

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE MEDICINA VETERINÁRIA**

Bárbara Carolina Gomes Ribeiro

**Zoneamento bioclimático para bovinos leiteiros no Estado
de Minas Gerais**

**Uberlândia – MG
2020**

Bárbara Carolina Gomes Ribeiro

**Zoneamento bioclimático para bovinos leiteiros no Estado
de Minas Gerais**

Monografia apresentada a coordenação do curso de graduação em Zootecnia da Universidade Federal de Uberlândia, como requisito parcial a obtenção do título de Zootecnista.

Orientadora: Profa. Dra. Mara Regina Bueno de Mattos Nascimento

**Uberlândia – MG
2020**

Bárbara Carolina Gomes Ribeiro

**Zoneamento bioclimático para bovinos leiteiros no Estado
de Minas Gerais**

Monografia aprovada como requisito parcial a
obtenção do título de Zootecnista no curso de
graduação em Zootecnia da Universidade
Federal de Uberlândia.

APROVADA EM 22/12/2020

Prof^ª. Dr^ª. Mara Regina Bueno de Mattos Nascimento, UFU/MG

Dr^ª. Giovanna Faria de Moraes

Prof. Dr. Ednaldo Carvalho Guimarães, UFU/MG

**Uberlândia – MG
2020**

*“Embora ninguém possa voltar atrás e
fazer um novo começo, qualquer pode
começar agora e fazer um novo fim.”*

Chico Xavier

RESUMO

Pesquisas que buscam métodos e técnicas para determinação de zoneamentos bioclimáticos são desenvolvidas com a finalidade de caracterizar as condições de conforto térmico dos animais e simultaneamente buscar propiciar a melhor ambiência para aumentar a expressão do potencial produtivo destes. Neste sentido, o objetivo neste estudo foi realizar o zoneamento bioclimático para bovinos leiteiros no Estado de Minas Gerais, Brasil. Foram utilizados dados meteorológicos diários dos últimos 10 anos (2010 – 2019), de 79 estações meteorológicas, sendo 54 presentes dentro do Estado de Minas Gerais e 25 distribuídas no entorno do Estado. As variáveis temperatura máxima diária, umidade relativa média e velocidade do vento média foram utilizadas para o cálculo do Índice de Temperatura Equivalente (ITE). Com os valores deste índice e da temperatura média diária, realizou-se as interpolações pela técnica de krigagem universal utilizando o *software* R. Os resultados encontrados mostram que as maiores temperaturas médias foram observadas no mês de outubro (27 a 28 °C), enquanto as menores foram observadas principalmente no mês de junho (valores menores que 23 °C). O ITE apresentou maior intensidade para o mês de março, com regiões classificadas em perigo ($38 < \text{ITE} \leq 44$) para conforto térmico, e menor intensidade para o mês de julho, com maior área do Estado com classificação de cautela ($27 < \text{ITE} \leq 32$), seguida de áreas com ausência de estresse térmico ($18 < \text{ITE} \leq 27$). Nestes aspectos, observou-se a ocorrência de variabilidade espacial das condições de ambiência animal ao longo de todos os meses do ano com necessidade de tomada de decisão quanto ao manejo em situações indicativas de estresse térmico. O zoneamento bioclimático pelo ITE ao caracterizar as condições adversas ao conforto térmico animal, mostra-se uma ferramenta auxiliar a produtores de leite, uma vez que indica as áreas de necessidade de manejos que proporcionem melhores condições de ambiência aos bovinos aumentando, conseqüentemente, os índices produtivos e reprodutivos dos animais.

Palavras-chave: Ambiência, conforto térmico, estresse térmico, geoestatística, índice de temperatura equivalente.

ABSTRACT

Research that seeks methods and techniques for determining bioclimatic zoning has been developed in order to characterize the conditions of thermal comfort of animals and simultaneously seek to provide the best ambience to increase the expression of their productive potential. In this sense, the objective of this study was to carry out bioclimatic zoning for dairy cattle in the State of Minas Gerais, Brazil. Daily meteorological data from the last 10 years (2010 - 2019) from 79 meteorological stations were used, with 54 present within the State of Minas Gerais and 25 distributed around the State. The variables maximum daily temperature, average relative humidity and average wind speed were used to calculate the Equivalent Temperature Index (ITE). With the values of this index and the average daily temperature, interpolations were performed using the universal kriging technique using the software R. The results found show that the highest average temperatures were observed in the month of October (27 to 28 °C), while the Minors were observed mainly in the month of June (values below 23 °C). The ITE showed the highest intensity for the month of March, with regions classified as endangered ($38 < \text{ITE} \leq 44$) for thermal comfort, and the lowest intensity for the month of July, with the largest area of the State with a caution classification ($27 < \text{ITE} \leq 32$), followed by areas with no thermal stress ($18 < \text{ITE} \leq 27$). In these aspects, it was observed the occurrence of spatial variability in the conditions of animal ambience throughout all months of the year with the need to make a decision regarding management in situations indicative of thermal stress. Bioclimatic zoning by the ITE, when characterizing adverse conditions for animal thermal comfort, is an auxiliary tool for milk producers, since it indicates the areas in need of management that provide better environment conditions for cattle, consequently increasing the indexes productive and reproductive animals.

Key-words: Ambience, thermal comfort, thermal stress, geostatistics, equivalent temperature index.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Variações de temperatura ambiente para zona de termoneutralidade, temperaturas críticas superiores e inferiores para diferentes grupos genéticos de bovinos.**Erro! Indicador não definido.**

Tabela 2 - Estações meteorológicas automáticas.....24

Tabela 3 - Parâmetros das equações de regressão para temperatura média (T_a) e ITE, e coeficiente de determinação ajustado ao longo dos meses.....28

Tabela 4 - Resultados das validações cruzadas para os modelos de interpolação de temperatura média (T_a) e ITE ao longo dos meses.....30

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Parâmetros do semivariograma.	20
Figura 2 - Representação dos modelos transitivos normalizados.....	21
Figura 3 - Distribuição geográfica das estações meteorológicas utilizadas no estudo.....	25
Figura 4 - Classificação climática de Köppen para Minas Gerais (1981-2010).....	26
Figura 5 - Distribuição espacial da temperatura média (Ta) para os meses de janeiro a abril.	31
Figura 6 - Distribuição espacial da temperatura média (Ta) para os meses de maio a agosto.	32
Figura 7 - Distribuição espacial da temperatura média (Ta) para os meses de setembro a dezembro.	32
Figura 8 – Zoneamento bioclimático através do ITE para os meses de janeiro a abril.....	34
Figura 9 - Zoneamento bioclimático através do ITE para os meses de maio a agosto.....	35
Figura 10 - Zoneamento bioclimático através do ITE para os meses de setembro a dezembro.	35

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	REFERENCIAL TEÓRICO	12
2.1	ASPECTOS DA AMBIÊNCIA NA BOVINOCULTURA LEITEIRA.....	12
2.1.1	Importância das variáveis meteorológicas na bovinocultura leiteira.....	12
2.1.2	Conforto térmico para bovinos de leite	13
2.2	ÍNDICE DE CONFORTO TÉRMICO E ZONEAMENTO BIOCLIMÁTICO..	14
2.2.1	Índice de Temperatura Equivalente (ITE)	15
2.2.2	Zoneamento Bioclimático.....	16
2.3	MÉTODO DE ANÁLISE ESPACIAL DE DADOS	17
2.3.1	Krigagem	Erro! Indicador não definido.
	2.3.1.1. Krigagem Universal.....	21
3	METODOLOGIA.....	23
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
5	CONCLUSÃO.....	36
	REFERÊNCIAS	37

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas o conforto térmico animal deixou de ser um problema secundário e tornou-se fator preocupante nos sistemas produtivos, uma vez que esse influencia os resultados produtivos, reprodutivos e nas respostas fisiológicas do animal. Na busca de maior produtividade, estudos sobre a variação dos atributos ambientais ao longo do território nacional tornam-se importantes aliados. Assim, buscando quantificar o estresse térmico em animais de produção, o desenvolvimento e estudos de índices de estresse térmico ganham espaço na biometeorologia zootécnica. Angelo (2013) ressalta que a escolha desses índices está diretamente relacionada com as condições ambientais, com a atividade que o animal desenvolve e com a importância de tais aspectos. Neste sentido, os índices que melhor correlacionam as respostas fisiológicas com as variáveis meteorológicas podem ser utilizados para determinação de zoneamentos bioclimáticos (AMARO, 2016; TAVARES et al., 2016).

O uso de zoneamento bioclimático para avaliação de regiões de conforto ou desconforto térmico propiciam a obtenção de informações que auxiliam na tomada de decisão em relação à atividade leiteira, isto é, decisão quanto ao manejo ambiental, para minimizar o estresse pelo calor (MENDES et al., 2014). Neste sentido, para gerar o zoneamento bioclimático com base na variabilidade espacial e temporal de uma localidade, é necessário obter o conhecimento sobre os mecanismos disponíveis para realizar o processo, tal como a geoestatística que considera o comportamento espacial das variáveis (DALL'AGNOL; BETZEK; BAZZI, 2018; AMARO, 2016).

Assim, o estudo justifica-se por apresentar contribuições para a biometeorologia e ambiência animal, especificamente, aos estudos de zoneamento bioclimático para caracterização do conforto térmico. Isso está ligado ao fato de existir variabilidade espacial de atributos meteorológicos devido à grande extensão territorial e correlações com as respostas fisiológicas dos animais, o que torna de fundamental importância a observação de ocorrências de estresse térmico para o correto manejo de contorno da situação.

Com base nas perspectivas expostas acima, no presente estudo objetivou-se avaliar a espacialização da variável meteorológica de temperatura média, bem como propor o zoneamento bioclimático para bovinos leiteiros no Estado de Minas Gerais,

visando ilustrar as condições de estresse térmico, fazendo o uso de análises estatísticas e geoestatísticas, séries históricas de estações meteorológicas automáticas e softwares computacionais. Como objetivos específicos do estudo, descreve-se: 1) avaliação dos dados levantados e aplicação do método de interpolação geoestatística para estimação da espacialização da variável temperatura média e do índice ITE; 2) avaliação estatística do método geoestatístico de predição das variáveis; 3) confecção dos mapas representando a espacialização da variável meteorológica e do zoneamento bioclimático, através do índice de temperatura equivalente, para bovinos leiteiros no Estado de Minas Gerais.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Para a descrição do referencial teórico fez-se necessário o levantamento bibliográfico de informações, estudos e dados norteadores que caracterizam a temática e reforçam a importância do estudo, sendo descritos a seguir.

2.1 ASPECTOS DA AMBIÊNCIA NA BOVINOCULTURA LEITEIRA

O ambiente animal pode ser definido, conforme Baêta e Souza (2010), como o somatório de todos os fatores, diretos e indiretos, que afetam os animais. A caracterização do ambiente térmico é importante para se buscar o conforto térmico animal, melhorando as suas condições de produção. Vários estudos descrevendo a ambiência, conforto térmico e produtividade animal, são encontrados dentro da biometeorologia zootécnica, como os apresentados pelos renomados autores Nääs (1989), Silva (2000) e Baêta e Souza (2010). Devido ao grande volume de pesquisas desenvolvidas que evidenciam a relação entre a ambiência e a produtividade animal, torna-se claro a importância da avaliação das condições ambientes para alcance de uma maior produção animal (AMARO, 2016; TAVARES et al., 2016).

2.1.1 Importância das variáveis meteorológicas na bovinocultura leiteira

Bovinos leiteiros são animais homeotérmicos, ou seja, que mantêm a temperatura corporal dentro de certos limites relativamente estreitos. O estresse térmico em bovinos ocorre quando o somatório de ações externas que agem sobre o animal altera a sua temperatura corporal, gerando tensões fisiológicas, metabólicas, celulares e moleculares (FERREIRA et al., 2017).

O clima está relacionado aos ajustes adaptativos dos animais às condições ambientais em que se encontram expostos. Mendes et al. (2014) descrevem que a temperatura do ar, bem como a umidade relativa, a velocidade do vento e a radiação solar, são algumas das principais variáveis meteorológicas responsáveis pela alteração da temperatura corporal do animal.

A temperatura do ar, que é influenciada por diferentes fatores como altitude, latitude, massa de ar, entre outros aspectos, ao se elevar acima da zona de termoneutralidade, interfere na troca de calor entre o animal e o ambiente. A umidade relativa, razão entre a pressão de vapor saturado da água na temperatura do ponto de orvalho pela pressão de vapor saturado da água na temperatura ambiente (SILVEIRA, 2014), está relacionada a termorregulação animal através de mecanismos evaporativos para perda de calor. O vento, deslocamento de ar na atmosfera no sentido horizontal, auxilia na maior ou menor possibilidade do animal em perder calor pelo contato de sua pele com o ar (BRETTAS et al., 2017; FERREIRA et al., 2017).

Diversos estudos descrevem percentuais de perda no âmbito da nutrição, produção e reprodução, observados devido a ocorrência de estresse por calor, dadas as ações deletérias das variáveis meteorológicas sobre a produtividade animal. O National Research Council (2001) relata decaimento em até 55% na ingestão de matéria seca em vacas submetidas ao estresse térmico. Estudos de Pinarelli (2003) evidenciam que o estresse térmico pode resultar em uma diminuição de 17% da produção de leite de vacas de 15 kg de leite/dia e de 22% em vacas de 40 kg/dia. Ayres et al. (2014) relatam que vacas leiteiras mestiças apresentaram redução da taxa de prenhez, do inverno para o verão, equivalente a 16,8%.

Nestas perspectivas, evidencia-se que os elementos meteorológicos afetam diretamente na homeotermia animal, visto que em situações de estresse térmico os animais acionam mecanismos termorreguladores para manutenção corporal, o que resulta em gasto energético metabólico que seria utilizado em seu potencial produtivo e reprodutivo (BAÊTA; SOUZA, 2010; TAVARES et al., 2016).

2.1.2 Conforto térmico para bovinos de leite

Uma vez compreendido a influência das variáveis meteorológicas na produtividade animal, torna-se necessário o conhecimento das características de conforto térmico para bovinos leiteiros. O conforto térmico de bovinos de leite a pasto em ambiente tropical é importante para manter a produção de leite e a reprodução adequadas (FERREIRA et al., 2017). Segundo Baêta e Souza (2010), existe uma faixa de temperatura ambiente onde é observado um mínimo consumo de energia para metabolismo basal, isto é, onde o gasto energético é mínimo e a energia líquida para

produção é máxima, denominada Zona de Conforto Térmico (ZCT), onde os animais estão sob conforto térmico e podem expressar seu máximo potencial genético.

Ferreira et al. (2017) apresentaram as variações de temperatura para zona de termoneutralidade (ZT), temperaturas críticas superiores (TCS) e inferiores (TCI). Tratando-se de zebuínos, é descrito faixa de 10 a 32 °C para a ZT, 30 a 35 °C para TCS e 0 °C para TCI (BIANXA, 1965). Para bovino Holandês, têm-se ZT variando de 4° C a 26 °C (HUBER, 1990), enquanto animais europeus observa-se variações de 7 a 21 °C para ZT e 25 a 27 °C para TCS.

Brettas et al. (2017) descrevem sobre autores que encontraram variações nos valores para a zona de termoneutralidade apresentadas por Ferreira et al. (2017). Para temperatura de bovinos zebuínos descreve-se valores entre 7 e 35 °C (SILVA, 2000) e para bovinos europeus entre -1 °C a 21 °C (MIRANDA; FREITAS, 2009); para umidade relativa observa-se valores entre 50% e 70% (ALMEIDA NETO et al., 2014; TAKAHASHI; BILLER; TAKAHASHI, 2009); e para a velocidade do vento entre 1,4 a 2,2 m.s⁻¹ (HAHN, 1985; PEREIRA, 2005).

O desconforto térmico é resultante da ação de altas temperaturas do ar, intensificado em alguns casos pela elevada umidade do ar, alta radiação térmica e baixa velocidade do vento, que pode ter efeitos negativos sobre o animal (TONELLO, 2011). Logo, compreender as faixas ideais que permitam a termorregulação dos animais é fundamental para a produtividade, visto que o sucesso da bovinocultura leiteira é dependente de uma ambiência adequada ao animal. Assim, o uso de índices que mensuram o conforto ou desconforto térmico tornam-se ferramentas de auxílio a tomadas de decisões no manejo de bovinos (TONELLO, 2011).

2.2 ÍNDICE DE ESTRESSE TÉRMICO E ZONEAMENTO BIOCLIMÁTICO

O desenvolvimento e uso de índices para mensuração de estresse por calor são relatados em estudos de biometeorologia e ambiência animal. Autores como Thom (1959), Buffington et al. (1981), Baêta et al. (1987), entre outros, utilizaram-se de atributos meteorológicos como temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento, radiação solar, etc., para formularem equações que indicassem a condição térmica do animal no

ambiente em que se encontra (SILVA; MORAES; GUILHERMINO, 2007). Ferreira et al. (2017) ressaltam que estes índices, onde as variáveis da equação são medidas do ambiente térmico, são chamados de índices de estresse térmico. Segundo Silva e Maia (2013), o ambiente externo, a superfície corporal, a cobertura da superfície corporal e outros fatores (como funções respiratórias e aspectos comportamentais) são os principais fatores associados a troca térmica entre os organismos e o ambiente. Ainda segundo os autores, os índices podem ser divididos em três categorias: a) índices racionais baseados no balanço de energia térmica; b) índices empíricos baseados na avaliação da deformação; c) índices diretos baseados em medições do meio ambiente. Os dois primeiros envolvem o uso de variáveis ambientais e fisiológicas, enquanto o terceiro utiliza apenas as medições do ambiente.

2.2.1 Índice de Temperatura Equivalente (ITE)

O Índice de Temperatura Equivalente (ITE), proposto por Baêta et al. (1987), foi desenvolvido através de análise de conforto térmico de vacas Holandesas em câmara climática. O índice leva em consideração os efeitos da temperatura, umidade relativa e a velocidade do vento para cálculo, resultando na seguinte equação (Equação 1):

$$\begin{aligned}
 ITE = & 27,88 - 0,456T_a + 0,010754T_a^2 - 0,4905U_r + 0,00088U_r^2 \\
 & + 1,1507V - 0,126447V^2 + 0,019876T_aU_r \\
 & - 0,046313T_aV
 \end{aligned}
 \tag{Equação 1}$$

Onde:

T_a → temperatura ambiente, em °C (bulbo seco);

U_r → umidade relativa, em %;

V → velocidade do vento, em $m.s^{-1}$.

Os valores limites para o ITE expressos por Baêta et al. (1987), apud Brettas et al. (2017), para temperaturas entre 15 °C e 41 °C, umidade relativa do ar entre 40% e 90% e velocidade do vento de 0 a 6,5 $m.s^{-1}$, são descritos a seguir:

- Ausência de problemas: 18 a 27;
- Cautela: 27 a 32;

- Cautela extrema: 32 a 38;
- Perigo: 38 a 44;
- Perigo extremo: >44.

Silva, Morais e Guilhermino (2007), ao trabalharem com vacas Holandesas e vacas Jersey em rebanhos comerciais nos Estados do Ceará e Rio Grande do Norte, relatam que os índices ITE e o Índice de Carga Térmica (ICT) apresentaram correlações significantes com as respostas fisiológicas dos animais (correlação de 0,293 e 0,286 com a temperatura retal e correlação de 0,520 e 0,542 com a frequência respiratória, respectivamente), sendo, portanto, considerados os melhores índices para avaliação de estresse térmico entre seis índices avaliados.

Brettas et al. (2017) avaliaram 10 índices de estresse térmico e suas correlações com as respostas fisiológicas em novilhas leiteiras mestiças na cidade de Uberlândia - Minas Gerais. Neste estudo os autores encontraram que o índice ITE apresentou as maiores correlações com as respostas fisiológicas (0,200 com a temperatura retal e 0,317 com a frequência respiratória), seguido pelo Índice de Estresse Térmico para Vacas (IETV) e o Índice de Estresse Ambiental ou Índice de Estresse Térmico (IET), com correlações, respectivamente, de 0,186 e 0,178 com a temperatura retal e 0,314 e 0,289 com a frequência respiratória.

Com base nestas perspectivas, o ITE foi escolhido como índice para aplicação no presente estudo de elaboração de zoneamento bioclimático para bovinos leiteiros, como auxílio à tomada de decisão quanto ao manejo de ambiência com a finalidade de minimizar o estresse por calor.

2.2.2 Zoneamento Bioclimático

Segundo Tonello (2011), os efeitos deletérios na produtividade animal, quando estes encontram-se fora da zona de termoneutralidade, é fato observado em diversos estudos na área da biometeorologia zootécnica, o que reforça a importância de se desenvolver meios de monitoramento às condições de conforto ambiental das quais os animais de produção estão submetidos.

Os componentes climáticos e meteorológicos influenciam no condicionamento das funções fisiológicas envolvidas na manutenção do equilíbrio térmico corporal. Logo

o zoneamento bioclimático, ao realizar a caracterização climática de uma determinada região permitindo visualizar áreas com probabilidade de ocorrência do estresse térmico, torna-se uma ferramenta aliada às atividades pecuárias (TONELO, 2011).

Conforme Amaro (2016), a divisão de zonas bioclimáticas leva em consideração as características climáticas de uma área. No território brasileiro, devido à sua grande extensão, pode existir diferentes zonas bioclimáticas dentro de um mesmo Estado, ou pode existir zonas bioclimáticas que abrangem partes de diferentes Estados. Nesta perspectiva, diversos autores vêm desenvolvendo estudos acerca do zoneamento bioclimático para regiões específicas do Brasil, como o estudo de Oliveira et al. (2017), que apresenta o zoneamento bioclimático para vacas leiteiras no Estado do Rio Grande do Sul; o estudo de Mendes et al. (2014), que apresenta o zoneamento bioclimático para a raça ovina Dorper no Estado de Pernambuco; e o estudo de Turco et al. (2006), que analisaram o zoneamento bioclimático para vacas leiteiras no Estado da Bahia. Tavares et al. (2016), utilizando auxílio de sistemas inteligentes, estudaram o zoneamento bioclimático para bovinos de corte em todo território nacional e encontraram resultados que evidenciaram a existência de zonas bioclimáticas que abrangem partes de diferentes Estados.

Amaro (2016) e Oliveira et al. (2017) citam que o zoneamento bioclimático pode ser obtido pela geoestatística, com base nas considerações de Yamamoto e Landim (2013), em que os métodos geoestatísticos detêm as ferramentas necessárias para compreensão da aleatoriedade dos dados, os quais apresentam uma possível estruturação espacial, possibilitando o georreferenciamento destes em função da correlação espacial.

Neste sentido, a geoestatística foi escolhida como ferramenta para elaboração do zoneamento bioclimático para bovinos leiteiros no Estado de Minas Gerais, pelo georreferenciamento do Estado e mapeamento espacial com base nas variáveis meteorológicas observadas.

2.3 MÉTODO DE ANÁLISE ESPACIAL DE DADOS

O geoprocessamento de dados pontuais por meio da geoestatística possibilita a representação especializada de vários fenômenos de estudo. A utilização de métodos de interpolação espacial em análises de atributos meteorológicos e zoneamentos bioclimáticos, como os realizados por Miranda et al. (2017), Oliveira et al. (2017),

Tonello (2011) e Turco et al. (2006), entre outros autores, evidenciam a utilidade desta ferramenta para estudos climatológicos, meteorológicos e bioclimatológicos, propiciando a possibilidade de estimar valores em locais onde não possui amostras.

A modelagem da variabilidade espacial possibilita gerar superfícies que representem o fenômeno estudado de forma realista. Há três abordagens que tem por objetivo, por meio da interpolação, gerar as superfícies representativas (CAMARGO; FUCKS; CÂMARA, 2001):

- Modelos determinísticos de efeitos locais: não realizam uma pré-hipótese estatística da variabilidade espacial, realizando a estimação da superfície através da interpolação de pontos amostrais mais próximos. Como exemplo destes modelos temos o método do vizinho mais próximo (*Natural Neighbor*) e o inverso da distância ponderada (IDW).
- Modelos determinísticos de efeitos globais: aqui a variabilidade local não é considerada fator importante e sim a variação em larga escala. Como exemplo destes modelos temos a superfície de tendência.
- Modelos estatísticos de efeitos locais e globais: requer que a variabilidade local e global seja modelada através de semivariogramas. Aqui a estimativa é baseada a partir da interpolação das amostras mais próximas. Como exemplo destes modelos temos a krigagem ordinária, krigagem universal e cokrigagem.

A verificação da eficiência dos métodos de interpolação se faz pela técnica de validação cruzada, que consiste na retirada de um ponto amostrado e realização dos cálculos como se o ponto retirado não existisse, seguido pela comparação do valor do ponto retirado com o valor estimado para tal (LUNDGREN; SILVA; LUNDGREN, 2017). Cálculos como a média dos erros (ME), média dos erros absolutos (MAE), raiz do erro quadrático médio (RMSE), variância média extraída (AVE) e coeficiente de determinação (R^2) são empregados na validação cruzada buscando-se o melhor interpolador.

A seguir, é apresentada as etapas e a técnica para interpolação de dados espaciais que será aplicada neste estudo.

2.3.1 Procedimentos para ajuste do semivariograma

Os modelos estatísticos de efeitos locais e globais, como a krigagem, constituem-se na estimativa linear e local, realizada dentro de vizinhanças estacionárias, buscando minimizar, sem viés, o erro de estimação (STURARO, 2015). As seguintes etapas descrevem os passos da krigagem: a) análise exploratória dos dados; b) análise estrutural (modelagem dos variogramas); c) interpolação estatística da superfície (CAMARGO; FUCKS; CÂMARA, 2001).

De acordo com Yamamoto e Landim (2013), embora desejável durante o processo de krigagem, não é obrigatório a simetria dos dados, sendo permitido o uso dos valores sem normalização quando não atendido o pressuposto. Neste sentido, durante a análise exploratória deseja-se que os dados apresentem normalidade, isto é, sejam aprovados pelo teste de normalidade. Na ocorrência de assimetria, recomenda-se realizar a transformação de dados para correção.

O semivariograma é uma ferramenta indispensável para realização da interpolação por krigagem, pois permite representar a variação do fenômeno regionalizado no espaço. A determinação do semivariograma é feita a partir da seguinte equação (CAMARGO; FUCKS; CÂMARA, 2001):

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i + h)]^2 \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

$\hat{\gamma}(h)$ → Semivariograma estimado;

$N(h)$ → Número de pares de pontos separados pela distância h ;

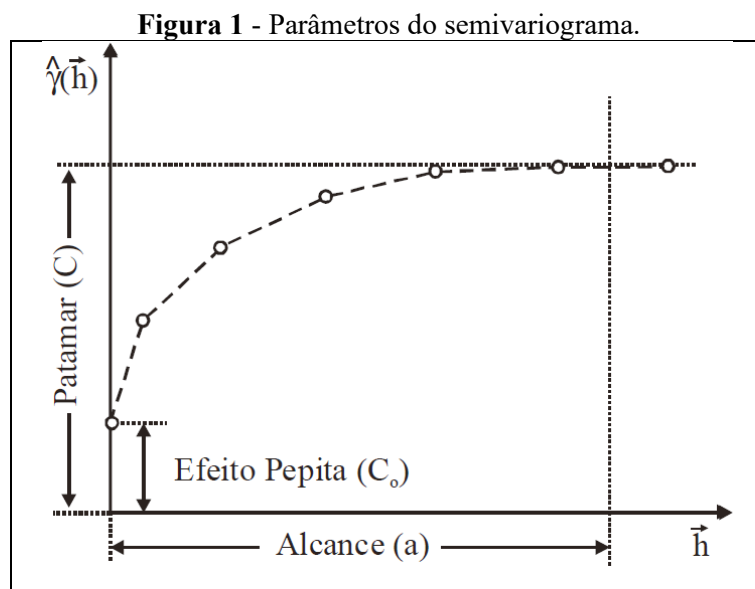
$z(x_i)$ → Valor do atributo no ponto x_i ;

$z(x_i + h)$ → Valor do atributo no ponto distante h do atributo x_i ;

x_i → Local no plano onde foi medido o atributo.

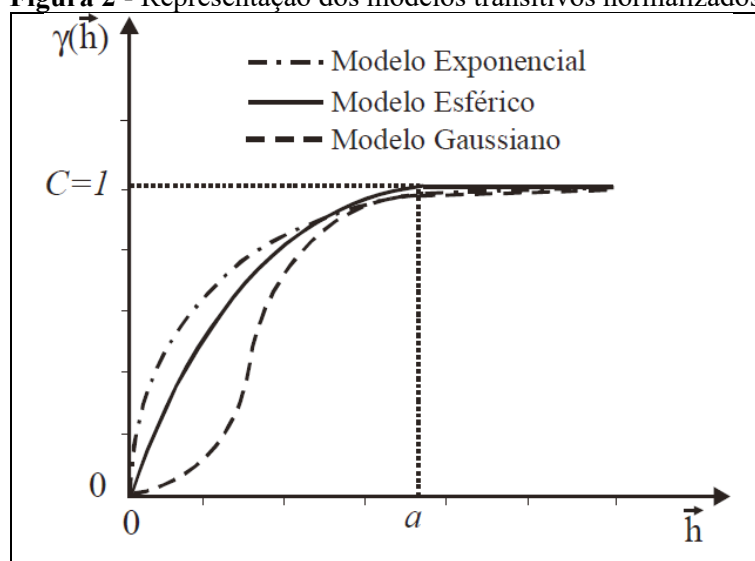
Os parâmetros do semivariograma a serem estimados podem ser observados na Figura 1. O efeito pepita (C_o) representa as microvariações não observadas pela medição ou possíveis erros nos aparelhos de medição. O patamar (C) representa a semivariância

máxima, onde a dependência espacial não mais influencia na amostra. O alcance (a) é a distância onde ainda se encontra a influência da dependência espacial (LUNDGREN; SILVA; LUNDGREN, 2017).



Fonte: Camargo, Fucks e Câmara (2001).

Camargo, Fucks e Câmara (2001) ressaltam a importância de o modelo ajustado representar a tendência de $\hat{\gamma}(h)$ em relação a h , visto que acarreta uma krigagem mais exata, isto é, mais confiável. Vários modelos são descritos na literatura, como nos trabalhos de Camargo, Fucks e Câmara (2001) e Saturaro (2015), entretanto, os modelos mais comumente usados são o exponencial, o gaussiano e o esférico, observados na Figura 2 (LUNDGREN; SILVA; LUNDGREN, 2017). Na Figura 2, onde têm-se o efeito pepita igual a zero, o modelo exponencial $\{\hat{\gamma}(h) = c[1 - e^{-\frac{h}{a}}]\}$ é ajustado por uma curva exponencial, onde o patamar é a assíntota da curva e o alcance é o encontro da tangente da curva na origem do patamar. O modelo gaussiano $\{\hat{\gamma}(h) = c[1 - e^{-\frac{h^2}{a^2}}]\}$ é ajustado por uma curva parabólica próxima à origem, onde o patamar é semelhante ao modelo exponencial e o alcance é extenso. Já o modelo esférico $\{\hat{\gamma}(h) = c\left(\left[\frac{3h}{2a}\right] - \left[\frac{h^3}{2a^3}\right]\right)$, para $h \leq a$; ou $\hat{\gamma}(h) = c$, para $h > a$ }, é o modelo mais comumente utilizado na geostatística, onde o patamar corresponde a variância a priori finita (SATURARO, 2015).

Figura 2 - Representação dos modelos transitivos normalizados.

Fonte: Camargo, Fucks e Câmara (2001).

2.3.2 Krigagem

Após a escolha do modelo, realiza-se a interpolação por krigagem, isto é, interpolação por média móvel ponderada, onde os pesos são determinados pela análise espacial, baseada no semivariograma experimental. A krigagem ordinária é um interpolador exato onde os valores interpolados coincidem com os valores dos pontos amostrais. É considerada um ótimo estimador pelo fato de produzir estimativas com variância mínima e não viciadas. Sua estimação se dá por equação (CAMARGO; FUCKS; CÂMARA, 2001):

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i), \text{ com } \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

$Z^*(x_0)$ → Valor estimado do atributo no local x_0 não amostrado;

n → Número de pontos utilizados na estimação do atributo no ponto x_0 ;

$Z(x_i)$ → Valor do atributo no ponto x_i ;

λ → Peso do atributo.

A krigagem universal é considerada um método similar à krigagem ordinária, onde o ajuste é feito por meio de um polinômio de ordem “ n ” em função das coordenadas

esaciais dos pontos amostrados (CAMPOS, 2018; OLIVEIRA; GREGO; BRANDÃO, 2015). O preditor para krigagem universal é descrito como (FOLLE, 2009):

$$Z(x) = Y(x) + \sum_{i=1}^n a_i f'_i(x) \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

$Y(x)$ → Função aleatória estacionária;

a_i → Coeficientes da função $f'_i(x)$, a priori desconhecidos;

$f'_i(x)$ → Conjunto de funções de base.

3 METODOLOGIA

Inicialmente foram obtidos do banco de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) as médias diárias do período de 2010-2019, de 79 estações meteorológicas automáticas (54 estações no Estado de Minas Gerais e 25 estações distribuídas no contorno do Estado de Minas Gerais), para composição de 24 mapas interpolados da temperatura média (T_a) e do Índice de Temperatura Equivalente (ITE). As estações em locais que circunvizinham o Estado de Minas Gerais foram consideradas a fim de reduzir possíveis erros obtidos pela ausência ou reduzida quantidade de estações meteorológicas nas delimitações do Estado.

O banco de dados considerado contém valores de temperatura média diária (em °C), temperatura máxima diária (em °C), umidade relativa média diária (em %), velocidade do vento média diária (em m.s⁻¹) e coordenadas espaciais (longitude, latitude e altitude) das respectivas estações meteorológicas, sendo também adicionado o ITE pela equação desenvolvida por Baêta et al. (1987).

A temperatura média diária calculada pelo INMET para estações meteorológicas automáticas baseia-se em duas medidas realizadas em padrões horários da Organização Meteorológica Mundial (Tempo Universal Coordenado - UTC) correspondente a 12 UTC e 24 UTC (9 h e 21 h, respectivamente) para a região sudeste do Brasil, sendo descrita a seguir pela Equação 5. O ITE foi calculado por meio da Equação 1 e das variáveis temperatura máxima diária, umidade relativa média e velocidade do vento média, buscando se aproximar ao máximo da situação de estresse térmico do animal.

$$T_{méd} = \frac{T_{9h} + T_{máx} + T_{mín} + 2 * T_{21h}}{5} \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

T_{9h} → Temperatura medida no horário das 9 horas;

$T_{máx}$ → Temperatura máxima medida ao longo do dia;

$T_{mín}$ → Temperatura mínima medida ao longo do dia;

T_{21h} → Temperatura medida no horário das 21 horas.

A Tabela 1 mostra as 79 estações meteorológicas automáticas consideradas e seu respectivo Estado de localização e altitude.

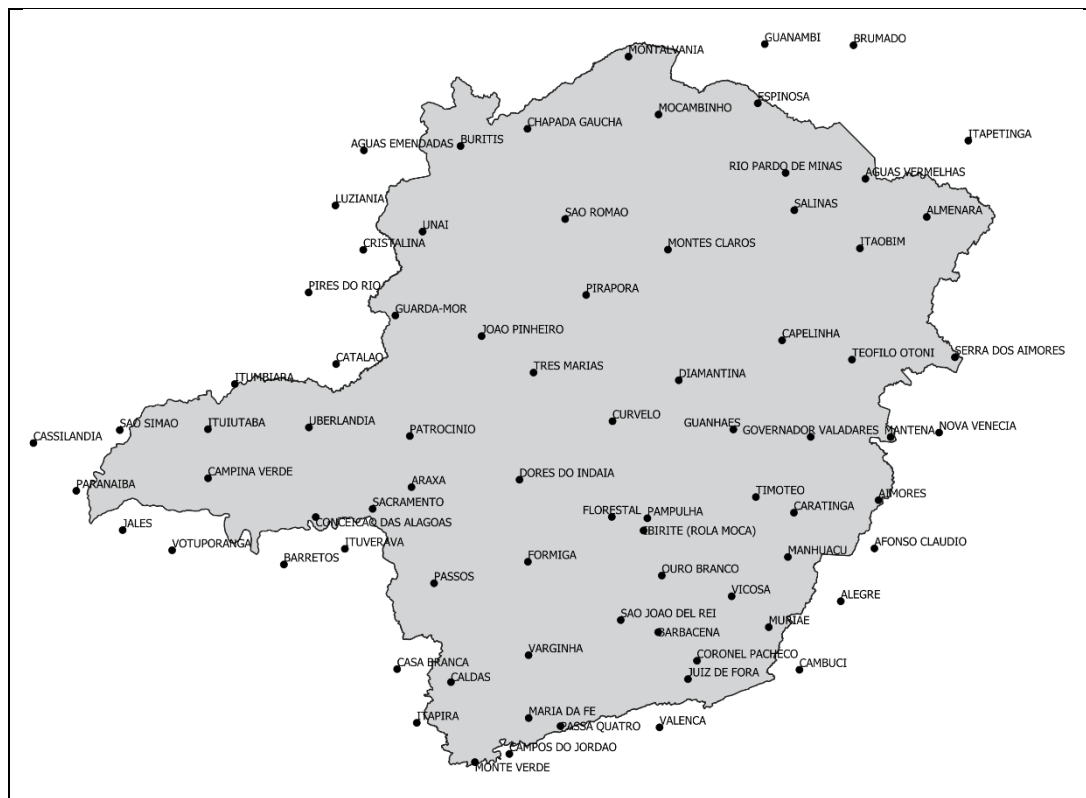
Tabela 1 – Localidade das estações meteorológicas automáticas do Estado de Minas Gerais e de estações meteorológicas automáticas de Unidades Federativas no entorno do Estado de Minas Gerais.

Nº	Estação	UF	Alt. (m)	Nº	Estação	UF	Alt. (m)
1	Afonso Claudio	ES	507,48	41	Ituverava	SP	610.58
2	Águas Emendadas	GO	1030,36	42	Jales	SP	460.44
3	Águas Vermelhas	MG	754,07	43	Joao Pinheiro	MG	877.05
4	Aimorés	MG	287,74	44	Juiz de Fora	MG	936.88
5	Alegre	ES	138	45	Luziânia	GO	1000.82
6	Almenara	MG	189,11	46	Manhuaçu	MG	819.47
7	Araxá	MG	1018,32	47	Mantena	MG	254.91
8	Barbacena	MG	1168	48	Maria da Fé	MG	1281.43
9	Barretos	SP	534,36	49	Mocambinho	MG	454
10	Brumado	BA	473,37	50	Montalvânia	MG	519.52
11	Buritit	MG	894	51	Monte Verde	MG	1544.89
12	Caldas	MG	1077,34	52	Montes Claros	MG	645.87
13	Cambuci	RJ	46	53	Muriaé	MG	282.79
14	Campina Verde	MG	559,07	54	Nova Friburgo	RJ	1070
15	Campos do Jordao	SP	1662,95	55	Nova Venécia	ES	156.02
16	Capelinha	MG	932,06	56	Ouro Branco	MG	1048.2
17	Caratinga	MG	609,25	57	Pampulha	MG	854.02
18	Casa Branca	SP	734,15	58	Paranaíba	MS	408.06
19	Cassilândia	MS	494,72	59	Passa Quatro	MG	1017.1
20	Catalão	GO	900,72	60	Passos	MG	781.7
21	Chapada Gaúcha	MG	873,2	61	Patrocínio	MG	978.11
22	Conceição das Alagoas	MG	572,54	62	Pirapora	MG	505.32
23	Coronel Pacheco	MG	411,14	63	Pires do Rio	GO	757.27
24	Cristalina	GO	1211,08	64	Rio Pardo de Minas	MG	850.06
25	Curvelo	MG	669,48	65	Sacramento	MG	913.12
26	Diamantina	MG	1359,25	66	Salinas	MG	487.14
27	Dores do Indaiá	MG	721,09	67	São Joao Del Rei	MG	929.88
28	Espinosa	MG	565,36	68	São Romão	MG	490.29
29	Florestal	MG	753,5	69	São Simão	GO	492.45
30	Formiga	MG	878,14	70	Serra dos Aimorés	MG	211.97
31	Governador Valadares	MG	198,24	71	Teófilo Otoni	MG	467.17
32	Guanambi	BA	552,23	72	Timóteo	MG	493.42
33	Guanhães	MG	852,68	73	Três Marias	MG	931.01
34	Guarda-Mor	MG	997,01	74	Uberlândia	MG	874.77
35	Ibirité	MG	1198,82	75	Unai	MG	640.85
36	Itaobim	MG	271,63	76	Valença	RJ	370
37	Itapetinga	BA	271,48	77	Varginha	MG	949.78
38	Itapira	SP	634,89	78	Viçosa	MG	697.64
39	Ituiutaba	MG	540,08	79	Votuporanga	SP	510.37
40	Itumbiara	GO	491,17				

Nº: Número de estações. Estação: Localidades das estações meteorológicas. Alt.: Altitude das estações meteorológicas em metros. Fonte: INMET.

A distribuição das estações meteorológicas descritas na Tabela 1, podem ser observadas na Figura 3 a seguir:

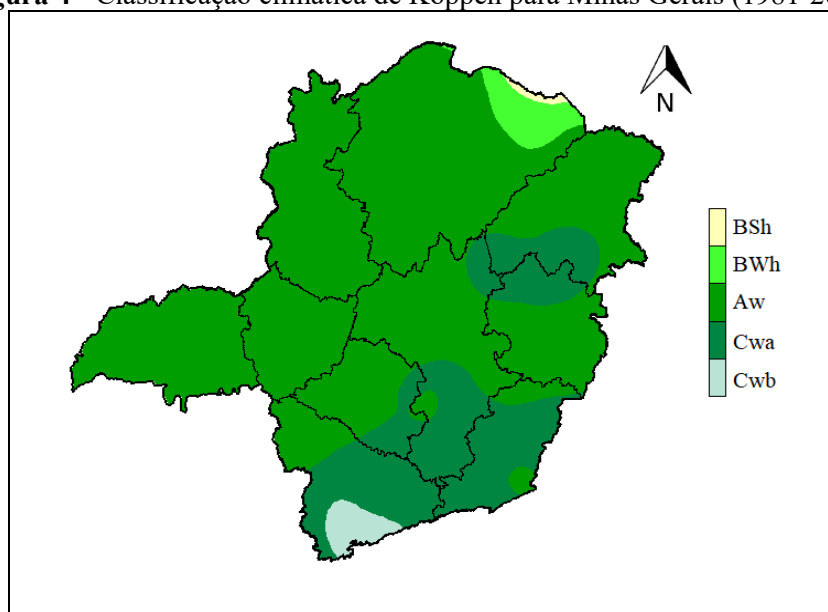
Figura 3 - Distribuição geográfica, através de *software* QGIS, das estações meteorológicas utilizadas no estudo.



Fonte: Autora.

O entendimento da classificação climática do Estado faz-se importante durante a análise dos resultados, onde pode-se observar se há coerência nos resultados obtidos. Segundo o Sistema de Classificação Climática de Köppen, Minas Gerais apresenta cinco climas variados (Figura 4) ao longo de seu território, sendo influenciado pelo tipo de relevo observado. Nas regiões da Mata e Sul do Estado encontra-se o clima Cwa (temperaturas moderadas com verão quente); ainda na região Sul e Serra da Mantiqueira observa-se uma pequena parte de clima Cwb (inverno frio e verão brando); nas regiões Central, Triângulo, Alto Parnaíba, Centro-oeste, Noroeste, Norte, Jequitinhonha e Rio Doce, observa-se o clima Aw (temperaturas elevadas com chuva de verão); por fim, em uma pequena porção do norte do Estado e na divisa com o Estado da Bahia, observam-se os climas Bwh e Bsh, respectivamente, árido e semiárido com temperaturas elevadas (MARTINS et al., 2018).

Figura 4 - Classificação climática de Köppen para Minas Gerais (1981-2010).



Fonte: Martins et al., (2018).

No processamento dos dados, o dataset do INMET foi utilizado como entrada no *software* R para realização da interpolação por meio do método de krigagem universal. O método de krigagem universal foi escolhido para interpolar a temperatura média diária e o índice ITE, uma vez que ambos apresentam tendência observada através do modelo de regressão múltipla. O Modelo Digital de Elevação (MDE), obtido por dados do Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil (TOPODATA) e processado pelo *software* de sistema de informação geográfica QGIS, foi utilizado como grade na krigagem universal, apresentando as três coordenadas espaciais como referência no processo de interpolação. O MDE apresenta 1065 linhas e 1336 colunas, com tamanho do pixel de 900 m.

Nos procedimentos iniciais no processo de interpolação, as variáveis temperatura média, temperatura máxima, umidade relativa média, velocidade do vento média e ITE foram avaliadas quanto a sua normalidade por meio do teste de Shapiro-Wilk, e quanto a sua homogeneidade pelo teste de Bartlett, onde foi observado que todas as variáveis não atendiam o pressuposto de normalidade e algumas não atendiam o pressuposto de homogeneidade. Neste sentido, realizou-se por meio da função “bestNormalize” no pacote bestNormalize do *software* R a normalização das variáveis, onde a função automaticamente escolhe a transformação que apresente a menor estatística de normalidade estimada dentre as existentes em sua função. Neste sentido, para a

normalização das variáveis temperatura média e ITE, a transformação escolhida durante execução do scrip através do programa foi a “orderNorm”.

Após a normalização das variáveis, realizou-se a modelagem do semivariograma através das funções “geoR” e “automap” do *software* R. Os semivariogramas foram ajustados através dos parâmetros de efeito pepita, alcance, patamar e máxima distância, buscando-se o melhor ajuste para obter resultados mais precisos durante a interpolação. Para verificação da eficiência dos modelos de semivariogramas ajustados, utilizou-se a técnica de validação cruzada, sendo calculados os coeficientes de determinação ajustado (R^2 -ajustado) e as raízes dos erros médios quadráticos (RMSE) para cada semivariograma gerado.

No processo de krigagem universal, aplicou-se o modelo de regressão múltipla em função da latitude (metros), longitude (metros) e altitude (metros), por meio do seguinte modelo:

$$R_i = \alpha_0 + \alpha_1x + \alpha_2y + \alpha_3z + e_i \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

R_i → Elementos a serem interpolados: temperatura e ITE;

x → Longitude do local em metros;

y → Latitude do local em metros;

z → Altitude do local em metros;

e_i → Erro.

Ressalta-se que a krigagem universal foi realizada através do pacote “gstat” do *software* R, onde entra-se com a informação do semivariograma adotado e do modelo de regressão múltipla gerado através das variáveis temperatura máxima e ITE, em função da latitude, longitude e altitude. Após feito o cálculo da krigagem universal, as variáveis foram “desnormalizadas” para confecção final dos mapas no *software* QGIS, com as respectivas unidades corretas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os parâmetros das equações de regressão geradas para os meses do ano, utilizadas pelo método de krigagem universal aplicados à temperatura média e ITE, são descritos na **Tabela 2**. Todas as equações de regressão lineares foram significativas ao nível de 5% de probabilidade pelo teste F. Os coeficientes de determinação ajustado (R^2 -ajustado) para a temperatura média variaram de 0,79 a 0,92, enquanto para o ITE variaram de 0,59 à 0,85, o que representa uma classificação forte e fortíssima para ambos os atributos, de acordo com a classificação apresentada por Coutinho et al. (2012).

Tabela 2 - Parâmetros das equações de regressão para temperatura média e ITE, e coeficiente de determinação ajustado para bovinos de leite ao longo do ano no Estado de Minas Gerais.

Temperatura média					
Mês	α_0	α_1	α_2	α_3	R^2 ajustado
Janeiro	$-2,819 \times 10^{-2}$	$-2,965 \times 10^{-7}$	$2,565 \times 10^{-7}$	$-2,507 \times 10^{-3}$	0,8650
Fevereiro	$-1,540 \times 10^{-1}$	$-2,734 \times 10^{-7}$	$2,681 \times 10^{-7}$	$-2,494 \times 10^{-3}$	0,8512
Março	-4,829	$-3,677 \times 10^{-7}$	$8,594 \times 10^{-7}$	$-2,334 \times 10^{-3}$	0,8396
Abril	-8,904	$-4,383 \times 10^{-7}$	$1,370 \times 10^{-6}$	$-2,158 \times 10^{-3}$	0,8505
Maiο	-14,51	$-2,479 \times 10^{-7}$	$2,022 \times 10^{-6}$	$-1,800 \times 10^{-3}$	0,8771
Junho	-14,20	$-3,147 \times 10^{-7}$	$1,990 \times 10^{-6}$	$-1,789 \times 10^{-3}$	0,8526
Julho	-13,85	$-4,640 \times 10^{-7}$	$1,962 \times 10^{-6}$	$-1,719 \times 10^{-3}$	0,7967
Agosto	-14,27	$-1,124 \times 10^{-6}$	$2,098 \times 10^{-6}$	$-1,572 \times 10^{-3}$	0,8074
Setembro	-13,13	$-1,447 \times 10^{-6}$	$2,003 \times 10^{-6}$	$-1,588 \times 10^{-3}$	0,8348
Outubro	-13,02	$-1,329 \times 10^{-6}$	$1,975 \times 10^{-6}$	$-1,638 \times 10^{-3}$	0,8231
Novembro	-8,839	$-9,951 \times 10^{-7}$	$1,439 \times 10^{-7}$	$-2,116 \times 10^{-3}$	0,8491
Dezembro	-3,118	$-7,372 \times 10^{-7}$	$7,118 \times 10^{-7}$	$-2,517 \times 10^{-3}$	0,9213
ITE					
Janeiro	6,728	$-8,649 \times 10^{-7}$	$-5,043 \times 10^{-7}$	$-2,520 \times 10^{-3}$	0,5997
Fevereiro	6,857	$-7,204 \times 10^{-7}$	$-5,012 \times 10^{-7}$	$-2,947 \times 10^{-3}$	0,8512
Março	1,409	$-5,212 \times 10^{-7}$	$1,462 \times 10^{-7}$	$-2,819 \times 10^{-3}$	0,8108
Abril	-2,047	$-6,653 \times 10^{-7}$	$5,939 \times 10^{-7}$	$-2,700 \times 10^{-3}$	0,7895
Maiο	5,340	$-2,789 \times 10^{-6}$	$4,491 \times 10^{-6}$	$-9,550 \times 10^{-3}$	0,8511
Junho	-4,390	$-6,547 \times 10^{-7}$	$8,797 \times 10^{-7}$	$-2,595 \times 10^{-3}$	0,7759
Julho	-1,412	$-5,447 \times 10^{-7}$	$4,949 \times 10^{-7}$	$-2,685 \times 10^{-3}$	0,7697
Agosto	1,069	$-6,022 \times 10^{-7}$	$1,821 \times 10^{-7}$	$-2,607 \times 10^{-3}$	0,6851
Setembro	5,943	$-6,741 \times 10^{-7}$	$-4,195 \times 10^{-7}$	$-2,665 \times 10^{-3}$	0,6780
Outubro	3,969	$-1,488 \times 10^{-6}$	$-4,807 \times 10^{-8}$	$-2,715 \times 10^{-3}$	0,7600
Novembro	-0,9216	$-1,548 \times 10^{-6}$	$5,836 \times 10^{-7}$	$-2,759 \times 10^{-3}$	0,8505
Dezembro	6,463	$-1,149 \times 10^{-6}$	$-3,957 \times 10^{-7}$	$-2,907 \times 10^{-3}$	0,8229

Legenda: α_0 intercepto da equação de regressão; α_1 , α_2 e α_3 são coeficientes da equação de regressão múltipla acompanhados de longitude, latitude e altitude, respectivamente; R^2 -ajustado é o coeficiente de determinação ajustado. Fonte: Autora.

Os valores dos parâmetros de ajuste do semivariograma são descritos na **Tabela 3**. Os parâmetros foram ajustados de modo a melhor representar o ajuste e seleção dos modelos da função de semivariograma. Os resultados das validações cruzadas obtidas nas avaliações dos ajustes são apresentados na Tabela 4. A raiz do erro quadrático médio (RMSE) e o coeficiente de determinação ajustado, que variaram de: 0,27 a 0,47 para o RMSE da temperatura média; 0,39 a 1,45 para o RMSE do ITE; 0,83 a 0,92 para o coeficiente de determinação ajustado da temperatura média; e 0,51 a 0,83 para o coeficiente de determinação ajustado do ITE; indicam que o método de krigagem universal apresentou boa espacialização das variáveis em estudo.

Tabela 3 - Resultados dos ajustes de parâmetros para modelagem dos semivariogramas para temperatura média (T_a) e ITE ao longo dos meses para o Estado de Minas Gerais.

Variável	Mês	RMSE	R ²	Função	Patamar	Alcance	Efeito Pepita	Máx. Distância
Temperatura média	Janeiro	0,3785	0,8552	Gaussiano	0,52	195801,41	0,59	1223758,78
	Fevereiro	0,3849	0,8503	Cúbico	0,61	1174808,43	0,62	979007,03
	Março	0,4089	0,8310	Gaussiano	0,72	603721,00	0,62	1248234,11
	Abril	0,3998	0,8384	Gaussiano	1,09	587404,22	0,41	1272709,14
	Maio	0,3612	0,8681	Gaussiano	1,50	685304,92	0,31	1492985,72
	Junho	0,3974	0,8404	Gaussiano	1,28	603721,00	0,33	1419560,19
	Julho	0,4740	0,7722	Gaussiano	1,29	603721,15	0,35	1346134,66
	Agosto	0,4643	0,7821	Gaussiano	1,43	685304,92	0,33	1370609,84
	Setembro	0,4054	0,8341	Gaussiano	1,18	587404,30	0,35	1492985,72
	Outubro	0,3821	0,8525	Gaussiano	1,32	603721,00	0,32	1566411,24
	Novembro	0,4001	0,8382	Gaussiano	1,01	538453,86	0,39	1223758,78
	Dezembro	0,2773	0,9223	Gaussiano	0,63	538453,86	0,60	1174808,43
ITE	Janeiro	0,6803	0,5296	Cúbico	0,21	473475,94	0,83	710213,91
	Fevereiro	0,3945	0,8424	Cúbico	0,43	642574,49	0,67	862402,61
	Março	0,4527	0,7917	Cúbico	0,52	648677,40	0,62	830307,07
	Abril	0,4747	0,7710	Cúbico	0,61	777853,33	0,53	879312,46
	Maio	1,4537	0,8407	Cúbico	9,65	980771,68	7,43	879312,46
	Junho	0,4867	0,7601	Esférico	0,71	676394,51	0,46	896222,32
	Julho	0,4926	0,7542	Cúbico	0,50	676394,42	0,60	896222,32

Agosto	0,5758	0,6630	Cúbico	0,49	777853,33	0,68	879312,46
Setembro	0,5822	0,6555	Cúbico	0,29	1217509,43	0,83	896222,32
Outubro	0,5130	0,7325	Cúbico	0,78	1217509,56	0,61	1251329,27
Novembro	0,3976	0,8398	Cúbico	0,56	879312,46	0,62	879312,46
Dezembro	0,4332	0,8092	Cúbico	0,40	744033,62	0,71	896222,32

Legenda: α_0 intercepto da equação de regressão; α_1 , α_2 e α_3 são coeficientes da equação de regressão múltipla acompanhados de longitude, latitude e altitude, respectivamente; R^2 -ajustado é o coeficiente de determinação ajustado; RMSE é a raiz do erro quadrático médio. Fonte: Autora.

Tabela 4 - Resultados das validações cruzadas para os modelos de interpolação de temperatura média (T_a) e ITE ao longo dos meses para o Estado de Minas Gerais.

Variável	Mês	R^2	R^2 ajustado	RMSE
Temperatura média	Janeiro	0,8552	0,8494	0,3785
	Fevereiro	0,8503	0,8443	0,3849
	Março	0,8310	0,8242	0,4089
	Abril	0,8384	0,8319	0,3998
	Mai	0,8681	0,8628	0,3612
	Junho	0,8404	0,8340	0,3974
	Julho	0,7722	0,7631	0,4740
	Agosto	0,7821	0,7734	0,4643
	Setembro	0,8341	0,8275	0,4054
	Outubro	0,8525	0,8466	0,3821
	Novembro	0,8382	0,8317	0,4001
	Dezembro	0,9223	0,9192	0,2773
ITE	Janeiro	0,5296	0,5108	0,6803
	Fevereiro	0,8424	0,8361	0,3945
	Março	0,7917	0,7834	0,4527
	Abril	0,7710	0,7618	0,4747
	Mai	0,8407	0,8343	1,4537
	Junho	0,7601	0,7505	0,4867
	Julho	0,7542	0,7444	0,4926
	Agosto	0,6630	0,6495	0,5758
	Setembro	0,6555	0,6417	0,5822
	Outubro	0,7425	0,7322	0,5042
	Novembro	0,8398	0,8334	0,3976
	Dezembro	0,8092	0,8016	0,4332

Legenda: R^2 é o coeficiente de determinação; R^2 -ajustado é o coeficiente de determinação ajustado; RMSE é a raiz do erro quadrático médio. Fonte: Autora.

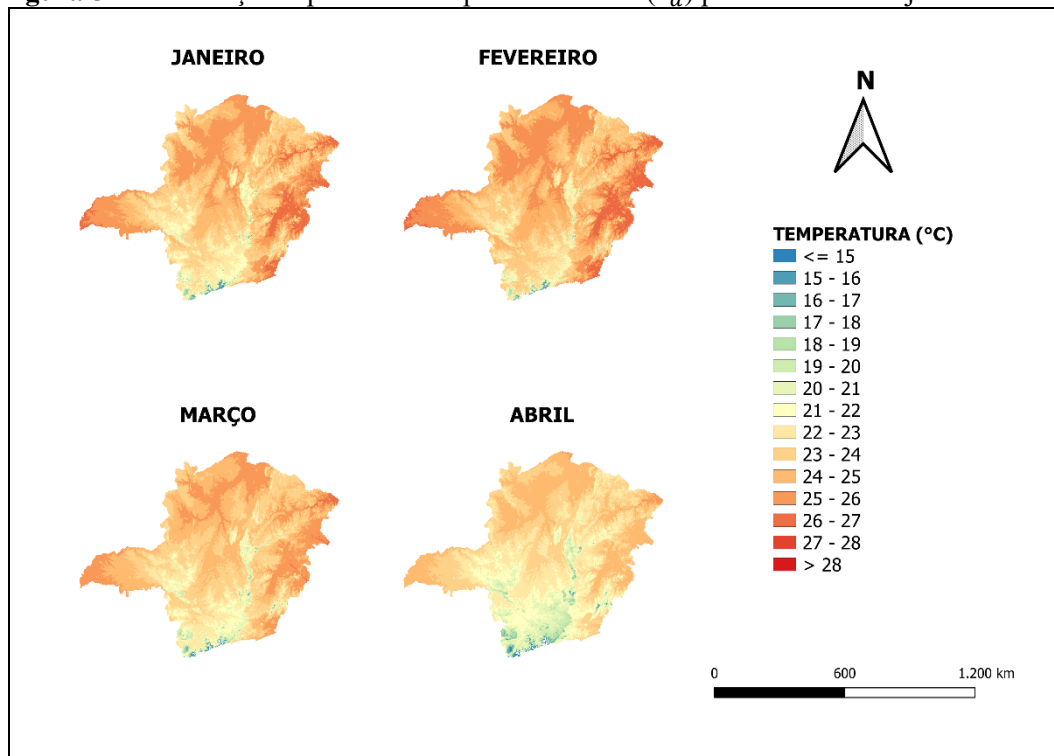
Os mapas representativos da interpolação da temperatura média são apresentados nas Figuras 5 a 7 abaixo. Para os meses de janeiro e fevereiro as temperaturas apresentaram valores abaixo de 15 °C na região sul, em proximidade das cidades de Monte Verde, Maria da Fé e Passa Quatro, enquanto a maior parte do Estado apresentou

temperaturas variando entre 22 a 26 °C. Algumas porções variando de 26 a 27 °C são observadas nas regiões do Jequitinhonha, Vale do Mucuri e Vale do Rio Doce. A região norte do Estado, apresentou temperaturas no intervalo de 25 a 26 °C. Ressalta-se que no mês de fevereiro observou-se maiores temperaturas se comparado ao mês de janeiro.

Nos meses de março, abril e maio observa-se a tendência de amenização das temperaturas até o mês de junho, mês em que se verificou as menores temperaturas do ano, com faixas abaixo de 15 °C na região sul do Estado e temperaturas de até 22 °C na maior parte do Estado. Na região norte e Jequitinhonha observou-se as maiores temperaturas para o mês, com valores entre 23 a 24 °C.

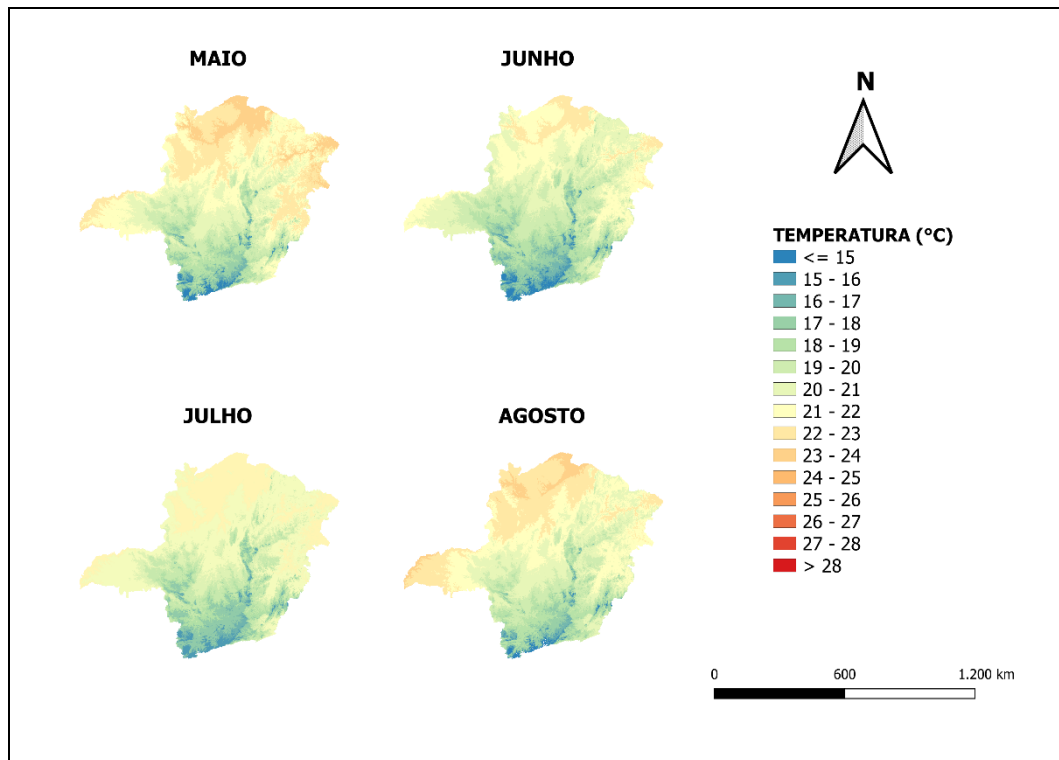
A partir do mês de julho é observado um aumento das temperaturas no Estado, com maiores variações de intensidade para a região norte. As maiores faixas de temperatura durante todo o ano foram observadas no mês de outubro, onde uma porção do norte do Estado apresentou regiões com temperaturas entre 27 e 28 °C, enquanto as regiões oestes do Triângulo Mineiro, noroeste do Estado e parte da região norte apresentaram temperaturas entre 26 e 27 °C. Os meses de novembro e dezembro são caracterizados pela redução de intensidade para as temperaturas em relação ao mês de outubro, mas com tendência de aumento para o mês de janeiro.

Figura 5 - Distribuição espacial da temperatura média (T_a) para os meses de janeiro a abril.



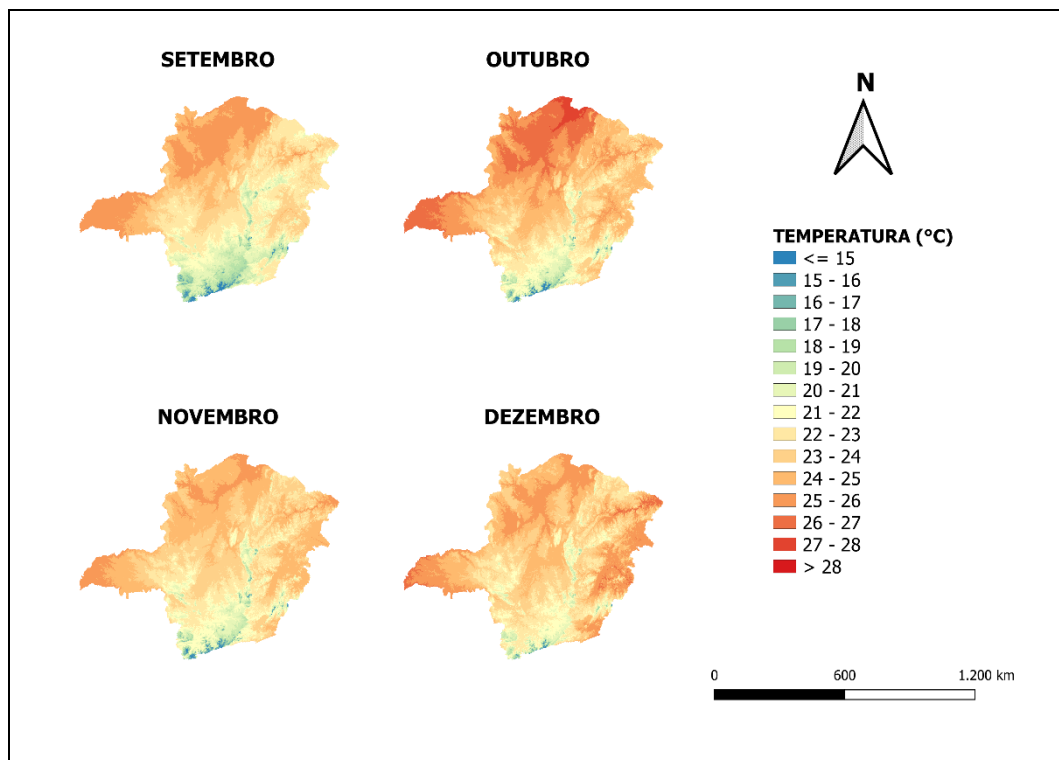
Fonte: Autora.

Figura 6 - Distribuição espacial da temperatura média (T_a) para os meses de maio a agosto.



Fonte: Autora.

Figura 7 - Distribuição espacial da temperatura média (T_a) para os meses de setembro a dezembro.



Fonte: Autora.

Os resultados observados na distribuição espacial da temperatura média ao longo do ano corroboram com os encontrados por Reboita et al. (2015), que apontaram maiores temperaturas para o Estado de Minas Gerais na estação de primavera, com amenização sequente nas estações do verão, outono e inverno.

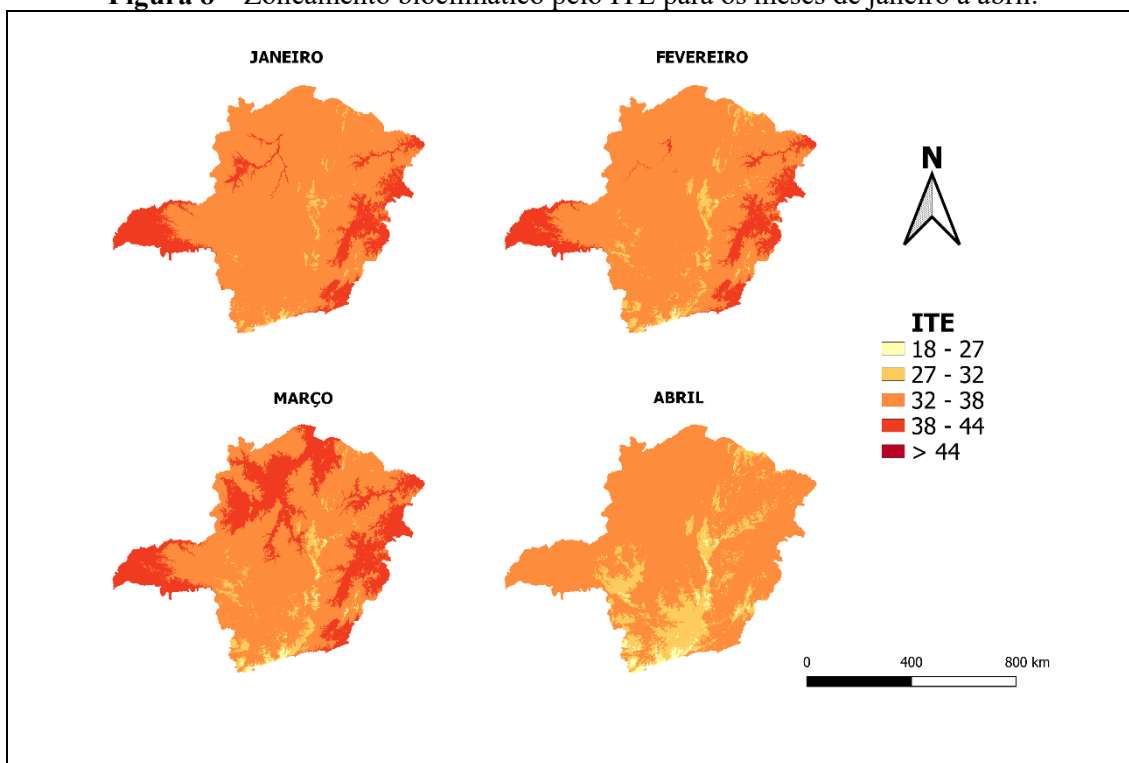
Os valores encontrados, quando comparados com a faixa ideal de termorregulação para bovinos europeus apresentados por Miranda e Freitas (2009), mostram que na maior parte do ano estes animais encontram-se fora da faixa de conforto, isto é, acionam seus mecanismos e termorregulação. Já quando comparado os valores encontrados com a faixa ideal para termorregulação de bovinos zebuínos apresentada por Silva (2000), observa-se que estes animais estão em condições de ambiência adequada, isto é, estão na faixa de conforto.

De modo geral, a temperatura é o principal atributo meteorológico a ser considerado dentro dos sistemas de produção. Elevadas temperaturas em conjunto com elevadas umidades relativas trazem prejuízos produtivos, reprodutivos e, conseqüentemente, econômicos (TONELLO, 2011).

O zoneamento bioclimático gerado na interpolação do ITE ao longo do ano está apresentado nas Figuras 8 a 10. Para o mês de janeiro observa-se predominantemente classificação de cautela extrema ($32 < \text{ITE} \leq 38$) para o Estado. Na região oeste do Triângulo Mineiro e pequenas faixas das regiões do Vale do Jequitinhonha, Vale do Mucuri, Vale do Rio Doce, Zona da Mata e noroeste do Estado apresentaram classificação no índice ITE de perigo ($38 < \text{ITE} \leq 44$).

Em fevereiro observa-se para o ITE característica semelhante ao mês de janeiro, com leve redução de áreas classificadas com ITE em perigo, enquanto para o mês de março foi observado aumento da área classificada como perigo. Pequenas porções de classificação de cautela ($27 < \text{ITE} \leq 32$) para os respectivos meses foram observadas.

Figura 8 – Zoneamento bioclimático pelo ITE para os meses de janeiro a abril.

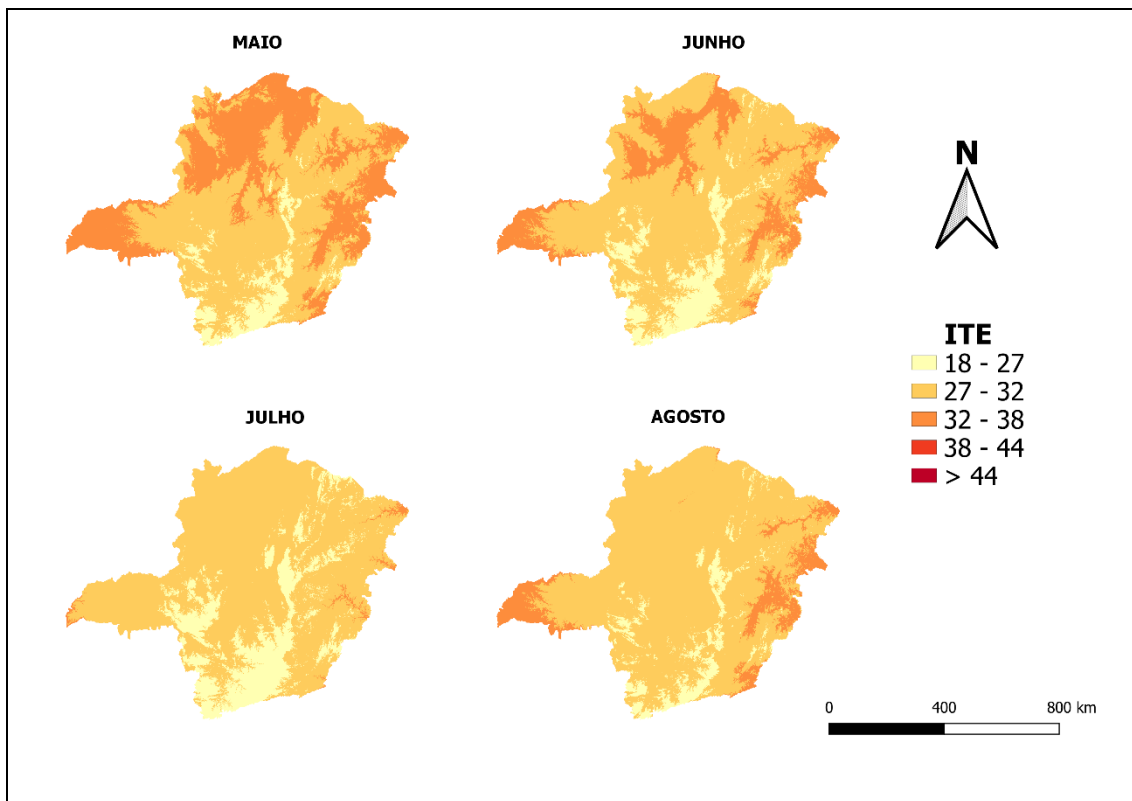


Fonte: Autora.

Os meses seguintes: abril, maio, junho e julho, apresentaram progressiva redução para o ITE, não sendo observadas condições de classificação de cautela extrema e perigo, como observados nos meses antecedentes. Este fato pode ser devido à redução de temperaturas e passagem do período chuvoso para período seco no Estado. O mês de julho foi o mais ameno para as condições de estresse térmico, embora ainda presente, em maior área do Estado, classificação de cautela. O respectivo mês ainda apresentou as maiores áreas com ausência de problemas ($18 < \text{ITE} \leq 27$) se comparado aos demais meses.

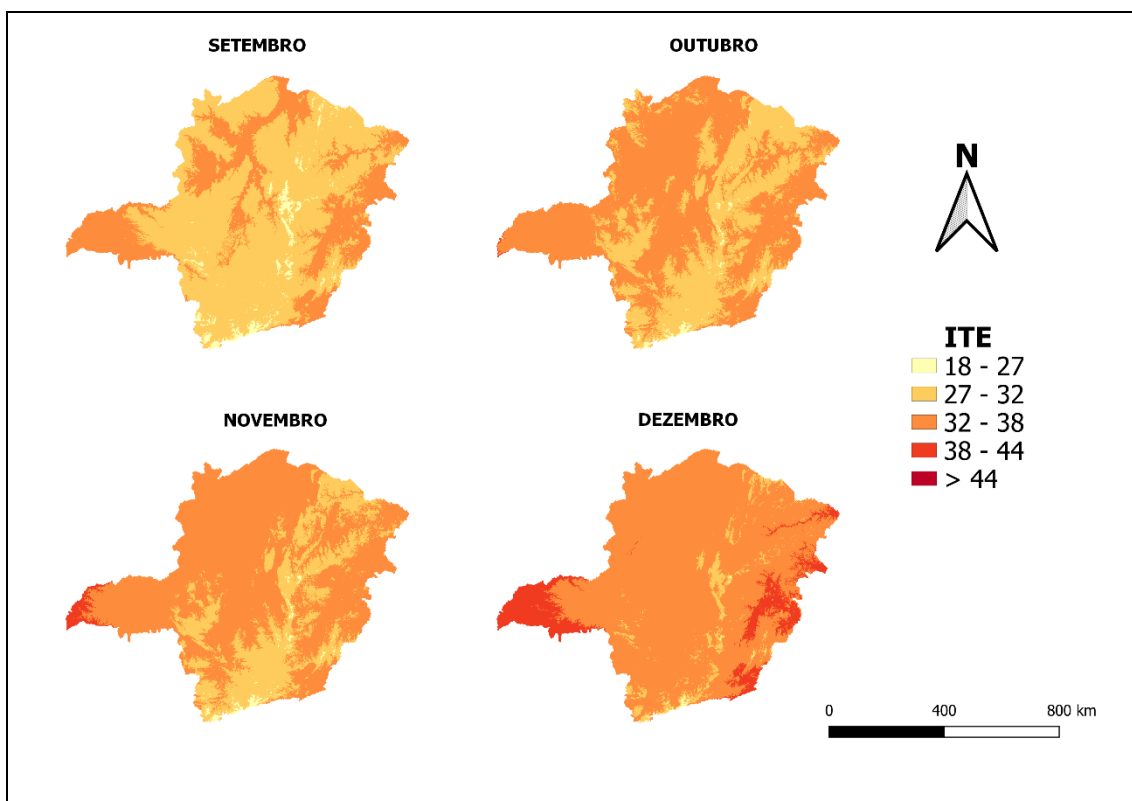
Para os meses de agosto, setembro, outubro, novembro e dezembro, observa-se a tendência de aumento das classificações de cautela extrema (até o mês de outubro) e de perigo (novembro e dezembro). Em nenhum mês do ano foi observado ITE com classificação de perigo extremo (> 44) para o Estado. O mês de março foi o que apresentou condições mais desfavoráveis para o conforto térmico do animal. Pequenas manchas indicativas de ausência de estresse térmico foram observadas nos meses de condições mais adversas, o que pode ser resultado das elevadas altitudes nos locais.

Figura 9 - Zoneamento bioclimático pelo ITE para os meses de maio a agosto.



Fonte: Autora.

Figura 10 - Zoneamento bioclimático pelo ITE para os meses de setembro a dezembro.



Fonte: Autora.

De forma geral, os resultados obtidos para o ITE podem ser explicados pela alta correlação inversa com a altitude e com a moderada a alta correlação direta com a temperatura (menores altitudes, maiores valores de temperatura e, conseqüentemente, maiores valores de ITE).

Além deste aspecto, pode-se concluir que animais zebuínos são mais adaptados às condições climáticas do Estado de Minas Gerais se comparado a animais europeus que demandam condições de manejo mais específicas para propiciar a ambiência adequada. Deste modo, recomendam-se as medidas de manejos descritas por Jimenez Filho (2013):

- Adequação física do ambiente por meio de sistemas de ventilação, aspersão e sombreamento, que reduzem o estresse térmico e aumentam o bem-estar e a produção de leite;
- Uso de raças mais tolerantes ao calor ou animais de cruzamentos industriais que apresentam maior resistência frente a condições adversas;
- Fornecer água de boa qualidade, e;
- Manejo nutricional com dieta “fria”, isto é, dieta que possibilita o fornecimento de nutrientes para a produção de leite com um menor incremento calórico proveniente do metabolismo dos alimentos.

Neste sentido, evidencia-se que no Estado de Minas Gerais há necessidade de manejos para proporcionar maiores condições de conforto térmico aos animais e, conseqüentemente, aumentar a expressão do potencial produtivo dos mesmos.

5 CONCLUSÃO

Em virtude da extensão territorial do Estado de Minas Gerais e dos diferentes climas e altitudes observados, há variabilidade espacial das condições de ambiência animal, o que sugere haver variação das medidas de manejo adotadas frente às condições particulares de cada região. O zoneamento bioclimático pelo ITE mostra-se uma ferramenta importante para produtores de leite, uma vez que pode auxiliar na escolha da genética a ser usada (animais zebuínos são mais adaptados às condições climáticas do Estado de Minas Gerais) e também na tomada de decisão de implementações de manejos que permitam proporcionar melhores condições de conforto térmico e, conseqüentemente, aumento dos índices produtivos e reprodutivos dos animais.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA NETO, L. A.; PANDORFI, H.; ALMEIDA, G. L.; GUISELINI, C. Climatização na pré-ordenha de vacas girolando no inverno do semiárido. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 10, p. 1072-1078, 2014. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v18n10p1072-1078>
- AMARO, A. L. N. **Zoneamento bioclimático do conforto humano para o Estado de Minas Gerais com base no Índice de Temperatura e Umidade**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Lavras, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas e Automação, Lavras, Minas Gerais, 2016.
- ANGELO, M. S. P. **Programa computacional para o cálculo de índices de conforto térmico na produção industrial de animais para carne e leite**. Dissertação (mestrado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Paulista – UNIP, São Paulo – SP, 2013.
- AYRES, G. F.; BORTOLETTO, N.; MELO JUNIOR, M.; HOOPER, H. B.; NASCIMENTO, M. R. B. de M.; SANTOS, R. M. dos. Efeito da estação do ano sobre a taxa de concepção e perda gestacional em vacas leiteiras mestiças. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 30, n. 4, p. 866-872, 2014.
- BAÊTA, F. C.; MEADOR, N. F.; SHANKLIN, M. D.; JHONSON, H. D. Equivalent temperature index at temperatures above the thermoneutral for lactating cows. In: MEETING OF THE AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS, 1987, Baltimore. [**Proceedings...**]. Baltimore: American Society of Agricultural Engineers, 1987. p.21.
- BAÊTA, F. C.; SOUZA, C. F. **Ambiência em edificações rurais: Conforto animal**. 2.ed. Viçosa: EDUFV, 2010. 269 p.
- BRETTAS, P. K. de M.; NASCIMENTO, M. R. B. M.; GUIMARÃES, E. C.; SOUZA, G. P. Melhor índice de estresse térmico para novilhas leiteiras mestiças. **Acta Scientiae Veterinariae**, Porto Alegre, v. 45, p. 1-8, 2017.
- BUFFINGTON, D. E.; COLLASSO-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**, St Joseph, v.24, n.3, p. 711-714. May/June 1981. <https://doi.org/10.13031/2013.34325>
- CAMARGO, E. C. G.; DRUCK, S.; CÂMARA, G. Análise de Superfícies por Geoestatística Linear. In: **Análise Espacial de Dados Geográficos**. 2001. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/analise/cap3-superficies.pdf>. Acesso em: 01 nov. 2020.

CAMPOS, P. M. **Método de seleção de preditores lineares geoestatísticos via abordagem do campo aleatório gaussiano**. Tese (doutorado), Universidade Federal de Lavras, 2018.

COUTINHO, L. S. A. L.; DUARTE, A. A. A. M.; NEVES, R. M.; COUTINHO NETO, B.; MANESCHY, C. E. A.; PINHEIRO, A. M. G. S. Modelagem do tempo de execução de obras civis: estudo de caso na Universidade Federal do Pará. **Ambiente construído**, Porto Alegre, v. 12, n. 1, p. 243-256, mar. 2012.
<https://doi.org/10.1590/S1678-86212012000100016>

DALL'AGNOL, R. W.; BETZEK, N. M.; BAZZI, C. L. Aplicação do software R para análise geoestatística, interpolação de dados por krigagem ordinária e geração de mapas temáticos de produtividade agrícola. **Revista de Computação Aplicada ao Agronegócio**, Medianeira, v. 1, n. 1, p. 24-37, jun. 2018.
<https://dx.doi.org/10.3895/rcaa.v1n1.7356>

FERREIRA, I. C.; MARTINS, C. F.; FONSECA NETO, A. M. da; CUMPA, H. C. B. **Conforto térmico em bovinos leiteiros a pasto**. Embrapa Cerrados – Documentos (INFOTECA-E), 2017.

FOLLE, D. **Análise e aplicações da geoestatística no contexto geológico-geotécnico urbano**. Tese (Doutorado), Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre - RS, 2009.

HAHN, G. L. Management and housing of farm animals in hot environments. In: **Stress physiology in livestock**. Boca Raton: CRC Press, pp.151-174, 1985.

JIMENEZ FILHO, D.L. Estresse calórico em vacas leiteiras: implicações e manejo nutricional. **PUBVET**, Londrina, v. 7, n. 25, ed. 248, art. 1640, suplemento 1, 2013.

LUNDGREN, W. J. C.; SILVA, I. F.; LUNDGREN, G. A. Estimativa pluviométrica através das técnicas da krigagem e cokrigagem no Estado de Sergipe. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 10, n. 03, p. 854-865, 2017.

MARTINS, F. B.; GONZAGA, G.; SANTOS, D. F.; REBOITA, M. S. Classificação climática de Köppen e de Thornthwaite para Minas Gerais: cenário atual e projeções futuras. **Revista Brasileira de Climatologia**, Curitiba, Dossiê Climatologia de Minas Gerais, p. 129-156, nov., 2018. <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v1i0>

MIRANDA, J. E. C.; FREITAS A. F. **Raças e tipos de cruzamentos para produção de leite**. Embrapa Gado de Leite, no 98, 2009. Juiz de Fora, MG, Brasil.

MIRANDA, R. de Q.; FERREIRA, H. S.; MORAIS, Y. C. B.; GALVÍNCIO, J. D.; MOURA, M. S. B. de. Avaliação de dez métodos diferentes de interpolação sobre dados meteorológicos em Petrolina, Pernambuco. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 20; SIMPÓSIO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS E DESERTIFICAÇÃO NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO, 5., [Anais...], 2017, Juazeiro, Bahia.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL - NRC. **Nutrient requirements of dairy cattle**. 7.rev.ed. Washinton, D.C.: 2001. 381p.

NÄÄS, I. A. **Princípios de conforto térmico na produção animal**. São Paulo: Ed. Ícone, 1989. 183 p.

OLIVEIRA, R. P.; GREGO, C. R.; BRANDAO, Z. N. **Geoestatística aplicada na agricultura de precisão utilizando o Vesper**. Embrapa Solos - Livro técnico (INFOTECA-E), 2015.

OLIVEIRA, Z. B.; BOTTEGA, E. L.; KNIES, A. E.; OLIVEIRA, M. B.; SOUZA I. J. Zoneamento bioclimático para vacas leiteiras no Estado do Rio Grande do Sul. **Revista Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 32, n. 3, p. 221-228, julho-setembro, 2017. <https://doi.org/10.17224/EnergAgric.2017v32n3p221-228>

PEREIRA, J. C. C. **Fundamentos de Bioclimatologia Aplicados à Produção Animal**. 1.ed. Belo Horizonte: FEPMVZ, 2005. 195p.

PINARELLI, C. **The effect of heat stress on milk yield**. Latte, Milan 28: 36-38, 2003.

REBOITA, M. S.; RODRIGUES, M.; SILVA, L. F.; ALVES, M. A. Aspectos climáticos do Estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Climatologia**, Curitiba, v. 17, p. 206-226, jul./dez., 2015. <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v17i0.41493>

SILVA, R. G. **Introdução à Bioclimatologia Animal**. São Paulo: Nobel, 2000. 286 p.

SILVA, R. G.; MORAIS, D. A. E. F.; GUILHERMINO, M. M. Evaluation of thermal stress indexes for dairy cows in tropical regions. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 36, n. 4, p. 1192-1198, julho/agosto, 2007. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982007000500028>

SILVA, R. G.; MAIA, A. S. C. **Principles of animal biometeorology**. Springer Science & Business Media, 2013.

SILVEIRA, F. L. (2014) **Umidade relativa: o que é e como se determina?** Centro de Referência para o Ensino de Física. Disponível em: <https://www.if.ufrgs.br/novocref/?contact-pergunta=umidade-relativa-o-que-e-e-como-se-determina>.

STURARO, J. R. (2015) **Apostila de geoestatística básica**. Disponível em: <http://igce.rc.unesp.br/Home/Departamentos47/geologiaaplicada/apostila-basica.pdf>. Acesso em: 01 nov. 2020.

TAKAHASHI, L. S.; BILLER, J. D.; TAKAHASHI, K. M. **Bioclimatologia zootécnica**. 2. ed. Jaboticabal: [s.n.], 2009. 91p.

TAVARES, G. F.; CARNEVSKIS, E. L.; SCHIASSI, R. C. F.; MIRANDA, K. O. S.; MIRANDA, J. H. Zoneamento Bioclimático para Bovinos de Corte no Brasil com o

Auxílio de Sistemas Inteligentes. **Journal of Animal Behaviour and Biometeorology**, Mossoró, v.4, n.4, p.116-123, 2016. <http://dx.doi.org/10.14269/2318-1265/jabb.v4n4p116-123>

THOM E. C. The discomfort index. **Weatherwise**, Washington, v. 12, n. 2, p. 57-61, 1959. <https://doi.org/10.1080/00431672.1959.9926960>

TONELLO, C. L. **Validação de Índice de Conforto Térmico e Zoneamento Bioclimático da Bovinocultura de Leite**. Tese (Doutorado), Centro de Ciências Agrárias, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2011. 140f.

TURCO, S. H. N.; SILVA, T. G. F.; SANTOS, L. F. C.; RIBEIRO, P. H. B.; ARAUJO, G. G. L.; HOLANDA JUNIOR, E. V.; AGUIAR, M. A. Zoneamento bioclimático para vacas leiteiras no Estado da Bahia. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 26, n. 1, p. 20-27, jan./abr. 2006. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162006000100003>

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. **Geoestatística: conceitos e aplicações**. Editora: Oficina de textos, São Paulo - SP, 2013.