidade remoção de GEE total} = \left(\frac{\text{Remoção anual de GEE}}{FPCM} \right) \quad (4.6.5.1)$$

Sendo:

Intensidade remoção de GEE total: remoção de GEE total da propriedade por leite produzido e corrigido para gordura e proteína (kg CO₂eq/kg FPCM);

Remoção anual de GEE: remoções provenientes da mudança de uso da terra e plantio de árvores (kg CO₂eq/ano);

FPCM: 1 kg de leite corrigido para gordura e proteína (kg de leite/ano).

4.6.6 Intensidade do balanço de carbono da propriedade

Por fim, calculou-se a intensidade do balanço de carbono (diferença entre emissões e remoções de GEE da propriedade), conforme a equação 4.6.6.1:

$$\text{Intensidade balanço C} = \left(\frac{\text{Balanço de C}}{\text{FPCM}} \right) \quad (4.6.6.1)$$

Sendo:

Intensidade balanço C: balanço de GEE da propriedade por leite produzido e corrigido para gordura e proteína (kg CO₂eq/kg FPCM);

Balanço de C: diferença entre emissões e remoções da propriedade (kg CO₂eq/ano);

FPCM: 1 kg de leite corrigido para gordura e proteína (kg de leite/ano).

4.7 Intensidade de emissão de GEE por vaca lactante no rebanho

Adicionalmente, foram realizados cálculos de intensidade de emissão (GEE), remoção (GEE) e balanço de carbono por vacas lactantes no rebanho, como realizado nos cálculos de intensidades anteriores, dividindo as emissões de cada setor (GEE) e remoção de GEE, além de balanço de carbono pelo número de vacas lactantes existentes no rebanho. Foram contabilizadas a intensidade de emissão de CH₄ entérico (kg CO₂eq/vaca lactante/ano), intensidade de emissão de dejetos (kg CO₂eq/vaca lactante/ano), intensidade de emissão da produção e aquisição de alimentos (kg CO₂eq/vaca lactante/ano), intensidade de emissão de GEE total da propriedade (kg CO₂eq/vaca lactante/ano), intensidade de remoção de GEE total da propriedade (kg CO₂eq/vaca lactante/ano) e intensidade do balanço de carbono (kg CO₂eq/vaca lactante/ano).

4.8 Intensidade de emissão de GEE por hectare

Da mesma forma, foram calculadas as intensidades por ha, sendo consideradas intensidade de emissão de GEE total (kg CO₂eq/ha/ano), intensidade de remoção de GEE total (kg CO₂eq/ha/ano) e intensidade do balanço de carbono (kg CO₂eq/ha/ano).

4.9 Qualidade do leite

As coletas de leite das propriedades foram realizadas para análise da composição e padrões higiênico-sanitários, mensalmente, sendo as amostras encaminhadas para a Clínica do Leite, em Piracicaba, SP. Para a coleta, o laboratório forneceu frascos contendo conservantes, sendo frascos com azidiol para análise de contagem padrão em placas (CPP) e frascos com

bromonata para análise de gordura, proteína, sólidos totais (ST), sólidos desengordurados (SD) e contagem de células somáticas (CCS).

Foi realizada a coleta do leite total no tanque de expansão pela indústria de laticínios responsável pelas propriedades, em cada sistema de produção avaliado. Inicialmente, o leite contido no tanque foi agitado para homogeneização de seus componentes, evitando erros de leitura. O sistema de agitação do tanque foi ligado por, no mínimo, cinco minutos antes da coleta. Quando o tanque apresenta capacidade acima de 5.700 litros, o tempo de agitação foi maior, acima de dez minutos. Em seguida, coletou-se leite utilizando coletor ou concha, devidamente higienizado, e as amostras foram acondicionadas em frascos contendo os devidos conservantes. Posteriormente, os frascos foram homogeneizados e corretamente identificados para envio ao laboratório (Dias; Antes, 2012).

A composição do leite, como gordura, proteína, ST e SD foi determinada por absorção infravermelha (MilkoScan™ FTIR), conforme norma ISO 9622:2013/IDF 141:2013 (ISO; IDF, 2013a). A CCS foi determinada por citometria de fluxo (Fossomatic™ 7 DC), de acordo com a norma ISO 13366-2:2006/IDF 148-2:2006 (ISO; IDF, 2006). Por fim, a CPP foi determinada também por citometria de fluxo (BactoScan™ FC+) em concordância com a norma ISO 16297:2013/IDF 161:2013 (ISO; IDF, 2013b).

A indústria de laticínios forneceu a média anual dos componentes e padrões higiênico-sanitários do leite de cada propriedade para a realização deste estudo. Nestes dados, foi realizada a análise estatística para a avaliação do impacto do sistema de produção (com acesso ao pasto e confinados) na qualidade do leite. Além disso, as médias anuais do teor de gordura e proteína do leite foram incorporadas às equações de produção anual de leite corrigido para gordura e proteína (FPCM), predição de emissões, intensidade de emissões, intensidade de remoções e intensidade de balanço de carbono.

4.10 Análise estatística

Para testar o efeito dos sistemas de produção [sistema com acesso ao pasto (AP) e sistema confinado (C)] nas variáveis área (ha), proporção de vacas adultas e recria no rebanho (%), produção de leite na lactação (kg leite/lactação), produção de leite diária (litros leite/dia), FPCM (kg leite/ano), gordura (%), proteína (%), ST (%), SD (%), CCS (cs/mL), CPP (UFC/mL), proteína bruta (PB) da dieta de vacas lactantes (%), digestibilidade da dieta de vacas lactantes (%), volumoso e concentrado da dieta vacas lactantes (%), relação concentrado:leite (kg concentrado/litros leite), proporção da produção de CH₄ entérico e dejetos das vacas lactantes

em relação ao rebanho total (%), emissão de CH₄ entérico (kg CH₄/vaca/ano), emissão de CH₄ (kg CH₄/vaca/ano), N₂O direto e indireto dos dejetos (kg N₂O/vaca/ano), intensidades de emissões e remoções de GEE e balanço de carbono por vaca lactante no rebanho (kg CO₂eq/vaca lactante/ano), por ha (kg CO₂eq/ha/ano) e por FPCM (kg CO₂eq/kg FPCM), além do número de árvores necessárias para neutralização das emissões, foram utilizados modelos lineares.

As variáveis de interesse (γ) seguiram distribuição normal (teste de Shapiro-Wilk) com média e desvio padrão determinados pelos dados coletados em cada sistema de produção. Os modelos lineares foram ajustados utilizando os pacotes lme4 (Bates *et al.*, 2015) e lmer Test (Kuznetsova; Brockhoff; Christensen, 2017). Os intervalos de confiança foram estimados por meio de testes qui-quadrado de Wald Tipo II. A adequação dos modelos foi testada inspecionando o resíduo nos gráficos com uma linha de melhor ajuste. O processamento dos dados e as análises [(descritivas (frequência, média, desvio padrão, coeficiente de variação, mínimo e máximo) e influência (modelos lineares)] foram realizadas em R com o auxílio do *software* RStudio (Core Team, 2023).

As distribuições marginais foram obtidas separadamente para cada sistema de produção (sistemas AP e C) por meio da amostragem da Cadeia de Markov Monte Carlo com 2.000 interações. Durante a etapa de estimativa, foram gerados três modelos, cada um com 2.000 interações, e 1.000 informações foram descartadas (*burn-in*) resultando no total de amostras pós-*burn-in* de 3.000. A convergência foi verificada pela observação dos gráficos de linha do processo MCMC, e os valores de R relacionados a cada parâmetro. Valores próximos de 1 indicaram boa convergência (Gelman; Rubin, 1992). A principal razão para a escolha deste método baseou-se no baixo número de unidades experimentais.

Segundo McNeish (2016), a simulação de Monte Carlo é um meio de estimativa apropriado e preciso para amostras pequenas, devido ao uso de métodos iterativos. Isso permite realizar n simulações com este conjunto de dados limitado. Além disso, o mesmo autor discutiu outras características desta abordagem, como os parâmetros aleatórios e os dados fixos, e a inclusão de informações prévias, o que pode aumentar a precisão da previsão. Assim, para fins de interpretação dos resultados, utilizamos a estimativa dos modelos. A significância foi declarada em $p \leq 0,05$ e considerada como tendência quando $p \leq 0,10$.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No presente estudo, os sistemas de produção com acesso ao pasto (AP) e confinados (C) apresentaram área variando de 43 a 190 hectares (ha) (média 97,68 ha) e 15 a 302 ha (média 95,80 ha), respectivamente. A maioria das propriedades leiteiras no Brasil é de pequeno e médio porte (MAPA, 2022), apresentando de 1 a 50 hectares (ha) (IBGE, 2017). Dessa forma, a área média de ambos os sistemas de produção demonstrou-se superior à média brasileira.

Os sistemas de produção incluídos neste estudo eram tecnificados e utilizavam raças especializadas em produção de leite. Segundo a classificação realizada por Agostinho *et al.* (2019), sistemas de produção com acesso ao pasto foram considerados como semi-intensivos. Realizava-se manejo intensivo rotacionado de pastagem para vacas em lactação, além de fornecimento de suplementação de concentrado durante todo o ano e volumoso conforme necessário (alto uso de insumos). Esses sistemas foram considerados eficientes na produção de silagem de milho, produzindo toda ou a maior parte do volumoso fornecido aos animais, e apresentando média de produção de 6.213,33 kg leite/lactação e 19,13 litros leite/vaca/dia (Tabela 6).

Os sistemas confinados foram classificados como intensivos (Agostinho *et al.*, 2019). Os animais permaneciam em estábulos com cama revestida de serragem, maravalha ou casca de café, e os galpões contavam com ventiladores e, muitas vezes, nebulização para vacas em lactação, garantindo maior conforto térmico e, conseqüentemente, maior produção de leite durante a lactação. Nessas propriedades, a alimentação era baseada em concentrado e volumoso no cocho durante todo o ano, sendo também consideradas eficientes na produção de volumoso. Esses fatores demonstram a maior tecnologia dessas propriedades em comparação aos demais sistemas de produção, resultando em uma média de produção de 10.089,92 kg leite/lactação e 31,67 litros leite/vaca/dia (Tabela 6).

Tabela 6 – Dados referentes à produção e qualidade do leite dos sistemas de produção com acesso ao pasto (n=6) e confinados (n=12), que foram visitados nas regiões de São Paulo, Minas Gerais e Goiás, no ano de 2023.

Variáveis	SP		SC		P-valor
	Média	Desv. pad.	Média	Desv. pad.	
Número de vacas lactantes	325	591,27	165	108,19	0,213
Peso médio vacas lactantes (kg)	510	67,82	620	50,63	<0,001
Produção de leite na lactação (kg leite/lactação)	6.213,33	1.574,58	10.089,92	1.470,16	<0,001
Produção de leite por dia (litros leite/vaca/dia)	19,13	6,13	31,67	5,92	<0,001
FPCM (ton leite/ano)	2.135,84	4.049,55	1.789,25	1.381,70	0,788
Gordura (%)	3,93	0,25	3,53	0,26	0,007
Proteína (%)	3,27	0,23	3,23	0,13	0,699
Sólidos totais (%)	12,7	0,61	12,32	0,4	0,111
Sólidos desengordurados (%)	8,82	0,25	8,79	0,16	0,795
CCS (mil cs/mL)	329,3	174.229	224,17	98.366	0,117
CPP (mil UFC/mL)	32,87	42.895	10,81	10.582	0,103

*AP: sistemas de produção com acesso ao pasto; C: sistemas de produção confinados; FPCM: produção de leite anual corrigida para gordura e proteína; CCS: Contagem de Células Somáticas; CPP: Contagem Padrão em Placas.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os sistemas AP apresentaram menor produção de leite na lactação (6.213,33 kg leite/lactação) ($p < 0,001$) e diária (19,13 litros leite/vaca/dia) ($p < 0,001$) em relação aos sistemas C, que apresentaram produção de 10.089,92 kg leite/lactação e 31,67 litros leite/vaca/dia (Tabela 6). Em sistemas com acesso ao pasto, as vacas geralmente percorrem longas distâncias, o que resulta em maior gasto energético. Além disso, estão sujeitas às variações climáticas, que afetam tanto a qualidade da dieta quanto o conforto térmico. Esses animais muitas vezes estão inseridos em piquetes com sombra limitada ou inexistente e pouca ventilação (Paris; Cecato, 2009). Já animais em sistemas confinados permanecem estabulados em galpões durante todo o ano, revestidos com cama, é possível controlar as condições ambientais, incluindo temperatura, umidade e ventilação. Isso garante maior conforto térmico aumentando, conseqüentemente, a produção de leite.

Algumas propriedades em que os animais têm acesso ao pasto adotam raças especializadas para esse tipo de sistema, apresentando menor produção de leite em comparação aos sistemas confinados. No entanto, essa não é a realidade, logo o fato de vacas não adaptadas estarem alocadas em áreas não confortáveis e frequentemente sujeitas ao estresse térmico

devido às altas temperaturas, impede que expressem seu potencial genético, interferindo diretamente em sua produção.

Estudos anteriores verificaram menor produção de leite em vacas alimentadas com dietas baseadas em pastagens, com (Bargo *et al.*, 2002) ou sem suplementação (Kolver; Moller, 1998), em relação às vacas recebendo apenas ração total mista. Segundo Kolver e Moller (1998), isso se deve ao menor consumo de matéria seca (CMS) e energia dos animais com acesso ao pasto. No entanto, esse fato não foi observado neste estudo, pois não houve diferença no fornecimento de matéria seca entre os sistemas de produção, com média de 20,69 kg MS para sistemas AP e 20,28 kg MS para sistemas C (Tabela 7).

Estudos recentes demonstraram resultados semelhantes aos deste experimento, caracterizando sistemas baseados em pastagens na América Latina por apresentarem média de produção de leite de 19 kg leite/vaca/dia e 5.396,7 kg leite/lactação (Sainz-Sánchez *et al.*, 2017; Fariña; Chilbroste, 2019; Marín-Santana *et al.*, 2020).

Em relação à composição e padrões higiênico-sanitários, todas as propriedades apresentaram-se dentro do padrão estabelecido pela IN 58 (Brasil, 2018), referente ao leite cru refrigerado (Tabela 6). A gordura do leite dos sistemas AP foi 1,11 vezes maior (média de 3,93%) ($p=0,007$) comparada à dos sistemas C (média de 3,53%). Este parâmetro pode variar de acordo com a raça (Woodford; Jorgensen; Barrington, 1986), estação do ano (Heck *et al.*, 2009), fase da lactação (Chilliard; Ferlay; Doreau, 2001), sendo o componente do leite mais suscetível a variações devido a intervenções dietéticas (Dewhurst *et al.*, 2006; Chilliard *et al.*, 2007; O'Callaghan *et al.*, 2016; Santos, 2002).

A proporção concentrado:volumoso foi determinada como importante consideração da dieta que pode alterar o perfil de ácidos graxos do leite (Chilliard *et al.*, 2007; Jaakamo *et al.*, 2019) e, conseqüentemente, a gordura (Magan *et al.*, 2021). No entanto, neste estudo, não se observou diferença significativa na proporção concentrado:volumoso entre os sistemas de produção AP e C (Tabela 7).

Sistemas agrícolas baseados em pastagens resultam em leite caracterizado por alto teor de gordura devido a dietas ricas em fibras, produzindo leite abundante em microcomponentes (ácidos graxos e vitaminas) e em compostos voláteis (aromas e terpenos), favoráveis à nutrição e à saúde humana (Lock *et al.*, 2006; Morand-Fehr *et al.*, 2007). Aumentar o teor de fibra efetiva e fibra fisicamente efetiva promove o aumento de fluxo de saliva, que age como tampão e mantém o pH ruminal entre 5,8 e 6,4, tais fatores aumentam a proporção de acetato em comparação ao propionato, o que provoca, conseqüentemente, aumento do teor de gordura do leite (Bakanar *et al.*, 2018). Demais pesquisadores também realizaram estudos comparando o

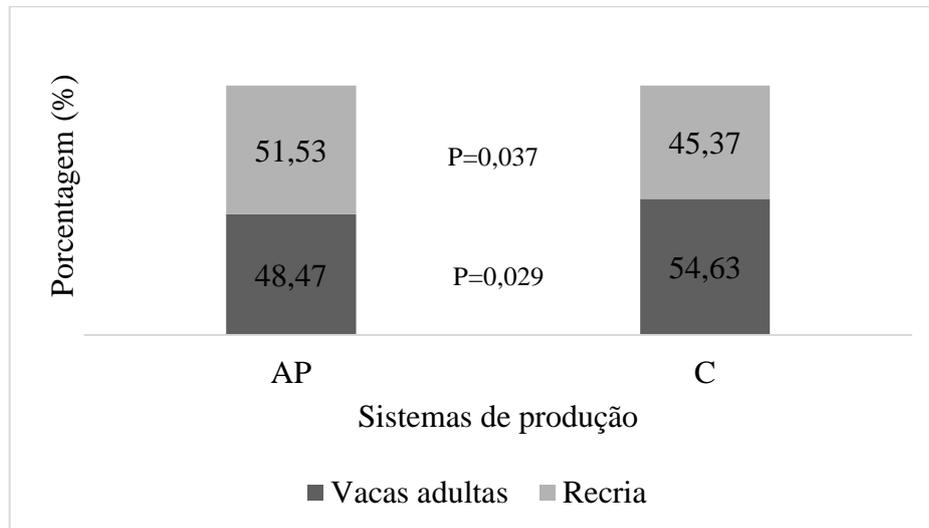
efeito dos sistemas de alimentação a pasto e ração total mista, demonstrando que o leite produzido em sistemas baseados em pastagens apresentou maior teor de gordura do leite (Liu *et al.*, 2016; Vanbergue *et al.*, 2018).

Além disso, a raça também pode ter influenciado as diferenças nos teores de gordura observados. Os sistemas AP apresentaram em sua maioria animais da raça girolando e sistemas nos C predominaram animais da raça holandês. Segundo Fonseca e Santos (2000), rebanhos brasileiros da raça girolando apresentam em média 4,0% de gordura, enquanto a composição média do leite da raça holandesa é de aproximadamente 3,5% de gordura (Walstra; Wouters; Geurts, 2006).

Para as demais variáveis, como número de vacas em lactação, produção de leite anual corrigido para gordura e proteína (FPCM), teor de proteína (%), sólidos totais (%), sólidos desengordurados (%), CCS (cs/mL) e CPP (UFC/mL), não foram observadas diferenças significativas entre os sistemas de produção. As propriedades deste estudo estavam ligadas a um programa inovador de baixa emissão de carbono, o qual foi concebido e implementado por uma indústria de laticínios. A integração entre tecnologia avançada, práticas agrícolas sustentáveis e foco na redução das emissões de carbono representa abordagem holística e progressista para a produção leiteira, impactando positivamente o meio ambiente e a qualidade dos produtos.

Conforme a Figura 1, nenhum dos sistemas apresentaram rebanho equilibrado. De acordo com Camargo e Haddade (2014), um rebanho equilibrado consiste em 70% de vacas adultas e 30% de recria (bezerras e novilhas). Dessas vacas adultas, em média, 83,3% devem estar em lactação, valor calculado utilizando período de lactação de 10 meses dividido pelo intervalo entre partos ideal de 12 meses, multiplicado por 100. Assim, aproximadamente 58,3% do rebanho total estará em lactação. Durante as visitas realizadas às propriedades AP e C, observou-se que ambas estavam em crescimento, no caso, retendo animais de recria para aumento do rebanho.

Figura 1 – Proporção de vacas adultas (%) e recria (%) em relação ao rebanho total, dos sistemas de produção AP (n=6) e C (n=12) visitados nas regiões de São Paulo, Minas Gerais e Goiás, no ano de 2023.



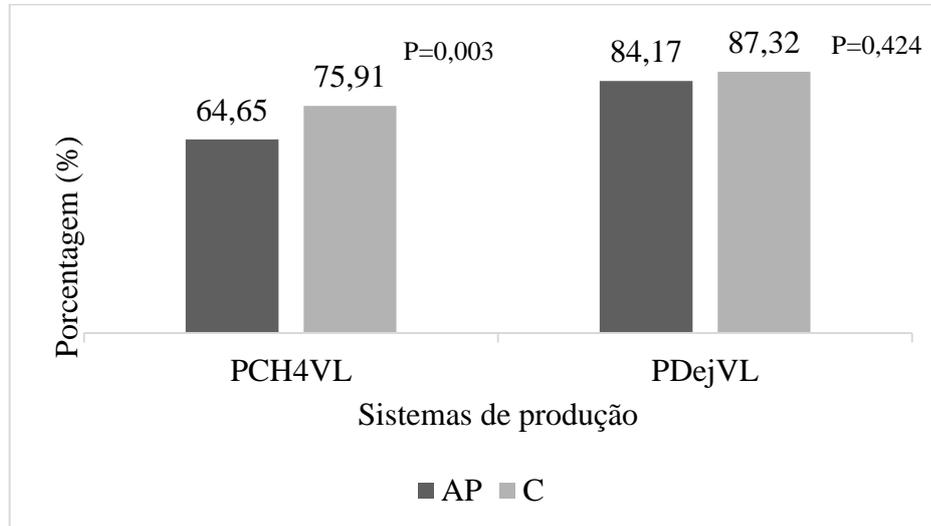
*AP: sistemas de produção com acesso ao pasto; C: sistemas de produção confinados.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Verificou-se que sistemas AP apresentaram menor proporção de vacas adultas (média 48,17%) ($p=0,029$) e maior proporção de recria (média 51,53%) ($p=0,037$) em comparação aos sistemas C, que registraram média e 54,63% de vacas adultas e 45,37% de recria (Figura 1). No entanto, ambos os rebanhos não demonstraram-se equilibrados, tal situação é considerada transitória, até que se atinja número planejado de vacas adultas no plantel, permitindo que os sistemas alcancem melhor desempenho produtivo de leite.

Em sistemas pecuários leiteiros, as vacas em lactação são os animais que mais emitem GEE no rebanho, principalmente, devido ao maior consumo de alimentos que serão transformados em leite (Figura 2). Porém, as novilhas emitem tanto quanto as vacas adultas, mas são animais não produtivos. Dessa forma, maiores emissões de GEE associadas à menor produção de leite do rebanho, geram conseqüentemente, maiores intensidades de emissões de GEE por leite produzido e corrigido para gordura e proteína, afetando diretamente a eficiência ambiental das propriedades.

Figura 2 – Proporção da emissão das vacas lactantes em relação ao rebanho total, provenientes do CH₄ entérico e dejetos dos sistemas de produção de leite AP (n=6) e C (n=12) visitados das regiões de São Paulo, Minas Gerais e Goiás, no ano de 2023.



*AP: sistemas de produção com acesso ao pasto; C: sistemas de produção confinados; PCH₄VL (kg CO₂eq/ano): proporção da produção de CH₄ entérico das vacas lactantes em relação ao rebanho total; PDejVL (kg CO₂eq/ano): proporção da produção de dejetos das vacas lactantes em relação ao rebanho total.

Fonte: Elaborado pelo autor.

No presente estudo, foi observada uma menor proporção na produção de CH₄ entérico por vacas lactantes em relação ao rebanho total nos sistemas AP (média 64,65%) (p=0,003) em comparação aos sistemas C (média 75,91%). Tal fato, se deve à menor proporção de vacas adultas no rebanho de propriedades AP em relação às propriedades C. Quanto à proporção na produção de dejetos por vacas lactantes em relação ao rebanho total, não houve diferença significativa entre os sistemas de produção, o que demonstra a expressividade da emissão de dejetos (em média 85%) pela categoria de vacas lactantes (Figura 2). Portanto, mesmo havendo maior proporção de vacas em lactação nos sistemas C, essa diferença não foi evidenciada.

O manejo alimentar das vacas lactantes é de extrema relevância dentro do sistema de produção, uma vez que afeta as emissões de GEE e de N, além de representar os custos mais elevados das operações agrícolas (Ouatahar *et al.*, 2021). Alguns parâmetros da dieta das vacas lactantes estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Parâmetros da dieta das vacas lactantes alocadas nos sistemas de produção de leite AP (n=6) e C (n=12) visitados nas regiões de São Paulo, Minas Gerais e Goiás, no ano de 2023.

Variáveis	AP (n=6)		C (n=12)		P-valor
	Média	Desv. pad.	Média	Desv. pad.	

Proteína bruta da dieta total (%)	14,65	2,57	15,45	2,75	0,562
Digestibilidade da dieta total (%)	65,79	4,18	68,01	2,84	0,198
Volumoso total da dieta (%)	59,73	11,99	51,82	9,15	0,137
Concentrado total da dieta (%)	40,27	11,99	48,18	9,15	0,137
Fornecimento volumoso na dieta vacas lactantes (kg MS)	12,59	3,99	10,41	1,88	0,128
Fornecimento concentrado na dieta vacas lactantes (kg MS)	8,1	1,69	9,87	2,62	0,153
Relação concentrado/leite (kg concentrado/ litros leite)	0,46	0,2	0,32	0,09	0,045

*AP: sistemas de produção com acesso ao pasto; C: sistemas de produção confinados.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Neste experimento, não foram observadas diferenças significativas para as variáveis proteína bruta (%), digestibilidade (%), volumoso (%) e concentrado (%) e consumo de concentrado e volumoso (kg MS) da dieta das vacas lactantes (Tabela 7). Os sistemas AP apresentaram média de fornecimento de 20,69 kg MS, contendo 14,65% de proteína bruta (PB) (base MS) e 65,79% de nutrientes digestíveis totais (NDT) (base MS) (Tabela 7). Conforme simulação realizada pelo NASEM (2021), levando em consideração o padrão e os hábitos dos animais, além do tipo de dieta disponível em cada propriedade, vacas lactantes com peso vivo médio de 510 kg, produção de leite de 19,13 litros/vaca/dia, teores de gordura no leite de 3,93% e de proteína de 3,27%, devem consumir 17,67 kg MS contendo aproximadamente 14,20% de PB (MS) e 63,63% de NDT (MS).

Observou-se nos sistemas C média de fornecimento de 20,28 kg MS, com 14,45% de PB e 68,01% de digestibilidade (Tabela 7). Da mesma forma, vacas lactantes com peso vivo médio de 620 kg, produção de leite de 31,67 litros/vaca/dia, teores de gordura no leite de 3,53% e de proteína de 3,23%, devem consumir 22,91 kg MS contendo 14,4% de PB (base MS) e 75,80% de NDT (base MS) (NASEM, 2021). Os dados de NDT foram estimados utilizando resultados de fibra em detergente ácido (%).

A vulnerabilidade dos sistemas AP às variações edafoclimáticas é uma realidade enfrentada pelos produtores com frequência. Essas flutuações podem afetar a disponibilidade e qualidade das pastagens, impactando diretamente na ingestão e digestibilidade dos alimentos pelos animais. Este *déficit* nutricional sazonal, geralmente, é reduzido pelo aumento da suplementação de volumosos e concentrados. Neste estudo, observou-se que os sistemas AP forneceram maior quantidade de alimento (kg MS) com proporção semelhante de PB (%) e NDT (%), em comparação à simulação realizada no NASEM (2021). Esta prática resulta em

aumento dos custos de produção, além de demonstrar a ineficiência dessas propriedades tanto em relação à gestão nutricional quanto às emissões de GEE.

Já nos sistemas C, observa-se o fornecimento de menor quantidade de alimento (kg MS) para vacas lactantes, com proporção ideal de PB (%) e menor proporção de NDT (%), em relação ao recomendado pelo NASEM (2021). Esse fato aponta para a necessidade de uma análise mais aprofundada dos processos de alimentação nesses sistemas, visando otimizar a produção leiteira e garantir a utilização eficiente dos recursos e insumos disponíveis.

A relação concentrado:volumoso da dieta de vacas lactantes varia conforme sua produção de leite. Geralmente, vacas de alta produção exigem maior proporção de concentrado em sua dieta. De acordo com Carvalho *et al.* (2021), para animais com produção de 14 a 23 kg leite/vaca/dia, recomenda-se fornecer 40% de concentrado e 60% de volumoso. Para animais que produzem de 24 a 35 kg leite/vaca/dia recomenda-se fornecer, em média, 45% concentrado e 55% de volumoso. Nesta pesquisa, foi observada média de produção de leite de 19,13 litros/vaca/dia em sistemas AP (Tabela 6), sendo a dieta composta por 40,27% de concentrado e 59,73% de volumoso (Tabela 7) e para sistemas C com média de produção de 31,67 litros/vaca/dia (Tabela 6), dieta composta por 48,18% de concentrado e 51,82% de volumoso (Tabela 7). Dessa forma, nota-se que a relação concentrado:volumoso está similar ao recomendado para ambos os sistemas de produção.

Segundo Alvim *et al.* (2005), durante a fase média da lactação (60 a 240 dias pós-parto), é recomendado que a relação entre o concentrado fornecido à vaca lactante e a produção de leite seja de 1:3, ou seja, 0,3 kg de concentrado por litro de leite, quando a produção é superior a 5 litros de leite no período das águas e 3 litros de leite no período da seca. Ambas as propriedades (AP e C), deste estudo, apresentaram relação concentrado:leite conforme recomendado por Alvim *et al.* (2005). No entanto, verificou-se que a relação concentrado:leite foi maior para os sistemas AP (média 0,46 kg concentrado/litro leite) ($p=0,045$) em comparação aos sistemas C (média 0,32 kg concentrado/litro leite), indicando que propriedades com acesso ao pasto forneceram maior quantidade de concentrado para menor produção de leite, na tentativa de minimizar os desafios provocados pelas variações climáticas, conforme discutido anteriormente (Tabela 7).

Melhorar a eficiência de produção influencia diretamente nas emissões de GEE das propriedades, tornando-as ambientalmente sustentáveis. Por exemplo, as emissões de CH₄ entérico representam perda de energia alimentar entre 2 a 11% da ingestão total de energia bruta pelo animal (Blaxter; Clapperton, 1965; Lassey *et al.*, 1997; Liu *et al.*, 2017), logo, reduzir o rendimento de emissões pode acompanhar maior conversão alimentar (Mills *et al.*, 2001). Da

mesma forma, manejar adequadamente o esterco animal, além de diminuir as emissões de GEE, constitui uma alternativa à utilização de fertilizantes sintéticos de alto custo, sendo eficaz quando os nutrientes disponíveis e a taxa de mineralização estão sincronizados com a absorção de nutrientes pelas culturas (Montes *et al.*, 2013). Na Tabela 8, são apresentadas as emissões de CH₄ entérico e dejetos por vaca lactante.

Tabela 8 – Emissões da vaca lactante provenientes do CH₄ entérico e dejetos dos animais dos sistemas de produção de leite AP (n=6) e C (n=12) visitados nas regiões de São Paulo, Minas Gerais e Goiás, no ano de 2023.

Variáveis	AP (n=6)		C (n=12)		P-valor
	Média	Desv. pad.	Média	Desv. pad.	
CH ₄ entérico (kg CH ₄ /vaca/ano)	134,48	20,18	158,34	17,04	0,017
CH ₄ dejetos (kg CH ₄ /vaca/ano)	43,24	20,13	66,82	21,91	0,042
N ₂ O direto dejetos (kg N ₂ O/vaca/ano)	0,61	0,13	0,87	0,22	0,015
N ₂ O indireto dejetos (kg N ₂ O/vaca/ano)	0,84	0,17	1,14	0,29	0,035

*AP: sistemas de produção com acesso ao pasto; C: sistemas de produção confinados.

Fonte: Elaborado pelo autor.

O presente estudo verificou que os sistemas AP apresentaram menor produção de CH₄ entérico por vaca (média 134,48 kg CH₄/vaca/ano) (p=0,017) em comparação aos sistemas C, média de 158,34 kg CH₄/vaca/ano (Tabela 8). A composição da dieta é a variável que mais influencia na emissão de CH₄ entérico. Apesar das dietas entre os sistemas de produção desta pesquisa serem semelhantes (Tabela 7), observou-se diferença significativa nas emissões de CH₄ entérico, calculadas segundo o *Tier 2* do IPCC (2019a), que se baseia na ingestão de energia bruta (GE), considerando que vacas lactantes mais produtivas apresentam maior gasto energético e, conseqüentemente, maior emissão. Portanto, os animais alocados em sistemas C produziram mais leite (10.089,92 kg/lactação; Tabela 6) e apresentaram maior emissão de CH₄ entérico em relação aos animais alocados em sistemas AP (6.213,33 kg/lactação; Tabela 6) (Tabela 8).

Conforme o IPCC (2019a), a produção de CH₄ entérico é de aproximadamente 138 kg CH₄/vaca/ano em sistemas leiteiros norte-americanos, apresentando média de produção de 10.250 kg leite/vaca/ano, e 103 kg CH₄/vaca/ano para animais produzindo 3.400 kg leite/vaca/ano na América Latina. De acordo com a metanálise realizada por Brito, Almeida e Oliveira (2022), verificou-se produção de CH₄ entérico maior para sistemas confinados, com média de 165,34 kg CH₄/vaca/ano devido à maior ingestão de matéria seca, em relação aos

sistemas a pasto com média de 134,32 kg CH₄/vaca/ano. Neste trabalho, valores similares foram encontrados, sendo a emissão de CH₄ entérico das vacas lactantes alocadas em C 1,17 vezes maior que vacas lactantes em AP (Tabela 8).

Segundo Moraes *et al.* (2014), essas equações de predição têm limitações intrínsecas, principalmente devido às incertezas associadas à caracterização dietética dos sistemas de produção. De acordo com o IPCC (2019a), o consumo de alimentos está positivamente relacionado ao tamanho do animal e à produção de leite. Portanto, neste estudo foi possível observar que as emissões de CH₄ entérico para AP foram subestimadas, uma vez que os animais alocados nestes sistemas estariam consumindo quantidade semelhante às vacas alocadas em C. Isso também indica possível ineficiência na gestão nutricional destas propriedades (AP), devido ao maior fornecimento de alimentos para animais menos produtivos. No entanto, estimar as emissões de GEE a partir de dados das propriedades permite, mesmo que de forma ampla, fornecer informações úteis sobre a eficiência dos sistemas.

Neste trabalho, a emissão de CH₄ dos dejetos por vaca foi menor ($p=0,042$) para vacas lactantes alocadas em AP (média 43,24 kg CH₄/vaca/ano) comparadas às alocadas em C (média 66,82 kg CH₄/vaca/ano) (Tabela 8). Sistemas com acesso ao pasto apresentaram 80% dos dejetos depositados a pasto, e o restante (20%) sendo manejado em lagoa anaeróbica, enquanto sistemas confinados apresentaram 80% dos dejetos gerenciados como compostagem em camas de *compost barn* e 20% em lagoa anaeróbica. Grande parte das emissões de CH₄ provenientes do manejo de dejetos é produzida em condições anaeróbicas, com pouca aplicação no solo. Dessa forma, quando o dejetos é manuseado como sólido, por exemplo, quando depositado em pastagens, como ocorreu em AP, produz menos CH₄ (USEPA, 2005).

Segundo o IPCC (2006a), sistemas a pasto na Nova Zelândia apresentaram média de aproximadamente 27 kg CH₄/vaca/ano, considerando animais 100% a pasto, valor diferente do encontrado para AP (média 43,24 kg CH₄/vaca/ano), sendo considerado 80% dos dejetos depositados no pasto e 20% manejados em lagoa anaeróbica, além disso, essas variações também podem ser atribuídas às diferenças climáticas. Para sistemas confinados, conforme o IPCC (2006a), os valores variaram de 48 kg CH₄/vaca/ano (Norte) a 78 kg CH₄/vaca/ano (Sul) nos EUA, resultados semelhantes foram verificados por sistemas C (média 66,82 kg CH₄/vaca/ano), no presente estudo.

Nesta pesquisa, também foi observada menor emissão de N₂O direto (média 0,61 kg N₂O/vaca/ano) ($p=0,015$) e N₂O indireto (média 0,84 kg N₂O/vaca/ano) ($p=0,035$) para vacas lactantes alocadas em sistemas AP, em relação às alocadas em sistemas C, que apresentaram média de 0,87 kg N₂O/vaca/ano de N₂O direto e 1,14 kg N₂O/vaca/ano de N₂O indireto (Tabela

8). Nos sistemas AP, as excretas são depositadas diretamente no solo e estão espacialmente separadas. Teoricamente, isso pode reduzir as emissões de N_2O , pois o tempo de exposição às condições climáticas adversas é minimizado. Em contraste, nos sistemas C, as excretas passam por processos de manejo (compostagem aerada) e permanecem expostas aos fatores que influenciam a emissão de N_2O , como elevada umidade e temperatura, por período considerável (12 meses ou mais) antes de serem incorporadas no solo, quando comparados aos sistemas AP.

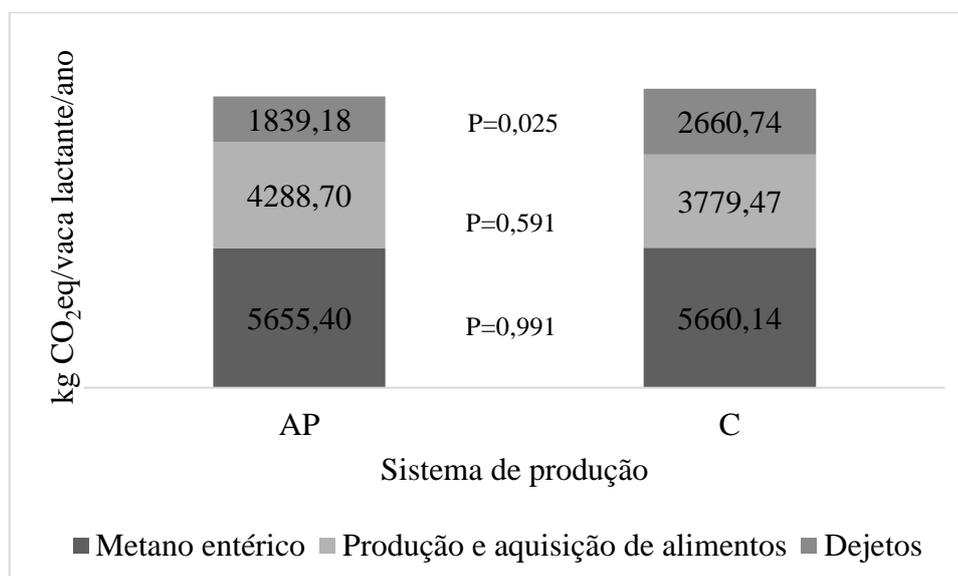
Em sistemas confinados (*compost barn*), Jungbluth, Hartung e Brose (2001) verificaram resultados diferentes do presente estudo, com emissões de 0,65 kg N_2O /vaca/ano e 5,25 kg NH_3 /vaca/ano. Além disso, segundo Owen e Silver (2015), as emissões de N_2O provenientes de lagoas anaeróbicas variam de 0,5 a 0,9 kg N_2O /vaca/ano. Essas variações nas emissões de GEE ocorrem de acordo com inúmeros fatores, como temperatura, composição da dieta, consumo de água, fluxo de ventilação, tipo de manejo de dejetos, pH, sólidos voláteis, nitrogênio amoniacal, e o tipo de cama utilizada em sistemas *compost barn*, entre outros (Leytem *et al.*, 2024).

A maneira como os dejetos são gerenciados dentro da propriedade influencia as emissões de GEE, principalmente sob a forma de CH_4 (devido às condições anaeróbicas), embora as emissões de N_2O e perdas por volatilização de NH_3 também sejam significativas. Aumentar o tempo de armazenamento do dejetos e a temperatura são fatores críticos que elevam a emissão desses gases (Philippe *et al.*, 2007; Costa *et al.*, 2012).

Também foram analisadas as intensidades de emissões de GEE por vacas lactantes no rebanho, e os resultados estão apresentados na Figura 3. Não foi observada diferença significativa para as variáveis intensidade de emissão proveniente do CH_4 entérico e produção e aquisição de alimentos. No entanto, houve diferença significativa entre os sistemas de produção para dejetos, sendo menor para propriedades AP (média 1.839,17 kg CO_2eq /vaca lactante/ano) ($p=0,025$), em relação às propriedades C (média 2.660,74 kg CO_2eq /vaca lactante/ano) (Figura 3). Neste estudo, as vacas lactantes se destacaram como a categoria mais significativa em termos de emissões de GEE provenientes dos dejetos. Nos sistemas AP, 80% dos dejetos da categoria de vacas em lactação foram excretados a pasto e 20% em lagoa anaeróbica, enquanto nos sistemas C, 80% foram depositados em *compost barn* e 20% em lagoa anaeróbica, como relatado anteriormente.

Figura 3 – Médias das intensidades de emissões de GEE por vaca lactante (kg CO_2eq /vaca lactante/ano) provenientes da fermentação entérica, dejetos e produção e aquisição de alimentos

dos sistemas de produção de leite AP (n=6) e C (n=12) visitados das regiões de São Paulo, Minas Gerais e Goiás, no ano de 2023.



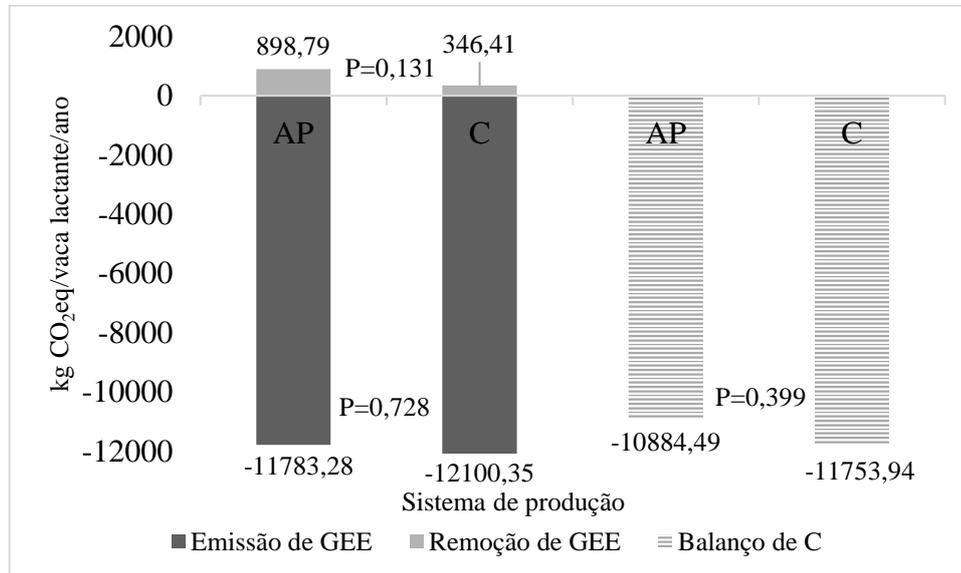
*AP: sistemas de produção com acesso ao pasto; C: sistemas de produção confinados.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para camas de compostagem (*compost barn*), apesar de serem caracterizadas como processo exotérmico e aeróbico de decomposição da matéria orgânica (MO) (Husfeldt *et al.*, 2012), as perdas de N e CH₄ podem ser altas devido à natureza do processo de compostagem, influenciadas por fatores como temperatura, pH, umidade e consistência do dejetos (Zeman; Depken; Rich, 2002). O composto pode ser fonte de emissões de N₂O, de acordo com processos de nitrificação e desnitrificação. Além disso, as perdas de NH₃ podem ser elevadas, atingindo a 50% do total de N presente no dejetos (Peigné; Girardin, 2004). Esses fatores podem ter influenciado as maiores emissões de GEE provenientes dos dejetos dos sistemas C em comparação com os AP. Segundo Estevam, Pavão e Assad (2023), em sistemas confinados, o acúmulo de dejetos em áreas restritas favorecem a decomposição anaeróbica, que resulta em maiores emissões de N₂O e CH₄ quando comparados com sistemas com acesso ao pasto.

Foi possível observar, neste experimento (Figura 3), que a maior fonte de emissões de GEE foi proveniente da fermentação entérica (47,4%), seguida pela produção e aquisição de alimentos (33,8%) e, por último, pelos dejetos (18,8%), assim como demonstrado por Rotz (2018). Também foram analisadas, no presente estudo, as intensidades totais de emissão de GEE, remoção de GEE e balanço de carbono por vacas lactantes no rebanho das propriedades AP e C, não havendo diferença significativa entre os sistemas de produção (Figura 4).

Figura 4 – Médias das intensidades de emissões de GEE, remoções de GEE e balanço de carbono por vacas lactantes no rebanho (kg CO₂eq/vaca lactante/ano) dos sistemas de produção de leite AP (n=6) e C (n=12) visitados das regiões de São Paulo, Minas Gerais e Goiás, no ano de 2023.



*AP: sistemas de produção com acesso ao pasto; C: sistemas de produção confinados; GEE: gases de efeito estufa.

*Para emissão de GEE foram considerados números negativos e remoção de GEE números positivos.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Em um estudo realizado em 2016, uma das propriedades de produção de leite avaliadas por Cunha *et al.* (2016) foi classificada como semi-intensiva, caracterizada por sistema silvipastoril com utilização exclusiva de pastagem durante a estação das águas e cana-de-açúcar e silagem de milho na estação seca. Verificou-se que esta propriedade apresentou resultados inferiores aos encontrados no presente estudo, principalmente devido às diferenças na estrutura dos rebanhos. As emissões de GEE, incluindo CH₄ entérico, dejetos, adubação nitrogenada, transporte e energia, foram calculadas em 3.816 kg CO₂eq/vaca lactante/ano. Segundo Cunha *et al.* (2016), a propriedade semi-intensiva era composta por 12 animais (10 vacas em lactação e 2 vacas secas), o que influenciou diretamente nas emissões e intensidade de emissões de GEE por vacas lactantes no rebanho.

Após análise, os dados referentes às intensidades de emissão e remoção de GEE, além de balanço de carbono por hectare foram compilados. Não foi observada diferença significativa entre os sistemas de produção. A intensidade de emissão de GEE por unidade de área (hectare) é importante para identificação de fontes de CO₂ atmosférico e para desenvolvimento de estratégias de mitigação de gases por hectare (Tabela 9).

Tabela 9 – Médias de intensidades de emissão e remoção de GEE, e balanço de carbono por hectare (kg CO₂eq/ha/ano) dos sistemas de produção de leite AP (n=6) e C (n=12) visitados das regiões de São Paulo, Minas Gerais e Goiás, no ano de 2023.

Variáveis	Médias		P-valor
	AP (n=6)	C (n=12)	
Emissão de GEE (kg CO ₂ eq/ha/ano)	25.424,22	25.361,76	0,995
Remoção de GEE (kg CO ₂ eq/ha/ano)	1.182,85	1.015,16	0,826
Balanço de carbono (kg CO ₂ eq/ha/ano)	24.241,37	24.346,60	0,991

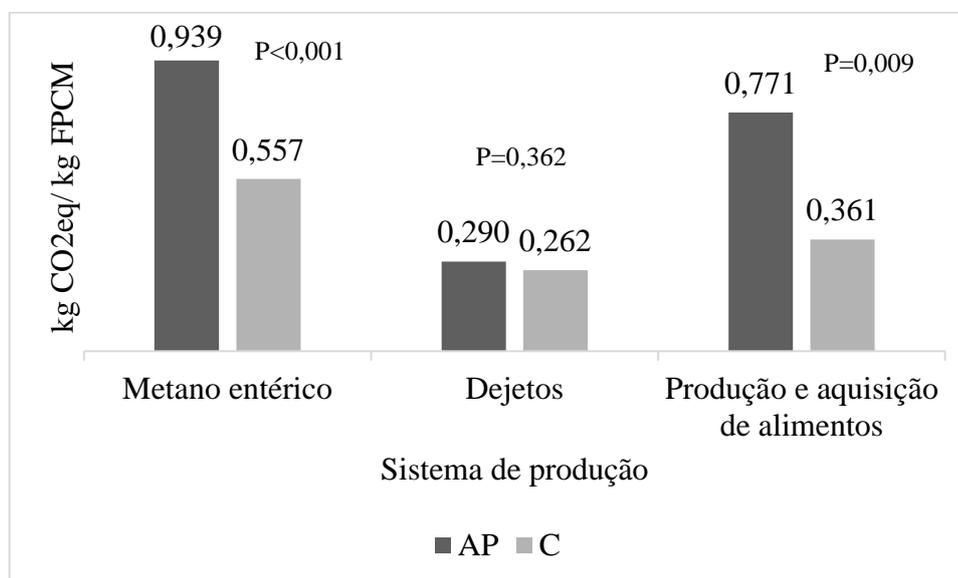
*AP: sistema de produção com acesso ao pasto; C: sistemas de produção confinados; GEE: Gases de efeito estufa.

Fonte: Elaborado pelo autor.

No presente experimento, as propriedades AP foram caracterizadas como sistemas intensivos de pastagem rotacionada, apresentando média de emissão de 25.424,22 kg CO₂eq/ha/ano, remoção de 1.182,85 kg CO₂eq/ha/ano e balanço de carbono de 24.241,37 kg CO₂eq/ha/ano (Tabela 9). Oliveira *et al.* (2022) verificaram emissão de 29.250 kg CO₂eq/ha/ano, remoção de 970 kg CO₂eq/ha/ano e balanço de carbono de 28.270 kg CO₂eq/ha/ano para sistema intensivo de pastagem rotacionado e irrigado com alta taxa de lotação (área = 3,2 ha). Em contraste, para um sistema extensivo de pastejo contínuo com baixa taxa de lotação (área = 6 ha), observaram emissão de 7.500 kg CO₂eq/ha/ano, remoção de 2.150 kg CO₂eq/ha/ano e balanço de carbono de 4.490 kg CO₂eq/ha/ano (Oliveira *et al.*, 2022). Entretanto, no presente estudo, foram consideradas todas as categorias animais para obtenção das emissões, remoções de GEE e balanço de carbono das propriedades, ao contrário do estudo de Oliveira *et al.* (2022), que considerou apenas a categoria de vacas em lactação. A área média das propriedades AP foi de 97,68 ha, além disso, o presente estudo estimou as emissões de GEE dos sistemas de produção, diferente de Oliveira *et al.* (2022), que realizaram coletas *in loco*, tais fatores influenciaram nas variações entre os resultados.

Os dados de intensidades de emissões por leite produzido e corrigido para gordura e proteína, provenientes do CH₄ entérico, dejetos e produção e aquisição de alimentos, estão apresentados na Figura 5.

Figura 5 – Médias de intensidades de emissões de CH₄ entérico, dejetos e produção e aquisição de alimentos por leite produzido e corrigido para gordura e proteína (kg CO₂eq/kg FPCM) dos sistemas de produção de leite AP (n=6) e C (n=12) visitados das regiões de São Paulo, Minas Gerais e Goiás, no ano de 2023.



*AP: sistemas de produção com acesso ao pasto; C: sistemas de produção confinados.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os sistemas AP apresentaram maior intensidade de emissão por leite produzido e corrigido para gordura e proteína tanto para CH₄ entérico (média 0,939 kg CO₂eq/kg FPCM) ($p < 0,001$) quanto para produção e aquisição de alimentos (média 0,771 kg CO₂eq/kg FPCM) ($p = 0,009$), em relação aos sistemas C, que apresentaram médias de 0,557 e 0,361 kg CO₂eq/kg FPCM, respectivamente. Por outro lado, não houve diferença significativa entre os sistemas de produção para intensidade de emissão por leite produzido e corrigido para gordura e proteína proveniente de dejetos (Figura 5).

O impacto significativo das emissões da fermentação entérica nas intensidades de emissões por leite produzido e corrigido para gordura e proteína era esperado, considerando que o CH₄ entérico contribui de forma substancial às emissões de GEE na produção de leite, variando entre 44 e 60% do CO₂eq total (Gollnow *et al.*, 2014; O'Brien *et al.*, 2014, 2016; Jayasundara *et al.*, 2019). No presente experimento, a intensidade de emissão de CH₄ por leite produzido e corrigido para gordura e proteína representou 47% da intensidade total para ambos os sistemas de produção.

A intensidade de emissão de CH₄ entérico por leite produzido e corrigido para gordura e proteína reflete a maximização da energia consumida pelo animal na produção de leite (Villanueva; Ibrahim; Catillo, 2023). Neste estudo, os sistemas AP apresentaram maior

intensidade de emissão de CH₄ entérico (0,939 kg CO₂eq/kg FPCM) devido ao maior número de animais no rebanho (média 704) em relação aos sistemas C (0,537 kg CO₂eq/kg FPCM) (média 363), que resultou em maior emissão proveniente da fermentação entérica. De acordo com Reichenbach *et al.* (2024), foi observada a maior intensidade de emissões de CH₄ entérico de 1,38 kg CO₂eq/kg ECM em um sistema leiteiro semi-intensivo B (que envolvia a compra de animais), em comparação com um sistema leiteiro extensivo que incluía dieta de alta qualidade e pastagem (0,79 kg CO₂eq/kg ECM). Intensidades intermediárias foram calculadas para um sistema semi-intensivo A (sem compra de animais) (1,04 kg CO₂eq/kg ECM) e um sistema intensivo (1,21 kg CO₂eq/kg ECM). Esses resultados variam de acordo com a dieta, a estrutura de rebanho e o sistema de produção.

Em relação à produção e aquisição de alimentos, os sistemas AP apresentaram maior intensidade de emissão por leite produzido e corrigido para gordura e proteína (0,771 kg CO₂eq/kg FPCM) em comparação com os sistemas C (0,361 kg CO₂eq/kg FPCM) (Figura 5). Como mencionado anteriormente, isso pode ser atribuído ao maior uso de alimentos concentrados e volumosos por essas propriedades na tentativa de minimizar os efeitos provocados pelas variações climáticas na dieta dos animais. As intensidades da produção e aquisição de alimentos representaram 39% das intensidades de emissões totais para os sistemas leiteiros AP e 31% para os sistemas C. Conforme relatado por Rotz (2018), as emissões provenientes da produção e aquisição de alimentos podem variar de 20 a 50% em sistemas pecuários leiteiros. Ribeiro-Filho *et al.* (2020) verificaram intensidades de emissões provenientes da produção de alimentos inferiores às encontradas neste experimento, variando de 0,23 a 0,21 kg CO₂eq/kg ECM, pois avaliaram as emissões apenas da categoria de vacas lactantes (média 165 vacas).

Para os sistemas de produção AP, foram identificados 0,290 kg CO₂eq/kg FPCM proveniente dos dejetos, enquanto para os sistemas C, o valor foi de 0,262 kg CO₂eq/kg FPCM (Figura 5). Os valores padrão segundo o IPCC para dejetos em pastagens são inferiores aos valores determinados para compostagem. No entanto, os sistemas de produção AP apresentaram maior número de animais no rebanho (média 704) em comparação aos sistemas C (média 363), o que equilibrou as emissões e, conseqüentemente, as intensidades das emissões provenientes dos dejetos de ambas as propriedades.

Ribeiro-Filho e seus colaboradores (2020), utilizando valores padrão determinados pelo IPCC (2006a) para armazenamento de dejetos em fossa abaixo de confinamento (>1 mês) e dejetos depositados a pasto, observaram intensidades de emissões de dejetos variando de 0,20 a 0,22 kg CO₂eq/kg ECM; valores semelhantes foram demonstrados neste experimento,

utilizando valores de pasto e lagoa anaeróbica para AP, e compostagem e lagoa anaeróbica para C.

No presente estudo, as intensidades de emissões provenientes do manejo de dejetos (kg CO₂eq/kg FPCM) representaram 15% para AP e 22% para C das intensidades de emissões totais. Segundo Rotz (2018), as emissões provenientes dos dejetos podem variar de 5 a 15% das emissões contabilizadas dentro das propriedades. Neste experimento, foram consideradas apenas as emissões de fermentação entérica, produção e aquisição de alimentos e manejo de dejetos, sem considerar emissões de energia e transporte.

De acordo com Vogel *et al.* (2023), a proporção de vacas em lactação em relação ao rebanho total tem efeito positivo na eficiência; ou seja, aumentar o número de vacas lactantes (aproximadamente 84% do rebanho) melhora a eficiência ambiental das propriedades leiteiras devido ao maior desempenho produtivo. Dessa forma, ajustar a estrutura do rebanho de ambos os sistemas leiteiros do presente estudo resultaria em menor intensidade de emissão (kg CO₂eq/kg FPCM) provenientes da fermentação entérica, produção e aquisição de alimentos e manejo de dejetos.

Por fim, foram avaliados os dados de intensidade de emissão e remoção de GEE total, além de intensidade do balanço de carbono em kg CO₂eq/kg FPCM dos sistemas de produção (Tabela 10). Além disso, foi calculado o número de árvores necessário para a compensação e neutralização do balanço de carbono das propriedades.

Tabela 10 – Médias das intensidades de emissão e remoção de GEE total, além de intensidade do balanço de carbono por leite produzido e corrigido para gordura e proteína (kg CO₂eq/kg FPCM) dos sistemas de produção de leite AP (n=6) e C (n=12) visitados das regiões de São Paulo, Minas Gerais e Goiás, no ano de 2023.

Variáveis	Médias		P-valor
	AP (n=6)	C (n=12)	
Intensidade de emissão de GEE (kg CO ₂ eq/kg FPCM)	1,999	1,173	<0,001
Intensidade de remoção de GEE (kg CO ₂ eq/kg FPCM)	0,175	0,036	0,046
Intensidade do balanço de carbono (kg CO ₂ eq/kg FPCM)	1,824	1,137	<0,001

*AP: sistemas de produção com acesso ao pasto; C: sistemas de produção confinados; GEE: gases de efeito estufa.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Todos os resultados da tabela 10 apresentaram diferença significativa entre os sistemas de produção estudados, sendo maior para sistemas AP intensidade de emissão de GEE (p<0,001), intensidade de remoção de GEE (p=0,046) e intensidade do balanço de carbono

($p < 0,001$) por leite produzido e corrigido para gordura e proteína (kg CO₂eq/kg FPCM) em comparação aos sistemas C. Tanto as intensidades de emissão por leite produzido e corrigido para gordura e proteína provenientes da fermentação entérica, quanto produção e aquisição de alimentos, para os sistemas AP foram maiores em relação aos sistemas C (Figura 5), o que provocou, conseqüentemente, maior intensidade de emissão total de GEE (kg CO₂eq/kg FPCM) (Tabela 10).

As intensidades de emissões de GEE por leite produzido e corrigido para gordura e proteína (kg CO₂eq/kg FPCM) estão de acordo com o encontrado por Velarde-Guillén, Arndt e Gomez (2022), que realizaram uma pesquisa avaliando 11 estudos de pegada de carbono (PC) na América Latina, sendo maior para sistemas à base de pasto (2,20 kg CO₂eq/kg FPCM) do que para sistemas confinados (1,73 kg CO₂eq/kg FPCM). Segundo esses autores, tal fato se deve à maior produção de leite em sistemas confinados, diferentemente do observado no presente estudo, pois a produção de leite não apresentou diferença significativa entre os sistemas de produção (Tabela 6); porém, o número de animais no rebanho dos sistemas AP (média 704 animais) foi superior comparado a sistemas C (média 363 animais), que resultaram em maior emissão de GEE e, conseqüentemente, maior intensidade de emissão de GEE.

A intensidade de emissão de GEE por leite produzido e corrigido para gordura e proteína foi maior para ambos os sistemas de produção (AP e C) em comparação com os resultados encontrados no estudo realizado por Zhu *et al.* (2016) na América Latina de 1,45 kg CO₂eq/kg FPCM. Mazzeto *et al.* (2020), por outro lado, encontraram valores superiores para sistema de produção confinados de 2,56 kg CO₂eq/kg FPCM em relação a sistemas semiconfinados, que apresentaram 3,86 kg CO₂eq/kg FPCM. Em pesquisa realizada na Nova Zelândia, avaliando sistemas de produção a pasto, verificou-se resultado entre 0,60 e 1,52 kg CO₂eq/kg FPCM (LACA *et al.*, 2020). Essas variações ocorrem, principalmente, devido à estrutura de rebanho, manejo do sistema de produção e eficiência na produção de leite. Conforme discutido anteriormente, uma estratégia para redução da intensidade de emissão de GEE seria o aumento do leite produzido e corrigido para gordura e proteína (FPCM), diluindo assim as emissões de GEE das propriedades.

Neste estudo, a intensidade de remoção de GEE por leite produzido e corrigido para gordura e proteína foi maior para os sistemas AP do que para os sistemas C (Tabela 10), demonstrando a maior capacidade dos sistemas baseados em pastagens de remover GEE da atmosfera e incorporá-los no solo, desde que bem manejados. Neste trabalho, foram verificados resultados superiores para intensidade de remoção de GEE, sendo a média de 0,175 kg CO₂eq/kg FPCM para os sistemas AP (semi-intensivos), em relação ao encontrado por Oliveira

et al. (2022), que demonstraram intensidade de remoção de GEE para sistema de pastejo contínuo com baixa taxa de lotação de 0,140 kg CO₂eq/kg FPCM em comparação com pastejo rotacionado e irrigado com alta taxa de lotação (0,0196 kg CO₂eq/kg FPCM). O presente experimento realizou uma estimativa das remoções de GEE segundo o IPCC (2006), enquanto Oliveira *et al.* (2022) realizaram coletas de solo *in loco*.

Para os sistemas C, observou-se média de 0,036 kg CO₂eq/kg FPCM (Tabela 10), valor inferior à remoção de GEE dos sistemas AP. Este fato está de acordo com o determinado por Kramer *et al.* (2009) e Koglo *et al.* (2022), onde as pastagens removem mais carbono pelo solo do que as demais culturas. Segundo Conant, Paustian e Elliot (2001), as pastagens podem atuar como um sumidouro significativo de carbono com a implementação de manejo adequado, sendo alternativa importante a ser considerada na busca pela compensação de GEE, além de sistemas pecuários mais sustentáveis. Vários estudos verificaram que o sequestro de carbono pode ser aumentado devido a práticas como pastejo rotacionado e taxa de lotação adequada (O'Mara, 2012; Soussana; Lemaire, 2014; Segnini *et al.*, 2019; Oliveira *et al.*, 2020, 2021).

Apesar de a intensidade de remoção ter sido maior para os sistemas AP, a intensidade de emissão de GEE dessas propriedades também foi maior, o que resultou em maior intensidade do balanço de carbono para esses sistemas (média 1,824 kg CO₂eq/kg FPCM) ($p < 0,001$) comparados aos sistemas C (média 1,137 kg CO₂eq/kg FPCM).

Para diminuir a intensidade do balanço de carbono, práticas que reduzam as emissões de GEE dentro das propriedades e aumentem as remoções de GEE da atmosfera para o solo devem ser adotadas. Há associação negativa não linear entre a produção de leite por propriedade e a intensidade de GEE. Dessa forma, Gerber *et al.* (2011) afirmam que o aumento da produtividade ao nível da exploração agrícola é uma estratégia de mitigação viável. A melhoria da produtividade animal abrange fatores como nutrição, reprodução, saúde, genética e gestão operacional geral na pecuária.

Dentre as estratégias para aumentar a remoção de GEE da atmosfera em culturas, estão a implantação de plantio conservacionista (plantio direto), controle de erosão e acidez do solo, rotação de culturas e utilização de plantas de cobertura para proteção do solo, ou seja, práticas que favoreçam o acúmulo do carbono orgânico no solo (Cheng, McCarl; Fei, 2022). Em relação às pastagens, a incorporação de árvores e leguminosas, o melhoramento de espécies vegetais, a fertilização adequada, a realização de rotação em piquetes e a irrigação são formas de aumentar o sequestro de carbono e, conseqüentemente, a remoção de GEE (Conant; Paustian; Elliot, 2001). No entanto, a taxa anual de acúmulo de carbono no solo não é suficiente para compensar todas as emissões de GEE dentro das propriedades (Congio e tal., 2021; Arndt *et al.*, 2022).

Dessa forma, a introdução de árvores nos sistemas leiteiros pode ser alternativa viável para a neutralização do balanço de carbono. Neste estudo, não houve diferença significativa ($p=0,680$) em relação ao número de árvores (*Eucalyptus* spp. com média de 7,5 anos) necessário para a neutralização dos sistemas de produção, apresentando média de $47.708 \pm 86.205,79$ árvores para os sistemas AP e $27.726 \pm 21.125,03$ árvores para os sistemas C. Estas árvores podem ser inseridas na propriedade de forma separada ou integrada. Em sistemas de integração, as árvores aumentam a produção de pastagem e as taxas de crescimento de forragem, resultante da aplicação de N e da umidade do solo, além de melhorar o desempenho e o conforto animal (Oliveira *et al.*, 2020). Após o processo de corte, quando são transformadas em produtos madeireiros, as árvores não emitem imediatamente o carbono armazenado; a decomposição ocorre conforme o tipo de produto madeireiro utilizado, um valor não contabilizado no balanço de carbono dos sistemas leiteiros (IPCC, 2006d).

6 CONCLUSÃO

Em conclusão, os sistemas de produção com acesso ao pasto (AP) e confinados (C) demonstraram desempenhos semelhantes em termos de volume anual de leite produzido e eficazes em manter padrões higiênico-sanitários. No entanto, sistemas AP apresentaram maior teor de gordura no leite.

Os sistemas C demonstram-se mais sustentáveis em relação à intensidade de emissão de GEE por leite produzido e corrigido para gordura e proteína; no entanto, sistemas a pasto têm maior capacidade de remoção de GEE, além de área disponível para plantio de árvores em comparação com sistemas C, podendo contribuir positivamente para a mitigação das mudanças climáticas, desde que sejam adotadas práticas de manejo adequadas.

Produzir de forma sustentável e eficiente exige uma abordagem holística do sistema de produção, incluindo estrutura equilibrada de rebanho, fornecimento adequado de alimentos em termos de qualidade e quantidade, manejo correto de dejetos, adoção de práticas conservacionistas para preservação do solo, bem como garantia do bem-estar animal.

As limitações deste trabalho incluem a dependência de resultados obtidos a partir das informações fornecidas pelo produtor. Essas informações podem estar sujeitas a inconsistências, portanto, é importante considerar que os resultados apresentados podem refletir variações que não foram totalmente controladas ou verificadas independentemente. Dessa forma, mais estudos devem ser realizados para mitigar possíveis inconsistências.

REFERÊNCIAS

- ABDELA, N. Sub-acute ruminal acidosis (SARA) and its consequence in dairy cattle: A review of past and recent research at global prospective. **Achievements Life Sciences**, v. 10, n. 2, p. 187–196, nov. 2016.
- AGOSTINHO, F. *et al.* Emergy accounting as a support for a strategic planning towards a regional sustainable milk production. **Agricultural Systems**, v. 176, p. 102647, nov. 2019.
- ALMEIDA, J. G. R. **Utilização do nitrogênio e emissão de amônia e óxido nitroso em diferentes sistemas de produção de bovinos leiteiros**. Tese (Doutorado em Ciência Animal) – Centro de Ciências Agroveterinárias, Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2018.
- ALONGI, D. M. *et al.* Indonesia's Blue Carbon: A Globally Significant and Vulnerable Sink for Seagrass and Mangrove Carbon. **Wetlands Ecology and Management**, v. 24, p. 3–13, 2016.
- ALVIM, M. J. *et al.* **Sistema de produção de leite com recria de novilhas em sistemas silvipastoris**. Juiz de Fora: Embrapa Gado de Leite, [2005]. Disponível em: <https://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Leite/LeiteRecriadeNovilhas/index.htm>. Acesso em: 01 jun. 2024.
- AMADO, T. J. C. *et al.* Potencial de plantas de cobertura em acumular carbono e nitrogênio no solo em sistema plantio direto e a melhoria da qualidade ambiental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 25, n. 1, p. 189-197, mar. 2001.
- AMADO, T. J. C. *et al.* Potential of carbon accumulation in no-till soils with intensive use and cover crops in Southern Brazil. **Journal of Environmental Quality**, v. 35, n. 4, p. 1599-1607, jul. 2006.
- ARNDT, C. *et al.* Full adoption of the most effective strategies to mitigate methane emissions by ruminants can help meet the 1.5 C target by 2030 but not 2050. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 119, n. 20, p. e2111294119, mai. 2022.

ASSIS, A. G. *et al.* **Sistemas de produção de leite no Brasil**. Juiz de Fora: Embrapa Gado de Leite, 2005. 6p. (Circular Técnica, 85).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE LÁCTEOS LONGA VIDA (ABVL). **Relatório anual**. São Paulo: Associação Brasileira da Indústria de Látceos Longa Vida, 2022.

BACHMAN, K. C.; SCHAIRER, M.L. Invited review: Bovine studies on optimal lengths of dry periods. **Journal of Dairy Science**, v. 86, n. 10, p. 3027-2027, out. 2003.

BAEK, C. Y.; LEE, K. M.; PARK, K. H. Quantification and control of the greenhouse gas emissions from a dairy cow system. **Journal of Cleaner Production**, v. 70, p. 50–60, mai. 2014.

BANAKAR, P. S. *et al.* Physically effective fibre in ruminant nutrition: A review. **Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry**, v. 7, n. 4, p. 303-308, mai. 2018.

BALBINO, L. C.; BARCELLOS, A. O.; STONE, L. F. **Marco Referencial: integração lavoura-pecuária-floresta**. Brasília: Embrapa, 2011. 130 p.

BAMUALIM, A.; KARTIARSO. Nutrition of draught animals with special reference to Indonesia. *In: DRAUGHT ANIMAL POWER FOR PRODUCTION*, 1985, Queensland. **Anais [...]**. Queensland:Townsville, 1985.

BARGO, F. *et al.* Performance of high producing dairy cows with three different feeding systems combining pasture and total mixed rations. **Journal of Dairy Science**, v. 85, n. 11, p. 2948-2963, nov. 2002.

BATES, D. *et al.* Fitting linear mixed-effects models using lme4. **Journal of Statistical Software**, v. 67, n. 1, p. 1–48, out. 2015.

BATTINI, F. *et al.* Mitigating the environmental impacts of milk production via anaerobic digestion of manure: Case study of a dairy farm in the Po Valley. **Science of the Total Environment**, v. 481, p. 196-208, mai. 2014.

BAYER, C. *et al.* Incremento de carbono e nitrogênio num latossolo pelo uso de plantas estivais para cobertura do solo. **Ciência Rural**, Santa Maria, RS, v. 33, n. 3, p. 469-475, jun. 2003.

- BAYER, C. *et al.* Organic matter storage in sandy loam Acrisol affected by tillage and cropping systems in southern Brazil. **Soil & Tillage Research**, v. 54, n. 1-2, p. 101-109, mar. 2000.
- BEAUCHEMIN, K. A.; MCALLISTER, T. A.; MCGINN, S. M. Dietary mitigation of enteric methane from cattle. **CABI Reviews**, n. 2009, p. 1-18, out. 2009.
- BELL, M. J.; CLOY, J. M.; REES, R. M. The true extent of agriculture's contribution to national greenhouse gas emissions. **Environmental Science & Policy**, v. 39, p. 1-12, mai. 2014.
- BENNETZEN, E. H.; SMITH, P.; PORTER, J. R. Agricultural production and greenhouse gas emissions from world regions—The major trends over 40 years. **Global Environmental Change**, v. 37, p. 43-55, mar. 2016.
- BERGMAN, M. S. *et al.* **Introduction to ESG**. Cambridge: Harvard Law School Forum on Corporate Governance, [2020]. Disponível em: <https://corpgov.law.harvard.edu/2020/08/01/introduction-to-esg/>. Acesso em: 25 set. 2023.
- BERNER, R. A.; LASAGA, A. C. Modeling the geochemical carbon cycle. **Scientific American**, v. 260, n. 3, p. 74-81, mar. 1989.
- BLAXTER, K. L.; CLAPPERTON, J. L. Prediction of the amount of methane produced by ruminants. **British Journal of Nutrition**, v. 19, n. 1, p. 511-522, ago. 1965.
- BOSHER, T. *et al.* Methane emissions intensity in grazing dairy cows fed graded levels of concentrate pellets. **New Zealand Journal of Agricultural Research**, v. 67, n. 3, p. 296-302, jan. 2024.
- BOTARO, B. G. *et al.* Quality based payment program and milk quality in dairy cooperatives of Southern Brazil: an econometric analysis. **Scientia Agricola**, Piracicaba, SP, v. 70, n. 1, p. 21-26, fev. 2013.
- BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia. **Emissões de óxido nitroso de solos agrícolas e de manejo de dejetos**. Brasília: Ministério da Ciência e Tecnologia, 2010.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. **Estimativas anuais de emissões de gases do efeito estufa no Brasil**. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações, 2020.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Inovação, Desenvolvimento Rural e Irrigação. **Plano setorial para adaptação à mudança do clima e baixa emissão de carbono na agropecuária com vistas ao desenvolvimento sustentável (2020-2030): visão estratégica para um novo ciclo**. Brasília: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Secretaria de Inovação, Desenvolvimento Rural e Irrigação, Brasília, 2021.

BRASIL. Instrução Normativa Nº 58, de 7 de novembro de 2023. **Fixa a identidade e as características de qualidade que devem apresentar o leite cru refrigerado, o leite pasteurizado e o leite pasteurizado tipo A**. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 2018, n. 230, p. 9.

BRAZ, S. P. *et al.* Soil carbon stocks under productive and degraded Brachiaria pastures in the Brazilian Cerrado. **Soil Science Society of America Journal**, v. 77, n. 3, p. 914-928, mai. 2013.

BRITO, A. F.; ALMEIDA, K. V.; OLIVEIRA, A. S. Production performance, nutrient use efficiency, and predicted enteric methane emissions in dairy cows under confinement or grazing management system. **Translational Animal Science**, v. 6, n. 2, p. txac028, abr. 2022.

BRITO, L. F. *et al.* Genetic selection of high-yielding dairy cattle toward sustainable farming systems in a rapidly changing world. **Animal**, v. 15, p. 100292, dez. 2021.

CAMARGO, A. C.; HADDADE, I. R. Viabilização da produção de leite na pequena propriedade. *In*: XXIV CONGRESSO BRASILEIRO DE ZOOTECNIA, 2014, Espírito Santo. **Anais [...]**. Espírito Santo: Vitória, 2014. Disponível em: <https://sistemafaerj.com.br/baldecheio/wp-content/uploads/2014/07/ZOOTEC-2014.pdf>. Acesso em: 20 jun. 2024.

CAMPOS, A. T. **Agronegócio do leite**. Manejo de dejetos. Brasília: Embrapa Gado de Leite, [2021]. Disponível em: https://www.embrapa.br/agenciadeinformacaotecnologica/criacoes/gado_de_leite/producao/sistemas-de-producao/instalacoes/manejo-dos-dejetos. Acesso em 02 jun. 2024.

CANAVARI, M.; CODERONI, S. Consumer stated preferences for dairy products with carbon footprint labels in Italy. **Agricultural and Food Economics**, v.8, n.4, p. 1-16, dez. 2020.

CARVALHO, L. A. *et al.* **Agronegócio do leite**. Dieta completa. Brasília: Embrapa Gado de Leite, [2021]. Disponível em:
https://www.embrapa.br/agenciadeinformacaotecnologica/criacoes/gado_de_leite/producao/sistemas-de-producao/alimentacao/vacas-leiteiras/dieta-completa. Acesso em: 02 jun. 2024.

CARVALHO, G. R. *et al.* **Desempenho recente do setor lácteo e perspectivas para 2023**. Juiz de Fora: Embrapa Gado de Leite, 2022. 4 p.

CARVALHO, M. M.; ALVIM, M. J.; CARNEIRO, J. C. **Sistemas agroflorestais pecuários: opções de sustentabilidade para áreas tropicais e subtropicais**. 1. ed. Juiz de Fora: Embrapa Gado de Leite, 2001.

CERRI, C. E. P. *et al.* Tropical agriculture and global warming: impacts and mitigation options. **Scientia Agricola**, Piracicaba, SP, v. 64, p. 83-99, fev. 2007.

CHENG, M.; MCCARL, B.; FEI, C. Climate change and livestock production: A literature review. **Atmosphere**, v. 13, n. 1, p. 140, jan. 2022.

CHIAVEGATO, M. B.; POWERS, W.; PALUMBO, N. Ammonia and greenhouse gas emissions from housed Holstein steers fed different levels of diet crude protein. **Journal of Animal Science**, v. 93, n. 1, p. 395-404, jan. 2015.

CHILLIARD, Y. *et al.* Diet, rumen biohydrogenation and nutritional quality of cow and goat milk fat. **European Journal of Lipid Science and Technology**, v. 109, n. 8, p. 828-855, ago. 2007.

CHILLIARD, Y.; FERLAY, A.; DOREAU, M. Effect of different types of forages, animal fat or marine oils in cow's diet on milk fat secretion and composition, especially conjugated linoleic acid (CLA) and polyunsaturated fatty acids. **Livestock Production Science**, v. 70, n. 1-2, p. 31-48, jul. 2001.

CONANT, R. T.; PAUSTIAN, K.; ELLIOTT, E. T. Grassland management and conversion into grassland: effects on soil carbon. **Ecological Applications**, v. 11, n. 2, p. 343-355, abr. 2001.

CONGIO, G. F. *et al.* Enteric methane mitigation strategies for ruminant livestock systems in the Latin America and Caribbean region: A meta-analysis. **Journal of Cleaner Production**, v. 312, p. 127693, ago. 2021.

CORE TEAM, R. **R**: A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2023. Disponível em: <https://www.R-project.org>. Acesso em: 15 mai. 2024.

COSTA, A. *et al.* Effects of TiO₂ based photocatalytic paint on concentrations and emissions of pollutants and on animal performance in a swine weaning unit. **Journal of Environmental Management**, v. 96, n. 1, p. 86-90, abr. 2012.

COSTA, C. N.; TEIXEIRA, N. M. **Estratégias para melhoria da qualidade do leite com foco na IN51**. Porto Velho: Embrapa Rondônia, 2007, 18 p. (Documentos, 158).

CUNHA, C. S. *et al.* Greenhouse gases inventory and carbon balance of two dairy systems obtained from two methane-estimation methods. **Science of the Total Environment**, v. 571, p. 744-754, nov. 2016.

DEMARCHI, J. J. A. A. **Sustentabilidade de propriedades leiteiras através da redução das emissões de gases de efeito estufa**. São Paulo: Infobibos, [2009]. Disponível em: http://www.infobibos.com/Artigos/2009_2/sustentabilidade/index.htm. Acesso em: 02 jun. 2024.

DEWHURST, R. J. *et al.* Increasing the concentrations of beneficial polyunsaturated fatty acids in milk produced by dairy cows in high-forage systems. **Animal Feed Science and Technology**, v. 131, n. 3-4, p. 168-206, dez. 2006.

DIAS, J. A. *et al.* **Impacto da iniciativa de pagamento por qualidade do leite sobre indicadores higiênico-sanitários de tanques de resfriamento de leite**. Porto Velho: Embrapa Rondônia, 2016. 33 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 78).

DIAS, J. A.; ANTES, F. G. **Procedimentos para a coleta de amostras de leite para contagem de células somáticas, contagem bacteriana total e detecção de resíduos de antibióticos**. Porto Velho: Embrapa Rondônia, 2012, 15p. (Documentos, 150).

DIAS, J. A.; ANTES, F. G. **Qualidade físico-química, higiênico-sanitária e composicional do leite cru Indicadores e aplicações práticas da Instrução Normativa 62**. Porto Velho: Embrapa Rondônia, 2014. 24 p. (Documentos, 158).

DUIN, E. C. *et al.* Mode of action uncovered for the specific reduction of methane emissions from ruminants by the small molecule 3-nitrooxypropanol. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 113, n. 22, p. 6172-6177, mai. 2016.

DUROJAYE, O.; LASEINDE, T.; OLUWAFEMI, I. A Descriptive Review of Carbon Footprint. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON HUMAN SYSTEMS ENGINEERING AND DESIGN: FUTURE TRENDS AND APPLICATIONS, 2019, Munique. **Anais [...]**. Munique: Baviera, 2019.

DUTREUIL, M. *et al.* Feeding strategies and manure management for cost-effective mitigation of greenhouse gas emissions from dairy farms in Wisconsin. **Journal of Dairy Science**, v. 97, n. 9, p. 5904-5917, set. 2014.

ECCLES, R. G.; KLIMENKO, S. The Investor Revolution. **Harvard Business Review**, v.97, n.3, p. 106-116, mai. 2019.

ECOINVENT VERSION 3. The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 21, n. 9, p.1218–1230, abr. 2016.

EDENHOFER, O. *et al.* **Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change**. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 3. ed. Nova Iorque: Cambridge University Press, 2014.

EMBRAPA. **Anuário do leite**. Juiz de Fora: Embrapa, 2023.

ESTEVAM, C. G., PAVÃO, E. M., ASSAD, E. **Quantificação das emissões de GEE no setor agropecuário: fatores de emissão, métricas e metodologias**. São Paulo: Fundação Getúlio Vargas, 2023.

EUROPEAN CONSUMER ORGANIZATION (ECO). **One Bite at a Time: Consumers and the Transition to Analysis of a Surv**, União Europeia: European Consumer Organization, 2020.

EVANS, J.; TURNBULL, J. W. **Plantation forestry in the tropics: the role, silviculture, and use of planted forests for industrial, social, environmental, and agroforestry purposes**. Oxford: Oxford University Press, 2004.

FAMIGLIETTI, J. *et al.* Development and testing of the product environmental footprint milk tool: a comprehensive LCA tool for dairy products. **Science of the Total Environment**, v. 648, p. 1614–26, jan. 2019.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION (FAO). **Climate Change and the Global Dairy Cattle Sector: The Role of the Dairy Sector in a Low-Carbon Future**. Roma: Food and Agriculture Organization and Global Dairy Platform, 2018.

FONSECA, L. F. L.; SANTOS, M. V. **Qualidade do leite e controle de mastite**. São Paulo: Lemos Editorial, 2000.

FARIÑA, S. R.; CHILIBROSTE, P. Opportunities and challenges for the growth of milk production from pasture: The case of farm systems in Uruguay. **Agricultural Systems**, v. 176, p. 102631, nov. 2019.

FONTERRA. **New Zeland's first carbonzero milk**. Nova Zelândia: Fonterra, [2024]. Disponível em: <https://www.fonterra.com/nz/en/our-stories/articles/new-zealands-first-carbonzero-milk.html>. Acesso: 31 out. 2023.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION (FAO). **Greenhouse Gas Emissions from the Dairy Sector. A Life Cycle Assessment**. Roma: Food and Agriculture Organization, 2010.

FRANCHI, G. A. *et al.* Welfare quality applied to the Brazilian dairy cattle. **Journal of Animal Behaviour and Biometeorology**, v. 2, n. 2, p. 60-65, 2014.

GARCIA, S. N. *et al.* One health for food safety, food security, and sustainable for food production. **Sustainable Food Systems**, v. 4, n. 1, jan. 2020.

GELMAN, A.; RUBIN, D. B. Inference from iterative simulation using multiple sequences. **Statistical Science**, v. 7, n. 4, p. 457-472, nov. 1992.

GERBER, P. *et al.* Productivity gains and greenhouse gas emissions intensity in dairy systems. **Livestock Science**, v. 139, n. 1-2, p. 100-108, jul. 2011.

GIBBS, M. J.; JOHNSON, D. E. "Livestock Emissions." *In*: INTERNATIONAL METHANE EMISSIONS, 1993, Washington: D. C. **Anais** [...]. Washington: D.C.,1993.

GOLLNOW, S. *et al.* Carbon footprint of milk production from dairy cows in Australia. **International Dairy Journal**, v. 37, n. 1, p. 31-38, jul. 2014.

GRUNERT, K. G. Sustainability labels on food products: Consumer motivation, understanding and use. **Food Policy**, v. 44, p. 177-189, fev. 2014.

GUO, L. B.; GIFFORD, R. M. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis. **Global Change Biology**, v. 8, n. 4, p. 345-360, nov. 2002.

HAMMAR, T.; HANSSON, P.; RÖÖS, E. Time-dependent climate impact of beef production—can carbon sequestration in soil offset enteric methane emissions? **Journal of Cleaner Production**, v. 331, p. 129948, jan. 2022.

HECK, J. M. L. *et al.* Seasonal variation in the Dutch bovine raw milk composition. **Journal of Dairy Science**, v. 92, n. 10, p. 4745-4755, out. 2009.

HERRERO, M. *et al.* Greenhouse gas mitigation potentials in the livestock sector. **Nature Climate Change**, v. 6, p. 452–461, mar. 2016.

HOISCHEN-TAUBNER, S. *et al.* The whole and the parts—A new perspective on production diseases and economic sustainability in dairy farming. **Sustainability**, v. 13, n. 16, p. 9044, ago. 2021.

HOU, F. *et al.* Comprehensive analysis method of determining global long-term GHG mitigation potential of passenger battery electric vehicles. **Journal of Cleaner Production**, v. 289, p. 125137, mar. 2021.

HRISTOV, A. N. *et al.* Special topics—Mitigation of methane and nitrous oxide emissions from animal operations: I. A review of enteric methane mitigation options. **Journal of Animal Science**, v. 91, n. 11, p. 5045-5069, nov. 2013.

HUSFELDT, A. W. *et al.* Management and characteristics of recycled manure solids used for bedding in Midwest freestall dairy herds. **Journal of Dairy Science**, v. 95, n. 4, p. 2195-2203, abr. 2012.

IMMIG, I. The rumen and hindgut as source of ruminant methanogenesis. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 42, p. 57-72, set. 1996.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo agropecuário 2017: resultados definitivos**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2019.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Pesquisa da Pecuária Municipal**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, [2020]. Disponível em: https://www.Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9107producaodapequariamunicipal.html?utm_source=landing&utm_medium=explicita&utm_campaign=producao_agropecuaria&t=destaques. Acesso em: 23 ago. 2023.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Land-Use, Land-Use Change, and Forestry: Special Report**. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Emissions from livestock and manure management. *In: DONG, H. et al. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Genebra, 2006a. v. 4, cap. 10, p. 10.1–10.87.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). N₂O emissions from managed soils, and CO₂ emissions from lime and urea application. *In: DE KLEIN, C. et al. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Genebra, 2006b. v.4, cap. 11, p. 11.1–11.54.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Generic Methodologies Applicable to Multiple Land-Use Categories. *In: AALDE, H. 2006 IPCC*

Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Genebra, 2006c. v. 4, cap. 2, p. 2.1-2.59.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Harvest woodproducts. *In*: PINGOUD, K. **2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.** Hayama, 2006d. v. 4, cap. 12, p. 33.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2007: The Scientific Basis: IPCC fourth assessment report, Working Group I.** Nova Iorque: Cambridge University Press, 2007.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Emissions from livestock and manure management. *In*: GAVRILOVA, O. *et al.* **2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.** Genebra, 2019a. v. 4, cap. 10, p. 10.1 – 10.207.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). N₂O Emissions from Managed Soils, and CO₂ Emissions from Lime and Urea Application. *In*: HERGOUALC'H, K. *et al.* **2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.** Genebra, 2019b. v. 4, cap. 11, p. 11.1 – 11.48.

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

INTERNATIONAL DAIRY FEDERATION (IDF). **A Common Carbon Footprint Approach for Dairy: The IDF Guide to Standard Life Cycle Assessment Methodology for the Dairy Sector.** Bélgica: International Dairy Federation, 2015.

INTERNATIONAL FARM COMPARISON NETWORK (IFCN). Carbon neutral dairy farming in 2050 possible. *In*: 22ND IFCN DAIRY CONFERENCE 2021, 2021, Eslésvico-Holsácia. **Anais [...].** Eslésvico-Holsácia: Quiel, 2021.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO 13366); INTERNATIONAL DAIRY FEDERATION (IDF 148). **Milk — Enumeration of somatic cells.** Part 2: Guidance on the operation of fluoro-opto-electronic counters. Suíça, 2006.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO 13366-2);
INTERNATIONAL DAIRY FEDERATION (IDF 148-2). **Milk — Enumeration of somatic cells**. Part 2: Guidance on the operation of fluoro-opto-electronic counters. Suíça, 2006.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO 16297);
INTERNATIONAL DAIRY FEDERATION (IDF 161). **Milk — Bacterial Count. Protocol for the evaluation of alternative methods**. Suíça, 2013b.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO 9622);
INTERNATIONAL DAIRY FEDERATION (IDF 141). **Milk and liquid milk products. Guidelines for the application of midinfrared spectrometry**. Suíça, 2013a.

JAAKAMO, M. J. *et al.* The effect of dietary forage to concentrate ratio and forage type on milk fatty acid composition and milk fat globule size of lactating cows. **Journal of Dairy Science**, v. 102, n. 10, p. 8825-8838, out. 2019.

JAYASUNDARA, S. *et al.* Improving farm profitability also reduces the carbon footprint of milk production in intensive dairy production systems. **Journal of Cleaner Production**, v. 229, p. 1018-1028, ago. 2019.

JIANG, T. *et al.* Effect of C/N ratio, aeration rate and moisture content on ammonia and greenhouse gas emission during the composting. **Journal of Environmental Sciences**, v. 23, n. 10, p. 1754-1760, out. 2011.

JOSEPH, L. *et al.* Sistemas silvipastoris e serviços ecossistêmicos: a visão dos produtores de leite do Sul do Brasil. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 42, n. 3, p. 261-270, ago. 2019.

JUNGBLUTH, T.; HARTUNG, E.; BROSE, G. Greenhouse gas emissions from animal houses and manure stores. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 60, p. 133-145, jul. 2001.

KATARIA, R. P. Use of feed additives for reducing greenhouse gas emissions from dairy farms. **Microbiology Research**, v. 6, n. 1, p. 6120, 2015.

KAUL, M.; MOHREN, G. M. J.; DADHWAL, V. K. Carbon storage and sequestration potential of selected tree species in India. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, v. 15, p. 489-510, abr. 2010.

KICHEL, A. N. *et al.* Sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta e o progresso do setor agropecuário brasileiro. *In: BUNGENSTAB, D. J. et al. ILPF: inovação com integração de lavoura, pecuária e floresta.* Brasília: Embrapa, 2019. cap. 2, p. 50-58.

KLEIN, D. *et al.* Environmental impacts of various biomass supply chains for the provision of raw wood in Bavaria, Germany, with focus on climate change. **Science of the Total Environment**, v. 539, p. 45-60, jan. 2016.

KLUTHCOUSKI, J.; STONE, L. F. Manejo Sustentável dos Solos dos Cerrados. *In: KLUTHCOUSKI, J.; STONE, L. F.; AIDAR, H. Integração Lavoura-Pecuária.* Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2003. p. 59-104.

KNAPP, J. 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, jun. 2014.

KNAUS, W. Dairy cows trapped between performance demands and adaptability. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 89, n. 7, p. 1107-1114, abr. 2009.

KOLVER, E. S.; MULLER, L. D. Performance and nutrient intake of high producing Holstein cows consuming pasture or a total mixed ration. **Journal of Dairy Science**, v. 81, n. 5, p. 1403-1411, mai. 1998.

KOGLO, Y. S. *et al.* Land use change matrix and slope gradient soil carbon assessment from forest to different cropping systems in Togo, West Africa. **Environmental Sustainability**, v. 5, p. 173-183, abr. 2022.

KRAMER, H. *et al.* Land use and land use change for LULUCF reporting under the convention on climate change and de Kyoto protocol. **Environmental Science, Geography**, jan. 2009.

KUHN, M. T.; HUTCHISON, J. L.; NORMAN, H. D. Effects of length of dry period on yields of milk fat and protein, fertility and milk somatic cell score in the subsequent lactation of dairy cows. **Journal of Dairy Research**, v. 73, n. 2, p. 154-162, mai. 2006.

KUZNETSOVA, A.; BROCKHOFF, P. B.; CHRISTENSEN, R. H. B. lmerTest package: tests in linear mixed effects models. **Journal of Statistical Software**, v. 82, n. 13, dez. 2017.

KWIATKOWSKA-MALINA, J. Qualitative and quantitative soil organic matter estimation for sustainable soil management. **Journal of Soils and Sediments**, v. 18, p. 2801-2812, ago. 2018.

LACA, A. *et al.* Overview on GHG emissions of raw milk production and a comparison of milk and cheese carbon footprints of two different systems from northern Spain. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, p. 1650-1666, 2020.

LACTALIS. **Propósito global e compromisso de carbono neutro até 2050**. Brasil: Lactalis, [2023]. Disponível em: <https://lactalis.com.br/pt/noticias-lactalis/?texto=carbono+neutro&post=3566>. Acesso em: 01 jun. 2024.

LAL, R. Carbon sequestration. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 363, n. 1492, p. 815-830, 2008.

LAL, R. *et al.* Soil carbon sequestration to mitigate climate change and advance food security. **Soil Science**, v. 172, n. 12, p. 943-956, dez. 2007.

LAL, R. Soil erosion and the global carbon budget. **Environment International**, v. 29, p. 437-450, jul. 2003.

LEHMANN, J.; GAUNT, J.; RONDON, M. Bio-char sequestration in terrestrial ecosystems—a review. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, v. 11, p. 403-427, mai. 2006.

LEYTEM, A. B. *et al.* Emissions of ammonia, methane, carbon dioxide, and nitrous oxide from dairy cattle housing and manure management systems. **Journal of Environmental Quality**, v. 40, n. 5, p. 1383-1394, out. 2011.

LEYTEM, A. B. *et al.* Quantifying greenhouse gas sources and sinks in animal production systems. *In*: HANSON, W. L.; ITLE, C.; EDQUIST, K. **Quantifying greenhouse gas fluxes in agriculture and forestry: Methods for entity-scale inventory**. Washington, 2024. cap. 4, p. 4-1 - 4-160.

LI, H.; XIN, H. Lab-scale assessment of gaseous emissions from laying-hen manure storage as affected by physical and environmental factors. **Transactions of the ASABE**, v. 53, n. 2, p. 593-604, mar. 2010.

- LIU, W. *et al.* C. Are rubber-based agroforestry systems effective in controlling rain splash erosion? **Catena**, v. 147, p. 16-24, dez. 2016.
- LIU, Z. *et al.* Enteric methane conversion factor for dairy and beef cattle: Effects of feed digestibility and intake level. **Transactions of the ASABE**, v. 60, n. 2, p. 459-464, 2017.
- LIU, Z.; LIU, Y. Mitigation of greenhouse gas emissions from animal production. **Greenhouse Gases: Science and Technology**, v. 8, n. 4, p. 627-638, mai. 2018.
- LOCK, A. L. *et al.* Milk fat depression: impact of dietary components and their interaction during rumen fermentation. *In: CORNELL NUTRITION CONFERENCE PROCEEDINGS PAPERS*, 2006, Ithaca. **Anais [...]**. Ithaca: Nova Iorque, 2006.
- LUIZ, V. T. *et al.* Sustainability Assessment of Intensification Levels of Brazilian Smallholder Integrated Dairy-Crop Production Systems: An Emergy and Economic-Based Decision Approach. **Sustainability**, v. 15, n. 5, p. 4674, mar. 2023.
- MACEDO, M. C. M. Integração lavoura e pecuária: o estado da arte e inovações tecnológicas. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, MG, v. 38, p. 133-146, jul. 2009.
- MAGAN, J. B. *et al.* Compositional and functional properties of milk and dairy products derived from cows fed pasture or concentrate-based diets. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v. 20, n. 3, p. 2769-2800, mai. 2021.
- MANNING, D. A. C. *et al.* Carbonate precipitation in artificial soils produced from basaltic quarry fines and composts: An opportunity for passive carbon sequestration. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, v. 17, p. 309-317, set. 2013.
- MARÍN-SANTANA, M. N. *et al.* Kikuyu pastures associated with tall fescue grazed in autumn in small-scale dairy systems in the highlands of Mexico. **Tropical Animal Health and Production**, v. 52, p. 1919-1926, jul. 2020.
- MAZZETTO, A. M. *et al.* Comparing the environmental efficiency of milk and beef production through life cycle assessment of interconnected cattle systems. **Journal of Cleaner Production**, v. 277, p. 124108, dez. 2020.

MCCAUGHEY, W. P.; WITTENBERG, K.; CORRIGAN, D. Impact of pasture type on methane production by lactating beef cows. **Canadian Journal of Animal Science**, v. 79, n. 2, p. 221-226, jun. 1999.

MCNEISH, D. On using Bayesian methods to address small sample problems. **Structural Equation Modeling: A Multidisciplinary Journal**, v. 23, n. 5, p. 750-773, jun. 2016.

MILLER, G. D.; AUESTAD, N. Towards a sustainable dairy sector: leadership in sustainable nutrition. **International Journal of Dairy Technology**, v. 66, n. 3, p. 307–316, mai. 2013.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO (MAPA). **Mapa do Leite**. Brasília: Ministério da Agricultura e Pecuária, [2022]. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/producaoanimal/mapadoleite#:~:text=O%20Brasil%20%C3%A9%20o%20terceiro%20maior%20produtor%20mundial,propriedades%2C%20empregando%20perto%20de%204%20milh%C3%B5es%20de%20pessoas>. Acesso em: 12 out. 2023.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA (MCT). **Emissões de óxido nitroso de solos agrícolas e de manejo de dejetos** (Segundo inventário brasileiro de emissões antrópicas de gases de efeito estufa). Brasília: Ministério da Ciência e Tecnologia, 2010. 106 p. (Relatório de Referência).

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO (MCTI). **Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima**. Brasília: Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, [2019]. Disponível em: https://antigo.mctic.gov.br/mctic/opencms/ciencia/SEPED/clima/ciencia_do_clima/painel_intergovernamental_sobre_mudanca_do_clima.html#:~:text=O%20IPCC%20elabora%20Relat%C3%B3rios%20de,as%20mudan%C3%A7as%20clim%C3%A1ticas%20est%C3%A3o%20ocorrendo. Acesso em: 17 out. 2023.

MIRANDA- ACKERMAN, M. A.; AZZARO - PANTEL, C. Extending the scope of eco-labelling in the food industry to drive change beyond sustainable agriculture practices. **Journal of Environmental Management**, v. 204, n. 3, p. 814-824, dez. 2017.

MONTENY, G.; BANNINK, A.; CHADWICK, D. Greenhouse gas abatement strategies for animal husbandry. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 112, n. 2-3, p. 163-170, fev. 2006.

MONTES, F. *et al.* SPECIAL TOPICS—Mitigation of methane and nitrous oxide emissions from animal operations: II. A review of manure management mitigation options. **Journal of Animal Science**, v. 91, n. 11, p. 5070-5094, 2013.

MORAES, L. E. *et al.* Prediction of enteric methane emissions from cattle. **Global Change Biology**, v. 20, n. 7, p. 2140-2148, jul. 2014.

MORAND-FEHR, P. *et al.* Influence of farming and feeding systems on composition and quality of goat and sheep milk. **Small Ruminant Research**, v. 68, n. 1-2, p. 20-34, mar. 2007.

MORI, C. *et al.* **Índice de atualização tecnológica para propriedades leiteiras: IAT-Leite**. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2020. 18 p. (Comunicado Técnico).

MRÓWCZYŃSKA-KAMIŃSKA, A. *et al.* Greenhouse gas emissions intensity of food production systems and its determinants. **PLoS One**, v. 16, n. 4, p. e0250995, 2021.

MÜLLER, M. D. *et al.* Estimativa de acúmulo de biomassa e carbono em sistema agrossilvipastoril na Zona da Mata Mineira. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, PR, n. 60, p. 11-11, dez. 2009.

NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES, ENGINEERING AND MEDICINE (NASEM). **Nutrient Requirements of Dairy Cattle**. 8. ed. Washington, The National Academies Press, 2021.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL (NRC). **Nutrient requirements of dairy cattle**. 6. ed. Washington: NAS, 1989.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL (NRC). **Nutrient requirements of beef cattle**. 7. ed. Washington: National Academy Press, 1996.

NESTLÉ. **Agricultura regenerativa para reduzir as emissões de CO₂**. Brasil: Nestlé, [2024]. Disponível em: <https://www.nestle.com.br/sustentabilidade/o-bom-alimento-tem-poder-para-regenerarnatureza#:~:text=Agricultura%20regenerativa%20para%20reduzir%20as%20emiss%C3%B5es%20de%20CO2&text=Ela%20consiste%20na%20ado%C3%A7%C3%A3o%20de,para%20natureza%2C%20sociedade%20e%20produtores..> Acesso em: 01 jun. 2023.

NIGHTINGALE, C. *et al.* Influence of variable milk quality premiums on observed milk quality. **Journal of Dairy Science**, v. 91, n. 3, p. 1236–1244, mar. 2008.

NOCARBON. **A fazenda Guaraci**. Brasil: Nocarbon, [2024]. Disponível em: <https://www.nocarbon.com.br/sobre-n%C3%B3s>. Acesso em: 31 out. 2023.

NOVO, A.; JANSEN, K.; SLINGERLAND, M. The novelty of simple and known technologies and the rhythm of farmer-centred innovation in family dairy farming in Brazil. **International Journal of Agricultural Sustainability**, v. 13, n. 2, p. 135-149, 2015.

O'BRIEN, D. *et al.* An appraisal of carbon footprint of milk from commercial grass-based dairy farms in Ireland according to a certified life cycle assessment methodology. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 19, p. 1469-1481, jun. 2014.

O'BRIEN, D. *et al.* How can grass-based dairy farmers reduce the carbon footprint of milk?. **Animal Production Science**, v. 56, n. 3, p. 495-500, fev. 2016.

O'CALLAGHAN, T. F. *et al.* Effect of pasture versus indoor feeding systems on raw milk composition and quality over an entire lactation. **Journal of Dairy Science**, v. 99, n. 12, p. 9424-9440, dez. 2016.

OLIVEIRA, P. P. A. *et al.* Greenhouse gas balance and carbon footprint of pasture-based beef cattle production systems in the tropical region (Atlantic Forest biome). **animal**, v. 14, n. 53, p. 427 – 437, 2020.

OLIVEIRA, P. P. A. *et al.* Greenhouse gas balance and mitigation of pasture-based dairy production systems in the Brazilian Atlantic Forest Biome. **Frontiers Veterinary Science**, v. 9, p. 958751, set. 2022.

OLIVEIRA, P. P. A. *et al.* Soil carbon dynamics in Brazilian Atlantic forest converted into pasture-based dairy production systems. **Agronomy Journal**, v. 113, n. 2, p. 1136-1149, 2021.

OUATAHAR, L. *et al.* Modelling the effect of feeding management on greenhouse gas and nitrogen emissions in cattle farming systems. **Science of the Total Environment**, v. 776, p. 145932, jul. 2021.

OWEN, J. J.; SILVER, W. L. Greenhouse gas emissions from dairy manure management: a review of field-based studies. **Global Change Biology**, v. 21, n. 2, p. 550-565, 2015.

PARIS, W.; CECATO, U. Sistemas de produção para bovinos leiteiros: pasto x confinado. *In*: MARTIN, T. N. **Sistemas de Produção Agropecuária da UTFPR**. Dois Vizinhos: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2009. cap. 9, p. 170-191.

PARK, K. H. *et al.* Low greenhouse gas emissions during composting of solid swine manure. **Animal Feed Science and Technology**, v. 166, p. 550-556, jun. 2011.

PEDREIRA, M. S. *et al.* Ruminant methane emission by dairy cattle in Southeast Brazil. **Scientia Agricola**, Piracicaba, SP, v. 66, p. 742-750, dez. 2009.

PEIGNÉ, J.; GIRARDIN, P. Environmental impacts of farm-scale composting practices. **Water, Air, and Soil Pollution**, v. 153, p. 45-68, mar. 2004.

PETERSON, C. B.; MITLOEHNER, F. M. Sustainability of the dairy industry: Emissions and mitigation opportunities. **Frontiers in Animal Science**, v. 2, p. 760310, out. 2021.

PEZZOPANE, J. R. M. *et al.* Managing eucalyptus trees in agroforestry systems: Productivity parameters and PAR transmittance. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 312, p. 107350, jun. 2021.

PHILIPPE, F. X. *et al.* Comparison of ammonia and greenhouse gas emissions during the fattening of pigs, kept either on fully slatted floor or on deep litter. **Livestock Science**, v. 111, n. 1-2, p. 144-152, ago. 2007.

POORE, J., NEMECEK, T. Reducing food's environmental impacts through producers and consumers. **Science**, v. 306, n. 6392, p. 987-992, jun. 2018.

PÖTTKER, D. **Efeito do tipo de solo, tempo de cultivo e da calagem sobre a mineralização da matéria orgânica em solos do Rio Grande do Sul**. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1977.

RAVAGLIA, P.; FAMIGLIETTI, J. VALENTINO, F. Certification and added value for farm productions. **Advances in Chemical, Pollution, Environmental, Management, and Protection**. Cambridge, v.2, p. 63-108, 2018.

RAVICHANDRAN, T. *et al.* Stimulating smallholder dairy market and livestock feed improvements through local innovation platforms in the Himalayan foothills of India. **Food Policy**, v. 95, p. 101949, ago. 2020.

REICHENBACH, M. *et al.* Differences in enteric methane emissions across four dairy production systems in the urbanizing environment of an Indian megacity. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 7, p. 1204218, jan. 2024.

REIDY, B. *et al.* Comparison of models used for national agricultural ammonia emission inventories in Europe: Liquid manure systems. **Atmospheric Environment**, v. 42, n. 14, p. 3452-3464, mai. 2008.

RIBEIRO-FILHO, H. M. N.; CIVIERO, M.; KEBREAB, E. Potential to reduce greenhouse gas emissions through different dairy cattle systems in subtropical regions. **Plos One**, v. 15, n. 6, p. e0234687, jun. 2020.

ROCHA, D. T. *et al.* **Cadeia produtiva do leite no Brasil**: produção primária. Juiz de Fora: Embrapa Gado de Leite, 2020. 16 p. (Circular Técnica.).

ROSSI, C. A. S. *et al.* Effect of a blend of essential oils, bioflavonoids and tannins on in vitro methane production and in vivo production efficiency in dairy cows. **Animals**, v. 12, n. 6, p. 728, mar. 2022.

ROTZ, C. A. Modeling greenhouse gas emissions from dairy farms. **Journal of Dairy Science**, v. 101, n.7, p. 6675-6690, jul. 2018.

ROTZ, C. A.; MONTES, F.; CHIANESE, D. S. The carbon footprint of dairy production systems through partial life cycle assessment. **Journal of Dairy Science**, v. 93, n. 3, p. 1266-1282, mar. 2010.

ROTZ, C. A.; THOMA, G. R. E. G. Assessing carbon footprints of dairy production systems. *In*: BEEDE, D. K. **Large dairy herd management**. Champaign, 2017. p. 19-31.

SAINZ-SÁNCHEZ, P. A. *et al.* Effect of stocking rate and supplementation on performance of dairy cows grazing native grassland in small-scale systems in the highlands of central Mexico. **Tropical Animal Health and Production**, v. 49, p. 179-186, jan. 2017.

SALTON, J. C. *et al.* Benefícios da adoção da estratégia de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta. *In: CORDEIRO, L. A. M. et al. Integração Lavoura-Pecuária-Floresta: o produtor pergunta, a Embrapa responde.* Brasília: Embrapa Arroz e Feijão, 2015. p. 35-51.

SALTON, J. C. *et al.* Integrated crop-livestock system in tropical Brazil: Toward a sustainable production system. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 190, p. 70-79, jun. 2014.

SÁNCHEZ – BRAVO, P. *et al.* Consumers' Attitude Towards the Sustainability of Different Food Categories. **Foods**, v. 9, n. 11, nov. 2020.

SANTOS, J. E. P. Feeding for milk composition. *In: VI INTERNATIONAL CONGRESS ON BOVINE MEDICINE, 2002, Santiago de Compostela. Proceedings [...].* Santiago de Compostela. 2002, p. 163–172.

SEARCHINGER, T. D. *et al.* Assessing the efficiency of changes in land use for mitigating climate change. **Nature**, v. 564, n. 7735, p. 249-253, dez. 2018.

SEGERKVIST, K. A. *et al.* Research on Environmental, Economic, and Social Sustainability in Dairy Farming: A Systematic Mapping of Current Literature. **Sustainability**, v. 12, n. 14, p. 5502, jul. 2020.

SEGNINI, A. *et al.* Soil carbon stock and humification in pastures under different levels of intensification in Brazil. **Scientia Agricola**, Piracicaba, SP, v. 76, p. 33-40, jan.- fev. 2019.

SERRA, A. P. *et al.* Fundamentos técnicos para implantação de sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta com eucalipto. *In: BUNGENSTAB, D. J. Sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta: a produção sustentável.* Brasília: Embrapa, 2012. cap. 5, p. 49-72.

SILVA, R. F. *et al.* Análise conjunta de atributos físicos e biológicos do solo sob sistema de integração lavoura-pecuária. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 46, p. 1277-1283, out. 2011.

SMITH, P. Carbon sequestration in croplands: the potential in Europe and the global context. **European Journal of Agronomy**, v. 20, n. 3, p. 229-236, fev. 2004.

SMITH, P. *et al.* Agriculture, forestry and other land use (AFOLU). *In: EDENHOFER, O. et al. Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III*

to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 3. ed. Nova Iorque: Cambridge University Press, 2014. cap. 11, p. 811-922.

SOLOMON, S. *et al.* **Climate Change 2007: The Physical Science Basis**. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

SOUSSANA, J.; LEMAIRE, G. Coupling carbon and nitrogen cycles for environmentally sustainable intensification of grasslands and crop-livestock systems. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 190, p. 9-17, jul. 2014.

THOMA, G. J. *et al.* Greenhouse gas emissions from milk production and consumption in the United States: A cradle-to-grave life cycle assessment circa 2008. **International Dairy Journal**, v. 31, n. 1, p. S3–S14, abr. 2013.

THOMPSON, A. G.; WAGNER-RIDDLE, C.; FLEMING, R. Emissions of N₂O and CH₄ during the composting of liquid swine manure. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 91, p. 87-104, fev. 2004.

THOMPSON, L. R.; ROWNTREE, J. E. Invited review: methane sources, quantification, and mitigation in grazing beef systems. **Applied Animal Science**, v. 36, n. 4, p. 556-573, ago. 2020.

TSUKAMOTO FILHO, A. A. **Fixação de carbono em um sistema agroflorestal com eucalipto na região do cerrado de Minas Gerais**. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2003.

TUBIELLO, F. N. *et al.* Greenhouse gas emissions from food systems: building the evidence base. **Environmental Research Letters**, v. 16, n. 6, p. 065007, jun. 2021.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **Inventory of U.S. greenhouse gas emissions and sinks**. Washington: United States Environmental Protection Agency, 2005.

VAN ZIJDERVELD, S. M. *et al.* Persistency of methane mitigation by dietary nitrate supplementation in dairy cows. **Journal of Dairy Science**, v. 94, n. 8, p. 4028-4038, ago. 2011.

- VANBERGUE, E. *et al.* Effects of feeding level, type of forage and milking time on milk lipolytic system in dairy cows. **Livestock Science**, v. 217, p. 116-126, nov. 2018.
- VELARDE-GUILLÉN, J.; ARNDT, C.; GÓMEZ, C. A. Carbon footprint in Latin American dairy systems. **Tropical Animal Health and Production**, v. 54, n. 1, p. 15, 2022.
- VENTURINI, K. S. *et al.* **Características do leite**. Espírito Santo: Universidade Federal do Espírito Santo, 2007.
- VILLANUEVA, C.; IBRAHIM, M.; CASTILLO, C. Enteric methane emissions in dairy cows with different genetic groups in the humid tropics of Costa Rica. **Animals**, v. 13, n. 4, p. 730, fev. 2023.
- VOGEL, E. *et al.* Environmental efficiency and methane abatement costs of dairy farms from Minas Gerais, Brazil. **Food Policy**, v. 119, p. 102520, ago. 2023.
- VOGEL, E.; BEBER, C. L. Carbon footprint and mitigation strategies among heterogeneous dairy farms in Paraná, Brazil. **Journal of Cleaner Production**, v. 349, p. 131404, mai. 2022.
- WAGHORN, G. Beneficial and detrimental effects of dietary condensed tannins for sustainable sheep and goat production—Progress and challenges. **Animal Feed Science and Technology**, v. 147, n. 1-3, p. 116-139, nov. 2008.
- WALSTRA, P.; WOUTERS, J. M. T.; GEURTS, T. J. **Dairy Science and Technology**. Boca Ratón: CRC Press, 2006.
- WARNER, D. *et al.* Effects of grass silage quality and level of feed intake on enteric methane production in lactating dairy cows. **Journal of Animal Science**, v. 95, n. 8, p. 3687-3699, ago. 2017.
- WIEDMANN, T.; MINX, J. A definition of carbon footprint. *In*: PERTSOVA, C. C. **Ecological Economics Research Trends**. Nova Iorque: Nova Science Publishers, 2007. cap. 1, p. 1-11.
- WOODFORD, J. A.; JORGENSEN, N. A.; BARRINGTON, G. P. Impact of dietary fiber and physical form on performance of lactating dairy cows. **Journal of Dairy Science**, v. 69, n. 4, p. 1035-1047, abr. 1986.

ZEMAN, C.; DEPKEN, D.; RICH, M. Research on how the composting process impacts greenhouse gas emissions and global warming. **Compost Science & Utilization**, v. 10, n. 1, p. 72-86, 2002.

ZHU, B. *et al.* Assessment of uncertainties in greenhouse gas emission profiles of livestock sectors in Africa, Latin America and Europe. **Regional Environmental Change**, v. 16, p. 1571-1582, 2016.

ANEXO A – Questionário aplicado nas propriedades visitadas das regiões de Minas Gerais, São Paulo e Goiás, no ano de 2023.

ITEM 1 – Descrição referente à unidade de produção.

DADOS REBANHO	
DESCRIÇÃO	
Nome	Fazenda Canchim
Estado	São Paulo
Cidade	São Carlos
Bioma	Mata Atlântica
Sistema de produção (principal)	A pasto
Início da simulação (mm/aaaa)	Setembro/2023
Fim da simulação (mm/aaaa)	Fevereiro/2024
Área (própria + arrendada em hectare)	50
Área pasto (própria + arrendada em hectare)	30
Área produção de alimentos (própria + arrendada em)	20
Área de Reserva Legal + APP	30
Taxa média de lotação (UA/ha)	9
Há venda de animais para outra propriedade?	Sim
Há compra de animais de outra propriedade?	Sim
Situação do pasto/cultura há 20 anos	Baixa lotação

Fonte: Embrapa Pecuária Sudeste (2023).

ITEM 2 – Detalhamento rebanho leiteiro e sistema de produção.

Detalhamento por Categorias						
Categoria	Número de animais	Peso médio (kg)	Ganho de peso médio diário (kg/dia)	Produção de leite (kg/animal/dia)	DEL	Produção de leite na lactação (kg/animal/ano)
Bezerros aleitamento	6	45	0,5			
Bezerras aleitamento	8	45	0,5			
Bezerras desmamadas	42	60	0,7			
Novilhas (12 meses ao parto)	37	360	0,4			
Vacas não lactantes (secas)	31	500	0,0			
Vacas lactantes	65	500	0,0	18,0	305	5490
Touros	0	0	0,0			

Sistema de Produção				
Categoria	Sistema de produção (detalhamento)	Situação alimentar	Tipo de Dieta	Uso de aditivos
Bezerros aleitamento	A pasto	Pasto	> 75% de forragem de alta qualidade da dieta total;	Não
Bezerras aleitamento	A pasto	Pasto	> 75% de forragem de alta qualidade da dieta total;	Não
Bezerras desmamadas	A pasto	Pasto	> 75% de forragem de alta qualidade da dieta total;	Não
Novilhas (12 meses ao parto)	A pasto	Pasto	> 75% de forragem de alta qualidade da dieta total;	Não
Vacas não lactantes (secas)	A pasto	Pasto	> 75% de forragem de alta qualidade da dieta total;	Não
Vacas lactantes	A pasto	Pasto	> 75% de forragem de alta qualidade da dieta total;	Não
Touros	A pasto	Pasto	> 75% de forragem	Sim

Fonte: Embrapa Pecuária Sudeste (2023).

ITEM 3 – Descrição manejo de dejetos e qualidade do leite.

Manejo de Dejetos						
Categoria	Manejo de dejetos 1	% do dejetos manejado 1	Manejo de dejetos 2	% do dejetos manejado 2	Manejo de dejetos 3	% do dejetos manejado 3
Bezerros aleitamento	Pastagem/área de	100				
Bezerras aleitamento	Pastagem/área de	100				
Bezerras desmamadas	Pastagem/área de	100				
Novilhas (12 meses ao parto)	Pastagem/área de	100				
Vacas não lactantes (secas)	Pastagem/área de	100				
Vacas lactantes	Pastagem/área de	92	Lagoa anaeróbica	8		
Touros		0				

Produção de leite								
Período inicial (mês/ano)	Período final (mês/ano)	Leite vendido (kg/período)	Gordura (%)	Proteína (%)	Sólidos totais (%)	Sólidos desengordurados (%)	Contagem de Células Somáticas (cs/mL)	Contagem Bacteriana Total (UFC/mL)
Setembro/2023	Fevereiro/2024	44668,0	4,1	3,5	12,9	8,8	376000	19000

Fonte: Embrapa Pecuária Sudeste (2023).

ITEM 4 – Uso do solo, mudanças de uso da terra e plantio de árvores.

Mudança de uso da terra					
Descrição (Nome da área)	Área (hectares)	Estoque de carbono no solo	Situação da área há 20 anos	Situação da área atual	Tipo de Solo
Integração	12	56	Pastagem média produtividade	Integração Lavoura-Pecuária (Sistema Santa-Fé)	
Irrigado	10	56	Milho para silagem (1 safra e pousio) - Plantio convencional	Milho para silagem (2 safras) - Plantio direto	
Outros	5	56	Pastagem alta produtividade	Pastagem alta produtividade	
	13	56	Pastagem alta produtividade	Pastagem média produtividade	

Plantio de árvores			
Espécie	Densidade (árvores/hectares)	Área (hectares)	Total de árvores
Corymbia citriodora			1500
Corymbia citriodora			1200

Fonte: Embrapa Pecuária Sudeste (2023).

ITEM 5 – Produtos da propriedade.

Produtos da propriedade		
Categoria	Quantidade	Conjunto de dados (kg CO2 eq/kg)
Bezerros(as) vendidos (cabeças)		
Novilhas vendidas (cabeças)		
Vacas vendidas (cabeças)		
Touros vendidos (cabeças)		
Carcaça vendida (kg)		
Leite vendido (kg)		

Fonte: Embrapa Pecuária Sudeste (2023).

ITEM 6 – Descrição da alimentação por categoria animal.

DADOS ALIMENTAÇÃO						
DESCRIÇÃO						
Ingredientes	Bezerros aleitamento machos					
	Quantidade MO (kg MO)	Quantidade MS (kg MS)	%MS	%PB	%DIG	kg CO2 eq/un
Milho moído fino (fubá)	0,56	0,492128	87,88	8,96	90,265	
Farelo de soja	0,24	0,21276	88,65	48,84	78,165	
Panicum maximum cv. Mombaça	2,96	0,7992	27	11,05	56,87	
Leite integral	6,6	0,792	12	3,6	98,3	
Soja (grão)	0					
	0					
	0					
Dieta total		2,30		11,53	80,29	

Fonte: Embrapa Pecuária Sudeste (2023).

ANEXO B – Equações para cálculo de ingestão de energia bruta (GE), segundo IPCC (2019).

Energia líquida de manutenção (NE_m)

Calculou-se a energia líquida da manutenção de acordo com a equação:

$$NE_m = Cfi \times (PV)^{0,75}$$

Sendo:

NE_m: requerimento de energia líquida para a manutenção animal, MJ dia⁻¹;

Cfi: coeficiente que varia para cada categoria animal, MJ dia⁻¹ kg⁻¹, conforme tabela 1;

PV: peso vivo do animal, kg;

0,75: fator de emissão derivado da relação entre o metabolismo basal e o peso vivo do animal.

Energia líquida de atividade (NE_a)

Calculou-se a energia líquida de atividade de acordo com a equação:

$$NE_a = Ca \times NE_m$$

Sendo:

NE_a: energia líquida para atividade animal, MJ dia⁻¹;

Ca: coeficiente correspondente à situação alimentar animal, conforme tabela 2;

NE_m: requerimento de energia líquida para manutenção animal, MJ dia⁻¹.

Energia líquida de crescimento (NE_g)

Calculou-se a energia líquida necessária para o crescimento baseada no National Research Council (1996).

$$NE_g = 22,02 \times \left(\frac{BW}{C \times MW} \right)^{0,75} \times WG^{1,097}$$

Sendo:

NE_g: energia líquida necessária para crescimento, MJ dia⁻¹;

22,02: quantidade de energia líquida necessária para depositar 1g de proteína no tecido animal;

BW: média do peso vivo corporal dos animais na população, kg;

C: coeficiente que varia de 0,8 para fêmeas, 1,0 para machos castrados e 1,2 para reprodutores (NRC, 1996; IPCC, 2006);

MW: peso vivo corporal maduro de uma fêmea adulta em condição corporal moderada, kg;

WG: média diária de ganho de peso por animal dentro de uma população, kg dia⁻¹;

0,75: fator de emissão derivado da relação entre o metabolismo basal e o peso vivo do animal;

1,097: fator de correção entre peso vivo e peso da carcaça.

Energia líquida para lactação (NE_l)

Calculou-se a energia líquida para lactação expressa pela quantidade de leite produzido e teor de gordura a 4% (NRC, 1989).

$$NE_l = Milk \times (1,47 + 0,40 \times Fat)$$

Sendo:

NE_l: energia líquida para lactação, MJ dia⁻¹;

Milk: produção de leite, kg de leite dia⁻¹;

1,47: fator que representa a energia líquida necessária para síntese de 1g de gordura no leite;

0,40: fator que representa a energia líquida para síntese de 1g de proteína no leite;

Fat: conteúdo de gordura no leite, % por peso.

Energia líquida para trabalho (NE_{work})

A energia líquida para trabalho (NE_{work}) é usada para estimar a energia necessária para a potência de tração de bovinos. Os valores de Bamualim e Kartiarso (1985) demonstram que cerca de 10% de NEm por hora é destinada para o trabalho, típico de animais de tração. Calculou-se a energia líquida para trabalho de acordo com a equação:

$$NE_{work} = 0,10 \times NE_m \times Hours$$

Sendo:

NE_{work} : energia líquida para trabalho, MJ dia⁻¹;

0,10: proporção da energia líquida da manutenção necessária para 1 hora de trabalho;

NE_m : requerimento de energia líquida para manutenção animal, MJ dia⁻¹.

$Hours$: número de horas de trabalho por dia, para vacas em lactação é zero.

Energia líquida para gestação (NE_p)

Calculou-se a energia líquida para gestação de acordo com a equação:

$$NE_p = C_{pregnancy} \times NE_m$$

Sendo:

NE_p : requerimento de energia líquida para gestação, MJ dia⁻¹;

$C_{pregnancy}$: coeficiente de gestação, conforme tabela 1;

NE_m : requerimento de energia líquida para manutenção animal, MJ dia⁻¹.

Tabela 1 – Coeficientes para os cálculos da energia líquida da manutenção (NE_m) e energia líquida da gestação (NE_p) para bovinos de leite.

Categoria animal	Coefficiente	Valor
Bovinos (vacas em lactação)	Cfi (MJ d ⁻¹ kg ⁻¹)	0,386*
Bovinos (touro)	Cfi (MJ d ⁻¹ kg ⁻¹)	0,370
Bovinos (demais categorias)	Cfi (MJ d ⁻¹ kg ⁻¹)	0,322
Bovinos (vacas em lactação)	$C_{pregnancy}$	0,100

*Os requisitos de energia de manutenção são 20% maiores durante a lactação.

Fonte: Adaptado de National Research Council (1996).

Tabela 2 – Coeficientes de atividade de bovinos correspondentes à situação alimentar animal.

Situação	Definição	Ca
Estabulados	Animais confinados a uma pequena área considerando que eles gastam pouca ou nenhuma energia para adquirir comida.	0,00
Pastejo	Os animais estão confinados em áreas com forragem suficiente, exigindo gasto de energia modesto para adquirir comida.	0,17

Pastejando grandes áreas	Os animais estão pastejando áreas abertas ou terrenos montanhosos, exigindo gasto de energia significativa para adquirir comida.	0,36
--------------------------	--	------

Fonte: Adaptado de National Research Council (1996).

Taxa de energia líquida utilizada para a manutenção (% da energia digestível) (REM)

Relação entre a energia líquida disponível em uma dieta para manutenção e a energia digestível consumida (REM) (Gibbs; Johnson, 1993).

$$REM = \left[1,123 - (4,092 \times 10^{-3} \times DE) + [1,126 \times 10^{-5} \times (DE)^2] - \left(\frac{25,4}{DE} \right) \right]$$

Sendo:

REM: taxa de energia líquida utilizada para a manutenção (% da energia digestível);

DE: digestibilidade dos alimentos expressa como uma fração da energia bruta.

Taxa de energia líquida utilizada para crescimento (% da energia digestível) (REG)

Proporção entre a energia líquida disponível para crescimento em uma dieta em relação à energia digestível consumida (REG) (Gibbs; Johnson, 1993).

$$REG = \left[1,164 - (5,160 \times 10^{-3} \times DE) + [1,308 \times 10^{-5} \times (DE)^2] - \left(\frac{37,4}{DE} \right) \right]$$

Sendo:

REG: taxa de energia líquida utilizada para o crescimento (% da energia digestível);

DE: digestibilidade dos alimentos expressa como uma fração da energia bruta.

ANEXO C – Equações necessárias para o cálculo de metano (CH₄) proveniente do manejo de dejetos.

Sólidos voláteis (VS)

A quantidade de sólidos voláteis foi calculada pela equação:

$$VS = \left[GE \times \left(1 - \frac{DE}{100} \right) + (UE \times GE) \right] \times \left[\frac{(1 - ASH)}{18,45} \right]$$

Sendo:

VS: excreção de sólido volátil por dia com base na matéria seca (MS), kg SV dia⁻¹;

GE: consumo de energia bruta, MJ dia⁻¹;

DE: digestibilidade dos alimentos expressa como uma fração da energia bruta (%);

(UE × GE): energia urinária expressa como fração de GE, conforme tabela 1;

ASH: teor de cinzas contido no dejetos, calculado como a fração do consumo de MS, conforme tabela 1;

18,45: fator de conversão para GE dietético por kg MS (MJ kg⁻¹). Esse valor é uma constante de uma ampla gama de alimentos à base de forragem e grãos consumidos pelos bovinos.

Tabela 1 – Resumo dos parâmetros e fatores utilizados no cálculo de emissões de CH₄ e N₂O direto e indireto provenientes do manejo de dejetos de bovinos de leite.

Parâmetro/fator de emissão	Símbolo	Valor	Unidade de medida
Energia urinária expressa como fração de GE (vacas em lactação alta produção e demais categorias)	UE x GE	0,02	-
Energia urinária expressa como fração de GE (vacas em lactação baixa produção)	UE x GE	0,04	-
Teor de cinzas contido no dejetos	ASH	8	%

Fonte: Adaptado IPCC (2019a).

Fator de emissão para a população de animais definida (EF)

O fator de emissão foi calculado para cada categoria, conforme equação:

$$EF_{(T)} = (VS_{(T)} \times 365) \times \left[B_{O(T)} \times 0,67 \times \sum_{(S,k)} \left(\frac{MCF_{(S,K)}}{100} \right) \times AWMS_{(T,S,k)} \right]$$

Sendo:

$EF_{(T)}$: fator de emissão para a população de animais definida (kg CH₄ cabeça⁻¹ano⁻¹);

$VS_{(T)}$: sólido volátil diário excretado para animais da categoria T (kg MS animal⁻¹ dia⁻¹);

365: base para calcular produção anual de VS (dias/ano⁻¹);

$B_{O(T)}$: capacidade máxima de produção de metano para esterco produzido pela categoria animal, m³/CH₄/kg⁻¹ de VS excretado, conforme tabela 2;

0,67: fator de conversão de m³ CH₄ para kg de CH₄;

$MCF_{(S,k)}$: fatores de conversão de metano para cada sistema de manejo de esterco S por região climática K, conforme tabela 3 (%);

$AWMS_{(T, S, k)}$: fração de esterco da categoria de animais T manejado com sistema de manejo de dejetos S na região climática K.

Tabela 2 – Fator de emissão para máxima capacidade de produção de metano do esterco bovino.

Categorias	Descrição	B₀ (kg CH₄/ kg VS)
Vacas lactantes	Alta produção	0,24
	Baixa produção	0,13
Demais categorias	Alta produção	0,18
	Baixa produção	0,13

Fonte: Adaptado IPCC (2019a).

Tabela 3 – Fator de conversão do metano (MCF) de acordo com cada sistema de manejo de tratamento de dejetos para bovinos de leite e variação climática (clima tropical), encontrados nas propriedades visitadas.

Sistema de gerenciamento de dejetos	MCFs
Lagoa anaeróbica	79,00
Armazenamento sólido	5,00
Pastagem	0,47
Biodigestor	1,41
Compostagem	1,50

*MCF: *methane conversion* fator (fator de conversão de metano);

*Para o MCF de lagoa anaeróbica foi adotado o valor médio para clima tropical segundo IPCC (2019a);

Fonte: Adaptado IPCC (2019a).

ANEXO D – Equações necessárias para o cálculo de Óxido Nitroso (N₂O) proveniente do manejo de dejetos.

Nitrogênio ingerido (N_{intake})

A quantidade de nitrogênio ingerido foi calculada da seguinte forma:

$$N_{intake(T)} = \frac{GE}{18,45} \times \left(\frac{\left(\frac{CP\%}{100} \right)}{6,25} \right)$$

Sendo:

$N_{intake(T)}$: ingestão diária de N por cabeça da categoria animal T, kg N animal⁻¹ dia⁻¹;

GE : ingestão de energia bruta, MJ dia⁻¹;

$18,45$: fator de conversão para GE dietético por kg MS (MJ kg⁻¹). Esse valor é uma constante de uma ampla gama de alimentos à base de forragem e grãos consumidos pelos bovinos;

$CP\%$: porcentagem de proteína bruta em matéria seca, %;

$6,25$: fator de conversão de kg de proteína para kg de N na dieta, kg de proteína alimentar (kg N)⁻¹.

Nitrogênio retido ($N_{retention}$)

A quantidade de N retido da dieta que foi retido pelo animal foi calculada conforme a equação:

$$N_{retention(T)} = \left[\frac{Milk \times \left(\frac{Milk PR\%}{100} \right)}{6,38} \right] + \left[\frac{WG \times \left[\frac{268 - \left(\frac{7,03 \times NEg}{WG} \right)}{100} \right]}{6,25} \right]$$

Sendo:

$N_{retention(T)}$: quantidade de N que é ingerida diariamente e retida por cabeça da categoria animal T, kg N animal⁻¹ dia⁻¹;

$Milk$: produção de leite (aplicável apenas para vacas em lactação), kg animal⁻¹ dia⁻¹;

$Milk PR\%$: porcentagem de proteína do leite, %;

$6,38$: fator de conversão de proteína do leite em N, kg proteína (kg N)⁻¹;

WG: ganho de peso da categoria T, kg dia⁻¹;

268 e 7,03: constantes das equações 3-8 no NRC (1996), g proteína kg animal⁻¹ e g proteína MJ animal⁻¹, respectivamente;

NE_g: energia líquida necessária para crescimento, MJ dia⁻¹;

1000: conversão de g para kg de proteína;

6,25: fator de conversão de kg de proteína para kg de N na dieta, kg de proteína alimentar (kg N)⁻¹.

ANEXO E – Pegada de carbono dos alimentos.

Tabela 1 – Pegada de carbono dos alimentos (kg CO₂eq/kg produto), conforme base de dados Ecoinvent 3.8.

Alimentos	GWP100 Fossil	GWP100 Biogênico	GWP100 Mudança de uso da terra	Total
Milho e sorgo (grão)	0,326261	0,000080	1,060978	1,387319
Soja (grão)	0,430790	0,000206	1,095192	1,526188
Farelo de soja	0,388701	0,001569	0,892397	1,282667
Casca de soja	0,596000	0,002990	0,810000	1,400899
Caroço e briquete de algodão	0,396976	0,000255	0,025039	0,422270
Milho grão seco de destilaria (DDG)	0,028996	0,000022	0,000840	0,029858
Milho grão úmido de destilaria (WDG)	0,028996	0,000022	0,000840	0,029858
Polpa cítrica (peletizada)	0,634698	0,004232	0,002650	0,641580
Resíduos de grãos de cevada de cervejaria	0,459306	0,000136	0,000346	0,459788
<i>Panicum spp.; Brachiaria spp.; Cynodon spp.; Opuntia cochenillifera</i>	-	-	-	0,147000
Feno <i>Cynodon</i> cv. Tifton	0,102468	0,000027	0,000014	0,102508
Silagem de milho e sorgo	0,053553	0,000012	0,000041	0,053606
Ureia	1,568849	0,000475	0,000454	1,569778

*GWP: *global warming potential* (potencial de aquecimento global).

Fonte: Ecoinvent 3.8

ANEXO F – Valores padrão de acordo com a matriz de transição do uso do solo.

Destino (sistema atual ou planejado)	Vegetação Natural	Pastagem Degradada	Pastagem de média produtividade	Pastagem de alta produtividade	Milho para Silagem (1 safra e pousio) - Plantio Convencional	Milho para Silagem (1 safra e pousio) - Plantio Direto	Milho para Silagem (2 safras) – Convencional	Milho para Silagem (2 safras) - Direto	Integração Lavoura-Pecuária (Sistema Santa-Fé)
Origem (sistema histórico)									
Vegetação Natural	1,00	0,90	0,98	1,03	0,85	0,95	0,95	0,98	1,02
Pastagem Degradada		1,00	1,09	1,14	0,94	1,06	1,06	1,09	1,13
Pastagem de média produtividade			1,00	1,05	0,87	0,97	0,97	1,00	1,04
Pastagem de alta produtividade				1,00	0,83	0,92	0,92	0,95	0,99
Milho para Silagem (1 safra e pousio) - Plantio Convencional					1,00	1,12	1,12	1,15	1,20
Milho para Silagem (1 safra e pousio) - Plantio Direto						1,00	1,00	1,03	1,07
Milho para Silagem (2 safras) – Convencional							1,00	1,09	1,13
Milho para Silagem (2 safras) – Direto								1,00	1,04
Integração Lavoura-Pecuária (Sistema Santa-Fé)									1,00

Fonte: Adaptado de Kramer *et al.* (2009) e Koglo *et al.* (2022).