

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a)
autor(a), o texto completo desta
tese será disponibilizado somente
a partir de 29/01/2028.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**PADRONIZAÇÃO DA TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA
PARA DIAGNÓSTICO DA MASTITE SUBCLÍNICA BOVINA
EM SISTEMA DE ORDENHA ROBÓTICA**

Raul Costa Mascarenhas Santana

Médico Veterinário

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL

**PADRONIZAÇÃO DA TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA
PARA DIAGNÓSTICO DA MASTITE SUBCLÍNICA BOVINA
EM SISTEMA DE ORDENHA ROBÓTICA**

Discente: Raul Costa Mascarenhas Santana

Orientador: Prof. Dr. Luiz Francisco Zafalon

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Doutor em Ciências Veterinárias, área de concentração em Saúde Única.

S232p	Santana, Raul Costa Mascarenhas Padronização da termografia infravermelha para diagnóstico da mastite subclínica bovina em sistema de ordenha robótica / Raul Costa Mascarenhas Santana. -- Jaboticabal, 2026 94 p. : il., tabs. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal Orientador: Luiz Francisco Zafalon 1. Algoritmos de inteligência artificial. 2. Mastite bovina. 3. Sistema automatizado de ordenha. 4. Termografia infravermelha. I. Título.
-------	---

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Dados fornecidos pelo autor(a).

Impacto potencial dessa pesquisa

A pesquisa gerou novos conhecimentos sobre a aplicação da termografia infravermelha associada a algoritmos de inteligência artificial no monitoramento da saúde da glândula mamária bovina. Esses conhecimentos fornecem uma base para o desenvolvimento futuro de soluções automatizadas voltadas ao diagnóstico precoce de doenças em sistemas de produção animal. O estudo contribui para a melhoria do bem-estar animal, a redução de perdas produtivas na pecuária leiteira e a otimização da gestão sanitária, além de contribuir para a sustentabilidade do setor. Fundamentos estabelecidos nesse trabalho podem orientar futuras inovações em tecnologias de monitoramento contínuo e no desenvolvimento de ferramentas automatizadas para diagnóstico.

Potential impact of this research

The research generated new knowledge on the application of infrared thermography combined with artificial intelligence algorithms for monitoring the health of the bovine mammary gland. This knowledge provides a foundation for the future development of automated solutions aimed at the early diagnosis of diseases in animal production systems. The study contributes to improving animal welfare, reducing production losses in the dairy industry, and optimizing herd health management, while also supporting the sustainability of the sector. The principles established in this work may guide future innovations in continuous monitoring technologies and the development of automated diagnostic tools.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: PADRONIZAÇÃO DA TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA PARA DIAGNÓSTICO DA MASTITE SUBCLÍNICA BOVINA EM SISTEMA DE ORDENHA ROBÓTICA

AUTOR: RAUL COSTA MASCARENHAS SANTANA

ORIENTADOR: LUIZ FRANCISCO ZAFALON

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em Ciências Veterinárias, área: Saúde Única pela Comissão Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 LUIZ FRANCISCO ZAFALON
Data: 29/01/2026 14:54:11-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Pesquisador Dr. LUIZ FRANCISCO ZAFALON (Participação Virtual)
EMBRAPA Pecuária Sudeste (CPPSE) / São Carlos/SP

Documento assinado digitalmente
 TERESA CRISTINA ALVES
Data: 30/01/2026 15:59:46-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Pesquisadora Dra. TERESA CRISTINA ALVES (Participação Virtual)
EMBRAPA Pecuária Sudeste (CPPSE) / São Carlos/SP

Documento assinado digitalmente
 ALESSANDRO PELEGRINE MINHO
Data: 30/01/2026 17:09:02-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Pesquisador Dr. ALESSANDRO PELEGRINE MINHO (Participação Virtual)
EMBRAPA Pecuária Sudeste (CPPSE) / São Carlos/SP

Documento assinado digitalmente
 IUCIF ABRÃO NASCIMENTO JUNIOR
Data: 29/01/2026 15:33:01-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. IUCIF ABRÃO NASCIMENTO JUNIOR (Participação Virtual)
Departamento de Medicina Veterinária / Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS) - Realeza/PR

Documento assinado digitalmente
 IVERALDO DOS SANTOS DUTRA
Data: 29/01/2026 17:08:30-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. IVERALDO DOS SANTOS DUTRA (Participação Virtual)
Departamento de Produção e Saúde Animal / FMV A UNESP Aracatuba

Jaboticabal, 29 de janeiro de 2026.

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

Raul Costa Mascarenhas Santana, nascido em Salvador (BA) em 17 de novembro de 1983, é médico-veterinário formado pela Universidade Federal da Bahia (UFBA), onde ingressou em 2002 após ser aprovado em 3º lugar no vestibular e concluiu a graduação em março de 2007. Em junho de 2006, ainda durante a graduação, foi aprovado em 2º lugar no concurso da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) para o cargo de Analista, passando a atuar a partir de novembro de 2007 na Unidade Descentralizada EMBRAPA Pecuária Sudeste, em São Carlos (SP), onde permanece até hoje. Entre 2008 e 2010, realizou especialização em Sanidade de Animais de Produção na Universidade Estadual Paulista (UNESP – Botucatu), para a qual foi selecionado em 1º lugar. No mesmo ano, conquistou novamente a 1ª colocação no vestibular da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) para o curso de Pedagogia, concluído em 2017. De 2012 a 2014, cursou o Mestrado em Medicina Veterinária, na área de Medicina Veterinária Preventiva, pela UNESP de Jaboticabal, onde foi aprovado em 2º lugar no processo seletivo. Entre 2014 e 2017, exerceu a função de Supervisor do Setor de Manejo Animal da EMBRAPA Pecuária Sudeste. Em 2017, ingressou em 1º lugar na especialização em Gestão Pública da UFSCar, concluída em 2019. Mais recentemente, em 2022, iniciou o Doutorado em Ciências Veterinárias, na área de Saúde Única, também pela UNESP de Jaboticabal.

EPIÍGRAFE

Entre Números e Amor

No emaranhado de uma matriz a crescer,
Os números dançam em ordem secreta,
Algoritmos revelam o que podem ser,
Desvendam sua existência de uma forma discreta.

O sentido é dado por cálculos profundos,
Entrelaçando o real e o imaginado,
Cada padrão perdido em ciclos fecundos,
Reside na lógica que o tempo tem traçado.

Mas existir é mais que razão e lógica,
É um laço que une, é calor e paixão.
A matemática cede ao amor que é música,
E o toque sincero se torna canção.

Assim, ao final, somos rimas e dor,
Entre cifras e laços, um mesmo pulsar.
Na vastidão do ser, há sempre fervor,
E na essência do amor, nos permitimos sonhar.

Fonte: elaborado pelo autor com auxílio do modelo de
linguagem ChatGPT da OpenAI.

DEDICATÓRIA

À minha esposa Tércila e minhas filhas
Ágata e Pérola, dedico esta tese.

AGRADECIMENTOS

A concretização desta tese não seria possível sem o apoio de pessoas e instituições que estiveram ao meu lado ao longo desta caminhada.

À minha esposa, Tércila Mascarenhas agradeço pelo amor, pela paciência e pelo incentivo constante que me deu forças para seguir em frente. Mais do que dividir a vida comigo, você esteve presente em cada etapa desta jornada, oferecendo serenidade nos dias de incerteza e entusiasmo nos momentos de conquista. Sua força silenciosa, seu olhar encorajador e a confiança depositada em mim foram fundamentais para que eu seguisse adiante. Este trabalho carrega, em cada página, a marca da sua presença discreta, mas indispensável.

Às minhas filhas, Ágata e Pérola, deixo todo o meu carinho e gratidão, pois são minha maior inspiração e a razão pela qual cada conquista ganha ainda mais significado.

Ao meu orientador e amigo de longa data, Luiz Francisco Zafalon, expresso profundo reconhecimento pela orientação dedicada, pela confiança e pelo companheirismo que foram fundamentais não apenas para o desenvolvimento desta pesquisa, mas também para minha formação acadêmica e pessoal.

À FAPESP (Processo N° 2020/16240-4) e ao CNPq (Processo N° 404513/2021-2), pelo financiamento indispensável para a realização deste trabalho, e à Embrapa, pelo estímulo à formação e pela oportunidade de desenvolver esta pesquisa em um ambiente que valoriza o conhecimento.

A todos que, de alguma forma, contribuíram com apoio, incentivo e confiança, deixo meu sincero agradecimento.

SUMÁRIO

	Página
CERTIFICADO DA COMISSÃO DE ÉTICA NO USO DE ANIMAIS	iii
RESUMO	iv
ABSTRACT	v
Lista de Abreviaturas.....	vi
Lista de Figuras	vii
Lista de Tabelas	viii
CAPÍTULO 1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	1
1. Introdução.....	1
2. Revisão de Literatura.....	3
2.1. A Mastite Bovina.....	3
2.2. Termografia de Infravermelho.....	6
2.3. Sistemas Automatizados de Ordenha.....	8
2.4. Algoritmos de Inteligência Artificial.....	11
Referências.....	14
CAPÍTULO 2 – MACHINE LEARNING TECHNIQUES ASSOCIATED WITH INFRARED THERMOGRAPHY TO OPTIMIZE THE DIAGNOSIS OF BOVINE SUBCLINICAL MASTITIS.....	20
Abstract.....	20
1. Introduction.....	20
2. Materials and Methods.....	22
2.1 Experiment Location, Period, and Animals.....	22
2.2 Milking Environment.....	23
2.3 Acquisition of Thermograms and Data Extraction.....	23
2.4 Collection of Milk Samples and Measurement of Body Temperature.....	25
2.5 Laboratory Analyses and Definition of Mammary Gland Health Status....	26
2.6 Statistical Analysis.....	27
2.6.1 Data Preparation for Analysis.....	27
2.6.2 Hyperparameter Adjustment for Model Optimization.....	28
2.6.3 Attributes Used for Predictive Model Optimization.....	29
2.6.4 Evaluation of the Predictive Model.....	30
3. Results and Discussion.....	31
4. Conclusions.....	44
References.....	45
CAPÍTULO 3 – ADVANCES IN THE DIAGNOSIS OF BOVINE UDDER HEALTH: INTEGRATING INFRARED THERMOGRAPHY WITH YOLO ALGORITHM FOR SUBCLINICAL MASTITIS DETECTION.....	48
Abstract.....	48
1. Introduction.....	48
2. Materials and Methods.....	50
2.1 Experiment location, period, and animals.....	50
2.2 Acquisition and selection of thermograms.....	51
2.3 Milk sample collection and definition of mammary gland health status.....	52
2.4 Image preprocessing: segmentation and annotation.....	53
2.5 Model implementation.....	54
2.5.1 Image preprocessing and model configurations.....	54

	Página
2.5.2 Hyperparameter adjustment for model optimization.....	55
2.5.3 Data augmentation: synthetic image creation.....	56
2.6 Evaluation of the predictive model.....	57
3. Results.....	61
4. Discussion.....	66
References.....	73
CAPÍTULO 4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	76
APÊNDICE – Material suplementar citado no Capítulo 2.....	77



CERTIFICADO
CEUA PRT Nº 04/2021

Certificamos que o projeto de Pesquisa intitulado: "*Desenvolvimento de algoritmos de aprendizado de máquina para o diagnóstico da mastite subclínica bovina por termografia infravermelha*", sob responsabilidade do pesquisador científico Dr. Luiz Francisco Zafalon, que envolve a produção, manutenção ou utilização de animais pertencentes ao filo Chordata, subfilo Vertebrata (exceto humanos), para fins de pesquisa científica encontra-se de acordo com os preceitos da lei nº 11.794, de 8 de outubro de 2008, do Decreto nº 6.899, de 15 de julho de 2009 e com as normas editadas pelo Conselho Nacional de Controle de Experimentação Animal (CONCEA) e foi aprovado pela Comissão de Ética no Uso de Animais da Embrapa Pecuária Sudeste.

(We hereby declare that the research project titled "Development of machine learning algorithms for the diagnosis of bovine subclinical mastitis by infrared thermography" has been registered under the responsibility of Dr. Luiz Francisco Zafalon involving production, management or utilization of animals from phylum Chordata, subphylum Vertebrata (except humans). The described experimental protocol is in accordance to the Brazilian Federal Law on Animal Experimentation (#11.794, enacted on 8th October 2008), to the Decree 6.899 (enacted on 15th July 2009) and the corresponding rules of National Council for Animal Experimentation Control (CONCEA), and it was approved by the Committee of Animal Experimentation of Embrapa Southeast Livestock.)

São Carlos, 13 de Outubro de 2021.


Dr. Alexandre Rossetto Garcia
 Presidente da Comissão de Ética no Uso de Animais
 Embrapa Pecuária Sudeste

Finalidade	Pesquisa Científica
Vigência da Autorização	01/06/2021 a 31/05/2023
Espécie / Linhagem / Raça	Bovino / Bos taurus / Holandesa e Jersolanda
Número de Animais	60
Peso / Idade	Em fase de lactação
Sexo	Fêmea
Origem	Embrapa Pecuária Sudeste

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
 Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
 Rod. Washington Luiz, km 234 Caixa Postal 339 13560-970 São Carlos, SP
 Telefone (16) 3411-5600
 E-mail: cppse.ceua@embrapa.br

PADRONIZAÇÃO DA TERMOGRAFIA INFRAVERMELHA PARA DIAGNÓSTICO DA MASTITE SUBCLÍNICA BOVINA EM SISTEMA DE ORDENHA ROBÓTICA

RESUMO – A mastite é uma das principais enfermidades de vacas leiteiras, acarreta prejuízos econômicos, compromete o bem-estar animal e apresenta relevância para a saúde pública. A forma subclínica da doença reduz a produção e compromete a qualidade nutricional do leite. O uso de tecnologias para seu diagnóstico precoce, como a termografia infravermelha (TIV), pode gerar grandes quantidades de dados capazes de fornecer informações valiosas quando analisados por técnicas de aprendizado de máquina. Diante disso, este trabalho teve como objetivo avaliar e aprimorar o uso da TIV no diagnóstico da mastite subclínica bovina, por meio do desenvolvimento de estratégias de análise de imagens térmicas apoiadas em algoritmos de Inteligência Artificial. Noventa e sete vacas leiteiras foram utilizadas. Elas foram ordenhadas em sistema automático de ordenha (AMS) e submetidas à TIV. O estado de saúde da glândula mamária foi determinado com o uso de um valor de triagem para a contagem de células somáticas do leite de 200.000 células/mL. Primeiramente, dados e variáveis de 1.035 unidades amostrais foram analisados com algoritmo *Extreme Gradient Boosting* (XGBoost). Avaliou-se 18 variáveis relacionadas ao ambiente, às características físico-químicas do leite, ao animal, à forma de agrupamento dos patógenos isolados e à termografia. As variáveis mais relevantes para a classificação do estado de saúde foram identificadas e selecionadas para a construção do modelo final de predição. Curvas ROC foram construídas e os melhores resultados para a área sob a curva (0,843) e especificidade diagnóstica (93,3%) foram obtidos com o modelo que considerou todas as variáveis termográficas. O ponto mais frio da região de interesse foi considerado o atributo termográfico mais importante no diagnóstico da mastite subclínica, e o modelo final criado pode ser utilizado para confirmação da doença. Em seguida, avaliou-se o desempenho da integração da TIV com modelos de visão computacional. Foram utilizados 514 termogramas de quartos mamários saudáveis e com mastite subclínica, analisados com o algoritmo *You Only Look Once* (YOLO), versões 8 e 11, com e sem técnicas de aumento de imagens. Todos os modelos apresentaram melhor desempenho na identificação de glândulas mamárias saudáveis, com destaque para o YOLOv8, configurado com a ativação de técnicas de aumento de imagens em seus valores padrão (precisão média — AP = 84,2%). O uso de imagens artificiais (mAP50 de 64,3% com o YOLOv8 e 60,4% com o YOLO11) melhorou o desempenho dos modelos, demonstrando capacidade de generalização na fase de teste, com destaque para o YOLO11 (83,3% de precisão, 55,6% de sensibilidade, 85,7% de especificidade e 68,8% de acurácia). O algoritmo YOLO mostrou-se promissor na avaliação da saúde da glândula mamária bovina com base em termogramas, especialmente com a inclusão de imagens sintéticas. O presente trabalho evidenciou o potencial de sinergia entre a TIV e os algoritmos de Inteligência Artificial no diagnóstico da mastite subclínica bovina. Enquanto o uso do XGBoost demonstrou que a análise conjunta de variáveis ambientais, produtivas e termográficas pode elevar a acurácia diagnóstica, a aplicação do YOLO reforçou o papel da visão computacional na detecção automática de padrões térmicos.

Palavras-chave: ordenha robótica, redes neurais convolucionais, XGBoost

STANDARDIZATION OF INFRARED THERMOGRAPHY FOR THE DIAGNOSIS OF BOVINE SUBCLINICAL MASTITIS IN ROBOTIC MILKING SYSTEMS

ABSTRACT – Mastitis is one of the most significant diseases affecting dairy cows, leading to economic losses, compromising animal welfare, and posing public health concerns. The subclinical form of the disease reduces milk yield and impairs its nutritional quality. Technologies aimed at the early diagnosis of this condition, such as infrared thermography (IRT), can generate large amounts of data that provide valuable insights when subsequently analyzed through machine learning techniques. Therefore, this study aimed to evaluate and improve the use of IRT in the diagnosis of bovine subclinical mastitis by developing thermal image analysis strategies supported by artificial intelligence algorithms. Ninety-seven dairy cows, milked in an automatic milking system (AMS), were subjected to IRT evaluation. Mammary gland health status was determined based on a screening threshold of 200,000 somatic cells/mL of milk. Initially, data and variables from 1,035 sampling units were analyzed using the Extreme Gradient Boosting (XGBoost) algorithm. Eighteen variables related to the environment, milk physicochemical characteristics, animal features, pathogen grouping, and thermography were assessed. The most relevant variables for health status classification were identified and selected for constructing the final predictive model. Receiver Operating Characteristic (ROC) curves were generated, and the best results for the area under the curve (AUC = 0.843) and diagnostic specificity (93.3%) were obtained with the model that included all thermographic variables. The coldest point in the region of interest was considered the most important thermographic attribute for subclinical mastitis diagnosis, and the final model developed can be used as a confirmatory diagnostic tool. Subsequently, the integration of IRT with computer vision models was evaluated. A total of 514 thermograms of healthy and subclinically mastitic udder quarters were analyzed using the You Only Look Once (YOLO) algorithm (versions 8 and 11), with and without image augmentation techniques. All models performed better at identifying healthy mammary glands, with YOLOv8 standing out when configured with default image augmentation settings (average precision – AP = 84.2%). The use of synthetic images improved model performance (mAP50 = 64.3% with YOLOv8 and 60.4% with YOLO11), demonstrating generalization capability in the test phase, particularly with YOLO11 (precision 83.3%, sensitivity 55.6%, specificity 85.7%, and accuracy 68.8%). The YOLO algorithm proved promising for evaluating bovine mammary gland health based on thermograms, especially when synthetic images were incorporated. This study highlighted the synergistic potential between IRT and artificial intelligence algorithms for diagnosing bovine subclinical mastitis. While the use of XGBoost demonstrated that the combined analysis of environmental, productive, and thermographic variables can enhance diagnostic accuracy, the application of YOLO reinforced the role of computer vision in the automatic detection of thermal patterns.

Keywords: convolutional neural networks, robotic milking, XGBoost

LISTA DE ABREVIATURAS

ACU – Accuracy
 AMS – Automated Milking System
 AP – Average Precision
 AT – Air Temperature
 AUC – Area Under the Receiver Operating Characteristic Curve
 AvgBT – Difference between the average temperature of the mammary gland and body temperature
 BMP – Bitmap Image File
 CCS – Contagem de Células Somáticas
 CE – Condutividade Elétrica
 CMT – California Mastitis Test
 CNN – Convolutional Neural Network
 CNS – Coagulase-Negative Staphylococci
 Cold – Coldest Point of the Mammary Gland
 Deep CNNs – Deep Convolutional Neural Networks
 DMLC – Distributed Machine Learning Community
 EC – Electrical Conductivity
 FN – False Negatives
 FP – False Positives
 Hot – Hottest Point of the Mammary Gland
 HotCold – Thermal Amplitude of the Mammary Gland
 IoU – Intersection over Union
 IRT – Infrared Thermography
 JPEG – Joint Photographic Experts Group
 MALDI-TOF – Matrix-Assisted Laser Desorption/Ionization Time-of-Flight Mass Spectrometry
 mAP – Mean Average Precision
 mAP50 – Mean Average Precision at IoU 50%
 P – Precision
 PCR – Polymerase Chain Reaction
 R – Recall
 RH – Relative Humidity
 ROI – Region of Interest
 SCC – Somatic Cell Count
 SCM – Bovine Subclinical Mastitis
 Se – Sensitivity
 Sp – Specificity
 THI – Temperature-Humidity Index
 TIV – Termografia de Infravermelho
 TN – True Negatives
 TP – True Positives
 VIA – Visual Geometry Group Image Annotator
 XGBoost – Extreme Gradient Boosting
 YOLO – You Only Look Once

LISTA DE FIGURAS

Página

Figure 1A. Thermographic image of the mammary gland of a lactating cow generated with the IRSOFT software, evidencing the region of interest (circular delimitation). Image parametrized to a thermal scale of 20.4°C - 42.4°C and using the greyscale color palette.....	25
Figure 2A. Confusion matrix obtained with the optimized XGBoost algorithm using all of the thermographic data.....	29
Figure 3A. Heatmap of the Pearson correlation matrix for the attributes used in XGBoost optimization.....	34
Figure 4A. Relative importance of the attributes for decision making with XGBoost executed using all variables.....	35
Figure 5A. Relative importance of attributes when running XGBoost after optimizing the model with all thermographic variables.....	40
Figure 6A. AUC obtained with the optimized XGBoost algorithm using all of the thermographic data for the diagnosis of SCM in lactating cows.....	41
Figure 7A. Cohen's Kappa index values according to the attribute combinations used in the execution of the XGBoost algorithm.....	42
Figure 1B. Infrared thermographic image of a bovine mammary gland converted into JPEG and Greyscale format to enable the analysis of thermal patterns.	52
Figure 2B. Thermographic image of the right antimere of bovine mammary glands with Regions of Interest (ROIs) marked in a circular shape, positioned above the teat cisterns, and labeled as healthy ("N").	54
Figure 3B. Graphical representation of the Intersection Over Union (IoU) metric used to evaluate the detection performance of machine learning models.	58
Figure 4B. Precision-recall curves obtained from the YOLO11x-seg.pt model, with AP values discriminated by class: class S (0.438) and class N (0.842), and the mAP50 across all classes (0.640).....	58
Figure 5B. Confusion matrix obtained during the validation stage of the YOLO11x-seg.pt model, representing detection performance for the classes "S" (with subclinical mastitis), "N" (without subclinical mastitis), and "background." The values indicate the number of correctly and incorrectly classified instances.....	60
Figure 6B. Distribution of mammary glands with subclinical mastitis according to SCC ($\times 10^3$ cells/mL).....	61
Figure 7B. Illustrative images of the YOLOv8x-seg validation results applied to thermograms from different animals, showing ROI classification and detection confidence.....	62
Figure 8B. Bounding box precision of the YOLO algorithm, versions 8 and 11, with and without the application of image augmentation techniques, considering both default and customized configurations.....	62
Figure 9B. Bounding box recall of the YOLO algorithm, versions 8 and 11, with and without image augmentation techniques, considering both default and customized configurations.....	63
Figure 10B. Detection performance of the ROI with the YOLOv8x-seg (a) and YOLO11x-seg.pt (b) algorithms in the test phase and their corresponding confidence levels.....	65

LISTA DE TABELAS

Página

Table 1A. Classification of isolated microorganisms (adapted from Kirkeby et al. [22]).....	27
Table 2A. XGBoost algorithm performance according to the use of environment-related attributes in six predictive characteristics of SCM in lactating cows.....	32
Table 3A. Pearson correlations between environmental and thermographic variables in diagnostic evaluations of SCM in lactating cows.....	33
Table 4A. XGBoost algorithm performance according to different combinations of animal-related attributes in six predictive characteristics of SCM in lactating cows.....	35
Table 5A. XGBoost algorithm performance according to the microbiological culture-based classification in six predictive characteristics of SCM in lactating cows.....	36
Table 6A. XGBoost algorithm performance according to different combinations of milk-related attributes in six predictive characteristics of SCM in lactating cows.....	37
Table 7A. XGBoost algorithm performance according to different combinations of thermographic attributes in six predictive characteristics of SCM in lactating cows.....	38
Table 1B. Hyperparameters adjusted for training and validation of the computer vision algorithms.....	56
Table 2B. Image augmentation techniques with their default values predefined in the original YOLOv8x-seg and YOLO11x-seg.pt configurations, as well as in the custom configuration.....	57
Table 3B. Evaluating bounding box performance of computer vision models trained with and without synthetic data across training and validation.....	63
Table 4B. Evaluating mask segmentation performance of computer vision models trained with and without synthetic images across training and validation.....	64
Table 5B. Evaluation of performance metrics in computer vision algorithm models during testing with and without synthetic images.....	64
Table 6B. Detection performance and computational metrics of YOLO algorithms in the test phase.....	65

CAPÍTULO 1 – Considerações gerais

1. Introdução

Ao longo da última década, assegurar a saúde e o bem-estar dos animais e a redução progressiva do uso de medicamentos tornou-se uma preocupação central para produtores de leite e consumidores (Bronzo et al., 2020). As estratégias para reduzir a dependência de antimicrobianos na produção de leite devem considerar a saúde do sistema mamário e o diagnóstico precoce da mastite (Pakrashi et al., 2023).

A mastite é uma das principais patologias que afetam a saúde do úbere das vacas em lactação (Khakimov et al., 2022; Machado et al., 2021). O impacto da doença está relacionado com a diminuição do retorno econômico da atividade leiteira consequente à redução da produção e da qualidade do leite (Velasco-Bolaños et al., 2021). A enfermidade é causada sobretudo em resposta aos patógenos contagiosos ou ambientais e manifesta-se nas formas clínica ou subclínica (Silva et al., 2021).

O diagnóstico da mastite subclínica em seus estágios iniciais pode ser útil para a identificação do agente causal e dos fatores que proporcionam o seu aparecimento, colaborando para implementação de medidas de manejo específicas para o controle da doença (Sinha et al., 2018). Desse modo, a detecção precoce da mastite permite que produtores de leite adotem medidas para limitar a propagação da enfermidade, como o monitoramento e separação de vacas em risco, assim como a higienização adequada do equipamento de ordenha usado nessas vacas (Pakrashi et al., 2023). O diagnóstico preciso é a melhor maneira de controlar e prevenir a disseminação da mastite no rebanho (Wang et al., 2022).

Nos últimos anos aumentou o interesse na Termografia de Infravermelho (TIV) do úbere para diagnosticar precocemente a mastite subclínica em bovinos leiteiros (Satheesan et al., 2024). A TIV é um método de medição de temperatura que pode fornecer informações para detecção de doenças em animais e avaliação de respostas fisiológicas em ambientes extremos. Essa tecnologia foi apontada como uma ferramenta eficaz para detectar a temperatura de bovinos (Cai et al., 2023).

A TIV pode identificar mudanças sutis de temperatura associadas a anormalidades no tecido mamário de diversas espécies, dentre elas, humanos, bovinos e bubalinos. A imagem termográfica oferece um método de triagem capaz de

detectar alterações no fluxo sanguíneo e no metabolismo que resulta em diferenças perceptíveis de temperaturas quando capturadas por uma câmera térmica (Al Husaini et al., 2024; Gayathri et al., 2024; Satheesan et al., 2024).

A temperatura da pele da superfície do úbere é um indicador importante para determinar a condição do animal, devido à possível influência de várias doenças sobre essa região (Khakimov et al., 2022). A elevação da temperatura nos termogramas do úbere, em conjunto com o aumento da contagem de células somáticas (CCS) no leite estão associados à reação inflamatória mamária (Machado et al., 2021).

Nos últimos anos, tecnologias como os sistemas automatizados de ordenha (*Automated Milking System* – AMS) vem sendo adotadas nas fazendas (Lokhorst et al., 2019) devido ao aumento dos custos com mão de obra e escassez de trabalhadores. Essa tecnologia gera uma grande quantidade de dados que podem ser processados com o emprego de algoritmos de aprendizado de máquina para originar resultados que possam ajudar a melhorar a produtividade (Olasehinde, 2021). Esses algoritmos também podem ser aplicados aos dados termográficos para identificar regiões de interesse (ROIs) e analisar informações de temperatura nessas áreas com o objetivo de prever resultados (Kim e Hidaka, 2021). Uma melhoria na previsão de distúrbios de saúde em vacas leiteiras beneficiaria tanto os seres humanos quanto os animais (Zhou et al., 2022).

Diante disso, objetivou-se avaliar e aprimorar o uso da termografia infravermelha no diagnóstico da mastite subclínica bovina, por meio do desenvolvimento de estratégias de análise de imagens térmicas com o apoio de algoritmos de aprendizado de máquina e de visão computacional.

CAPÍTULO 4 – Considerações finais

À medida que a pecuária se moderniza com o emprego progressivo de tecnologias e diante da preocupação com a saúde e bem-estar dos animais, essa pesquisa coloca em evidência a importância do desenvolvimento de métodos de diagnóstico não invasivos, ágeis e passíveis de integração em AMS. Compreende-se que a TIV pode ser integrada como uma tecnologia complementar a outras utilizadas na solução de problemas complexos em saúde animal.

A presente tese demonstrou o potencial de sinergia entre a TIV e algoritmos de inteligência artificial no diagnóstico da mastite subclínica bovina. Enquanto o uso do XGBoost demonstrou que a análise conjunta de variáveis ambientais, produtivas e termográficas podem elevar a acurácia diagnóstica, a aplicação do YOLO reforçou o papel da visão computacional na detecção automática de padrões térmicos, mesmo diante das limitações decorrentes da escassez de dados representativos da doença.

A possibilidade de utilizar modelos baseados em inteligência artificial como mecanismos confirmatórios ou de triagem representa um ganho relevante para a pecuária leiteira, reduzindo perdas produtivas, contribuindo para o uso racional de antibióticos e, conseqüentemente, colaborando para a sustentabilidade do setor. Além disso, a adoção de tecnologias que favorecem o bem-estar animal fortalece uma imagem positiva da produção leiteira junto à sociedade.

Entretanto, os resultados desse trabalho também evidenciaram desafios a serem superados, como a necessidade de bancos de dados robustos e representativos, e o desenvolvimento de sensores adaptados à obtenção de dados em tempo real para a campo. Tais aspectos abrem espaço para investigações que explorem o potencial da integração entre a termografia infravermelha, aprendizado profundo e outras técnicas de monitoramento fisiológico, visando não apenas à melhoria do diagnóstico da mastite subclínica, mas também à construção de sistemas preditivos mais abrangentes para diferentes enfermidades em animais de produção.

Por fim, este trabalho se insere no escopo das investigações científicas mais atuais reforçando a relevância da integração entre a medicina veterinária e a ciência de dados para a criação de metodologias mais eficientes no monitoramento e diagnóstico de doenças em animais de produção.

References

- Aziz, F., & Saputri, D. U. E. (2024). Efficient Skin Lesion Detection using YOLOv9 Network. *Journal of Medical Information Technology*, 2(1), 11-15. <https://doi.org/10.37034/medinftech.v2i1.30>
- Bobbo, T., Biffani, S., Taccioli, C., Penasa, M., & Cassandro, M. (2021). Comparison of machine learning methods to predict udder health status based on somatic cell counts in dairy cows. *Scientific Reports*, 11. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-93056-4>
- Coskun, G., & Aytekin, I. (2021). Early detection of mastitis by using infrared thermography in Holstein-Friesian dairy cows via classification and Regression Tree (CART) Analysis. *Selçuk Journal of Agriculture and Food Sciences*, 35(2), 115-124. <https://dx.doi.org/10.15316/SJAFS.2021.237>
- Cuthbertson, H., Tarr, G., & Gonzalez, L.A. (2019). Methodology for data processing and analysis techniques of infrared video thermography used to measure cattle temperature in real time. *Computers and Electronics in Agriculture*, 167:1-10. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.105019>
- Diukarev, V., & Yaroslav, S. (2024). Proposed Methods for Preventing Overfitting in Machine Learning and Deep Learning. *Asian Journal of Research in Computer Science*, 17(10), 85-94. <https://doi.org/10.9734/ajrcos/2024/v17i10511>
- Ebrahimie, E., Ebrahimi, F., Ebrahimi, M., Tomlinson, S., & Petrovski, K. R. (2018). A large-scale study of indicators of sub-clinical mastitis in dairy cattle by attribute weighting analysis of milk composition features. *Journal of Dairy Science*, 85, 193-200. <https://dx.doi.org/10.1017/S0022029918000249>
- Hamed, G., Marey, M., Amin, S. E., & Tolba, M. F. (2021). Automated Breast Cancer Detection and Classification in Full Field Digital Mammograms Using Two Full and Cropped Detection Paths Approach. *IEEE Access*, 9, 116898-116913. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3105924>
- Hasanin, T., Khoshgoftaar, T. M., Leevy, J. L., & Bauder, R. A. (2019). Severely imbalanced Big Data challenges: investigating data sampling approaches. *Journal of Big Data*, 6, 107. <https://doi.org/10.1186/s40537-019-0274-4>
- Hinterstoisser, S., Lepetit, V., Wohlhart, P., & Konolige, K. (2019). On Pre-trained Image Features and Synthetic Images for Deep Learning. In: Leal-Taixé L, Roth S, eds. *Computer Vision – ECCV 2018 Workshops*. Lecture Notes in Computer Science. Cham: Springer, 11129. https://doi.org/10.1007/978-3-030-11009-3_42
- Hovinen, M., Siivonen, J., Taponen, S., Hänninen, L., Pastel, M., Aisla, A., & Pyörälä, S. (2008). Detection of Clinical Mastitis with the Help of a Thermal Camera. *Journal of Dairy Science*, 91, 4592-4598. <https://doi.org/10.3168/jds.2008-1218>
- Jiang, B., Wu, Q., Yin, X., Wu, D., Song, H., & He, D. (2019). FLYOLOV3 deep learning for key parts of dairy cow body detection. *Computers and Electronics in Agriculture*, 166, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104982>

- Krishnamoorthy, P., Goudar, A. L., Suresh, K. P., & Roy, P. (2021). Global and countrywide prevalence of subclinical and clinical mastitis in dairy cattle and buffaloes by systematic review and meta-analysis. *Research in Veterinary Science*, 136, 561-586. <https://doi.org/10.1016/j.rvsc.2021.04.021>
- Motamed, S., Rogalla, & P., Khalvati, F. (2021). Data augmentation using Generative Adversarial Networks (GANs) for GAN-based detection of Pneumonia and COVID-19 in chest X-ray images. *Informatics in Medicine Unlocked*, 27, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.imu.2021.100779>
- Qiao, Y., Truman, M., & Sukkarieh, S. (2019). Cattle segmentation and contour extraction based on Mask R-CNN for precision livestock farming. *Computers and Electronics in Agriculture*, 165. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104958>
- Romanello, N., Lourenço Júnior, J. B., Barioni Júnior, W., Brandão, F. Z., Marcondes, C. R., Pezzopane, J. R. M., ... Moura, A. B. B. (2018). Thermoregulatory responses and reproductive traits in composite beef bulls raised in a tropical climate. *International Journal of Biometeorology*, 62, 1575-1586. <https://doi.org/10.1007/s00484-018-1557-8>
- Sathiyabarathi, M., Jeyakumar, S., Manimaran, A., Jayaprakash, G., Pushpadass, H. A., Sivaram, M., ... Kumar, R. D. (2016). Infrared thermography: a potential noninvasive tool to monitor udder health status in dairy cows. *Veterinary World*, 9(10), 1075-1081. <http://dx.doi.org/10.14202/vetworld.2016.1075-1081>
- Sharma, P., Bhardwaj, K., Wadhwa, D. R., & Katoch, S. (2020). Subclinical mastitis and its effect on milk components in crossbred cows. *Himachal Journal of Agricultural Research*, 46(1), 95-99.
- Shorten, C., & Khoshgoftaar, T. M. (2019) A survey on image data augmentation for deep learning. *Journal of Big Data*, 6(60),1-48. <https://doi.org/10.1186/s40537-019-0197-0>
- Silva, R. A. B., Pandorfi, H., & Almeida, G. L. P. (2021). Thermal Image Thresholding for Automatic Detection of Bovine Mastitis. *International Journal of Computer Applications*, 183(14), 29-33. <https://dx.doi.org/10.5120/ijca2021921460>
- Soltani, H., Amroune, M., Bendib, I., Haouam, M., Benkhelifa, E., & Fraz, M. M. (2024). Breast lesions segmentation and classification in a two-stage process based on Mask-RCNN and Transfer Learning. *Multimedia Tools and Applications*, 83, 35763-35780. <https://doi.org/10.1007/s11042-023-16895-5>
- Thompson, J., Nunn, S. L. E., Sarkar, S., & Clayton, B. (2023). Diagnostic Screening of Bovine Mastitis Using MALDI-TOF MS Direct-Spotting of Milk and Machine Learning. *Veterinary Sciences*, 10, 101. <https://doi.org/10.3390/vetsci10020101>
- Ultralytics. YOLOv8 – Train Settings [Internet]. GitHub; 2023 [acesso em 11 nov. 2024]. Disponível em: <https://docs.ultralytics.com/modes/train/#train-settings>
- Ultralytics. YOLOv11 – Model Overview [Internet]. GitHub; 2024 [acesso em 13 fev. 2025]. Disponível em: <https://docs.ultralytics.com/models/yolo11>
- Vijayakumar, A., & Vairavasundaram, S. (2024). YOLO-based Object Detection Models: A Review and its Applications. *Multimedia Tools and Applications*, 83, 83535-83574. <https://doi.org/10.1007/s11042-024-18872-y>

Wang, Y., Kang, X., He, Z., Feng, Y., & Liu, G. (2022). Accurate detection of dairy cow mastitis with deep learning technology: a new and comprehensive detection method based on infrared thermal images. *Animal*, 16, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2022.100646>

Yu, T., Mo, B., Liu, F., Qi, H., & Liu, Y. (2019). Robust thermal infrared object tracking with continuous correlation filters and adaptive feature fusion. *Infrared Physics & Technology*, 98, 69-81. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2019.02.012>

Zaninelli, M., Redaelli, V., Luzi, F., Bronzo, V., Mitchell, M., Dell'Orto, V., ... Savoini, G. (2018). First Evaluation of Infrared Thermography as a Tool for the Monitoring of Udder Health Status in Farms of Dairy Cows. *Sensors*, 18(3), 862. <https://doi.org/10.3390/s18030862>

Zhang, X., Kang, X., Feng, N., & Liu, G. (2020). Automatic recognition of dairy cow mastitis from thermal images by a deep learning detector. *Computers and Electronics in Agriculture*, 178:105754. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105754>