

Termografia infravermelha aplicada à pecuária de precisão

Infrared thermography applied to precision livestock farming

Alexandre Rossetto Garcia^{1,2}, Andréa do Nascimento Barreto³, Mariana Jucá Moraes⁴, Gabriela Novais Azevedo⁵, Lívia Ferreira Pinho⁶, Giovanna Galhardo Ramos⁷, Alda Juliana Castro de Sousa⁸

¹ Dr., Embrapa Pecuária Sudeste (CPPSE), São Carlos (SP), Brasil, alexandre.garcia@embrapa.br

² Dr., Universidade Federal do Pará (UFPA), Castanhal (PA), Brasil, alexandre.garcia@embrapa.br

³ MSc., Universidade Federal do Pará (UFPA), Castanhal (PA), Brasil, andreadnb91@gmail.com

⁴ BSc., Universidade Federal do Pará (UFPA), Castanhal (PA), Brasil, marianajmoraes15@gmail.com

⁵ BSc., Centro Universitário Central Paulista (UNICEP), São Carlos (SP), Brasil, gabi.nazevedo@hotmail.com

⁶ BSc., Universidade Federal do Pará (UFPA), Castanhal (PA), Brasil, liviapinho30@gmail.com

⁷ BSc., Universidade de São Paulo (USP), Pirassununga (SP), Brasil, giovannagalhardo@gmail.com

⁸ BSc., Universidade Federal do Pará (UFPA), Castanhal (PA), Brasil, julianacastro2127@gmail.com

RESUMO

Este capítulo visa mostrar fundamentos técnicos e científicos da termografia infravermelha (IRT) e suas principais aplicações na produção animal, com enfoque na espécie bovina. O uso da termografia infravermelha como ferramenta auxiliar no diagnóstico de afecções e seu emprego na avaliação da condição térmica dos animais é abordado. Detalhes sobre os fundamentos físicos da técnica são apresentados de modo simplificado, bem como os principais componentes de uma câmera térmica e o seu funcionamento. A compreensão sobre a adoção de máscaras térmicas para a interpretação visual instantânea de um termograma é facilitada pela apresentação de alguns tipos de paletas de cores. Diversas aplicações da termografia infravermelha para bovinos de corte e bovinos de leite são abordadas, de modo a exemplificar a utilidade da IRT no apoio a técnicos e a produtores rurais na tomada de decisões mais assertivas, visando melhorar os processos de avaliação dos animais e aumentar a eficiência dos sistemas de produção.

Palavras-chave: pecuária de precisão; termografia infravermelha; gado de corte; gado de leite; câmeras térmicas.

ABSTRACT

This chapter aims to show the technical and scientific basis of infrared thermography (IRT) and its main applications in livestock production, focusing on cattle. The use of IRT as an auxiliary tool in diagnosing disease and its use in evaluating the thermal condition of animals are discussed. Details of the physical principles of the technique are presented in simplified form, as well as the main components of a thermal imaging camera and how they work. Understanding the use of thermal masks for immediate visual interpretation of a thermogram is facilitated by showing some types of color palettes. Several applications of IRT for beef and dairy cattle are discussed to illustrate the usefulness of IRT in assisting technicians and rural producers to make more assertive decisions aimed at improving animal evaluation processes and increasing the efficiency of production systems.

Keywords: precision livestock farming; infrared thermography; beef cattle; dairy cattle; thermal cameras.

1 INTRODUÇÃO

As tecnologias digitais têm contribuído expressivamente para o recente avanço da ciência animal, em virtude da necessidade crescente de acompanhamento do estado de saúde e de ambiência dos animais. Dentro do cenário de inovação no ambiente agrícola, as tecnologias de pecuária de precisão (PP ou PLF, do inglês *Precision Livestock Farming*) estão se tornando cada vez mais comuns na pecuária moderna e várias aplicações vêm sendo desenvolvidas e adotadas em diversos sistemas de produção no

<https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000066>

 Este é um capítulo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais, sem alterações e que o trabalho original seja corretamente citado.



Brasil. A pecuária de precisão tem como um de seus principais objetivos o uso de inovações tecnológicas para o monitoramento animal, visando aumentar a geração de informações e melhorar o gerenciamento dos sistemas de produção. Ao longo dos anos, esse conjunto de técnicas digitais tem sido usado para favorecer as interações entre humanos e animais, bem como para aumentar a produtividade e a sustentabilidade das fazendas (Vaintrub et al., 2021). O uso de técnicas acuradas e confiáveis para transpor os eventos do ambiente analógico para o digital é também necessário nos diversos campos de pesquisas científicas, o que inclui a Medicina Veterinária e a Zootecnia.

Dentre as tecnologias digitais disponíveis para uso em ciência animal, o uso da termografia infravermelha, também conhecida como IRT (do inglês *Infrared Thermography*), vem ganhando espaço, seja nas fazendas, seja na pesquisa científica. A termografia por infravermelho é uma técnica de aquisição e análise de informações térmicas a partir de imagens obtidas à distância, que opera na faixa da radiação infravermelha. É, portanto, uma técnica que permite avaliar a temperatura de superfície dos animais (Pantoja et al., 2017) e dos demais elementos do ambiente circundante sem que haja contato com o elemento a ser inspecionado. Essa característica é útil no diagnóstico e no acompanhamento do tratamento de determinadas enfermidades, além de possibilitar a identificação de ambientes desafiadores para os animais no tocante à condição térmica (McManus et al., 2016; Romanello et al., 2018).

2 A TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA

A termografia infravermelha é uma tecnologia sem contato e não destrutiva, usada para capturar e visualizar informações térmicas de objetos e ambientes. A IRT baseia-se nos princípios de detecção e mensuração da radiação infravermelha, a qual é a radiação eletromagnética emitida pelos objetos devido a sua temperatura. O princípio da IRT vale-se do fato de a transferência de calor por radiação térmica ocorrer em toda superfície acima do chamado “zero absoluto”. O zero absoluto é o limite inferior de temperatura na natureza, que corresponde à menor temperatura possível de ser atingida, equivalente a $-273,15$ °C ou 0 Kelvin. Na ausência de meio isolante, transferência de calor por radiação ocorre entre duas superfícies que se encontram em temperaturas diferentes. Dessa forma, todos os corpos acima de zero grau Kelvin emitem radiação eletromagnética. Os raios infravermelhos, que são parte do espectro eletromagnético, geram a sensação de calor por meio de ondas

invisíveis a olho nu. Essa energia emitida é detectada pelas câmeras termográficas e é convertida em sinais elétricos, o que torna possível a interpretação da temperatura de superfície de modo visual.

3 FUNDAMENTOS DA TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA

A radiação infravermelha foi descoberta em 1800 pelo astrônomo Sir Frederick William Herschel. Porém, sua aplicação prática ocorreu somente durante a Segunda Guerra Mundial, quando a primeira câmera infravermelha eletrônica foi desenvolvida e utilizada em tanques alemães. Grandes e pesadas, eram equipamentos destinados a ampliar a capacidade humana de visão noturna (Luzy et al., 2013). Essas câmeras também foram utilizadas como instrumentos de alta sensibilidade na formação de imagens térmicas, captando radiação fora do espectro visível durante voos noturnos de aviões espiões. Seu uso tinha como objetivo fotografar alvos inimigos captando imagens térmicas, sendo as informações obtidas por meio dessas fotografias usadas na elaboração de estratégias militares (Rogalski, 2011). Posteriormente, o uso das câmeras infravermelhas foi adotado em pesquisas preventivas na área de saúde humana (Ring; Ammer, 2012) e, com base em aprimoramentos técnicos, tornou-se também utilizável na Medicina Veterinária.

As câmeras térmicas infravermelhas também são conhecidas como termocâmeras ou termógrafos: equipamentos que capturam a energia infravermelha emitida por um corpo e, com base na sua emissividade, são capazes de indicar a temperatura de superfície do mesmo. Imaginemos, como exemplo, a avaliação termográfica de um membro anterior de um cavalo. O membro do animal radia uma onda eletromagnética na faixa de frequência do infravermelho, que se propaga pela atmosfera. A imagem térmica do membro é enquadrada por lentes e converge para um detector formado por diversos sensores infravermelhos. A irradiação recebida pelo termovisor é amplificada e convertida em um sinal condicionado para o processamento eletrônico. Cálculos são efetuados para se correlacionar a irradiação recebida com a temperatura do objeto, determinada por meio de um algoritmo de cálculo que considera a lei de Planck. Na sequência, a imagem térmica é construída em uma matriz de pontos (pixels), cuja resolução depende do número de pixels. Ou seja, quanto maior o número de pixels, melhor a resolução da imagem gerada pelo operador. Dessa forma, simplificada, a imagem térmica da região anatômica de interesse é instantaneamente disponibilizada em uma tela e pode ser gravada em formato de arquivo digital. Em benefício da

ciência animal, a evolução tecnológica permitiu que as câmeras termográficas pudessem ser miniaturizadas e se transformassem em equipamentos portáteis. Isso tem facilitado sobremaneira o uso dos termovisores em ambientes hospitalares, em clínicas veterinárias, centros de diagnóstico, bem como em instalações de fazendas, como estábulos, salas de ordenha e confinamentos.

A termografia infravermelha permite a investigação de diferentes aspectos da fisiologia térmica dos animais. Além de auxiliar no diagnóstico de lesões e enfermidades em uma abordagem individualizada e mais específica, a técnica pode ser eficaz para aplicações populacionais, como na localização e contagem de animais ou na determinação da condição térmica de um rebanho. A grande vantagem do uso da IRT na pesquisa e nas rotinas de campo consiste no fato de as medições poderem ser feitas sem tocar ou perturbar o animal e, dependendo do tipo de instrumento e aplicação, essas medições podem ser realizadas a curtas (< 1 m) ou grandes distâncias (> 1000 m) (McCafferty, 2007). Essa característica faz da IRT um método que não exige contato físico direto com a superfície monitorada, permitindo a leitura remota da distribuição de temperatura. Um exemplo de uso a curta distância são as imagens termográficas parciais da cabeça de bovinos com globo ocular em primeiro plano (Figura 1), abordagem útil para a estimativa da condição térmica instantânea do animal.

4 BASE FÍSICA DA TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA

O espectro eletromagnético abrange uma ampla gama de ondas, incluindo luz visível, luz ultravioleta

e radiação infravermelha. A radiação infravermelha é caracterizada por comprimentos de onda maiores que os da luz visível, normalmente variando de cerca de 0,7 a 1.000 micrômetros (μm). Desse modo, a base física da termografia infravermelha reside no fato de que todos os objetos emitem radiação térmica e de que a intensidade e a distribuição espectral dessa radiação dependem da temperatura do objeto. De acordo com a lei da radiação do corpo negro de Planck, objetos mais quentes emitem radiação mais intensa em comprimentos de onda mais curtos dentro do espectro infravermelho.

A faixa de radiação infravermelha é dividida em diferentes regiões:

- 1) Infravermelho próximo (NIR): O NIR é uma região que varia de aproximadamente 0,7 μm a 1,4 μm e está mais próxima da luz visível. É frequentemente usado em aplicações como controles remotos e fibra óptica.
- 2) Infravermelho de ondas curtas (SWIR): O SWIR é uma região que se estende de 1,4 μm a 3 μm e possui diversas aplicações em espectroscopia e imagem.
- 3) Infravermelho de ondas médias (MWIR): O MWIR abrange a faixa de 3 μm a 8 μm e é comumente usado em aplicações como sistemas militares de imagem térmica.
- 4) Infravermelho de ondas longas (LWIR): O LWIR abrange de aproximadamente 8 μm a 15 μm e é a principal região de interesse para a maioria dos dispositivos e câmeras de imagem térmica de aplicação civil.

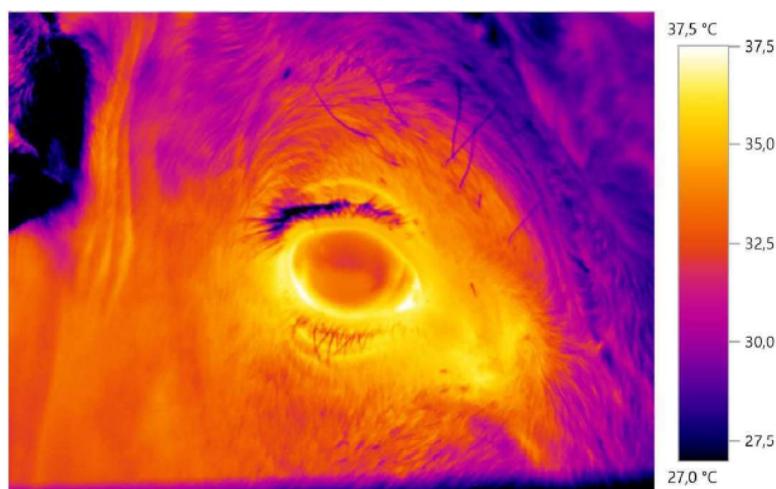


Figura 1. Imagem termográfica do globo ocular de bovino. Termograma parametrizado para a paleta de cores ferro e escala térmica de 27,0 oC a 37,5 oC.

5 FUNCIONAMENTO DE UMA CÂMERA TÉRMICA

As câmeras térmicas infravermelhas são equipamentos capazes de detectar e capturar a radiação infravermelha emitida pelos objetos. A câmera térmica converte a radiação detectada em sinais elétricos e os processa em uma imagem visível. A imagem gerada apresenta as variações de temperatura dos objetos em cena. Essa propriedade permite aos usuários detectar anomalias, fontes de calor ou gradientes de temperatura no ambiente ou no objeto observado.

Os principais componentes de uma câmera térmica infravermelha e seu modo de funcionamento são:

- a) **Sensor infravermelho:** O sensor ou detector infravermelho é a parte mais importante de uma câmera térmica infravermelha. Existem vários tipos de detectores, mas um tipo comum é o microbolômetro. Os microbolômetros consistem em um conjunto de minúsculos sensores térmicos que absorvem e medem o calor (radiação infravermelha) dos objetos no campo de visão da câmera.
- b) **Lente:** As câmeras infravermelhas possuem um sistema de lentes para focar a radiação infravermelha recebida no conjunto de detectores.
- c) **Processamento de imagem:** A radiação infravermelha detectada é convertida em sinais elétricos pelo conjunto de microbolômetros. Esses sinais são en-

tão processados para criar uma imagem, de modo que cada pixel na imagem corresponde a uma leitura de temperatura realizada pelo conjunto de microbolômetros. É como se cada pixel funcionasse como um termômetro individualmente, o que faz com que uma imagem térmica possua tanto mais avaliações de temperaturas quanto maior for a sua resolução.

- d) **Mapeamento de cores:** Para tornar a imagem interpretável e visualmente compreensível, a câmera atribui cores a diferentes valores de temperatura. Esse processo é feito usando-se uma paleta ou escala de cores, disponível nos softwares da própria câmera ou em programas de interpretação de imagens térmicas. As paletas de cores mais intuitivas são aquelas em que as temperaturas mais altas são representadas por cores quentes (por exemplo, vermelho e amarelo) e as temperaturas mais baixas são representadas por cores frias (por exemplo, azul e verde). Porém, há diversos tipos diferentes de paletas de cores à escolha do termografista. (ver box “Paletas de cores”).
- e) **Exibição:** A imagem térmica resultante é exibida na tela da câmera, permitindo aos usuários visualizar e discriminar as diferenças de temperatura na imagem ou na região de interesse.

BOX 1: O QUE É UM MICROBOLÔMETRO?

O microbolômetro é um componente-chave em dispositivos de imagem infravermelha, como câmeras térmicas. Em geral, é produzido a partir de materiais como óxido de vanádio ou silício amorfo. O microbolômetro é um tipo de detector térmico usado para converter a radiação infravermelha emitida por objetos em sinais elétricos, os quais podem ser processados para criar imagens térmicas. Os microbolômetros são conhecidos por seu tamanho compacto, confiabilidade e economia, características que os tornam amplamente utilizados em diversas aplicações, incluindo segurança e vigilância, sistemas automotivos de visão noturna e imagens médicas.

Funcionamento de um microbolômetro e seus principais recursos:

1. Princípio de detecção: Os microbolômetros operam com base na mudança da resistência elétrica em resposta a variações de temperatura. Eles consistem em um conjunto de minúsculos resistores termicamente sensíveis, cada um posicionado em um local de pixel.

2. Absorção de radiação infravermelha: Quando a radiação infravermelha de um objeto atinge a superfície do microbolômetro, ela faz com que a temperatura do resistor mude. A quantidade de mudança de temperatura é proporcional à intensidade da radiação infravermelha recebida.

3. Mudança na resistência elétrica: À medida que a temperatura do resistor muda, sua resistência elétrica também muda. Essa mudança na resistência é medida e convertida em sinal elétrico pelo microbolômetro.

4. Matriz de pixels: Os microbolômetros são compostos por um grande arranjo desses pixels termicamente sensíveis. Cada pixel detecta independentemente a temperatura da parte correspondente da imagem que está sendo visualizada.

5. Leitura e processamento: Os sinais elétricos do conjunto de microbolômetros são lidos e processados por um software embarcado no dispositivo de imagem térmica. Esses sinais são então usados para criar uma imagem térmica, com o sinal de cada pixel representando a temperatura naquele local específico do sensor.

Os principais recursos e vantagens dos microbolômetros incluem:

- **Operação não refrigerada:** Ao contrário de alguns outros detectores infravermelhos, os microbolômetros não requerem refrigeração criogênica, a temperaturas extremamente baixas. Eles podem operar em faixa de temperatura próxima à temperatura ambiente, o que simplifica o design do dispositivo e reduz o consumo de energia.

- **Tamanho compacto:** Os microbolômetros são relativamente pequenos e podem ser integrados em dispositivos de imagem térmica compactos e leves, o que permite a portabilidade das termocâmeras.

- **Economicidade:** O processo de fabricação dos microbolômetros tornou-se mais econômico ao longo do tempo, resultando em produtos de imagem térmica com custos acessíveis para diversas aplicações.

- **Confiabilidade:** Os microbolômetros são sensores conhecidos por sua estabilidade e confiabilidade a longo prazo.

- **Ampla faixa espectral:** Dependendo do material utilizado, os microbolômetros podem ser projetados para detectar uma ampla faixa de comprimentos de onda no espectro infravermelho, o que os torna versáteis para diferentes aplicações.

BOX 2: PALETAS DE CORES

As paletas de cores usadas em termografia infravermelha são essenciais para a interpretação das imagens térmicas, pois atribuem cores diferentes às variações de temperatura, tornando os dados mais visíveis e compreensíveis.

Diferentes situações podem exigir a escolha de paletas de cores específicas para a interpretação das imagens térmicas. Em aplicações médicas pode ser preferível usar paletas que realcem sutilmente as diferenças de temperatura para diagnósticos precisos, enquanto em inspeções industriais, paletas que enfatizem rapidamente as áreas quentes ou frias podem ser mais apropriadas. A escolha da paleta de cores depende, portanto, do contexto e das preferências do usuário.

Alguns exemplos de paletas de cores comumente usadas em termografia infravermelha:

- **Paleta arco-íris:** É uma das paletas mais comuns e mais amplamente usadas na termografia. A imagem térmica é representada por uma escala de cores que segue as cores do arco-íris, começando com azul (para temperaturas mais baixas) e passando por verde, amarelo, laranja e vermelho (para temperaturas mais altas).

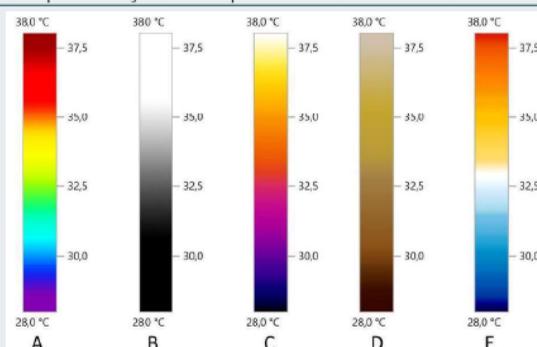
- **Paleta ferro:** Também é uma paleta popular devido à sua facilidade de interpretação. Representa a temperatura com cores que lembram as cores de uma barra de ferro aquecendo, começando com preto ou azul escuro (para temperaturas mais baixas), passando por tons de vermelho, amarelo e branco (para temperaturas mais altas).

- **Paleta em escala de cinza:** Usa diferentes tons de cinza para representar a temperatura. Geralmente começa com preto ou preto-azulado (para temperaturas mais baixas) e progride até tons mais claros de cinza e branco (para temperaturas mais altas).

- **Paleta arco-íris invertido:** É semelhante à paleta de cores arco-íris, mas com as cores invertidas. Começa com vermelho (para temperaturas mais baixas) e progride até azul (para temperaturas mais altas).

- **Paleta de cores pseudocor:** Usa cores variadas e não necessariamente segue uma ordem específica, tornando-a adequada para situações em que a ênfase é na diferenciação de temperatura em vez de em uma representação precisa.

- **Paleta de cores personalizadas:** Alguns sistemas de termografia permitem que os usuários personalizem suas próprias paletas de cores. Isso pode ser útil para adaptar a representação de temperatura de acordo com as necessidades específicas de um aplicativo.



Exemplos de paletas de cores mais comumente usadas na interpretação de termogramas: (A) paleta arco-íris, (B) paleta monocromática em escala de cinza, (C) paleta ferro, (D) paleta sépia, (E) paleta azul-vermelho. Paletas parametrizadas para a escala térmica de 28,0 °C a 38,0 °C.

6 USO DA TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA NA MEDICINA VETERINÁRIA

A termografia infravermelha é uma ferramenta valiosa que possui diversas aplicações na Medicina Veterinária. Ela permite avaliar de forma não invasiva a saúde e o bem-estar dos animais ao possibilitar a mensuração instantânea da temperatura corpórea ou da temperatura de regiões específicas do corpo do animal a fim de detectar anormalidades ou problemas potenciais. A termografia por infravermelho permite avaliar um animal imóvel ou em movimento, bem como avaliar animais de forma individual ou simultaneamente com precisão, repetibilidade e confiabilidade. Porém, a termografia não depende apenas da temperatura do animal, mas também da sua emissividade e condutividade (Soerensen et al., 2014), o que pode ocasionar algumas limitações quanto ao uso da técnica (Zhang et al., 2020).

Uma das possibilidades de uso da IRT é sua capacidade de relacionar as mudanças na temperatura da

superfície aos estados fisiológicos particulares ou associados a certos comportamentos dos animais, como o aconchego ou a vocalização. Na última década, diversos trabalhos com uso da termografia infravermelha foram desenvolvidos na área veterinária, como uma ferramenta para se obter uma avaliação precisa da condição térmica do animal (Moura et al., 2011) e de certas respostas térmicas que podem ser avaliadas em desafios dinâmicos, visando determinar a funcionalidade de um órgão, região corporal ou sistema. Alguns estudos realizados mostraram que a IRT é capaz também de detectar não apenas as mudanças na temperatura da superfície em resposta a atividade física mas também ao medo ou ao estresse (Herborn et al., 2018). A termografia vem sendo utilizada em diversas espécies animais de produção, como ovinos (Castanheira et al., 2010; McManus et al., 2015), bovinos (Pezeshki et al., 2011), equinos (Fenner et al., 2016) e bubalinos (Barros et al., 2016). Contudo, seu uso não tem se limitado aos estudos com mamífe-

ros, de modo que a técnica tem sido aplicada também para avaliação de insetos, répteis e pássaros (McCafferty et al., 1998).

Ao longo dos anos, o uso da termografia no monitoramento animal foi ampliado, com aplicações no diagnóstico de mastite (Colak et al., 2008; Zaninelli et al., 2018), identificação do estresse térmico (Herborn et al., 2015; Silva et al., 2017), na reprodução (Menegassi et al., 2016; Kahwage et al., 2017), no monitoramento de neonatos (Sousa et al., 2022) e até mesmo na avaliação da emissão de metano (Montanholi et al., 2008). Ainda, estudos relataram a utilidade de uso da IRT na avaliação da extensão e duração de processos inflamatórios observados após a marcação, nos efeitos da descorna, nas alterações de estado térmico dos animais durante o transporte, na detecção de distúrbios podais e na hipertermia corpórea devido a infecções.

Uma das limitações para a adoção da termografia infravermelha como técnica de apoio diagnóstico reside no fato de que seu uso requer equipamento especializado para geração de imagem térmica, além de pessoal treinado para realizar a interpretação das imagens térmicas com precisão. Porém, quando utilizada juntamente a outras ferramentas de diagnóstico e exames clínicos, a IRT melhora a qualidade geral dos cuidados veterinários, aprimora o monitoramento zootécnico e contribui para o bem-estar dos animais em vários ambientes.

A IRT permite mensurar de forma instantânea a temperatura da superfície do corpo do animal sem que haja contato físico ou necessidade de contenção física, a depender do tipo de avaliação. Isso torna o procedimento menos estressante para o animal. Elevação na temperatura corporal pode indicar hipertermia sistêmica, dificuldade de termorregulação corpórea ou condição febril. Condições de hipotermia generalizada também podem ser detectadas pela termografia infravermelha. Todos esses casos podem estar associados a um problema de saúde subjacente.

Além disso, a termografia infravermelha pode também ser usada para identificar variações de temperatura em áreas específicas do corpo do animal. Esse procedimento é particularmente útil para identificar processos inflamatórios, como nas articulações, músculos ou cascos. A condição de hipotermia local também pode ser detectada pela termografia infravermelha.

A IRT encontra aplicabilidade na detecção de lesões específicas como: a) Lesões músculo-esqueléticas: afecções como distensões musculares, lesões em tendões, lesões ligamentares e inflamação das articulações geralmente resultam em variações localizadas de temperatura, que podem ser detectadas por meio de imagens térmicas; b) Claudicação: a câmera in-

fravermelha pode identificar diferenças de calor entre membros saudáveis e lesionados, o que pode ser de grande valia para identificar a origem da claudicação; c) problemas dentários: Problemas dentários, como abscessos dentários ou fraturas dentárias, podem causar alterações localizadas de temperatura que são visíveis por meio de imagens térmicas.

O monitoramento usual de animais com a IRT pode permitir a detecção precoce de problemas de saúde. Um bom exemplo é o uso da técnica na indústria equestre, onde é amplamente utilizada para monitorar cavalos de corrida e cavalos de desempenho. O uso regular da termografia em cavalos atletas pode ajudar a detectar sinais precoces de lesão ou inflamação, permitindo intervenção imediata e práticas preventivas. Outro uso rotineiro de interesse é no monitoramento da saúde de animais de produção, como bovinos, bubalinos, ovinos, caprinos e suínos. A IRT pode auxiliar na identificação de animais com temperatura corporal mais elevada, indicando problemas infecciosos ou condição de estresse térmico.

Um uso ainda exploratório da IRT, mas de grande interesse, é a identificação dos padrões de calor e alterações no fluxo sanguíneo para os órgãos reprodutivos. Essa aplicação, estudada com maior interesse em bovinos de leite e em suínos, pode ser útil em programas de reprodução, a fim de identificar as diferentes fases do ciclo estral das matrizes, na tentativa de maximizar sua fertilidade. Uma vez que a temperatura corporal elevada pode ser um sinal de estresse nos animais, a avaliação termográfica pode ser usada para avaliar os níveis de estresse durante o transporte, o manejo ou mesmo no interior dos sistemas de produção, sejam os animais criados estabulados ou a pasto.

O uso da IRT na vigilância da saúde de animais em cativeiro também é importante, especialmente para animais ou espécies que podem não apresentar sinais clínicos evidentes. Pode ajudar na detecção precoce de doenças e melhorar o bem-estar geral dos animais. Por fim, a IRT pode ser usada no monitoramento de surtos de doenças, desempenhando papel importante na biossegurança, o que pode ser crucial na prevenção da propagação de doenças nas populações animais, bem como de zoonoses, ou seja, de doenças intercambiáveis entre o ser humano e espécies animais.

6.1 Aplicação da termografia infravermelha na pecuária leiteira

Uma das aplicações de interesse da IRT na produção de bovinos leiteiros se relaciona à manutenção da saúde do aparelho locomotor, principalmente da região podal, pois as afecções de casco são responsá-

veis por aproximadamente 60% das causas de claudicação em vacas de leite. Imagens termográficas da banda coronária dos cascos podem ser usadas em avaliação comparativa ou individualizada para detectar alterações de temperatura e eventuais processos inflamatórios (Nikkah et al., 2005). Ainda, trabalhos apontam que a temperatura máxima dos cascos, em abordagem anterior, posterior ou lateral, é significativamente maior que a de cascos não afetados por processo inflamatório (Chiu; Hsu, 2022).

As vacas leiteiras são animais muito sensíveis a alta temperatura do ar e apresentam uma diminuição na produção devido à redução na ingestão de matéria seca consequente ao estresse térmico. Além disso, o estresse pelo calor determina perdas reprodutivas que reduzem o potencial econômico das granjas produtoras de leite. Por isso, a IRT tem sido considerada ferramenta de interesse para estudar não somente o efeito do estresse térmico em vacas leiteiras, mas também para avaliar estratégias de arrefecimento dos animais. Vacas holandesas sob estresse calórico foram aspergidas e submetidas a um fluxo de ventilação forçada (3m/s), durante 45 minutos, condição na qual a temperatura retal foi reduzida em 1,0 °C (Flamenbaum et al., 1986). Nesse sentido, a temperatura de superfície das vacas de leite pode ser monitorada por IRT tanto em galpões de manejo (Knizkova et al., 2007) como a campo, desde que sejam consideradas as condições ótimas para a aquisição das imagens térmicas.

Aplicação de grande interesse é a detecção da resposta inflamatória da glândula mamária (Figura 2), associada a um aumento inicial na temperatura da porção afetada do úbere. Sendo a IRT um método diagnósti-

co não invasivo e cujas medições precisas podem ser realizadas com rapidez, a técnica permite inferências entre a temperatura da superfície e o estado de saúde da glândula mamária (Tommasoni et al., 2023). Com a crescente preocupação com a resistência antimicrobiana, é fortemente recomendado que apenas as glândulas mamárias que apresentem infecção sejam tratadas, o que requer um método diagnóstico precoce e preciso. Contudo, estudos em ovinos e bovinos têm demonstrado que o monitoramento da temperatura de superfície do úbere deve considerar sua aplicação em ambiente de temperatura do ar controlado ou, no mínimo, se combinado ao monitoramento da temperatura ambiental. Para ovinos, o uso de salas com climatização controlada para avaliação dos animais é mais simples, dado o porte dos animais. De qualquer modo, protocolos mais específicos e que considerem os fatores microclimáticos do local de avaliação do animal devem ser desenvolvidos para orientar o uso da IRT no diagnóstico da mastite subclínica diretamente nas propriedades rurais (Digiovani et al., 2016; Machado et al., 2021).

Outra aplicação veterinária relevante para a pecuária leiteira é o estudo de detecção de estro em vacas a partir das temperaturas de superfície avaliáveis de modo prático. Um estudo pioneiro, realizado a partir da avaliação da temperatura da região posterior das vacas mostrou que a IRT foi capaz de detectar o estro em estágios iniciais, mas foi menos preciso no pós-parto, devido a um maior número de falso-positivos (Hurnik et al., 1984). Também foi demonstrado que a IRT é capaz de mostrar alterações significativas na temperatura de superfície de matrizes bovinas

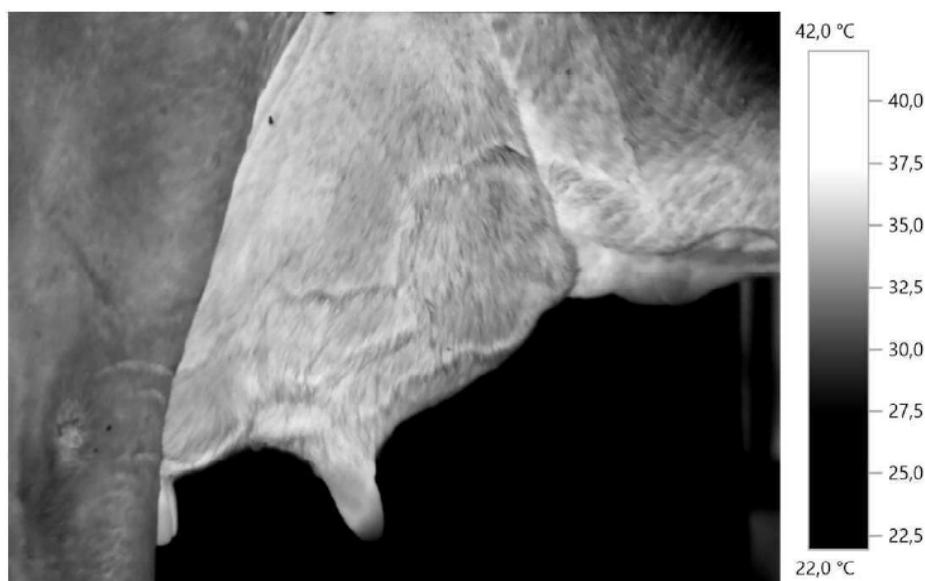


Figura 2. Imagem termográfica de úbere de vaca leiteira adulta momentos antes da ordenha. Termograma parametrizado para a paleta de cores monocromática preto-branco e escala térmica de 22,0 oC a 42,0 oC.

conforme o avançar da gestação, além de diferenças de temperatura entre vacas gestantes e não gestantes (Deak et al., 2019). Contudo, o grande interesse ainda permanece na determinação de possíveis alterações de temperatura detectáveis no início da fase estral para predição do momento da ovulação. Essa característica, se confirmada, permitiria automatizar a detecção do estro a partir da análise de imagens com inteligência artificial, com base em termogramas gerados a partir da visitação das vacas à sala de ordenha. Apesar de alguns resultados animadores (Perez Marquez et al., 2019; Vicentini et al., 2020), esse desafio ainda parece distante de ser superado.

6.2 Aplicação da termografia infravermelha na pecuária de corte

Métodos não destrutivos e não invasivos podem ser úteis para obtenção de dados confiáveis sem interferir diretamente nos indivíduos avaliados. A IRT é uma ferramenta com grande potencial para mensurar as condições de estresse térmico animal (Paim et al., 2014), pois permite o mapeamento da temperatura de superfície de diversas áreas corpóreas (Luzi et al., 2013). A IRT pode ser usada experimentalmente em testes controlados de resistência ao calor, bem como diretamente a campo, nos sistemas de produção. Pode ser usada como ferramenta auxiliar na caracterização do estresse térmico animal, associada a avaliação de parâmetros fisiológicos vitais (Romanello et al., 2018) e/ou comportamentais, ou em determinada condição de manejo e, ainda, ser utilizada para avaliar o conforto térmico de instalações.

A IRT tem sido considerada ferramenta de interesse para avaliar estratégias de mitigação do calor ambiente sobre os animais. Em condição de maior escala, o uso de câmeras termográficas embarcadas em aviões mostrou-se muito útil para mapear áreas extensas de pastagens tropicais. O sensoriamento distal por IRT em sobrevoos tripulados apresenta alta correlação linear ($r = 0,72$; $P = 0,0287$ até $r = 0,89$; $P = 0,0013$) com os registros de temperaturas obtidas em estações meteorológicas automáticas instaladas em sistemas de produção a pasto. Por isso, a IRT permite identificar com precisão as diferenças térmicas entre pastagens em monocultura e em sistemas silvipastoris, com definição de ilhas de calor nos primeiros e zonas de conforto térmico naqueles com presença de árvores (Garcia et al., 2023). Essa característica da IRT fornece uma nova aplicação para avaliações microclimáticas na pecuária que pode auxiliar o produtor nas tomadas de decisão de manejo ambiental e do rebanho visando aumentar o bem-estar de bovinos de corte criados a pasto.

Para sensoriamento proximal, a IRT pode ser usada na avaliação da temperatura de superfície de diferentes regiões do corpo. Nos bovinos, a temperatura máxima da região do globo ocular é observada próxima da carúncula lacrimal (Stewart et al., 2008) e apresenta correlação positiva ($r = 0,392$; $P < 0,05$) com a temperatura interna corpórea (Giro et al., 2019). A IRT é capaz de mostrar que bovinos de corte criados em pastagens arborizadas apresentam temperatura de superfície da região dorsal mais baixa do que animais criados em pastagens a pleno sol ($31,9 \pm 0,2$ vs $32,8 \pm 0,2$ °C, $P < 0,05$). A utilização da sombra atua diretamente no bem-estar animal, reduzindo o principal fator causador de estresse calórico em bovinos criados a pasto, que é a radiação solar (Garcia et al., 2023; Romanello et al., 2023). Por isso, a temperatura de superfície da pele de um animal criado a campo também é um atributo fisiológico de interesse a ser monitorado porque, conforme a teoria dos escudos concêntricos de calor, o fluxo para dissipação de energia térmica do núcleo corpóreo para o meio externo só ocorre quando a temperatura da superfície corpórea é menor que a temperatura do core (Mitchell, 2013). A termografia de bovinos criados a pasto (Figura 3) tem mostrado diferenças expressivas na temperatura de superfície de animais mantidos em sistemas silvipastoris ou em pastagens convencionais com pouca disponibilidade de sombreamento natural.

Um dos primeiros trabalhos com IRT na avaliação andrológica de touros bovinos usou a técnica para diagnóstico de processos inflamatórios nos órgãos sexuais de reprodutores e teve como objetivo principal a obtenção de um termograma global das gônadas de animais com fertilidade normal e com fertilidade alterada (Kozumplik et al., 1989). Desde então, considerou-se possível o uso da IRT para o diagnóstico de afecções dos órgãos sexuais acompanhadas de mudanças locais de temperatura, que podem afetar diretamente a qualidade do sêmen e a produção espermática.

A termorregulação escrotal para manutenção da temperatura testicular entre 4 °C e 6 °C abaixo da temperatura interna corpórea é de extrema importância para garantir a normalidade da espermatogênese e um pré-requisito para produção de sêmen com qualidade (Garcia, 2017). Por isso, a IRT é uma ferramenta auxiliar de grande importância na avaliação dos efeitos do estresse calórico nos parâmetros reprodutivos de touros (Menegassi et al., 2015). Os ruminantes apresentam gradiente de temperatura escrotal decrescente do funículo espermático à cauda do epidídimo (Coulter et al., 1988; Silva et al., 2017; Moura et al., 2019). Esse gradiente de temperatura no escroto e nos testículos aumenta quanto mais distan-

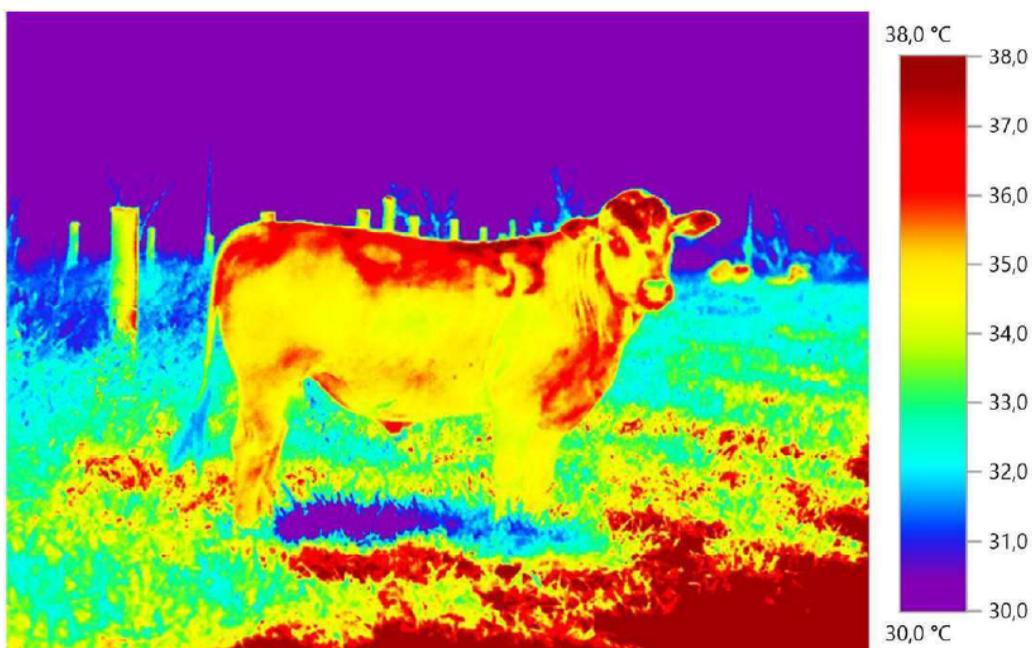


Figura 3. Imagem termográfica do antímero direito de bovino da raça Canchim em sistema de produção a pasto sem sombreamento natural. Termograma parametrizado para a paleta de cores arco-íris e escala térmica de 30,0 oC a 38,0 oC.

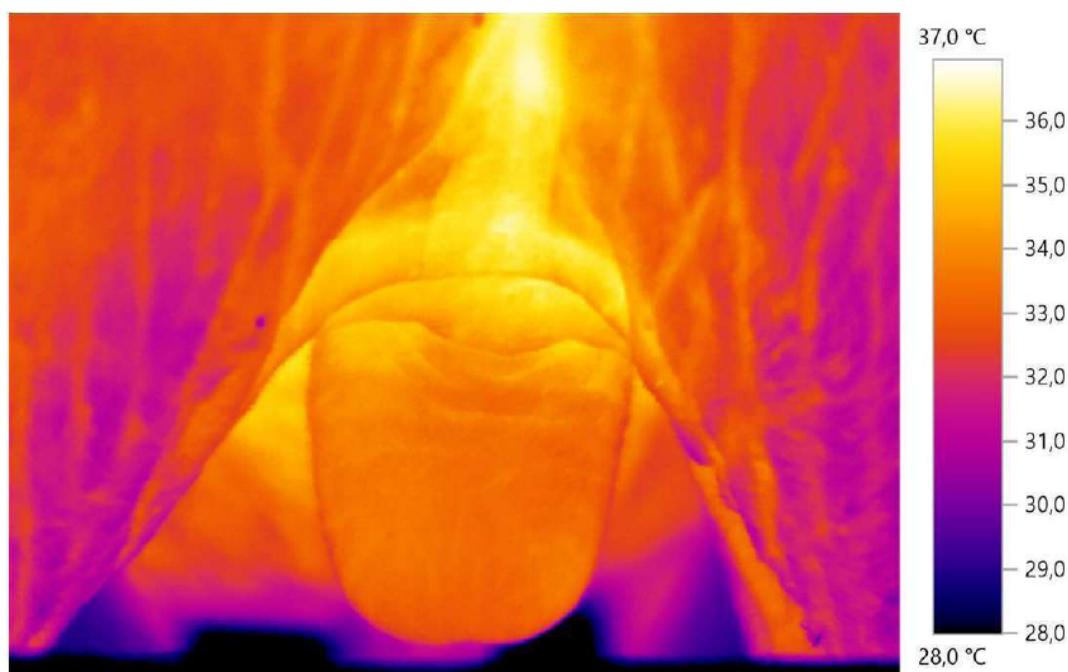


Figura 4. Imagem termográfica do escroto de touro bovino jovem - 9 meses de idade. Termograma parametrizado para a paleta de cores ferro e escala térmica de 28,0 oC a 37,0 oC.

te estiver a estrutura relativamente à cavidade abdominal (Figura 4). Por exemplo, a temperatura média da superfície escrotal de touros taurinos e compostos é de 30,4 °C no polo dorsal e de 28,8 °C no polo ventral (Kastelic et al., 1995). Dessa forma, o uso da termografia tem revelado particularidades térmicas de diferentes segmentos do escroto, importantes para o entendimento das trocas térmicas de animais

de diferentes idades, genótipos e condições clínicas (Brito et al., 2012; Romanello et al., 2018). Assim, apesar da temperatura média escrotal poder ser usada como um referencial de interesse clínico, uma abordagem segmentar pode trazer informações mais detalhadas ao médico veterinário e discriminar alterações expressas em regiões de dimensões diminutas (Romanello et al., 2023).

Em bovinos jovens existe correlação negativa do diâmetro do cone vascular testicular com as temperaturas médias superficiais do escroto e com o percentual de defeitos de cabeça de espermatozoides. Além disso, há correlação positiva ($r = 0,45$) do diâmetro do cone vascular com a porcentagem de espermatozoides normais (Brito et al., 2012). Dessa forma, em função dos distintos aspectos de temperatura de superfície escrotal que podem ser observados nos touros, eles podem ser classificados como portadores de termogramas com padrão normal, anormal ou questionável (Lunstra; Coulter, 1997). Touros bovinos e bubalinos portadores de termogramas normais apresentam padrão escrotal distinguível em três bandas térmicas bem definidas, bilateralmente simétricas e com temperaturas decrescentes da região funicular para a base do escroto. Touros bovinos com termograma anormal apresentam menor gradiente de temperatura testicular e redução na qualidade seminal (Lunstra; Coulter, 1997; Kastelic; Brito, 2012; Menegassi et al., 2015).

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A linha que separa os mundos físico e digital está se tornando cada vez mais tênue e essa nova condição traz novos desafios e amplia o número de paradigmas que precisam ser quebrados para a consolidação de uma agricultura digital completa. A crescente adoção de técnicas e métodos disruptivos que propiciam maior controle e precisão dos sistemas de produção é uma realidade na pecuária moderna. Nesse contexto, tecnologias inovadoras como a termografia infravermelha têm contribuído para o maior controle da condição de saúde e de criação dos animais no que se refere à sua resposta, positiva ou negativa, no ambiente de produção.

Dados gerados pelo sensoriamento térmico infravermelho têm apresentado grande consistência e confiabilidade em aplicações destinada a animais de produção de diferentes espécies. Apesar da análise desses dados ainda estar relativamente limitada a processamentos manuais ou semiautomatizados, os *outputs* termográficos poderão, em breve, ser gerados integralmente por inteligência artificial. Esses resultados têm grande valia para municiar modelos preditivos e modelos prescritivos, o que ampliará o uso da termografia infravermelha por técnicos e produtores rurais, contribuindo para a melhoria dos processos de monitoramento animal e para o aumento da eficiência dos sistemas de produção.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio e os recursos para a execução das pesquisas com termografia infravermelha disponibilizados pela Embrapa (Rede de Agricultura de Precisão), pela Rede ILPF, pela Fapesp (Processos 2015/26627-5, 2019/04528-6 e 2021/04335-3) e pelo CNPq (Processos 307757/2019-6, 404513/2021-2, 312295/2022-7 e 406866/2022-8). Este trabalho foi realizado com apoio complementar do INCT Reprodução Animal e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (Capes), Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

- BARROS, D. V.; SILVA, L. K. X.; KAHWAGE, P. R.; LOURENÇO JÚNIOR, J. B.; SOUSA, J. S.; SILVA, A. G. M.; FRANCO, I. M.; MARTORANO, L. G.; GARCIA, A. R. Assessment of surface temperatures of buffalo bulls (*Bubalus bubalis*) raised under tropical conditions using infrared thermography. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, v. 68, n. 2, p. 422-430, 2016. DOI: <http://doi.org/10.1590/1678-4162-8327>.
- BRITO, L. F. C.; BARTH, A. D.; WILDE, R. E.; KASTELIC; J. P. Testicular vascular cone development and its association with scrotal temperature, semen quality, and sperm production in beef bulls. **Animal Reproduction Science**, v. 134, p. 135-140, 2012. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2012.08.025>.
- CASTANHEIRA, M.; PAIVA, S. R.; LOUVANDINI, H.; LANDIM, A.; FIORVANTI, M. C. S.; DALLAGO, B. S.; CORREA, P. S.; MCMANUS, C. Use of heat tolerance traits in discriminating between groups of sheep in Central Brazil. **Tropical Animal Health and Production**, v. 42, p. 1821-1828, 2010. DOI: <http://doi.org/10.1007/s11250-010-9643-x>.
- CHIU Y. J.; HSU, J. T. Integrated infrared thermography and accelerometer-based behavior logger as a hoof lesion identification tool in dairy cows with various foot diseases under subtropical climates. **Journal of Animal Science**, v. 100, n. 10, p. skac271, 2022. DOI: <http://doi.org/10.1093/jas/skac271>.
- COLAK, A.; POLAT, B.; OKUMUS, Z.; KAYA, M.; YANMAZ, L. E.; HAYIRLI, A. Short Communication: Early detection of mastitis using infrared thermography in dairy cows. **Journal of Dairy Science**, v. 91, p. 4244-4248, 2008. DOI: <http://doi.org/10.3168/jds.2008-1258>.
- COULTER, G. H.; SENGER, P. L.; BAILEY, D. R. Relationship of scrotal surface temperature measured by infrared thermography to subcutaneous and deep testicular temperature in the ram. **Journal of Reproduction and Fertility**, v. 84, n. 2, p. 417-423, 1988. DOI: <https://doi.org/10.1530/jrf.0.0840417>. PMID: 3199358.
- DEAK, F. L. G. B.; CHACUR, M. G. M.; SOUZA, C. D.; ANDRADE, I. B.; CORNACINI, G. F.; GARCIA, A. R.; GABRIEL, L. R.

- A. Effects of physiological stage and season on infrared thermograms of different body areas of dairy cows raised under tropical conditions. **Animal Reproduction**, v. 16, n. 2, p. 311-316, 2019. DOI: <http://doi.org/10.21451/1984-3143-AR2017-0023>.
- DIGIOVANI, D. B.; BORGES, M. H. F.; GALDIOLI, V. H. G.; MATIAS, B. F.; BERNARDO, G. M.; SILVA, T. R.; FÁVARO, P. C.; BARCA JÚNIOR, F. A.; LOPES, F. G.; KOETZ JÚNIOR, C.; RIBEIRO, E. L. A. Infrared thermography as diagnostic tool for bovine subclinical mastitis detection. **Revista Brasileira de Higiene e Sanidade Animal**, v. 10, n. 4, p. 685-692, 2016. DOI: <http://doi.org/10.5935/1981-2965.20160055>.
- FENNER, K.; YOON, S.; WHITE, P.; STARLING, M.; MCGREEVY, P. The effect of noseband tightening on horses' behavior, eye temperature and cardiac responses. **PLoS ONE**, v. 11, n. 5, p. 1-20, 2016. DOI: <http://doi.org/10.1371/journal.pone.0154179>.
- FLAMENBAUM, I.; WOLFENSON, D.; MAMEN, M.; BERMAN, A. Cooling dairy cattle by a combination of sprinkling and forced ventilation and its implementation in the shelter system. **Journal of Dairy Science**, v. 69, n. 12, p. 3140-3147, 1986. DOI: [http://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(86\)80778-0](http://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(86)80778-0).
- GARCIA, A. R.; SILVA, L. K. X.; BARROS, D. V.; LOURENÇO JÚNIOR, J. B.; MARTORANO, L. G.; LISBOA, L. S. S.; SILVA, J. A. R.; SOUSA, J. S.; SILVA, A. O. A. Key points for the thermal comfort of water buffaloes in Eastern Amazon. **Ciência Rural**, v. 53, p. e20210544, 2023. DOI: <http://doi.org/10.1590/0103-8478cr20210544>.
- GARCIA, A. R. Degeneração testicular: um problema superado ou ainda um dilema? **Revista Brasileira de Reprodução Animal**, v. 41, p. 33-39, 2017.
- GIRO, A.; BERNARDI, A. C. C.; BARIONI JUNIOR, W. B.; LEMES, A. P.; BOTTA, D.; ROMANELLO, N.; BARRETO, A. N.; GARCIA, A. R. Application of microchip and infrared thermography for monitoring body temperature of beef cattle kept on pasture. **Journal of Thermal Biology**, v. 84, p. 121-128, 2019. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2019.06.009>.
- HERBORN, K. A.; GRAVES, J. L.; JEREM, P.; EVANS, N. P.; NAGER, R.; MCCAFFERTY, D. J.; MCKEEGAN, D. E. F. Skin temperature reveals the intensity of acute stress. **Physiology & Behavior**, v. 152, p. 225-230, 2015. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.physbeh.2015.09.032>.
- HERBORN, K.A.; JEREM, P.; NAGER, R. G.; MCKEEGAN, D. E. F.; MCCAFFERTY, D. J. Surface temperature elevated by chronic and intermittent stress. **Physiology & Behavior**, v. 191, p. 47-55, 2018. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.physbeh.2018.04.004>.
- HURNIK, J. F.; DE BOER, S.; WEBSTER, A. B. Detection of health disorders in dairy cattle utilizing a thermal infrared scanning technique. **Canadian Journal of Animal Science**, v. 64, n. 4, p. 1071-1073, 1984. DOI: <http://doi.org/10.4141/cjas84-124>.
- KAHWAGE, P. R.; ESTEVES, S. N.; JACINTO, M. A. C.; JUNIOR, W. B.; PEZZOPANE, J. R. M.; PANTOJA, M. H. A.; BOSI, C.; MIGUEL, M. C. V.; MAHLMEISTER, K.; GARCIA, A. R. High systemic and testicular thermolytic efficiency during heat tolerance test reflects better semen quality in rams of tropical breeds. **International Journal of Biometeorology**, v. 61, n. 10, p. 1819-1829, 2017. DOI: <http://doi.org/10.1007/s00484-017-1367-4>.
- KASTELIC J. P.; BRITO L. F. Ultrasonography for monitoring reproductive function in the bull. **Reproduction in Domestic Animals**, v. 47, p. 45-51, 2012. DOI: <http://doi.org/10.1111/j.1439-0531.2012.02042.x>.
- KASTELIC, J. P.; COULTER, G. H.; COOK, R. B. Scrotal surface, subcutaneous, intratesticular, and intraepididymal temperatures in bulls. **Theriogenology**, v. 44, p. 147-52, 1995. DOI: [http://doi.org/10.1016/0093-691X\(95\)00155-2](http://doi.org/10.1016/0093-691X(95)00155-2).
- KNIZKOVA, I.; KUNC, P.; GÜRDIL, K. A. G.; PINAR, Y.; SELVI, Ç. K. Applications of infrared thermography in animal production. **Anadolu Journal of Agricultural Sciences**, v. 22, n. 3, p. 329-336, 2007.
- KOZUMPLIK, J.; MALIK, K.; OCHOTSKY, J. Využití termografické metody k diagnostice zánětlivých procesů lokalizovaných na pohlavních orgánech pleměnků. **Veterinarství**, v. 39, p. 305-307, 1989.
- LUNSTRA, D. D.; COULTER, G. H. Relationship between scrotal infrared temperature patterns and natural-mating fertility in beef bulls. **Journal of Animal Science**, v. 75, p. 767-774, 1997. DOI: <http://doi.org/10.2527/1997.753767x>.
- LUZI, F.; MITCHELL, M.; COSTA, L. N.; REDAELLI, V. **Thermography: current status and advances in livestock animals and in veterinary medicine**. Brescia, Italy: Editore a cura Fondazione Iniziative Zooprofilattiche e Zootecniche, 2013. 236 p.
- MACHADO, N. A. F.; DA COSTA, L. B. S.; BARBOSA-FILHO, J. A. D.; DE OLIVEIRA, K. P. L.; DE SAMPAIO, L. C.; PEIXOTO, M. S. M.; DAMASCENO F. A. Using infrared thermography to detect subclinical mastitis in dairy cows in compost barn systems. **Journal of Thermal Biology**, n. 97, p. 102881, 2021. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2021.102881>.
- MCCAFFERTY, D. J. The value of infrared thermography for research on mammals: previous applications and future directions. **Mammal Review**, v. 37, n. 3, p. 207-223, 2007. DOI: <http://doi.org/10.1111/j.1365-2907.2007.00111.x>.
- MCCAFFERTY, D. J.; MONCRIEFF, J. B.; TAYLOR, I. R.; BODDIE, G. F. The use of IR thermography to measure the radiative temperature and heat loss of a barn owl (*Tyto alba*). **Journal of Thermal Biology**, v. 23, p. 311-318, 1998. DOI: [http://doi.org/10.1016/S0306-4565\(98\)00022-9](http://doi.org/10.1016/S0306-4565(98)00022-9).
- MCMANUS, C.; BIANCHINI, E.; PAIM, T. P.; LIMA, F. G.; BRACCINI NETO, J.; CASTANHEIRA, M.; ESTEVES, G. I. F.; CESAR CARDOSO, C.; DALCIN, V. C. Infrared thermography to evaluate heat tolerance in different genetic groups of Lambs. **Sensors**, v. 15, p. 17258-17273, 2015. DOI: <http://doi.org/10.3390/s150717258>.

- MCMANUS, C.; TANURE, C. B.; PERIPOLLI, V.; SEIXAS, L.; FISCHER, V.; GABBI, A. M.; MENEGASSI, S. R. O.; STUMPF, M. T.; KOLLING, G. J.; DIAS, E.; COSTA JUNIOR, J. B. G. Infrared thermography in animal production: an overview. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 123, p. 10-16, 2016. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.compag.2016.01.027>.
- MENEGASSI, S. R.; PEREIRA, G. R.; DIAS, E. A.; KOETZ JUNIOR, C.; LOPES, F. G.; BREMM, C.; PIMENTEL, C.; LOPES, R. B.; da ROCHA, M. K.; CARVALHO, H. R.; BARCELLOS, J. O. The uses of infrared thermography to evaluate the effects of climatic variables in bull's reproduction. **International Journal of Biometeorology**, v. 60, n. 1, p. 151-157, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00484-015-1013-y>. PMID: 26049285.
- MENEGASSI, S. R. O.; BARCELLOS, J. O. J.; DIAS, E. A.; KOETZ JR, C.; PEREIRA, G. R.; PERIPOLLI, V.; MCMANUS, C.; CANOZZI, M. E. A.; LOPES, F. G. Scrotal infrared digital thermography as a predictor of seasonal effects on sperm traits in Braford bulls. **International Journal of Biometeorology**, v. 59, p. 357-364, 2015. DOI: <http://doi.org/10.1007/s00484-014-0847-z>.
- MITCHELL, M. A. Thermal imaging in physiology: theoretical and practical considerations. In: LUZI, F.; MITCHELL, M. A.; NANNI COSTA, L.; REDAELLI, V. (Eds.). **Thermography: current status and advances in livestock animals and in veterinary medicine**. Brescia, Italy: Fondazione Iniziative Zooprofilattiche e Zootecniche, 2013. p. 47-65.
- MONTANHOLI, Y. R.; ODONGO, N. E.; SWANSON, K. C.; SCHENKEL, F. S.; MCBRIDE, B. W.; MILLER, S. P. Application of infrared thermography as an indicator of heat and methane production and its use in the study of skin temperature in response to physiological events in dairy cattle (*Bos taurus*). **Journal of Thermal Biology**, v. 33, p. 468-475, 2008. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2008.09.001>.
- MOURA, A. B. B.; BRANDÃO, F. Z.; ESTEVES, S. N.; NUNES DE SOUZA, G.; FONSECA, J. F. D.; PANTOJA, M. H. A.; ROMANELLO, N.; BOTTA, D.; GIRO, A.; GARCIA, A. R. Differences in the thermal sensitivity and seminal quality of distinct ovine genotypes raised in tropical conditions. **Theriogenology**, v. 1, p. 123-131, 2019. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.theriogenology.2018.09.037>.
- MOURA, J. D.; MAIA, A. P. A.; VERCELLINO, R. A.; MEDEIROS, B. B. L.; SARUBBI, J.; GRISKA, P. R. Uso da termografia infravermelha na análise da termorregulação de cavalo em treinamento. **Engenharia Agrícola**, v. 31, n. 1, p. 23-32, 2011. DOI: <http://doi.org/10.1590/S0100-69162011000100003>.
- NIKKAH, A.; PLAIZIER, J. C.; EINARSON, M. S.; BERRY, R. J.; SCOTT, S. L.; KENNEDY, A. D. Short communication: infrared thermography and visual examination of hoo-ves of dairy cows in two stages of lactation. **Journal of Dairy Science**; v. 88, n. 8, p. 2749-2753, 2005. DOI: [http://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(05\)72954-4](http://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(05)72954-4).
- PAIM, T. P.; MARTINS, R. F. S.; CARDOSO, C.; DALLAGO, B.; LOUVANDINI, H.; MCMANUS, C. Thermal comfort index and infrared temperatures for lambs subjected to different environmental conditions. **Scientia Agricola**, v. 71, n. 5, p. 345-355, 2014. DOI: <http://doi.org/10.1590/0103-9016-2013-0191>.
- PANTOJA, M. H. A.; ESTEVES, S. N.; JACINTO, M. A. C.; PEZZOPANE, J. R. M.; PAZ, C. C. P.; SILVA, J. A. R.; LOURENÇO JUNIOR, J. B.; BRANDÃO, F. Z.; MOURA, A. B. B.; ROMANELLO, N.; BOTTA, D.; GARCIA, A. R. Thermoregulation of male sheep of indigenous or exotic breeds in a tropical environment. **Journal of Thermal Biology**, v. 69, p. 302-310, 2017. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2017.09.002>.
- PEREZ MARQUEZ, H. J.; AMBROSE, D. J.; SCHAEFER, A. L.; COOK, N. J.; BENCH, C. J. Infrared thermography and behavioral biometrics associated with estrus indicators and ovulation in estrus-synchronized dairy cows housed in tiestalls. **Journal of Dairy Science**, v. 102, v. 5, p. 4427-4440, 2019. DOI: <http://doi.org/10.3168/jds.2018-15221>.
- PEZESHKI, A.; STORDEUR, P.; WALLEMACQ, H.; SCHYNTS, F.; STEVENS, M.; BOUTET, P.; PEELMAN, L. J.; SPIEGELEER, B.; DUCHATEAU, L.; BUREAU, F.; BURVENICH, C. Variation of inflammatory dynamics and mediators in primiparous cows after intramammary challenge with *Escherichia coli*. **Veterinary Research**, v. 42, n. 15, p. 1-10, 2011. DOI: <http://doi.org/10.1186/1297-9716-42-15>.
- RING, E. F. J.; AMMER, K. Infrared thermal imaging in medicine. **Physiological Measurement**, v. 33, n. 3, p. 33-46, 2012. DOI: <http://doi.org/10.1088/0967-3334/33/3/R33>.
- ROGALSKI, A. Recent progress in infrared detector technologies. **Infrared Physics & Technology**, v. 54, p. 136-154, 2011. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.infrared.2010.12.003>.
- ROMANELLO, N.; BARRETO, A. N.; SOUSA, M. A. P.; BALIEIRO, J. C. C.; BRANDAO, F. Z.; TONATO, F.; BERNARDI, A. C. C.; PEZZOPANE, J. R. M.; PORTUGAL, J. A. B.; GARCIA, A. R. Thermal comfort of Nelore (*Bos indicus*) and Canchim (*Bos taurus x Bos indicus*) bulls kept in an integrated crop-livestock-forestry system in a tropical climate. **Agricultural Systems**, v. 209, p. 103687, 2023. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.agsy.2023.103687>.
- ROMANELLO, N.; LOURENÇO JUNIOR, J. B.; BARIONI JUNIOR, W.; BRANDÃO, F. Z.; MARCONDES, C. R.; PEZZOPANE, J. R. M.; PANTOJA, M. H. A.; BOTTA, D.; GIRO, A.; MOURA, A. B. B.; BARRETO, A. N.; GARCIA, A. R. Thermoregulatory responses and reproductive traits in composite beef bulls raised in a tropical climate. **International Journal of Biometeorology**, v. 62, p. 1575-1586, 2018. DOI: <http://doi.org/10.1007/s00484-018-1557-8>.
- SILVA, L. K. X.; SOUSA, J. S.; SILVA, A. O. A.; LOURENÇO JUNIOR, J. B.; FATURI, C.; MARTORANO, L. G.; FRANCO, I. M.; PANTOJA, M. H. A.; BARROS, D. V.; GARCIA, A. R. Testicular thermoregulation, scrotal surface temperature patterns, and semen quality of water buffalo bulls reared in a tropical climate. **Andrologia**, v. 50, n. 2, p. e12836, 2017. DOI: <http://doi.org/10.1111/and.12836>.

- SOERENSEN, D. D.; CLAUSEN, S.; MERCER, J. B.; PEDERSEN, L. J. Determining the emissivity of pig skin for accurate infrared thermography. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 109, p. 52-58, 2014. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.compag.2014.09.003>.
- SOUSA, M. A. P.; ESTEVES, S. N.; SILVA, A. G. M.; BRANDÃO, F. Z.; DAHER, L. C. C.; PEZZOPANE, J. R. M.; VOLANTE, C. A.; BARRETO, A. N.; GARCIA, A. R. Major differences between single or twin hair lambs in the immediate postpartum period: Metabolic and thermodynamic patterns detected by infrared thermography. **Journal of Thermal Biology**, v. 106, p. 103258, 2022. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2022.103258>.
- STEWART, M.; STAFFORD, K. J.; DOWLING, S. K.; SCHAEFER, A. L.; WEBSTER, J. R. Eye temperature and heart rate variability of calves disbudded with or without local anesthetic. **Physiology & Behavior**, v. 93, n. 4, p. 789-797, 2008. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.physbeh.2007.11.044>.
- TOMMASONI, C.; FIORE, E.; LISUZZO, A.; GIANESELLA, M. Mastitis in dairy cattle: on-farm diagnostics and future perspectives. **Animals**, v. 13, n. 15, p. 2538, 2023. DOI: <http://doi.org/10.3390/ani13152538>.
- VAINTRUB, M. O.; LEVIT, H.; CHINCARINI, M.; FUSARO, I.; GIAMMARCO, M.; VIGNOLA, G. Precision livestock farming, automats and new technologies: possible applications in extensive dairy sheep farming. **Animal**, v. 15, n. 3, p. 100143, 2021. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.animal.2020.100143>.
- VICENTINI, R. R.; MONTANHOLI, Y. R.; VERONEZE, R.; OLIVEIRA, A. P.; LIMA, M. L. P.; UJITA, A.; EL FARO, L. Infrared thermography reveals surface body temperature changes during proestrus and estrus reproductive phases in Gyr heifers (*Bos taurus indicus*). **Journal of Thermal Biology**, v. 92, p. 102662, 2020. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2020.102662>.
- ZANINELLI, M., REDAELLI, V., LUZI, F., BRONZO, V., MITCHELL, M., DELL'ORTO, V., BONTEMPO, V., CATTANEO, D., SAVOINI, G. First evaluation of infrared thermography as a tool for the monitoring of udder health status in farms of dairy cows. **Sensors**, v. 18, n. 3, p. 862, 2018. DOI: <http://doi.org/10.3390/s18030862>.
- ZHANG, C.; XIAO, D.; YANG, Q.; WEN, Z.; LV, L. Application of infrared thermography in livestock monitoring. **Transactions of the ASABE**, v. 63, n. 2, p. 389-399, 2020. DOI: <http://doi.org/10.13031/trans.13068>.