

# INDICADORES DE ESTRESSE TÉRMICO EM BOVINOCULTURA DE LEITE: DA CIÊNCIA À TOMADA DE DECISÃO COM INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

*Data de aceite: 01/08/2024*

### **Liandra Maria Abaker Bertipaglia**

Universidade Brasil, UB, Descalvado-SP  
<http://orcid.org/0000-0001-5811-7816>

### **Gabriel Maurício Peruca de Melo**

Universidade Brasil, UB, Descalvado-SP  
<http://orcid.org/0000-0002-1634-4145>

### **Wanderley José de Melo**

Universidade Brasil, UB, Descalvado-SP  
e Universidade Estadual Paulista, FCAV/  
UNESP, Jaboticabal-SP. Pesquisador  
Sênior do CNPq  
<http://orcid.org/0000-0003-2683-0347>

### **Beatriz Pereira Baldissarelli**

Universidade Brasil, UB, Descalvado-SP  
<http://lattes.cnpq.br/1292127655017477>

### **Mariana Mello**

Universidade Brasil, UB, Descalvado-SP  
<http://lattes.cnpq.br/6395901509400650>

### **Tony Edgley Catão Tenorio**

Universidade Brasil, UB, Descalvado-SP  
<http://lattes.cnpq.br/0599558351358749>

### **Caroline Fernanda Franco Lima**

Universidade Brasil, Descalvado-SP  
<https://orcid.org/0009-0001-2622-1632>

**RESUMO:** O capítulo “Biomonitoramento de vacas leiteiras com foco na avaliação do bem-estar” aborda a importância dos indicadores de estresse térmico na bovinocultura leiteira, destacando a relevância crescente desses parâmetros nos últimos anos. A pesquisa utiliza a plataforma Scopus para uma análise bibliométrica abrangendo o período de 2019 a 2024, identificando um aumento significativo na publicação de estudos sobre estresse térmico em vacas leiteiras. Com 793 documentos recuperados, a análise revela que a maioria das publicações são artigos científicos, seguidos por artigos de revisão, livros e capítulos de livros. O estudo enfatiza o impacto do estresse térmico na produção e bem-estar dos bovinos, destacando a necessidade de biomarcadores e tecnologias avançadas para avaliação e monitoramento. A inteligência artificial (IA) e o aprendizado de máquina (ML) são identificados como ferramentas promissoras para auxiliar na tomada de decisões e otimização da produção leiteira. A análise bibliométrica também posiciona o Brasil como o quarto país com maior número de publicações sobre o tema, demonstrando um crescimento promissor na área. Além dos aspectos bibliométricos, o estudo

detalha a importância de variáveis fisiológicas, como frequência respiratória, frequência cardíaca, temperatura retal e da pele, como indicadores de estresse térmico. A termografia infravermelha (IRT) é destacada como uma tecnologia promissora para a coleta de dados fisiológicos. O uso de IA para análise de termogramas é explorado, evidenciando a redução da variabilidade entre observadores e a superação da capacidade humana em tarefas específicas. Em conclusão, a pesquisa reforça a necessidade de contínuo investimento em tecnologias de monitoramento e avaliação de estresse térmico, visando melhorar o bem-estar e a produtividade dos bovinos leiteiros.

## INTRODUÇÃO

Os parâmetros ou indicadores utilizados para avaliar o estado de estresse térmico em animais alcançaram patamares significativos de importância no contexto mundial nos últimos cinco anos. Além disso, os mecanismos tecnológicos que se utilizam dessas informações para auxiliar nas tomadas de decisão sobre o manejo dos animais nesse estado térmico têm sido cada vez mais desenvolvidos e aplicados.

Na bovinocultura de leite, pesquisas publicadas indicam que a preocupação com essa temática é recorrente e vem aumentando nos últimos anos. Para exemplificar essa realidade, realizou-se um levantamento bibliográfico na base de dados Scopus, que oferece acesso a milhões de registros de artigos de periódicos, conferências e patentes, abrangendo uma ampla gama de disciplinas acadêmicas, além de trabalhos de conclusão. Desenvolvida pela Elsevier, essa plataforma é uma ferramenta essencial para a pesquisa acadêmica, oferecendo extensa cobertura, atualização constante e recursos avançados de busca e análise.

Nesse levantamento bibliográfico realizado, adotou-se o período de 2019 a 2024, utilizando-se como palavras-chave e termos booleanos na busca avançada da plataforma (<https://www.scopus.com>): “gado leiteiro” OU “vacas” OU “bovinos”; “estresse térmico” OU “estresse por calor”; “indicadores” OU “biomarcadores”; “inteligência artificial” OU “aprendizado de máquina” OU “IA” OR “ML”; “avaliação”; “monitoramento”; “previsão”.

Considerando as descobertas obtidas no levantamento, destaca-se o número crescente de pesquisas com bovinos leiteiros sobre essa temática, publicadas no período de 2019 a 2024, conforme observado na Figura 1. No total, foram recuperados 793 resultados na Scopus, sendo que no ano de 2024, em apenas quatro meses completos, foram publicados 87 documentos.

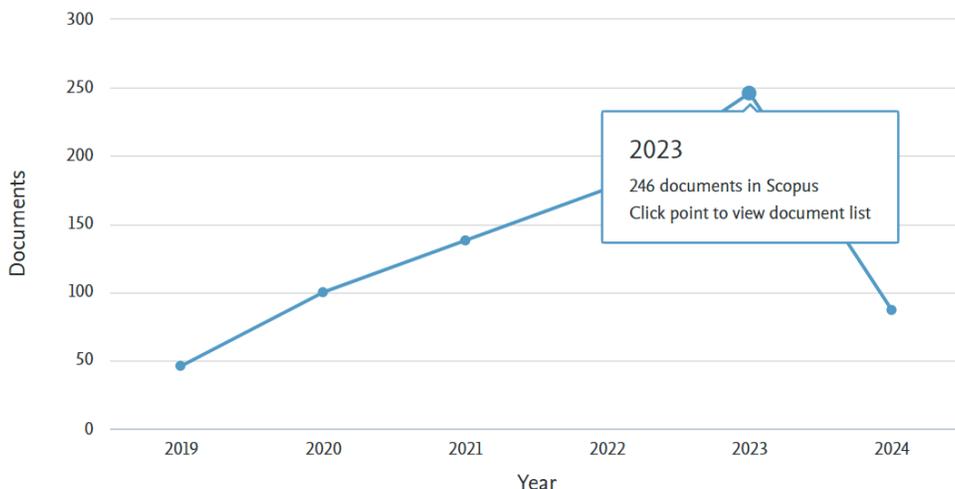


Figura 1. Documentos publicados por ano, no período de 2019 a 2024, apresentados na plataforma Scopus. Data de pesquisa: maio de 2024.

Fonte: Scopus ( <https://www.scopus.com/term/analyzer> ).

Deve-se levar em consideração que, do total de 793 resultados recuperados, 64,6% (512 documentos) são da categoria artigo científico, 27,2% (216 documentos) são artigos de revisão, 4,2% (33 documentos) são livros e 2,4% (19 documentos) são capítulos de livros (Figura 2).

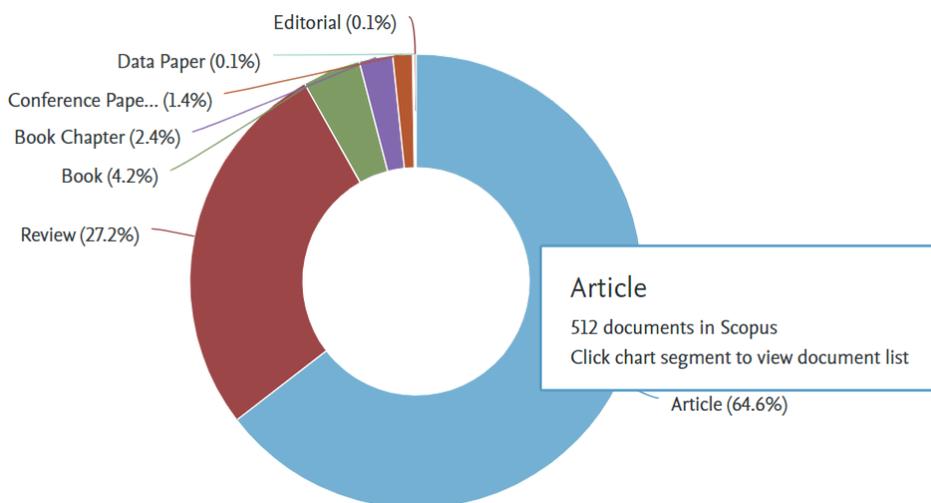


Figura 2. Categorias de documentos publicados por ano, no período de 2019 a 2024, apresentados na plataforma Scopus. Data de pesquisa: maio de 2024.

Fonte: Scopus ( <https://www.scopus.com/term/analyzer> ).

Outra característica relevante considerada foi a posição do Brasil entre os 13 países que mais publicaram documentos sobre a temática do levantamento bibliográfico realizado na plataforma Scopus. O Brasil contribuiu com 59 documentos, enquanto a Itália contribuiu com 67, os Estados Unidos com 137 e a China com 157. Na Figura 3, dentre os países apresentados, a menor contribuição foi da Coreia do Sul, com 25 documentos.

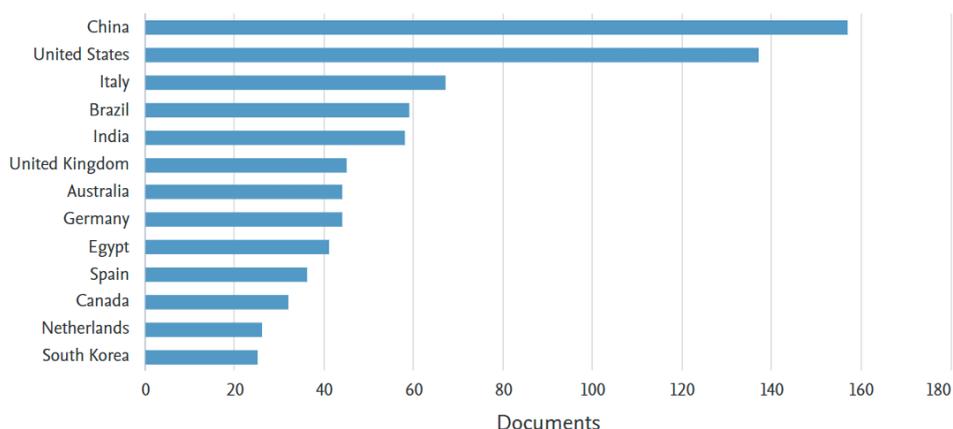


Figura 3. Ranking dos 13 países que publicaram  $\geq 25$  documentos recuperados na plataforma Scopus, no período de 2019 a 2024. Data de pesquisa: maio de 2024.

Fonte: Scopus ( <https://www.scopus.com/term/analyzer> ).

De modo geral, o estresse térmico é um fator que impacta significativamente a produção e o bem-estar dos bovinos leiteiros. A busca por indicadores, biomarcadores e tecnologias para avaliação e monitoramento do estresse térmico é crucial para o manejo adequado dos animais.

Neste cenário, a inteligência artificial e o aprendizado de máquina apresentam grande potencial para auxiliar na tomada de decisões e na otimização da produção leiteira. O Brasil, apesar de ocupar a 4ª posição no ranking de países com maior número de publicações, demonstra um crescimento promissor na área de pesquisa sobre estresse térmico em bovinos leiteiros, o que vem a corroborar que o Brasil continue investindo em pesquisa e desenvolvimento na área de estresse térmico em bovinos leiteiros, buscando se consolidar como referência internacional na temática.

Na busca de informações mais detalhadas sobre o resultado da pesquisa obtida na plataforma Scopus, limitou-se a busca, sobre os 793 documentos encontrados, usando restritores as palavras-chaves associadas intrinsecamente aos fatores animal e do meio ambiente que interferem sobre a resposta animal frente aos estresse por calor, sendo estas as palavras-chaves: fazendas, bovino, pecuária, gado leiteiro, vaca, vaca leiteira, gado Holandês, modelo animal, bem estar animal, bem-estar, temperatura corporal, temperatura

retal, temperatura, termografia, termorregulação, termografia infravermelha, umidade, estresse por calor, estresse térmico, resposta ao choque térmico, estresse oxidativo, antioxidantes, estresse fisiológico, estresse animal, produção de leite, marcador biológico, biomarcadores, fertilidade, antioxidante, reprodução, produção de leite, fertilidade, peso corporal, resposta imune, comportamento animal, comportamento, ingestão de alimentos, taxa respiratória, inseminação artificial, espermatozoide, sêmen, embrião, desenvolvimento embrionário, lesão por calor, saúde animal, claudicação, fator ambiental. Desta restrição, 525 documentos foram recuperados, sendo que 370 eram da categoria artigo científico.

Ainda, limitando-se a busca para outros restritores relacionados à ordem tecnológica (pecuária de precisão, precisão, inteligência artificial, machine learning, aprendizado de máquina, aprendizado, aprendizado profundo, algoritmo) recuperou-se 538 documentos do total de 793 encontrados na plataforma Scopus, representando aproximadamente 70% dos documentos publicados. Esses números denotam a expressão da pesquisa sobre a nova onda tecnológica e de precisão que a pesquisa representa sobre a bovinocultura leiteira.

O que se observa, em uma análise generalista sobre os documentos recuperados é que abordam questões importantes que podem ser utilizadas na prática das fazendas leiteiras comerciais. Modelos analíticos preditivos integrados ao aprendizado de máquina melhoram a tomada de decisões e permitem que os pecuaristas maximizem suas explorações.

Isto é evidente na capacidade desses produtores de monitorar remotamente a saúde do gado através de dispositivos vestimentais que monitorizam os sinais específicos e o comportamento dos animais. Além disso, os veterinários empregam diagnósticos avançados baseados em IA para detecção e controle eficiente de parasitas, rastreamento automatizado e análise de comportamento, detecção de anomalias, nutrição de precisão, suporte à reprodução e aplicativos de gerenciamento baseados em dispositivos móveis. Embora a inteligência artificial e aprendizado de máquina sejam importantes no desenvolvimento sustentável, sua aplicação apresenta inúmeros desafios.

No geral, a digitalização e a IA transformaram completamente as práticas tradicionais na pecuária. No entanto, existe uma necessidade urgente de melhorar a criação digital, permitindo que os pecuaristas apreciem e adotem estes sistemas inovadores.

## ALGUNS INDICADORES DE ESTRESSE E A INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Para manter o equilíbrio interno e lidar com o estresse, os animais dependem de variáveis fisiológicas essenciais, como frequência respiratória (FR), frequência cardíaca (FC), temperatura retal (TR), taxa de sudorese (TS) e temperatura da pele (TP). Entre essas variáveis, FR, TR e TP se destacam como indicadores confiáveis do estresse térmico em diversos animais de produção, incluindo gado de corte e leiteiro. A avaliação dessas variáveis fornece informações valiosas sobre a gravidade do estresse térmico, permitindo aos produtores rurais tomarem medidas para garantir o bem-estar animal e minimizar os impactos negativos na produtividade. Em resumo, FR, TR e TP são ferramentas essenciais para monitorar o estresse térmico em animais de produção, contribuindo para a saúde animal, o bem-estar e a lucratividade da pecuária (Rashamol et al., 2018)

### Temperatura retal e da superfície do corpo

A temperatura retal (TR) é um indicador crucial da carga de calor nos animais e do seu estado fisiológico (Koga et al 2004). Quando expostos a alto estresse térmico, os animais tentam equilibrar a temperatura corporal dissipando a carga de calor. Se estes mecanismos falharem, a TR aumenta, indicando uma falha dos mecanismos termorreguladores (Marai; Haebe 2010). O aumento da TR pode reduzir o desempenho dos animais uma vez que está relacionada com características fisiológicas associadas ao estresse térmico em animais de produção. Estudos mostraram uma correlação entre TR, umidade e outras características fisiológicas em várias raças de gado. Portanto, a TR pode ser um marcador biológico confiável para quantificar a resposta ao estresse térmico na pecuária (Salio et al., 2017; Chandra Bhan et al., 2013).

A pele é uma importante fonte para a troca de calor em mamíferos, com a temperatura da superfície da pele (ST) podendo ser medida em diferentes partes do corpo (Paulo; Lopes, 2014).

A temperatura da superfície corporal varia de acordo com a exposição solar e o fluxo sanguíneo da pele, que regula o calor entre o núcleo do corpo e a pele. O estresse térmico altera o fluxo sanguíneo e aumenta-o para as superfícies da pele, com essa temperatura sendo registrada mais alta durante o verão (Marai et al., 2007).

De modo geral, em temperaturas acima da zona de termoneutralidade, os animais precisam dissipar o calor excessivo do corpo para o ambiente. Regiões específicas da superfície corporal desempenham um papel fundamental nesse equilíbrio térmico, sendo ainda mais importante em áreas quentes (Souza-Junior et al., 2018). As chamadas “janelas térmicas” são áreas especializadas na liberação de calor durante o estresse térmico, por meio do aumento da circulação sanguínea periférica (Thompson et al., 2017).

Superficialmente, as janelas térmicas se caracterizam pela ausência ou pouca presença de pelos (mamíferos) ou penas (aves). Pelos e penas atuam como resistência à transferência de calor do corpo para o ambiente. Em alguns casos, uma camada de ar entre pelos ou penas reduz ainda mais a condutividade térmica, dificultando a dissipação de calor. No conceito de janela térmica, bem estabelecido, o “abrir da janela” representa a vasodilatação periférica em climas quentes, facilitando a liberação de calor. Já o “fechar da janela” representa a vasoconstrição periférica para conservar calor em climas frios (Souza-Junior; De Queiroz, 2022).

Para a avaliação da temperatura da superfície do corpo dos animais, ao contrário dos métodos tradicionais que necessitam de contato, a termografia infravermelho (IRT) se destaca como uma ferramenta promissora para coletar dados fisiológicos. Essa tecnologia gera imagens térmicas (ou termogramas) que mapeiam a temperatura da superfície corporal, facilitando a previsão da troca de calor sensível entre o animal e o ambiente (Souza-Junior et al., 2019).

A análise computadorizada de termogramas é fundamental para aprimorar as informações obtidas pela termografia infravermelha, pois a relação entre doenças e padrões de calor, por exemplo, costuma ser sutil e complexa. Algoritmos de mineração de dados e aprendizado de máquina (ML) são frequentemente utilizados para essa análise, funcionando como ferramentas de diagnóstico assistidas por computador que auxiliam pessoas na tomada de decisões (de Dumast et al., 2018).

Essa abordagem computacional oferece três vantagens principais: a) redução da variabilidade entre observadores (análise computadorizada padroniza a interpretação dos termogramas, minimizando diferenças nas avaliações feitas por diferentes profissionais); b) superação da capacidade humana em tarefas específicas (a inteligência artificial (IA) pode superar o desempenho humano em tarefas específicas, como identificar padrões sutis de calor que podem indicar doenças); c) medição objetiva do desempenho (o desempenho dos sistemas de análise computadorizada pode ser medido e quantificado, permitindo avaliar sua confiabilidade e aprimorá-los continuamente) (Faust et al., 2014).

As características radiômicas extraem informações quantitativas de imagens, permitindo a análise e classificação de padrões específicos. São divididas em três categorias principais: forma, textura e frequência (Gonzalez; Woods; Prentice Hall, 2008).

A combinação de características radiômicas (quantitativas) com características semânticas (qualitativas) possibilita uma caracterização mais completa e robusta de um determinado padrão. O aprendizado de máquina (ML) é um ramo da inteligência artificial (IA) que capacita modelos computacionais a aprender e fazer previsões através do reconhecimento de padrões (Hung et al., 2020).

Um exemplo do uso de imagens termográficas para o diagnóstico precoce de doença de rebanho leiteiro (mastite) foi relatado por Yurochka et al. (2023). Segundo os pesquisadores, o sistema estudado foi composto por três módulos de imagem térmica que

capturam termogramas simultâneos de toda a superfície do úbere, permitindo uma análise completa e precisa. Um algoritmo inteligente foi desenvolvido para processar as imagens térmicas e classificar cada úbere em um dos três estados possíveis: “saudável”, “suspeita de mastite subclínica” ou “suspeita de mastite clínica”. O algoritmo também levou em consideração a posição do animal, seja dinâmica ou estática, durante a coleta de dados.

Segundo Yurochka et al. (2023), essa tecnologia inovadora oferece diversos benefícios, como: diagnóstico precoce da mastite (a detecção precoce da mastite permite um tratamento mais eficaz e rápido, reduzindo os custos com medicamentos e o impacto na produção de leite); redução de custos (o diagnóstico sem contato elimina a necessidade de exames invasivos, diminuindo o risco de infecções e o estresse para os animais); maior bem-estar animal (o diagnóstico precoce e o tratamento eficaz contribuem para o bem-estar das vacas leiteiras); análise completa do úbere (a captura simultânea de imagens térmicas de toda a superfície do úbere permite uma avaliação mais abrangente e precisa da saúde do animal).

Segundo Wang et al. (2023), na investigação tradicional baseada em termografia infravermelho, os métodos de processamento da informação térmica contida na imagem térmica são complicados. A maioria deles é obtida e processada manualmente a partir de janelas térmicas usando software específico (como FLIR Tools), limitando severamente a aplicação da tecnologia IRT na produção. De modo geral, os sistemas inteligentes para o diagnóstico de mastite baseado em imagens térmicas representa um avanço significativo na área da pecuária leiteira, oferecendo uma ferramenta eficaz para o diagnóstico precoce, redução de custos e melhoria do bem-estar animal.

## Frequência respiratória

A frequência respiratória (FR) das vacas, um processo fisiológico essencial, vai além de um indicador da saúde respiratória. Ela se configura como um biomarcador crucial para avaliar o bem-estar animal, especialmente durante os períodos mais quentes, quando o estresse térmico se torna uma ameaça (Dißmann et al., 2022).

Em vez de construir um modelo complexo para calcular a frequência respiratória (FR) em vacas leiteiras, é mais prático desenvolver um modelo de previsão para este parâmetro. Para tal, é essencial identificar os principais fatores que influenciam a FR. Sendo assim, um fator considerado significativo é a temperatura do ambiente. A zona termoneutra (ZTN) representa uma faixa estreita de temperatura ambiente ideal para os animais, onde não há necessidade de gasto energético para manter a temperatura corporal. Para vacas em lactação, a ZTN está entre 5 e 25°C (Becker; Stone, 2024). Quando expostas ao estresse térmico, a FR das vacas pode aumentar significativamente, variando entre 45 e 80 bpm, e em casos extremos, pode ultrapassar 120 bpm, dependendo da severidade do estresse (Yan et al., 2021).

A abordagem convencional para determinação da frequência respiratória envolve a contagem manual dos movimentos do flanco (Santos et al., 2017). Apesar da utilização considerável deste método, abordagens alternativas surgiram nos últimos anos, como a utilização de sensores de pressão diferencial para medir flutuações de pressão no nariz, técnicas de termografia infravermelha ou sensores sensíveis à temperatura para detectar flutuações de temperatura no fluxo de ar inspirado e expirado pelas narinas (Jorquera-Chávez et al., 2019; Lowe et al., 2019; Strutzke et al., 2019; Kim et al., 2021).

Neste contexto, a FR das vacas leiteiras é um importante indicador de saúde para avaliação do estresse térmico em vacas expostas a altas temperaturas. Existem modelos baseados em aprendizado de máquina (Machine learning, ML) que podem identificar automaticamente padrões em fatores relacionados a FR. De acordo com Yan et al. (2024), ao avaliarem métodos de ML para desenvolver um modelo preditivo de FR de vacas leiteiras utilizando variáveis ambientais, observou-se que não houve diferença estatística no desempenho do modelo ao usar parâmetros ambientais, índices de calor ou fluxos de calor como características de entrada.

Wang et al. (2024) desenvolveram estudo para propor um algoritmo baseado em fluxo óptico para detectar remota e rapidamente a taxa respiratória de vacas em baias livres (confinamento tipo *freestall*). Para tanto, contou-se com câmeras fixas em posição e altura que pudesse captar os animais em posições planejadas e, com observadores para a avaliação “manual”. A vaca foi considerada expirando quando o flanco parece afundar para dentro e inspirando quando o flanco parece subir ou expandir. Com base neste critério, os observadores registaram manualmente as taxas de respiração, com cada ondulação do flanco representando um ciclo respiratório completo. Ao usar a inteligência artificial (algoritmo) para a análise e projeção dos resultados, os pesquisadores observaram que a região central do corpo da vaca foi a mais eficaz na estimativa da frequência respiratória, superando outras áreas de interesse (ROIs).

Segundo os pesquisadores, essa superioridade se deve a dois fatores principais: a) Definição precisa da região: a definição da região central como ROI minimiza a influência de ruídos causados por tremores corporais e balanço da cauda, movimentos que podem distorcer a medição da RR; b) Menor influência da flutuação do flanco: a região central apresenta menor flutuação durante a respiração em comparação com o flanco, o que contribui para a precisão da estimativa. É importante ressaltar que a utilização da região central como ROI ainda pode apresentar falhas em alguns casos, como quando a vaca apresenta alterações de postura ou tremores corporais intensos. Em suma, a escolha da região central do corpo da vaca como ROI para a estimativa da RR oferece maior precisão e confiabilidade, mas ainda apresenta limitações em cenários com movimentos corporais excessivos.

## Parâmetros comportamentais

O estresse térmico em vacas leiteiras surge quando os animais não conseguem dissipar o calor de forma eficaz, desequilibrando seu sistema termorregulatório. Condições ambientais adversas, como altas temperaturas, umidade elevada ou forte radiação solar, são os principais fatores que contribuem para o estresse térmico (Cesca et al., 2021; Thornton et al., 2022). Em alguns casos, o estresse térmico também pode estar relacionado à produção excessiva de calor pelo próprio animal em condições de criação sob alta densidade animal na mesma área (Santos et al., 2023).

Diante os fatores acima mencionados, além de outros, podem gerar respostas animais induzidas pelo estresse térmico e, que podem ser classificadas em respostas fisiológicas, respostas morfológicas, respostas comportamentais, respostas metabólicas, respostas produtivas e respostas do estado imunológico (Idris et al., 2021).

Em climas quentes, as vacas adotam diversas estratégias para minimizar o calor corporal. Mudanças no comportamento, como alterações na ingestão de alimento e água, tempo em pé e deitado, são algumas das respostas fisiológicas observadas. O aumento da temperatura ambiente pode levar as vacas a ficarem em pé por mais tempo, o que, por sua vez, pode reduzir a produção de leite. Essa postura em pé frequente melhora a respiração e a eficiência da perda de calor, diminuindo a transferência de calor corporal para o ambiente (Anderson et al., 2013).

Outro comportamento associado é o de beber água. Pereyra et al. (2010) corroboram a relação entre o comportamento de beber água e o índice temperatura-umidade (THI). Em seu estudo, vacas leiteiras caipiras apresentaram o maior número de episódios de consumo de água quando o THI se encontrava entre 78 e 82. O padrão de consumo de água foi monitorado durante três dias consecutivos, com cada hora do dia categorizada de acordo com o THI: “normal” ( $\text{THI} < 70$ ), “alerta” ( $70 < \text{THI} < 78$ ), “perigo” ( $79 < \text{THI} < 82$ ) e “emergência” ( $\text{THI} > 82$ ).

Além do comportamento de beber água, outras variáveis podem indicar estresse em vacas leiteiras, como a mobilidade. A claudicação, um problema frequente na indústria leiteira, gera perdas econômicas e compromete o bem-estar animal, sendo considerada um dos distúrbios mais dolorosos para as vacas e que altera o comportamento do animal (Olechnowicz; Jaskowski, 2011). A detecção precoce e precisa da claudicação deve minimizar esses impactos. O diagnóstico tradicional da claudicação, classicamente, é feito por meio da avaliação visual de atributos relacionados à condição, como inclinação da cabeça, curvatura das costas, encurtamento da passada e rigidez articular (Schlageter-Tello et al., 2014; Van Nuffel et al., 2016).

Higaki et al. (2024) propuseram a análise quantitativa da mobilidade através da técnica de estimativa de pose baseada em visão computacional e do aprendizado de máquina, possibilitando uma pontuação objetiva do nível de estresse.

Neste contexto, ao empregar tecnologia de visão computacional para reconhecer o comportamento animal, é possível monitorar o animal em tempo real, recebendo informações sobre o seu estado de saúde e, com isso, protegendo eficazmente o rebanho e mantendo, ao mesmo tempo, os benefícios econômicos da criação. A técnica de estimativa de postura baseada em visão computacional permite estimar a pose e os movimentos de animais ou humanos em sequências de vídeo. Devido ao seu potencial para facilitar a avaliação clínica motora, a avaliação através de medidas objetivas e quantitativas dos movimentos tem recebido atenção significativa no campo da saúde humana (Stenum et al., 2021).

Para Wang et al. (2023), o desenvolvimento de tecnologias emergentes representadas pela tecnologia de aprendizado de máquina (ML) oferece uma oportunidade para obter avaliações automatizadas, sem contato e de alta precisão da saúde do gado.

## Parâmetros ambientais

A avaliação do estresse térmico em vacas leiteiras frequentemente se baseia no índice de temperatura-umidade (ITU), que combina temperatura e umidade do ambiente. O Índice Temperatura-Umididade (ITU), criado por Thom em 1959, se destaca como o indicador mais popular para avaliar o estresse térmico em vacas leiteiras, devido à sua simplicidade e praticidade (SIQUEIRA, et al., 2022).

O Índice de Globo Negro e Umidade (Black Globe Humidity Index - BGHI), de acordo com Buffington et al., (1981), integra a temperatura de bulbo seco, a umidade, radiação líquida e movimento do ar em um único valor. O BGHI foi criado com a inserção da temperatura de globo negro (em vez da temperatura de bulbo seco), na equação do THI. O índice requer a medição da temperatura do globo negro, usando um termômetro de globo negro, que se refere a um dispositivo que consiste em uma esfera fina de cobre (geralmente com 0,15 m de diâmetro), pintada de preto e com um sensor de temperatura no centro. A esfera de metal preto absorve o calor radiante e aumenta a temperatura interna. Ele fornece informações indiretas sobre a contribuição da radiação e da velocidade do vento (°C) sobre a sensação térmica. Neste contexto, os autores afirmam que o BGHI é um indicador mais preciso do que o THI, estando o animal sob estresse por calor.

Segundo Frigieri (2022), o BGHI pode ser considerado o mais assertivo quando se fala em índice de conforto térmico na produção de leite, ao utilizar radiação solar direta com animais de estresse severo devido ao calor.

Pesquisas iniciais demonstraram que a ventilação forçada reduziu a frequência respiratória de 73 bpm para 59 bpm no grupo de animais em ambiente ventilado, em comparação ao grupo controle (Berman et al., 1985). Já no ano de 2010, Gebremedhin et al. observaram aumento da frequência respiratória superior a 125 bpm em vacas expostas a ambientes quentes e secos ou a radiação solar intensa (850 W m<sup>-2</sup>) por 3 horas.

Segundo Li et al., (2020), pesquisas utilizavam regressão múltipla para desenvolverem modelos de previsão de frequência respiratória para bovinos de corte e leite com a incorporação de parâmetros ambientais térmicos como temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do ar como entradas.

Em síntese, na avaliação do estresse térmico em vacas leiteiras, índices como o índice de temperatura e umidade (ITU) e índice de temperatura equivalente (ITE) para vacas leiteiras, que se baseiam em parâmetros ambientais (temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do ar e radiação solar), são comumente utilizados para classificar os níveis de estresse por calor (MADER et al., 2010). No entanto, esses índices não consideram as variações na geração interna de calor, um fator importante no equilíbrio térmico do animal (WANG et al., 2018).

Pesquisas recentes revelam o uso da inteligência artificial no processo de determinação precisa e ou previsão da frequência respiratória como indicador ou classificador do estresse por calor. Segundo Yan et al., (2024), ao contrário dos métodos tradicionais, os modelos de aprendizado de máquina (ML) se destacam pela habilidade de aprender padrões e relações complexas a partir de grandes conjuntos de dados. Essa flexibilidade e capacidade de aprendizado automático resultam em um desempenho preditivo superior.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nos últimos anos, a utilização de indicadores termodinâmicos na pecuária leiteira ganhou significativa importância no contexto global. Mecanismos tecnológicos que utilizam essas informações para auxiliar na tomada de decisões relativas ao manejo animal têm sido cada vez mais desenvolvidos e aplicados.

Em geral, o estresse térmico impacta significativamente a produção e a saúde do gado leiteiro. A busca por indicadores, biomarcadores e tecnologias para avaliação e monitoramento do estresse térmico é fundamental para o manejo adequado dos animais. A inteligência artificial e o aprendizado de máquina oferecem grande potencial para auxiliar na tomada de decisões e otimizar a produção leiteira. O Brasil, apesar de ocupar a 4<sup>a</sup> posição no ranking de países com maior número de publicações, apresenta um crescimento promissor nas pesquisas sobre estresse térmico em bovinos leiteiros, demonstrando seu contínuo investimento em pesquisa e desenvolvimento.

## REFERENCIAS

- ANDERSON, S.D.; BRADFORD, B.J.; HARNER, J.P.; TUCKER, C.B.; CHOI, C.Y.; ALLEN, J.D.; HALL, L.W.; RUNGRUANG, S.; COLLIER, R.J.; SMITH, J.F. Effects of adjustable and stationary fans with misters on core body temperature and lying behavior of lactating dairy cows in a semiarid climate. **Journal of Dairy Science**, v. 96, p.4738–4750, 2013.
- BECKER, C. A.; STONE, A. E. **Recognizing heat stress in dairy cattle: a scoring system to help producers assess heat stress**. Mississippi State University Extension Service. Publication 3464 (POD-03-24), 2024.
- BERMAN, A. Extending the potential of evaporative cooling for heat-stress relief. **Journal of Dairy Science**, v. 89, n. 10, p. 3817-3825, 2006.
- BUFFINGTON, C.S. et al. Black globe humidity index (BGHI) as comfort equation for dairy cows. **Transactions of the ASAE**, v.24, n.3, p.711-714, 1981.
- CESCA, R.S.; SANTOS, R.C.; DE TONISSI E BUSCHINELLI DE GOES, R.H.; FAVARIM, A.P.C; DE OLIVEIRA, M.S.G.; DA SILVA, N.C. Thermal comfort of beef cattle in the state of Mato Grosso do Sul, Brazil. **Ciência e Agrotecnologia**, v.45, e008321, 2021.
- CHANDRA, B.; SINGH, SV.; UPADHYAY, RC.; HOODA, OK.; BALIYAN, B. Impact of temperature variability on physiological, hematological and biochemical profile of growing and adult Murrah buffaloes. **Journal of Agrometeorology**, v.15, p.146-152, 2013.
- DE DUMAST, P.; MIRABEL, C.; CEVIDANES, L.; RUELLAS, A.; YATABE, M.; IOSHIDA, M.; et al. A web-based system for neural network based classification in temporomandibular joint osteoarthritis. **Computerized Medical Imaging and Graphics**, v.67, p. 45–54, 2018.
- DIBMANN, L.; HEINICKE, J.; JENSEN, K.; AMON, T.; HOFFMANN, G. How should the respiration rate be counted in cattle?. **Veterinary Research Communications**. v. 46, n.4, p.1221-1225, 2022.
- FAUST, O.; RAJENDRA ACHARYA, U.; NG, E.Y.K; HONG, T.J.; YU, W. Application of infrared thermography in computer aided diagnosis. **Infrared Physics & Technology**, v.66, p. 160–75, 2014.
- FRIGERI, K. D. M. Análise cienciométrica e revisão sistemática do estresse térmico e comportamento de vacas em lactação alojadas em confinamento. Universidade tecnológica federal do Paraná dois vizinhos 2022. Disponível em: <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/30907/1/cienciometriarevisaosistematicavacasalojadasemconfinamento.pdf>. Acesso em: maio 2024.
- GEBREMEDHIN, K.G.; LEE, C.N.; HILLMAN, P.E.; COLLIER, R. J. Physiological responses of dairy cows during extended solar exposure. **Transactions of the ASABE**, v. 53, n.1, p.239-247, 2010.
- GONZALEZ, R.C.; WOODS, R.E.; PRENTICE HALL, P. **Digital Image Processing**. Third Edition. 954: Pearson International Edition, Pearson Education; 2008.
- HUNG, K.; MONTALVAO, C.; TANAKA, R.; KAWAI, T.; BORNSTEIN, M.M. The use and performance of artificial intelligence applications in dental and maxillofacial radiology: a systematic review. **Dentomaxillofacial Radiology**, v.49, 20190107, 2020.
- IDRIS, M.; UDDIN, J.; SULLIVAN, M.; MCNEILL, D.M.; PHILLIPS, C.J.C. Non-Invasive physiological indicators of heat stress in cattle. **Animals**, v. 11, p. 71, 2021.

JORQUERA-CHAVEZ, M.; FUENTES, S.; DUNSHEA, F.R.; WARNER, R.D.; POBLETE, T.; JONGMAN, E.C. Modelling and validation of computer vision techniques to assess heart rate, eye temperature, ear-base temperature and respiration rate in cattle. **Animals**, v.9, p.1089, 2019.

KIM, S.; HIDAKA, Y. Breathing pattern analysis in cattle using infrared thermography and computer vision. **Animals**, v.11, p.207, 2021.

KOGA, A.; KUHARA, T.; KANAI, Y. Comparison of body water retention during water deprivation between swamp buffaloes and Friesian cattle. **Journal of Agricultural Science**, v.138, p.435-440, 2004.

LI, G.; CHEN, S.; CHEN, J.; PENG, D.; GU, X. Predicting rectal temperature and respiration rate responses in lactating dairy cows exposed to heat stress. **Journal of Dairy Science**, v.103, n. 6, p. 5466-5484, 2020.

LOWE, G.; SUTHERLAND, M.; WAAS, J.; SCHAEFER, A.; COX, N.; STEWART, M. Infrared Thermography—a non-invasive method of measuring respiration rate in calves. **Animals**, v. 9, p.535, 2019.

MADER, T.; JOHNSON, L.; GAUGHAN, J. A comprehensive index for assessing environmental stress in animals. **The Journal of Animal Science**, v. 88, p. 2153–2165, 2010.

MARAI, I.F.; EL-DARAWANY, A.A.; FADIEL, A.; ABDEL-HAFEZ, M.A. Physiological traits as affected by heat stress in sheep—a review. **Small Ruminant Research**, v.71, p.1-2, 2007.

MARAI, I.F.; HAEEB, A.A. Buffalo's biological functions as affected by heat stress—A review. **Livestock Science**, v.127, p.89-109, 2010.

PAULO, J.L.A.; LOPES, F.A. Daily activity patterns of Saanen goats in the semi-arid northeast of Brazil. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.43, p.464–470, 2014.

PEREYRA, A.V.G.; MAY, V.M.; CATRACCHIA, C.G.; HERRERO, M.A.; FLORES, M.C.; MAZZINI, M. Influence of water temperature and heat stress on drinking water intake in dairy cows. **Chilean Journal of Agricultural Research**, v.70, p.328–336, 2010.

RASHAMOL, V. P.; SEJIAN, V.; BAGATH, M.; KRISHNAN, G.; ARCHANA, P. R.; BHATTA, R. Physiological adaptability of livestock to heat stress: an updated review. **Journal of Animal Behaviour and Biometeorology**, v. 6, p.62-71, 2018.

SAILO, L.; GUPTA, I.D.; DAS, R.; CHAUDHARI, M.V. Physiological response to thermal stress in sahiwal and karan fries cows. **International Journal of Livestock Research**, v.7, p.275-83, 2017.

SANTOS, R.C.; LOPES, A.L.N.; SANCHES, A.C.; GOMES, E.P.; DA SILVA, E.A.S.; DA SILVA, J.L.B. Intelligent automated monitoring integrated with animal production facilities. **Engenharia Agrícola**, v. 43, e20220225, 2023.

SANTOS, S.G.C.G.D.; SARAIVA, E.P.; FILHO, E.C.P.; NETO, S.G.; FONSÊCA, V.F.C.; PINHEIRO, A.D.C.; ALMEIDA, M.E.V.; DE AMORIM, M.L.C.M. The use of simple physiological and environmental measures to estimate the latent heat transfer in crossbred Holstein cows. **International Journal of Biometeorology**, v. 61, p.217–225, 2017.

- SCHLAGETER-TELLO, A.; BOKKERS, E.A.M.; GROOT KOERKAMP, P.W.G.; VAN HERTEM, T.; VIAZZI, S.; ROMANINI, C.E.B.; HALACHMI, I.; BAHR, C.; BERCKMANS, D.; LOKHORST, K. Effect of merging levels of locomotion scores for dairy cows on intra- and interrater reliability and agrément. **Journal of Dairy Science**, v. 97, n. 9, p. 5533-5542, 2014.
- SIQUEIRA, I.H.S., VALE, P.A.C.B., VALE, W.G., BARRETO, L.M.G., MENESES, M.D., SANTOS, E.J., JUNIOR, V.R., BRÉTAS, A.A. Caracterização da variabilidade espacial dos índices de conforto térmico para vacas leiteiras criadas em compost barn. **Brazilian Journal of Development**, v.8, n.5, p. 38001-38014, 2022.
- SOUZA-JUNIOR, J.B.F.; DE QUEIROZ, J.P.A.F. Multiple pathways to dissipate body heat excess and the infrared thermography effectiveness. **Journal of Animal Behaviour and Biometeorology**, v.10, 2022.
- SOUZA-JUNIOR, J.B.F.; QUEIROZ, J.P.A.F.; SANTOS, V.J.S.; DANTAS, M.R.T.; LIMA, R.N.; LIMA, P.O.; COSTA, L.L.M. Cutaneous evaporative thermolysis and hair coat surface temperature of calves evaluated with the aid of a gas analyzer and infrared thermography. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.154, p.222-226, 2018.
- STENUM, J.; ROSSI, C.; ROEMMICH, R.T. Two-dimensional video-based analysis of human gait using pose estimation. **PLoS Computational Biology**, v.17, n.4, e1008935. 2021.
- STRUTZKE, S.; FISKE, D.; HOFFMANN, G.; AMMON, C.; HEUWIESER, W.; AMON, T. Technical note: Development of a noninvasive respiration rate sensor for cattle. **Journal Dairy Science**, v.102, p.690–695, 2019.
- THOMPSON, C.L.; SCHEIDEL, C.; GLANDER, K.E.; WILLIAMS, S.H.; VINYARD, C.J. An assessment of skin temperature gradients in a tropical primate using infrared thermography and subcutaneous implants. **Journal of Thermal Biology**, v.63, p.49-57, 2017.
- THORNTON, P.; NELSON, G.; MAYBERRY, D.; HERRERO, M. Impacts of heat stress on global cattle production during the 21st century: a modelling study. **The Lancet Planetary Health**, v. 6, e192–e201, 2022.
- WANG, X.; BJERG, B.S.; CHOI, C.Y.; ZONG, C.; ZHANG, G. A review and quantitative assessment of cattle-related thermal indices. **The Journal of Thermal Biology**, v. 77, p.24–37, 2018.
- WANG, X.; CHEN, B.; YANG, R.; LIU, K.; CUAN, K.; CAO, M. Um método de estimativa rápida e sem contato para a taxa de respiração de vacas usando visão mecânica. **Agriculture**, v.14 n.1, p.40, 2024.
- WANG, Y.; LI, Q.; CHU, M.; KANG, X.; LIU, G. Application of infrared thermography and machine learning techniques in cattle health assessments: A review. **Biosystems Engineering**, v. 230, p. 361-387, 2023.
- YAN, G.; LIU, K.; HAO, Z.; SHI, Z.; LI, H. The effects of cow-related factors on rectal temperature, respiration rate, and temperature-humidity index thresholds for lactating cows exposed to heat stress. **Journal of Thermal Biology**, v.100, p. 103041, 2021.
- YAN, G.; ZHAO, W.; WANG, C.; SHI, Z.; LI, H.; YU, Z.; JIAO, H.; LIN, H. A comparative study of machine learning models for respiration rate prediction in dairy cows: Exploring algorithms, feature engineering, and model interpretation. **Biosystems Engineering**, v. 239, p. 207-230, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2024.01.010>.
- YUROCHKA, S. S.; PAVKIN, D. Y.; PEKHALSKIY, I. A.; KHAKIMOV, A. R.; POLIKANOVA, A. A. Technology for non-contact assessment of the udder physiological state for early diseases diagnosis. **Vestnik Of The Russian Agricultural Science**, v.5, p.83-89, 2023.