



Programa de Pós-Graduação em Zootecnia

**HISTÓRICO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA
REGIÃO SEMIÁRIDA E IMPACTO SOBRE A
PRODUÇÃO DE LEITE E CARNE**

OFERÊNCIA ALBINO NHALUMBA

2025

OFERÊNCIA ALBINO NHALUMBA

Histórico das mudanças climáticas na região semiárida e impacto sobre a produção de leite e carne

Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Montes Claros como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Zootecnia, área de concentração em Zootecnia no Semiárido, para obtenção do título de Mestre.

Orientadora

DSc. Cinara da Cunha Siqueira Carvalho

**Janaúba
2025**

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

Nhalumba, Oferência Albino

N576h Histórico das mudanças climáticas na região semiárida e impacto sobre a produção de leite e carne [manuscrito] / Oferência Albino Nhalumba – 2025.
57 p.

Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Zootecnia, Universidade Estadual de Montes Claros – Janaúba, 2025.

Orientadora: Prof^a. D. Sc. Cinara da Cunha Siqueira Carvalho.

1. Conforto térmico. 2. Mudanças climáticas. 3. Leite Produção. 4. Produção animal. 5. Região semiárida. I. Carvalho, Cinara da Cunha Siqueira. II. Universidade Estadual de Montes Claros. III. Título.

CDD. 637.14

Catálogo: Joyce Aparecida Rodrigues de Castro Bibliotecária CRB6/2445

Montes Claros, 10 de novembro de 2025.

OFERÊNCIA ALBINO NHALUMBA

HISTÓRICO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS NA REGIÃO SEMIÁRIDA E IMPACTO SOBRE A PRODUÇÃO DE LEITE E CARNE

Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Montes Claros como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Zootecnia, área de concentração em Zootecnia no Semiárido, para obtenção do título de Mestre em Zootecnia.

APROVADA em 29 de SETEMBRO de 2025.

Dra. Cinara da Cunha Siqueira Carvalho/ Presidente/ UNIMONTES

Dr. Flávio Pinto Monção/ Membro Interno/ UNIMONTES

Dr. Vicente Ribeiro Rocha Júnior/Membro Interno/UNIMONTES

Dr. André Santos de Souza/Membro Interno/UNIMONTES

Dra. Edilane Costa Martins/ Membro Externo/ Oregon State University

JANAÚBA, MINAS GERAIS – BRASIL/2025



Documento assinado eletronicamente por **Cinara da Cunha Siqueira Carvalho**, Professor(a), em 10/11/2025, às 09:46, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 47.222, de 26 de julho de 2017](#).



Documento assinado eletronicamente por **Flávio Pinto Monção**, Professor(a), em 10/11/2025, às 11:06, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 47.222, de 26 de julho de 2017](#).



Documento assinado eletronicamente por **André Santos De Souza registrado(a) civilmente como André Santos de Souza, Usuário Externo**, em 10/11/2025, às 12:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 47.222, de 26 de julho de 2017](#).



Documento assinado eletronicamente por **Edilane Costa Martins, Usuário Externo**, em 16/11/2025, às 16:22, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 47.222, de 26 de julho de 2017](#).



Documento assinado eletronicamente por **Vicente Ribeiro Rocha Junior, Professor(a)**, em 18/11/2025, às 14:01, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 47.222, de 26 de julho de 2017](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.mg.gov.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **126979068** e o código CRC **7BCB23C0**.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus pela força e serenidade concedidas em cada dia desta caminhada. Foi Sua presença constante que me sustentou nas horas de incerteza e me inspirou a seguir com fé, coragem e esperança.

Aos meus pais, Albino Nhalumba e Laurinda Vilanculo, registro meu profundo reconhecimento pelo amor, pelos ensinamentos e pelo apoio incondicional em todos os momentos da minha vida. São exemplos de honestidade, sabedoria e dedicação, valores que me guiaram nesta jornada.

À minha família, que é meu alicerce, deixo gratidão especial ao meu tio Arlindo Nhalumba, ao meu esposo Jaime Mariano Daipa, e aos meus filhos Yurla, Jaime e Jamila, cuja presença e carinho me deram força para continuar quando o cansaço tentou prevalecer. Estendo também meu agradecimento aos meus irmãos, primos e sobrinhos, por cada gesto de incentivo e palavra de apoio ao longo deste percurso.

À minha orientadora, Prof.^a Dr.^a Cinara da Cunha Siqueira Carvalho, manifesto minha sincera admiração pela dedicação, paciência e compromisso em cada orientação. Sua sensibilidade, rigor científico e incentivo constante foram fundamentais para a construção deste trabalho e para o meu crescimento pessoal e acadêmico.

Ao Prof. Dr. Flávio Pinto Monção, expresso meus agradecimentos pelo companheirismo, pela disponibilidade e pelas valiosas contribuições, que enriqueceram tanto o conteúdo científico quanto a minha formação como pesquisadora.

Agradeço também à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG: TO - 4823-24) pelo apoio financeiro, que tornou possível a realização desta pesquisa e pela confiança depositada em meu potencial acadêmico.

Por fim, deixo meu sincero agradecimento a todos que, de alguma forma, contribuíram para a concretização desta importante etapa da minha vida. Cada gesto, palavra e presença tiveram significado profundo nesta conquista que levo comigo com gratidão e humildade.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	9
LISTA DE TABELAS	9
NORMAS DA REVISTA CIENTÍFICA	10
RESUMO GERAL.....	11
ABSTRACT GERAL	13
1. INTRODUÇÃO GERAL.....	14
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1 Dados climáticos e sua importância na produção animal	15
2.2 Impacto do clima sobre o comportamento ingestivo e a produção de leite.....	19
2.3 Impacto do clima sobre o desempenho produtivo da pecuária de corte	21
2.4 Meta-análise aplicada à relação entre clima e produção de leite e carne	22
3. REFERÊNCIAS	25
4. CAPÍTULO 1 Histórico das mudanças climáticas na região semiárida e impacto sobre a produção de leite e carne	30
RESUMO	30
ABSTRACT	31
4.1 INTRODUÇÃO	31
4.2 MATERIAL E MÉTODOS	33
4.2.1 Coleta e análise de banco de dados para composição da meta-análise	33
4.2.2 Série histórica da produção de leite e carne bovina no semiárido mineiro (2014 - 2023)	34
4.2.3 Obtenção e processamento dos dados climatológicos	35
4.2.4 Análise estatística	35
4.3 RESULTADOS.....	37
4.3.1 Variáveis e Índices Climáticos (2014 - 2024)	37

4.3.2 Produção Anual de Leite e Carne Bovina (2014 - 2023).....	38
4.3.3 Relação entre Ciclos Climáticos, Precipitação e Produção Pecuária (2014 - 2024)	39
4.3.4 Análise Multivariada.....	41
4.3.4.1 Análise de Componentes Principais (ACP)	41
4.3.4.2 Cargas Fatoriais das Variáveis nos Componentes Principais (PC1 e PC2).....	41
4.3.4.3 Biplot da Análise de Componentes Principais (PC1 × PC2)	42
4.3.4.4 Agrupamento dos anos com base nas variáveis climáticas (Dendrograma)	44
4.3.5 Relação entre produção de leite e clima.....	46
4.4 DISCUSSÃO.....	46
4.5 CONCLUSÃO.....	51
4.6 REFERÊNCIAS.....	53
4.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	57

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Relação entre os ciclos climáticos, precipitação (mm) e a produção de leite e carne registrados nos últimos 10 anos no semiárido mineiro	40
Figura 2	Biplot dos Componentes Principais com variáveis e anos (2014 - 2024)	43
Figura 3	Dendrograma de similaridade entre os anos com base nas variáveis climáticas (2014 – 2024)	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Médias anuais de variáveis climáticas e índices de conforto térmico no semiárido mineiro, no período de 2014 a 2024	37
Tabela 2	Produção anual estimada de leite e de carne bovina no semiárido mineiro entre 2014 e 2023	38
Tabela 3	Autovalores e variância explicada (%) pelos componentes principais	41
Tabela 4	Cargas fatoriais das variáveis climáticas nos dois primeiros componentes principais (PC1 e PC2)	42

NORMAS DA REVISTA CIENTÍFICA

Esta dissertação segue as premissas básicas da Revista Brasileira de Zootecnia (RBZ).

Link: <https://rbz.org.br/>

RESUMO GERAL

NHALUMBA, Oferência Albino. **Histórico das mudanças climáticas na região semiárida e impacto sobre a produção de leite e carne.** 2025. 57 p. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) - Universidade Estadual de Montes Claros, Janaúba, Minas Gerais, Brasil.

As mudanças climáticas têm impactado a produção vegetal/animal em diversas regiões do mundo. Contudo, ainda existem lacunas no conhecimento sobre os efeitos dessas mudanças na região semiárida, especialmente sobre a produção de bovinos. Assim, este trabalho teve como objetivo avaliar a influência histórica do clima sobre a produção de leite e carne na região por meio de uma abordagem multivariada. Foram utilizadas variáveis climáticas (temperatura do ar, umidade relativa, radiação solar global e velocidade do vento) disponibilizadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) entre 2014 e 2024, a partir das quais se calcularam indicadores de conforto térmico, como o Índice de Temperatura e Umidade (ITU) e a entalpia específica do ar. Os dados de produção leiteira foram obtidos no *Anuário do Leite* da EMBRAPA, e as informações sobre bovinos de corte foram estimadas a partir de estatísticas do IBGE e da SEAPA-MG. A análise estatística, realizada por meio da Análise de Componentes Principais (ACP) e da Análise de Cluster (agrupamento), revelou que os dois primeiros componentes explicaram 76,36% da variância total dos dados. O primeiro componente principal (PC1), responsável por 51,36%, esteve fortemente associado à temperatura do ar e à umidade relativa, refletindo o efeito direto da carga térmica e do estresse por calor sobre os animais. O segundo componente (PC2), que explicou 25,00%, relacionou-se à radiação solar global e à velocidade do vento, representando o balanço energético e a ventilação do ambiente. Durante os anos de El Niño (2015 e 2016), observou-se elevação dos valores médios de ITU (>78) e de entalpia ($>85 \text{ kJ kg}^{-1}$), acompanhada de reduções na produção de leite (-14%) e carne ($-16,7\%$). Já em períodos de La Niña (2020 e 2021), condições térmicas mais amenas favoreceram a recuperação produtiva, com aumentos de 23% na produção de leite e 44% na de carne. Esses resultados evidenciam a maior vulnerabilidade da pecuária leiteira ao estresse térmico e reforçam a importância de estratégias de manejo adaptativas e sustentáveis, além do monitoramento contínuo das variáveis climáticas, como forma de fortalecer a resiliência produtiva no semiárido mineiro.

Palavras-chave: Conforto térmico; Entalpia; Índices bioclimáticos; Produção animal; Análise multivariada; Resiliência produtiva.

ABSTRACT GERAL

NHALUMBA, Oferência Albino. **Historical changes in climate in the semiarid region and their impact on milk and beef production.** 2025. 57 p. Dissertation (Master's Degree in Animal Science) - Universidade Estadual de Montes Claros, Janaúba, Minas Gerais, Brazil.

Climate change has affected both plant and animal production in several regions of the world. However, knowledge gaps still remain regarding its effects in semi-arid regions, particularly on cattle production. Therefore, this study aimed to evaluate the historical influence of climate on milk and beef production in the region through a multivariate approach. The climatic variables - air temperature, relative humidity, global solar radiation, and wind speed - were obtained from the Brazilian National Institute of Meteorology (INMET) for the period from 2014 to 2024. From these variables, thermal comfort indicators were calculated, including the Temperature-Humidity Index (THI) and the specific air enthalpy. Milk production data were obtained from EMBRAPA's *Anuário do Leite*, and beef cattle production data were estimated using statistics from IBGE and SEAPA-MG. Statistical analysis, performed using Principal Component Analysis (PCA) and Cluster Analysis (grouping), revealed that the first two components explained 76.36% of the total variance in the data. The first principal component (PC1), which accounted for 51.36% of the variance, was strongly associated with air temperature and relative humidity, reflecting the direct effect of heat load and thermal stress on animals. The second component (PC2), which explained 25.00%, was related to global solar radiation and wind speed, representing the environmental energy balance and ventilation conditions. During El Niño years (2015 - 2016), higher mean THI (>78) and enthalpy ($>85 \text{ kJ kg}^{-1}$) values were observed, accompanied by reductions in milk (-14%) and beef (-16.7%) production. Conversely, during La Niña years (2020 - 2021), milder thermal conditions favored productive recovery, with increases of 23% in milk and 44% in beef production. These findings highlight the greater vulnerability of dairy cattle to heat stress and reinforce the importance of adaptive and sustainable management strategies, as well as continuous monitoring of climatic variables, to strengthen productive resilience in the semi-arid region of Minas Gerais.

Keywords: Thermal comfort; Enthalpy; Bioclimatic indices; Animal production; Multivariate analysis; Productive resilience.

1. INTRODUÇÃO GERAL

A bovinocultura desempenha papel estratégico para a economia, a segurança alimentar e o desenvolvimento social de Minas Gerais, estado que se destaca como um dos principais polos da pecuária brasileira. A atividade está presente em todas as regiões mineiras, adaptando-se às diferentes condições edafoclimáticas e organizando-se tanto em sistemas intensivos, com elevada tecnologia, quanto em sistemas extensivos, de menor uso tecnológico (Emater, 2025).

A pecuária, nas modalidades leiteira e de corte, constitui uma das bases da agropecuária mineira. Minas Gerais ocupa a liderança nacional na produção de leite, respondendo por aproximadamente 27% do volume total produzido no país e está entre os cinco maiores produtores de carne bovina do Brasil (Embrapa, 2024). Essas atividades exercem papel essencial na economia rural, promovendo emprego, renda e inclusão produtiva, sobretudo em pequenas propriedades, nas quais a bovinocultura se associa ao manejo familiar e à diversificação agrícola (SILVEIRA et al., 2022). Entretanto, ambas as cadeias enfrentam desafios relacionados à variabilidade climática e às limitações impostas pelas condições edafoclimáticas do semiárido mineiro (Emater, 2025).

Nessa região, o clima é caracterizado por baixa pluviosidade anual, entre 600 e 900 mm, temperaturas médias elevadas, variando de 25 °C a 32 °C, e alta radiação solar, frequentemente acima de 20 MJ m⁻² dia⁻¹ (INMET, 2024). Essas condições intensificam o estresse térmico em bovinos, sobretudo em vacas leiteiras, mais sensíveis às variações de temperatura e umidade. Esse estresse compromete o equilíbrio térmico corporal, reduz o consumo de matéria seca e afeta a eficiência alimentar e reprodutiva, resultando em menores índices produtivos (Cheng et al., 2022; Polsky e von Keyserlingk, 2017). Alterações comportamentais, como redução no tempo de alimentação e ruminação e aumento no tempo de ócio, estão diretamente associadas a altos valores de Índice de Temperatura e Umidade (ITU) e de Índice de Temperatura de Globo e Umidade (ITGU), o que evidencia o impacto negativo do ambiente sobre o desempenho zootécnico (Silva et al., 2024).

Na pecuária de corte, os efeitos do clima manifestam-se principalmente por meio da redução da disponibilidade e qualidade das pastagens, o que limita o ganho médio diário de peso e a taxa de lotação. Durante períodos prolongados de seca, a forragem disponível não supre as exigências nutricionais dos animais, reduzindo a produtividade e afetando a

qualidade da carcaça (Amaral et al., 2024). Esses impactos tornam-se mais severos em anos de El Niño, caracterizados por estiagens prolongadas e aumento das temperaturas, enquanto períodos de La Niña, marcados por maior pluviosidade, favorecem a recuperação das pastagens e promovem melhores índices produtivos e reprodutivos.

Diante dessas condições, torna-se essencial compreender a interação entre variabilidade climática, recursos forrageiros e desempenho produtivo, de forma a subsidiar estratégias de manejo adaptativas. A análise de séries históricas de dados climatológicos é uma ferramenta importante para identificar padrões ambientais e orientar decisões de manejo. O uso de técnicas estatísticas multivariadas, como a Análise de Componentes Principais (ACP) e a Análise de Cluster, permite sintetizar variáveis climáticas correlacionadas e revelar os principais vetores de risco para a pecuária regional (Menéndez-Buxadera et al., 2021, Novara et al., 2025). A meta-análise surge como uma abordagem robusta ao integrar resultados de diferentes estudos, aumentando a precisão e a confiabilidade das inferências sobre a relação entre clima e produção animal (Azevedo et al., 2024; Luiz, 2002).

A adoção de ferramentas como o zoneamento bioclimático e a previsão de eventos climáticos extremos (El Niño/La Niña) possibilita o planejamento estratégico da produção. A integração dessas informações orienta a aplicação de medidas preventivas de manejo, como sombreamento natural ou artificial, climatização de instalações, suplementação nutricional e o uso de genótipos mais adaptados ao calor, garantindo maior bem-estar e produtividade dos animais (Fournel et al., 2017; Guimarães et al., 2020; Reis et al., 2021; Silva et al., 2024).

Diante desse cenário, este trabalho teve como objetivo avaliar a influência histórica do clima sobre a produção de leite e carne na região semiárida de Minas Gerais, por meio de uma abordagem multivariada. Buscou-se compreender como as variações climáticas afetam o desempenho produtivo dos bovinos e gerar informações que subsidiem estratégias de manejo adaptativo e sustentável na pecuária regional.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Dados climáticos e sua importância na produção animal

Os dados climáticos correspondem a registros sistemáticos de variáveis meteorológicas, como temperatura do ar, umidade relativa, radiação solar direta e difusa, velocidade do vento e precipitação pluviométrica. A análise integrada dessas variáveis é

essencial para compreender os padrões ambientais ao longo do tempo e orientar decisões de manejo mais eficientes e adaptativas (Dikmen e Hansen, 2009; Tazzo et al., 2024). Em regiões tropicais e semiáridas, como o norte de Minas Gerais, o acompanhamento dessas informações é indispensável, pois permite planejar a produção forrageira, ajustar o calendário produtivo e adotar estratégias preventivas frente a eventos extremos, como secas e ondas de calor (Ferreira et al., 2024; Oliveira et al., 2018; Silva et al., 2012; Thornton et al., 2021).

Entre as variáveis meteorológicas, a precipitação e a temperatura do ar exercem papel central na sustentabilidade da pecuária. A região semiárida mineira caracteriza-se por médias anuais de temperatura entre 24 °C e 28 °C, com picos superiores a 35 °C nos meses mais quentes, e precipitação média inferior a 800 mm, concentrada em poucos meses do ano (INMET, 2024). Esse regime irregular de chuvas afeta diretamente a disponibilidade de forragem e água, tornando os sistemas produtivos altamente dependentes de estratégias de manejo adaptativo (Cheng et al 2022; Reis et al., 2021; Silveira et al., 2022; von Keyserlingk et al., 2017).

A análise de séries históricas de dados climáticos possibilita identificar zonas agroclimáticas e antecipar a adoção de medidas mitigadoras em casos de anomalias ambientais, como estiagens ou enchentes. O monitoramento contínuo dessas variáveis, especialmente em registros de longo prazo, é fundamental para prever riscos e planejar estratégias que aumentem a resiliência dos sistemas produtivos (Reis et al., 2021; Tazzo et al., 2024). A integração entre dados meteorológicos e informações produtivas tem se mostrado uma ferramenta estratégica para o planejamento agropecuário, pois amplia a capacidade de adaptação dos rebanhos às variações ambientais e reduz os prejuízos econômicos associados ao clima (Amaral et al., 2024).

Em regiões tropicais e semiáridas, fenômenos como El Niño e La Niña modificam substancialmente os regimes de temperatura e pluviosidade, afetando a disponibilidade de pastagens e o desempenho zootécnico dos animais. Nesses contextos, índices bioclimáticos, como o Índice de Temperatura e Umidade (ITU) e a Entalpia Específica do Ar, tornam-se essenciais para avaliar as condições térmicas do ambiente e estimar o grau de desconforto térmico a que os animais estão submetidos (Dikmen e Hansen, 2009; Guimarães et al., 2020; Silva et al., 2012; Thornton et al., 2021).

O ITU é um indicador combinado que integra os efeitos simultâneos da temperatura do ar (°C) e da umidade relativa (%) sobre o conforto térmico dos animais (Dikmen e Hansen,

2009; Fournel et al., 2017; Thornton et al., 2021). Para vacas leiteiras, valores acima de 70 pontos já indicam estresse térmico leve (71 - 78). O estresse evolui para severo (79 - 83), e torna-se crítico (≥ 84) conforme o aumento do calor (Guimarães et al., 2020 e Tazzo et al., 2024). Nessa condição, observa-se redução no consumo de matéria seca, queda na produção de leite e alterações fisiológicas como aumento da frequência respiratória e da temperatura retal (Silva e Passini et al., 2017). Bovinos de corte, sobretudo raças zebuínas como Nelore e Guzará, apresentam maior tolerância, suportando valores de ITU próximos de 75 pontos antes da manifestação de sinais mais evidentes de desconforto térmico (Cheng et al., 2022; Dikmen e Hansen, 2009; Pereira et al., 2018; Silva et al., 2024). Essa diferença entre aptidões leiteiras e de corte reflete não apenas o metabolismo, mas também adaptações genéticas que conferem maior resistência ao calor, aspecto crucial para o melhoramento e manejo no semiárido (Seijan et al., 2018; Silva et al., 2024).

A Entalpia Específica do Ar, por sua vez, representa o conteúdo total de energia do ar úmido, resultante da soma da energia sensível (temperatura) e da energia latente (umidade). Esse parâmetro expressa a carga térmica imposta ao animal e fornece uma avaliação mais completa do estresse ambiental, uma vez que a alta umidade relativa dificulta a dissipação de calor e agrava o desconforto térmico (Dikmen e Hansen, 2009). A utilização da entalpia como indicador tem se mostrado eficiente na caracterização de ambientes de criação, permitindo avaliar o desempenho de práticas como sombreamento natural ou artificial, ventilação forçada e resfriamento evaporativo (Fournel et al., 2017; Polsky, e von Keyserlingk, 2017).

Quando submetidos a condições de calor excessivo, os bovinos apresentam redução da homeotermia, aumento da frequência respiratória e da temperatura corporal interna, e diminuição no consumo alimentar e na eficiência reprodutiva. Esse desequilíbrio fisiológico compromete o bem-estar e a produtividade, podendo elevar a mortalidade em situações de estresse severo (Cheng et al., 2022; Dikmen e Hansen, 2009).

Diante das projeções de aquecimento global, compreender as relações entre clima e desempenho animal torna-se essencial para a segurança alimentar. Cheng et al. (2022) destacam que as mudanças climáticas impactam diretamente a pecuária e que as medidas de adaptação devem ser ajustadas às condições locais, ao manejo e à genética dos animais. Estratégias de mitigação, como a redução das emissões de gases de efeito estufa, o uso eficiente da água e da energia, e a adoção de sistemas integrados e sustentáveis de produção, são fundamentais para aumentar a resiliência da pecuária e reduzir sua vulnerabilidade

ambiental (Ferreira et al., 2024). O Quadro 1 resume os limites do ITU utilizados para classificar os diferentes níveis de estresse térmico em bovinos leiteiros e de corte.

Quadro 1 - Limites do Índice de Temperatura e Umidade (ITU) para diferentes níveis de estresse térmico em bovinos leiteiros e de corte

CLASSIFICAÇÃO	ITU	DESCRIÇÃO
Conforto térmico	≤ 70	Os animais encontram-se em equilíbrio térmico, mantendo o metabolismo basal e a temperatura corporal dentro da faixa de conforto, sem necessidade de mecanismos adicionais de dissipação de calor.
Estresse térmico leve	71 – 78	Nesta faixa, inicia-se o desconforto térmico. Entre 71 - 75 (atenção) e 75 - 78 (alerta), há leve aumento da frequência respiratória e redução gradual do consumo de matéria seca, podendo refletir em pequena queda na produção de leite.
Estresse térmico severo	79 – 83	Situação de perigo: os animais apresentam sinais fisiológicos evidentes de estresse térmico, como aumento da temperatura retal, sudorese e queda expressiva na produtividade.
Estresse térmico crítico	≥ 84	Condição crítica: o animal perde a capacidade de manter a homeotermia, com risco elevado à saúde, à eficiência reprodutiva e à sobrevivência em casos extremos.

Fonte: Adaptado de Guimarães et al. (2020) e Tazzo et al. (2024).

A partir dos limites apresentados no Quadro 1, observa-se que os bovinos leiteiros são mais sensíveis ao calor, manifestando sinais de desconforto térmico em faixas de ITU mais baixas, enquanto os bovinos de corte, especialmente as raças zebuínas, mostram maior resistência às altas temperaturas. Essa diferença está relacionada às características genéticas e fisiológicas de cada grupo, incluindo metabolismo, densidade de glândulas sudoríparas e composição corporal.

Compreender essas variações é fundamental para ajustar práticas de manejo em regiões semiáridas, onde as condições térmicas frequentemente ultrapassam os limites de conforto. O uso de indicadores bioclimáticos, como o ITU e a entalpia específica do ar, permite identificar períodos críticos, planejar medidas de mitigação e orientar decisões sobre nutrição, sombreamento, ventilação e escolha de genótipos mais adaptados. Então, torna-se possível reduzir os impactos do estresse térmico, promover o bem-estar animal e fortalecer a sustentabilidade produtiva dos sistemas pecuários da região.

2.2 Impacto do clima sobre o comportamento ingestivo e a produção de leite

O clima semiárido brasileiro é marcado por alta radiação solar, escassez de chuvas e temperaturas elevadas, principalmente entre os meses de março e setembro. Essas condições impõem desafios constantes à manutenção do conforto térmico dos animais e reduzem a disponibilidade de forragem, tornando necessária a adoção de estratégias adaptativas nos sistemas de produção leiteira (Silva et al., 2012).

O conhecimento das variáveis climáticas mais influentes na pecuária leiteira é fundamental para avaliar o conforto térmico dos bovinos e planejar estratégias de manejo adaptativas. Entre essas variáveis, o Índice de Temperatura e Umidade (ITU) se consolidou como ferramenta amplamente utilizada, pois integra os efeitos combinados da temperatura do ar e da umidade relativa e, em alguns modelos, também considera a radiação solar. Essa métrica é amplamente empregada em estudos de ambiência por sua simplicidade de cálculo e, principalmente, por sua capacidade de refletir o bem-estar térmico animal em diferentes condições ambientais (Dikmen e Hansen, 2009; Thornton et al., 2021; von Keyserlingk et al., 2017).

Em estudo conduzido no Centro-Oeste do Brasil, Reis et al. (2021) avaliaram vacas leiteiras mestiças submetidas a diferentes condições de Índice de Temperatura de Globo e Umidade (ITGU). Quando expostas a valores médios de ITGU de 82, as vacas reduziram o tempo de alimentação em 21,5% e o de ruminação em 19%, em comparação ao grupo mantido sob ITGU de 70. O tempo de ócio aumentou em cerca de 3,1 horas por dia, o que evidência o estresse térmico altera significativamente o comportamento ingestivo e direciona os animais para períodos prolongados de inatividade, com reflexos diretos na eficiência alimentar e no bem-estar.

Corroborando esses resultados, Tazzo et al. (2024) verificaram que vacas mantidas em condições de conforto térmico, com Índice de Temperatura e Umidade (ITU) variando entre 65 e 70, apresentaram produção média de 21,4 litros de leite por dia. As vacas expostas a valores de ITU superiores a 78 produziram apenas 16,8 litros diários, correspondendo a uma redução aproximada de 21% na produtividade. Esses achados reforçam a alta sensibilidade do desempenho zootécnico às variações ambientais e evidenciam a importância de manter os

animais dentro da zona de conforto térmico, já que pequenas elevações do ITU podem resultar em perdas expressivas de produção.

De maneira semelhante, Reis et al. (2021) e Polsky e von Keyserlingk (2017) verificaram, em ambientes tropicais, que vacas leiteiras submetidas a valores de ITU superiores a 75 reduziram o tempo médio de alimentação para 3,2 horas por dia, em comparação a 5,6 horas em condições de conforto térmico, além de apresentarem queda na ruminação de 7,4 para 5,1 horas diárias. Essas alterações de comportamento ingestivo, embora representem mecanismos adaptativos frente ao calor, comprometem a digestibilidade da dieta, reduzem a eficiência produtiva e ampliam os riscos ao bem-estar animal. Como medidas práticas, os autores supracitados sugerem ajuste dos horários de arraçoamento, aumento da densidade energética das dietas durante ondas de calor e fortalecimento da infraestrutura de resfriamento nas áreas de manejo.

No semiárido da Paraíba em dias com radiação solar superior a 650 W/m^2 e Índice de Temperatura e Umidade (ITU) acima de 78, a produção de leite foi reduzida em aproximadamente 22% em relação a dias com ITU inferior a 72. Esse resultado demonstra que não apenas a temperatura e a umidade, mas também as radiações solares diretas intensificam os efeitos do estresse térmico, comprometendo a homeotermia e desviando parte da energia metabólica que seria utilizada na síntese de leite. Do ponto de vista prático, o estudo reforça a importância da implantação de estratégias de sombreamento e manejo de ambiência em regiões semiáridas, onde a alta carga radiante representa um dos principais fatores limitantes à produtividade (Polsky e von Keyserlingk, 2017; Silva et al., 2012; Silva et al., 2022).

Em síntese, os resultados de diferentes pesquisas demonstram que o estresse térmico no semiárido brasileiro compromete tanto o comportamento ingestivo quanto a produção de leite, confirmando a forte dependência da pecuária leiteira em relação às condições climáticas. Alterações em parâmetros como tempo de alimentação, ruminação, produção diária e respostas fisiológicas evidenciam os limites de adaptação dos animais e reforçam a importância de estratégias de mitigação para reduzir perdas produtivas e preservar o bem-estar.

É importante destacar que a maioria das raças leiteiras utilizadas no Brasil tem origem em regiões de clima temperado, o que as torna mais sensíveis ao calor. Entretanto, os cruzamentos com raças zebuínas, como o Girolando, têm contribuído para melhorar a adaptabilidade ao ambiente semiárido, ampliando a resistência ao calor e mantendo níveis

satisfatórios de produção. Vale ressaltar que a produção de leite responde rapidamente às variações térmicas, sendo uma das primeiras variáveis a refletir o impacto do estresse ambiental sobre o desempenho animal.

2.3 Impacto do clima sobre o desempenho produtivo da pecuária de corte

A bovinocultura de corte também apresenta vulnerabilidades específicas diante das condições climáticas adversas. No Brasil, onde predomina a criação de bovinos em regiões tropicais e semiáridas, o aumento da frequência de eventos extremos, como períodos consecutivos com elevado Índice de Temperatura e Umidade (ITU), tem resultado em reduções de desempenho, menor eficiência alimentar e comprometimento da qualidade da carne, além de exigir maior atenção ao bem-estar animal (Amaral et al., 2024; Ferreira et al., 2024; Polsky e von Keyserlingk, 2017; Thornton et al., 2021).

O estresse térmico altera de forma significativa o comportamento ingestivo e a fisiologia de bovinos de corte. Em estudo com novilhas Nelore, a exposição ao calor reduziu a ingestão de matéria seca em cerca de 16% e aumentou o consumo de água em aproximadamente 25%, além de modificar parâmetros ruminais e fisiológicos. Tais alterações evidenciam os impactos negativos sobre o ganho médio diário (GMD) e a conversão alimentar, reforçando a sensibilidade dos animais às condições térmicas elevadas (Becker et al., 2020; Meneses et al., 2021; Pereira et al., 2018).

Nos sistemas de confinamento, os efeitos do estresse térmico são ainda mais perceptíveis. Uma revisão sistemática com meta-análise, envolvendo 31 estudos e mais de 6.700 bovinos, concluiu que a oferta de sombra melhora o desempenho zootécnico e reduz sinais fisiológicos de estresse térmico, como frequência respiratória e escore de ofegação (Azevedo et al., 2024; Silva e Passini et al., 2017). No estudo conduzido por Winders et al. (2023), observou-se que o uso de sombra em confinamentos promoveu maior consumo de matéria seca durante períodos de calor intenso e melhorou a eficiência alimentar, especialmente nas fases finais de engorda, quando pequenas diferenças de desempenho ainda se traduzem em ganhos significativos de carcaça.

A qualidade da carne também é fortemente influenciada pelo clima e pelo manejo pré-abate. Um levantamento envolvendo mais de 1,1 milhão de bovinos no Centro-Oeste brasileiro demonstrou que fatores ambientais e logísticos estão diretamente associados à variação na

qualidade das carcaças (Amaral et al., 2024). O estresse térmico prolongado, ou aquele associado ao transporte e manejo inadequado, pode resultar na ocorrência de carne DFD (*Dark, Firm, Dry*), caracterizada por coloração escura, textura firme e superfície seca, decorrente da depleção do glicogênio muscular antes do abate (Sullivan et al., 2022; von Keyserlingk et al., 2017). Esses efeitos reforçam a importância de protocolos de bem-estar e manejo adequados, especialmente em condições de calor intenso, a fim de preservar a qualidade e o valor comercial da carne.

Em sistemas a pasto, soluções de baixo custo, como o uso de sombra natural ou a adoção de arranjos silvipastoris, têm apresentado efeitos positivos sobre o conforto térmico dos bovinos de corte. Em estudo conduzido com animais Nelore na Amazônia Oriental, a inclusão de árvores nas pastagens reduziu significativamente a carga térmica radiante e melhorou os indicadores comportamentais, com aumento do tempo de alimentação e maior regularidade na ruminação (Moretti et al., 2017; Silva et al., 2024). Resultados semelhantes foram observados em outros sistemas tropicais, nos quais a oferta de sombra contribuiu para maior eficiência alimentar e mitigação das respostas fisiológicas ao calor (Azevedo et al., 2024).

Em síntese, o estresse térmico na pecuária de corte compromete diretamente o ganho médio diário (GMD), a conversão alimentar e a qualidade da carcaça, limitando o potencial produtivo dos sistemas tropicais. Para regiões semiáridas, como o norte de Minas Gerais, a adoção de estratégias adaptativas, como sombreamento, suplementação estratégica, oferta de água fresca e manejo nutricional adequado, é fundamental para mitigar perdas e aumentar a resiliência da produção de carne frente às mudanças climáticas. Essa compreensão é essencial para embasar a análise desenvolvida nesta dissertação, que busca integrar dados climáticos históricos à avaliação produtiva da bovinocultura de leite e de corte em ambiente semiárido.

2.4 Meta-análise aplicada à relação entre clima e produção de leite e carne

A meta-análise surgiu no final do século XX como uma ferramenta estatística destinada a integrar os resultados de múltiplos estudos independentes sobre uma mesma temática. Desde então, consolidou-se como um método robusto para a síntese de informações científicas, permitindo identificar padrões gerais a partir de dados heterogêneos. No campo das ciências agrárias, seu uso tem crescido de forma expressiva, especialmente em estudos

voltados à compreensão da interação entre variáveis ambientais e respostas produtivas em diferentes sistemas de manejo (Azevedo et al., 2024; Marçal-Pedroza et al., 2023).

Ao possibilitar o agrupamento quantitativo de dados secundários, a meta-análise aumenta a precisão das estimativas, reduz o risco de viés amostral e amplia a confiabilidade das conclusões. Na zootecnia e na ambiência animal, essa técnica tem sido aplicada para avaliar respostas produtivas, bem-estar animal, efeitos ambientais e a eficácia de estratégias de manejo. Em especial, na pecuária leiteira e de corte em clima tropical, essa abordagem mostra-se útil para generalizar resultados obtidos em diferentes condições, permitindo inferências mais sólidas e subsidiando a tomada de decisão técnica e científica (Azevedo et al., 2024; Ferreira et al., 2024; Firdaus et al., 2023; von Keyserlingk et al., 2017).

Exemplos recentes ilustram a ampla aplicabilidade da meta-análise nas ciências agrárias. Azevedo et al. (2024), em uma revisão sistemática com meta-análise envolvendo bovinos de corte, demonstrou que a oferta de sombra melhora o desempenho produtivo e reduz parâmetros fisiológicos indicativos de estresse térmico. Na pecuária leiteira, Tazzo et al. (2024) observaram reduções significativas na produção de leite sob elevados valores de ITU, enquanto Reis et al. (2021) documentaram alterações marcantes no comportamento ingestivo, especialmente na ruminação, em condições de estresse térmico. Esses resultados reforçam a utilidade da meta-análise como ferramenta para integrar evidências e compreender a magnitude dos impactos climáticos sobre sistemas pecuários tropicais.

Além da pecuária leiteira, estudos recentes também demonstram a aplicabilidade da meta-análise na bovinocultura de corte. Azevedo et al. (2024), ao integrar dados de 31 estudos conduzidos em sistemas de confinamento, verificaram que o fornecimento de sombra reduziu a frequência respiratória média dos animais e aumentou o ganho médio diário (GMD) sob condições de estresse térmico. Esses resultados reforçam o potencial da meta-análise como ferramenta robusta para avaliar respostas produtivas e fisiológicas em diferentes contextos da pecuária tropical (Azevedo et al., 2024).

A condução de uma meta-análise requer etapas metodológicas criteriosas. A qualidade dos estudos incluídos influencia diretamente a robustez dos resultados, sendo essencial avaliar o risco de viés e realizar análises de sensibilidade para assegurar a consistência das conclusões. Outro ponto central é a análise de heterogeneidade, que permite identificar variações entre os estudos e compreender as fontes de inconsistência nos dados. Para esse fim, ferramentas

estatísticas especializadas, como os softwares R e RevMan, têm sido amplamente utilizadas em pesquisas científicas da área (Azevedo et al., 2024).

Estudos aplicados reforçam a relevância dessa metodologia. Azevedo et al. (2024), por exemplo, empregaram uma meta-análise para avaliar a influência da ambiência sobre o desempenho zootécnico e a redução de sinais fisiológicos de estresse em bovinos de corte em confinamento. Em adição, outros estudos corroboram a relação entre o estresse e o comportamento ingestivo ao observar que vacas leiteiras submetidas a valores de ITU entre 79 e 83 tiveram o tempo de ruminação significativamente alterado, o que mostra o impacto da ambiência nas respostas comportamentais (Moretti et al., 2017; Reis et al., 2021).

Esses resultados mostram que a meta-análise é capaz de correlacionar dados climáticos com o comportamento ingestivo, permitindo inferências mais sólidas sobre a produtividade e o bem-estar animal em sistemas tropicais (Azevedo et al., 2024; Reis et al., 2021).

Em síntese, a meta-análise configura-se como uma ferramenta estratégica para integrar dados climáticos e produtivos em sistemas pecuários. Ao reunir informações provenientes de diferentes estudos e contextos, essa abordagem permite identificar tendências consistentes, reduzir incertezas e embasar decisões de manejo mais eficientes. Sua aplicação contribui para fortalecer a resiliência da pecuária frente às mudanças climáticas, consolidando-se como uma metodologia essencial para avaliar a relação entre o clima, o comportamento animal e a produção de leite e carne.

3. REFERÊNCIAS

Amaral, T. B.; LE Cornec, A. P.; Rosa, G. J. M. 2024. Environmental factors and management practices associated with beef cattle carcass quality in the mid-west of Brazil. *Translational Animal Science* 8:txae120. DOI: <http://doi.org/10.1093/tas/txae120>

Azevedo, L. A.; Canozzi, M. E. A.; Rodhermel, J. C. B.; Schwegler, E.; La Manna, A.; Clariget, J.; Bianchi, I.; Moreira, F.; Olsson, D. C.; Peripolli, V. 2024. Strategies to alleviate heat stress on performance and physiological parameters in feedlot-finished cattle under heat stress conditions: systematic review and meta-analysis. *Journal of Thermal Biology* 119:103798. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2024.103798>

Becker, C. A.; Collier, R. J.; Stone, A. E. 2020. Invited review: Physiological and behavioral effects of heat stress in dairy cows. *Journal of Dairy Science* 103:6751-6770. DOI: <http://doi.org/10.3168/jds.2019-17929>

Cheng, M.; McCarl, B.; Fei, C. 2022. Climate change and livestock production: A literature review. *Atmosphere* 13:140. DOI: <http://doi.org/10.3390/atmos13010140>

Dikmen, S. and Hansen, P. J. 2009. Is the temperature-humidity index the best indicator of heat stress in lactating dairy cows in a subtropical environment? *Journal of Dairy Science* 92:109-116. DOI: <http://doi.org/10.3168/jds.2008-1370>

EMATER-MG. Pecuária em Minas Gerais: panorama e importância econômica. Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do Estado de Minas Gerais, 2025. Disponível em: https://www.emater.mg.gov.br/portal.do?flagweb=novosite_pagina_interna&id=18712.

Acesso em: 10 ago. 2025.

EMBRAPA. Anuário do Leite 2024. Juiz de Fora: Embrapa Gado de Leite. 2024. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1164754/1/Anuario-Leite-2024.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2025.

Ferreira, N. C. R.; Andrade, L. N.; Ferreira, L. N. 2024. Climate change impacts on livestock in Brazil. *International Journal of Biometeorology* 68:2693-2704. DOI: <http://doi.org/10.1007/s00484-024-02778-3>

Firdaus, F.; Atmoko, B. A.; Baliarti, E.; Widi, T. S. M.; Maharani, D.; Panjono, P. 2023. The meta-analysis of beef cattle body weight prediction using body measurement approach with breed, sex, and age categories. *Journal of Advanced Veterinary and Animal Research* 10:630. DOI: <http://doi.org/10.5455/javar.2023.j718>

Fournel, S.; Ouellet, V.; Charbonneau, É. 2017. Practices for alleviating heat stress of dairy cows in humid continental climates: A literature review. *Animals* 7:37. DOI: <http://doi.org/10.3390/ani7050037>

Guimarães, K. L.; da Costa Sarmiento, P. L.; Manno, M. C.; de Lima Carvalhal, M. V. 2020. bioclimático para produção de bovinos de leite na região sudeste da Amazônia Legal. *PUBVET* 14:141. DOI: <http://doi.org/10.31533/pubvet.v14n12a709.1-10>

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP). Brasília: INMET, 2024. Disponível em: <https://bdmep.inmet.gov.br/>. Acesso em: 18 jan. 2025.

Luiz, A. J. B. Meta-análise: definição, aplicações e sinergia com dados espaciais. *Cadernos de Ciência & Tecnologia*, v. 19, p. 407-428, 2002. DOI: <https://doi.org/10.35977/0104-1096.cct2002.v19.8814>

Marçal-Pedroza, M. G.; Canozzi, M. E. A.; Campos, M. M.; Sant'Anna, A. C. 2023. Effects of dairy cow temperament on milk yield: a systematic review and meta-analysis. *Journal of Animal Science* 101:skad099. DOI: <http://doi.org/10.1093/jas/skad099>

Menéndez-Buxadera, A.; Muñoz-Mejías, E.; Sánchez, M.; Serradilla, J. M.; Molina, A. 2021. Use of Principal Component Analysis to combine genetic merit for heat stress and fat and protein

yield in Spanish autochthonous dairy goat breeds. *Animals* 11:736. DOI: <http://doi.org/10.3390/ani11030736>

Meneses, J. A. M.; de Sá, O. A. A. L.; Coelho, C. F.; Pereira, R. N.; Batista, E. D.; Ladeira, M. M.; Casagrande D. R.; Gionbelli, M. P. 2021. Effect of heat stress on ingestive, digestive, ruminal and physiological parameters of Nellore cattle feeding low- or high-energy diets. *Livestock Science* 252: 104676. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.livsci.2021.104676>

Moretti, R.; Biffani, S.; Chessa, S.; Bozzi, R. 2017. Heat stress effects on Holstein dairy cows' rumination. *Animal* 11:2320-2325. DOI: <http://doi.org/10.1017/S1751731117001173>

Novara, V.; Masseroni, M.; Canossa, M.; Gallo, A. 2025. Application of multivariate techniques for estimating herd feed efficiency using chemical and near-infrared calibration models in dairy cattle. *JDS Communications*. DOI: <http://doi.org/10.3168/jdsc.2025-0829>

Oliveira, Z. B.; Silva, C. M.; Souza, I. J.; Link, T. T.; Bottega, E. L. 2018. Climate change scenarios and their impacts on dairy production in southern Brazil. *Brazilian Journal of Biosystems Engineering* 12:110-121. DOI: <http://doi.org/10.18011/bioeng2018v12n2p110-121>

Pereira, K. C. B., Carvalho; C. D. C. S.; Ruas, J. R. M.; Menezes, G. C. D. C.; Castro, A. L. D. O.; Costa, M. D. D. 2018. Effect of the climatic environment on ingestive behavior of F1 Holstein × Zebu cows. *Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal* 19:207-215. DOI: <http://doi.org/10.1590/S1519-99402018000200006>

Polsky, L. and von Keyserlingk, M. A. G. 2017. Invited review: Effects of heat stress on dairy cattle welfare. *Journal of Dairy Science* 100:8645-8657. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2017-12651>

Reis, N. S.; Ferreira, I. C.; Mazocco, L. A.; Souza, A. C. B.; Pinho, G. A.; da Fonseca Neto, Á. M.; ... McManus, C. M. 2021. Shade modifies behavioral and physiological responses of low to medium production dairy cows at pasture in an integrated crop-livestock-forest system. *Animals* 11:2411. DOI: <https://doi.org/10.3390/ani11082411>

Sejian, V.; Bhatta, R.; Gaughan, J. B.; Dunshea, F. R.; Lacetera, N. 2018. Adaptation of animals to heat stress. *Animal* 12:s431-s444. DOI: <https://doi.org/10.1017/S1751731118001945>

Silva, D. C. and Passini, R. 2017. Physiological responses of dairy cows as a function of environment in holding pen. *Engenharia Agrícola* 37:206-214. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v37n2p206-214/2017>

Silva, R. G.; Maia, A. S. C.; de Macedo Costa, L. L.; de Queiroz, J. P. A. F. 2012. Latent heat loss of dairy cows in an equatorial semi-arid environment. *International Journal of Biometeorology* 56: 927-932. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0501-y>

Silva, V. C.; de Sousa Nascimento, R.; Neto, J. P. L.; de Melo Lopes, F. F., Miranda, J. R.; Furtado, D. A. 2022. Animal thermal comfort index for the state of Paraíba, Brazil: trend, influencing factors, and mitigating measures. *Theoretical and Applied Climatology* 147:523-534. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03849-w>

Silva, W. C.; da Silva, J. A. R.; Martorano, L. G.; da Silva, É. B. R.; de Carvalho, K. C.; Sousa, C. E. L.; ... Lourenço-Júnior, J. D. B. 2024. Thermal comfort of Nelore cattle (*Bos indicus*) managed in silvopastoral and traditional systems associated with rumination in a humid tropical environment in the Eastern Amazon, Brazil. *Veterinary Sciences* 11:236. DOI: <https://doi.org/10.3390/vetsci11060236>

Silveira, R.M. F.; da Silva, V. J.; Ferreira, J.; dos Santos Fontenelle, R. O.; Vega, W. H. O.; Sales, D. C.; ... de Vasconcelos, A. M. 2022. Diversity in smallholder dairy production systems in the Brazilian semiarid region: Farm typologies and characteristics of raw milk and water used in milking. *Journal of Arid Environments* 203:104774. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2022.104774>

Sullivan, R. O.; Davis, M.; Bretón, J.; Edwards-Callaway, L. 2022. Investigating the impact of pre-slaughter management factors on meat quality outcomes in cattle raised for beef: a scoping

review. *Frontiers in Animal Science* 3:1065002. DOI: <https://doi.org/10.3389/fanim.2022.1065002>

Tazzo, I. Tarouco; A. K., Allem, P. H. C.; Bremm, C.; Cardoso, L. S.; Junges, A. H. 2024. Temperature and Humidity Index (THI) during the 2021/2022 summer and its impact on dairy cattle in Rio Grande do Sul, Brazil. *Ciência Animal Brasileira* 25:e77035. DOI: <https://doi.org/10.1590/1809-6891v25e-77035E>

Thornton, P.; Nelson, G.; Mayberry, D.; Herrero, M. 2021. Increases in extreme heat stress in domesticated livestock species during the twenty-first century. *Global Change Biology* 27:5762-5772. DOI: <https://doi.org/10.1111/gcb.15825>

von Keyserlingk, M. A.; Amorim Cestari, A.; Franks, B.; Fregonesi, J. A.; Weary, D. M. 2017. Dairy cows value access to pasture as highly as fresh feed. *Scientific Reports* 7:44953. DOI: <https://doi.org/10.1038/srep44953>

Winders, T. M.; Melton, B. A.; Boyd, B. M.; Macken, C. N.; Watson, A. K.; MacDonald, J. C.; Erickson, G. E. 2023. Impact of shade in beef feedyards on performance, ear temperature and heat stress measures. *Journal of Animal Science*, 101: skad004. DOI: <https://doi.org/10.1093/jas/skad004>

4. CAPÍTULO 1 Histórico das mudanças climáticas na região semiárida e impacto sobre a produção de leite e carne

Oferência Albino Nhalumba¹, Cinara da Cunha Siqueira Carvalho¹, Flávio Pinto Monção¹, André Santos de Souza¹, Vicente Ribeiro Rocha Júnior, Edilane Costa Martins², Mauro Koji Kobayashi¹, Maria Dulcineia da Costa¹

¹Universidade Estadual de Montes Claros, Janaúba, Minas Gerais, Brasil

²Oregon State University, Corvallis, Oregon, Estados Unidos

Autor correspondente: Cinara da Cunha Siqueira Carvalho.

Email: cinara.carvalho@unimontes.br

RESUMO

As mudanças climáticas têm impactado a produção vegetal e animal, mas ainda existem lacunas sobre seus efeitos na região semiárida, especialmente na bovinocultura. Este trabalho teve como objetivo avaliar a influência histórica do clima sobre a produção de leite e carne na região, utilizando abordagem multivariada. Variáveis climáticas (temperatura do ar, umidade relativa, radiação solar global e velocidade do vento) disponibilizadas pelo INMET entre 2014 e 2024 foram utilizadas para calcular indicadores de conforto térmico, como o Índice de Temperatura e Umidade (ITU) e a entalpia específica do ar. Os dados de produção de leite foram obtidos no Anuário do Leite da EMBRAPA, e as informações sobre bovinos de corte foram estimadas a partir de estatísticas do IBGE e da SEAPA-MG. As análises de Componentes Principais e de Cluster mostraram que os dois primeiros componentes explicaram 76,36% da variância total. O primeiro componente (51,36%) associou-se à temperatura e umidade, refletindo o efeito da carga térmica e do estresse por calor. O segundo (25,00%) relacionou-se à radiação solar e ao vento, representando o balanço energético e a ventilação. Nos anos de El Niño (2015 - 2016), observaram-se ITU >78 e entalpia >85 kJ kg⁻¹, acompanhados de reduções de 14% na produção de leite e 16,7% na de carne. Em períodos de La Niña (2020 - 2021), condições mais amenas favoreceram aumentos de 23% na produção de leite e 44% na de carne. Os resultados evidenciam maior vulnerabilidade da pecuária leiteira ao estresse

térmico e reforçam a necessidade de estratégias de manejo adaptativas e monitoramento contínuo para fortalecer a resiliência produtiva no semiárido mineiro.

Palavras-chave: Conforto térmico; Entalpia; Índices bioclimáticos; Produção animal; Análise multivariada.

ABSTRACT

Climate change has affected plant and livestock production, yet important knowledge gaps remain regarding its impacts in the semiarid region, particularly on cattle farming. This study aimed to evaluate the historical influence of climate on milk and meat production in the region using a multivariate approach. Climatic variables (air temperature, relative humidity, global solar radiation, and wind speed) provided by INMET from 2014 to 2024 were used to calculate thermal comfort indicators, such as the Temperature-Humidity Index (THI) and air specific enthalpy. Milk production data were obtained from EMBRAPA's Dairy Yearbook, and beef cattle information was estimated from IBGE and SEAPA-MG statistics. Principal Component Analysis and Cluster Analysis showed that the first two components explained 76.36% of the total variance. The first component (51.36%) was associated with temperature and humidity, reflecting the direct effect of heat load and heat stress on animals. The second component (25.00%) was related to solar radiation and wind speed, representing energy balance and environmental ventilation. During El Niño years (2015 - 2016), THI values >78 and enthalpy >85 kJ kg⁻¹ were observed, accompanied by reductions of 14% in milk production and 16.7% in meat production. In La Niña periods (2020 - 2021), milder thermal conditions favored increases of 23% in milk production and 44% in meat production. These results demonstrate the greater vulnerability of dairy cattle to heat stress and highlight the need for adaptive management strategies and continuous climate monitoring to strengthen productive resilience in the semiarid region of Minas Gerais.

Keywords: Thermal comfort; Enthalpy; Bioclimatic indices; Animal production; Multivariate analysis.

4.1 INTRODUÇÃO

A bovinocultura representa parte significativa da economia de Minas Gerais, líder nacional na produção de leite (≈27% do total) e entre os cinco maiores produtores de carne bovina (Embrapa, 2024). A atividade inclui sistemas leiteiros e de corte, do manejo intensivo

ao familiar (Emater, 2025; Silveira et al., 2022), e contribui para a oferta de alimentos e geração de emprego no meio rural.

No semiárido mineiro, a pecuária é influenciada por baixa pluviosidade anual (600 - 900 mm), temperaturas médias elevadas (25 - 32 °C) e radiação solar superior a 20 MJ m⁻² dia⁻¹ (INMET, 2024). Essas condições reduzem a disponibilidade e qualidade das pastagens, comprometem o ganho de peso e a taxa de lotação, especialmente em anos de estiagem (Amaral et al., 2024).

Altas temperaturas e umidade elevadas provocam estresse térmico em vacas leiteiras de raças exóticas, reduzem consumo de matéria seca e produção de leite, e aumentam o tempo de ócio e a frequência respiratória (Cheng et al., 2022; Polsky e von Keyserlingk, 2017; Silva et al., 2024). O Índice de Temperatura e Umidade (ITU) e o Índice de Temperatura de Globo e Umidade (ITGU) indicam alterações no comportamento ingestivo e na eficiência reprodutiva (Reis et al., 2021; Tazzo et al., 2024).

Em raças zebuínas de corte, mais tolerantes ao calor (ITU ≈75), o estresse térmico prolongado reduz ingestão de matéria seca, conversão alimentar e aumenta a ocorrência de problemas de saúde (Becker et al., 2020; Dikmen e Hansen, 2009). A oferta de sombra, natural ou artificial, melhora indicadores fisiológicos e desempenho zootécnico (Azevedo et al., 2024; Winders et al., 2023).

O uso de séries históricas e técnicas multivariadas, como Análise de Componentes Principais e Análise de Cluster, permite identificar variáveis climáticas correlacionadas e fatores de estresse para a produção animal (Menéndez-Buxadera et al., 2021; Novara et al., 2025). A meta-análise integra resultados de diferentes estudos, aumentando a precisão das inferências sobre a relação clima-produção (Azevedo et al., 2024; Luiz, 2002).

O monitoramento climático, o zoneamento bioclimático e a previsão de eventos extremos, como El Niño/La Niña, orientam medidas de manejo, incluindo sombreamento, climatização, ajustes nutricionais e seleção de genótipos adaptados ao calor (Fournel et al., 2017; Guimarães et al., 2020; Reis et al., 2021; Silva et al., 2024).

Este trabalho teve como objetivo avaliar a influência histórica do clima sobre a produção de leite e carne na região semiárida de Minas Gerais, utilizando abordagem multivariada.

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

4.2.1 Coleta e análise de banco de dados para composição da meta-análise

O presente estudo foi conduzido na Universidade Estadual de Montes Claros (Unimontes), Campus de Janaúba, a partir da coleta e análise de dados secundários destinados à composição da meta-análise. O banco de dados climático foi estruturado com informações disponibilizadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), referentes ao período de 2014 a 2024. Para sua construção, foram consideradas as seguintes variáveis: volume de precipitação (mm), temperatura do ar (°C), umidade relativa do ar (%), radiação solar global ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$) e velocidade do ar ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$).

Como critério de inclusão, adotou-se a disponibilidade de séries completas em intervalos mensais, totalizando 120 meses de observações (de 2014 a 2023) e aproximadamente 3.600 registros brutos por variável climática. Desse total, 3.420 registros (95%) foram efetivamente utilizados nas análises, após a exclusão de 180 valores ausentes ou inconsistentes identificados nos bancos originais do INMET e da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). A exclusão foi realizada quando os dados apresentavam falhas de medição, lacunas temporais superiores a três dias consecutivos ou valores extremos incoerentes com os padrões históricos da região. Esse processo de triagem assegurou consistência, homogeneidade temporal e robustez estatística ao banco de dados final utilizado na meta-análise, permitindo maior precisão na correlação entre as variáveis climáticas e os indicadores produtivos avaliados.

Para complementar o banco climático, foram incorporados dados produtivos. No caso da pecuária leiteira, utilizaram-se informações publicadas no *Anuário do Leite* da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa Gado de Leite), contemplando a série histórica da produção no semiárido mineiro entre 2014 e 2024.

Em relação à pecuária de corte, a série histórica foi construída a partir de informações oficiais de produção de carcaça bovina (em toneladas), disponibilizadas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e pela Secretaria de Estado de Agricultura, Pecuária e Abastecimento de Minas Gerais (SEAPA-MG), abrangendo o período de 2014 a 2023. Para representar especificamente a região semiárida, considerou-se a participação estimada de

22% do rebanho bovino mineiro, definida com base em levantamentos regionais da distribuição pecuária realizados pela SEAPA-MG e pela Emater.

A série resultante compreendeu dez observações anuais (2014 - 2023), correspondentes à produção total de carcaça da região estimada por essa proporção. Os critérios de inclusão dos dados seguiram os mesmos adotados para a bovinocultura de leite, considerando apenas fontes oficiais, consistência temporal completa e ausência de falhas no registro anual. A partir desses dados, calcularam-se os valores anuais da produção de carne, os quais foram organizados em planilhas próprias e utilizados em análises comparativas com a produção de leite e com os indicadores climáticos representativos da região semiárida mineira.

4.2.2 Série histórica da produção de leite e carne bovina no semiárido mineiro (2014 - 2023)

Os dados referentes à produção de leite no semiárido mineiro, no período de 2014 a 2023, foram obtidos a partir das publicações anuais do Anuário do Leite da Embrapa Gado de Leite. Para a construção da série histórica, considerou-se a média anual de produção (em mil litros) divulgada para Minas Gerais, com posterior recorte dos valores estimados para a região semiárida do estado, conforme a delimitação estabelecida pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e pela Secretaria de Estado de Agricultura, Pecuária e Abastecimento de Minas Gerais (SEAPA-MG). Os dados foram organizados em planilha eletrônica e tabulados de modo a representar a evolução temporal da atividade leiteira, destacando anos críticos de seca e períodos de recuperação, o que possibilitou a comparação direta com os índices climáticos avaliados neste estudo.

A série histórica da produção de bovinos de corte foi construída a partir dos dados oficiais de produção de carcaça bovina (em toneladas), disponibilizados pelo IBGE e pela SEAPA-MG, também para o período de 2014 a 2023. Para representar especificamente o semiárido mineiro, adotou-se a proporção de 22% do rebanho bovino estadual, conforme levantamentos regionais da distribuição pecuária. Essa estimativa serviu como base para o cálculo anual da produção de carne na região, cujos valores foram sistematizados em tabela própria e posteriormente utilizados nas análises comparativas com a produção leiteira e com os indicadores climáticos.

4.2.3 Obtenção e processamento dos dados climatológicos

As condições ambientais associadas ao estresse térmico foram calculadas por meio do Índice de Temperatura e Umidade (ITU), definido pela combinação da temperatura ambiente e da umidade relativa (NRC, 1971):

$$ITU = Tbs + (0,36Tpo) + 41,2$$

Onde Tbs é a temperatura do bulbo seco (°C), Tpo é a temperatura do ponto de orvalho (°C).

Com base no banco de dados, também foram estimados outros índices de conforto térmico, como a entalpia específica (H), considerada uma medida relevante na biometeorologia por refletir a carga de energia do ar úmido que influencia diretamente o desempenho animal em regiões semiáridas. A fórmula utilizada, adaptada de Barbosa Filho et al. (2007), foi:

$$H = 6,7 + 0,243 * Tbs + \frac{UR}{100} * \left(\frac{7,5 * Tbs}{100237,3 + Tbs} \right)$$

Onde H é a entalpia específica (kJ/kg de ar seco), Tbs é a temperatura de bulbo seco (°C) e UR é a umidade relativa do ar (%).

4.2.4 Análise estatística

Os índices climáticos tabulados foram submetidos à Análise de Componentes Principais (ACP). Para essa análise, foram consideradas seis variáveis: temperatura do ar, umidade relativa, precipitação, radiação, ITU e entalpia. Com base na matriz de correlação entre as variáveis, os dados foram padronizados para média igual a zero e variância igual a um. Optou-se pelo uso da matriz de correlação em vez da matriz de covariância, seguindo Johnson e Wichern (2007).

O critério de Kaiser (1960) foi utilizado para determinar os componentes principais que melhor explicaram a variabilidade dos dados, considerando autovalores iguais ou superiores a

1. Para a comparação das variáveis, foram criadas variáveis padronizadas a partir das originais, aplicando-se a fórmula:

$$V_p = (V - x) / \sigma$$

Em que V_p é a nova variável ponderada, V é a variável observada, x é a média das observações da variável original e σ é o desvio padrão da variável observada.

Na ACP, cada componente principal (Y_i) correspondeu a uma combinação linear das 10 variáveis padronizadas (X_j) e essas combinações não foram correlacionadas entre si:

$$Y_i = a_{i1}X_1 + a_{i2}X_2 + \dots + a_{ip}X_p = \sum_{j=1}^p a_{ij}X_j$$

Em que a_{ij} são os autovetores, com $i = 1, 2, p$ e

$$\sum_{j=1}^p a_{ij}^2 = 1$$

O primeiro componente principal, Y_1 , possuía variância máxima entre todas as combinações lineares de X . O segundo componente principal foi correlacionado com o primeiro e possuía a segunda maior variância e, assim, sucessivamente. A cada componente principal Y_i existiu p autovalor (λ) ordenado de forma que:

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_p$$

A importância relativa de um componente principal foi avaliada a partir da percentagem de variância total por ele explicada, ou seja, a percentagem de seu autovalor em relação ao total dos autovalores de todos os componentes, dado por:

$$Y_i = \frac{Var(Y_i)}{\sum_{i=1}^p Var(Y_i)} \times 100 = \frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^p \lambda_i} \times 100$$

Para a análise exploratória dos dados por meio da Análise de Componentes Principais (ACP), foi utilizado o software PAST® 4.03 (Hammer et al., 2001).

4.3 RESULTADOS

4.3.1 Variáveis e Índices Climáticos (2014 - 2024)

A Tabela 1 apresenta as médias anuais das variáveis climáticas observadas no semiárido mineiro entre 2014 e 2024. Verificou-se ampla variação na precipitação anual, com valores mínimos de 368,6 mm em 2015 e máximos de 1.072,0 mm em 2020. A radiação solar global apresentou pico em 2021 ($1.073,7 \text{ MJ}\cdot\text{m}^{-2}$), refletindo maior carga térmica em anos de menor nebulosidade, enquanto as temperaturas médias anuais oscilaram entre $24,7^\circ\text{C}$ (2022) e $28,9^\circ\text{C}$ (2015).

Tabela 1 - Médias anuais de variáveis climáticas e índices de conforto térmico no semiárido mineiro, no período de 2014 a 2024

Ano	Radiação Global ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}$)	Precipitação (mm)	Temperatura do ar ($^\circ\text{C}$)	Temperatura de ponto de orvalho ($^\circ\text{C}$)	Umidade relativa do ar (%)	Velocidade do ar ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	Entalpia ($\text{kJ}\cdot\text{kg de ar seco}^{-1}$)	ITU
2014	-	443,40	27,31	16,23	52,59	1,86	16,38	74,35
2015	-	368,60	28,89	15,06	45,73	1,86	16,55	75,51
2016	714,14	515,90	27,62	17,84	57,94	2,05	16,78	75,25
2017	876,57	613,40	25,77	14,98	54,92	2,75	15,82	72,36
2018	894,88	692,00	25,40	16,18	60,36	2,49	15,96	72,43
2019	926,95	521,40	26,36	15,66	55,72	2,21	16,09	73,20
2020	980,96	1072,00	25,43	17,43	65,32	2,21	16,22	72,90
2021	1073,70	1039,40	25,58	16,65	61,95	2,01	16,10	72,77
2022	905,37	777,20	24,70	16,27	63,53	1,50	15,82	71,74
2023	957,78	381,00	26,46	16,23	57,28	1,65	16,21	73,50
2024	933,49	946,20	25,77	17,46	64,17	1,89	16,33	73,25

Legenda: ITU - Índice de Temperatura e Umidade.

Fonte: Dados do INMET (2024), processados pela autora.

A umidade relativa do ar variou de 49% a 68%, e o Índice de Temperatura e Umidade (ITU) apresentou valores entre 71,7 e 75,5. A entalpia específica do ar manteve-se em torno de 15,8 a 16,4 kJ·kg⁻¹ de ar seco.

4.3.2 Produção Anual de Leite e Carne Bovina (2014 - 2023)

A Tabela 2 apresenta a produção anual estimada de leite e carne bovina no semiárido mineiro entre 2014 e 2023. Observou-se que a produção de leite variou de 1,48 bilhão de litros em 2016 para 1,83 bilhão de litros em 2021, enquanto a produção de carne bovina aumentou gradualmente de 150 mil toneladas em 2014 para 190 mil toneladas em 2023.

Tabela 2 - Produção anual estimada de leite e carne bovina no semiárido mineiro entre 2014 e 2023

Ano	Produção estimada de leite (mil litros)	Produção estimada de carne bovina (toneladas)
2014	1.720.000	150.000
2015	1.520.000	130.000
2016	1.480.000	125.000
2017	1.610.000	140.000
2018	1.685.000	155.000
2019	1.595.000	160.000
2020	1.740.000	170.000
2021	1.830.000	180.000
2022	1.760.000	185.000
2023	1.670.000	190.000

Fonte: IBGE SIDRA /SEAPA-MG.

Entre 2014 e 2016, registrou-se redução a produção de leite e carne, coincidente com o período de El Niño, quando o semiárido mineiro enfrentou déficit hídrico acentuado e elevadas temperaturas médias. Nessa fase, a produção leiteira caiu de 1,72 para 1,48 bilhão de litros, e a produção de carne reduziu de 150 mil para 125 mil toneladas.

A partir de 2020 e 2021, observou-se recuperação produtiva significativa, com aumento da pluviosidade e menores índices de estresse térmico, sob influência do fenômeno La Niña. Nesse intervalo, a produção de leite atingiu 1,83 bilhão de litros, e a produção de carne, 180 mil toneladas. Os anos de transição 2017 a 2019 e 2022 a 2023 apresentaram produção intermediária de leite (1,59 - 1,76 bilhão de litros) e carne (160 - 190 mil toneladas).

4.3.3 Relação entre Ciclos Climáticos, Precipitação e Produção Pecuária (2014 - 2024)

A Figura 1 ilustra a relação entre os ciclos climáticos globais (El Niño, La Niña e períodos de transição), a precipitação anual e a produção de leite e carne no semiárido mineiro, no período de 2014 a 2024.

Durante o evento El Niño (2014 - 2016), observou-se redução acentuada da precipitação (média de 442,6 mm) e aumento do ITU acima de 75. Nesse intervalo, a produção de leite reduziu de 1,72 bilhões de litros em 2014 para 1,48 bilhões em 2016, enquanto a produção de carne caiu de 150 mil para 125 mil toneladas.

Nos anos de transição (2017 - 2019), a precipitação aumentou para 608,9 mm e o ITU manteve-se abaixo de 75. A produção de leite atingiu 1,68 bilhões de litros em 2018, com leve retração em 2019, enquanto a produção de carne manteve trajetória ascendente, chegando a 160 mil toneladas.

No ciclo de La Niña (2020 - 2021) a precipitação média alcançou 962,9 mm, e o ITU permaneceu abaixo de 73. Durante esse período, a produção de leite atingiu 1,83 bilhões de litros, e a carne chegou a 180 mil toneladas.

A fase de transição recente (2022 - 2024) apresentou redução da precipitação (média de 663,6 mm) e leve aumento do ITU acima de 73. A produção de carne bovina chegou a 190 mil toneladas em 2023, enquanto a produção de leite apresentou queda após o pico de 2021, atingindo 1,67 bilhões de litros.

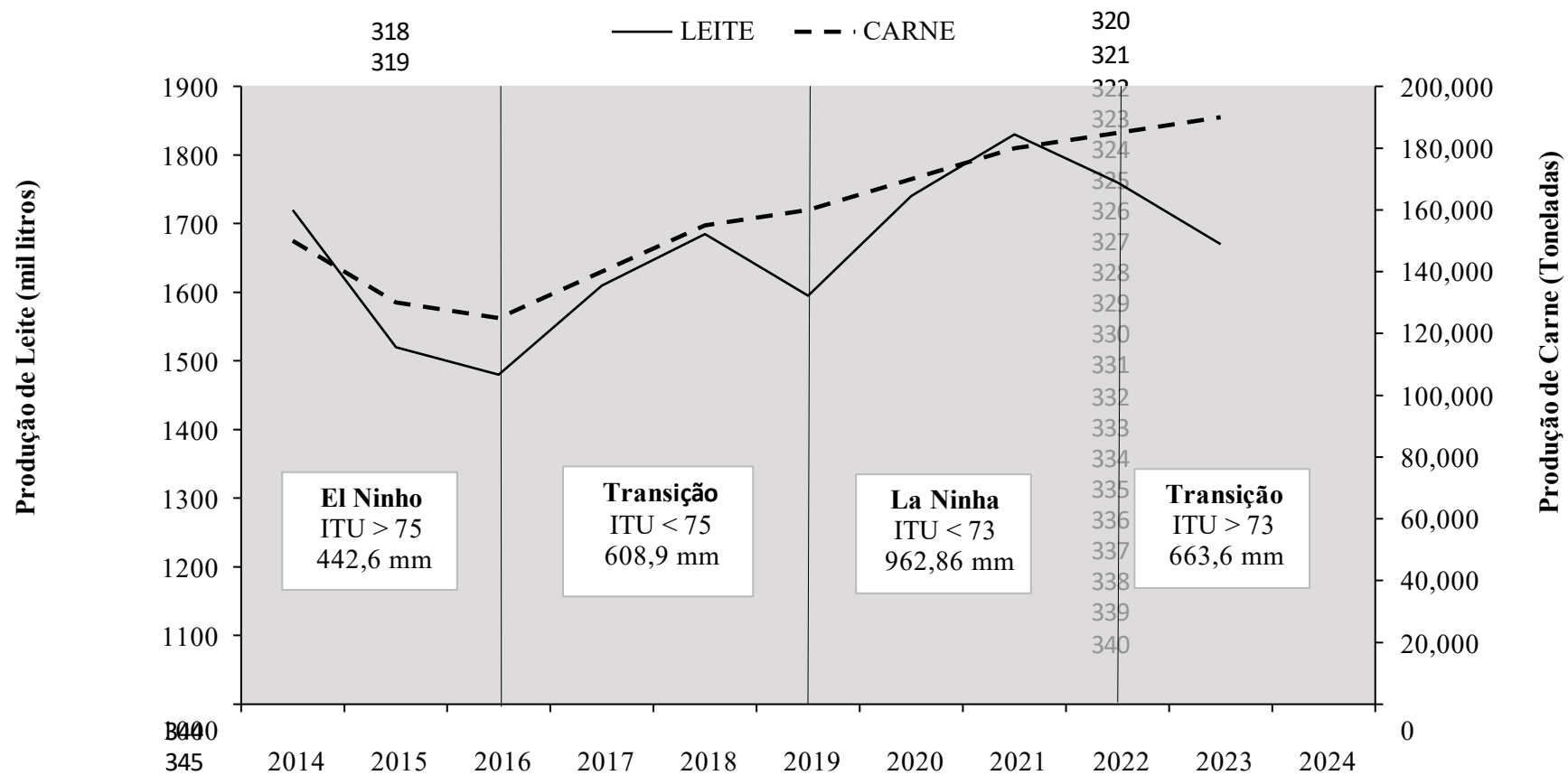


Figura 1 - Relação entre precipitação anual, ciclos climáticos (El Niño/La Niña) e produção de leite e carne no semiárido mineiro entre 2014 e 2024.

4.3.4 Análise Multivariada

4.3.4.1 Análise de Componentes Principais (ACP)

A Análise de Componentes Principais (ACP) foi aplicada às variáveis climáticas registradas entre 2014 e 2024 para identificar os fatores que mais contribuíram para a variabilidade das condições ambientais no semiárido mineiro. Os autovalores e o percentual de variância explicada por cada componente estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Autovalores e variância explicada (%) pelos componentes principais

Componente principal (CP)	Autovalores	Variância explicada (%)
PC1	410,876	51,36
PC2	199,477	25,00
PC3	110,228	14,00
PC4	0,6835	9,00
PC5	0,1037	0,80
PC6	0,0065	0,80
PC7	0,0004	0,0054
PC8	0,00016	0,002

Fonte: Elaborada pela autora (2025).

Os resultados indicaram que os dois primeiros componentes principais (PC1 e PC2) foram suficientes para representar a estrutura dos dados climáticos, explicando conjuntamente 76,36% da variância total. O PC1, com autovalor de 410,876, explicou 51,36% da variância, enquanto o PC2, com 199,477, explicou 25,00%.

Os demais componentes apresentaram variâncias inferiores a 10%, confirmando que PC1 e PC2 são suficientes para descrever a dinâmica climática regional.

4.3.4.2 Cargas Fatoriais das Variáveis nos Componentes Principais (PC1 e PC2)

A Tabela 4 apresenta as cargas fatoriais das variáveis climáticas nos dois primeiros componentes principais (PC1 e PC2).

Tabela 4 - Cargas fatoriais das variáveis climáticas nos dois primeiros componentes principais (PC1 e PC2).

VARIÁVEL	PC1	PC2
ITU	0,4594	0,2153
ENTALPIA	0,3739	0,4400
VELOCIDADE DO AR	-0,0783	-0,2988
UMIDADE RELATIVA	-0,4189	0,3542
TEMP. PONTO ORVALHO	-0,1089	0,6755
TEMPERATURA DO AR	0,4816	0,0239
PRECIPITAÇÃO	-0,4021	0,2688
RADIAÇÃO SOLAR	-0,2489	-0,1271

Fonte: Elaborada pela autora (2025).

O Componente Principal 1 (PC1) foi influenciado pela temperatura do ar (0,4816) e pelo Índice de Temperatura e Umidade - ITU (0,4594), seguidos pela entalpia (0,3739). O Componente Principal 2 (PC2) foi dominado por variáveis relacionadas ao calor latente e à umidade atmosférica, com destaque para o ponto de orvalho (0,6755), a entalpia (0,4400) e a umidade relativa (0,3542). Algumas variáveis apresentaram correlação negativa com os componentes, como a velocidade do ar (-0,2988 em PC2) e a radiação solar (-0,2489 em PC1).

4.3.4.3 Biplot da Análise de Componentes Principais (PC1 × PC2)

A Figura 2 apresenta o biplot resultante da Análise de Componentes Principais (ACP), considerando os dois primeiros componentes (PC1 e PC2), que juntos explicaram 76,36% da variância total dos dados climáticos. O gráfico permitiu a visualização simultânea das variáveis climáticas (vetores) e dos anos analisados (2014 - 2024).

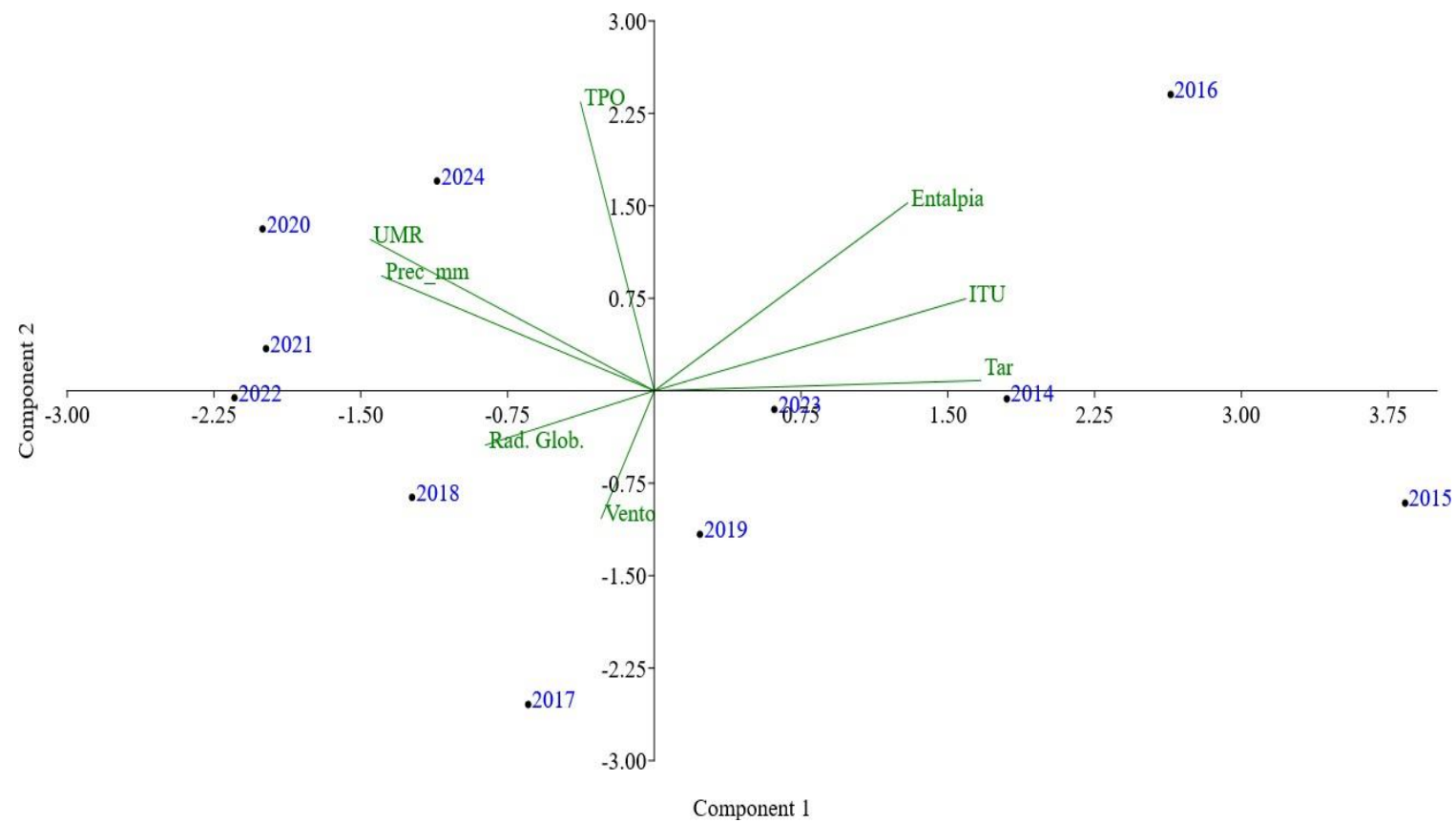


Figura 2 - Biplot dos Componentes Principais com variáveis e anos (2014 - 2024)

No biplot, o PC1 (eixo horizontal) foi fortemente associado à temperatura do ar, ao Índice de Temperatura e Umidade (ITU) e à entalpia. O PC2 (eixo vertical) foi determinado principalmente pela umidade relativa, temperatura de ponto de orvalho e precipitação. A estrutura obtida apresentou dois vetores principais, um associado às variáveis de calor sensível (temperatura) e outro às variáveis de calor latente (umidade do ar). A distribuição dos anos no plano fatorial mostrou separação ao longo desses dois eixos.

Os anos 2015 e 2016, situados na extremidade direita do PC1, apresentaram temperaturas médias acima de 28 °C e ITU superiores a 75. Nesses anos, o estresse térmico foi o fator limitante, reduzindo a ingestão de alimento e comprometendo o desempenho produtivo.

Os anos 2020, 2021 e 2024 posicionaram-se no quadrante superior esquerdo, associados a índices de umidade relativa acima de 75% e maior precipitação anual (>900 mm). Os anos 2017, 2018, 2019 e 2022 se concentraram em regiões intermediárias do biplot, condições neutras ou de transição. Nesses períodos, o equilíbrio entre temperatura e umidade resultou em estresse térmico moderado, sem prejuízos severos à produtividade, mas também sem ganhos expressivos.

A disposição vetorial das variáveis mostrou alta correlação positiva entre o ITU e a entalpia, com vetores orientados em direções semelhantes e magnitudes próximas. Ambos os índices apresentaram comportamento alinhado no plano fatorial.

4.3.4.4 Agrupamento dos anos com base nas variáveis climáticas (Dendrograma)

A Figura 3 apresenta o dendrograma de similaridade climática entre os anos de 2014 a 2024, obtido a partir das variáveis analisadas na Análise de Cluster hierárquica.

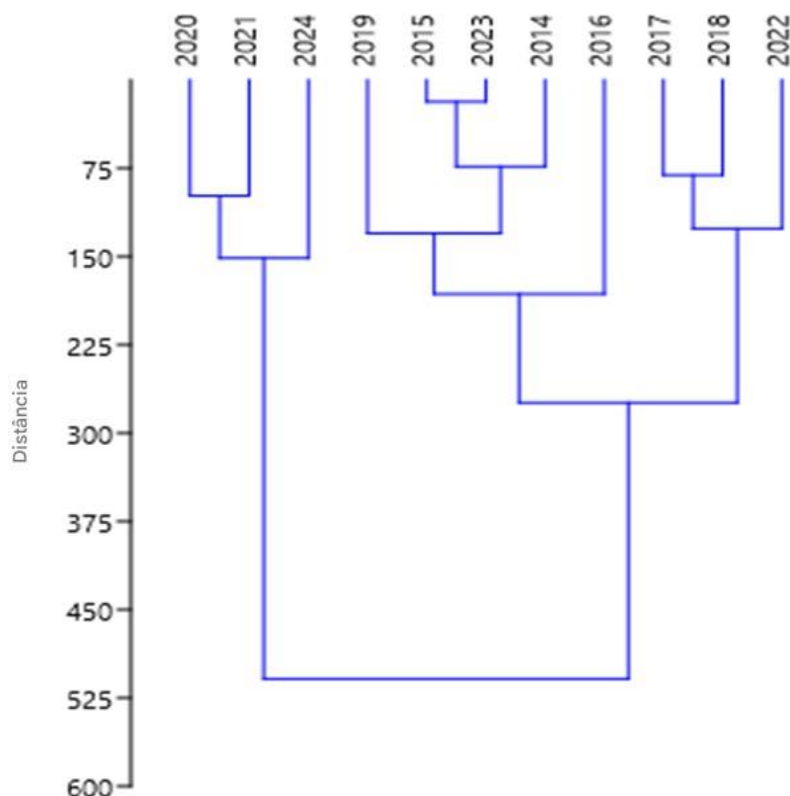


Figura 3 - Dendrograma de similaridade entre os anos com base nas variáveis climáticas (2014 - 2024)

Os resultados indicaram a formação de três grupos principais de anos: Grupo 1: formado por 2020, 2021 e 2024, caracterizados por valores elevados de umidade relativa e precipitação superiores a 900 mm. Esses anos coincidiram com períodos classificados como de ocorrência de La Nina e apresentaram valores médios de ITU inferiores a 73.

Grupo 2: composto por 2015, 2016 e 2019, anos que apresentaram temperaturas médias superiores a 28 °C e valores de ITU acima de 75. Esses anos coincidiram com períodos classificados como de ocorrência de El Nino e registraram menor pluviosidade regional. No dendrograma, 2015 e 2016 aparecem próximos.

Grupo 3: reuniu os anos 2014, 2017, 2018, 2022 e 2023, classificados como anos de transição, com valores intermediários de temperatura (25 - 27 °C) e umidade relativa (60 - 70%). Esses anos não coincidiram com períodos classificados como de ocorrência de El Nino ou La Nina e apresentaram variação interanual nos parâmetros climáticos.

4.3.5 Relação entre produção de leite e clima

Os dados da Tabela 2 e da Figura 1 mostraram variações na produção de leite ao longo dos anos analisados. Em 2015 e 2016, a produção apresentou redução de 19,4% em relação à média da década, anos que registraram ITU superior a 75,5 e entalpia acima de 16,5 kJ/kg de ar seco.

Nos anos com ocorrência de La Nina (2020 e 2021), a produção leiteira aumentou 13,5% a produção de leite em comparação com o triênio anterior, juntamente com pluviosidade de 962,9 mm. Os anos intermediários (2017 - 2019 e 2022 - 2023) apresentaram valores médios de produção, com variação entre os anos.

A produção de carne e a produção leiteira apresentaram padrões anuais semelhantes (Tabela 2 e Figura 1). Nos anos de 2015 e 2016, a produção de carne registrou 125 mil toneladas, anos caracterizados por temperaturas médias superiores a 28 °C e ITU acima de 75, classificados como de ocorrência de El Nino. A partir de 2018, os valores anuais aumentaram até 2020 e 2023 período em que a produção atingiu 190 mil toneladas. Os anos de La Nina (2020 - 2021) apresentaram melhor conforto térmico, com ITU médio inferior a 73 e entalpia moderada ($\sim 16,16 \text{ kJ/kg de ar seco}^{-1}$) (16,22 e 16,10 kJ/kg em 2020 e 2021).

4.4 DISCUSSÃO

Os anos de 2015 e 2016, associados ao El Nino, destacaram-se pelos maiores níveis de estresse térmico da série. Nesses dois anos, o ITU alcançou 75,51 e 75,25, respectivamente, ultrapassando o limite de conforto térmico e coincidindo com as mais altas temperaturas médias (28,89 °C em 2015 e 27,62 °C em 2016). Além do calor intenso, houve forte restrição hídrica, com precipitações de apenas 368,6 mm em 2015 e 515,9 mm em 2016, os menores valores registrados no período analisado. Esses valores se alinham às categorias de desconforto identificadas por Tazzo et al. (2024), que relataram elevada frequência de horas com THI acima dos limiares de atenção e alerta, acompanhada de estimativas de perdas produtivas.

Os anos de 2020 e 2021 apresentaram as melhores condições ambientais da série, como também evidenciado na Figura 1. Nesses anos, o ITU permaneceu abaixo de 73 (72,90 em 2020 e 72,77 em 2021) e a precipitação aumentou para 1.072,0 mm e 1.039,4 mm, criando

um ambiente muito mais próximo da termoneutralidade. Esse conjunto de condições favoreceu a ingestão e o comportamento de pastejo, conforme discutido por Polsky e von Keyserlingk (2017). O reflexo produtivo foi imediato: a produção de leite atingiu 1,83 bilhão de litros em 2021 e a de carne alcançou 180 mil toneladas, os maiores valores registrados na série (Tabela 2). Nos anos de transição (2017 - 2019 e 2022 - 2023), os valores intermediários de ITU (2,36; 72,43; 73,20; 71,74; 73,50) e entalpia (15,82 a 16,21 kJ·kg⁻¹) representaram condições menos extremas, mas ainda desafiadoras quando não se adotam estratégias de sombreamento, ventilação ou ajustes nutricionais. Mesmo ambientes moderadamente quentes podem reduzir a eficiência produtiva, especialmente em animais mais sensíveis ao calor.

Esses resultados reforçam a importância de avaliar conjuntamente ITU e entalpia para caracterizar o conforto térmico e identificar períodos críticos no semiárido, visto que a temperatura do ar isolada não descreve adequadamente o impacto sobre o desempenho animal. O monitoramento contínuo desses índices torna-se fundamental para o manejo adaptativo e mitigação do estresse térmico.

Secas prolongadas comprometem a ingestão, a digestibilidade e o ganho médio diário, comportamento coerente com os resultados de Meneses et al. (2021), que registraram queda de 16% no consumo de matéria seca e menor digestibilidade em condições de calor. Essa dinâmica é compatível com o observado em 2014 - 2016, quando o El Niño intensificou o estresse térmico, restringiu a disponibilidade de forragem e reduziu a produção de leite de 1,72 bilhão de litros (2014) para 1,48 bilhão de litros (2016) e a produção de carne de 150 mil para 125 mil toneladas.

Diferente dos anos mais quentes, a recuperação produtiva registrada em 2020 e 2021 acompanhou a melhora das condições térmicas e hídricas. Nesses dois anos, o ITU permaneceu abaixo de 73 (72,90 em 2020 e 72,77 em 2021) e a precipitação aumentou de forma expressiva (1.072 mm e 1.039 mm), criando um ambiente muito mais próximo da termoneutralidade. As condições contribuem na ingestão e no comportamento de pastejo, como descrito por Polsky e von Keyserlingk (2017). O efeito prático aparece de forma clara nos dados produtivos: enquanto em 2016, sob forte estresse térmico (ITU 75,25) e baixa precipitação (515,9 mm), a produção de leite havia recuado para 1,48 bilhão de litros e a de carne para 125 mil toneladas, em 2021 os valores chegaram ao ápice da série, com 1,83 bilhão

de litros de leite e 180 mil toneladas de carne. Essa diferença evidencia que a melhoria das condições climáticas nos anos de La Nina teve impacto direto no desempenho dos rebanhos. Nos períodos intermediários (2017 - 2019 e 2022 - 2023), os níveis médios de produção reforçam a sensibilidade da pecuária regional às oscilações climáticas, mesmo quando não ocorrem extremos como os registrados em 2015 - 2016 ou 2020 - 2021. Os dados apresentados na Figura 1 mostram que a precipitação nesses anos variou entre 521 e 777 mm, valores suficientes para evitar colapsos produtivos, mas ainda abaixo dos volumes observados nos anos mais úmidos. A produção de leite oscilou entre 1,59 e 1,76 bilhão de litros, enquanto a de carne variou de 160 mil a 190 mil toneladas, de acordo com a Tabela 2. A dependência direta da pluviosidade fica evidente quando se observa que, em 2023, a produção de carne atingiu 190 mil toneladas, mesmo com a precipitação reduzida a 381 mm e um ITU de 73,50, resultado que demonstra maior resiliência do sistema de corte frente às limitações hídricas.

Já a pecuária leiteira mostrou maior sensibilidade às variações climáticas, com quedas mais pronunciadas em anos de menor oferta de forragem, como evidenciado pela perda de produção após o pico registrado em 2021. Esses contrastes reforçam que a resposta produtiva na região depende não apenas do manejo, mas principalmente da variação interanual da precipitação e dos índices de conforto térmico.

A Figura 1 confirma que a precipitação atua como variável-chave para a produção pecuária, modulando tanto a disponibilidade de forragem quanto o conforto térmico. Sob condições de conforto ($ITU < 72$, como em 2022, com 71,74), há redução da carga térmica e melhora das respostas ingestivas, coerente com evidências fisiológicas de menor frequência respiratória e melhor comportamento alimentar em ambientes moderados (Azevedo et al., 2024; Reis et al., 2021). No biplot da ACP (Figura 2), o ano de 2022 se agrupa próximo aos anos de transição, marcado por valores intermediários de temperatura, umidade e entalpia. Da mesma forma, o dendrograma (Figura 3) posiciona 2022 no grupo de anos de variabilidade climática moderada (Grupo 3), que reúne condições de conforto térmico relativo e precipitação intermediária, reforçando que anos com ITU mais baixos e melhor balanço hídrico favorecem a estabilidade produtiva observada na série histórica.

A análise multivariada reforça que o conforto térmico é elemento central nos sistemas tropicais. A ACP evidenciou que a variabilidade interanual é determinada principalmente por fatores térmicos e hídricos: o PC1 concentrou variáveis associadas ao calor sensível e o PC2 ao calor latente. PC1 explicou 51,36% da variância, concentrando variáveis associadas ao calor

sensível (temperatura do ar 0,4816, ITU 0,4594, entalpia 0,3739), enquanto o PC2 explicou 25,00%, dominado por variáveis de calor latente (ponto de orvalho 0,6755, entalpia 0,4400, umidade relativa 0,3542). Essa separação valida o uso de índices compostos como ITU e entalpia no acompanhamento do ambiente térmico.

A combinação de calor e umidade intensifica o desconforto animal, reduzindo ingestão e aumentando a demanda fisiológica, fenômeno descrito em estudos de estresse térmico em bovinos (Polsky e von Keyserlingk, 2017; Jo e Lee, 2025). A atuação negativa de variáveis como incidência solar (- 0,2489) e vento (- 0,2988) coincide com princípios de manejo ambiental discutidos por Fournel et al. (2017), que destacam a eficácia de sombreamento, ventilação e sistemas evaporativos no alívio térmico.

O biplot da ACP indicou que os anos de maior risco climático foram 2015 e 2016, caracterizados por temperaturas médias elevadas (28,89 °C e 27,62 °C), ITU de 75,51 e 75,25 e entalpia superior a 16,5 kJ·kg⁻¹, forte carga de calor sensível. Os anos 2020, 2021 e 2024 destacaram-se pelo aumento do calor latente, associados a umidade relativa mais elevada (61,95% - 65,32%), ponto de orvalho acima de 16,6 °C e precipitação anual de 1.072,0 mm, 1.039,4 mm e 946,2 mm, respectivamente. Essa separação entre anos mais quentes e anos mais úmidos, observada no plano fatorial, foi confirmada pelo dendrograma de similaridade, que agrupou 2020, 2021 e 2024 como anos de maior umidade e precipitação (> 900 mm) e ITU abaixo de 73, enquanto 2015 - 2016 formaram o grupo de maior calor sensível, menor pluviosidade (368,6 mm e 515,9 mm) e ITU > 75. Esses padrões reforçam a eficiência dos índices compostos e da análise multivariada em identificar anos anômalos e períodos críticos na série histórica do semiárido mineiro

O estresse térmico compromete o eixo endócrino da lactação, reduzindo a secreção de hormônios como prolactina e ocitocina, diminuindo a ruminação e aumentando a frequência respiratória (Reis et al., 2021; Azevedo et al., 2024). Esses mecanismos são compatíveis com os resultados observados neste estudo: nos anos mais quentes da série, especialmente 2015 e 2016, que registraram temperaturas médias de 28,89 °C e 27,62 °C, ITU de 75,51 e 75,25 e precipitação reduzida (368,6 e 515,9 mm), houve queda expressiva da produção leiteira de 1,72 bilhões (2014) para 1,48 bilhões de litros (2016) e redução da produção de carne de 150 mil para 125 mil toneladas.

Moretti et al. (2017) demonstraram que o aumento do THI reduz o tempo de ruminação, reforçando o impacto funcional do calor sobre o comportamento ingestivo, e esse

efeito também se refletiu nos anos de El Niño da presente série, nos quais a combinação de calor sensível elevado e baixa disponibilidade forrageira coincidiu com os menores desempenhos produtivos do período analisado.

Na pecuária de corte, a escassez de pastagens reduz o tempo de pastejo, aumenta o ócio e limita o ganho médio diário. A disponibilidade de forragem regula o comportamento ingestivo e o metabolismo energético: maior oferta aumenta pastejo, ruminação e eficiência alimentar, enquanto a estiagem tem efeito oposto. Estratégias como suplementação proteico-energética durante a seca ajudam a manter o desempenho, conforme evidenciado em estudos de manejo térmico e fisiológico (Azevedo et al., 2024). Os dados do presente estudo reforçam essa interpretação: nos anos mais secos, especialmente 2015 e 2016, quando a precipitação caiu para apenas 368,6 mm e 515,9 mm e o ITU atingiu 75,51 e 75,25, a produção de carne apresentou seus menores valores da série (130 mil e 125 mil toneladas). Esses resultados mostram que, sob forte limitação hídrica e maior estresse térmico, a disponibilidade de forragem diminui e a suplementação torna-se essencial para evitar quedas ainda maiores no desempenho.

Indicadores ambientais como o NDVI influenciam diretamente o desempenho final das carcaças, conforme demonstrado por Amaral et al. (2024), destacando a relevância da condição da pastagem na produtividade. Essa relação também se refletiu no presente estudo, uma vez que os anos de maior recuperação produtiva - 2020, 2021 e 2023 - coincidiram com precipitações elevadas (1.072 mm e 1.039 mm em 2020 - 2021) ou com rápida rebrota de pastagens após eventos de chuva, resultando em produção de carne de 170 mil, 180 mil e 190 mil toneladas, respectivamente. Os padrões encontrados fortalecem o vínculo entre disponibilidade de biomassa forrageira, qualidade nutricional das pastagens e desempenho produtivo dos rebanhos no semiárido mineiro.

A produção de carne no semiárido mineiro depende da interação entre clima, manejo e qualidade forrageira. Os anos mais críticos do estudo (2015 - 2016), com precipitação de 368,6 e 515,9 mm e ITU acima de 75, registraram as menores produções de carne (130 e 125 mil toneladas), o que mostrou a vulnerabilidade do sistema ao estresse térmico e hídrico. Em anos mais úmidos e termicamente amenos, como 2020, 2021 e 2023, sustentaram as maiores produtividades (170, 180 e 190 mil toneladas), demonstrando a forte dependência da pecuária regional de condições climáticas favoráveis. A estabilidade produtiva requer estratégias integradas de manejo climático e nutricional, apoiadas no uso de índices compostos como ITU

e entalpia para orientar ações adaptativas que aumentem a resiliência dos sistemas pecuários frente às oscilações ambientais.

4.5 CONCLUSÃO

Este estudo evidencia que compreender a relação entre clima e desempenho pecuário no semiárido mineiro é essencial para garantir a sustentabilidade produtiva e econômica da região.

A análise multivariada aplicada a dados de uma década demonstrou que a integração entre variáveis térmicas, hídricas e produtivas é capaz de revelar padrões ambientais complexos, que não seriam identificados por abordagens isoladas.

Mais do que quantificar oscilações anuais, o trabalho permitiu traduzir estatisticamente a influência direta do ambiente sobre a eficiência biológica dos rebanhos, consolidando a importância do uso de índices compostos (ITU e entalpia) e ferramentas analíticas avançadas como instrumentos de diagnóstico climático.

Do ponto de vista técnico, a pesquisa reforça que o monitoramento contínuo de variáveis meteorológicas e sua interpretação integrada com indicadores zootécnicos constituem a base para uma pecuária adaptada às novas condições climáticas.

Os resultados obtidos não apenas confirmam a vulnerabilidade dos sistemas produtivos a extremos térmicos e hídricos, mas também apontam caminhos para a mitigação dos impactos, destacando o papel do manejo adaptativo como elo entre ciência e prática.

Medidas como o sombreamento estratégico, o resfriamento evaporativo, a suplementação nutricional programada, e o uso de genótipos adaptados ao calor devem ser compreendidas não como alternativas isoladas, mas como componentes integrados de sistemas resilientes.

Cientificamente, este trabalho contribui para o avanço do conhecimento agroclimático aplicado à bovinocultura tropical, demonstrando que a estatística multivariada é uma ferramenta poderosa para identificar padrões de risco climático e orientar decisões em tempo real.

Essa abordagem oferece suporte para políticas públicas, zoneamentos agroclimáticos e estratégias de planejamento territorial da pecuária, especialmente em regiões vulneráveis às mudanças climáticas globais.

633 Por fim, as evidências reunidas aqui indicam que a resiliência da pecuária no semiárido
634 mineiro depende da capacidade de antecipar cenários climáticos, ajustar práticas de manejo
635 e fortalecer a integração entre pesquisa, extensão e produtor rural.

636 Mais do que compreender o passado climático, é necessário planejar o futuro
637 produtivo, transformando o conhecimento técnico em ações concretas de adaptação e
638 inovação sustentável.

4.6 REFERÊNCIAS

- Amaral, T. B.; LE Cornec, A. P.; Rosa, G. J. M. 2024. Environmental factors and management practices associated with beef cattle carcass quality in the mid-west of Brazil. *Translational Animal Science* 8:txae120. DOI: <http://doi.org/10.1093/tas/txae120>
- Azevedo, L. A.; Canozzi, M. E. A.; Rodhermel, J. C. B.; Schwegler, E.; La Manna, A.; Clariget, J.; Bianchi, I.; Moreira, F.; Olsson, D. C.; Peripolli, V. 2024. Strategies to alleviate heat stress on performance and physiological parameters in feedlot-finished cattle under heat stress conditions: systematic review and meta-analysis. *Journal of Thermal Biology* 119:103798. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2024.103798>
- Barbosa Filho, J. A. D.; Vieira, F. M. M. C.; Garcia, D. B.; Silva, M. A. N.; Silva, I. O. J. 2007. Tabela prática para avaliação do ambiente de confinamento de vacas holandesas em lactação. Núcleo de Pesquisa em Ambiência: Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.
- Becker, C. A.; Collier, R. J.; Stone, A. E. 2020. Invited review: Physiological and behavioral effects of heat stress in dairy cows. *Journal of Dairy Science* 103:6751-6770. DOI: <http://doi.org/10.3168/jds.2019-17929>
- Cheng, M.; McCarl, B.; Fei, C. 2022. Climate change and livestock production: A literature review. *Atmosphere* 13:140. DOI: <http://doi.org/10.3390/atmos13010140>
- Dikmen, S. and Hansen, P. J. 2009. Is the temperature-humidity index the best indicator of heat stress in lactating dairy cows in a subtropical environment? *Journal of Dairy Science* 92:109-116. DOI: <http://doi.org/10.3168/jds.2008-1370>
- EMATER-MG. Pecuária em Minas Gerais: panorama e importância econômica. Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do Estado de Minas Gerais, 2025. Disponível em: https://www.emater.mg.gov.br/portal.do?flagweb=novosite_pagina_interna&id=18712. Acesso em: 10 ago. 2025.
- EMBRAPA. Anuário do Leite 2024. Juiz de Fora: Embrapa Gado de Leite. 2024. Disponível em:

<https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1164754/1/Anuario-Leite-2024.pdf>. Acesso em: 10 mar. 2025.

Fournel, S.; Ouellet, V.; Charbonneau, É. 2017. Practices for alleviating heat stress of dairy cows in humid continental climates: A literature review. *Animals* 7:37. DOI: <http://doi.org/10.3390/ani7050037>

Guimarães, K. L.; da Costa Sarmiento, P. L.; Manno, M. C.; de Lima Carvalhal, M. V. 2020. bioclimático para produção de bovinos de leite na região sudeste da Amazônia Legal. *PUBVET* 14:141. DOI: <http://doi.org/10.31533/pubvet.v14n12a709.1-10>

Hammer, Ø. 2001. PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontologia Electronica* 4:9.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP). Brasília: INMET, 2024. Disponível em: <https://bdmep.inmet.gov.br/>. Acesso em: 18 jan. 2025.

Jo, J. and Lee, H. 2025. Impact of Relative Humidity on Heat Stress Responses in Early-Lactation Holstein Cows. *Animals* 15:1503. DOI: <https://doi.org/10.3390/ani15111503>

Johnson, R. A. and Wichern, D. W. Applied multivariate statistical analysis. 5. ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2002.

Kaiser, H. F. 1960. The application of electronic computers to factor analysis. *Educational and Psychological Measurement* 20:141-151. Doi: <https://doi.org/10.1177/001316446002000116>

Luiz, A. J. B. 2002. Meta-análise: definição, aplicações e sinergia com dados espaciais. *Cadernos de Ciência & Tecnologia* 19:407-428. DOI: <https://doi.org/10.35977/0104-1096.cct2002.v19.8814>

Menéndez-Buxadera, A.; Muñoz-Mejías, E.; Sánchez, M.; Serradilla, J. M.; Molina, A. 2021. Use of Principal Component Analysis to combine genetic merit for heat stress and fat and protein

yield in Spanish autochthonous dairy goat breeds. *Animals* 11:736. DOI: <http://doi.org/10.3390/ani11030736>

Meneses, J. A. M.; de Sá, O. A. A. L.; Coelho, C. F.; Pereira, R. N.; Batista, E. D.; Ladeira, M. M.; Casagrande D. R.; Gionbelli, M. P. 2021. Effect of heat stress on ingestive, digestive, ruminal and physiological parameters of Nelore cattle feeding low- or high-energy diets. *Livestock Science* 252: 104676. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.livsci.2021.104676>

Moretti, R.; Biffani, S.; Chessa, S.; Bozzi, R. 2017. Heat stress effects on Holstein dairy cows' rumination. *Animal* 11:2320-2325. DOI: <http://doi.org/10.1017/S1751731117001173>

NRC - National Research Council. 2016. Nutrient requirements of beef cattle. 8th ed. National Academies Press, Washington, D.C.

Novara, V.; Masseroni, M.; Canossa, M.; Gallo, A. 2025. Application of multivariate techniques for estimating herd feed efficiency using chemical and near-infrared calibration models in dairy cattle. *JDS Communications*. DOI: <http://doi.org/10.3168/jdsc.2025-0829>

Polsky, L. and von Keyserlingk, M. A. G. 2017. Invited review: Effects of heat stress on dairy cattle welfare. *Journal of Dairy Science* 100:8645-8657. DOI: <https://doi.org/10.3168/jds.2017-12651>

Reis, N. S.; Ferreira, I. C.; Mazocco, L. A.; Souza, A. C. B.; Pinho, G. A.; da Fonseca Neto, Á. M.; McManus, C. M. 2021. Shade modifies behavioral and physiological responses of low to medium production dairy cows at pasture in an integrated crop-livestock-forest system. *Animals* 11:2411. DOI: <https://doi.org/10.3390/ani11082411>

Silva, W. C.; da Silva, J. A. R.; Martorano, L. G.; da Silva, É. B. R.; de Carvalho, K. C.; Sousa, C. E. L.; ... Lourenço-Júnior, J. D. B. 2024. Thermal comfort of Nelore cattle (*Bos indicus*) managed in silvopastoral and traditional systems associated with rumination in a humid tropical environment in the Eastern Amazon, Brazil. *Veterinary Sciences* 11:236. DOI: <https://doi.org/10.3390/vetsci11060236>

Silveira, R.M. F.; da Silva, V. J.; Ferreira, J.; dos Santos Fontenelle, R. O.; Vega, W. H. O.; Sales,

738 D. C.; ... de Vasconcelos, A. M. 2022. Diversity in smallholder dairy production systems in the
 739 Brazilian semiarid region: Farm typologies and characteristics of raw milk and water used in
 740 milking. Journal of Arid Environments 203:104774. DOI:
 741 <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2022.104774>
 742

743 Tazzo, I. Tarouco; A. K., Allem, P. H. C.; Bremm, C.; Cardoso, L. S.; Junges, A. H. 2024.
 744 Temperature and Humidity Index (THI) during the 2021/2022 summer and its impact on dairy
 745 cattle in Rio Grande do Sul, Brazil. Ciência Animal Brasileira 25:e77035. DOI:
 746 <https://doi.org/10.1590/1809-6891v25e-77035E>
 747

748 Winders, T. M.; Melton, B. A.; Boyd, B. M.; Macken, C. N.; Watson, A. K.; MacDonald, J. C.;
 749 Erickson, G. E. 2023. Impact of shade in beef feedyards on performance, ear temperature and
 750 heat stress measures. Journal of Animal Science, 101: skad004. DOI:
 751 <https://doi.org/10.1093/jas/skad004>

4.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho permitiu compreender, de forma mais próxima e integrada, como as mudanças climáticas vêm influenciando a produção de leite e carne no semiárido mineiro. Ao analisar dados de uma década, foi possível observar que o clima não afeta apenas o ambiente, mas impacta diretamente a rotina, a produtividade e a sustentabilidade dos sistemas pecuários da região.

As variações na temperatura, na umidade e na precipitação ao longo dos anos mostraram que os rebanhos estão constantemente expostos a situações de estresse, especialmente durante períodos de seca intensa e calor excessivo. Esses períodos comprometeram a ingestão de alimento, a eficiência metabólica e, consequentemente, o desempenho produtivo dos animais. Por outro lado, anos com melhores condições de chuva e menor carga térmica proporcionaram recuperação da produção, evidenciando o quanto a pecuária é sensível às condições climáticas.

Mais do que apresentar números e tendências, este estudo demonstrou a importância de compreender a interação entre clima, ambiente e produção animal de forma integrada. A utilização de índices como o ITU e a entalpia, associada às análises multivariadas, permitiu enxergar padrões que não seriam percebidos em análises isoladas, reforçando a necessidade de abordagens mais completas e sistêmicas.

Do ponto de vista prático, os resultados indicam que a pecuária no semiárido depende cada vez mais da adoção de estratégias adaptativas. Medidas como sombreamento adequado, resfriamento, suplementação nutricional em períodos críticos e escolha de animais mais adaptados ao calor não devem ser vistas como soluções pontuais, mas como parte de um conjunto de ações integradas que aumentam a resiliência dos sistemas produtivos.

Além disso, este trabalho destaca o papel fundamental do monitoramento climático contínuo como ferramenta de planejamento e tomada de decisão. Antecipar cenários de risco e preparar respostas adequadas pode reduzir perdas, aumentar a eficiência e contribuir para a sustentabilidade da atividade pecuária na região.

Por fim, espera-se que esta pesquisa contribua não apenas para o meio acadêmico, mas também para produtores, técnicos e gestores, fortalecendo o diálogo entre ciência e prática no enfrentamento dos desafios impostos pelas mudanças climáticas no semiárido mineiro.