



Metodologia para estimativa de conforto térmico bovino utilizando dados de cabresto inteligente e estações agrometeorológicas



Modelagem do
conforto térmico

Comparativo
entre preditores

TGN⁽¹⁾ (°C)

$$TC = (1,2 \times ta) - (20 \times d) + 52$$

*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Embrapa Agricultura Digital
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

DOCUMENTOS 187

Metodologia para estimativa de conforto térmico bovino utilizando dados de cabresto inteligente e estações agrometeorológicas

*Helano Póvoas de Lima
Caroline Carvalho de Oliveira
Roberto Hiroshi Higa
Eduardo Antonio Speranza
Camilo Carromeu*

Embrapa Agricultura Digital
Av. Dr. André Tosello, nº 209 - Campus da Unicamp, Barão
Geraldo - Campinas, SP
CEP. 13083-886 - Fone: +55 (19) 3211-5700

www.embrapa.br/agricultura-digital
www.embrapa.br/fale-conosco/sac

Comitê Local de Publicações
da Unidade Responsável

Presidente
Carla Geovana do Nascimento Macário

Secretário-Executivo
Maria Fernanda Moura

Membros
*Adriana Farah Gonzalez, Alexandre de Castro, Carla
Cristiane Osawa, Debora Pignatari Drucker, Ivan Mazoni,
João Camargo Neto, João Francisco Gonçalves Antunes,
Magda Cruciol*

Revisão de texto
Adriana Farah Gonzalez

Normalização bibliográfica
Carla Cristiane Osawa

Projeto gráfico da coleção
Carlos Eduardo Felice Barbeiro

Editoração eletrônica
Magda Cruciol

Foto da capa e arte
Caroline Carvalho e Magda Cruciol

1ª edição
Publicação digital (2022): PDF

Todos os direitos reservados.

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte,
constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Embrapa Agricultura Digital

Metodologia para estimativa de conforto térmico bovino utilizando dados
de cabresto inteligente e de estações meteorológicas / Helano Póvoas
de Lima ... [et al.]. - Campinas : Embrapa Agricultura Digital, 2022.
PDF (19 p.) : il. color. - (Documentos / Embrapa Agricultura Digital,
ISSN 2764-2488 ; 187).

1. Bovino de corte. 2. Gado Nelore. 3. Conforto térmico. I. Lima, Hela-
no Póvoas de. II. Embrapa Agricultura Digital. III. Série.

CDD (21. ed.) 636.213

Carla Cristiane Osawa (CRB-8/10421)

© Embrapa, 2022

Helano Póvoas de lima

Bacharel e mestre em Ciência da Computação, analista da Embrapa Agricultura Digital, Campinas, SP

Caroline Carvalho de Oliveira

Zootecnista, Ph.D em Ciências Agrárias, bolsista de estímulo à inovação na Embrapa Gado de Corte, Campo Grande, MS

Roberto Hiroshi Higa

Engenheiro eletricitista, doutor em Engenharia Elétrica, pesquisador da Embrapa Agricultura Digital, Campinas, SP

Eduardo Antonio Speranza

Bacharel e doutor em Ciência da Computação, analista da Embrapa Agricultura Digital, Campinas, SP

Camilo Carromeu

Cientista da Computação, Ph.D. em Pecuária de Precisão, analista da Embrapa Gado de Corte, Campo Grande, MS

Apresentação

A bovinocultura encontra-se entre as principais atividades agropecuárias exercidas no Brasil, contribuindo fortemente como ativo econômico para o Produto Interno Bruto (PIB). Seus subprodutos, em especial a carne vermelha, figuram entre os maiores produtos de exportação do País e vem ganhando cada vez mais mercado na economia globalizada.

A pecuária brasileira está inserida num contexto de vastas extensões de terras agricultáveis, abundância de água e clima propício. Incrementos de produção e produtividade conquistados nas últimas quatro décadas dobrou o número de cabeças de gado bovino no País. Soma-se ainda o crescente consumo de proteína animal e altos índices de exportação agropecuária.

Para atender à demanda por qualificação e à exigência de uma relação equilibrada com o ecossistema por parte dos mercados internacionais, o investimento em novos sistemas e serviços que contribuam para eficiência e competitividade da cadeia produtiva brasileira vão exigir avanços em ciência e tecnologia para alcançar a excelência técnica e referência mundial no setor.

Este trabalho explora um dos aspectos ainda pouco manejados, mas com influência tanto na produtividade quanto na qualidade: o conforto térmico animal na pecuária de corte extensiva, onde o ambiente não é controlado. É proposta uma metodologia para avaliação de conforto térmico animal por meio de dispositivos conectados à internet, que monitoram variáveis fisiológicas e meteorológicas.

Stanley Robson de Medeiros Oliveira

Chefe Geral

Sumário

Introdução.....	6
Desenvolvimento	8
Desenvolvimento do regressor com dados históricos.....	10
Modelagem do conforto térmico utilizando SBRF	12
Definição da base de dados fuzzy	13
Definição da base de regras fuzzy	15
Implementação	17
Considerações finais	17
Referências	18

Introdução

A bovinocultura de corte carece de condições favoráveis para garantir uma boa produtividade do rebanho. Sendo o sistema de produção extensivo o mais utilizado, os bovinos encontram-se frequentemente expostos às intempéries climáticas. A exposição à forte radiação solar e às altas temperaturas faz esses animais ingressarem em um estado conhecido como estresse térmico, capazes de alterar a frequência respiratória e cardíaca e, por consequência, sua taxa metabólica, ou seja, sua capacidade de transformar em carne, leite ou energia o que ingerem (Encarnação, 1989 citado por Marques et al., 2006).

Alguns índices vêm sendo utilizados para quantificar e classificar o ambiente térmico na produção animal. A maior parte se restringe aos elementos climáticos (radiação solar, temperatura e umidade relativa do ar, vento, etc.), não considerando a individualidade da resposta do organismo animal (ex: idade, sexo, raça, linhagem, etc.). Neste sentido, podemos exemplificar, na lista abaixo, alguns dos índices frequentemente empregados na avaliação do conforto térmico de bovinos¹:

a) ÍNDICE DE TEMPERATURA E UMIDADE (THI) (Thom, 1958):

$$\text{THI} = t_a + 0,36t_{po} + 41,5$$

t_a = temperatura do ar (°C) ; t_{po} = temperatura de ponto de orvalho (°C).

b) ÍNDICE DE GLOBO ÚMIDO (WBGT) (Yaglou; Minard, 1957):

$$\text{WBGT} = 0,7t_w + 0,2t_g + 0,1t_a$$

t_w = temperatura do bulbo úmido (°C); t_a = temperatura do ar (°C); t_g = temperatura do globo de Vernon (°C).

c) ÍNDICE DE GLOBO E UMIDADE (BGHI) (Buffington et al., 1981):

$$\text{BGHI} = t_g + 0,36t_{po} + 41,5$$

t_g = temperatura do globo negro (°C); t_{po} = temperatura de ponto de orvalho (°C).

¹ Vale ressaltar que todos os índices buscam aferir, por meio de diferentes variáveis e método, o mesmo fenômeno, portanto não são mutuamente exclusivos.

d) ÍNDICE DE TEMPERATURA EQUIVALENTE PARA VACAS (**ETI**) (Baeta et al., 1987):

$$ETI = 27,88 - 0,456ta + 0,010754ta^2 - 0,4905U + 0,00088U^2 + 1,1507V - 0,126447V^2 + 0,019876ta \times U - 0,046313ta \times V$$

ta = temperatura do ar (°C); U = umidade relativa do ar (%); V = velocidade do vento (m/s).

e) ÍNDICE DE TOLERÂNCIA AO CALOR (ITC) (Baccari Junior et al., 1986):

$$ITC = 10 - (tr2 - tr1)$$

tr2 = temperatura retal ao sol (°C); tr1 = temperatura retal a sombra (°C).

f) ÍNDICE DE IBÉRIA (Rhoad, 1944):

$$ITC = 100 - 18 (trm - 38,33)$$

ITC = índice de tolerância ao calor; Trm = temperatura retal media (°C).

g) ÍNDICE DE RAUSCHENBACH-YEROKHIN (Rauschenbach; Yerokhin, 1975):

$$ITC = (1,2 \times ta) - (20 \times d) + 52$$

ITC = índice de tolerância ao calor; ta: temperatura do ar (°C); d: diferença entre as temperaturas retais.

Assim, considerando as diferenças existentes entre os indivíduos diante da capacidade de enfrentarem as adversidades ambientais, quantificar e avaliar conjuntamente os elementos climáticos e as alterações fisiológicas dos animais se torna necessário para sustentar e auxiliar tomadas de decisões, seja no âmbito do manejo (ambiental e/ou animal) ou na seleção de indivíduos mais tolerantes e/ou adaptados a determinada região (Sá Filho et al., 2012). Ressaltando, ainda, a importância deste entendimento para sistemas extensivos onde há pouco ou nenhum controle do ambiente térmico produtivo.

Com as leis de incentivo fiscal para que empresas privadas brasileiras invistam em Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PD&I) e considerando o know-how Embrapa, com o intuito de propor melhorias em indicadores de sustentabilidade, em 2021, foi firmado acordo de cooperação técnica para desenvolvimento e execução do projeto “Sistema integrado de IoT e IA3 para monitoramento de indicadores de produtividade, ambientais e de bem-estar animal em sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (ILPF)” entre as empresas Huawei do Brasil Telecomunicações, Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações (CPQD) e a Embrapa, para monitoramento de indicadores ambientais e de produtividade e bem-estar animal.

No contexto do projeto, com foco na área de bem-estar animal, propôs-se utilizar dispositivos de IoT para monitorar variáveis fisiológicas de cada animal em tempo real, possibilitando, por exemplo, a avaliação do conforto térmico bovino em sistema extensivo e fora de ambiente controlado. O objetivo deste trabalho é apresentar a metodologia utilizada para a construção de um índice para estimativa de conforto térmico bovino, utilizando dados microclimáticos de estações meteorológicas e dados fisiológicos do cabresto eletrônico por meio de técnicas de inteligência artificial.

As técnicas de modelagem baseadas em inteligência artificial são foco de intensa pesquisa, visto serem capazes de tratar problemas complexos, com muitas variáveis, que são difíceis de solucionar por métodos clássicos (Alonso Moral et al., 2021). Sistemas baseados em regras *fuzzy* (SBRF) têm sido aplicados a diversas áreas, como modelagem, controle e automação, dentre outras, tornando-se uma das principais aplicações da teoria de conjuntos *fuzzy* fundamentada por Zadeh (1965). Dentre as vantagens deste tipo de sistema, destacam-se a capacidade de modelar o conhecimento baseando-se em termos linguísticos e a tolerância à imprecisão, permitindo interpretabilidade por seres humanos, proporcionando robustez e boa capacidade de generalização (Alonso et al., 2015; Nguyen et al., 2019).

Desenvolvimento

Para desenvolvimento do projeto foi utilizada uma unidade experimental em sistemas ILPF implantados há 13 anos, localizada na Embrapa Gado de Corte, município de Campo Grande, Mato Grosso do Sul (latitude de 54°42' 26"S, longitude de 20° 24' 52"O e 530 m de altitude). A unidade experimental de 18 ha é composta por dois sistemas em integração lavoura-pecuária-floresta sendo ILPF-22, com espaçamento entre renques de árvores de 22 m e densidade arbórea de 113 árvores por hectare e ILPF-28, com espaçamento entre renques de árvores de 28 m e densidade arbórea de 89 árvores por hectare, e, um sistema de integração lavoura-pecuária (ILP).

² Sigla para “Internet das Coisas” ou “Internet of Things” em inglês, que são pequenos dispositivos, como sensores, conectados à internet.

³ Sigla utilizada para “Inteligência Artificial”, que corresponde a uma área de estudo na ciência da computação.

Estações meteorológicas (Modelo μ METOS® ET0, compostas por sensores de radiação solar, temperatura e umidade relativa do ar e velocidade do vento), foram instaladas a um metro e meio de altura em relação à superfície do solo, para coleta e monitoramento de dados ambientais (Figura 1), conforme a seguinte distribuição: duas estações em cada sistemas de ILPF, sendo, estação-1 alocada a 2 metros dos renques de árvores e estação-2 no ponto central do piquete entre os renques de árvores e, no sistema de ILP, uma estação no ponto central do piquete.



Figura 1. Croqui da unidade experimental e distribuição das estações meteorológicas.

Fonte: Adaptado de Google (2022).

Para avaliação animal foram utilizados novilhos da raça Nelore com idade média de 13 meses distribuídos da seguinte forma: 12 animais em cada sistema de ILPF e 8 no ILP, totalizando 32 animais. Todos os procedimentos e metodologias aplicadas foram aprovadas pela Comitê de Ética para Uso de Animais, CEUA- Embrapa Gado de Corte, sob protocolo n° 004/2022. Cada animal foi equipado com o dispositivo não invasivo Bovine Eletronic Platform-BEP (INDEXT Soluções Tecnológicas) para coleta de variáveis fisiológicas do animal em campo (Figura 2), programados para registro em intervalos de 15 min.

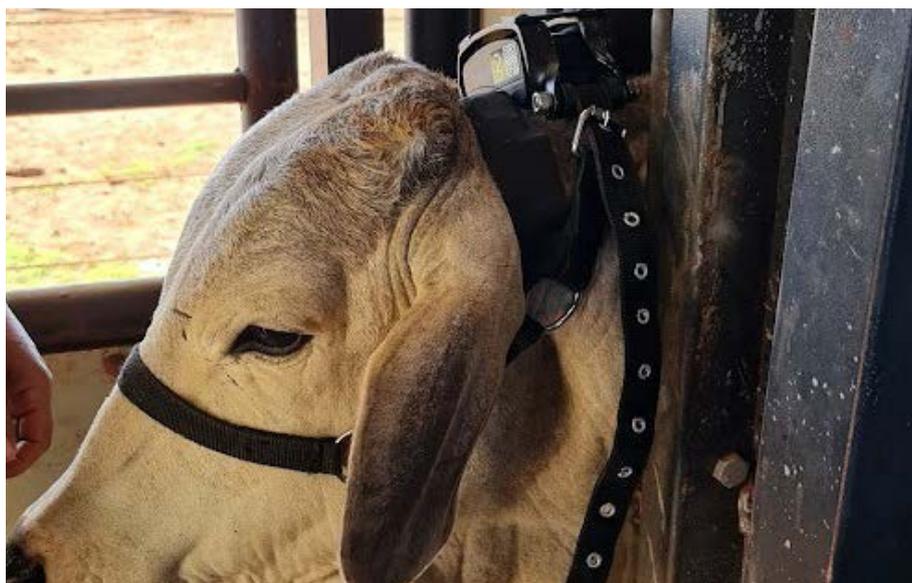


Figura 2. Dispositivo *Bovine Eletronic Platform-BEP*.

Foto: Caroline Carvalho de Oliveira.

Para a composição do índice de conforto térmico bovino (ICTB), dentre uma grande gama de variáveis aferidas pelos dispositivos, foi feita uma seleção prévia sobre quais seriam possivelmente

relevantes para o problema. Quanto às variáveis providas pelo cabresto eletrônico, foram selecionadas o índice UV (escala do sensor), a temperatura superficial (°C), a frequência respiratória (movimentos por minuto), a frequência cardíaca (batimentos por minuto) e o sombreamento (sol, sombra ou noite). Quanto às variáveis providas pelas estações meteorológicas, foram selecionadas a temperatura do ar (°C), a umidade relativa do ar (%), a temperatura de ponto de orvalho (°C), a radiação solar (W/m²), a velocidade do vento e a rajada de vento máxima (m/s).

Um problema encontrado com bastante frequência é a ausência do sensor para medição da temperatura de globo negro (TGN) na maioria das estações meteorológicas comumente utilizadas (incluindo as disponíveis no projeto), porém, essa variável é muito importante para a avaliação. O sensor da TGN é construído posicionando-se um sensor de temperatura dentro de uma cúpula, geralmente feita de cobre, pintada com tinta preta, exposto ao sol e ao vento, mimetizando os efeitos da temperatura, umidade, vento e calor radiante no processo de troca térmica do animal com o ambiente e, portanto, tem alta correlação com o conforto térmico.

A TGN tem papel particular como referência tácita no processo de modelagem, pois o índice de conforto térmico mais amplamente adotado por especialistas da área é o Índice de Temperatura de Globo e Umidade (ITGU), proposto por Buffington et al. (1981), onde a TGN é a principal componente na equação que o define.

Para suprir a ausência da TGN, foi adotado o seguinte procedimento: desenvolver um regressor utilizando dados históricos de microclima aferidos no local do projeto em experimentos passados, quando o sensor de TGN estava disponível (8347 medições); comparar a performance deste regressor com regressores referenciados na literatura da área, aferida nos mesmos dados históricos; adotar o regressor com melhor resultado. A metodologia utilizada para coleta dos dados históricos microclimáticos encontra-se descrita em Oliveira et al. (2019).

Desenvolvimento do regressor com dados históricos

Foram desenvolvidos regressores utilizando os dados referidos por meio de algoritmos clássicos de regressão (Linear, RandomForest, MLP, KNN, CART, SVM). Para validação dos modelos foi adotada validação cruzada de 10 partições. Alguns destes algoritmos já possuem seleção de variáveis embutida ou indicam qual o peso das variáveis na composição do resultado. Foi verificado que algumas variáveis, como sistema produtivo (ILPF-1, ILPF-2, ILP), estação do ano (verão, inverno), umidade relativa do ar e temperatura do ponto de orvalho, apresentaram pouca relevância na predição para determinados algoritmos. Na Tabela 1 é apresentado comparativo da avaliação dos preditores modelados para a TGN, utilizando as variáveis temperatura do ar, temperatura do ponto de orvalho e umidade relativa do ar. Nota-se que, à exceção da rede neural Multi Layer Perceptron (MLP), os demais algoritmos alcançaram performance similar, oscilando o R² entre 0,75 e 0,82.

Tabela 1. Comparativo entre preditores para a TGN, melhores resultados em verde e piores em vermelho..

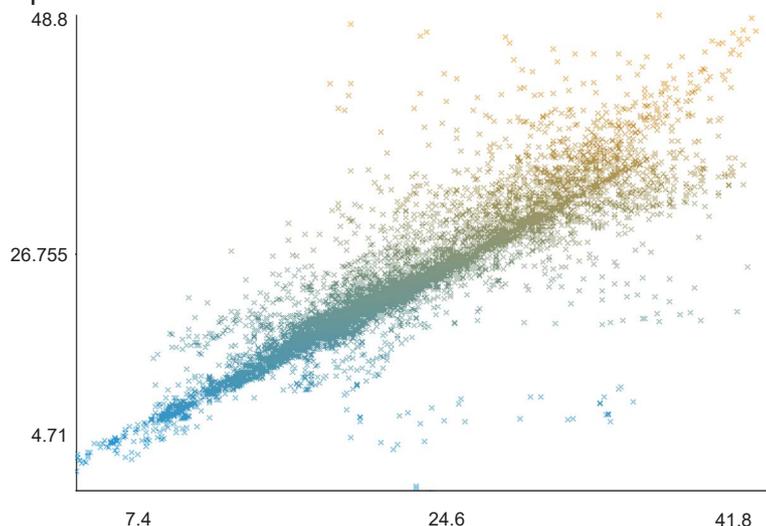
	Coef. de correlação	R ²	MAE ⁽¹⁾	RMSE ⁽²⁾
Regressão Linear	0,9046	0,8183	1,5268	2,6755
Random Forest	0,8955	0,8019	1,5770	2,8064
SVM	0,9009	0,8116	1,4397	2,7458
MLP	0,8661	0,7501	2,0752	3,1707
KNN(n=3)	0,8916	0,7950	1,6263	2,8607
KNN(n=5)	0,8990	0,8082	1,5606	2,7548
CART	0,9026	0,8147	1,5154	2,7046

(¹)Erro médio absoluto,(²) Raiz do Erro Quadrático Médio.

Tendo a regressão linear apresentado o melhor resultado, embora outros preditores tenham apresentado resultado equivalente, por se tratar de um algoritmo simples e comparável aos preditores presentes na literatura, esta foi considerada como o preditor adotado. O erro absoluto médio ficou na casa de 1,5 °C e a equação final foi determinada como:

$$\begin{aligned} \text{Temperatura de globo negro (}^{\circ}\text{C)} = & 0.3593 \text{ Temperatura do ponto de orvalho (}^{\circ}\text{C)} + \\ & 0.7242 \text{ Temperatura do ar (}^{\circ}\text{C)} + \\ & -0.0677 \text{ Umidade relativa (\%)} + 5.79 \end{aligned}$$

Efetuada-se análise visual dos resultados da predição, observa-se que em 58% das instâncias (4826) o preditor apresenta erro inferior a 1 °C, em 87% das instâncias (7246) o preditor apresenta erro inferior a 3 °C, em 94% das instâncias (7857) o preditor apresenta erro inferior a 5 °C e em 1,4% das instâncias (118) apenas, o preditor erra em mais de 10 °C. A dispersão do erro é apresentada na Figura 3. Neste gráfico, quanto mais distante da reta bissetriz o ponto estiver, maior o erro. É possível visualizar que o preditor tende a apresentar um erro um pouco maior quando a TGN for mais alta. Uma possível explicação para isso é a influência da radiação solar na TGN, não captada pelo modelo.

**Figura 3.** Resultado da predição da TGN (Medido x Predito) em °C.

Regressores na literatura

Paralelamente ao regressor desenvolvido, foram levantados alguns dos mais utilizados regressores encontrados na literatura e suas performances foram validadas junto aos dados históricos da área do projeto utilizando o erro médio absoluto (MAE em inglês) como métrica. A Tabela 2 apresenta as equações da regressão linear e respectivos erros.

Tabela 2. Comparativo do erro médio absoluto entre preditores da literatura aferido em dados históricos.

Regressor	Equação	MAE (°C)
Desenvolvido	$TGN = 0.3593 TPO + 0.7242 TAR + -0.0677 UR + 5.79$	1,53
Silva et al. (2019)	$TGN = 1,1641 TAR - 1,5941$	2,22
Abreu et al. (2011)	$TGN = -0,9387 + 0,8562 TAR + 0,0162 TAR^2$	4,85
Telles et al. (2016)	$TGN = -7,371 + 1,261 TAR + 0,117 UR - 0,00396 (TAR \times UR)$	1,69

Nas equações, TGN = temperatura de globo negro, TPO = temperatura do ponto de orvalho, TAR = temperatura do ar e UR = umidade relativa do ar.

Nota-se que entre os preditores na literatura, o que obteve menor erro foi o definido em Telles et al. (2016), posicionando-se muito próximo do regressor desenvolvido neste trabalho, utilizando os próprios dados históricos, o que significa uma boa capacidade de generalização para conjuntos de dados diferentes. Dado que ambos os preditores mencionados apresentaram erro médio baixo (por volta de 1,6 °C), pode-se dizer que ambos se apresentam como uma alternativa viável para ser utilizada na ausência da TGN

Modelagem do conforto térmico utilizando SBRF

SBRF são modelos matemáticos compostos por três elementos principais: a base de dados, que corresponde ao conjunto das variáveis de entrada e seus respectivos intervalos (partições *fuzzy*), a base de regras, que representa as relações lógicas e de interdependência entre as variáveis de entrada e saída em um formato de linguagem natural (regras *fuzzy*), e o motor de inferência, que opera a base de dados e a de regras, segundo um conjunto de parâmetros, para fornecer um resultado dado valores de entrada (Klir; Yuan, 1995).

Os SBRF podem ser construídos de três maneiras diferentes. O primeiro método consiste em definir os parâmetros do modelo de forma manual, utilizando-se conhecimento extraído de especialistas de domínio e da literatura especializada. Este método é usualmente adotado quando não há dados suficientes sobre o fenômeno que se quer modelar ou quando se trata de avaliação qualitativa. O segundo método consiste em utilizar dados sobre o fenômeno e algoritmos de aprendizado de máquina, como regressores, classificadores, agrupadores, construtores de regras de associação e árvores de decisão, etc., para a definição dos parâmetros do modelo (Ojha et al., 2019). Este método tem a desvantagem de construir modelos que não são interpretáveis por humanos, o que pode inibir sua adoção em alguns contextos, como, por exemplo, em sistemas de suporte à decisão. Entretanto este método tende a apresentar performance maior quando aferido em dados. Por fim, uma abordagem mais adequada em boa parte dos cenários é a construção híbrida, onde parte do conhecimento vem dos especialistas/literatura e outra parte é construída utilizando aprendizado de

máquina, porém, impondo heurísticas para garantir a interpretabilidade do modelo resultante (Lima; Camargo, 2014).

No contexto do projeto, foi necessário definir um procedimento para a construção, ajuste e validação do modelo devido às restrições apresentadas em cada momento ao longo do tempo. No primeiro momento do projeto (atualmente), os cabrestos inteligentes e as estações meteorológicas estão sendo implantadas em campo e a quantidade e confiabilidade dos dados é bastante reduzida. Portanto, a metodologia possível é a construção do modelo utilizando conhecimento dos especialistas e da literatura, utilizando os dados disponíveis até o momento para ajustar as partições *fuzzy* definidas. Em um segundo momento do projeto, quando já haverá uma massa de dados relevante para ser utilizada em aprendizado de máquina, e após a execução de testes controlados de estresse térmico nos rebanhos para a produção de medições nessa situação, é planejado o ajuste e validação do modelo utilizando o método híbrido. Para este processo será utilizada a ferramenta EvoFuzzy (Lima et al., 2016) desenvolvida pela Embrapa Agricultura Digital. O modelo de inferência do sistema *fuzzy* adotado no trabalho é o descrito por Mamdani e Assilian (1975), com implicação pelo operador Mínimo, agregação pelo operador Máximo e defuzzificação pelo operador Centro de Gravidade.

Definição da base de dados *fuzzy*

Nesta primeira etapa da modelagem, com a ajuda de um especialista do domínio (que acompanha o experimento de ILPF há 10 anos), o conjunto de variáveis foi restringido para garantir a confiabilidade e aderência do modelo ao expertise deste. No segundo momento do projeto, todas as variáveis mencionadas anteriormente serão adicionadas com o auxílio de aprendizado de máquina.

Foram adotadas partições *fuzzy* fortes (Mencar et al., 2013) utilizando funções de pertinência triangulares e trapezoidais. Para a parametrização das funções foram adaptados valores de referência para conforto térmico de bovinos indianos (maioria do rebanho no Brasil) presentes na literatura (Silva, 2000; Mota, 2001), apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Valores de referência para conforto térmico para bovinos indianos presentes na literatura, adaptados para as partições *fuzzy*.

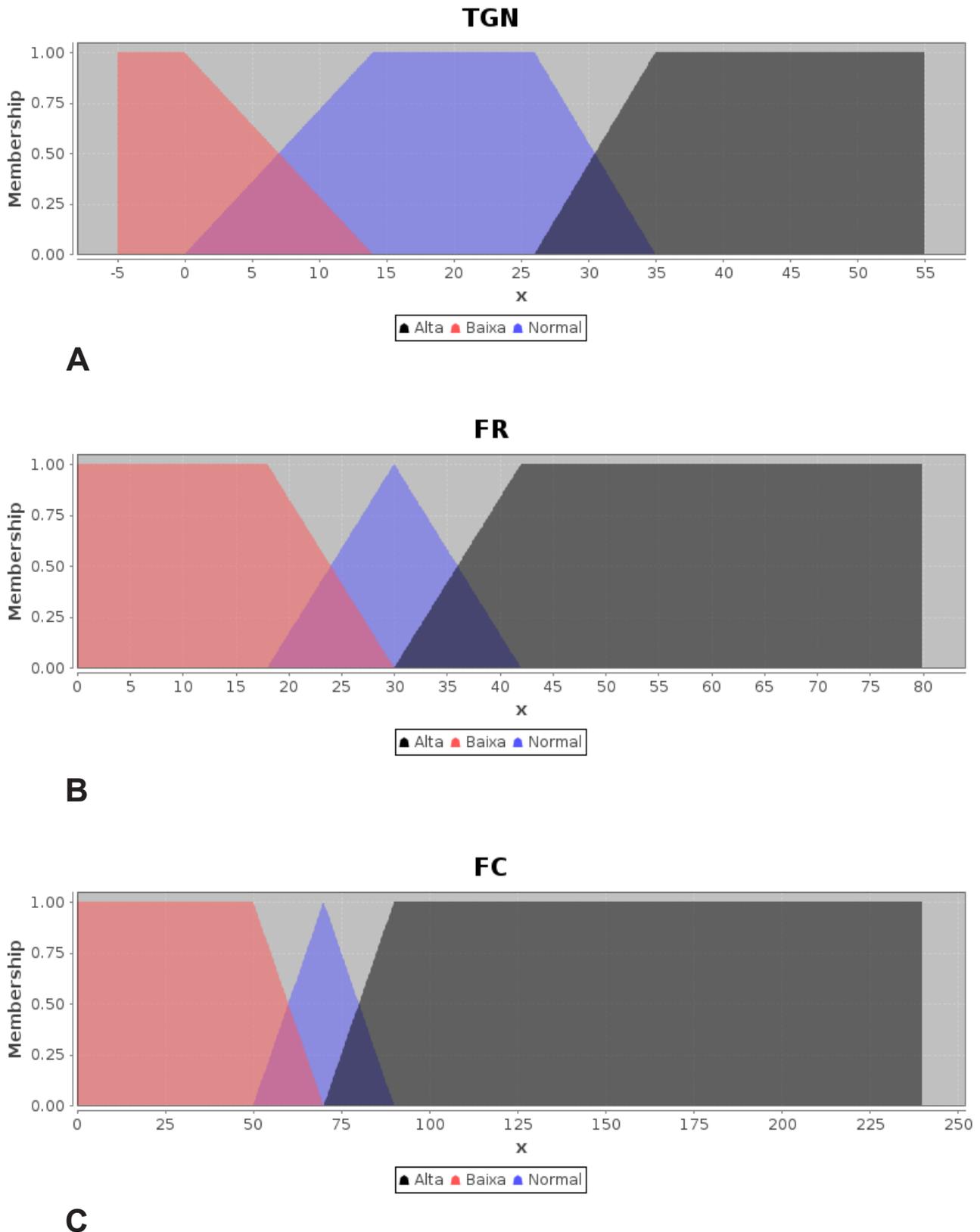
TGN ⁽¹⁾ (°C)	FR ⁽²⁾ (mov./min)	FC ⁽³⁾ (bat./min)	TS ⁽⁴⁾ (°C)
7 a 26	24 a 36	60 a 80	35.2

⁽¹⁾TGN = temperatura de globo negro. ⁽²⁾FR = frequência respiratória. ⁽³⁾FC = frequência cardíaca. ⁽⁴⁾TS = temperatura superficial.

As partições *fuzzy* para as variáveis de entrada do ICTB foram definidas para temperatura de globo negro (TGN), frequência respiratória (FR), frequência cardíaca (FC) e temperatura superficial (TS), apresentadas, respectivamente, nas Figuras 4A, 4B, 4C e 4D. Para estas variáveis, foram adotados os termos linguísticos 'Alta', 'Normal' e 'Baixa' para representar os conjuntos *fuzzy* de cada partição. A partição do ICTB foi definida em um universo de 0 a 10, sendo adotados os termos linguísticos 'Conforto', 'Desconforto' e 'Crítico' para representar os conjuntos (Figura 4E).

Os valores das variáveis de entrada, a serem alimentadas no modelo, correspondem à média das medições, em um intervalo de 30 min, dos valores aferidos no cabresto eletrônico ou na estação agrometeorológica, conforme a origem de cada variável. Esta 'suavização' das variáveis faz-se necessária, pois, os efeitos fisiológicos da influência destas no conforto térmico animal é observada

apenas depois de certo tempo após a alteração dos valores considerados 'normais'. Para as variáveis FR, FC e TS, as medições com valor 'zero' são descartadas do cálculo da média, por possivelmente tratar-se de erros de medição⁴. Para a saída do modelo ICTB, maior será o conforto térmico quanto mais próximo de zero for o valor do índice.



⁴ O cabresto inteligente é um produto experimental, portanto sujeito a falhas pontuais.

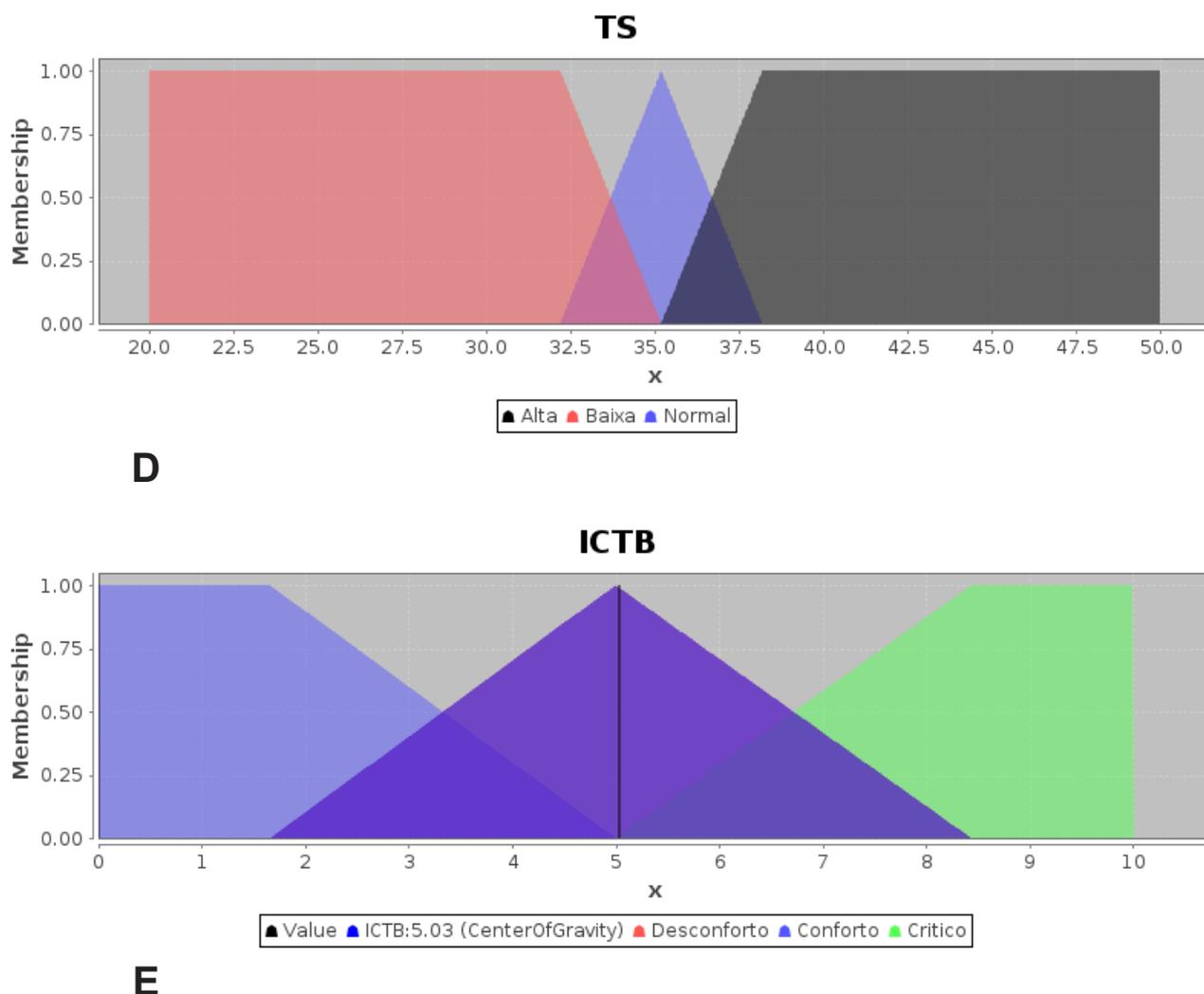


Figura 4. Gráficos das funções de pertinência das partições *fuzzy* definidas para as variáveis de entrada (A,B,C,D) e saída (E) do ICTB.

Definição da base de regras *fuzzy*

A base de regras foi projetada para ter consistência lógica, ou seja, apresentar um resultado para a inferência diante de qualquer valor para as variáveis de entrada dentro do intervalo definido. Para isso, foram definidas regras onde o antecedente apresenta apenas conjunção (conectivo 'E') entre as variáveis de entrada, e o consequente, apenas a variável de saída, o índice. Neste primeiro momento do projeto, as regras foram definidas apenas com base no conhecimento de especialistas.

A Tabela 4 apresenta todas as regras do modelo. Nesta tabela, o antecedente das regras corresponde às variáveis de entrada (FR, FC, TS e TGN) usando o operador conjunção (E) e o consequente da regra é a variável de saída (ICTB), por exemplo, a regra 1 lê-se "Se FR é Alta E FC é Alta E TGN é Alta Então ICTB é Crítico". A construção da base de regras foi estabelecida em duas etapas. Na primeira, os especialistas foram instruídos a elencar, de maneira não guiada, regras que correspondessem a situações onde eles tinham elevado grau de confiança sobre qual seria o comportamento do conforto térmico do animal nesse cenário. Tais regras tendem a ser mais gerais e a corresponder ao conhecimento tácito do especialista (Tabela 4, regras 1 a 11).

Na segunda etapa, foram apresentados aos especialistas antecedentes de regras que correspondem ao complemento entre as regras elencadas espontaneamente e o conjunto total de regras pos-

síveis. Estes então foram instados a julgar o cenário representado em cada antecedente de regra e fazer uma asserção sobre qual deveria ser o conforto térmico em cada caso (Tabela 4, regras 12 a 47). Em um segundo momento do projeto, quando dados rotulados estiverem disponíveis, este segundo conjunto deve ser substituído por regras extraídas por aprendizado de máquina, usando a ferramenta EvoFuzzy.

Tabela 4. Base de regras *fuzzy* definida para o ICTB.

#	FR(1)	FC(2)	TS(3)	TGN(4)	ICTB(5)
1	Alta	Alta	-	Alta	Crítico
2	Alta	Baixa	-	Alta	Desconforto
3	Alta	Normal	-	Alta	Desconforto
4	Alta	-	-	Baixa	Conforto
5	Alta	-	-	Normal	Desconforto
6	Baixa	Baixa	Baixa	-	Crítico
7	Baixa	Normal	Baixa	-	Conforto
8	Baixa	-	Normal	Normal	Conforto
9	Normal	Alta	Baixa	-	Desconforto
10	Normal	Baixa	Baixa	-	Desconforto
11	Normal	-	Normal	Normal	Conforto
12	Baixa	Alta	Alta	Alta	Desconforto
13	Baixa	Alta	Alta	Baixa	Crítico
14	Baixa	Alta	Alta	Normal	Conforto
15	Baixa	Alta	Baixa	Alta	Conforto
16	Baixa	Alta	Baixa	Baixa	Desconforto
17	Baixa	Alta	Baixa	Normal	Desconforto
18	Baixa	Alta	Normal	Alta	Desconforto
19	Baixa	Alta	Normal	Baixa	Desconforto
20	Baixa	Baixa	Alta	Alta	Conforto
21	Baixa	Baixa	Alta	Baixa	Crítico
22	Baixa	Baixa	Alta	Normal	Conforto
23	Baixa	Baixa	Normal	Alta	Conforto
24	Baixa	Baixa	Normal	Baixa	Conforto
25	Baixa	Normal	Alta	Alta	Conforto
26	Baixa	Normal	Alta	Baixa	Crítico
27	Baixa	Normal	Alta	Normal	Conforto
28	Baixa	Normal	Normal	Alta	Conforto
29	Baixa	Normal	Normal	Baixa	Conforto
30	Normal	Alta	Alta	Alta	Desconforto
31	Normal	Alta	Alta	Baixa	Desconforto
32	Normal	Alta	Alta	Normal	Desconforto
33	Normal	Alta	Normal	Alta	Desconforto
34	Normal	Alta	Normal	Baixa	Desconforto
35	Normal	Baixa	Alta	Alta	Conforto
36	Normal	Baixa	Alta	Baixa	Conforto

Continua

37	Normal	Baixa	Alta	Normal	Conforto
38	Normal	Baixa	Normal	Alta	Conforto
39	Normal	Baixa	Normal	Baixa	Conforto
40	Normal	Normal	Alta	Alta	Conforto
41	Normal	Normal	Alta	Baixa	Conforto
42	Normal	Normal	Alta	Normal	Conforto
43	Normal	Normal	Baixa	Alta	Conforto
44	Normal	Normal	Baixa	Normal	Conforto
45	Normal	Normal	Normal	Alta	Conforto
46	Normal	Normal	Normal	Baixa	Conforto
47	Normal	Normal	Baixa	Baixa	Desconforto

⁽¹⁾Frequência respiratória. ⁽²⁾Frequência cardíaca. ⁽³⁾Temperatura superficial. ⁽⁴⁾Temperatura de globo negro. ⁽⁵⁾Índice de conforto térmico bovino.

Implementação

O SFBR foi especificado utilizando a linguagem FCL (Fuzzy Control Language) definida pela norma IEC 61131 parte 7 (International Electrotechnical Commission, 2000), que define um padrão para interoperabilidade de sistemas *fuzzy*. Este formato permitiu que fosse utilizada a ferramenta WebFuzzy (Lima et al., 2011) para auxiliar o processo de modelagem. Esta ferramenta, por meio de uma interface para a internet, é capaz de efetuar inferências, simulações e visualização de resultados de SBRF, facilitando a interação entre o especialista de domínio e o desenvolvedor. Após a finalização da definição, uma API em linguagem Java foi desenvolvida utilizando o motor de inferência da ferramenta EvoFuzzy, permitindo a incorporação do modelo do ICTB em aplicações que suportem Java ou interface de linha de comando. Adicionalmente, a EvoFuzzy permite exportação do código fonte do modelo em linguagem C++ e o padrão FCL é suportado por microcontroladores programáveis comerciais.

Considerações finais

Foi apresentada uma metodologia para construção de um índice para estimativa de conforto térmico bovino, utilizando dados microclimáticos de estações meteorológicas e dados fisiológicos do cabresto eletrônico por meio de técnicas de inteligência artificial. Esta iniciativa se mostra particularmente relevante, pois, a quase totalidade dos índices disponíveis na literatura científica, para este propósito, utilizam apenas variáveis climáticas ou variáveis fisiológicas difíceis de aferir fora de ambiente controlado, como a temperatura retal. Estes índices são mais adaptados para sistemas de confinamento (geralmente gado leiteiro), enquanto o índice proposto permite avaliar o conforto térmico em sistemas extensivos, com o gado no pasto. Uma vantagem adicional é a capacidade de diferenciação do microclima na avaliação, por exemplo, em sistemas ILPF, onde há mais sombra, em que utilizar apenas dados de estações meteorológicas pode não representar o real estado do animal.

Foi também apresentada metodologia para estimativa da TGN em caso de ausência deste sensor específico, utilizando dados climáticos do local e validado com as principais referências da literatura. Esta metodologia se mostra relevante visto a ausência do sensor da TGN ser a situação mais corriqueira, enquanto a estação agrometeorológica, mesmo que não presente na fazenda, geralmente existe nas proximidades (como as estações do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET)).

Como continuidade do projeto, pretende-se coletar dados rotulados de animais em estresse térmico, por meio de experimento controlado em campo, para subsidiar técnicas de aprendizado de máquina no refinamento e validação do modelo, por exemplo, incluindo variáveis não óbvias para o especialista. Também espera-se que, por meio de um período de coleta de dados mais extenso, seja possível refinar o modelo quanto aos intervalos de conforto adotados e quanto à sazonalidade do clima.

Referências

ABREU, P. G. de; ABREU, V. M. N.; FRANCISCON, L.; COLDEBELLA, A.; AMARAL, A. G. do. Estimativa da temperatura de globo negro a partir da temperatura de bulbo seco. **Engenharia na Agricultura**, v. 19, n. 6, p. 557-563, 2011. DOI: [10.13083/reveng.v19i6.273](https://doi.org/10.13083/reveng.v19i6.273).

ALONSO, J. M.; CASTIELLO, C.; MENCAR, C. Interpretability of fuzzy systems: current research trends and prospects. In: KACPRZYK, J.; PEDRYCZ, W. (eds). **Springer handbook of computational intelligence**. Dordrecht: Springer, 2015. chap. 14, p. 219-237. DOI: [10.1007/978-3-662-43505-2_14](https://doi.org/10.1007/978-3-662-43505-2_14).

ALONSO MORAL, J. M.; CASTIELLO, C.; MAGDALENA, L.; MENCAR, C. An overview of fuzzy systems. In: _____ **Explainable fuzzy systems: paving the way from interpretable fuzzy systems to explainable AI systems**. Cham: Springer, 2021. chap. 2, p. 25-47. (Studies in computational intelligence, v. 970). DOI: [10.1007/978-3-030-71098-9_2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-71098-9_2).

BACCARI JUNIOR, F.; POLASTRE, R.; FRÉ, C. A.; ASSIS, P. S. Um novo índice de tolerância ao calor para bubalinos: correlação com o ganho de peso. In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE DE ZOOTECNIA, 23., 1986, Campo Grande, MS. **Anais...** Campo Grande: SBZ, 1986. p. 316.

BAETA, F. C.; MEADOR, N. F.; SHANKLIN, M. D.; JOHNSON, H. D. Equivalent temperature index at temperatures above the thermoneutral for lactating cows. In: SUMMER MEETING OF THE AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS, 1987, Baltimore. **Proceedings...** St. Joseph: The American Society of Agricultural Engineers, 1987. 22 p.

BUFFINGTON, D. E.; COLLAZO-AROCHO, A.; CANTON, G. H.; PITT, D.; THATCHER, W. W.; COLLIER, R. J. Black globe-humidity index (BGHI) as comfort equation for dairy cows. **Transactions of the ASAE**, v. 24, n. 3, p. 711-714, 1981. DOI: [10.13031/2013.34325](https://doi.org/10.13031/2013.34325).

GOOGLE. **Google maps**. Disponível em: <https://www.google.com.br/maps/@-20.4476406,-54.7178254,3193m/data=!3m1!1e3>. Acesso em: 22 nov. 2022.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **CEI IEC 61131-7: automates programmables – partie 7: programmation em logique floue**. 1. ed. Geneva, 2000. 17 p. Título equivalente: programmable controllers - part 7: fuzzy control programming. Disponível em: <https://webstore.iec.ch/publication/4556>. Acesso em: 15 ago. 2022.

KLIR, G. J.; YUAN, B. **Fuzzy sets and fuzzy logic: theory and applications**. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1995. 574 p.

LIMA, H. P. de; CAMARGO, H. de A. A methodology for building fuzzy rule-based systems integrating expert and data knowledge. In: BRAZILIAN CONFERENCE ON INTELLIGENT SYSTEMS, 2014, São Carlos. **Proceedings...** [S.l.]: Conference Publishing Services, 2014. p. 300-305. BRACIS 2014.

LIMA, H. P. de; CAMARGO, H. de A.; ABREU, U. G. P. de; NOGUEIRA, E.; SILVA, J. C. B. Ferramenta para construção de sistemas fuzzy integrando conhecimento de especialistas e extraído de dados. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS FUZZY, 4., 2016, Campinas. **Livro de resumos**. Campinas: Sociedade Brasileira de Matemática Aplicada e Computacional, 2016. p. 62-63. Editores: Marcos Eduardo Ribeiro do Valle Mesquita, Graçaliz Pereira Dimuro, Regivan Hugo Nunes Santiago, Estevão Esmi Laureano. CBSF 2016. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/1148083>. Acesso em: 7 nov. 2022.

LIMA, H. P. de; MASSRUHA, S. M. F. S.; ABREU, U. G. P. de; SANTOS, S. A. Webfuzzy e fuzzygen - ferramentas para modelagem fuzzy: aplicação na sustentabilidade das fazendas do Pantanal. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROINFORMÁTICA, 8., 2011, Bento Gonçalves. **Anais...** Florianópolis: UFSC; Pelotas: UFPel, 2011. Não paginado. SBIAgro 2011. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/905609>. Acesso em: 4 nov. 2022.

MAMDANI, E. H.; ASSILIAN, S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. **International Journal of Man-Machine Studies**, v. 7, n. 1, p. 1-13, Jan. 1975. DOI: [10.1016/S0020-7373\(75\)80002-2](https://doi.org/10.1016/S0020-7373(75)80002-2).

MARQUES, J. A.; CALDAS NETO, S. F.; GROFF, A. M.; SIMONELLI, S. M.; CORASA, J.; ROMERO, L.; ZAWADSKI, F.; ARAÚJO, P. F. de. Comportamento de bovinos mestiços em confinamento com e sem acesso a sombra durante o período de verão. **Campo Digit@I**, v. 1, n. 1, p. 54-59, 2006.

MENCAR, C.; LUCARELLI, M.; CASTIELLO, C.; FANELLI, A. M. Design of strong fuzzy partitions from cuts. In: CONFERENCE OF THE EUROPEAN SOCIETY FOR FUZZY LOGIC AND TECHNOLOGY, 8., 2013, Milano. **Proceedings...** [S.l.]: Atlantis Press, 2013. p. 424-431. Editors: Gabriella Pasi, Javier Montero, Davide Ciucci. EUSFLAT-13. DOI: [10.2991/eusflat.2013.65](https://doi.org/10.2991/eusflat.2013.65).

MOTA, F. S. **Climatologia zootécnica**. Pelotas: Edição do autor, 2001. 104 p.

NGUYEN, A. T.; TANIGUCHI, T.; ECIOLAZA, L.; CAMPOS, V.; PALHARES, R.; SUGENO, M. Fuzzy control systems: past, present and future. **IEEE Computational Intelligence Magazine**, v. 14, n. 1, p. 56-68, Feb. 2019. DOI: [10.1109/MCI.2018.2881644](https://doi.org/10.1109/MCI.2018.2881644).

OJHA, V.; ABRAHAM, A.; SNÁŠEL, V. Heuristic design of fuzzy inference systems: a review of three decades of research, **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 85, p. 845-864, Oct. 2019. DOI: [10.1016/j.engappai.2019.08.010](https://doi.org/10.1016/j.engappai.2019.08.010).

OLIVEIRA C. C. de; ALVES, F. V.; MARTINS, P. G. M. de A.; KARVATTE JUNIOR, N.; ALVES, G. F.; ALMEIDA, R. G. de; MASTELARO, A. P.; SILTA, E. V. da C. e. Vaginal temperature as indicative of thermoregulatory response in Nellore heifers under different microclimatic conditions. **Plos One**, v. 14, n. 10, e0223190, 2019. DOI: [10.1371/journal.pone.0223190](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0223190).

RAUSCHENBACH, J. O.; YEROKHIN, P. I. **Quantitative estimation of heat tolerance in animals**. Novosibirski: Publishing House Nauka, 1975.

RHOAD, A. O. The Iberia heat tolerance test for cattle. **Tropical Agriculture**, v. 21, v. 9, p.162-164, 1944.

SÁ FILHO, G. F. de; TORQUATO, J. L.; SOUZA JUNIOR, J. B. F. de; DOMINGOS, H. G. T.; COSTA, L. L. de M.; DANTAS, M. R. T. Índices de conforto térmico aplicado a animais de produção. **Pubvet**, v. 6, n. 14, 1349, abr. 2012.

SILVA, R. G. da. **Introdução à bioclimatologia animal**. São Paulo: Nobel, 2000. 286 p.

SILVA, T. G. F. da; SANTOS, G. C. L.; DUARTE, A. M. C.; TURCO, S. H. N.; CRUZ NETO, J. F. da; JARDIM, A. M. D. da R. F.; SANTOS, T. S. dos. Black globe

temperature from meteorological data and a bioclimatic analysis of the Brazilian Northeast for Saanen goats. *Journal of Thermal Biology*, v. 85, n. 2, 102408, Oct. 2019. DOI: [10.1016/j.jtherbio.2019.102408](https://doi.org/10.1016/j.jtherbio.2019.102408).

TELES JUNIOR, C. G. S.; GATES, R. S.; OLIVEIRA, J. L. de; TINÔCO, I. F. F.; VILELA, M. O. **Estimativa da temperatura de globo negro a partir da temperatura e umidade relativa do ar**. 2016. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/340385501_ESTIMATIVA_DA_TEMPERATURA_DE_GLOBO_NEGRO_A_PARTIR_DA_TEMPERATURA_E_UMIDADE_RELATIVA_DO_AR. Acesso em: 22 nov. 2022.

THOM, E.C. Cooling degree days. **Air conditioning, heating, and ventilating**, v. 55, p. 65-72, 1958.

YAGLOU, C. P.; MINARD, D. Control of heat casualties at military training centers. **A.M.A. Archives of Industrial Health**, v. 16, n. 4, p. 302-316, Oct. 1957.

ZADEH, L. A. Fuzzy sets. **Information and Control**, v. 8, n. 3, p. 338-353, June 1965. DOI: [10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X).

Embrapa

Agricultura Digital

MINISTÉRIO DA
AGRICULTURA, PECUÁRIA
E ABASTECIMENTO



CGPE 017893