



AMANDA STEFANY FERREIRA MARINS

**SUPLEMENTAÇÃO COM N-CARBAMILGLUTAMATO EM
RUMINANTES: REVISÃO SOBRE SEU POTENCIAL NA
REDUÇÃO DO ESTRESSE TÉRMICO E EMISSÕES DE GASES
DE EFEITO ESTUFA**

**LAVRAS – MG
2025**

AMANDA STEFANY FERREIRA MARINS

**SUPLEMENTAÇÃO COM N-CARBAMILGLUTAMATO EM RUMINANTES:
REVISÃO SOBRE SEU POTENCIAL NA REDUÇÃO DO ESTRESSE TÉRMICO E
EMISSIONES DE GASES DE EFEITO ESTUFA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação do Mestrado Profissional em Ciência e Tecnologia da Produção Animal – Convênio UFLA/IABS, área de concentração em Ciência e Tecnologia da Produção Animal, para a obtenção do título de Mestre.

Orientador
Prof. Dr. Erick Darlisson Batista

**LAVRAS – MG
2025**

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

Marins, Amanda Stefany Ferreira.

Suplementação com n-carbamilglutamato em ruminantes: revisão sobre seu potencial na redução do estresse térmico e emissões de gases de efeito estufa / Amanda Stefany Ferreira Marins. – 2025.

60 p. : il.

Orientador: Erick Darlisson Batista.

Dissertação (Mestrado profissional) - Universidade Federal de Lavras, 2025.
Bibliografia.

1. Arginina. 2. Utilização de nitrogênio. 3. Nutrição. I. Batista, Erick Darlisson.
II. Universidade Federal de Lavras. III. Título.

AMANDA STEFANY FERREIRA MARINS

**SUPLEMENTAÇÃO COM N-CARBAMILGLUTAMATO EM RUMINANTES:
REVISÃO SOBRE SEU POTENCIAL NA REDUÇÃO DO ESTRESSE TÉRMICO E
EMISSIONES DE GASES DE EFEITO ESTUFA**

**N-CARBAMYLGLUTAMATE SUPPLEMENTATION IN RUMINANTS: REVIEW OF
ITS POTENTIAL FOR REDUCING HEAT STRESS AND GREENHOUSE GASES
EMISSIONS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação do Mestrado Profissional em Ciência e Tecnologia da Produção Animal – Convênio UFLA/IABS, área de concentração em Ciência e Tecnologia da Produção Animal, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 30 de junho de 2025.

Profa. Dra. Marina Arruda Camargos Danés
Prof. Dr. Bruno Grossi Costa Homem

UFLA
UFV

Orientador
Prof. Dr. Erick Darlisson Batista

**LAVRAS – MG
2025**

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida e por me dar forças sempre para poder continuar a jornada.

Aos meus pais e ao meu filho José, pelo apoio de sempre e compreensão nos momentos difíceis, distância e ausência para a conclusão dessa etapa, minhas avós pelo amor e fé.

Ao meu companheiro Luiz pelo incentivo, apoio e compreensão.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA) e Instituto Brasileiro de Sustentabilidade, pela oportunidade concedida.

Ao meu orientador Erick, pelo companheirismo, flexibilidade e por acreditar no meu trabalho.

Aos professores e amigos do PPGCTPA, pelas contribuições intelectuais e momentos memoráveis vividos.

Aos amigos, em especial, ao Filipe, pela indicação, desde o início, apoio e compreensão; no ambiente profissional, Gislaine, Paulo e Robson, por ser apoio e trazer leveza nas horas mais difíceis; Karoline, pelo comprometimento e apoio sempre que necessário.

Agradeço à banca, pela presença, atenção e valiosas contribuições para este trabalho.

À todos que contribuíram para a realização deste trabalho, meu muito obrigada!

RESUMO

Esta dissertação revisa os efeitos da suplementação com N-carbamilglutamato (NCG) em vacas leiteiras submetidas ao estresse térmico por calor, com foco na redução desse estresse, efeitos metabólicos e produção de metano. A pesquisa destaca a crescente preocupação com as mudanças climáticas e as emissões de gases de efeito estufa, especialmente o metano, cuja origem, na atividade pecuária, é significativa no cenário brasileiro. O estudo evidencia que o estresse térmico, agravado pelo aquecimento global, compromete o desempenho produtivo, fisiológico e o bem-estar animal, além de influenciar a fermentação ruminal e a emissão de metano. A suplementação com NCG mostrou potencial para melhorar a eficiência metabólica, aumentar a produção de proteína do leite em 11,6% e teor de gordura do leite em 8,3%, reduzir hormônios do estresse e melhorar a imunidade, além de alterar positivamente a microbiota ruminal e a utilização de nutrientes. Apesar de evidências promissoras, ainda são necessários estudos adicionais para quantificar o impacto do NCG na redução da emissão de metano, durante a fermentação ruminal, contribuindo, assim, para estratégias mais sustentáveis na produção de leite em regiões de clima quente.

Palavras-chave: arginina; utilização de nitrogênio; nutrição; leite; metabolismo.

ABSTRACT

This thesis reviews the effects of N-carbamylglutamate (NCG) supplementation in dairy cows subjected to heat stress, focusing on reducing heat stress, metabolic effects, and methane production. The research highlights the growing concern regarding climate change and greenhouse gas emissions, especially methane, whose origin in livestock activity is significant in Brazil. The study shows that heat stress, aggravated by global warming, compromises productive and physiological performance and animal welfare, influencing ruminal fermentation and methane emissions. NCG supplementation has demonstrated potential to improve metabolic efficiency, increase milk protein and fat production, reduce stress hormones, improve immunity, and positively alter ruminal microbiota and nutrient utilization. Despite promising evidence, further studies are still necessary to quantify the impact of NCG on reducing methane emissions during ruminal fermentation, thus contributing to more sustainable strategies in milk production in hot climate regions.

Keywords: arginine; nitrogen utilization; nutrition; milk; metabolismo.

INDICADORES DE IMPACTO

Neste estudo, apresentam-se impactos potenciais e concretos nas áreas social, tecnológica, econômica e ambiental, relacionados à produção de leite sustentável com enfoque em regiões de clima quente. Ao evidenciar que a suplementação com N-carbamilglutamato (NCG) pode melhorar a eficiência metabólica, produtividade e qualidade do leite, reduzir o estresse térmico e indicar a possível redução na emissão de metano, o trabalho contribui para a inovação tecnológica na pecuária, promovendo práticas mais sustentáveis e eficientes.

Do ponto de vista social, os resultados potencializam o bem-estar animal e a saúde dos animais, especialmente em regiões de clima quente, impactando, positivamente, produtores de leite, representativos no território brasileiro.

O público-alvo inclui produtores de leite, técnicos e pesquisadores, contribuindo para a formação de uma rede de atores comprometidos com a sustentabilidade na agropecuária, promovendo a adoção de estratégias sustentáveis e a disseminação de conhecimentos científicos, com impacto direto na melhoria da produtividade e na redução de gases de efeito estufa. Considerando as características de um país de clima predominantemente tropical e expressiva produção leiteira, estima-se que o uso do NCG possa beneficiar inúmeros produtores e técnicos, enquanto a participação de docentes e estudantes, na pesquisa e ações extensionistas, reforça o impacto acadêmico e social.

Os impactos se enquadram nas áreas temáticas de Meio Ambiente (redução de emissão de metano e impacto na sustentabilidade ambiental), Tecnologia e Produção (melhoria na eficiência produtiva e na microbiota ruminal), e Saúde (bem-estar animal e saúde do produtor). Além disso, alinham-se aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU, especialmente à ODS 13 (Ação contra a mudança global do clima), ODS 2 (Fome zero e agricultura sustentável), e ODS 15 (Vida terrestre), contribuindo para estratégias globais de mitigação das mudanças climáticas e promoção de práticas agrícolas sustentáveis.

IMPACT INDICATORS

This study presents potential and concrete impacts in the social, technological, economic, and environmental areas related to sustainable milk production with a focus on hot climate regions. By demonstrating that supplementation with N-carbamylglutamate (NCG) can improve metabolic efficiency, productivity, and milk quality, reduce heat stress, and indicate a possible reduction in methane emissions, the work contributes to technological innovation in livestock farming, promoting more sustainable and efficient practices.

From a social perspective, the results enhance animal welfare and health, especially in hot climate regions, positively impacting milk producers who are significant within the Brazilian territory. The target audience includes milk producers, technicians, and researchers, contributing to the formation of a network of actors committed to sustainability in agriculture, promoting the adoption of sustainable strategies and the dissemination of scientific knowledge, with a direct impact on improving productivity and reducing greenhouse gases. Considering the characteristics of a predominantly tropical country with substantial milk production, it is estimated that the use of NCG can benefit numerous producers and technicians, while the participation of faculty and students in research and extension activities reinforces the academic and social impact.

The impacts fall within the thematic areas of Environment (reduction of methane emissions and impact on environmental sustainability), Technology and Production (improvement in productive efficiency and ruminal microbiota), and Health (animal welfare and producer health). Additionally, they align with the United Nations Sustainable Development Goals (SDGs), particularly SDG 13 (Climate Action), SDG 2 (Zero Hunger and Sustainable Agriculture), and SDG 15 (Life on Land), contributing to global strategies for mitigating climate change and promoting sustainable agricultural practices.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processo de emissão de metano por fermentação entérica.....	23
Figura 2 - Produção de leite conforme o nível de estresse térmico.....	32
Figura 3 - Limites de conforto térmico para diferentes composições raciais.....	32

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Rebanho mundial (milhões de cabeça).....	20
Tabela 2 - Tamanho dos maiores rebanhos por estado.....	20
Tabela 3 - Densidade nutricional em relação ao impacto climático.....	24
Tabela 4 - Coeficientes de correlação e Probabilidade (P) entre a emissão de metano e a temperatura do ar, da superfície da epiderme e do Pelame, retal, umidade relativa, radiação e temperatura radiante media.....	38
Tabela 5 - Resultados obtidos dos trabalhos descritos (compilados).....	42

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
2	OBJETIVOS.....	14
2.1	Objetivo Geral.....	14
2.2	Objetivos específicos.....	14
3	REFERENCIAL TEÓRICO.....	15
3.1.	Aquecimento global e mudanças climáticas.....	15
3.1.1	Pecuária brasileira e emissões de metano e óxido nitroso.....	18
3.1.2	Produção de metano entérico em ruminantes.....	21
3.2	Desafios climáticos no cerrado: impactos do estresse térmico na produção de leite.....	24
3.3	Respostas fisiológicas e metabólicas de animais de produção em função do estresse térmico.....	33
3.4	NCG como estratégia para reduzir os efeitos do estresse térmico.....	39
3.5	NCG como estratégia para reduzir a emissão de metano entérico.....	44
4	CONCLUSÃO.....	47
	REFERÊNCIAS.....	48

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a intensificação das mudanças climáticas e o consequente aquecimento global têm sido objeto de crescente preocupação científica e política, impulsionados pelo aumento contínuo na concentração atmosférica de Gases de Efeito Estufa (GEE). Dentre esses gases, o metano (CH₄) destaca-se por apresentar um *Global Warming Potential* (GWP₁₀₀) aproximadamente 27,2 vezes superior ao do dióxido de carbono (CO₂), com tempo de permanência na atmosfera estimado entre 12 anos (Environmental Protection Agency - EPA, 2025). No contexto das atividades antrópicas. Segundo dados do Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG), a produção agropecuária respondeu por cerca de 28% das emissões de gases de efeito estufa do Brasil, em 2019, ocupando a segunda posição nacional, nesse ranking, atrás apenas das mudanças de uso da terra, ou seja, 72% dessas emissões tiveram relação com as atividades rurais.

O Brasil, detentor de um dos maiores rebanhos bovinos do mundo — com mais de 200 milhões de cabeças (Associação Brasileira das Indústrias Exportadoras de Carnes - ABIEC, 2024), exerce papel expressivo nas emissões nacionais de GEE, não apenas pela fermentação entérica, mas também pelas mudanças no uso da terra e desmatamento associados à expansão da atividade pecuária. Nesse cenário, torna-se imperativo o desenvolvimento e a adoção de estratégias de mitigação que visem à redução da pegada de carbono, ou seja, as emissões da produção animal, alinhando-se às diretrizes internacionais de sustentabilidade ambiental.

Entretanto, além dos impactos ambientais diretamente relacionados às emissões, a produção animal, em regiões tropicais, enfrenta-se outro desafio de natureza igualmente crítica: o estresse térmico. Caracterizado por uma condição fisiológica em que a dissipação de calor torna-se ineficiente frente à elevada carga térmica ambiental, o estresse térmico compromete uma série de funções metabólicas, reduz o desempenho produtivo e reprodutivo dos animais e pode amplificar a intensidade de processos fermentativos menos eficientes no rúmen, contribuindo ainda mais para as emissões de metano entérico. Em virtude das mudanças climáticas e da intensificação das ondas de calor, espera-se que a frequência e severidade desses episódios aumentem, nos próximos anos, exigindo soluções inovadoras que considerem não apenas a produtividade e adaptação dos animais frente a tais adversidades.

Dessa forma, torna-se essencial o aprofundamento de abordagens nutricionais que, além de promoverem a mitigação das emissões de GEE, atuem também na modulação do metabolismo nitrogenado e na atenuação dos efeitos do estresse térmico. Dentre as

alternativas estudadas, a suplementação com aditivos alimentares, como o N-carbamilglutamato (NCG), tem se mostrado promissora. O NCG, por atuar na regulação do ciclo da ureia e na síntese endógena de arginina, no qual pode melhorar a eficiência metabólica dos animais, reduzir o estresse térmico e, potencialmente, influenciar na produção de metano, durante a fermentação ruminal a partir da redução da relação acetato/propionato (Li *et al.*, 2022). Assim, compreender os efeitos do NCG na microbiota ruminal, na produção de gases e no bem-estar dos animais é essencial para desenvolver práticas que conciliem produtividade, bem-estar animal e sustentabilidade ambiental.

Portanto, este trabalho tem como objetivo investigar, por meio de revisão de literatura os efeitos da suplementação com NCG em vacas leiteiras sob estresse térmico, na melhora da saúde metabólica, imunológica e produtiva dos animais; possuir potencial para reduzir a produção de metano entérico e óxido nitroso na atividade agropecuária, contribuindo para o avanço de estratégias que promovam uma pecuária mais sustentável e responsável frente às mudanças climáticas globais.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste estudo é revisar, com base nas evidências científicas, os efeitos da inclusão de N-carbamilglutamato na dieta sobre o estresse térmico e o potencial de mitigação das emissões entéricas de metano em vacas leiteiras. Objetiva-se, com essa abordagem, oferecer contribuições relevantes para sistemas produtivos localizados em ambientes tropicais, como o Cerrado mineiro (importante bacia leiteira nacional), onde os desafios impostos pelas altas temperaturas e pela demanda por maior eficiência ambiental tornam urgente a adoção de estratégias nutricionais inovadoras e sustentáveis.

2.2 Objetivos específicos

- a) Revisar criticamente a literatura científica sobre os impactos do estresse térmico no desempenho produtivo e fisiológico de bovinos leiteiros;
- b) Explorar as evidências disponíveis acerca do uso do NCG como estratégia nutricional voltada à adaptação de ruminantes ao estresse térmico;
- c) Analisar os efeitos do NCG como aditivo nutricional na mitigação dos impactos da produção de metano entérico, a partir de alterações durante o processo de fermentação ruminal e redução de óxido nitroso formado a partir do nitrogênio das fezes e urina;

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. Aquecimento global e mudanças climáticas

O aquecimento global é resultante do fenômeno do efeito estufa que resulta no aumento da temperatura da Terra, ocasionado pelo aumento da emissão dos gases de efeito estufa, resultantes de processos biológicos e atividades antrópicas. Dentre os principais gases de efeito estufa estão dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), hidrofluorcarbonos (HFCs), e perfluorcarbonos (PFCs). Cada um desses gases tem influência de forma diferente sobre o efeito estufa, pelo fato de que cada um possui um potencial de aquecimento global e tempo de permanência na atmosfera, diferentes. Ainda assim, o efeito estufa é importante para a manutenção da vida no planeta, por regular a temperatura, retendo o calor da atmosfera, o que ocasiona a manutenção da temperatura. O fator cada vez mais alarmante, nesse contexto, é o aumento da concentração desses gases, conforme apontado pelo Sexto Relatório de Avaliação do Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2021). Em relação às atividades antrópicas que resultam no aumento da emissão dos gases de efeito estufa, o setor agropecuário contribui para as emissões de metano (CH_4), principalmente, por meio da fermentação entérica de ruminantes e o manejo de dejetos, dióxido de carbono (CO_2), proveniente do uso de combustíveis fósseis, desmatamento e queimadas e também o óxido nitroso (N_2O), por meio das excreções de nitrogênio pelas fezes e urina, além do uso de fertilizantes nitrogenados (Primavesi *et al.*, 2004).

As altas concentrações de metano, dióxido de carbono e óxido nitroso evidenciam que o aquecimento global, induzido pelo ser humano, já aumentou em $1,1^\circ\text{C}$ a temperatura média global (IPCC, 2021). Como resultado do aumento da temperatura tem sido registrado de forma cada vez mais frequente, ocorrências como derretimento de geleiras, o aumento do nível do mar, a acidificação dos oceanos, a maior ocorrência de eventos extremos como ondas de calor, as secas e inundações (Moreira *et al.*, 2022). O desenfreado aumento da temperatura pode desencadear eventos irreversíveis no sistema climático, como o derretimento das camadas de gelo da Antártida Ocidental e Groenlândia, resultando em um aumento significativo do nível do mar (IPCC, 2021). Ainda, segundo o IPCC, caso os países não implementem ações para reduzir as emissões dos gases de efeito estufa, é provável que a temperatura média do planeta aumente em $4,1^\circ\text{C}$ até 2100. Em contrapartida, esse valor ainda pode ser reduzido o que evidencia a importância das ações globais para atenuar o aquecimento global.

À medida que esses eventos climáticos ocorrem, indicando o aumento significativo da temperatura média do planeta e seus impactos, debates sobre as mudanças climáticas, suas causas e efeitos têm ganhado, cada vez mais, espaço em âmbito mundial. Há destaque para as atividades antropogênicas que têm contribuído para esse fato, visto que o homem aumenta a emissão de gases de efeito estufa para a atmosfera, por meio de atividades como o uso de combustíveis fósseis, queimadas, desmatamentos e a atividade pecuária. Segundo Marcovitch (2006), desde a revolução industrial, à base do uso de combustíveis fósseis não renováveis tornou-se evidente a participação do ser humano nas emissões dos gases de efeito estufa.

A preocupação científica com as alterações climáticas intensificou-se, a partir da segunda metade do século XX, impulsionada pelo avanço da tecnologia atmosférica, principalmente nos Estados Unidos e na antiga União Soviética, em um contexto de Guerra Fria e crescente interesse sobre os impactos ambientais de grandes eventos, como explosões nucleares. No entanto, foi apenas na década de 1970, com a realização da Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente Humano, em Estocolmo (1972), que as questões ambientais ganharam dimensão internacional. Em 1988, foi criado o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), uma iniciativa conjunta da Organização Meteorológica Mundial (WMO) e do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (UNEP), com o objetivo de reunir e sintetizar evidências científicas sobre o aquecimento global e suas causas, impactos e possíveis estratégias de mitigação.

Desde o seu primeiro relatório, em 1990, o IPCC já apontava para um aquecimento significativo da atmosfera terrestre e, nos relatórios seguintes, consolidou-se a atribuição do fenômeno à ação humana, principalmente pela queima de combustíveis fósseis e mudanças no uso da terra. Em 1992, a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC) foi firmada na ECO-92, no Rio de Janeiro, estabelecendo as bases para negociações climáticas globais. As Conferências das Partes (COPs) tiveram início em 1995 e, em 1997, resultaram no Protocolo de Kyoto, primeiro acordo internacional vinculante que estabeleceu metas obrigatórias de redução das emissões de gases de efeito estufa para países desenvolvidos. Desde então, os relatórios do IPCC vêm alertando para os riscos crescentes das mudanças climáticas, ressaltando que as emissões precisam ser drasticamente reduzidas, até 2030, para evitar cenários irreversíveis de colapso climático. Essas conclusões culminaram no Acordo de Paris, firmado em 2015, que estabelece metas globais para a contenção do aquecimento a níveis abaixo de 2 °C, preferencialmente 1,5 °C acima dos níveis pré-industriais.

Dentro desse aspecto de mudanças climáticas oriundas de atividades antropogênicas e a preocupação com o clima, no cenário brasileiro, muito se tem apontado sobre a contribuição da atividade agropecuária na emissão de metano, frente às emissões do país, por ser registrada como o principal fator contribuinte com, aproximadamente, 75,3% das emissões de CH₄ do país, em 2022 segundo dados do Observatório do Clima (Ângelo; Marengo, 2022). O Brasil já evidencia impactos decorrentes do aquecimento global, observados em distintas regiões do território nacional. No Sudeste e em partes do Nordeste, têm-se registrado eventos extremos de precipitação, com chuvas intensas e fora do padrão histórico (Fernandes *et al.*, 2021). Em contrapartida, a região Sul tem enfrentado períodos de estiagem severa e prolongada, configurando secas históricas com efeitos adversos sobre a produção agrícola e o fornecimento de energia elétrica (Oliveira, 2024). Na região Norte, especificamente na Bacia Amazônica, os registros apontam para a ocorrência de inundações em níveis recordes, denotando alterações no regime hidrológico da floresta tropical (Scholz, 2020). Os padrões de chuva também têm sofrido alterações, fruto do aquecimento global, havendo uma concentração em menor número de dias e com maior intensidade, como as chuvas extremas ocorridas em 2020, na serra de Petrópolis, e as cheias ocorridas no Rio Grande do Sul em 2024. O Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden) relatou, em 2021, o registro da maior estiagem em termos de duração, desde 1910, o que evidencia a crescente irregularidade na distribuição de chuvas e a intensificação de extremos climáticos.

Diante disso, o Brasil, assim como outros países, vem assumindo uma série de compromissos dentro de uma agenda climática fomentada, principalmente, por conferências, como a Conferência das Partes (COPs), para reduzir as emissões de gases de efeito estufa, combater o desmatamento e se adaptar às mudanças climáticas. Na última COP, ocorrida em 2024, o país firmou compromissos e estabeleceu prazos para cumpri-los, visando a reduzir a sua contribuição efetiva, perante o cenário do aquecimento global. Dentre as metas estipuladas, pode-se citar a redução das emissões de gases do efeito estufa em até 67% até 2035, zerar as emissões líquidas de gases do efeito estufa até 2050 e acabar com o desmatamento ilegal até 2030.

De acordo com o Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG, 2023), as emissões brasileiras são majoritariamente provenientes das mudanças no uso da terra, seguidas pelas atividades agropecuárias. Dentro desse setor, a pecuária é responsável por cerca de 80% das emissões, totalizando 496 MtCO₂eq em 2022 — um aumento de 4% em relação ao ano anterior; já a agricultura contribuiu com 20% (121,2

MtCO_{2e}). O metano oriundo da fermentação entérica de ruminantes é um dos principais responsáveis por esse cenário, sendo, particularmente, relevante, em países de base agropecuária tropical como o Brasil, que, além de possuir um dos maiores rebanhos bovinos do mundo tornando o país naturalmente mais exposto às emissões entéricas, onde há a predominância de sistemas extensivos e baixa eficiência produtiva.

No âmbito da produção animal, os impactos das mudanças climáticas podem ser observados no estresse térmico animal, redução do consumo de alimentos e consequente queda da produtividade desses animais, alterações metabólicas e a consequente queda da imunidade, entre outros. A associação de fatores decorrentes das mudanças climáticas como a queda da produção animal e das lavouras, maior frequência de extremos climáticos, aumento na incidência de pragas e doenças nos cultivos resultam na escassez de alimentos e consequente aumento dos preços, dificultando o acesso a alimentos, o que está diretamente ligado à segurança alimentar.

Portanto, compreender as mudanças climáticas, a partir de uma perspectiva integrada, que considere tanto os mecanismos naturais quanto os impactos socioeconômicos e ambientais é fundamental para o desenvolvimento de estratégias eficazes de mitigação e adaptação, especialmente em setores estratégicos como a agropecuária, cuja participação nas emissões de GEE é expressiva e crescente.

3.1.1 Pecuária brasileira e emissões de metano e óxido nitroso

Dentre os gases de efeito estufa, o metano assume importante papel, uma vez que possui um potencial de aquecimento global de 27,2 vezes maior que o CO₂ e permanece na atmosfera por 12 anos, com uma taxa de crescimento anual de 7,0% (Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC, 2006), ganhando cada vez mais destaque nas discussões sobre aquecimento global e sustentabilidade (Oliveira *et al.*, 2017), principalmente, em razão do seu elevado impacto climático, curto tempo de ação e origem majoritária nas atividades agropecuárias, sobretudo em países tropicais como o Brasil. Esse gás é um hidrocarboneto de concentração média de 1,72 partes por milhão por volume (ppmv) e 27,2 vezes mais potente em reter calor que o gás carbônico (Alvalá; Kirchoff; Pavão, 1998). O metano é oriundo de diversas atividades, sejam elas naturais (processos biológicos importantes para a manutenção do ecossistema como a decomposição da matéria orgânica, atividades de microrganismos marinhos, fermentação entérica em ruminantes) ou atividades antrópicas (exploração de combustíveis fósseis, aterros sanitários e queimadas). Cada vez mais questionados pelos

cientistas, a emissão desse gás resulta em impactos ambientais de sérias proporções, como o derretimento de geleiras, alterações em regimes pluviais e maior ocorrência de eventos extremos com a seca.

Nesse cenário, a participação do Brasil na emissão de metano está relacionada, principalmente, à atividade pecuária. Estima-se que 15% do território nacional seja ocupado por rebanhos bovinos (MapBiomas, 2024), refletindo sua relevância econômica e social. O país apresenta um dos maiores rebanhos de ruminantes do mundo, com cerca de 234 milhões de bovinos, 21 milhões de ovinos, 12 milhões de caprinos e 1,6 milhão de bubalinos (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, 2022a), destacando-se como importante fornecedor de carne e leite em escala global. Nas Tabelas 1 e 2, apresentam-se os países com os maiores efetivos globais entre os anos de 2018 e 2022 e a distribuição do rebanho bovino entre os principais estados brasileiros.

Já o óxido nitroso (N_2O) é um gás de efeito estufa de grande relevância, pois apresenta um potencial de aquecimento global cerca de 300 vezes superior ao do dióxido de carbono (CO_2) e uma longa permanência na atmosfera., cerca de 120 anos. Sua produção e emissão para o ambiente estão relacionadas, principalmente, a processos microbiológicos do solo, como a nitrificação e a desnitrificação, dois processos biológicos centrais do ciclo do nitrogênio e estão diretamente ligados à emissão de óxido nitroso (N_2O) para a atmosfera, intensificados, pelo uso de fertilizantes nitrogenados, na agricultura, pela excreção animal (urina e fezes) e pela decomposição da matéria orgânica. Além de contribuir para o aquecimento global, o N_2O também está associado à degradação da camada de ozônio, ampliando seus impactos ambientais. Assim, o manejo inadequado do nitrogênio no solo e na pecuária é uma das principais fontes antrópicas desse gás, reforçando a necessidade de estratégias de mitigação. Diante dessas características e de seus significativos aumentos em concentrações atmosféricas, as emissões de metano e óxido nitroso têm se tornado uma preocupação cada vez maior no que diz respeito à saúde e à manutenção da vida no planeta. Dessa forma, reduzir as emissões de metano e óxido nitroso pode contribuir para uma eficaz atenuação da temperatura global, ajudando a desacelerar o aquecimento global e a mitigar os efeitos das mudanças climáticas, e conseqüentemente, melhorando a qualidade do ar, trazendo benefícios para a saúde e o meio ambiente. Portanto, ações para reduzir as emissões de metano se tornam essenciais para enfrentar os desafios das mudanças climáticas.

Tabela 1 - Rebanho mundial (milhões de cabeça).

Rebanho Mundial						
País	2018	2019	2020	2021	2022	Var 2022/21
Índia	301,9	302,7	3032	305,5	306,70	0,4%
Brasil	232,35	238,15	252,70	252,70	264,10	4,5%
EUA	94,29	94,80	93,79	93,59	91,80	-1,9%
China	90,38	89,15	91,38	95,62	99,50	4,1%
EU	79,01	77,84	77,16	76,46	75,72	-1,0%
Argentina	54,79	55,0	54,46	53,54	53,74	0,4%
Australia	26,17	25,69	23,65	23,02	23,97	4,1%
Outros	96,16	95,70	95,64	96,06	96,17	0,1%
Total	945,05	979,03	983,42	996,49	1011,7	1,5%

Fonte: United States Department of Agriculture (USDA, 2020).

No cenário nacional, observa-se que o estado de Mato Grosso se mantém como líder na produção bovina, com um efetivo superior a 32,4 milhões de cabeças (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, 2023), seguido por Goiás (24,3 milhões), Pará (23,9 milhões), Minas Gerais (22,8 milhões) e Mato Grosso do Sul (18,6 milhões).

Tabela 2 - Tamanho dos maiores rebanhos por estado.

Rebanhos por estado	
Localidade	Quantidade (cabeças)
Mato Grosso	32.424.958
Goiás	24.293.954
Pará	23.921.005
Minas Gerais	22.856.143
Mato Grosso do Sul	18.608.503

Fonte: IBGE (2023).

Segundo dados do SEEG (2023), o setor agropecuário brasileiro é o principal emissor de metano, respondendo por 71,8% das emissões nacionais desse gás (14,54 milhões de toneladas), sendo que 91,6% dessas emissões têm origem pela fermentação entérica, seguida pelo manejo de dejetos animais (5,8%) e atividades agrícolas (2,6%), como a produção de arroz irrigado e cana-de-açúcar. Os ruminantes produzem entre 150 e 420 litros de CH₄ por dia, resultando em emissões anuais de 39,1 a 109,5 kg para bovinos e de 6,5 a 14,4 kg para ovinos. O Brasil e a Índia lideram as emissões mundiais de metano entérico, com 14,5 e 10,3 T de CH₄/ano, respectivamente. Quando se considera apenas a emissão de bovinos, o Brasil é o maior emissor, seguido pela Índia e pelos Estados Unidos (Thorpe, 2009), visto que boa parte do rebanho da Índia é composta por vacas sagradas ou de dupla aptidão, com restrição ao abate, o que reduz sua produtividade e emissão por animal.

Diferentemente de outras nações industrializadas, no Brasil a maior parte das emissões de GEE está associada à mudança no uso da terra, com destaque para o desmatamento e a expansão da pecuária, que representam, aproximadamente, 74% das emissões totais do país. Segundo a Climate Watch (2022b), o Brasil é responsável por cerca de 3,1% da emissão de metano em âmbito mundial, sendo, 71,8% desse total, oriundo da atividade pecuária, ou seja, 14,54 milhões de toneladas em 2020. Desse montante, 91,6%, 13,3 milhões de toneladas, resultam da fermentação entérica do rebanho bovino (Alencar *et al.*, 2022).

Dessa forma, no contexto das mudanças climáticas, a pecuária brasileira tem sido frequentemente apontada como uma das principais fontes de emissões de GEE, sobretudo, em decorrência da baixa eficiência produtiva observada em grande parte dos sistemas de criação baseados em pastagens degradadas ou subutilizadas. A limitação no desempenho zootécnico desses sistemas acarreta maior emissão de GEE por unidade de produto (carne ou leite), comprometendo a sustentabilidade ambiental da atividade (Silva, 2023b). Assim, torna-se evidente a necessidade de adoção de estratégias de intensificação sustentável e de práticas de manejo que promovam maior eficiência no uso dos recursos naturais, com vistas à redução das emissões relativas de GEE e à mitigação dos impactos ambientais da pecuária nacional.

Nesse contexto, é provável que a agropecuária seja, cada vez mais, afetada por restrições nas emissões de GEE e por regulamentações ambientais. A tendência ou a obrigação legal de mitigar as emissões de GEE influenciará diretamente a necessidade de aumentar a eficiência zootécnica nos sistemas pecuários, juntamente com o manejo nutricional dos animais. A melhoria das práticas alimentares pode reduzir a emissão de metano por quilograma de alimento consumido ou por quilograma de produto. Agentes específicos e aditivos dietéticos têm sido sugeridos como alternativas para reduzir as emissões de metano. O desenvolvimento de estratégias de mitigação e a viabilidade de sua aplicação prática são áreas de pesquisa em todo o mundo (Thornton, 2010).

A redução da emissão dos GEE vai além dos compromissos internacionais assumidos pelo Brasil, visto que os impactos das mudanças climáticas já podem ser notados em todo o globo (Ângelo; Marengo, 2022), o que torna essencial adotar ações que visem à redução da emissão desses gases e estratégias de mitigação.

3.1.2 Produção de metano entérico em ruminantes

Além de ser um importante GEE, parte responsável pelo aquecimento global, o metano de origem entérica afeta diretamente a eficiência da fermentação ruminal, em razão da

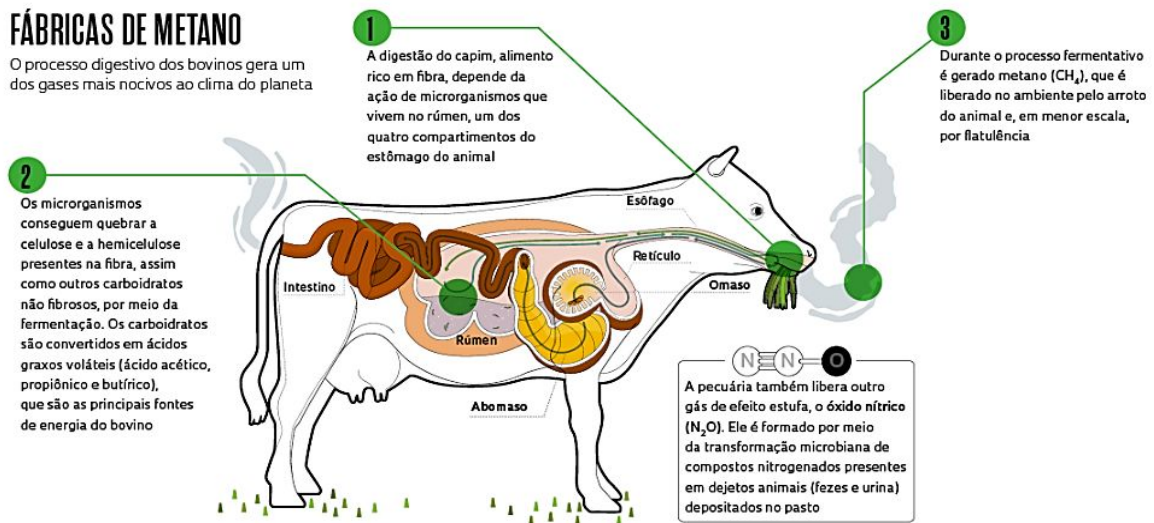
perda de carbono e, conseqüentemente, de energia, o que influencia o desempenho dos animais (Benetel, 2018). Portanto, entender os mecanismos de síntese de metano e os fatores que afetam sua produção, é crucial. O desafio na criação de ruminantes é desenvolver dietas e estratégias de manejo que minimizem a produção relativa de metano, por unidade de leite, carne ou lã produzida, promovendo maior eficiência produtiva e reduzindo a contribuição negativa da pecuária para o aquecimento global.

Aprimorar e validar metodologias precisas de medição da emissão de metano e criar bancos de dados específicos para os sistemas de produção de cada região (país ou bioma), é de fundamental importância para a sustentabilidade da atividade. As discussões sobre a redução das emissões de GEE têm se concentrado, tanto em mudanças na cadeia de produção e abastecimento de alimentos quanto na demanda, através de mudanças significativas nos padrões de consumo.

A maior parte do metano excretado pela fermentação entérica no rúmen é liberada por eructação, enquanto a porção produzida no trato digestivo posterior é principalmente excretada pela respiração (Benetel, 2018).

A digestão do bovino acontece no retículo-rúmen, um compartimentado do estômago onde ocorre a fermentação anaeróbica, no qual microrganismos convertem carboidratos celulósicos ingeridos na alimentação em ácidos graxos de cadeia curta, que se tornam fonte de energia para o animal. Nesse processo, é gerado o H_2 , fonte para que bactérias metanogênicas reduzam o CO_2 , resultando assim na formação do metano (CH_4) que é expelido para a atmosfera, por meio, principalmente da eructação (Cicerone; Oremland, 1988; Zotti; Paulino, 2009), conforme a Figura 1.

Figura 1 - Processo de emissão de metano por fermentação entérica.



Fonte: Vasconcelos e Zapparoli (2022).

O rúmen é uma câmara de fermentação que recebe o material digerido e realiza movimentos responsáveis pela mistura desse material (sólido e fluido), pela regurgitação para a ruminação e pela eructação dos gases oriundos da fermentação. O processo de regurgitação estimula a produção de saliva, que neutraliza os ácidos produzidos, durante a fermentação, sendo assim, um agente tamponante, protegendo o sistema digestivo e promovendo um ambiente ideal para o crescimento bacteriano, com pH entre 5,5 e 7,0. Além da produção de ácidos graxos voláteis como o acético, propiônico, butírico, a atuação do rúmen como câmara de fermentação na presença de bactérias resulta na produção de gases como o dióxido de carbono e o metano, encontrados na parede superior do rúmen (Magaço; Duarte, 2019).

Essa síntese de metano no rúmen ocorre, em decorrência da presença de microrganismos metanogênicos, as *Archae*, que possuem cofatores exclusivos como enzimas que as diferenciam evolutivamente das bactérias. A produção de CH_4 , a partir da matéria orgânica em condição anaeróbica no rúmen, envolve um conjunto de micro-organismos ruminais junto das metanogênicas. Microrganismos hidrolisam amido e polissacarídeos em açúcares, ácidos graxos voláteis, H_2 e CO_2 , que as *Archeas* utilizarão para a produção do CH_4 (Tapio *et al.*, 2017). A produção de metano tem papel importante na digestão, por manter baixas as concentrações de metano no rúmen, permitindo o crescimento de outras espécies de bactérias para uma fermentação mais eficiente, sendo assim o CH_4 um consumidor de hidrogênio no rúmen (Johnson; Johnson, 1995).

Medidas políticas que visam a uma redução radical no consumo de alimentos de origem animal têm sido propostas como forma de reduzir as emissões globais de GEE. No

entanto, a avaliação do impacto climático da produção de diferentes alimentos deve levar em consideração seu valor nutricional e importância econômica e social. Smedman *et al.* (2010) propuseram uma unidade funcional, denominada Índice de Densidade Nutricional/Impacto Climático (DNIC). Os autores compararam a emissão de GEE geradas para a produção de leite, refrigerantes, suco de laranja, cerveja, vinho, água mineral gasosa e bebidas de soja e aveia. Para a produção de leite foram gerados para cada 100 g do produto, 99 g de equivalente CO₂, um dos valores mais elevados quando comparado às demais bebidas (Entretanto, quando a comparação foi realizada levando-se em consideração o DNIC (densidade de nutrientes/emissão de GEE), o leite apresentou vantagem em relação aos demais alimentos, pelo seu alto valor nutricional (Tabela 3). Entretanto, quando a comparação foi realizada levando-se em consideração o DNIC (densidade de nutrientes/emissão de GEE), o leite apresentou vantagem em relação aos demais alimentos, pelo seu alto valor nutricional.

Tabela 3 – Densidade nutricional em relação ao impacto climático.

Alimento	Porcentagem de NNR em 100 g de produto	Número de nutrientes $\geq 5\%$ da NNR	Densidade nutricional	Emissão de GEE	Índice DNIC
Leite	126	9	53,8	99	0,54
Refrigerante	7	0	0	109	0
Suco de laranja	90	4	17,2	61	0,28
Cerveja	18	0	0	101	0
Vinho tinto	24	1	1,2	204	0,01
Água mineral	2	0	0	10	0
Bebida de soja	53	3	7,6	30	0,25
Bebida de aveia	32	1	1,5	21	0,07

NNR: Recomendações Nórdicas de Nutrição; Índice DNIC = Índice de Densidade nutricional/Impacto Climático (DNIC = Densidade nutricional/emissão de gases de efeito estufa – GEE); Emissão de GEE = emissão de GEE (g de equivalente CO₂ por 100 g de produto); Densidade nutricional = Porcentagem de NNR em 100 g de produto x número de nutrientes $\geq 5\%$ da NNR/21.

Fonte: Smedman *et al.* (2010).

3.2 Desafios climáticos no cerrado: impactos do estresse térmico na produção de leite

A pecuária leiteira está presente na maioria dos municípios brasileiros, sendo a atividade principal em muitos deles e uma importante atividade econômica no Brasil, gerando emprego e renda em quase todos os municípios, com mais de um milhão de produtores e empregos indiretos (Leite *et al.*, 2023). Com grande potencial de crescimento, o Brasil está entre os maiores exportadores de leite. Minas Gerais lidera como o estado de maior produção de leite, seguido por Paraná, Rio Grande do Sul, Goiás e Santa Catarina (IBGE, 2022a).

Rondônia destaca-se na Região Norte (Cicera, 2020). O Cerrado, o segundo maior bioma do Brasil, possui o maior efetivo bovino entre os biomas brasileiros (IBGE, 2022a), desempenhando papel importante na pecuária do país. O clima da região, com temperaturas variando cerca de 20,8 °C a 25,3 °C e o montante médio anual de precipitação concentra-se principalmente na estação chuvosa (setembro a março) que varia entre 650 mm e 2.550 mm, com distribuição desigual aumentando de leste a oeste da região da Caatinga até a Amazônia. (Sano et al., 2020). Influencia, diretamente, a produção e o bem-estar dos animais. A umidade relativa do ar também varia, conforme a estação, impactando o conforto térmico dos bovinos (Machado *et al.*, 2011).

As elevadas temperaturas ambientais características do cerrado, juntamente com as variações na umidade do ar e a exposição à radiação solar direta, são fatores climáticos que podem causar desconforto nos animais, levando-os a buscar maneiras de manter o equilíbrio corporal (Souza; Batista, 2012).

Considerando as condições climáticas do Cerrado, bioma de grande representatividade na produção leiteira, o tornam mais propenso ao estresse térmico causado por altas temperaturas em ruminantes. Se essas condições não forem adequadamente enfrentadas, é possível que ocorra uma queda significativa na produtividade dos rebanhos.

Para se adaptar a essas mudanças ambientais, os animais recorrem a comportamentos que afetam diretamente as trocas de calor sensível, como condução, convecção cutânea e radiação, além das perdas de calor latente (evaporação cutânea) para o ambiente, buscando restabelecer o equilíbrio térmico. Assim, é crucial considerar o conhecimento sobre as variáveis climáticas, sua interação com os animais e as respostas comportamentais e fisiológicas destes ao definir os objetivos da atividade pecuária (Slimen *et al.*, 2016).

O conforto térmico é influenciado por variáveis climáticas, como temperatura e umidade relativa do ar. Considerando as variações durante o ano, conforme as estações climáticas, a questão do conforto térmico e saúde do animal deve ser, constantemente, avaliada.

A faixa de temperatura de conforto térmico para bovinos varia de acordo com a idade, raça e estado fisiológico dos animais (Climate Watch, 2022a). De modo geral, as condições mais adequadas para os bovinos de origem europeia correspondem à temperatura média inferior a 20 °C e umidade relativa do ar variando entre 50 e 80%. A temperatura crítica sob a qual cai o consumo de alimentos e a produção de leite está entre 24 e 26 °C para a raça Holandesa, entre 27 e 29 °C para o rebanho Jersey e acima de 29,5 °C para a raça Parda-Suíça.

Já as raças zebuínas (*Bos taurus indicus*) foram selecionadas, naturalmente, para as condições de ambiente tropical da Índia - clima mais quente e até árido. A raça Gir é originária da região ao sul da península de Kathiawar, na costa ocidental da Índia, sob o Trópico de Câncer, em ambiente quente e seco. A raça Guzerá é originária da região norte de Gujarat, território vizinho ao do Gir. A região tem clima muito quente, quase inóspito (Carvalho *et al.*, 2003).

Um estudo sobre estresse térmico e sua relação com o desempenho animal conduzido por Vitor Neto (2017), mostrou que, no Bioma Cerrado, entre os meses de maio a setembro é possível obter melhores resultados na produção e qualidade do leite, desde que se invista em áreas sombreadas e com água de fácil acesso aos animais, tornando o ambiente mais confortável. Foi observado que, nessas condições, não ocorrem diferenças estatísticas na qualidade e quantidade da produção de leite nesse mesmo período.

Além das características climáticas específicas de cada região, surgem situações de extremos climáticos, principalmente as altas temperaturas registradas no cerrado. O estresse térmico provocado pelo calor compromete o bem-estar animal e altera seu comportamento fisiológico. Atualmente, em um cenário de altas temperaturas, um grande desafio para o rebanho leiteiro é alcançar a qualidade sem perder a produtividade. As condições climáticas que fogem do conforto térmico do rebanho resultam em perdas significativas, impactando no conforto, desempenho e saúde dos animais. Segundo a Embrapa Gado de Leite (2023), o aumento da temperatura interna dos animais pode resultar em perdas de até 30% na produtividade, com o limiar crítico iniciando, a partir de 31 °C. Além de reduzir a produção de leite, a qualidade do leite e seus derivados também é comprometida, pela redução dos teores de proteína e gordura, com impacto no teor de sólidos totais do leite, em função da diminuição na ingestão de matéria seca. durante a hipertermia, como forma de tentar diminuir a carga de calor interna (Cartwright *et al.*, 2023).

O trabalho apresentado por Neiva (2023a) teve o objetivo de mostrar que, mesmo em condições de altas temperaturas, é possível viabilizar a produção de leite minimizando os efeitos do estresse térmico, por meio do manejo e fornecimento de áreas com sombras e água de qualidade, em abundância e de fácil acesso para os animais.

As pesquisas no assunto têm identificado questões significativas relacionadas ao bem-estar animal, especialmente no que diz respeito ao conforto térmico. Um dos principais desafios na pecuária brasileira está ligado ao estresse térmico (Daltro *et al.*, 2020). O clima predominante no Cerrado, caracterizado por altas temperaturas, umidade relativa do ar, significativamente, variada e intensa radiação solar propicia o surgimento do estresse térmico.

Esse estresse afeta o metabolismo e a fisiologia dos animais, perturbando sua homeostase. Essa desregulação na tentativa de dissipar o calor resulta em prejuízos no desempenho e na produção, afetando aspectos como crescimento, produção de leite e reprodução (Baumgard; Rhoads Júnior, 2013).

Os animais consomem energia para suas funções biológicas normais. No entanto, quando essa energia é desviada para dissipar calor em vez de manter as funções vitais, pode levar à morte. Esses processos metabólicos e fisiológicos são desencadeados gradualmente, dependendo do nível de estresse térmico. Ou seja, o estresse térmico de curto prazo resulta em mudanças fisiológicas imediatas, enquanto o estresse crônico pode provocar alterações metabólicas (Slimen *et al.*, 2016).

Nesse contexto, um dos maiores desafios para a produção, enfrentado pelos produtores de leite no cerrado é o estresse por calor e as respostas fisiológicas que ele causa na vaca leiteira em lactação. A estação quente é relativamente longa, ocorrendo uma intensa energia radiante por um longo período de tempo. Vacas leiteiras em lactação criam uma grande quantidade de calor metabólico e acumulam calor adicional da energia radiante e tem seu resfriamento comprometido por trocas de calor com o ambiente, aumentando assim a carga de calor na vaca e, conseqüentemente, sua temperatura corporal aumenta, enquanto a ingestão diminui e, assim, a produtividade do animal. Dessa forma, a carga de calor acumulada pela vaca submetida ao estresse térmico é a soma do calor acumulado do ambiente e a falha em dissipar o calor associado ao metabolismo (West, 2003).

Lee (1965) define estresse como a magnitude de forças externas ao sistema corporal que tende a deslocar esse sistema do seu estado de repouso. Portanto, os fatores ambientais externos à vaca contribuem para o estresse (neste caso, estresse por calor), enquanto o deslocamento da vaca do estado de repouso seria a resposta do animal ao estresse externo, ou tensão por calor.

Os bovinos se caracterizam como endotérmicos, o que significa que têm a habilidade de manter constante sua temperatura corporal interna, mesmo diante de variações na temperatura ambiente (Silva *et al.*, 2012). Esse controle térmico é resultado do equilíbrio entre o calor gerado pelo metabolismo e a perda ou ganho de calor para o ambiente. Assim, os animais podem ajustar suas funções fisiológicas e metabólicas de acordo com o ambiente em que se encontram (Rodrigues, 2005).

Os animais endotérmicos possuem diversos mecanismos para regular sua temperatura corporal, incluindo adaptações metabólicas, fisiológicas e comportamentais. Por exemplo, eles podem ajustar sua ingestão de alimentos, promover a vasodilatação ou a vasoconstrição

de seus vasos sanguíneos e se aglomerar ou se dispersar para controlar a produção ou perda de calor para o meio (Benetel, 2008). Além disso, os animais possuem zonas de temperatura ótimas para produção, dentro das quais nenhuma energia adicional acima da manutenção é gasta para aquecer ou resfriar o corpo.

O centro termorregulador no hipotálamo é responsável por coordenar a resposta fisiológica dos animais endotérmicos ao frio ou calor. Ele recebe informações das células periféricas e desencadeia respostas, como produção de calor em resposta ao frio ou dissipação de calor em resposta ao calor (Marques, 2001).

Embora a temperatura corporal da maioria dos mamíferos seja em torno de 39 °C e das aves seja, cerca de 41 °C, essas temperaturas podem variar de acordo com diversos fatores, como raça, idade, dieta, nível produtivo, hora do dia, estação do ano, ciclo estral e atividade do animal (Rodrigues, 2005).

O ambiente em que o animal está inserido influencia, significativamente, em sua capacidade de manter a temperatura corporal constante. Fatores ambientais como temperatura, umidade relativa do ar, velocidade do vento e presença de abrigos afetam a produção ou perda de calor para o meio (Benetel, 2008).

Embora os animais endotérmicos sejam capazes de manter sua temperatura corporal constante, a facilidade desse controle depende de vários fatores ambientais. Existe uma faixa de temperatura confortável para esses animais, conhecida como zona de termoneutralidade, onde não há estresse térmico. Nessa zona, o gasto fisiológico é mínimo e o animal aproveita ao máximo os nutrientes da dieta para crescimento, manutenção e produção (Azevedo; Alves, 2009).

Numerosas mudanças fisiológicas ocorrem no sistema digestivo: química, ácido-base e hormônios do sangue, durante o tempo quente; algumas em resposta à ingestão reduzida de nutrientes, mas muitas mudanças ocorrem como resultado. Neurônios que são sensíveis à temperatura estão localizados por todo o corpo do animal e enviam informações ao hipotálamo, o que invoca inúmeras mudanças fisiológicas, anatômicas ou comportamentais na tentativa de manter o equilíbrio térmico (Curtis, 1983) como redução na ingestão de alimento, buscam sombra e vento, aumentam a taxa respiratória e aumentam , tanto o fluxo sanguíneo periférico quanto a transpiração, tendo efeito negativo na produção e saúde do animal. A respiração ofegante intensifica a perda de CO₂ via ventilação pulmonar, reduzindo a concentração sanguínea de ácido carbônico, alterando para bicarbonato, necessário para manter o pH sanguíneo, resultando em uma alcalose respiratória. A compensação para essa alcalose envolve aumento da excreção urinária de bicarbonato (Ernstmeyer; Christman,

2021), levando a um declínio na concentração sanguínea desse composto, comprometendo a capacidade de tamponamento associada ao sistema de bicarbonato, o que pode ser crítico durante o verão, quando são fornecidas rações ricas em grãos. Além disso, bovinos perdem quantidades significativas de potássio (K) pelo suor e as perdas aumentam com a taxa de suor (Jenkinson; Mabon, 1973).

Em estudo, McGuire *et al.* (1989) concluíram que uma parte dos efeitos negativos do estresse térmico na produção de leite poderia ser explicada pela diminuição da ingestão e absorção de nutrientes, resultando em um desvio do fluxo sanguíneo para fins de resfriamento, alterando o metabolismo de nutrientes e contribuindo para menor produção de leite durante o tempo quente.

O conhecimento acumulado, ao longo de gerações, sobre as interações entre variabilidade genética, produtividade e ambiente possibilitou o desenvolvimento de métodos para quantificar o impacto do clima no desempenho dos animais de produção. Isso é alcançado, por meio da utilização de índices bioclimáticos, os quais estabelecem relações entre estados fisiológicos e diferentes condições climáticas (Azevedo; Alves, 2009).

Em geral, os índices de conforto térmico têm como objetivo avaliar a adequação do ambiente de criação para a atividade desejada.

A temperatura ambiente e a umidade relativa do ar são fatores climáticos significativos que afetam as variáveis fisiológicas das vacas lactantes, influenciando o balanço energético e, conseqüentemente, a produtividade. Portanto, diversos índices foram desenvolvidos e são utilizados para estimar o desconforto causado por diferentes condições ambientais (Broom; Molento, 2004).

A zona de termoneutralidade é limitada por duas temperaturas críticas: a superior e a inferior. Quando a temperatura está acima da temperatura crítica superior, o animal está sujeito ao estresse térmico pelo calor; enquanto abaixo da temperatura crítica inferior, enfrenta estresse pelo frio. Nessas condições, ocorre uma série de respostas fisiológicas para manter a homeostase térmica do corpo (Azevedo; Alves, 2009).

Um dos métodos mais comuns para avaliar o estresse térmico é o Índice de Temperatura e Umidade (ITU), calculado com base na temperatura ambiente (em °C) e na umidade relativa do ar (UR), expressa em forma de fração decimal. O corpo dos animais utiliza a evaporação do suor para regular a temperatura. Para vacas leiteiras, o estresse térmico é identificado quando o ITU ultrapassa 72 (Dhiman; Zaman, 2001), enquanto valores acima de 83 indicam um estresse severo, conforme destacado por Amormino (2006).

Quadro 1 - Índice de temperatura e umidade

Temp. °C	Umidade Relativa																					
	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100	
23,89															72	72	73	73	74	74	75	75
26,67							72	72	73	73	74	74	75	76	76	77	78	78	79	79	80	80
29,44			72	72	73	74	75	75	76	77	78	78	79	80	81	81	82	83	84	84	85	85
32,22	72	73	74	75	76	77	78	79	79	80	81	82	83	84	85	86	86	87	88	89	90	90
35,00	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	95
37,78	77	78	79	80	82	83	84	85	86	87	88	90	91	92	93	94	95	97	98	99		
40,55	79	80	82	83	84	86	87	88	89	91	92	93	93	95	97							
43,33	81	83	84	86	87	89	90	91	93	94	96	97										Estresse moderado
46,11	84	85	87	88	90	91	93	93	96	97												Estresse medio
48,89	88	88	89	91	93	94	96	98														Estresse severo

Fonte: Johnson *et al.* (1962).

Índice de temperatura e umidade (ITGU) igual ou inferior a 74 para bovinos definem situação de conforto; de 75 a 78 significam situação de alerta; de 79 a 84, perigo; e acima de 84, emergência (Baeta; Souza, 2012).

Baeta *et al.* (1987) desenvolveram o Índice de Temperatura Equivalente (ETI), considerando os efeitos combinados da temperatura do ar (°C), umidade relativa do ar (%) e velocidade do vento (m/s). As escalas de risco foram estabelecidas com base em recomendações do Serviço Nacional de Meteorologia dos Estados Unidos da América (National Weather Service, 1984 apud Baêta; Souza, 2012). O vento desempenha um papel crucial ao promover a troca constante de ar aquecido junto ao corpo por ar frio do ambiente, aumentando, assim, a taxa de perda de calor sensível e a taxa de resfriamento por evaporação (Lopes *et al.*, 2016).

O ETI leva em conta o efeito de resfriamento do vento, que se intensifica com o aumento da sua velocidade e a diminuição da temperatura. As escalas estabelecidas são de extrema importância para avaliar o nível de estresse térmico de cada animal. Elas variam, desde a ausência de problemas (entre 18 e 27), passando pela cautela (entre 27 e 32), cautela extrema (entre 32 e 38), até o perigo (entre 38 e 44), e perigo extremo (acima de 44) (Lopes *et al.*, 2016).

Os animais ruminantes conseguem expressar melhor seu potencial produtivo quando estão dentro de uma faixa de temperatura conhecida como zona de conforto térmico. Essa

zona é alcançada quando os animais estão expostos a um ambiente que permite a manutenção de sua taxa metabólica basal sem a necessidade de utilizar suas reservas corporais. No entanto, essa faixa pode variar dependendo da umidade do ar, da raça do animal e de seu estado fisiológico (Silva, 2023a, 2023b). Essas variáveis podem ser influenciadas por fatores intrínsecos, como estado fisiológico, raça e idade, além de fatores extrínsecos, como a ingestão de alimentos e água, e as temperaturas extremas.

Em situações de estresse térmico severo, a glândula mamária ativa um mecanismo de regulação negativa para reduzir a produção de leite. Isso envolve processos físicos e bioquímicos para a dissipação de calor no ambiente e diminuição da produção de calor metabólico, como aumento da frequência respiratória e redução na ingestão de matéria seca (Pires *et al.*, 1998).

Vacas de alto rendimento são mais vulneráveis ao estresse térmico do que aquelas de baixo rendimento, maior produção de calor oriundo da maior ingestão de alimentos para atender à elevada demanda de produção. A redução na produção de leite, em decorrência de estresse térmico, pode chegar a 17% em vacas que produzem 15 kg de leite por dia e a 22% em vacas que produzem 40 kg de leite por dia (Pinarelli, 2003).

Na maioria das vezes, essas alterações ambientais levam a uma redução no desempenho dos animais (Souza *et al.*, 2010). Estudos realizados por Barbosa *et al.* (2004) confirmaram os efeitos adversos das temperaturas elevadas sobre a produção de leite, reprodução e resistência a doenças. Conforme explicado por Lopes (2009), em condições de desconforto térmico causado pelo calor, os animais tendem a reduzir o consumo de alimentos e a produção de leite, além de experimentarem outras alterações fisiológicas para regular a temperatura corporal, o que resulta em uma perda de produtividade. Dessa forma, um aspecto importante para a saúde e desempenho animal nos rebanhos é o bem-estar animal.

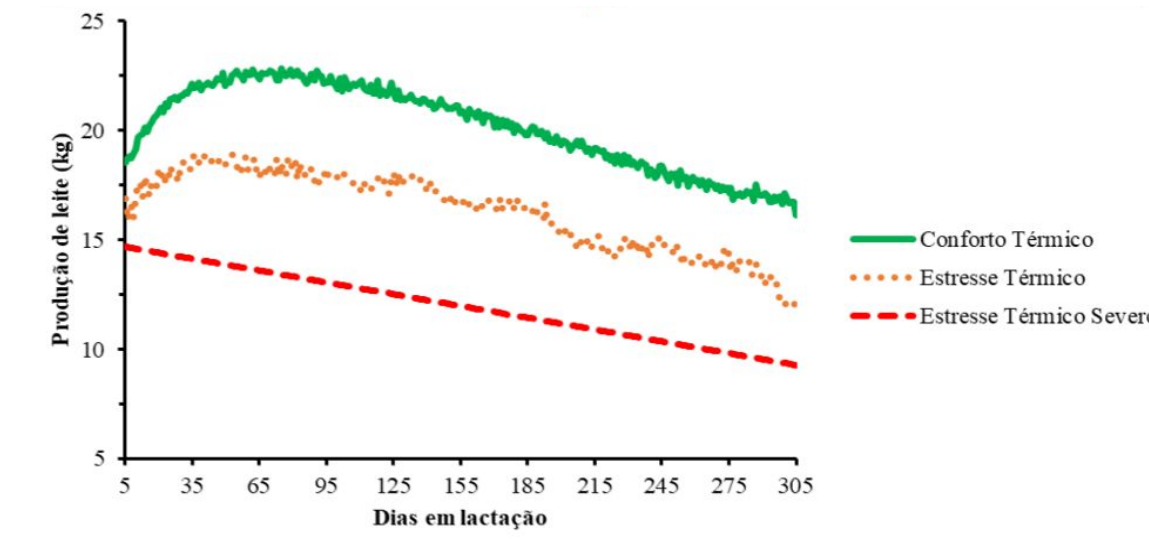
Em áreas de clima como o cerrado, as condições adversas, como altas temperaturas, significativa amplitude na umidade relativa do ar e radiação solar intensa, combinadas com a alta produção de calor metabólico, levam ao acúmulo de calor corporal excessivo nos animais. Se o animal não conseguir dissipar esse excesso de calor para o ambiente, ocorre o estresse térmico. Para aliviar esse estresse e melhorar a capacidade de produção, além de evitar síndromes metabólicas, é necessário que se façam intervenções nas condições de criação desses animais, inclusive em sua dieta com a adição de compostos específicos, como se verá adiante (Azevedo; Alves, 2009).

Nesse contexto, a nutrição animal é fundamental para a saúde e desempenho do rebanho e está em constante evolução, incorporando novas tecnologias e estratégias para

melhorar a utilização dos alimentos e atender às demandas emergenciais. Portanto, o estabelecimento de estratégias adequadas para obter respostas é essencial para alcançar o sucesso na pesquisa.

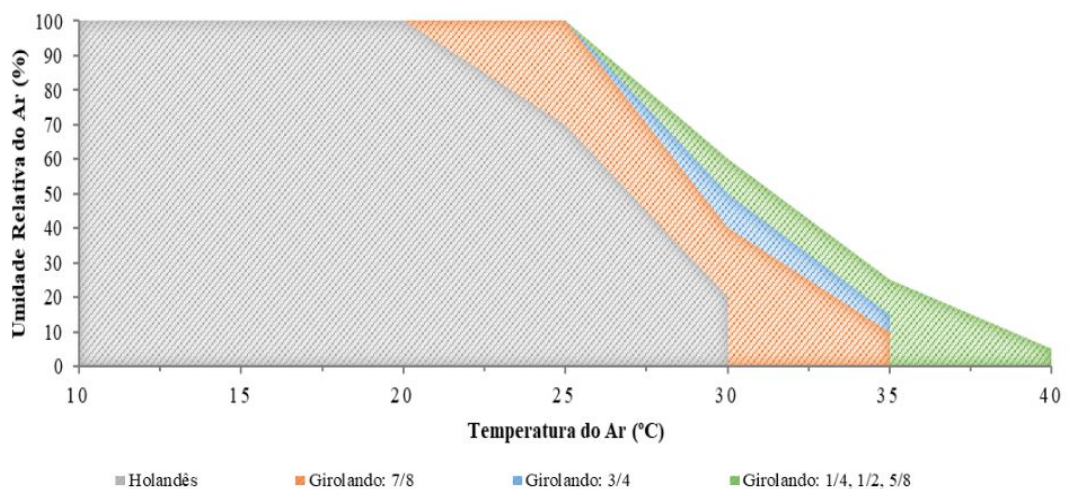
Na Figura 2, ilustra-se que vacas sob estresse térmico podem deixar de produzir até 34% do seu potencial em uma única lactação, representando perdas significativas na produção de leite e impactando a economia dos produtores (Neiva, 2023a).

Figura 2 - Produção de leite conforme o nível de estresse térmico.



Fonte: Neiva (2023a).

Figura 3 - Limites de conforto térmico para diferentes composições raciais.



Fonte: Neiva (2023a).

As diferentes raças bovinas apresentam distintos níveis de tolerância ao calor, o que influencia diretamente o bem-estar, o desempenho produtivo e a resposta fisiológica ao

estresse térmico. Raças de origem europeia (*Bos taurus taurus*), como Holandesa, Jersey e Parda-Suíça, são menos adaptadas ao clima quente e úmido, apresentando limiares mais baixos de estresse térmico. Embora sejam altamente produtivas em leite, essas raças são mais sensíveis ao calor. Por outro lado, raças zebuínas (*Bos taurus indicus*), como Gir e Guzerá, originárias de regiões tropicais da Índia, foram naturalmente selecionadas em ambientes quentes e áridos, o que lhes confere maior resistência térmica.

3.3 Respostas fisiológicas e metabólicas de animais de produção em função do estresse térmico

Em boa parte das regiões do País e outras regiões de climas quentes no mundo, as altas temperaturas podem ultrapassar os limiares biológicos dos animais, causando estresse térmico, quando a dissipação de calor do corpo do animal é inferior à carga total recebida (Li *et al.*, 2022), acarretando em uma série de consequências metabólicas como aumento no nível de cortisol (intimamente associado ao estresse e à ansiedade) e de transaminase glutâmico-oxaloacética (um marcador de dano hepático) (Kim *et al.*, 2021), bem como a concentração de proteínas sanguíneas do choque térmico (Choi *et al.*, 2021; Kim *et al.*, 2021), fisiológicas como o aumento das frequências cardíacas e respiratórias, e comportamentais que visam o aumento da área efetiva de dissipação de calor, controle da área de contato com a superfície mais quente ou ainda aumentar a eficiência respiratória (Kim *et al.*, 2021).

Em decorrência da redução na ingestão de alimentos e ao aumento na frequência respiratória, vacas sob estresse térmico tendem a ruminar menos, o que afeta a produção de saliva, um importante agente tampão no rúmen. Isso pode levar à acidose ruminal e, em casos prolongados de clima quente, pode resultar em laminite e redução do teor de gordura do leite (Machado, 1999). Além disso, o estresse térmico pode causar imunossupressão e reduzir a eficiência do sistema imunológico, aumentando a suscetibilidade a doenças nas vacas (AL-BUSAIDI *et al.*, 2008).

Dentre os fatores fisiológicos indicadores de respostas, encontram-se os parâmetros hematológicos, importantes ferramentas na avaliação da saúde animal no que se refere ao estado de saúde e grau de estresse térmico ao qual está sujeito (Roberto *et al.*, 2010), por ser o sistema sanguíneo sensível às mudanças de temperatura, traduzidas por variações nos valores do hematócrito, número de leucócitos circulantes, conteúdo de eritrócitos e teor de hemoglobina no eritrócito (Iriadan, 2007). De acordo com Nunes *et al.* (2002), quanto maior a demanda do animal, maior será o valor do hematócrito, em decorrência da perda de líquido

por evaporação, pela redução do volume plasmático sanguíneo, levando ao aumento na concentração do hematócrito (Souza *et al.*, 2011). Os eritrócitos são as células mais numerosas no sangue, sendo que seu citoplasma é formado por 1/3 de hemoglobina e 2/3 de água. Sua função é carrear hemoglobina que, por sua vez, transporta O₂ dos pulmões para os tecidos e CO₂ dos tecidos para os pulmões. A dosagem total da hemoglobina reflete diretamente a capacidade do eritrócito como carreador de oxigênio e seu percentual corresponde ao volume de hemácias em relação ao volume total de sangue. Ao mesmo número de hemácias podem corresponder valores de hematócrito diferentes, conforme o estado de hidratação do animal. O aumento no nível de hematócrito no sangue foi verificado por Silva *et al.* (2006), ao estudar o efeito da época do ano em caprinos no semiárido que estavam em estresse térmico.

Nesse contexto a produção animal nos trópicos se diferencia, sendo influenciada, independente da espécie, e limitada, principalmente, pelo estresse térmico (Souza *et al.*, 2005). Com o advento do aquecimento global e aumento das temperaturas e extremos climáticos, os animais são cada vez mais expostos a condições ambientais estressantes. O estresse térmico, resultante de altas, além de alterar as reações comportamentais dos animais, redução na ingestão de alimentos e na produção de leite (Brasil *et al.*, 2000), o estresse térmico causa uma alteração aguda e crônica nas concentrações plasmáticas de cortisol e hormônios tireoideanos (Coelho *et al.*, 2008).

Os parâmetros fisiológicos de Temperatura Retal (TR), Frequência Respiratória (FR), Temperatura Superficial da Pele (TS) e Frequência Cardíaca (FC) sofrem influência do turno do dia, promovendo uma elevação dessas variáveis fisiológicas (Medeiros *et al.*, 2007; Silva *et al.*, 2006, 2010; Souza *et al.*, 2008).

Os eritrócitos são responsáveis por transportar o oxigênio que está ligado à hemoglobina por todo o organismo, sofrendo influência do ambiente externo. Quanto maior o número de eritrócitos, maior a capacidade de oxigenação dos tecidos (Reece, 1996). Durante o esforço físico, a circulação e consumo do oxigênio aumentam, verificando-se também elevação do valor da hemoglobina. Portanto, espera-se que animais estressados termicamente, com maior frequência respiratória, apresentem valores superiores desse parâmetro (Nunes *et al.*, 2002). Quanto ao hematócrito, este pode aumentar em função de uma desidratação, resultante da perda de líquidos por mecanismos evaporativos de dissipação de calor, como respiração e sudorese. Pode, ainda, diminuir em função de anemias, prenhez avançada e estresse térmico de longa duração, em que o número de hemácias, o teor de hemoglobina e a contagem global de leucócitos estão diminuídos (Lee; Roussel; Beatty, 1976). Perfil hormonal – Cortisol A ativação do eixo hipotálamo-hipófise adrenal com consequente aumento das

concentrações plasmáticas de cortisol é a resposta mais proeminente do animal a condições estressantes. A secreção de cortisol estimula ajustes fisiológicos, que permitem ao animal tolerar o estresse causado por um ambiente quente (Silanikove, 2000). Concentrações plasmáticas de cortisol de cabras de uma raça indiana em lactação e seus cruzamentos foram mais elevadas no mês de temperatura mais elevada, sugerindo que o estresse pelo calor pode influir nas concentrações de cortisol (Ludri; Sarma, 1985). Machos da raça Saanen em clima tropical apresentaram níveis de cortisol mais elevado, no período do ano em que foram registradas maiores temperaturas do ar, com um índice de temperatura e umidade de emergência (Salles, 2010). Kaushish *et al.* (1987) relataram que o aumento no nível de cortisol, durante o estresse térmico foi significativo em caprinos, sendo que os níveis sanguíneos são mais elevados após estresse térmico agudo, em comparação a animais que vivem em situação de estresse térmico crônico. Em contrapartida, severo o estresse crônico pode resultar em períodos de altas concentrações de cortisol, diminuindo a ~~apetição individual~~ por causar imunossupressão e atrofia dos tecidos de defesa do organismo, além de reduzir a energia disponível para o sistema imune, aumentando a suscetibilidade dos animais às doenças infecciosas (Al-Busaidi; Johnson; Mahgoub, 2008). Perfil hormonal – T3 e T4.

Entre as mudanças endócrinas importantes, por ocasião do estresse, pode-se destacar também, a diminuição na atividade do eixo hipotálamo-hipófise tireoide, com redução das concentrações de hormônios tireoideanos, tetraiodotironina ou tiroxina (T4) e 3,3, 5-triiodotironina (T3) (Reece, 1996). Helal *et al.* (2010) observaram hipotiroidismo em cabras Balady e Damascus criadas no Nordeste do Egito, decorrente da redução na concentração de T3 e T4 induzida por estresse térmico. Esses hormônios apresentam como efeito global o aumento do metabolismo basal, disponibilizando mais glicose para as células, estimulando a síntese de proteínas, as funções cardíacas e neuronais. Verifica-se ainda um importante papel dos hormônios tireoideanos no controle da produção de calor em animais homeotérmicos, uma vez que elevam o consumo de oxigênio dos tecidos, resultando em aumento da produção de calor (efeito calorigênico) (McNabb, 1995).

Segundo Emesih, Newton e Weise (1995), a fertilidade é menor em situações de estresse térmico. Essa redução é de natureza multifatorial, visto que a hipertermia, causada pelo colapso dos mecanismos termorreguladores, altera e inviabiliza as funções celulares de várias partes e/ou tecidos do sistema reprodutivo (Pereira, 2005).

No tocante à gestação, sabe-se que sua duração é geneticamente estabelecida para cada espécie, mas pode ser influenciada por diversos fatores e por suas interações (Simplício *et al.*, 1990). O estresse térmico materno, durante o período crítico de reconhecimento da gestação,

reduz a eficiência reprodutiva em animais, influenciando no desenvolvimento do concepto (Emesih; Newton; Weise, 1995).

O estresse provocado pelas elevadas temperaturas ambientais também interfere na função reprodutiva do macho caprino (Silva *et al.*, 2005).

A produção e a qualidade do leite de cabra estão diretamente relacionadas ao tipo e à qualidade da dieta dos animais, à raça, ao período de lactação, ao clima e à ação combinada desses fatores, nas condições ambientais de cada país ou região (Zambom *et al.*, 2005).

Avaliando o efeito do estresse térmico sobre a produção e composição química do leite de cabras Alpina, Brasil *et al.*, (2000), relataram uma menor produção de leite, com menores teores de gordura, proteína, lactose e sólidos totais das cabras submetidas a ambiente estressante (0,96 kg de leite), quando comparado com cabras sob termoneutralidade (1,02 kg de leite). Essa queda na produção de leite e na concentração de seus componentes nos animais estressados é explicada pela diminuição na ingestão de nutrientes, uma vez que estes consumiram 62,55% menos feno durante o dia e 15,98% menos durante a noite. Além disso, a utilização de mecanismos termorreguladores pelos animais estressados, traduzido pelo aumento da frequência respiratória (126,9 mov.min⁻¹), desviou a energia da dieta (Brasil *et al.*, 2000).

Como discorrido anteriormente, o estresse térmico é a resposta do organismo a mudanças bruscas de temperatura, podendo resultar em alterações comportamentais, metabólicas e fisiológicas e pode ser percebido, visivelmente, pelo comportamento animal; respiração ofegante, a busca por sombra, redução no consumo de alimento, maior salivação, maior ingestão de água, na tentativa de regular a temperatura corporal e mantê-la nos limites normais. Outro aspecto que pode ser influenciado por questão de desconforto térmico ocasionado, em razão de altas temperaturas é a produção de metano, por ser um processo resultante da digestão dos bovinos, sua quantidade pode ser influenciada pela qualidade da dieta e os fatores que influenciam o ambiente em que o animal está inserido. Além disso, as alterações endócrinas resultantes do menor consumo de alimento, como a redução na absorção de nutrientes, o aumento do requerimento nutricional de manutenção reduz a eficiência do rebanho quando expostos a temperaturas mais altas.

A relação entre o estresse térmico nos ruminantes e a emissão de metano é complexa e pode ser associada a diversos fatores relacionados à digestão e à fermentação no rúmen. A eficiência da digestão no rúmen pode ser prejudicada pelo estresse térmico visto que altas temperaturas afetam o metabolismo, resultando em uma digestão menos eficiente e uma fermentação ruminal menos eficaz, o que pode levar a uma maior produção de metano, além

de alterações metabólicas e problemas de saúde como acidose ruminal que também podem afetar a eficiência da fermentação (Meneses *et al.*, 2023). Tem-se ainda uma menor ingestão de alimentos desses animais, o que, inicialmente, pode levar a uma redução da produção desse gás, havendo menos substrato para a fermentação, porém, se a dieta não for balanceada, pode alterar a eficiência da fermentação, podendo aumentar a produção de metano por unidade de alimento produzida.

Outra alteração resultante do estresse térmico em ruminantes é a escolha por alimentos, de forma que mudanças na dieta em resposta ao estresse térmico podem influenciar a quantidade de metano produzido. Esses fatores levam a uma alteração da microbiota ruminal, alterando, assim, a atividade microbiana no rúmen, podendo interferir nas produções de metano e óxido nitroso. Cropper, Lloyd e Emmans (1985, 1986) observaram que ovelhas, buscando atender as suas exigências nutricionais, selecionaram alimentos, mediante a oportunidade de escolhê-los com baixo ou alto teor de proteína, servindo, assim, para sustentar o modelo sugerido por Forbes (1999), validando a hipótese de que os animais se alimentam para minimizar desconfortos de ordem física ou metabólica. Em um estudo realizado em 2009, Passini *et al.*, evidenciaram o fato de que apresentada oportunidade de escolha entre alimentos volumosos e concentrados, vacas em estresse térmico realizam seleção não aleatória dos mesmos. “Durante o estresse térmico, a ingestão de alimentos muda, e dietas mais concentradas promovem maior produção de propionato e menor formação de metano” (Li *et al.*, 2022). Em resposta ao estresse térmico, os animais tendem a reduzir o consumo de forragens fibrosas (ricos em celulose) e aceitam melhor alimentos com maior densidade energética, como concentrados. Além disso, os ruminantes apresentam como mecanismos de resfriamento o aumento da respiração e transpiração, aumentando a energia utilizada pelo animal, interferindo, assim, nos produtos obtidos durante a fermentação. Para o bom funcionamento do rúmen e a consequente produção de acetato, propionato e butirato, a pressão de H_2 no rúmen precisa ser baixa (Freire, 2015). Dessa maneira, a emissão de CH_4 é influenciada pela forma na qual o H_2 é utilizado, sendo a peça central para moderar a produção desse gás.

Assim, o estresse térmico pode influenciar a produção de metano em ruminantes de várias maneiras, principalmente, por meio de alterações na digestão, na ingestão de alimentos e na saúde geral dos animais, o que faz importante o cuidado com os animais em relação ao estresse térmico, que vai além do bem estar animal, interferindo também na saúde, produtividade e sustentabilidade da atividade.

Conforme apresentado na Tabela 3, as condições entre a emissão de metano com temperatura do ar (-0,60) e umidade relativa do ar 0,67 indicam que o ambiente influencia na quantidade de metano I.

Tabela 4 - Coeficientes de correlação e Probabilidade (P) entre a emissão de metano e a temperatura do ar, da superfície da epiderme e do Pelame, retal, umidade relativa, radiação e temperatura radiante média.

	T _A	T _{EP}	T _R	T ₈	U _R	R _{AD}	T _{RM}
E _{CH4}	-0,60	-0,49	-0,24	-0,54	0,67	0,23	-0,60
Probabilidade e	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1

Fonte: Carvalho (2015).

Segundo Passini *et al.* (2009), nos sistemas de produção animal, as dietas são planejadas com composições específicas para atender às necessidades de crescimento, reprodução e lactação dos animais.

Animais se alimentam para minimizar desconfortos físicos ou metabólicos, podendo alterar suas preferências alimentares de acordo com as mudanças na oferta de nutrientes. Mudanças ambientais, como aumento da temperatura, também podem influenciar a ingestão de alimentos, afetando a fermentação ruminal e a utilização de nutrientes.

Diante dessas circunstâncias, recomenda-se ajustar a densidade energética da dieta para minimizar o estresse térmico, aumentando a relação entre alimentos volumosos e concentrados.

É sabido que aumentar a densidade energética da dieta é uma prática recomendada para minimizar a redução na ingestão de alimentos em situações de estresse térmico (Dhiman; Zaman, 2001).

Durante sua evolução, os animais ruminantes desenvolveram a capacidade de utilizar eficientemente carboidratos estruturais como fonte de energia e compostos nitrogenados não proteicos como fonte de proteína (Valadares Filho; Pina, 2006).

A avaliação dos alimentos na nutrição animal é fundamental para determinar sua composição química e características físicas, com o objetivo de otimizar seu uso na produção, melhorar o desempenho dos animais e garantir maior retorno financeiro ao produtor. Essa avaliação ajuda a identificar o potencial dos alimentos, suas necessidades de suplementação e a superar deficiências nutricionais. A pesquisa na área é essencial para desenvolver metodologias que relacionem o conteúdo de nutrientes com a digestibilidade, metabolismo e produtividade animal, contribuindo para o avanço da atividade pecuária.

Nesse sentido, o manejo nutricional, que envolve a escolha e o manejo adequado da dieta dos animais, desde a qualidade das pastagens, e forragens é fundamental. Alimentos ricos em carboidratos solúveis, como silagem de milho, ajudam a diminuir a produção de metano ao favorecer a formação de compostos que competem com a metanogênese pelo hidrogênio. Além disso, o uso de taninos presentes em leguminosas como a *Acacia* pode reduzir a atividade de microrganismos metanogênicos, contribuindo para a diminuição do metano. Óleos essenciais, extraídos de plantas, também apresentam efeito antimicrobiano, alterando a fermentação ruminal e reduzindo a produção de metano, além de ser uma alternativa aos antibióticos. Lipídeos na dieta; óleos vegetais e sementes oleaginosas, podem diminuir a produção de metano, ao serem tóxicos às bactérias metanogênicas e ao não produzirem excesso de hidrogênio. A suplementação com leveduras, como *Saccharomyces cerevisiae*, melhora a digestibilidade e a estabilidade ruminal, além de reduzir a emissão de metano.

A utilização de aditivos, especialmente ionóforos como a monensina, também é uma estratégia eficiente. Esses compostos modificam a microbiota ruminal, aumentando a produção de ácido propiônico e reduzindo o metano, sem prejudicar o desempenho animal. A monensina, por exemplo, é amplamente utilizada e comprovadamente eficaz na redução das emissões.

Em suma, a combinação de manejo nutricional adequado, o uso de ingredientes específicos e aditivos pode contribuir, significativamente, para a mitigação do metano na pecuária, promovendo uma produção mais sustentável e ambientalmente responsável.

3.4 NCG como estratégia para reduzir os efeitos do estresse térmico

O estresse térmico representa um desafio significativo para a produção leiteira, especialmente em regiões com alta carga térmica, como o Cerrado brasileiro. Quando o índice de temperatura e umidade (THI) ultrapassa 72, vacas leiteiras manifestam alterações comportamentais e fisiológicas que incluem a redução da ingestão de matéria seca, aumento da frequência respiratória e cardíaca, elevação da temperatura corporal, além de comprometimento da função imune e desempenho produtivo (Ma; Szilagy; Zhang, 2021). Nesse contexto, estratégias nutricionais que atenuem os efeitos deletérios do estresse térmico tornam-se fundamentais para a manutenção da saúde e produtividade dos animais.

A arginina (Arg) é um aminoácido funcional com papel central na síntese de óxido nítrico (NO), um vasodilatador endógeno que promove a redistribuição do fluxo sanguíneo

periférico, favorecendo a dissipação de calor e contribuindo para a termorregulação em condições de estresse térmico (Wu *et al.*, 2018). Apesar da capacidade dos ruminantes de sintetizar Arg endogenamente, essa produção pode ser insuficiente em momentos de elevada demanda fisiológica (Chacher *et al.*, 2013). Dessa forma, o N-carbamilglutamato (NCG), análogo estrutural do N-acetilglutamato (NAG), tem sido proposto como uma alternativa eficaz para estimular a síntese endógena de Arg.

O NCG atua como ativador da enzima carbamoil-fosfato sintetase-1 (CPS-1), catalisadora da primeira etapa do ciclo da ureia, promovendo a formação de citrulina e, subsequentemente, de arginina (Chacher *et al.*, 2013). Estudos demonstram que o NCG é mais resistente à degradação no rúmen quando comparado à Arg, com apenas 17,8% de degradação após 24 horas de incubação ruminal, frente a 100% para a Arg (Chacher *et al.*, 2012), permitindo que alcance o intestino delgado em forma funcional.

Nesse contexto, a suplementação com NCG tem sido investigada como uma estratégia potencial para atenuar os efeitos negativos do estresse térmico em bovinos leiteiros. Um estudo recente conduzido por Li *et al.* (2022) avaliou os efeitos do NCG em vacas holandesas submetidas ao estresse térmico, buscando compreender sua influência sobre o metabolismo e a microbiota ruminal, bem como sobre a microbiota fecal. Para isso, foi utilizada uma abordagem que combinou técnicas avançadas de análise metabólica e de caracterização da microbiota, com o objetivo de avaliar os efeitos da suplementação de NCG na composição microbiana e no perfil metabólico do conteúdo ruminal e das fezes. O experimento envolveu vacas Holandesas em lactação, que receberam doses de 0, 15, 20 ou 25 g/dia de NCG durante 60 dias. Durante todo o período experimental, os animais foram submetidos a condições de estresse térmico, conforme evidenciado pelo índice temperatura-umidade (THI) médio de 80,6. Os principais resultados indicaram que a suplementação com NCG promoveu alterações significativas no ambiente ruminal, destacando-se o aumento na concentração de proteína microbiana e nos ácidos graxos voláteis totais, com incremento da proporção molar de propionato. Simultaneamente, houve redução do pH ruminal, da concentração de amônia e da relação acetato:propionato. Essas modificações sugerem uma modulação positiva do processo fermentativo ruminal, que pode refletir em maior eficiência na utilização do nitrogênio dietético e melhor desempenho da fermentação sob condições de estresse térmico. Além disso, o estudo forneceu novas evidências sobre os efeitos do NCG nos metabólitos e na microbiota do rúmen e das fezes, indicando que o NCG possui potencial como aditivo alimentar para mitigar os impactos do estresse térmico em vacas leiteiras.

Por outro lado, em um estudo conduzido por Zhu *et al.* (2023) com vacas leiteiras mantidas em ambiente de hipoxia, típico da região do Tibete, os autores avaliaram os efeitos do uso de NCG sobre a fermentação ruminal e a adaptação dos animais às condições adversas. Os autores observaram que o NCG melhorou a utilização de nitrogênio no rúmen, aumentou a produção de ácido acético e de ácidos graxos voláteis totais, e promoveu maior diversidade microbiana ruminal, com predominância dos filos Bacteroidetes, Firmicutes e Patescibacteria. Além disso, a concentração de amônia ruminal foi reduzida e as vias metabólicas associadas ao metabolismo de carboidratos, aminoácidos, lipídios, energia e ao processamento da informação genética foram mais ativamente representadas, sugerindo melhor funcionalidade microbiana. Esses resultados indicam que o NCG pode favorecer a adaptação de vacas Holandesas a ambientes hostis, contribuindo para a manutenção do desempenho produtivo.

Em outro estudo (Liu *et al.*, 2022), vacas Jersey saudáveis em lactação foram avaliadas sob condição de estresse hipóxico em alta altitude no Tibete. As vacas foram divididas em dois grupos: o primeiro recebeu uma dieta convencional, enquanto o segundo grupo recebeu a mesma dieta acrescida de 20g/dia de NCG. Ambas as dietas foram oferecidas em duas refeições diárias, às 8h e 18h, *ad libitum*, com acesso livre à água. O experimento teve duração de 60 dias, sendo 12 de adaptação e 48 de análise. Durante o estudo, amostras de sangue, fezes, conteúdo ruminal e leite foram coletadas em diferentes períodos para avaliar parâmetros sanguíneos, composição do leite, capacidade antioxidante e resposta ao estresse de altitude. Os resultados mostraram que o grupo que recebeu NCG apresentou maior consumo de matéria seca, maior saturação de oxigênio no sangue e aumento da gordura no leite, além de uma redução na proporção de ácido butírico e nos níveis hormonais relacionados ao estresse de altitude, como tiroxina, endotelina e transferrina. Com base nesses achados, os autores concluíram que a adição de NCG à dieta contribuiu para melhorar o estado fisiológico e o desempenho produtivo das vacas Jersey em condições de hipóxia.

Além disso, Ma, Szilagy e Zhang (2021) observaram que a suplementação com NCG também trouxe benefícios para a produção de leite, composição do leite, metabolismo e sistema imune de vacas Holandesas em estresse térmico. Nesse estudo, vacas que receberam diferentes doses de NCG produziram mais leite (aproximadamente 5,35% em relação ao grupo controle) e com maior teor de proteína. Também foram identificadas mudanças em processos do organismo relacionados ao uso de aminoácidos, energia e ácidos biliares. Esses resultados reforçam que o NCG pode ser uma ferramenta útil para ajudar vacas leiteiras a enfrentarem o estresse térmico, favorecendo o equilíbrio do organismo e a manutenção do desempenho produtivo.

Tabela 5 - Resultados obtidos dos trabalhos descritos (compilados).

Referência	Raça animais	Nº animais	Tratamentos	Principais resultados
Li <i>et al.</i> (2022)	Vacas holandesas	48 em lactação e estresse térmico	Con (0) 15 g/dia NCG 20g/dia NCG 25 g/dia NCG	Aumento do nível de proteína microbiana ruminal; Aumento nível AGV produzido; Redução pH ruminal e N amoniacal; Aumento na concentração de Arg no líquido ruminal
Liu <i>et al.</i> (2022)	Vacas Jersey	14 em lactação e estresse hipoxico	Con (0) Con + 20g/dia NCG	Maior consumo matéria seca; Maior saturação de oxigênio no sangue; Maior teor de gordura no leite; Redução dos hormônios do estresse de altitude.
Zhu <i>et al.</i> (2022)	Vacas holandesas	12 em lactação e estresse hipoxico	Con (0) Con + 20g/dia NCG	Melhorar a utilização de nitrogênio no rúmen; aumentar a diversidade microbiana do rúmen; proporção molar de ácido acético aumentou
Ma <i>et al.</i> (2021)	Vacas holandesas	48 em lactação e estresse térmico	Con (0) 15 g/dia NCG 20g/dia NCG 25 g/dia NCG	Aumento da produção de leite e proteína do leite; Aumento da glicose no soro das vacas; Redução da amônia no sangue; Aumento das imunoglobinas A, G, M Redução no cortisol; Aumento na concentração de ácidos biliares
Chacher <i>et al.</i> (2014)	Vacas holandesas	60 em lactação e calor metabólico-intensa atividade- alta produção	Con (0) 10 g/dia NCG 20g/dia NCG 30 g/dia NCG	Aumento da produção de leite; Aumento da proteína do leite e no teor de lactose; Redução concentração NO plasmático; concentração N plasmático, N uréico, N no leite, N na urina Aumento na concentração Met;
Gu <i>et al.</i> (2018)	Vacas holandesas	60 em lactação e estresse oxidativo (por hipertensão)	Con (0) 10 g/dia NCG 20g/dia NCG 40 g/dia NCG	Aumento da gordura e da proteína do leite; na concentração de NO e aminoácido total; Aumento na concentração de Arg

Fonte: elaboração própria.

Complementando essas evidências, Loor *et al.* (2023) destacam o papel central da arginina – e de seu análogo N-carbamoylglutamato – como nutrientes funcionais em ruminantes expostos ao estresse térmico. Segundo os autores, o NCG estimula a síntese endógena de arginina apresentando efeitos positivos como a redução de cortisol e de marcadores de estresse oxidativo, e o aumento da atividade de enzimas antioxidantes, como superóxido dismutase (SOD) e glutathione peroxidase (GPX). Também foram observadas ativações de vias metabólicas ligadas ao metabolismo energético sugerindo que, tanto a arginina quanto o NCG exercem efeitos sistêmicos amplos, com potencial para melhorar a homeostase fisiológica e o desempenho produtivo em condições desafiadoras.

Apesar dessas evidências, os trabalhos contemplando os efeitos do NCG em vacas de leite e em ruminantes de forma geral são escassos no Brasil e no mundo. Contudo, existem evidências com outras categorias animais que demonstram os efeitos de seu uso em animais de produção submetidos ao estresse térmico.

Yang *et al.* (2021) avaliando os efeitos da adição de diferentes níveis de NCG no desempenho de crescimento em touros holandeses saudáveis alimentados com dieta controle, 20 mg/kg de peso corporal, 40 mg/kg PC e 80 mg/kg PC concluíram que a adição de NCG aumentou as concentrações plasmáticas de Arg e aminoácidos essenciais totais, o que resultou em maior ganho médio diário em touros alimentados com NCG, sendo a dosagem 40 mg/kg foi ideal para melhorar o crescimento de touros Holandeses em engorda.

A importância do uso do NCG como estratégia nutricional em vacas leiteiras sob condições de estresse térmico e hipóxico é evidenciada pelos seus efeitos positivos na modulação do metabolismo ruminal, na melhora da fermentação e na saúde geral dos animais, ao aumentar a produção de ácidos graxos voláteis, que são as principais fontes de energia para os ruminantes e favorecer o pH ruminal estável, reduzindo o risco de acidose subclínica.

Os estudos demonstram que a suplementação com NCG promove aumento na produção de proteína microbiana, melhora na composição do leite, maior eficiência na utilização de nitrogênio, indicando que o aditivo também reduz a contribuição da atividade pecuária em relação ao N₂O, além de uma resposta adaptativa mais robusta às condições adversas, como altas temperaturas e hipóxia. Esses efeitos contribuem para a manutenção da produtividade, saúde e bem-estar dos animais, destacando o NCG como uma ferramenta promissora para mitigar os impactos do estresse ambiental na produção leiteira.

3.5 NCG como estratégia para reduzir a emissão de metano entérico

Segundo Machado *et al.* (2011), cerca de 85 a 90% do metano produzido pelos ruminantes é de origem da fermentação entérica, sendo o restante produzido, a partir dos dejetos desses animais. A modificação da fermentação ruminal, por meio da alteração da dieta é uma ferramenta para reduzir a emissão desse gás, alterando os tipos de carboidrato, suplementando com lipídeos e manipulando a microbiota ruminal, por meio de componentes presentes nos alimentos ou aditivos (Mohammed *et al.*, 2004).

A fermentação ruminal é um processo anaeróbio, que ocorre na ausência de oxigênio e é realizado, pela população microbiana do rúmen. Nesse processo, os carboidratos são convertidos em ácidos graxos de cadeia curta (AGCC), que são utilizados pelo animal como fonte de energia. *Archaea*, presentes no rúmen, obtêm energia para seu crescimento ao utilizar H para reduzir CO₂ e formar metano, para ser eructado para a atmosfera (Cottle; Nolan; Wiedemann, 2011). Dessa forma, estratégias para a manipulação de hidrogênio no rúmen corresponde a um controle da emissão de metano e otimiza seu uso nas vias de fermentação (Machado *et al.*, 2011).

Nesse contexto de manipulação da dieta animal, os aditivos se mostram ferramentas eficientes. São substâncias que visam a aumentar o desempenho do animal, seja o ganho, a eficiência alimentar ou ambos. Mesmo que não reduzam a emissão de metano diretamente, ao aumentarem o ganho de peso, diminuirão a emissão de GEE total por kg de ganho de peso. Aditivos que alteram a biota ruminal podem reduzir a produção de metano ao favorecer uma biota menos metanogênica no rúmen (Malafaia; Biscola, 2023).

Liu *et al.* (2022), avaliando os efeitos da suplementação dietética com NCG na digestibilidade, fermentação ruminal, qualidade do leite, parâmetros antioxidantes e metabólitos do gado Jersey sob condição de estresse hipóxico, sendo separados em dois tratamentos, o primeiro recebendo a dieta convencional e o segundo recebendo 20 g/dia de NCG junto à dieta, por 60 dias. Os autores identificaram que o grupo de animais que receberam NCG junto à dieta apresentou maior consumo de matéria seca, maior saturação do oxigênio no sangue, aumento da gordura do leite, reduziu a proporção de ácido butírico, além de reduzir hormônios relacionados ao estresse de altitude, como a tiroxina, a endotelina e a transferrina. Concluíram, assim, que o NCG, além de contribuir para a melhora do estado fisiológico e desempenho produtivo para o gado leiteiro em condições de estresse hipóxico, pode contribuir para a mitigação do metano produzido na fermentação ruminal de bovinos, a partir da redução da proporção de ácido butírico gerado na fermentação.

Zhang *et al.* (2021), investigando os efeitos do N-carbamilglutamato (NCG) no crescimento e desempenho de abate sob a qualidade da carne, utilização de nitrogênio, antioxidantes plasmáticos e aminoácidos—em touros holandeses—alimentados com dieta controle; 40 mg/kg de peso corporal de NCG; grupo ureia e grupo Ureia + NCG (dieta de ureia com 40 mg/kg de peso corporal de NCG). Os resultados obtidos indicaram que a alimentação com NCG melhorou o ganho médio diário, a conversão alimentar, o peso de abate e rendimento da carcaça. Além dos ganhos em termos produtivos, a adição de NCG na alimentação dos animais foi capaz de reduzir os teores de N fecal e N urinário, ureia plasmática nos touros e amônia, diminuindo a volatilização de amônia no ambiente, reduzindo a contaminação do ar e da água (por lixiviação de nitratos), contribuindo para uma menor emissão de gases do efeito estufa e poluição ambiental, em contrapartida, aumentou a retenção e utilização de N, NO plasmático, Arg.

Gu *et al.* (2018) avaliaram os efeitos da suplementação com NCG na composição do leite. Distribuídas em quatro tratamentos, vacas holandesas em lactação receberam suplementação com 0, 10, 20 ou 40 g de NCG/dia por vaca durante 14 semanas. As vacas administradas com NCG tiveram um aumento na produção de gordura e no teor de proteína do leite. A adição de NCG aumentou a concentração de NO e tendeu a aumentar a concentração de glicose plasmática. As concentrações de aminoácido total e Arg plasmáticos aumentaram significativamente pela adição de NCG. Dessa forma, esses achados sugerem que o NCG pode auxiliar na regulação do metabolismo e melhorar a qualidade do leite.

Chacher *et al.* (2013) avaliaram vacas leiteiras multíparas, por sete semanas, divididas em quatro tratamentos, sendo eles: 0, 10, 20 e 300, g NCG/dia. A suplementação do NCG resultou em uma maior produção e teor de proteína e lactose do leite, enquanto o rendimento e o teor de gordura do leite não diferiram entre os tratamentos. A concentração plasmática de NO e amônia diminuíram. Houve aumento percentual na concentração plasmática de Arg nas vacas alimentadas com NCG. Por meio desse estudo, conclui-se que o NCG melhorou o desempenho da lactação das vacas leiteiras e da qualidade do leite, o que pode ser explicado por uma alteração na amônia plasmática N e NO, por ureagênese eficiente, sendo uma alternativa à suplementação de Arg para a melhoria da síntese proteica do leite.

Ainda assim, observa-se uma escassez de estudos específicos sobre o uso de NCG como estratégia para reduzir a emissão de metano entérico em ruminantes. Embora algumas pesquisas tenham explorado alternativas para mitigar esse impacto ambiental, há uma necessidade urgente de novos experimentos e trabalhos científicos que possam validar a eficácia do NCG nesse contexto. A realização de estudos mais aprofundados permitirá

compreender melhor os mecanismos envolvidos, otimizar as doses e avaliar possíveis efeitos colaterais, contribuindo, assim, para o desenvolvimento de práticas mais sustentáveis na produção animal. Como conclusão, investir em pesquisas sobre NCG é fundamental para avançar na busca por soluções viáveis e eficientes para a redução das emissões de metano, promovendo um setor agropecuário mais sustentável, responsável e com novas possibilidades.

4 CONCLUSÃO

Conclui-se, a partir desse trabalho, que o NCG possui potencial para atenuar os efeitos negativos do estresse térmico em bovinos de leite, alterar o padrão fermentativo, além de otimizar a utilização de N e a síntese de arginina, por meio da regulação eficiente do ciclo da ureia. Estudos realizados indicam que o NCG se mostra promissor quanto ao aumento do teor de proteína do leite, assim como o teor de gordura. Além disso, o uso do NCG indicou a melhora dos efeitos negativos do estresse térmico, em decorrência da redução dos hormônios indicadores do estresse térmico e melhora da capacidade antioxidante, induzindo que o NCG aumenta a imunidade fisiológica de vacas leiteiras.

Por fim, em nível de sustentabilidade, além da melhora na condição de saúde e bem-estar dos animais, estudos indicaram o NCG como redutor da excreção de nitrogênio nas fezes e na urina, uma das principais fontes de emissão de amônia e óxido nítrico. Estudos adicionais são necessários para avaliar mais detalhadamente o efeito do NCG na redução da emissão de metano, durante a fermentação ruminal; indiretamente, poderia reduzir a emissão de metano por kg de produto gerado, uma vez que ele pode potencializar a produção de leite das vacas. Contudo, mais pesquisas são necessárias para entender e quantificar esses efeitos.

REFERÊNCIAS

- AL-BUSAIDI, R.; JOHNSON, E. H.; MAHGOUB, O. Seasonal variations of phagocytic response, immunoglobulin G (IgG) and plasma cortisol levels in Dhofari goats. **Small Ruminant Research**, Amsterdam, v. 79, n. 2-3, p. 118-123, Oct. 2008. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921448808001430>. Acesso em: 13 mar. 2022.
- ALENCAR, A. *et al.* **Desafios e oportunidades para redução das emissões de metano no Brasil**. Brasília, DF: Observatório do Clima, 2022.
- ALVALÁ, P. C.; KIRCHHOFF, V. W. J. H.; PAVÃO, H. G. O metano na atmosfera: produção de metano em regiões de queimadas e áreas alagadas. **Revista Biotecnologia, Ciência e Desenvolvimento**, Brasília, v. 7, p. 40-43, 1998.
- AMORMINO, T. C. F. Produção animal: alternativas sustentáveis frente as ameaças do aquecimento global. *In*: CONGRESSO INTERNACIONAL DE DIREITO AMBIENTAL: MUDANÇAS CLIMÁTICAS, BIODIVERSIDADE E USO SUSTENTÁVEL DE ENERGIA, 2008, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: Imprensa Oficial do Estado de São Paulo, 2008. v. 2. p. 157-173.
- ÂNGELO, C.; MARENGO, J. A. IPCC AR6, WGI: resumo comentado. **Observatório do Clima**, Rio de Janeiro, p. 1-10, 2022. Disponível em: https://www.oc.eco.br/wp-content/uploads/2021/08/OC-IPCC-AR6-FACTSHEET_FINAL.pdf. Acesso em: 28 jun. 2025.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS EXPORTADORAS DE CARNES (ABIEC). Perfil da Pecuária no Brasil. **Beef Report 2024**, Brasília, 22 ago. 2024. Disponível em: <https://abiec.com.br/publicacoes/beef-report-2024-perfil-da-pecuaria-no-brasil>. Acesso em: 29 maio 2025.
- AZEVEDO, D. M. M. R.; ALVES, A. A. **Bioclimatologia aplicada à produção de bovinos leiteiros nos trópicos**. Teresina, PI: Embrapa Meio-norte, 2009. (Documentos, n. 188).
- BAETA, F. C. *et al.* Equivalent temperature index at temperatures above the thermoneutral for lactating cows. *In*: MEETING OF THE AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS, 1987, Baltimore. **Proceedings [...]**. Baltimore: American Society of Agricultural Engineers, 1987. p. 1-22.
- BAÊTA, F. C.; SOUZA, C. F. **Ambiência em edificações rurais: conforto animal**. 2. ed. Viçosa: Ed. UFV, 2012.
- BARBOSA, O. R. *et al.* Efeitos da sombra e da aspersão de água na produção de leite de vacas da raça Holandesa durante o verão. **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 26, n. 1, p. 115-122, 2004.
- BAUMGARD, L. H.; RHOADS JÚNIOR, R. P. Effects of heat stress on postabsorptive metabolism and energetics. **Annual Review of Animal Biosciences**, Palo Alto, v. 1, n. 1, p. 311-337, 2013.

BENETEL, G. **Uso de óleos essenciais como estratégia moduladora da fermentação ruminal para mitigação das emissões de metano por bovinos Nelore**. 2018. Tese (Doutorado em Zootecnia) – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2018.

BERMANBUCCI, U. *et al.* Metabolic and hormonal acclimation to heat stress in domesticated ruminants. **Animal**, Cambridge, v. 4, n. 7, p. 1167–1183, July 2010.

BRASIL, L. H. de A. *et al.* Efeito do estresse térmico sobre a produção, composição química do leite e respostas termorreguladoras de cabras da raça alpina. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 29, n. 6, p. 1632-1641, 2000. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rbz/v29n6/5689.pdf>. Acesso em: 13 mar. 2022.

BROOM, D. M. Animal welfare: concepts and measurement. **Journal of Animal Science**, Champaign, IL, v. 69, n. 10, p. 4167-4175, Oct. 1991.

BROOM, D. M.; MOLENTO, C. F. M. Bem-estar animal: conceito e questões relacionadas - revisão. **Archives Veterinary Science**, Curitiba, v. 9, n. 2, p. 1-11, 2004.

CARTWRIGHT, S. L. *et al.* Impact of heat stress on dairy cattle and selection strategies for thermotolerance: a review. **Frontiers in Veterinary Science**, Lausanne, v. 10, June 2023. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/veterinary-science/articles/10.3389/fvets.2023.1198697/full>. Acesso em: 29 maio 2025.

CARVALHO, L. de A. *et al.* Sistema de produção de leite (Zona da Mata Atlântica). **Embrapa Gado de Leite**, Juiz de Fora, n. 1, jan. 2003. Disponível em: <https://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/FontesHTML/Leite/LeiteZonadaMataAtlantica/racas.html>. Acesso em: 13 mar. 2025.

CARVALHO, M. D. de. **Equilíbrio térmico e emissão de metano em vacas Jersey**. 2015. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, 2015.

CENTRO NACIONAL DE MONITORAMENTO E ALERTAS DE DESASTRES NATURAIS (CEMADEN). Monitoramento de secas e impactos no Brasil - Setembro/2020. **Portal Cemaden**, São Paulo, 15 out. 2020. Disponível em: www2.cemaden.gov.br/monitoramento-de-secas-e-impactos-no-brasil-setembro2020/. Acesso: 12 fev. 2025.

CHACHER, B. *et al.* Degradação de l-arginina e N-carbamoil glutamato e seu efeito na fermentação ruminal *in vitro*. Italiano. **Italian Journal of Animal Science**, Bologna, v. 11, n. 4, p. 4693–4696, 2012.

CHACHER, B. *et al.* Efeito do N-carbamoilglutamato na dieta sobre a produção de leite e a utilização de nitrogênio em vacas leiteiras de alta produtividade. **Journal of Dairy Science**, Champaign, Ill, v. 97, n. 4, p. 2338-2345, 2014.

CHACHER, B. *et al.* Potential role of N-carbamoyl glutamate in biosynthesis of arginine and its significance in production of ruminant animals. **Journal of Animal Science and Biotechnology**, London, v. 4, p. 1-6, Apr. 2013.

CHEW, B. P.; EISENMAN, J. R.; TANAKA, T. S. A infusão de arginina estimula a prolactina, o hormônio do crescimento, a insulina e a lactação subsequente em vacas leiteiras prenhes. **Journal of Dairy Science**, Champaign, Ill, v. 67, p. 2507-2518, 1984.

CHOI, W.-T. *et al.* Dietary supplementation of acetate-conjugated tryptophan alters feed intake, milk yield and composition, blood profile, physiological variables, and heat shock protein gene expression in heat-stressed dairy cows. **Journal of Thermal Biology**, Oxford, v. 98, n. 6, p. 102949, Apr. 2021.

CICERA, S. Governo de Rondônia e Ministério da Agricultura buscam soluções para fomentar a produção de leite em Rondônia. **Portal do Governo do Estado de Rondônia – SEAGRI**, Rondônia, 27 maio 2020. Disponível em:

<http://www.rondonia.ro.gov.br/governo-de-rondonia-e-ministerio-da-agricultura-buscam-solucoes-para-fomentar-a-producao-do-leite-em-rondonia/>. Acesso em: 13 mar. 2023.

CICERONE, R. J.; OREMLAND, R. S. Biogeochemical aspects of atmospheric methane. **Global Biogeochemical Cycles**, Washington, v. 2, n. 4, p. 299-327, Dec. 1988. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/GB002i004p00299>. Acesso em: 29 maio 2025.

CLIMATE WATCH. Historical GHG emissions. **Portal Climate Watch**, Washington, 2022a. Disponível em: <https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions>. Acesso em: 18 mar. 2025.

CLIMATE WATCH. Washington, DC, 2022b. Disponível em: www.climatewatchdata.org. Acesso em: 12 abr. 2022.

COELHO, L. A. *et al.* Concentrações plasmáticas de testosterona, triiodotironina (T3) e tiroxina (T4) em bodes submetidos ao estresse calórico. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, Belo Horizonte, v. 60, n. 6, p. 1338-1345, 2008. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/abmvz/v60n6/07.pdf>. Acesso em: 13 mar. 2025.

COTTLE, D. J.; NOLAN, J. V.; WIEDEMANN, S. G. Ruminant enteric methane mitigation: a review. **Animal Production Science**, Melbourne, v. 51, n. 6, p. 491-514, May 2011.

CROPPER, M.; LLOYD, M. D.; EMMANS, G. C. An investigation into the relationship between nutrient requirements and diet selection in growing lambs. **Animal Production**, Bletchley, v. 40, n. 3, p. 562, 1985.

CROPPER, M.; LLOYD, M. D.; EMMANS, G. C. Choice feeding as a method of determining lamb nutrient requirements and growth potential. **Animal Production**, Bletchley, v. 42, n. 2, p. 453-454, 1986.

CURTIS, S. E. **Environmental management in animal agriculture**. Ames, IA: The Iowa State University Press, 1983.

DALTRO, A. M. *et al.* Efeito do estresse térmico por calor na produção de vacas leiteiras. **Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, Porto Alegre, v. 26, n. 1, p. 288-311, 2020.

DHIMAN, T. R.; ZAMAN, M. S. Desafios dos sistemas de produção de leite em confinamento em condições de clima quente. *In: SIMPÓSIO DE NUTRIÇÃO E PRODUÇÃO DE GADO DE LEITE*, 2., 2001, Belo Horizonte. **Anais [...]**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2001. p. 5-20.

EMBRAPA GADO DE LEITE. **Anuário Leite 2023: leite baixo carbono**. Brasília, DF: Embrapa, 2023.

EMESIH, G. C.; NEWTON, G. R.; WEISE, D. W. Effects of heat stress and oxytocin on plasma concentrations of progesterone and 13,14-dihydro-15- ketoprostaglandin F2 in goats. **Small Ruminant Research**, Amsterdam, v. 16, n. 2, p. 133-139, 1995. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0921-4488\(95\)00629-Y](https://doi.org/10.1016/0921-4488(95)00629-Y). Acesso em: 30 jun. 2008.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). Sources of Greenhouse Gas Emissions. **Epa.gov**, Washington, 2025 Mar. 31. United States: 5 ago. 2022. Disponível em: <https://www.epa.gov/ghgemissions/sources-greenhouse-gas-emissions#agriculture>. Acesso em: 11 abr. 2025.

ERNSTMEYER, K.; CHRISTMAN, E. Fluids and electrolytes. *In: ERNSTMEYER, K.; CHRISTMAN, E. (ed.). Nursing fundamentals*. Eau Claire, WI: Chippewa Valley Technical College, 2021. p. 933-1028. Disponível em: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK591820/>. Acesso em: 29 maio 2025.

FERNANDES, V. R. *et al.* Secas e os impactos na região sul do Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, [s. l.], v. 28, p. 561-584, 2021. Disponível em: <https://ojs.ufgd.edu.br/rbclima/article/view/14748>. Acesso em: 11 jan. 2024.

FORBES, J. M. Dietary awareness. **Applied Animal Behaviour Science**, Amsterdam, v. 57, n. 3/4, p. 287-297, May 1998.

FORBES, J. M. Minimal total discomfort as a concept for the control of food intake and selection. **Appetite**, London, v. 33, n. 3, p. 371, Dec. 1999.

FREIRE, A. P. A. **Desempenho, características de carcaça, produção de metano e metabolismo ruminal em ovinos alimentados com dieta contendo nitrato de cálcio**. Tese (Doutorado em Ciência Animal e Pastagens) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Quieroz”, Piracicaba, 2015.

GU, F. F. *et al.* Comunicação breve: efeitos da adição dietética de N-carbamoilglutamato na composição do leite em vacas leiteiras em lactação média. **Journal of Dairy Science**, Champaign, Ill, v. 101, n. 12, p. 10985–10990, Dec. 2018.

HELAL, A. *et al.* Effect of heat stress on coat characteristics and physiological responses of Balady and Damascus goats in Sinai, Egypt. **American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences**, Faisalabad, v. 7, n. 1, p. 60-69, 2010. Disponível em: [http://www.idosi.org/aejaes/jaes7\(1\)/10.pdf](http://www.idosi.org/aejaes/jaes7(1)/10.pdf). Acesso em: 23 jan. 2011.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). PPM -Pesquisa da Pecuária Municipal. **ibge.gov.br**, Rio de Janeiro, 2022a. Disponível em:

<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9107-producao-da-pecuaria-municipal.html?edicao=37928>. Acesso em: 15 maio 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). PPM -Pesquisa da Pecuária Municipal. **ibge.gov.br**, Rio de Janeiro, 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9107-producao-da-pecuaria-municipal.html#:~:text=Em%202021%2C%20o%20rebanho%20bovino,224%2C6%20milh%C3%5es%20de%20cabe%C3%A7as>. Acesso em: 13 mar. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Tabulação especial do Censo Agropecuário 2017 de estabelecimentos de bovinos de corte com mais de 50 cabeças agregados por município**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Coordenação de Estatísticas Agropecuárias, 2022b.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). Normais climatológicas do Brasil. **Portal INMET**, Brasília, 2010. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/normais>. Acesso em: 13 mar. 2022.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2021: the physical science basis**. Cambridge: Cambridge University Press, 2021a. (Working Group I).

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Climate change widespread, rapid, and intensifying – IPCC. **IPCC**, Geneva, Aug. 9 2021b. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/2021/08/09/ar6-wg1-20210809-pr/>. Acesso em: 13 mar. 2023.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories: agriculture, forestry and other land use**. Geneva: IPCC, 2006. v. 4.

IRIADAN, M. Variation in certain hematological and biochemical parameters during the peri-partum period in kilis does. **Small Ruminant Research**, Amsterdam, v. 73, n. 1-3, p. 54–57, Nov. 2007.

JENKINSON, D. M.; MABON, R. M. Efeito da temperatura e da umidade no pH da superfície da pele e na composição iônica das secreções da pele em bovinos Ayrshire. **O Jornal Veterinário Britânico**, Londres, v. 129, n. 3, p. 282–295, May/June 1973.

JOHNSON, H. D. **Bioclimatology and adaptation of livestock**. Amsterdam: Elsevier, 1987.

JOHNSON, H. D. *et al.* **Effects of various temperature-humidity combinations on milk production of Holstein cattle**. Missouri: Missouri Agricultural Experimental Station, 1962. (Research Bulletin).

JOHNSON, K. A.; JOHNSON, D. E. Methane emissions from cattle. **Journal of Animal Science**, Champaign, Ill, v. 73, n. 8, p. 2483-2492, Aug. 1995.

KAUSHISH, S. K. *et al.* Effect of heat and water restriction on physiological responses of Beetal and Black Bengal goats. **Indian Journal of Animal Science**, Karnal, v. 57, n. 5, p. 461-65, 1987.

- KIM, W.-S. *et al.* Responses of beef calves to long-term heat stress exposure by evaluating growth performance, physiological, blood and behavioral parameters. **Journal of Thermal Biology**, Oxford, v. 100, p. 103033, Aug. 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0306456521002011>. Acesso em: 13 mar. 2022.
- KOLB, E. **Fisiologia veterinária**. 4. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1987.
- LEE, D. H. R. Climate stress indices for domestic animals. **International Journal of Biometeorology**, Leiden, v. 9, n. 1, p. 29-35, 1965.
- LEE, J. A.; ROUSSEL, J. D.; BEATTY, J. F. Effect of temperature season on bovine adrenal cortical function, blood cell profile, and milk production. **Journal of Dairy Science**, Champaign, Ill, v. 59, n. 1, p. 104-108, Jan. 1976.
- LEITE, A. E. de L. M. *et al.* Overview of the milk production chain in Brazil: development and perspectives. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**, São Paulo, v. 1, n. 3, p. 170-185, mar. 2023.
- LI, Y. *et al.* Respostas do microbiomametaboloma no conteúdo ruminal e nas fezes de vacas leiteiras em lactação com N-Carbamilglutamato Suplementação sob estresse térmico. **Frontiers in Veterinary Science**, Lausanne, v. 9, p. 902001, 2022. Disponível em: [10.3389/fvets.2022.902001](https://doi.org/10.3389/fvets.2022.902001). Acesso em: 13 mar. 2023.
- LIANG, H. *et al.* Dietary arginine affects the insulin signaling pathway, glucose metabolism and lipogenesis in juvenile blunt snout bream *Megalobrama amblycephala*. **Scientific Reports**, London, v. 7, n. 1, p. 7864, Aug. 2017.
- LIU, H. Y. *et al.* Effects of methionine and its ratio to lysine on expression of $\alpha s1$ casein gene in cultured bovine mammary epithelial cells. **Journal of Animal and Feed Sciences**, Jabłonna, v. 16, n. 2, p. 330–334, 2007. Supplement.
- LIU, Z. *et al.* N-Carbamoylglutamate supplementation on the digestibility, rumen fermentation, milk quality, antioxidant parameters, and metabolites of Jersey cattle in high-altitude areas. **Frontiers in Veterinary Science**, Lausanne, v. 9, p. 848912, Apr. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fvets.2022.848912>. Acesso em: 20 ago. 2022.
- LOOR, J. J. *et al.* Physiological impact of amino acids during heat stress in ruminants, **Animal Frontiers**, London, v. 13, n. 5, p. 69–80, Oct. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/af/vfad052>. Acesso em: 20 out. 2024.
- LOPES, A. C. R. **Ganho de peso e rendimento de carcaça de bovinos de corte confinados com acesso à sombra**. 2009. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2009.
- LOPES, L. B. *et al.* The influence of tree on the thermal environment and behaviour of grazing heifers in Brazilian Midwest. **Tropical Animal Health and Production**, Edinburgh, v. 48, n. 4, p. 755-761, Apr. 2016.

- LUDRI, R. S.; SARMA, P. V. Cortisol concentrations in the blood plasma of lactating Beetal goats and their crosses. **India Journal of Animal Science**, Karnal, v. 55, n. 6, p. 505-508, 1985.
- MA, N.; SZILAGYI, J.; ZHANG, Y. Calibration-free complementary relationship estimates terrestrial evapotranspiration globally. **Water Resources Research**, Washington, v. 57, n. 9, 2021WR029691, Sept. 2021.
- MACHADO, F. S. *et al.* **Emissões de metano na pecuária: conceitos, métodos de avaliação e estratégias de mitigação.** Juiz de Fora: Embrapa Gado de Leite, 2011.
- MACHADO, R. **Manejo reprodutivo em sistemas intensivos de produção leite.** São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 1999. (Embrapa Pecuária Sudeste. Circular Técnica, 20).
- MAGAÇO, F. dos S.; DUARTE, E. R. Interação microbiana e metanogênese em ruminantes – uma revisão. **Medicina Veterinária**, Recife, v. 13, n. 1, p. 88-95, jan./mar. 2019. Disponível em: <https://www.journals.ufrpe.br/index.php/medicinaveterinaria/article/view/2615>. Acesso em: 26 jan. 2025.
- MALAFAIA, C.; BISCOLA, P. H. N. **Anuário CiCarne da cadeia produtiva da carne bovina – 2023.** Campo Grande, MS: Embrapa Gado de Corte, 2023. (Documento, nº 314).
- MAPBIOMAS. Em 2023, a perda de áreas naturais no Brasil atinge a marca de 33% do território. **MapBiomas.org**, 21 ago. 2024. Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/2024/08/21/em-2023-a-perda-de-areas-naturais-no-brasil-atinge-a-marca-historica-de-33-do-territorio/>. Acesso em: 13 set. 2024.
- MARCOVITCH, J. **Para mudar o futuro: mudanças climáticas, políticas públicas e estratégias empresariais.** São Paulo: EDUSP, 2006.
- MARCUZZO, F. F. N.; CARDOSO, M. R. D.; FARIA, T. G. Chuvas no cerrado da região centro-oeste do Brasil: análise histórica e tendência futura. **Ateliê Geográfico**, Goiânia, v. 6, n. 2, p. 112-130, ago. 2012.
- MARQUES, J. A. I. **Curso de atualização por tutoria à distância atualização da produção de bovinos de corte.** Maringá: Universidade Estadual de Maringá, PR, 2001. p. 486–527.
- McGUIRE, M. A. *et al.* Effects of thermal stress and level of feed intake on portal plasma flow and net fluxes of metabolites in lactating Holstein cows. **Journal of Animal Science**, Champaign, v. 67, n. 4, p. 1050-1060, Apr. 1989.
- McNABB, F. M. A. Thyroid hormones, their activation, degradation and effects on metabolism. **The Journal of Nutrition**, Springfield, Ill, v. 125, n. 6, p. 1773S-1776S, 1995. Supplement. Disponível em: http://jn.nutrition.org/content/125/6_Suppl/1773S.full.pdf+html. Acesso em: 25 jan. 2011.
- MEDEIROS, L. F. D. *et al.* Avaliação de parâmetros fisiológicos de caprinos SPRD (sem padrão racial definido) pretos e brancos de diferentes idades, à sombra, no município do Rio de Janeiro. **Boletim de Indústria Animal**, Nova Odessa, v. 64, n. 4, p. 277-287, 2007. Disponível em: <http://www.iz.sp.gov.br/pdfsbia/1197566375.pdf>. Acesso em: 20 ago. 2008.

MENESES, J. A. M. *et al.* Heat stress promotes adaptive physiological responses and alters mRNA expression of ruminal epithelium markers in *Bos taurus indicus* cattle fed low-or high-energy diets. **Journal of Thermal Biology**, Oxford, v. 114, p. 103562, May 2023.

MESA BRASILEIRA DA PECUÁRIA SUSTENTÁVEL. Rebanho bovino do Brasil bateu novo recorde em 2023. **Clipping Notícias**, [s. l.], 19 set. 2024. Disponível em: <https://pecuariasustentavel.org.br/noticias/rebanho-bovino-do-brasil-bateu-novo-recorde-em-2023/>. Acesso em: 11 jan. 2024.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA. Mapa do leite: políticas públicas e privadas para o leite. **gov.br**, Brasília, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/producao-animal/mapa-do-leite>. Acesso em: 11 jan. 2024.

MOHAMMED, N. *et al.* Effects of ionophores, vitamin B6 and distiller's grains on in vitro tryptophan biosynthesis from indolepyruvic acid, and production of other related compounds by ruminal bacteria and protozoa. **Animal Feed Science and Technology**, Amsterdam, v. 116, n. 3-4, p. 301-311, Oct. 2004.

MORAES, S. A. de; COSTA, S. A. P.; ARAUJO, G. G. L. de. Nutrição e exigências nutricionais. In: VOLTOLINI, T. V. **Produção de caprinos e ovinos no Semiárido**. Petrolina: Embrapa Semiárido, 2011. p. 165-200. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/916912/nutricao-e-exigencias-nutricionais>. Acesso em: 12 abr. 2024.

MOREIRA, A. T. R. *et al.* O impacto da ação antrópica no meio ambiente: aquecimento global. **Revista Educação em Foco**, Belo Horizonte, n. 14, p. 22-27, 2022. Disponível em: <https://portal.unisepe.com.br/unifia/wpcontent/uploads/sites/10001/2022/06/O-IMPACTO-DA-AÇÃO-ANTRÓPICA-NOMEIO-AMBIENTE-AQUECIMENTO-GLOBAL-pág-22-a-27.pdf>. Acesso em: 28 jun. 2025.

NEIVA, R. Girolando incorpora PTA para tolerância ao estresse térmico no sumário. In: EMBRAPA GADO DE LEITE. **Anuário Leite 2023: leite baixo carbono**. Brasília, DF: Embrapa, 2023a. p. 111-113.

NEIVA, R. Pecuária brasileira reduz emissão de metano entérico por litro de leite. **Embrapa Notícias**, Brasília, 16 maio 2023b. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/80563726/pecuaria-brasileira-reduz-emissao-de-metano-enterico-por-litro-de-leite>. Acesso em: 11 jan. 2024.

NUNES, A. S. *et al.* Efeito de dois regimes de suplementação e dois sistemas de produção, nos constituintes sanguíneos de cabras Saanen durante a lactação. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 31, n. 3, p. 1245-1250, 2002. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rbz/v31n3/13077.pdf>. Acesso em: 28 jun. 2025.

OLIVEIRA, R. C. de. **SPERS: sistema de previsão de recessão em estiagem para o Rio Grande do Sul**. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Hídrica) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2024.

OLIVEIRA, V. da S. *et al.* Estratégias para mitigar a produção de metano entérico.

Veterinária Notícias, Uberlândia, v. 23, n. 1, p. 39-70, jan./abr. 2017. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php.vetnot/article/view/32380>. Acesso em: 5 jul. 2024.

PASSINI, R. *et al.* Estresse térmico sobre a seleção da dieta por bovinos. **Acta Scientiarum. Animal Sciences**, Maringá, v. 31, n. 3, p. 303-309, 2009.

PASSINI, R. *et al.* Estresse térmico sobre a seleção da dieta por bovinos. **Acta Scientiarum. Animal Sciences**, Maringá, v. 31, n. 3, p. 303-309, 2009.

PEREIRA, C. C. J. **Fundamentos de bioclimatologia aplicados à produção animal**. Belo Horizonte: FEPMVZ, 2005.

PINARELLI, C. The effect of heat stress on milk yield. **Latte**, Milano, v. 28, n. 2, p. 36-38, 2003.

PIRES, M. F. *et al.* A. Reflexos do estresse térmico no comportamento das vacas em lactação. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AMBIÊNCIA NA PRODUÇÃO DE LEITE, 1., 1998, Piracicaba. Produção de leite em clima quente. **Anais [...]**. Piracicaba: FEALQ, 1998. p. 68-102.

PRIMAVESI, O. *et al.* Metano entérico de bovinos leiteiros em condições tropicais brasileiras. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 3, p. 277-283, mar. 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2004000300011>. Acesso em: 30 jun. 2008.

REECE, W. O. **Fisiologia de animais domésticos**. São Paulo: Roca, 1996.

ROBERTO, J. V. B. *et al.* Parâmetros hematológicos de caprinos de corte submetidos a diferentes níveis de suplementação no semi-árido paraibano. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 23, n. 1, p. 127-132, jan./mar. 2010.

RODRIGUES, E. Processos de transmissão de calor. In: RODRIGUES, E. **Conforto térmico das construções**. São José: Instituto Federal Santa Catarina, 2005. p. 3-27. Disponível em: <http://ead.sitescola.com.br/arquivo/documento/homeotermia.pdf>. Acesso em: 12 mar. 2024.

SALLES, M. G. F. **Parâmetros fisiológicos e reprodutivos de machos caprinos Saanen criados em clima tropical**. 2010. Tese (Doutorado em Ciências Veterinárias) – Curso de Pós-graduação em Ciências Veterinárias, Universidade Estadual do Ceará, Ceará, 2010.

SANO, E. E. *et al.* Características gerais da paisagem do Cerrado. *Dinâmica Agrícola no Cerrado*. [s.l: s.n.]. v. 1, p. 21-37.

SCHOLZ, M. C. **Litigância climática e a implementação das contribuições nacionalmente determinadas do Acordo de Paris pelo Brasil: uma análise a partir da abordagem ecossistêmica**. 2020. Tese (Doutorado em Direito) – Centro de Ciências Jurídicas, Programa de Pós Graduação em Direito, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2020.

SILANIKOVE, N. Effects of heat stress on the welfare of extensively managed domestic ruminants. **Livestock Production Science**, Amsterdam, v. 67, n. 1-2, p. 1-18, Dec. 2000.

Disponível em: <http://www.journals.elsevierhealth.com/periodicals/livest/article/PIIS0301622600001627/abstract>. Acesso em: 12 set. 2009.

SILVA, E. M. N. da *et al.* Avaliação da adaptabilidade de caprinos exóticos e nativos no semi-árido paraibano. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 30, n. 3, p. 516-521, maio/jun. 2006. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/cagro/v30n3/v30n3a18.pdf>. Acesso em: 23 ago. 2008.

SILVA, F. J. S. **Propostas de seleção para redução da produção de gases de efeito estufa em bovinos de corte**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Zootecnia) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2023a.

SILVA, G. de A. *et al.* Efeito das épocas do ano e de turno sobre os parâmetros fisiológicos e seminais de caprinos no Semi-Árido Paraibano. **Agropecuária Científica no Semi-Árido**, Patos, v. 1, n. 1, p. 7-14, 2005. Disponível em: <https://www.acsa.revistas.ufcg.edu.br/acsa/index.php/ACSA/article/view/7/pdf>. Acesso em: 20 ago. 2008.

SILVA, J. C. P. M. da *et al.* **Bem-estar do gado leiteiro: a importância do conforto térmico para o alto desempenho do gado**. Guaíba: Aprenda Fácil, 2012.

SILVA, J. M. **Os efeitos da crise econômica de 2014-2020 sobre a estrutura produtiva do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba: uma análise dos principais municípios da região**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciências Econômicas) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2023b.

SILVA, L. D. *et al.* O clima no bioma cerrado. In: SILVA, L. D. *et al.* (org.). **Sistema de informações para planejamento florestal no cerrado brasileiro**. Piracicaba: ESALQ/USP, 2021. v. 2, cap. 2, p. 12-29. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1137058/1/PL-Clima-cerrado-v2-cap2-2021.pdf>. Acesso em: 13 mar. 2025.

SILVA, R. G. **Introdução à bioclimatologia animal**. São Paulo: Nobel, 2000.

SILVA, S. V. *et al.* Efeito das condições reprodutivas e climáticas na produção de embriões de cabras Boer superovuladas. **Ciência Animal Brasileira**, Goiânia, v. 11, n. 3, p. 570-575, jul./set. 2010. Disponível em: <http://www.revistas.ufg.br/index.php/vet/article/view/5122>. Acesso em: 20 jan. 2011.

SILVA, T. P. D. e *et al.* Efeito da exposição à radiação solar sobre parâmetros fisiológicos e estimativa do declínio na produção de leite de vacas mestiças (Holandês X Gir) no sul do estado do Piauí. **Comunicata Scientiae**, Piauí, v. 3, n. 4, p. 299–305, 2012.

SIMPLÍCIO, A. A. *et al.* Manejo reprodutivo de caprinos em regiões tropicais. In: CAPRINOCULTURA E OVINOCULTURA, 1990, Piracicaba. **Anais [...]**. Piracicaba: FEALQ, 1990. p. 34-56.

SISTEMA DE ESTIMATIVAS DE EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA (SEEG). Conheça as emissões de gases de efeito estufa do Brasil. **Comunidade do SEEG**, Piracicaba, 2023. Disponível em: www.seeg.eco.br/. Acesso em: 29 abr. 2024.

SLIMEN, I. B. *et al.* Heat stress effects on livestock: molecular, cellular and metabolic aspects, a review. **Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition**, [Berlin], v. 100, n. 3, p. 401-412, June 2016.

SMEDMAN, A. *et al.* Nutrient density of beverages in relation to climate impact. **Food & Nutrition Research**, Bålsta, v. 54, p. 5170- 577, Aug. 2010.

SOARES FILHO, G.; McMANUS, C.; MARIANTE, A. da S. Fatores genéticos e ambientais que influenciam algumas características de reprodução e produção de leite em cabras no Distrito Federal. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 30, n. 1, p. 133-140, 2001. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/rbz/v30n1/5445.pdf>. Acesso em: 15 maio 2025.

SOUZA, B. B. de; BATISTA, N. L. Os efeitos do estresse térmico sobre a fisiologia animal. **Agropecuária Científica no Semiárido**, Campina Grande, v. 8, n. 3, p. 6-10, jul./set. 2012.

SOUZA, B. B. de *et al.* Efeito do clima e da dieta sobre os parâmetros fisiológicos e hematológicos de cabras da raça saanen em confinamento no sertão paraibano. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, Pombal, v. 6, n. 1, p. 77–82 jan./mar. 2011.

SOUZA, B. B. de *et al.* Temperatura superficial e índice de tolerância ao calor de caprinos de diferentes grupos raciais no semi-árido paraibano. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 1, p. 275-280, jan./fev. 2008. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/cagro/v32n1/a39v32n1.pdf>. Acesso em: 12 set. 2009.

SOUZA, E. D. de *et al.* Determinação dos parâmetros fisiológicos e gradiente térmico de diferentes grupos genéticos de caprinos no Semi-Árido. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 29, n. 1, p. 177-184, jan./fev. 2005.

SOUZA, R. de *et al.* Produção e qualidade do leite de vacas da raça Holandesa em função da estação do ano e ordem de parto. **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal**, Salvador, v. 11, n. 2, p. 484-495, 2010.

TAPIO, I. *et al.* The ruminal microbiome associated with methane emissions from ruminant livestock. **Journal of Animal Science and Biotechnhnology**, London, v. 8, n. 7, p. 1-11, 2017.

THE EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL (EPC). Directive 1999/96/EC of the European Parliament and of the Council of 13 December 1999 on the approximation of the laws of the Member States relating to measures to be taken against the emission of gaseous and particulate pollutants from compression ignition engines for use in vehicles, and the emission of gaseous pollutants from positive ignition engines fuelled with natural gas or liquefied petroleum gas for use in vehicles and amending Council Directive 88/77/EEC. **Official Journal**, Bruxelas, L. 044, p. 1-155, 16 Feb. 2000.

THORNTON, P. K. Livestock production: recent trends, future prospects. **Philosophical Transactions**, London, v. 365, n. 1554, p. 2853-2867, 2010.

THORPE, A. Enteric fermentation and ruminant eructation: the role (and control?) of methane in the climate change debate. **Climatic Change**, Dordrecht-Holland, v. 93, p. 407-431, 2009.

THRALL, M. A. **Hematologia e bioquímica clínica veterinária**. São Paulo: Roca, 2007.

TSAI, D. *et al.* **Análise das emissões brasileiras de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil: 1970-2022**. Brasília, DF: Observatório do Clima, 2023.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA). 2020. Disponível em: <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/app/index.html#/app/%0AadvQuery>.

VALADARES FILHO, S. C.; PINA, D. S. Fermentação ruminal. *In*: BERCHIELLI, T. T.; PIRES, A. V.; OLIVEIRA, S. G. (ed.). **Nutrição de ruminantes**. Jaboticabal: Funep, 2006. p. 151-182.

VASCONCELOS, Y.; ZAPAROLLI, D. O esforço do Brasil para reduzir a pegada de carbono da pecuária. **Pesquisa FAPESP**, São Paulo, n. 314, 25 maio 2022. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/o-esforco-do-brasil-para-reduzir-a-pegada-de-carbono-da-pecuaria/>. Acesso: 10 out. 2023.

VITOR NETO, O. **Interferência do estresse térmico na reprodução e produção de bovinos de leite em ambiente de domínio de cerrado**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) – Faculdade Evangélica de Goianésia, Goianésia, 2017.

WEST, J. W. Effects of hot, humid weather on milk temperature, dry matter intake, and milk yield of lactating dairy cows. **Journal of Dairy Science**, Champaign, Ill, v. 86, n. 6, p. 2131-2144, June 2003.

WU, G. *et al.* Board-invited review: arginine nutrition and metabolism in growing, gestating, and lactating swine. **Journal of Animal Science**, Champaign, IL, v. 96, n. 12, p. 5035-5051, Nov. 2018.

YANG, J. *et al.* Effects of dietary N-Carbamylglutamate on growth performance, apparent digestibility, nitrogen metabolism and plasma metabolites of fattening holstein bulls. **Animais**, Basel, v. 11, n. 1, p. 126, Jan. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ani11010126>. Acesso em: 13 mar. 2022.

ZAMBOM, M. A. *et al.* Curva de lactação e qualidade do leite de cabras Saanen recebendo rações com diferentes relações volumoso: concentrado. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 34, n. 6, p. 2515-2521, 2005. Suplemento.

ZHANG, Q. *et al.* Effects of inclusion of N-carbamylglutamate in the non-protein diet on growth and slaughter performance, meat quality, nitrogen metabolism and antioxidant of holstein bulls. **Animais**, Basel, v. 12, n. 1, p. 33, Dec. 2021.

ZHU, J. *et al.* Effects of dietary N-carbamylglutamate on rumen fermentation parameters, and bacterial community diversity of Holstein dairy cows in Tibet. **Frontiers in Microbiology**, Lausanne, v. 14, 1101620, May 2023. Disponível em:

<https://www.frontiersin.org/journals/microbiology/articles/10.3389/fmicb.2023.1101620/full>.
Acesso em: 29 maio 2025.

ZOTTI, C. A.; PAULINO, V. T. **Metano na produção animal:** emissão e minimização de seu impacto. Nova Odessa: Instituto de Zootecnia, 2009.