



**LUCAS RODRIGUES OLIVEIRA**

**VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DO CONFORTO  
TÉRMICO HUMANO PARA O ESTADO DE MINAS GERAIS,  
BRASIL**

**LAVRAS-MG  
2018**

**LUCAS RODRIGUES OLIVEIRA**

**VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DO CONFORTO TÉRMICO HUMANO  
PARA O ESTADO DE MINAS GERAIS, BRASIL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas e Automação, área de concentração em Engenharia de Sistemas, para a obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Tadayuki Yanagi Junior  
Orientador

Profa. Dra. Sílvia de Nazaré Monteiro Yanagi  
Prof. Dr. Gabriel Araújo e Silva Ferraz  
Coorientadores

**LAVRAS-MG  
2018**

**Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca  
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Oliveira, Lucas Rodrigues.

Variabilidade Espaço-Temporal do Conforto Térmico Humano  
para o Estado de Minas Gerais, Brasil / Lucas Rodrigues Oliveira. -  
2018.

70 p.

Orientador(a): Tadayuki Yanagi Junior.

Coorientador(a): Sílvia de Nazaré Monteiro Yanagi, Gabriel  
Araújo e Silva Ferraz.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de  
Lavras, 2018.

Bibliografia.

1. Conforto térmico humano. 2. Índice de temperatura efetiva em  
função do vento. 3. Zoneamento bioclimatológico para o estado de  
Minas Gerais, Brasil. I. Yanagi Junior, Tadayuki. II. Yanagi, Sílvia  
de Nazaré Monteiro. III. Ferraz, Gabriel Araújo e Silva.

**LUCAS RODRIGUES OLIVEIRA**

**VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DO CONFORTO TÉRMICO HUMANO  
PARA O ESTADO DE MINAS GERAIS, BRASIL**

**SPACE-TEMPORAL VARIABILITY OF HUMAN THERMAL COMFORT FOR THE  
STATE OF MINAS GERAIS, BRAZIL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas e Automação, área de concentração em Engenharia de Sistemas, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 03 de agosto de 2018.

Prof. Dr. Tadayuki Yanagi Junior	UFLA
Profa. Dra. Ilda de Fátima Ferreira Tinôco	UFV
Prof. Dr. Gabriel Araújo e Silva Ferraz	UFLA
Profa. Dra. Priscilla Abreu Pereira Ribeiro	UFLA

Prof. Dr. Tadayuki Yanagi Junior  
Orientador

Profa. Dra. Sílvia de Nazaré Monteiro Yanagi  
Prof. Dr. Gabriel Araújo e Silva Ferraz  
Coorientadores

**LAVRAS-MG  
2018**

*Dedico este Mestrado aos meus pais,  
irmã, avós e namorada pelo incentivo e  
apoio em todas minhas decisões e escolhas.*

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus e Nossa Senhora Aparecida por sempre me concederem sabedoria nas escolhas dos melhores caminhos e por me darem permissão para realização desta dissertação.

À Universidade Federal de Lavras, sobretudo ao Departamento de Pós-Graduação em Engenharia de Software e Automação pela oportunidade.

À CAPES pela concessão da bolsa de estudos. A FAPEMIG e ao CNPq.

Ao meu orientador, professor Dr. Tadayuki Yanagi Junior, pelo exemplo, conhecimentos compartilhados e conselhos.

Aos meus coorientadores, professora Dra. Sílvia de Nazaré Monteiro Yanagi e professor Dr. Gabriel Araújo e Silva Ferraz pela importante ajuda no desenvolvimento desta dissertação.

Aos amigos professores, Márcio Eustáquio Ferreira Leal pela sempre pronta disposição na adequação de horários e colaborações, ao mestrando Carlos Antônio Rufino Júnior e ao doutorando Junio Moreira pelo constante incentivo.

A todos os amigos de departamento.

Aos meus pais, Laécio e Márcia, a minha irmã Luana, meu cunhado Miceno, minha namorada Fernanda e avós, pelo amor, companheirismo e apoio em todas as etapas da minha vida.

**Meu sincero Muito Obrigado!**

*“O passado serve para evidenciar as nossas falhas  
e dar-nos indicações para o progresso do futuro.” (Henry Ford)*

## RESUMO

Objetivou-se com o presente trabalho, proceder o zoneamento bioclimático de classificação do conforto e desconforto térmico para humanos no estado de Minas Gerais, Brasil, considerando cenários histórico e futuros. Séries históricas (1961 a 2017) do índice de temperatura efetiva em função do vento mínimo ( $TEV_{mín}$ , °C), médio ( $TEV_{méd}$ , °C) e máximo ( $TEV_{máx}$ , °C) foram obtidas em função dos valores médios mensais da temperatura de bulbo seco do ar mínima ( $t_{bs\ mín}$ , °C), compensada ( $t_{bs\ comp}$ , °C) e máxima ( $t_{bs\ máx}$ , °C), umidade relativa (UR, %) e velocidade do vento ( $V$ ,  $m\ s^{-1}$ ), disponíveis em 34 estações meteorológicas. O teste Mann-Kendall foi aplicado às séries históricas para realização de análises de tendências. Valores de  $TEV_{mín}$ ,  $TEV_{méd}$  e  $TEV_{máx}$  foram simulados para cenários futuros (para os anos 2028 e 2038). Análises geoestatísticas baseadas em valores históricos e futuros foram aplicadas para geração de mapas do índice de temperatura efetiva em função do vento ( $TEV$ ). No geral, os resultados evidenciam tendências de aquecimento para as duas próximas décadas. As estações de outono e inverno apresentam propensões a sensações térmicas de conforto a humanos em maior dimensão territorial, especialmente nas mesoregiões Central de Minas, Metropolitana de Belo Horizonte, Sul/Sudoeste de Minas, Campos das Vertentes e Zona da Mata. As estações verão e primavera possuem disposições para climas moderadamente quentes, em respeito a áreas das mesoregiões do Triângulo Mineiro, Noroeste e Norte de Minas, Jequitinhonha e Vale do Mucuri.

**Palavras-chave:** Conforto térmico humano. Índice de temperatura efetiva em função do vento. Zoneamento bioclimatológico.

## ABSTRACT

The objective of this study was to perform the bioclimatic zoning of comfort and thermal discomfort for humans in the state of Minas Gerais, Brazil, considering historical and future scenarios. Historical series (1961 to 2017) of the minimum ( $ETW_{min}$ , °C), mean ( $ETW_{avg}$ , °C) and maximum ( $ETW_{max}$ , °C) effective temperature index as a function of the wind were obtained as a function of the monthly mean values of the minimum ( $t_{bs\ min}$ , °C), compensated ( $t_{bs\ comp}$ , °C) and maximum ( $t_{bs\ max}$ , °C) dry-bulb temperature, relative humidity (RU, %) and wind speed ( $V$ ,  $m\ s^{-1}$ ), available in 34 meteorological stations. The Mann-Kendall test was applied to the historical series for trend analysis.  $ETW_{min}$ ,  $ETW_{avg}$  and  $ETW_{max}$  values were simulated for future scenarios (for years 2028 and 2038). Geostatistical analyzes based on historical and future values were applied for generation of effective temperature index as a function of wind (ETW) maps. In general, the results evidenced heating trends for the next two decades. The autumn and winter seasons tending to thermal sensations of human comfort in a larger territorial dimension, especially in the mesoregions Central de Minas, Metropolitana de Belo Horizonte, South / Southwest of Minas, Campos das Vertentes and Zona da Mata. The summer and spring seasons have provisions for moderately warm climates, with respect to areas of the Mesoregions of the Triangulo Mineiro, Northwest and North of Minas, Jequitinhonha and Vale do Mucuri.

**Keywords:** Human thermal comfort. Effective temperature as a function of wind index. Bioclimatological zoning.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de avaliação climática por meio do índice de clima térmico universal (UTCI) obtido pela produção dinâmica de um modelo termofísico ampliado por um modelo de vestuário .....	33
Figura 2 - Escala de sensação térmica baseada no índice voto médio previsto (PMV) .....	35

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificações de possíveis distúrbios de calor para humanos em grupos de alto risco adotadas para o índice de calor (IC) .....	21
Tabela 2 - Zonas de conforto e desconforto adotadas para o índice de temperatura e umidade (ITU) em referência ao trabalhador rural.....	22
Tabela 3 - Escala de avaliação do humidex: grau de conforto para humanos.....	23
Tabela 4 - Classificação do conforto térmico humano baseado em valores do índice de temperatura e resfriamento pelo vento (WCT) .....	26
Tabela 5 - Recomendações para atividades ao ar livre em vários intervalos de temperatura do índice de bulbo úmido e temperatura do globo negro (IBUTG).....	27
Tabela 6 - Valores de referência para o índice de bulbo úmido e temperatura do globo negro (IBUTG) em função da atividade e do ciclo de trabalho/descanso de uma pessoa.....	28
Tabela 7 - Taxas de metabolismo por tipo de atividade .....	29
Tabela 8 - Classificação do grau de conforto baseado nos intervalos de valores do índice de conforto térmico humano (ICH) .....	31
Tabela 9 - Faixas de valores do índice de desconforto humano (IDH) relativas às condições de conforto e desconforto térmico .....	32
Tabela 10 - Variáveis disponíveis por meio da resposta do modelo termofisiológico (após períodos de exposição iguais a 30 minutos e 120 minutos).....	34
Tabela 11 - Categorias de estresse humano classificadas pelas faixas de valores do índice de clima térmico universal (UTCI) .....	35
Tabela 12 - Recomendações de valores para uso do índice de voto médio previsto (PMV) .....	37
Tabela 13 - Taxa metabólica para diferentes tipos de atividades.....	37
Tabela 14 - Índice de resistência térmica para vestimentas .....	38
Tabela 15 - Sensações térmicas em humanos adotadas para o índice de temperatura efetiva (TE) .....	40
Tabela 16 - Sensação térmica e grau de estresse fisiológico por faixas de valores do índice de temperatura efetiva em função do vento (TEv).....	41
Tabela 17 - Classificação da sensação térmica e do grau de estresse fisiológico por faixas de valores dos índices de temperatura efetiva (TE) e de temperatura efetiva em função do vento (TEv) para humanos de acordo com o laboratório MASTER – IAG/USP.....	41

## LISTA DE SIGLAS

°C	grau Celsius
ASHARE	<i>American Society of Heating &amp; Refrigeration &amp; AC Engineering</i>
ACGIH	<i>American Conference of Governmental Industrial Hygienists</i> ou conferência americana de higienistas industriais
$C_b$	Calor específico do sangue ( $W s K^{-1} kg^{-1}$ )
CET	<i>Corrected Effective Temperature</i> (°C) ou temperatura efetiva corrigida (°C)
clo	resistência térmica ( $m^{-2} °C/W$ )
$e$	pressão real de vapor d'água (hPa)
$e_a$	pressão atual de vapor d'água (hPa)
$E_{dif}$	perda por difusão do suor (W)
EPI	Equipamento de Proteção Individual
$E_{rsw}$	perda requerida por evaporação ( $W m^{-2}$ )
Esk	perdas evaporativas pela pele ( $W m^{-2}$ )
ET	<i>Effective Temperature</i> (°C)
ETW	<i>Effective Temperature as a function of Wind</i> (°C)
$ETW_{avg}$	<i>Effective Temperature as a function of Wind average</i> (°C)
$ETW_{max}$	<i>Effective Temperature as a function of Wind maximum</i> (°C)
$ETW_{min}$	<i>Effective Temperature as a function of Wind minimum</i> (°C)
$F_{c-sk}$	Fluxo de calor do centro do corpo para a superfície da pele ( $W m^{-2}$ )
$f_{cl}$	razão entre a área da pele vestida e nua
$F_{sk-cl}$	Fluxo de calor da superfície da pele para a superfície externa da roupa ( $W m^{-2}$ )
hab	habitantes
$h_c$	coeficiente de troca convectiva ( $W/m^2 °C$ )
HI	<i>Heat Index</i> (°C)
hPa	Hectopascal
HTC	<i>Human Thermal Comfort</i> (°C)
IBUTG	Índice de Bulbo Úmido e Temperatura do Globo Negro (°C)
IC	Índice de Calor (°C)
ICH	Índice de Conforto Térmico Humano (°C)

I <sub>cl</sub>	Isolamento térmico da roupa (m <sup>2</sup> °C/W)
IDH	Índice de Desconforto Humano (°C)
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IPCC	<i>International Panel on Climate Change</i> ou painel intergovernamental de mudança climática
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
ITU	Índice de Temperatura e Umidade (adimensional)
km <sup>2</sup>	quilômetros quadrados
m	metros
M	taxa metabólica (W m <sup>-2</sup> )
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
MASTER	Meteorologia Aplicada a Sistemas de Tempo Regionais
met	metabolismo por metro quadrado (W m <sup>-2</sup> )
mm	milímetros
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
NR	Norma Regulamentadora
OT <sub>n</sub>	<i>neutral Operative Temperature</i> (°C) ou temperatura operativa neutra (°C)
p <sub>a</sub>	pressão parcial do vapor d'água (hPa)
P <sub>b</sub>	densidade do sangue (kg l <sup>-1</sup> )
PIB	Produto Interno Bruto
PMV	<i>Predicted Mean Vote</i> (adimensional) ou voto médio previsto (adimensional)
PPD	<i>Predicted Percentage of Dissatisfied</i> (adimensional) ou percentual previsto de insatisfeitos (adimensional)
Q <sub>res</sub>	perda pela respiração (W m <sup>-2</sup> )
R <sub>c</sub>	Radiação de onda curta (W m <sup>-2</sup> )
RH	<i>Relative Humidity</i>
S	calor acumulado (W m <sup>-2</sup> )
t <sub>bn</sub>	temperatura de bulbo úmido natural (°C)
t <sub>bs</sub>	temperatura de bulbo seco do ar (°C)
t <sub>bs mín</sub>	temperatura de bulbo seco do ar mínima (°C)
t <sub>bs comp</sub>	temperatura de bulbo seco do ar compensada (°C)

$t_{bs \text{ máx}}$	temperatura de bulbo seco do ar máxima (°C)
$t_{bs,mm}$	temperatura média mensal do ar externo (°C)
$t_{bu}$	temperatura de bulbo úmido (°C)
$t_c$	temperatura do centro do corpo (°C)
$t_{cl}$	temperatura da superfície externa da roupa (°C)
TE	Temperatura Efetiva (°C)
TE <sub>v</sub>	Temperatura Efetiva em função do vento (°C)
TE <sub>v máx</sub>	Temperatura Efetiva em função do vento máxima (°C)
TE <sub>v méd</sub>	Temperatura Efetiva em função do vento média (°C)
TE <sub>v mín</sub>	Temperatura Efetiva em função do vento mínima (°C)
$t_g$	temperatura de globo (°C)
THI	<i>Temperature Humidex Index</i> (adimensional)
$t_{po}$	temperatura de ponto de orvalho (°C)
$t_{rm}$	temperatura radiante média (°C)
$t_{sk}$	temperatura da superfície da pele (°C)
UR	Umidade Relativa (%)
UTCI	<i>Universal Thermal Climate Index</i> (°C) ou índice de clima térmico universal (°C)
V	Velocidade do vento ( $m \text{ s}^{-1}$ )
$V_b$	fluxo de sangue do centro do corpo para a pele (função de $t_c$ e $t_{sk}$ ) ( $l \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ )
W	<i>Watt</i> ou trabalho extremo ( $W \text{ m}^{-2}$ )
WBGT	<i>Wet-Bulb Globe Temperature</i> (°C)
WCT	<i>Wind Chill Temperature index</i> (°C) ou índice de temperatura e resfriamento pelo vento (°C)

## SUMÁRIO

<b>PRIMEIRA PARTE</b> .....	<b>16</b>
<b>1</b> <b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>16</b>
1.1 <b>OBJETIVO GERAL</b> .....	<b>17</b>
1.2 <b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b> .....	<b>18</b>
<b>2</b> <b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>19</b>
2.1 <b>CONFORTO TÉRMICO HUMANO</b> .....	<b>19</b>
2.1.1 <b>ÍNDICES TÉRMICOS DE CONFORTO HUMANO</b> .....	<b>19</b>
2.1.2 <b>ÍNDICE DE CALOR (IC)</b> .....	<b>20</b>
2.1.3 <b>ÍNDICE DE TEMPERATURA E UMIDADE (ITU)</b> .....	<b>21</b>
2.1.4 <b>ÍNDICE <i>HUMIDEX</i></b> .....	<b>22</b>
2.1.5 <b>TEMPERATURA OPERATIVA NEUTRA (OTN)</b> .....	<b>23</b>
2.1.6 <b>ÍNDICE DE TEMPERATURA E RESFRIAMENTO PELO VENTO (WCT)</b> .....	<b>25</b>
2.1.7 <b>ÍNDICE DE BULBO ÚMIDO E TEMPERATURA DO GLOBO NEGRO (IBUTG)</b> .....	<b>26</b>
2.1.8 <b>ÍNDICE DE BULBO ÚMIDO E TEMPERATURA DO GLOBO NEGRO (IBUTG) (NR-15)</b> ....	<b>27</b>
2.1.9 <b>ÍNDICE DE CONFORTO TÉRMICO HUMANO (ICH)</b> .....	<b>30</b>
2.1.10 <b>ÍNDICE DE DESCONFORTO HUMANO (IDH)</b> .....	<b>31</b>
2.1.11 <b>ÍNDICE DE CLIMA TÉRMICO UNIVERSAL (UTCI)</b> .....	<b>32</b>
2.1.12 <b>ÍNDICE VOTO MÉDIO PREVISTO (PMV)</b> .....	<b>35</b>
2.1.13 <b>PERCENTUAL PREVISTO DE INSATISFEITOS (PPD)</b> .....	<b>38</b>
2.1.14 <b>ÍNDICES DE TEMPERATURA EFETIVA (TE)</b> .....	<b>39</b>
2.1.15 <b>ÍNDICE DE TEMPERATURA EFETIVA EM FUNÇÃO DO VENTO (TEv)</b> .....	<b>40</b>
2.2 <b>SÉRIE TEMPORAL</b> .....	<b>42</b>
2.3 <b>ZONEAMENTO BIOCLIMÁTICO BRASILEIRO</b> .....	<b>43</b>
<b>3</b> <b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>45</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>46</b>
<b>SEGUNDA PARTE</b> .....	<b>52</b>
<b>ARTIGO: VARIABILIDADE ESPAÇO-TEMPORAL DO CONFORTO TÉRMICO</b> <b>HUMANO PARA TRABALHADORES DE REGIÕES DE CLIMA TROPICAL</b> <b>APLICADA PARA O ESTADO DE MINAS GERAIS, BRASIL</b> .....	<b>52</b>

## PRIMEIRA PARTE

### 1 INTRODUÇÃO

A região sudeste do Brasil é habitada por aproximadamente 40% da população e abrange as maiores metrópoles e uma grande infraestrutura produtiva. Apesar de possuir áreas urbanas sofisticadas e bem equipadas, municípios de pequeno porte são igualmente proeminentes na oferta de empregos formais devido a existência de atividades produtivas diversificadas. Aproximadamente metade da produção nacional advém da região Sudeste (MATOS; FERREIRA, 2017).

Os climas predominantes em Minas Gerais é o tropical de altitude e o tropical, sendo que a diversidade de clima ocorre conforme a altitude e a pressão atmosférica. O clima tropical de altitude surge em áreas caracterizadas pelo relevo mais elevado, as quais apresentam temperaturas do ar que variam entre 17°C a 20°C, possuindo índices pluviométricos que ultrapassam 1300 mm anuais. Em contrapartida, o clima tropical é característico de áreas baixas, cujas temperaturas do ar oscilam entre 22°C e 23°C com duas estações bem definidas, verões chuvosos e invernos secos (FREITAS, 2017).

As alterações climáticas interferem no bem-estar e desempenho dos seres humanos. Em Minas Gerais, diversos trabalhadores do setor urbano e rural desenvolvem suas atividades em ambientes externos, sendo expostos a variações climáticas e ao desconforto térmico. Além do estresse ocasionado pelo exercício relacionado à atividade que desenvolvem, esses trabalhadores estão mais sujeitos a redução de desempenho e a acidentes de trabalho quando o ambiente térmico está fora da zona de termoneutra (AMARO, 2016).

Mudanças climáticas, sobretudo aquelas devidas ao aquecimento global acarretadas por ações humanas, foram alertadas primeiramente na década de 1950. Durante os anos 1980 as preocupações de pesquisadores relacionadas ao impacto dessas mudanças no ecossistema se tornaram mais acentuadas (BARCELLOS et al., 2009).

Considerado a principal entidade avaliadora do conhecimento sobre alterações climáticas, o painel intergovernamental de mudança climática, originalmente denominado *international panel on climate change* (IPCC), determinou que as alterações do clima atribuídas ao aquecimento da terra afetaram os sistemas físicos e biológicos, assim como os sistemas naturais e humanos. Nos

últimos 100 anos a temperatura média da superfície terrestre aumentou 0,7°C e o nível médio do mar elevou-se 0,17 m. Observou-se também, maior taxa de derretimento das camadas de gelo, além do aumento das precipitações e evaporação nos oceanos. A partir da década de 1970 ocorreu a ampliação da frequência e intensidade de eventos extremos, como secas, inundações e tempestades de vento (IPCC, 2007). Desta forma, as variações climáticas continuamente ocorrem e podem interferir na capacidade laboral do homem.

Dependendo das condições térmicas, os mecanismos termorreguladores do corpo humano não são capazes de manter a temperatura do núcleo corporal próxima ao ideal, o que pode ocasionar cansaço, indisposição, aumento da pressão sanguínea, da frequência cardíaca e da produção de calor (AMARO, 2016). Neste contexto, com o intuito de estabelecer condições térmicas que caracterizam o conforto humano, foram desenvolvidos diversos índices que classificam o status de conforto térmico. Esses índices podem ser aplicados em zoneamentos bioclimáticos do conforto humano.

Estudos desta natureza contribuem para o estabelecimento de jornadas de trabalho cujo os horários e datas favorecem as atividades de trabalhadores, objetivando o melhor rendimento e conforto térmico, por meio do uso de equipamentos de proteção individual (EPI), se necessário, e intervalos de descanso.

Deste modo, torna-se relevante o desenvolvimento de pesquisas bioclimatológicas em determinadas regiões. Assim, as condições do ambiente térmico podem ser avaliadas e os métodos que promovam conforto térmico podem ser desenvolvidos de forma a propiciar melhoria do ambiente de trabalho, sendo de grande utilidade para auxílio nas tomadas de decisão relacionadas ao planejamento de atividades, incluindo a avaliação do uso de técnicas de climatização.

## **1.1 Objetivo geral**

Conceber o zoneamento bioclimático para trabalhadores que atuam em ambientes externos no Estado de Minas Gerais, baseado no índice de temperatura efetiva em função do vento (TE<sub>v</sub>) e considerando cenários histórico e futuros.

## 1.2 Objetivos específicos

- a. Elaborar um estudo de tendências a partir de séries históricas médias mensais de valores mínimos, médios e máximos de TEv de municípios do Estado de Minas Gerais;
- b. Predizer cenários futuros (para os anos 2028 e 2038) de valores mínimos, médios e máximos de TEv;
- c. Gerar o zoneamento bioclimático de TEv para os valores médios históricos e para os cenários futuros, adotando as classificações de conforto e desconforto estabelecidas pelo laboratório de meteorologia aplicada a sistemas de tempo regionais (MASTER).

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Conforto térmico humano

Conforto térmico está associado à condição psicológica humana capaz de expressar satisfação baseada nas características térmicas de um ambiente (NOBREGA; VERÇOSA, 2011). Em outra perspectiva, conforto térmico é considerado uma propriedade fornecida pelo ambiente e por edificações, capaz de prover um grau de satisfação do ser humano com as condições térmicas do ambiente em que se situa (NOGUEIRA et al., 2011).

Fatores físicos, fisiológicos e psicológicos definem a sensação térmica, essa por sua vez, está fortemente ligada à subjetividade. As trocas de calor do corpo com o meio caracterizam os fatores físicos; as mudanças dos mecanismos fisiológicos do organismo representam os fatores fisiológicos; as diferenças na percepção e nas ações provocadas aos estímulos sensoriais, frutos de outras experiências e de expectativas de uma pessoa, definem por fim, os fatores psicológicos (LAMBERTS; XAVIER; GOULART, 2011).

Fatores como idade, sexo, condição de saúde e métodos de adaptação ao clima local são exemplos de características particulares do indivíduo, que combinadas aos do ambiente, implicam na sensação humana de conforto térmico (SILVA; GONZALEZ; SILVA F., 2011). Diante disso, é improvável que um conjunto de pessoas inseridas em um mesmo local estejam, em sua totalidade, termicamente confortáveis, mesmo que algumas se encontrem nesta situação (MELES, 2012).

A necessidade de condicionamento de ambientes fechados para requerer o desempenho de atividades humanas, especialmente no trabalho, originou o estudo do conforto térmico. A eficiência energética de edificações e a preocupação com a qualidade dos espaços livre públicos em termos de estratégias bioclimáticas, desencadeou maior interesse de análise do conforto térmico em espaços abertos (COUTO NINCE et al., 2013).

#### 2.1.1 Índices térmicos de conforto humano

Mais de cem índices foram desenvolvidos para avaliar as condições bioclimáticas para seres humanos no último século. Alguns destes índices se baseiam em resultados generalizados de medições, como o frio do vento e a temperatura de bulbo úmido ( $t_{bu}$ ), enquanto que, outros

consideram as reações observadas do corpo humano quando submetidos ao estresse térmico (BLAZEJCZYK et al., 2012).

Nas subseções que seguem, são conceituados diferentes índices de conforto térmico.

### 2.1.2 Índice de calor (IC)

O índice de calor (IC), originalmente denominado *heat index* (HI) (STEADMAN, 1979), determina uma temperatura aparente com base em dados da temperatura de bulbo seco do ar ( $t_{bs}$ ) e da umidade relativa (UR) do ar. O cálculo do IC é realizado a partir da equação 1 (ROTHFUSZ, 1990) derivada por múltiplas análises de regressões em  $t_{bs}$  e UR da primeira versão de Steadman (1979). Neste índice, quando o valor da umidade é alto, a taxa de evaporação da água é diminuída, expressando que o calor é retirado do corpo a uma taxa menor, o levando a reter mais calor do que seria no ar seco.

$$IC = -8,784695 + 1,61139411 \cdot t_{bs} + 2,338549 \cdot UR - 0,14611605 \cdot t_{bs} \cdot UR - 1,2308094 \cdot 10^{-2} \cdot t_{bs}^2 - 1,6424828 \cdot 10^{-2} \cdot UR^2 + 2,11732 \cdot 10^{-3} \cdot t_{bs}^2 \cdot UR + 7,2546 \cdot 10^4 \cdot t_{bs} \cdot UR^2 - 3,582 \cdot 10^6 \cdot t_{bs}^2 \cdot UR^2 \quad (1)$$

em que,

$IC$ : índice de calor ( $^{\circ}C$ );

$t_{bs}$ : temperatura de bulbo seco do ar ( $^{\circ}C$ );

$UR$ : umidade relativa do ar (%).

O IC é válido para situações em que o valor da  $t_{bs}$  se encontra acima de  $20^{\circ}C$ , sendo seus valores correlacionados a possíveis distúrbios de calor em humanos (BLAZEJCZYK et al., 2012). Categorizações para o IC e possíveis distúrbios de calor para humanos em grupos de alto risco (pessoas sujeitas a essas temperaturas) são listados na tabela 1.

Tabela 1 - Classificações de possíveis distúrbios de calor para humanos em grupos de alto risco adotadas para o índice de calor (IC).

Índice de calor (°C)	Categoria	Possíveis distúrbios de calor para humanos em grupos de alto risco
27 – 32	Cuidado	Possível fadiga com exposição prolongada e/ou atividade física
32 – 41	Cuidado extremo	Insolação, câibras musculares e/ou exaustão possível por calor com exposição prolongada e/ou atividade física
41 – 54	Perigo	Insolação, câibras musculares e/ou exaustão provável pelo calor. Possível insolação com exposição prolongada e/ou atividade física
≥ 54	Perigo extremo	Insolação ou provável golpe de calor <sup>1</sup>

Fonte: BLAZEJCZYK et al. (2012).

Nota: <sup>1</sup> trata-se de uma emergência médica caracterizada pelo início repentino de hipertermia (temperatura corporal > 40°C; falência circulatória, baixa concentração de oxigênio nos tecidos do corpo humano, aumento das necessidades metabólicas) e difusão neurológica central (MARTO, 2005).

### 2.1.3 Índice de temperatura e umidade (ITU)

O índice de temperatura e umidade (ITU), originalmente denominado *temperature humidex index* (THI) (THOM, 1959), é utilizado com abrangência por considerar informações normalmente disponíveis em estações meteorológicas e em banco de dados concebidos a partir de imagens de satélite (SOUZA et al., 2010).

O ITU pode ser calculado por meio da equação 2 com base nos valores de  $t_{bs}$  e temperatura do ponto de orvalho ( $t_{po}$ ). A  $t_{po}$  pode ser determinada pela equação 3 (VIANELLO; ALVES, 2012) em função da pressão real do vapor d'água ( $e$ ). Os intervalos de conforto e desconforto térmico adotados pelo ITU são listados na tabela 2.

$$ITU = t_{bs} + 0,36 \cdot t_{po} + 41,5 \quad (2)$$

em que,

$ITU$ : índice de temperatura e umidade (adimensional);

$t_{bs}$ : temperatura de bulbo seco do ar (°C);

$t_{po}$ : temperatura de ponto de orvalho (°C).

$$t_{po} = \frac{186,4905 - 237,3 \log e}{(\log e - 8,2859)} \quad (3)$$

em que,

$e$ : pressão real de vapor d'água (hPa).

Tabela 2 - Zonas de conforto e desconforto adotadas para o índice de temperatura e umidade (ITU) em referência ao trabalhador rural.

<b>Parâmetros de conforto e desconforto térmico</b>	<b>Zonas de conforto e desconforto térmico</b>
ITU < 74	Conforto térmico adequado
74 ≤ ITU < 79	Ambiente quente, no qual se inicia o desconforto térmico, podendo causar problemas de saúde e redução no rendimento do trabalhador rural
79 ≤ ITU < 84	Condições ambientais muito quentes, indicando perigo e podendo trazer consequências graves à saúde do trabalhador rural; implica em condição de perigo para os animais, indicando aos produtores a necessidade de tomarem precauções para evitar perdas na produção
ITU > 84	Indica condição extremamente quente, com risco muito grave à saúde do trabalhador rural; indica emergência, sendo necessário que providências urgentes sejam tomadas para evitar a perda do plantel

Fonte: SOUZA et al. (2010).

#### 2.1.4 Índice *humidex*

O *humidex* (MASTERSON; RICHARDSON, 1979) é um índice baseado na combinação da  $t_{bs}$  e da UR para indicar o nível de desconforto térmico em ambientes externos. Quanto maior o valor gerado pelo índice, maior o desconforto térmico. O intervalo de conforto estabelecido pelo *humidex* é de 20°C e 29°C. Valores de *humidex* iguais ou maiores a 30°C representam o início de percepções de desconforto, sendo essas agravadas conforme o aumento da  $t_{bs}$  (ALFANO; PALELLA; RICCIO, 2011).

O *humidex* pode ser calculado pela equação 4 (MASTERSON; RICHARDSON, 1979).

$$Humidex = t_{bs} + 0,5555 \cdot (e - 10) \quad (4)$$

em que,

*Humidex*: índice *humidex* (°C);

$t_{bs}$ : temperatura de bulbo seco do ar (°C);

$e$ : pressão de vapor d'água do ar atmosférico (hPa).

A pressão de vapor d'água,  $e$ , pode ser calculada pela equação 5.

$$e = 6,11 \cdot e^{(5417,753 \cdot \left(\frac{1}{273,16}\right) \cdot \left(\frac{1}{273,16 + t_{po}}\right))} \quad (5)$$

em que,

$t_{po}$ : temperatura do ponto de orvalho (°C).

A escala de avaliação do *humidex* (tabela 3) fornece informações sobre faixas de temperatura que caracterizam perigo e possíveis síndromes de calor para humanos.

Tabela 3 - Escala de avaliação do *humidex*: grau de conforto para humanos.

<b><i>Humidex</i> (°C)</b>	<b>Graus de conforto</b>
20 – 29	Sem desconforto
30 – 39	Algum desconforto
40 – 45	Grande desconforto; evite o esforço
46 ou mais	Perigoso; possível golpe de calor

Fonte: BLAZEJCZYK et al. (2012).

### 2.1.5 Temperatura operativa neutra (OTn)

Utilizada para avaliação térmica de ambientes condicionados naturalmente, a temperatura operativa neutra, originalmente nomeada *neutral operative temperature* (OTn) (ASHARE 55, 2004) e atualizada em 2010, considera que indivíduos fazem o uso de determinados tipos de vestimentas de acordo com situações climáticas externas, não sendo possível assim, estimar o isolamento causado pela roupa. Neste índice, não são considerados a UR ou limites de V, devido a processos de adaptação.

A equação 6 pode ser usada para o cálculo da OTn (ASHARE 55, 2004).

$$OTn = 17,8 - 0,32 \cdot t_{bs,mm} \quad (6)$$

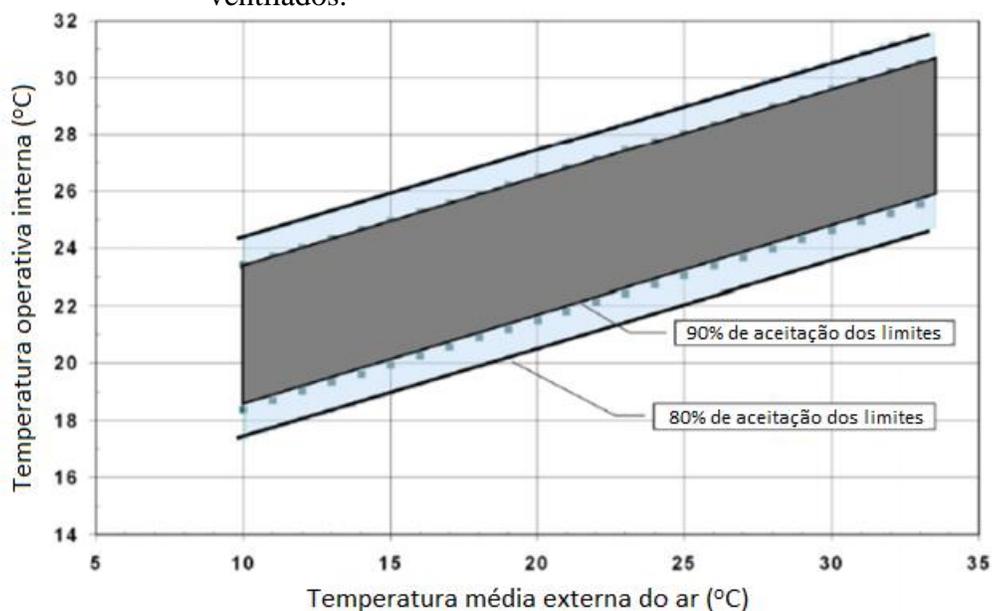
em que,

OTn: temperatura operativa neutra (°C);

$t_{bs,mm}$ : temperatura média mensal do ar externo (°C).

Conforme ilustrado no gráfico 1, existem dois intervalos aceitos de temperatura operativa para espaços naturalmente ventilados: um para 80% de aceitabilidade dos limites e outro para 90% de aceitabilidade dos limites. Sendo que os 80% de aceitabilidades são aplicados em casos de aplicações típicas e quando outras informações não estiverem disponíveis. É aceitável utilizar 90% de limites de aceitabilidade quando um padrão mais alto de conforto térmico é desejado (ASHRAE 55, 2010).

Gráfico 1: Faixas de temperatura operativa aceitáveis para espaços naturalmente ventilados.



### 2.1.6 Índice de temperatura e resfriamento pelo vento (WCT)

O índice de temperatura e resfriamento pelo vento, originalmente denominado *wind chill temperature index* (WCT) (SIPLE; PASSEL, 1945), foi implementado a partir de análises obtidas por meio de experimentos na Antártica.

O experimento foi conduzido com o uso de um equipamento constituído por cilindros plásticos, preenchidos com água e expostos ao vento em diferentes temperaturas. Com isso, notou-se o tempo necessário para que a água fosse congelada, em intervalos de  $t_{bs}$  e velocidade do vento ( $V$ ) que variaram de  $-9^{\circ}\text{C}$  a  $-56^{\circ}\text{C}$  e  $0\text{ m s}^{-1}$  a  $12\text{ m s}^{-1}$ , respectivamente.

Após o tratamento dos dados, verificou-se que os resultados referentes a  $V$  não devem ultrapassar  $22,3\text{ m s}^{-1}$ . O WCT pode ser calculado pela equação 7 (ASHARE, 1997).

$$WCT = 13,12 + 0,6215 \cdot t_{bs} - 11,37 \cdot V_{10}^{0,16} + 0,3965 \cdot t_{bs} \cdot V_{10}^{0,16} \quad (7)$$

em que,

$WCT$ : índice de temperatura e resfriamento pelo vento ( $^{\circ}\text{C}$ );

$t_{bs}$ : temperatura de bulbo seco do ar ( $^{\circ}\text{C}$ );

$V_{10}$ : velocidade do vento a 10 m do solo ( $\text{m s}^{-1}$ ).

A classificação do conforto térmico humano baseado em valores do WCT são listados na tabela 4.

Tabela 4 - Classificação do conforto térmico humano baseado em valores do índice de temperatura e resfriamento pelo vento (WCT).

WCT (°C)	Classificação
0 – -9	Aumento de desconforto (ainda que seja em menor nível)
-10 – -27	Desconfortável; Risco de hipotermia caso haja permanência em ambientes externos por longos períodos sem proteção adequada
-28 – -39	Risco de congelamento: verificar a face e as extremidades por entorpecimento ou brancura
-40 – -47	Alto risco de congelamento: verifique a face e as extremidades por entorpecimento ou brancura
-48 – -54	Risco muito alto de congelamento: verifique o rosto e as extremidades frequentemente por entorpecimento ou brancura
abaixo de -54	Condições externas perigosas

Fonte: Adaptação de ENVIRONMENT AND CLIMATE CHANGE CANADA (2011).

### 2.1.7 Índice de bulbo úmido e temperatura do globo negro (IBUTG)

O índice de bulbo úmido e temperatura do globo negro (IBUTG), originalmente denominado *wet-bulb globe temperature* (WBGT) (YAGLOU; MINARD, 1957), é o único índice de calor a ter limiares conhecidos diretamente relacionados aos níveis de atividade física. No entanto, requer variáveis de entrada não padronizadas: a temperatura de globo ( $t_g$ ) equilibrada durante 30 minutos e a  $t_{bu}$  exposta, a fim de considerar o efeito do aquecimento do sol e o resfriamento evaporativo ocasionado pelo vento. O IBUTG possui uma forma simplificada, a qual é capaz de representar o estresse térmico para condições diurnas médias em ambientes externos, baseado apenas na  $t_{bs}$  e na UR (WILLETT; SHERWOOD, 2012).

Apesar de correlacionar-se bem com a temperatura da pele, condições úmidas e em situações de trabalhos leves, o IBUTG correlaciona-se mal com outras variáveis fisiológicas, como a frequência cardíaca, a temperatura retal e a perda de peso causada pela transpiração. O índice IBUTG superestima o estresse térmico (temperatura do núcleo corporal diferente da ideal - média de 37°C) de pessoas expostas ao calor em muitos países em desenvolvimento, como a China, Índia, Tailândia e Emirados Árabes Unidos. No Canadá, o uso deste índice tem algumas restrições, sendo estas relacionadas aos ciclos de trabalho de repouso estabelecidos pelo IBUTG, embasados na norma americana de higienistas industriais (*American Conference of Governmental Industrial Hygienists - ACGIH*), os quais não suportam qualquer valor superior a 30°C (DEHGHAN et al., 2012). Uma restrição inerente do IBUTG é sua limitada aplicabilidade em uma ampla gama de cenários ocasionada por dificuldades e pelo inconveniente de mensuração

da  $t_g$ , a qual pode ser incômoda e impraticável. Devido a estas limitações alguns autores baseiam-se em uma equação simplificada (equação 8) que considera a  $t_{bs}$  e a  $e$  para sua avaliação (BLAZEJCZYK et al., 2012). Quando disponível a  $t_g$ , o cálculo do IBUTG pode ser obtido pelas equações 9 e 10.

$$IBUTG = 0,567 \cdot t_{bs} + 0,393 \cdot e + 3,94 \quad (8)$$

em que,

$IBUTG$ : índice de bulbo úmido e temperatura do globo negro ( $^{\circ}C$ );

$t_{bs}$ : temperatura de bulbo seco do ar ( $^{\circ}C$ );

$e$ : pressão de vapor d'água (hPa).

A tabela 5 lista as faixas do IBUTG referentes a recomendações detalhadas para atividades realizadas ao ar livre.

Tabela 5 - Recomendações para atividades ao ar livre em vários intervalos de temperatura do índice de bulbo úmido e temperatura do globo negro (IBUTG).

IBUTG ( $^{\circ}C$ )	Atividade desportiva recomendada
< 18	Ilimitada
18 – 23	Manter alerta para possíveis aumentos no índice e para sintomas de estresse por calor
23 – 28	Exercício ativo para pessoas não-aclimatadas deve ser reduzido
28 – 30	O exercício ativo para todos, exceto os bem aclimatados, deve ser reduzido
> 30	Todo o treinamento deve ser interrompido

Fonte: Tradução de BLAZEJCZYK et al. (2012).

### 2.1.8 Índice de bulbo úmido e temperatura do globo negro (IBUTG) (NR-15)

A norma regulamentadora NR-15 (BRASIL, 1978) determina limiares aos quais os trabalhadores podem permanecer expostos a ambientes quentes na execução de suas atividades. A NR-15 tem como referência o IBUTG para análise do estresse térmico e estabelece ações a serem executadas quando os valores de referência são ultrapassados (SILVA et al., 2011).

O IBUTG deve ser aplicado para avaliação da exposição ao calor, definido pelas equações 9 (para ambientes internos sem carga solar) e 10 (para ambientes externos com carga solar).

$$IBUTG = 0,7 \cdot t_{bn} + 0,3 \cdot t_g \quad (9)$$

$$IBUTG = 0,7 \cdot t_{bn} + 0,1 \cdot t_{bs} + 0,2 \cdot t_g \quad (10)$$

em que,

*IBUTG*: índice de bulbo úmido e temperatura do globo negro (°C);

*t<sub>bn</sub>*: temperatura de bulbo úmido natural (°C);

*t<sub>g</sub>*: temperatura de globo (°C);

*t<sub>bs</sub>*: temperatura de bulbo seco do ar (°C).

Em função dos valores obtidos pelas equações 9 e 10, o regime de trabalho intermitente é definido conforme descrito na tabela 6. Considera-se os períodos de descanso como tempo de serviço para todos os efeitos legais (SILVA et al., 2011).

Tabela 6 - Valores de referência para o índice de bulbo úmido e temperatura do globo negro (IBUTG) em função da atividade e do ciclo de trabalho/descanso de uma pessoa.

Regime de trabalho intermitente (por hora)	Tipo de atividade (IBUTG)		
	Leve (°C)	Moderada (°C)	Pesada (°C)
Trabalho contínuo	até 30,0	até 26,7	até 25,0
45 minutos de trabalho 15 minutos de descanso	30,1 – 30,6	26,8 – 28,0	25,1 – 25,9
30 minutos de trabalho 30 minutos de descanso	30,7 – 31,4	28,1 – 29,4	26,0 – 27,9
15 minutos de trabalho 45 minutos de descanso	31,5 – 32,2	29,5 – 31,1	28,0 – 30,0
Trabalho não permitido sem medidas de controle adotadas	acima de 32,2	acima de 31,1	acima de 30,0

Fonte: BRASIL (1978).

O tipo de atividade (leve, moderada e pesada) é determinado pelos dados contidos na tabela 7.

Tabela 7 - Taxas de metabolismo por tipo de atividade.

<b>Tipo de atividade</b>		<b>kcal h<sup>-1</sup></b>
Trabalho leve	Sentado em repouso	100
	Sentado, movimentos moderados com braços e tronco (ex.:datilografia)	125
	Sentado, movimentos moderados com braços e pernas (ex.:dirigir)	130
	De pé, trabalho leve, em máquina ou bancada, principalmente com os braços	150
Trabalho moderado	Sentado, movimentos vigorosos com braços e pernas	180
	De pé, trabalho leve em máquina ou bancada, com alguma movimentação	175
	De pé, trabalho moderado em máquina ou bancada, com alguma movimentação	220
	Em movimento, trabalho moderado de levantar ou empurrar	300
Trabalho pesado	Trabalho intermitente de levantar, empurrar ou arrastar pesos (ex.: remoção com pá)	440
	Trabalho fatigante	550

Fonte: BRASIL(1978).

O IBUTG corresponde ao valor médio ponderado para uma hora, determinado pela equação 11.

$$IBUTG = \frac{IBUTG_T \cdot \theta_T + IBUTG_D \cdot \theta_D}{60} \quad (11)$$

em que,

$IBUTG$ : índice de bulbo úmido e temperatura do globo negro (°C);

$IBUTG_T$ : valor do IBUTG no local de trabalho (°C);

$\theta_T$ : soma dos tempos (minutos), do tempo em que se encontra no local de trabalho (por hora);

$IBUTG_D$ : valor do IBUTG no local de descanso (°C);

$\theta_D$ : soma dos tempos parciais (minutos), em que se encontra no local de descanso (por hora).

Deve ser considerado para os tempos  $\theta_T$  e  $\theta_D$  o período mais desfavorável do ciclo de trabalho, sendo  $\theta_T + \theta_D = 60$  minutos (SILVA et al., 2011).

### 2.1.9 Índice de conforto térmico humano (ICH)

O índice de conforto térmico humano (ICH), originalmente nomeado *human termal confort* (HTC), é calculado pela equação 12 (ANDERSON (1965)) (SANTOS; MELO, 2010).

$$ICH = t_{bs} + \frac{5}{9} \cdot (e_a - 10) \quad (12)$$

em que,

$ICH$ : índice de conforto térmico humano (°C);

$t_{bs}$ : temperatura de bulbo seco do ar (°C);

$e_a$ : pressão atual de vapor d'água (hPa).

A  $e_a$  pode ser calculada pela equação 13.

$$e_a = \frac{e_s \cdot UR}{100} \quad (13)$$

em que  $e_s$  é a pressão de saturação do vapor do ar (hPa) e é calculada por meio da equação de Tetens (1930) (equação 14) (SANTOS; MELO, 2010) e UR é a umidade relativa do ar (%).

$$e_s = 6,10 \cdot 10^{\frac{7,5 \cdot t_{bs}}{237,3 + t_{bs}}} \quad (14)$$

em que,

$t_{bs}$ : temperatura de bulbo seco do ar (°C).

A tabela 8 lista a classificação do nível de conforto térmico em função dos valores de ICH calculados.

Tabela 8 - Classificação do grau de conforto baseado nos intervalos de valores do índice de conforto térmico humano (ICH).

Graus de umidade (°C)	Graus de conforto
20 – 29	Confortável
30 – 39	Graus de conforto variando
40 – 45	Desconforto suportável
46 ou mais	Desconforto insuportável

Fonte: SANTOS; MELO (2010).

### 2.1.10 Índice de desconforto humano (IDH)

O índice de desconforto humano (IDH) é calculado por meio da equação 15 (ONO; KAWAMURA, 1991).

$$IDH = 0,99 \cdot t_{bs} + 0,36 \cdot t_{po} + 41,5 \quad (15)$$

em que,

$IDH$ : índice de desconforto humano (adimensional);

$t_{bs}$ : temperatura de bulbo seco do ar (°C);

$t_{po}$ : temperatura de ponto de orvalho (°C).

A  $t_{po}$  pode ser determinada pelas equações 16 e 17.

$$t_{po} = \frac{b \cdot \alpha(t_{bs}, UR)}{a - \alpha(t_{bs}, UR)} \quad (16)$$

$$\alpha(t_{bs}, UR) = \frac{a \cdot t_{bs}}{(b + t_{bs})} + \ln(UR) \quad (17)$$

em que,

$b$ : 237,7 (°C);

$a$ : 17,27;

$UR$ : umidade relativa do ar dividida por 100.

As faixas de valores do IDH relativas às condições de conforto térmico são listadas na tabela 9.

Tabela 9 - Faixas de valores do índice de desconforto humano (IDH) relativas às condições de conforto e desconforto térmico.

<b>Intervalo do IDH (adimensional)</b>	<b>Efeito</b>
IDH > 80	Estresse devido ao calor
75 > IDH > 80	Desconfortável devido ao calor
60 > IDH > 75	Confortável
55 > IDH > 60	Desconfortável devido ao frio
IDH < 55	Estresse devido ao frio

Fonte: SANTOS; MELO (2010).

### 2.1.11 Índice de clima térmico universal (UTCI)

O índice de clima térmico universal, originalmente nomeado *universal termal climate index* (UTCI) (COST Action 730, 2009), é expresso como a  $t_{bs}$  da condição de referência, que induz a mesma resposta fisiológica do indivíduo caso submetido a um ambiente térmico real (BLAZEJCZYK et al., 2010).

O UTCI adota as faixas climáticas  $-50^{\circ}\text{C} \leq t_{bs} \leq 50^{\circ}\text{C}$ ,  $-30^{\circ}\text{C} \leq$  temperatura radiante média ( $t_{rm}$ ) -  $t_{bs} \leq 70^{\circ}\text{C}$ ,  $V$  entre 0,5 e 30,3  $\text{m s}^{-1}$  e UR de 5% a 100%. Desse modo, este índice é equivalente para a combinação das variáveis climáticas  $t_{bs}$ , radiação, vento e UR, sendo caracterizado como a temperatura de um ambiente de referência, que produz o mesmo valor de estresse térmico do ambiente real (COUTO NINCE et al., 2013).

O UTCI foi desenvolvido para estabelecer os seguinte princípios: ser termo fisiologicamente significativa em toda a gama de troca de calor; ser aplicável em cálculos que englobem todo o corpo, mas podendo ser aplicado, também, na avaliação de resfriamento local da pele; poder ser utilizado em todos os climas, estações e escalas de micro para macro; ser útil em aplicações-chave em biometeorologia humana (como em serviços meteorológicos e de saúde pública); e representar um índice de medição de temperatura (BLAZEJCZYK et al., 2010).

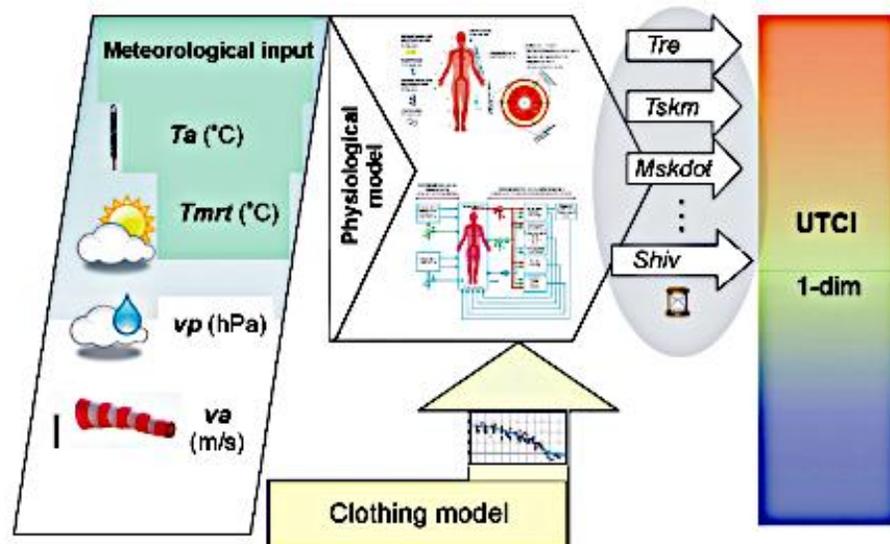
As condições de referência para o UTCI são:  $V$  equivalente a 0,5  $\text{m s}^{-1}$  a uma altura de 10 m em relação ao solo;  $t_{rm}$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) idêntica a  $t_{bs}$  ( $^{\circ}\text{C}$ ); e que representa a UR igual a 50% (na presença

de altas  $t_{bs}$  ( $>29^{\circ}\text{C}$ ), a UR de referência é admitida como constante (20hPa); taxa metabólica de 2,3 met ( $135 \text{ W m}^{-2}$ ) (BLAZEJCZYK et al., 2010).

Este índice considera a adequação das vestimentas como uma importante resposta comportamental às condições climáticas. Devido a isto, o UTCI tinha como filosofia ponderar hábitos sazonais de vestimentas dos europeus baseados em dados de pesquisas realizadas em campo, objetivando a obtenção de dados realistas que afetam o comportamento humano quanto a sua percepção do clima ao ar livre (BLAZEJCZYK et al., 2010).

O valor do índice é obtido por meio da saída dinâmica multivariada do modelo (figura 1).

Figura 1 - Esquema de avaliação climática por meio do índice de clima térmico universal (UTCI) obtido pela produção dinâmica de um modelo termofísico ampliado por um modelo de vestuário.



Fonte: BLAZEJCZYK et al. (2010).

As respostas do UTCI devem indicar processos fisiológicos e termorreguladores (tabela 10), os quais são tratados como significantes para a reação humana a condições térmicas neutras, moderadas e extremas (KAMPMANN et al., 2008).

Tabela 10 - Variáveis disponíveis por meio da resposta do modelo termofisiológico (após períodos de exposição iguais a 30 minutos e 120 minutos).

Variável	Abreviação	Unidade
Temperatura retal	Ter	°C
Temperatura média da pele	Tskm	°C
Temperatura da pele do rosto	Tskfc	°C
Produção de suor	Mskdot	g min <sup>-1</sup>
Calor gerado pelo tremor	Shiv	W
Pele molhada	wettA	% da área do corpo
Fluxo sanguíneo da pele	VblSk	% de valor basal

Fonte: BLAZEJCZYK et al. (2010).

O UTCI pode ser calculado por meio da equação 18.

$$UTCI = 0,995 \cdot t_{bs} + 0,27 \cdot (t_{rm} - t_{bs}) \cdot r^2 = 0,99 \quad (18)$$

em que,

$UTCI$ : índice de clima térmico universal (°C);

$t_{bs}$ : temperatura de bulbo seco do ar (°C);

$t_{rm}$ : temperatura radiante média (°C).

A  $t_{rm}$  pode ser obtida por meio da equação 19, a qual pode ser aplicada em ambientes cobertos como pátios (NOGUEIRA; DUARTE; SOUZA NOGUEIRA, 2005).

$$t_{rm} = t_g + k \cdot [V \cdot (t_g - t_{bs})]^{1/2} \quad (19)$$

em que,

$t_g$ : temperatura de globo (°C);

$k$ : coeficiente relacionado com a unidade das temperaturas, para escala em °C,  $k$  será 2,22;

$V$ : velocidade do vento ao nível do globo (m s<sup>-1</sup>);

$t_{bs}$ : temperatura de bulbo seco do ar (°C).

A tabela 11 lista categorias de estresse humano classificadas por valores do índice UTCI (°C).

Tabela 11 - Categorias de estresse humano classificadas pelas faixas de valores do índice de clima térmico universal (UTCI).

Faixa de UTCI (°C)	Categoria de estresse
Acima de +46	Estresse de calor extremo
+38 – +46	Estresse de calor muito forte
+32 – +38	Estresse de calor forte
+26 – +32	Estresse de calor moderado
+ 9 – +26	Nenhum estresse
+ 9 – 0	Estresse de frio leve
0 – -13	Estresse de frio moderado
-13 – -27	Estresse de frio forte
-27 – -40	Estresse de frio muito forte
Abaixo de -40	Estresse de frio extremo

Fonte: Adaptado de PANAGIOTIS; NASTOS; MATZARAKIS (2012).

### 2.1.12 Índice voto médio previsto (PMV)

A sensação térmica pressentida por uma pessoa, baseada no voto médio previsto, originalmente nomeado *predicted mean vote* (PMV) (FANGER, 1970), é definida pela escala ilustrada na figura 02. Este é um índice que pode ser determinado quando a atividade (taxa metabólica) e as vestimentas (resistência térmica) são conhecidas, além da mensuração de variáveis físicas, tais como:  $t_{bs}$ ,  $t_{rm}$ ,  $V$  e  $UR$ . Vale ressaltar que o PMV é baseado no balanço de calor do corpo humano com o ambiente (ISO 7726, 1985).

Figura 2 - Escala de sensação térmica baseada no índice voto médio previsto (PMV).



Fonte: ISO 7730 (1994).

O PMV é avaliado segundo uma escala de 7 valores, os quais variam de -3 (muito frio) a +3 (muito quente). Em um ambiente considerado dentro da zona de conforto térmico estabelecido pela norma ISO 7730 (1994), o PMV deve se encontrar no intervalo de -0,5 a +0,5. As equações 20 a 22 são usadas para o cálculo do PMV (ISO 7730, 1994).

$$PMV = (0,303 \cdot e^{-0,036 \cdot M} + 0,028) \cdot \{(M - W) - 3,05 \cdot 10^{-3} \cdot [5733 - 6,99 \cdot (M - W) - p_a] - 0,42 \cdot [(M - W) - 58,15] - 1,7 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot (5867 - e) - 0,001 \cdot 4 \cdot M \cdot (34 - t_{bs}) - 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (t_{rm} + 273)^4] - f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_{bs})\} \quad (20)$$

$$t_{cl} = 35,7 - 0,028 \cdot (M - W) - I_{cl} \cdot \{3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (t_{rm} + 273)^4] + f_{cl} h_c \cdot (t_{cl} - t_{bs})\} \quad (21)$$

$$h_c = 2,4 \cdot (t_{cl} - t_{bs})^{0,25} \text{ ou } h_c = 12,1 \cdot V^{0,5} \text{ (adotar o maior valor)} \quad (22)$$

em que,

$PMV$ : voto médio previsto (adimensional);

$M$ : taxa metabólica ( $W m^{-2}$ );

$W$ : trabalho extremo ( $W m^{-2}$ );

$p_a$ : pressão parcial do vapor d'água (hPa);

$e$ : pressão de vapor d'água (hPa);

$t_{bs}$ : temperatura de bulbo seco do ar ( $^{\circ}C$ );

$f_{cl}$ : razão entre a área da pele vestida e nua;

$t_{cl}$ : temperatura superficial da roupa ( $^{\circ}C$ );

$t_{rm}$ : temperatura radiante média ( $^{\circ}C$ );

$h_c$ : coeficiente de troca convectiva ( $W m^{-2} ^{\circ}C$ );

$I_{cl}$ : isolamento térmico da roupa ( $m^2 ^{\circ}C W^{-1}$ );

$V$ : velocidade do vento ( $m s^{-1}$ ).

O uso do PMV é aconselhável quando valores de variáveis ambientais e pessoais se caracterizarem conforme os expostos na tabela 12 (MOURA, 2012).

Tabela 12 - Recomendações de valores para uso do índice de voto médio previsto (PMV).

Variáveis	Valores
M	46 – 232 W m <sup>-2</sup> (0,8 met a 4 met)
I <sub>cl</sub>	0 – 0,310 m <sup>2</sup> °C W <sup>-1</sup> (0 a 2 clo)
t <sub>bs</sub>	10 – 30°C
t <sub>rm</sub>	10 – 40°C
V	0 – 1 m s <sup>-1</sup>
p <sub>a</sub>	0 – 2.700 Pa

Fonte: Adaptação da ISO 7730 (2005).

Nota: M: taxa metabólica; I<sub>cl</sub>: resistência térmica das roupas (W m<sup>-2</sup>); t<sub>bs</sub>: temperatura de bulbo seco do ar (°C); t<sub>rm</sub>: temperatura radiante média (°C); V: velocidade relativa do ar (m s<sup>-1</sup>) p<sub>a</sub>: pressão parcial do vapor d'água (hPa).

Atividades físicas ocasionam a dissipação de energia térmica (tabela 13). A quantidade de energia liberada depende da quantidade de atividade muscular, assim, quanto maior o número de atividade física, maior será o metabolismo.

Tabela 13 - Taxa metabólica para diferentes tipos de atividades.

Atividade	Metabolismo	
	W m <sup>-2</sup>	met
Reclinado	46	0,8
Sentado relaxado	58	1,0
Atividade sedentária (escritório, escola, etc.)	70	1,2
Fazer compras, atividades laboratoriais	93	1,6
Trabalhos domésticos	116	2,0
Caminhando em local plano a 2 km h <sup>-1</sup>	110	1,9
Caminhando em local plano a 3 km h <sup>-1</sup>	140	2,4
Caminhando em local plano a 4 km h <sup>-1</sup>	165	2,8
Caminhando em local plano a 5 km h <sup>-1</sup>	200	3,4

Fonte: ISO 7730 (2005).

Nota: met: metabolismo por metro quadrado (1met: 58,2 W m<sup>-2</sup>).

Os diversos tipos de vestimentas conferem diferentes níveis de resistência térmica (clo) entre o corpo e o meio (tabela 14).

Tabela 14 - Índice de resistência térmica para vestimentas.

<b>Vestimenta</b>	<b>Índice de resistência térmica - Icl (clo)</b>
Meia calça	0,10
Meia fina	0,03
Meia grossa	0,05
Calcinha e sutiã	0,03
Cueca	0,03
Cuecão longo	0,10
Camiseta de baixo	0,09
Camiseta de baixo mangas compridas	0,12
Camisa manga curta	0,15
Camisa fina mangas compridas	0,20
Camisa manga comprida	0,25
Camisa flanela manga comprida	0,30
Blusa com mangas compridas	0,15
Saia grossa	0,25
Vestido leve	0,15
Vestido grosso manga comprida	0,40
Jaqueta	0,35
Calça fina	0,20
Calça média	0,25
Calça flanela	0,28
Sapatos	0,04

Fonte: ISO 7730(2005).

Nota: 1 clo: 0,155 m<sup>2</sup>°C W<sup>-1</sup>.

Em pesquisas desenvolvidas por Humphreys (1994), determinou-se que o PMV obtém resultado mais precisos quando estudado em laboratório e considerando atividades sedentárias e roupas leves, porém, existe maior inconsistência nos dados entre o PMV e o voto médio real quando consideradas roupas mais pesadas e níveis de atividade superior (CHARLES, 2003).

### 2.1.13 Percentual previsto de insatisfeitos (PPD)

O percentual previsto de insatisfeitos, originalmente nomeado *predicted percentage of dissatisfied* (PPD) (FANGER, 1982), indica a percentagem de pessoas insatisfeitas com condições térmicas de um ambiente e está diretamente relacionado com o PMV, pois a partir da associação

destes, é obtida a percentagem de pessoas insatisfeitas (BATISTA, 2010). O cálculo do PPD pode ser efetuado analiticamente em função do PMV, conforme equação 23 (ISO 7730, 1994).

$$PPD = 100 - 95 \cdot e^{(0,03353 \cdot PMV^4 + 0,2179 \cdot PMV^2)} \quad (23)$$

em que,

*PPD*: percentual previsto de insatisfeitos (adimensional);

*PMV*: voto médio previsto (adimensional).

Os valores de incerteza do PMV são relativamente inferiores aos números de incerteza do PPD. Existe também, maior variação da incerteza do PPD com a alteração das condições iniciais de cálculo e suas incertezas, quando comparados às incertezas do PMV (OLIVEIRA, 2008).

O uso do PPD é aconselhável quando seu valor é menor ou igual a 10% para ser tratado como termicamente confortável (MOURA, 2012).

#### 2.1.14 Índices de temperatura efetiva (TE)

O índice temperatura efetiva (TE), originalmente denominado *effective temperature index* (ET) (HOUGHTON; YAGLOU, 1923), foi proposto como um método para determinar os efeitos relativos da  $t_{bs}$  e UR no conforto. Em sua forma original, este índice abrangeu a faixa de temperatura de 1°C a 45°C, mas, no entanto, foi aplicado para determinar o nível de estresse por calor. Vernon e Warner (1932) trocaram a  $t_{bs}$  pela temperatura de globo negro para permitir que a radiação fosse considerada (*corrected effective temperature* ou em tradução, temperatura efetiva corrigida – CET). A partir de então, inúmeras atualizações foram realizadas no índice básico, sendo todas objetivando a classificação do estresse térmico (BLAZEJCZYK et al., 2012).

A TE pode ser calculada pela equação 24 (MISSENARD, 1937).

$$TE = t_{bs} - 0,4 \cdot \left(1 - \frac{UR}{100}\right) \cdot (t_{bs} - 10) \quad (24)$$

em que,

*TE*: temperatura efetiva (°C);

$t_{bs}$ : temperatura de bulbo seco do ar ( $^{\circ}\text{C}$ );

$UR$ : umidade relativa do ar (%).

As faixas de valores do índice de temperatura efetiva associados a sensações térmicas em humanos são listadas na tabela 15.

Tabela 15 - Sensações térmicas em humanos adotadas para o índice de temperatura efetiva (TE).

TE ( $^{\circ}\text{C}$ )	Sensação térmica em humanos
$TE < 25$	Limite para conforto com relação ao calor
$25 \leq TE < 29,2$	Sensação de calor moderado

Fonte: Adaptação de SANTOS (2015).

### 2.1.15 Índice de temperatura efetiva em função do vento (TE<sub>v</sub>)

O índice de temperatura efetiva em função do vento (TE<sub>v</sub>), originalmente denominado *effective temperature as a function of wind* (ETW), é baseado não somente nas variáveis  $t_{bs}$  e  $UR$ , como também na velocidade do vento ( $V$ ) (HOUGHTON; YAGLOU, 1923). O TE<sub>v</sub> pode ser calculado por meio da equação 25 (MISSENARD, 1937).

$$TE_v = 37 - \frac{37 - t_{bs}}{0,68 - 0,0014 \cdot UR + \frac{1}{1,76 + 1,4 \cdot V^{0,75}}} - 0,29 \cdot t_{bs} \cdot (1 - 0,01 \cdot UR) \quad (25)$$

em que,

$TE_v$ : temperatura efetiva em função do vento ( $^{\circ}\text{C}$ );

$t_{bs}$ : temperatura de bulbo seco do ar ( $^{\circ}\text{C}$ );

$UR$ : umidade relativa do ar (%);

$V$ : velocidade do vento a uma altura em relação ao solo de 1,2 m ( $\text{m s}^{-1}$ ).

A distribuição das zonas de conforto em relação a distintos níveis de percepção térmica e as reações fisiológicas relacionadas através do TE<sub>v</sub> foram estabelecidas por Fanger (1970) (tabela 16).

Tabela 16 - Sensação térmica e grau de estresse fisiológico por faixas de valores do índice de temperatura efetiva em função do vento (TEv).

<b>TEv (°C)</b>	<b>Sensação térmica</b>	<b>Grau de estresse fisiológico</b>
TEv < 13	Muito frio	Extremo estresse ao frio
13 ≤ TEv < 16	Frio	Tiritar
16 ≤ TEv < 19	Frio moderado	Ligeiro resfriamento do corpo
19 ≤ TEv < 22	Ligeiramente frio	Vasoconstrição
22 ≤ TEv < 25	Confortável	Neutralidade térmica
25 ≤ TEv < 28	Ligeiramente quente	Ligeiro suor; vasodilatação
28 ≤ TEv < 31	Quente moderado	Suando
31 ≤ TEv < 34	Quente	Suor em profusão
TEv > 34	Muito quente	Falha na termorregulação

Fonte: FANGER (1970).

Uma classificação comumente aceita para avaliação da TE e TEv é a adotada pelo laboratório MASTER do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo, a qual é empregada na previsão das condições de conforto térmico nas regiões sul, sudeste e centro-oeste do Brasil (tabela 17). O intervalo entre 22°C e 25°C é caracterizado como termicamente confortável pelo laboratório referenciado. Este considera os valores abaixo de 22°C correspondentes a sensações que variam de ligeiramente fresco a muito frio e os acima de 25°C, àqueles associados a sensações que variam de ligeiramente quente a muito quente (SOUZA; NERY, 2013).

Tabela 17 - Classificação da sensação térmica e do grau de estresse fisiológico por faixas de valores dos índices de temperatura efetiva (TE) e de temperatura efetiva em função do vento (TEv) para humanos de acordo com o laboratório MASTER – IAG/USP.

<b>TE e TEv (°C)</b>	<b>Sensação térmica</b>	<b>Grau de estresse fisiológico</b>
< 05	Muito frio	Extremo estresse ao frio
05 – 10	Frio	Extremo estresse ao frio
10 – 13	Moderadamente frio	Tiritar
13 – 16	Ligeiramente frio	Resfriamento do corpo
16 – 19	Pouco frio	Ligeiro resfriamento do corpo
19 – 22	Ligeiramente fresco	Vasoconstrição
22 – 25	Confortável	Neutralidade térmica
25 – 28	Ligeiramente quente	Ligeiro suor; Vasodilatação
28 – 31	Quente moderado	Suando
31 – 34	Quente	Suor em profusão
> 34	Muito quente	Falha na termorregulação

Fonte: MASTER - IAG/USP (2009)

## 2.2 Série temporal

A série temporal é definida como a maneira de organizar em um espaço temporal informações quantitativas, sendo um recurso aplicável a diferentes finalidades e campos de conhecimento.

As séries temporais podem ser aplicadas para o zoneamento bioclimático, como nos estudos referentes a análise das propostas de revisão do zoneamento bioclimático brasileiro (estudo de caso de Colatina, ES) (AMORIN; CARLO, 2017), no mapeamento bioclimático do estado do Rio de Janeiro (CRONEMBERGER, 2011) e na análise bioclimática em habitações obedecendo uma sequência temporal e diversidade de técnicas construtivas na cidade de Barra do Bugres, MT (CARIGNANI; AZEREDO; FERREIRA, 2008).

Ao se fazer uma análise por meio de série temporal, a variável observada é associada ao período anterior, apresentando dessa forma uma série. Modelos baseados em séries temporais oferecem capacidades de previsão e aplicabilidade mais amplas do que técnicas não-temporais (SATO, 2013).

Em outra analogia, série temporal ordena dados históricos que possuem semelhanças ao longo do tempo de acordo com a sequência lógica deste. Os dados coletados podem ser caracterizados em distintas escalas temporais, como diária, semanal, mensal, trimestral ou anual. Os dados consistem em quatro componentes: tendência, efeito sazonal, cíclico e efeito irregular. A análise de séries temporais utiliza técnicas de previsão para identificar modelos de dados passados, com o pressuposto de que eventos futuros podem ser previstos com base em dados atuais (CHUJAI; KERDPRASOP; KERDPRASOP, 2013).

Uma série temporal pode ser dita como contínua ou discreta. Na primeira classificação, as observações são realizadas continuamente no tempo. Determinando o conjunto  $T = \{t : t_1 < t < t_2\}$  a série temporal é expressada por  $\{X(t) : t \in T\}$ . Discreta é a classificação dada quando as observações são feitas em tempos específicos, normalmente equiespaçados. Definindo o conjunto  $T = \{t_1, \dots, t_n\}$  a série temporal é representada por  $\{X_t : t \in T\}$ . De maneira simplificada, tem-se  $T = \{1, 2, \dots, n\}$  (EHLERS, 2009).

O uso de técnicas para análises de séries temporais se faz necessário. A proposta por Mann-Kendall trata de um teste não paramétrico que não exige que os dados sejam normalmente

distribuídos. Destaca-se também, que este teste apresenta baixa sensibilidade a rupturas bruscas devido à não homogeneidade das séries temporais (TABARI; TALAEE, 2011).

O método Mann-Kendall pode ser utilizado na detecção de tendências climáticas, como nos estudos sobre a detecção de tendências monótonas em séries mensais de precipitação pluvial do estado de São Paulo (BLAIN, 2010), na análise de tendência das séries temporais de precipitação da região sul do Brasil (PINHEIRO; GRACIANO; SEVERO, 2013) e na análise de tendências em séries temporais anuais de dados climáticos e hidrológicos na bacia do rio Parnaíba entre os estados do Maranhão e Piauí, Brasil (PENNEREIRO; ORLANDO, 2013).

Os dados relatados como não detectados são incluídos no teste de Mann-Kendall, sendo atribuídos a eles um valor comum que é inferior ao menor valor medido no conjunto de dados. De acordo com o teste, a hipótese nula ( $H_0$ ) pressupõe que não há tendências (dados independentes e ordenados aleatoriamente) e isto é testado novamente contra a hipótese alternativa ( $H_1$ ), na qual assume-se que existe uma tendência. O procedimento computacional para a realização deste teste considera uma série temporal com  $n$  pontos de dados, tendo  $T_i$  e  $T_j$  como dois subconjuntos. Os valores dos dados são então avaliados como uma série temporal ordenada. Cada valor é comparado com todos os outros subsequentes. Caso em um período superior, o valor comparado seja maior que um valor presente em um período anterior, a estatística  $S$  é incrementada em 1. Por outro lado, se o valor de um dado pertencente a um período posterior for inferior a um valor de dados amostrado anteriormente,  $S$  é decrementado de 1. O resultado de todos incrementos e decrementos representa o valor final de  $S$  (KARMESHU, 2012).

### **2.3 Zoneamento bioclimático brasileiro**

A zona bioclimática designa o território geográfico homogêneo quanto aos elementos climáticos que intervêm nas relações entre ambiente construído e conforto-humano (NBR 15220, 2003).

A norma brasileira regulamentadora (NBR) 15220 (2003) institui o zoneamento bioclimático do país, delineando características e recomendações para cada zona existente. O INMET do ministério da agricultura, pecuária e abastecimento (MAPA) fornece informações pertinentes ao clima através de bases de dados próprias, que abrangem, em meio a outras

informações, dados condizentes as temperaturas e umidades máximas e mínimas mensais médias, pluviosidades e direções do vento (PLENTZ GIRALT; ANZOLCH, 2015).

Os critérios empregados para constituir o zoneamento de conforto térmico variam entre países ou mesmo entre regiões características. Nos Estados Unidos, a *building america climate regions*, adota critérios diários de aquecimento e resfriamento, enquanto que a comissão de energia da Califórnia, classifica zonas geográficas baseando em condições climáticas características que estabelecem o desenvolvimento de um determinado requisito de eficiência energética. Na China, o zoneamento térmico fundamenta-se na análise dos dados das estações meteorológicas de temperaturas médias dos meses mais quentes e mais frios do ano, e na contagem de dias com temperaturas médias inferiores a 5°C e superiores a 25°C. No Brasil, zonas bioclimáticas sugerem apenas estratégias de projeto para construções e sua grade de métodos de interpolação adotados não considera como fator a variação de altitude (PAWAR; MUKHERJEE; SHANKAR, 2015).

O zoneamento bioclimático brasileiro divide o território nacional em 8 zonas, sendo a oitava a maior em extensão territorial (mais de 53%). Contudo, esta zona agrupa cidades com características climáticas distintas, o que torna questionável a adoção de diretrizes construtivas idênticas para um grupo de cidades que demonstram comportamentos desiguais pertinentes às suas principais propriedades climáticas (PEDRINI et al., 2009).

Com grande parte do território situado em zonas tropicais, diversos requisitos de conforto e economia de energia se tornam fundamentais no Brasil. Baseados nesta argumentação, autores consideram recomendações de diretrizes para a construção e estratégias para condicionamento térmico passivo. Essas recomendações consideram as divisões do território nacional em zonas bioclimáticas, fornecendo dados relacionados à resistência térmica, inclusive sobre propriedades térmicas da maioria dos materiais e componentes no país. Este zoneamento é baseado nos parâmetros de conforto *american society of heating & refrigeration & AC engineering* (ASHARE, 2004) e na carta bioclimática de Givoni (GIVONI, 1969). A carta bioclimática oferece recomendações para projetistas, como características térmicas de telhados e paredes. Nesta, existem letras que correspondem a estratégias específicas e adequadas a serem aplicadas em países tropicais (TEIXEIRA; LABAKI, 2013).

Embasados no respectivo mapa, estudos podem obter o clima de cidades e relacioná-lo com tabelas que informam as medidas e diretrizes construtivas bioclimáticas para cada local, neste caso, onde será projetada e construída uma edificação.

### **3 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Devido a existência de correlação entre o clima, saúde e desempenho humano, verifica-se a necessidade de pesquisas que estudem as condições de conforto associadas ao ambiente térmico. Trabalhadores que desenvolvem as suas atividades laborais em ambientes externos estão, geralmente, expostos a ambientes térmicos desconfortáveis ao longo de boa parte do tempo. Ademais, as mudanças climáticas podem agravar este problema quando se considera cenários futuros. Neste contexto, estudos de metodologias para análises e classificações em bases de dados constatarem-se imprescindíveis para estudos bioclimáticos, cujos resultados viabilizam a busca por soluções precedentes, como a concepção de edificações, o uso de equipamentos de proteção individual por parte dos trabalhadores e a adequação de horários de atividades.

## REFERÊNCIAS

- ALFANO, F. R. A. D.; PALELLA, B. I.; RICCIO, G. **Thermal environment assessment reliability using temperature-humidity indices**. *Industrial health*, v. 49, n. 1, p. 95-106, 2011.
- AMARO, A. L. N. **Zoneamento bioclimático do conforto humano para o estado de Minas Gerais com base no índice de temperatura e umidade**. 2016. 50 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas e Automação)-Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2016.
- AMORIM, A. C.; CARLO, J. C. **Análise das propostas de revisão do zoneamento bioclimático brasileiro: estudo de caso de Colatina, ES**. *Ambiente Construído*, v. 17, n. 1, p. 373-391, 2017.
- ASHRAE 55. **Handbook of fundamentals**. Atlanta: **American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers**, Inc, 2005. ANSI/ASHRAE Standard 55-2004, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Inc, 2004.
- ASHRAE 55 ASHRAE Standard 55-2010. **Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy**. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, 2010.
- ASHRAE. **American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers**, Handbook Fundamentals Volume, Chap. 8. Thermal Comfort, 8.1 - 8.28, 1997.
- BARCELLOS, C. et al. **Mudanças climáticas e ambientais e as doenças infecciosas: cenários e incertezas para o Brasil**. *Epidemiologia e Serviços de Saúde*, v. 18, n. 3, p. 285-304, 2009.
- BATISTA, J. B. et al. **O ambiente que adoce: condições ambientais de trabalho do professor do ensino fundamental**. *Cad Saúde Colet*, v. 18, n. 2, p. 234-42, 2010.
- BLAIN, G. C. **Detecção de tendências monótonas em séries mensais de precipitação pluvial do Estado de São Paulo**. *Bragantia*, v. 69, n. 4, 2010.
- BLAZEJCZYK, K. et al. **Principles of the new Universal Thermal Climate Index (UTCI) and its application to bioclimatic research in European scale**. *Miscellanea Geographica*, v. 14, n. 2010, p. 91-102, 2010.
- BLAZEJCZYK, K. et al. **Comparison of UTCI to selected thermal indices**. *International journal of biometeorology*, v. 56, n. 3, p. 515-535, 2012.
- BRASIL. Ministério do Trabalho. **NR-15: atividades e operações insalubres**. Brasília, DF, 1978.
- CARIGNANI, G.; AZEREDO, J.; FERREIRA, A. P. **Análise bioclimática em habitações obedecendo a uma sequência temporal e diversidade de técnicas construtivas na cidade de**

**barra do BUGRES-MT.** Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 12., Fortaleza, CE, 2008.

CHARLES, K.E. **Fanger's Thermal Comfort and Draught Models.** Institute for Research in Construction National Research Council of Canada, 2003.

CHUJAI, P.; KERDPRASOP, N.; KERDPRASOP, K. **Time series analysis of household electric consumption with ARIMA and ARMA models.** In: Proceedings of the International Multi Conference of Engineers and Computer Scientists. p. 295-300, 2013.

COST Action 730. **Towards a Universal Thermal Climate Index UTCI for assessing the thermal environment of the human being, Final Report.** Disponível em: <[http://www.cost.eu/COST\\_Actions/essem/730](http://www.cost.eu/COST_Actions/essem/730)>. Acesso em: 04 jul. 2017.

COUTO NINCE, P. C. et al. **Usos dos Índices PET e UTCI na Avaliação do Conforto Termal no Campus da UFMT em Cuiabá-MT.** Electronic Journal of Management, Education and Environmental Technology (REGET), v. 9, n. 9, p. 2026-2036, 2013.

CRONEMBERGER, F. M. et al. **Mapeamento Bioclimático do Estado do Rio de Janeiro.** Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Curitiba, PR, Brasil, INPE p.5745, 2011.

DEHGHAN, H. et al. **Combination of wet bulb globe temperature and heart rate in hot climatic conditions:** The practical guidance for a better estimation of the heat strain. International Journal of Environmental Health Engineering, v. 1, n. 1, p. 18, 2012.

EHLERS, R. S. **Análise de séries temporais:** laboratório de estatística e geo informação. 5. ed. [S.l.]: Universidade Federal do Paraná, 118 p., 2009.

**Environment and Climate Change.** Disponível em: <<http://www.ec.gc.ca/default.asp?lang=en&n=FD9B0E51-1>>. Acesso em: 24 jan. 2011.

FANGER, P.O. **Thermal Comfort.** Analysis and Application in Environment Engineering. Copenhagen: Danish Technical Press; 1970.

FANGER, P. O. **Thermal Comfort.** Florida: Robert E. Krieger Publishing Co., 1982.

FREITAS, E. de. **Aspectos naturais de Minas Gerais.** Brasil Escola. Disponível em: <<http://brasilecola.uol.com.br/brasil/aspectos-naturais-minas-gerais.htm>>. Acesso em: 06 set. 2017.

GIVONI, B. **Man, Climate and Architecture.** Elsevier Pub. Co. Ltd. 364, 1969.

HOUGHTON, F. C; YAGLOU, C. P. **Determining equal comfort lines.** J Am Soc Heat Vent Eng.;29:165 - 176, 1923.

HUMPHREYS, M. A. **Field studies and climate chamber experiments in thermal comfort research.** In N. A. Oseland & M. A. Humphreys (Eds.), *Thermal Comfort: Past Present and Future* (pp. 52- 72). Garston, UK: Building Research Establishment.1994.

IPCC. **Summary for Policymakers.** In: SOLOMON, S.; QIN, D.; MANNING, M.; ENHEN, Z.; MARQUIS, M.; AVERYT, K.B.; TIGNOR M.; MILLER, H.L. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. p. 2-18, 2007.

ISO/IEC 7726 - **International Organization for Standardization: 7726: Instrumentos e métodos de medição de parâmetros ambientais,** 1985.

ISO/IEC 7730 - **International Organization for Standardization: 7730: Moderate thermal environments - Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort,** 1994.

ISO/IEC 7730 - **International Organization for Standardization: ISO 7730. Moderate thermal environments - Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions of thermal comfort.** 2005.

KAMPMANN, B. et al. **Der Entwicklungsstand des klimatischen Belastungs-Index UTCI (Universal Thermal Climate Index),** [in:] Gesellschaft fürArbeitswissenschaft, Produkt- und Produktions-Ergonomie – Aufgabe für Entwickler und Planer, 54. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft, Dortmund: GfA - Press;243-246, 2008.

KARMESHU, N. **Trend detection in annual temperature & precipitation using the Mann Kendall test—a case study to assess climate change on select states in the northeastern United States.** 2012.

LAMBERTS, R.; XAVIER, A. A; GOULART, S. **Conforto e stress térmico.** LabEEE, UFSC, 2011.

MARTO, N. **Ondas de calor. Impacto sobre a saúde.** Acta Médica Portuguesa, p. 467-474, 2005.

MASTER – Meteorologia Aplicada a Sistemas de Tempo - IAG/USP. **Distribuição das zonas de conforto para diferentes graus de percepção térmica e suas respostas fisiológicas.** Disponível em:

<[http://www.master.iag.usp.br/conforto/previsao.php?ant=&var=temp\\_efet&t=2&gr=2&pref=2g&inic=00](http://www.master.iag.usp.br/conforto/previsao.php?ant=&var=temp_efet&t=2&gr=2&pref=2g&inic=00)>. Acesso em: 31 out. 2009.

MASTERSON, J.; RICHARDSON, F. A.; HUMIDEX, A. **Method of Quantifying Human Discomfort Due to Excessive Heat and Humidity.** Downsview, Ontario: Environment Canada; 1979.

- MATOS, R.; FERREIRA, R. N. **Brasil em Crise e o Emprego Formal no Sudeste**. Caminhos de Geografia, v. 18, n. 61, p. 150-164, 2017.
- MELES, B. A. **Ergonomia Industrial e Conforto Térmico em postos de trabalho**. Dissertação de Mestrado. Universidade de Aveiro, 2012.
- MISSENARD A. **L'Homme et le climat**. Paris, 1937.
- MOURA, L. F. **Verificação da existência de imprecisões nos valores do índice de isolamento térmico de vestimenta da norma ISO 9920: 2007**. Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2012.
- NBR 15220 - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Desempenho térmico de edificações Parte 1: Definições, símbolos e unidades**, 15220. Rio de Janeiro, 5 p., 2003.
- NÓBREGA, R. S.; VERÇOSA, T. **O microclima e o (des) conforto térmico em ambientes abertos na cidade do Recife**. Revista de Geografia (Recife)-ISSN: 2238-6211, v. 28, n. 1, p. 93-109, 2011.
- NOGUEIRA, C. E. C. et al. **Avaliação do conforto térmico nas residências convencional e inovadora do “Projeto CASA”**, Unioeste, Campus de Cascavel. v34i1. 10875. Acta Scientiarum. Technology, v. 34, n. 1, p. 3-7, 2011.
- NOGUEIRA, M. C. de J. A.; DUARTE, L. C.; SOUZA NOGUEIRA, J. de. **Conforto térmico na escola pública em Cuiabá-MT: estudo de caso**. REMEA-Revista Eletrônica do Mestrado em Educação Ambiental, v. 14, 2005.
- OLIVEIRA, A. R. C. S. **Avaliação da Incerteza na Determinação dos Índices de Conforto Térmico PMV e PPD**. Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica. Universidade de Coimbra. 2008.
- ONO, H. S. P.; KAWAMURA, T. **Sensible Climates in Monsoon Asia**. International Journal of Biometeorology, Vol. 35, nº XX, p.39-47, 1991.
- PANAGIOTIS, T.; NASTOS, P.T.; MATZARAKIS, A. **The effect of air temperature and human thermal indices on mortality in Athens, Greece**. Theor Appl Climatol 108:591 - 599. 2012.
- PAWAR, A. S.; MUKHERJEE, M.; SHANKAR, R. **Thermal comfort design zone delineation for India using GIS**. Building and Environment, v. 87, p. 193-206, 2015.
- PEDRINI, A. et al. **Desempenho térmico de tipologias de habitações de interesse social para seis cidades brasileiras**. UFRN. Natal, p. 89. 2009.
- PENEREIRO, J. C.; ORLANDO, D. V. **Análises de tendências em séries temporais anuais de dados climáticos e hidrológicos na bacia do rio Parnaíba entre os estados do Maranhão e Piauí/Brasil**. Revista geográfica acadêmica, v. 7, n. 2, p. 5-21, 2013.

PINHEIRO, A.; GRACIANO, R. L. G.; SEVERO, D. L. **Análise de tendência das séries temporais de precipitação da região sul do BRASIL.** Revista Brasileira de Meteorologia, v. 28, n. 3, 2013.

PLENTZ GIRALT, R.; ANZOLCH, R. **Eficiência energética e certificação como condicionantes de projeto: experiência acadêmica.** In: XXXIV Encuentro Arquisur 2015 y XIX Congreso de Escuelas y Facultades Públicas de Arquitectura de los países de América del Sur (La Plata, Argentina), 2015.

ROTHFUSZ, L. P. **The heat index equation.** NWS Southern Region Technical Attachment, SR/SSD 90 - 23, Fort Worth, Texas, 1990.

SANTOS, J. B. dos. **Análise do conforto térmico humano no município de Arapiraca – alagoas, utilizando software Matlab.** Revista Brasileira de Geografia Física, v. 7, n. 5, p. 939-948, 2015.

SANTOS, W. R. T.; MELO, M. L. D. **Índices de Conforto e Desconforto Térmico Humano segundo os Cenários Climáticos do IPCC.** In: XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia, Belém do Pará - PA. 2010.

SATO, R. C. **Disease management with ARIMA model in time series.** Einstein (São Paulo), v. 11, n. 1, p. 128-131, 2013.

SILVA, I. M. da.; GONZALEZ, L. R.; SILVA, D. F. F. da. **Recursos naturais de conforto térmico: um enfoque urbano.** 2011.

SILVA, L. B.; SANTOS, R. L. S.; MARINHO, T. B.; SOUZA, E. L. **Adequação de estimadores regressivos no estudo da relação entre produtividade e conforto térmico.** In: XXXI Encontro Nacional de Engenharia de Produção (ENEGEP), 2011, Belo Horizonte - MG. Inovação Tecnológica e Propriedade Intelectual: Desafios da Engenharia de Produção na Consolidação do Brasil no Cenário Econômico Mundial, 2011.

SIPLE, P. A.; PASSEL C. F. **Measurements of dry atmospheric cooling in subfreezing temperatures.** Proceedings of the American Philosophical Society, 89 (1), p.177-199, 1945.

SOUZA, A. de. et al. **Um estudo de conforto e desconforto térmico para o Mato Grosso do Sul.** Revista de Estudos Ambientais, v. 12, n. 2, p. 15-25, 2010.

SOUZA, D. M. de.; NERY, J. T. **O conforto térmico na perspectiva da Climatologia Geográfica.** Geografia (Londrina), v. 21, n. 2, p. 65-83, 2013.

STEADMAN, R.G. **The assessment of sultriness. Part I: A temperature-humidity index based on human physiology and clothing science.** J Appl Meteorol 18:861 - 873, 1979.

TABARI, H.; TALAEI, P. H. **Temporal variability of precipitation over Iran: 1966 - 2005.** Journal of Hydrology, v. 396, n. 3, p. 313-320, 2011.

TEIXEIRA, C. F. B.; LABAKI, L. C. **Study of thermal behaviour of roofing on subtropical climate: The use of radiant barrier.** 2013.

TETENS, O. **Über einige meteorologische Begriffe.** Z. Geophys., n.6, p. 297-309, 1930.

THOM, E.C. **The discomfort index Weatherwise.** 60:12-57, 1959.

VERNON, H. M.; WARNER, C. G. **The influence of the humidity of the air on capacity for work at high temperatures.** J Hyg 32:431–462, 1932.

VIANELLO, R. L.; ALVES, A. R. **Meteorologia básica e aplicações.** 2. ed. Viçosa, MG: UFV, 460 p., 2012.

YAGLOU, C. P, MINARD, D. A. **Arch Ind Health.** Oct; 16(4):302-16, 1957.

WILLETT, K. M.; SHERWOOD, S. **Exceedance of heat index thresholds for 15 regions under a warming climate using the wet-bulb globe temperature.** International Journal of Climatology, v. 32, n. 2, p. 161-177, 2012.

## SEGUNDA PARTE

**ARTIGO:** Variabilidade espaço-temporal do conforto térmico humano para trabalhadores de regiões de clima tropical aplicada para o estado de Minas Gerais, Brasil

Artigo a ser submetido à revista *Computers and Electronics in Agriculture* e formatado conforme as normas estabelecidas por ela.

## Variabilidade espaço-temporal do conforto térmico humano para trabalhadores de regiões de clima tropical aplicada para o estado de Minas Gerais, Brasil

Lucas Rodrigues Oliveira <sup>1</sup>, Tadayuki Yanagi Junior <sup>2</sup>, Gabriel Araújo e Silva Ferraz <sup>3</sup>, Sílvia de Nazaré Monteiro Yanagi <sup>4</sup>

INFORMAÇÕES DO ARTIGO	RESUMO
<p><i>Palavras-chave:</i> Ambiente térmico humano Índice de temperatura efetiva em função do vento Teste de Mann-Kendall Zoneamento bioclimático</p>	<p>Objetivou-se com este estudo propor o zoneamento bioclimático de classificação do conforto e desconforto térmico para humanos voltada a trabalhadores de regiões de clima tropical aplicada para o estado de Minas Gerais, Brasil, considerando cenários histórico e futuros. Séries históricas (1961 a 2017) do índice de temperatura efetiva em função do vento mínimo (<math>TEv_{\min}</math>, °C), médio (<math>TEv_{\text{méd}}</math>, °C) e máximo (<math>TEv_{\max}</math>, °C) foram obtidas em função dos valores médios mensais da temperatura de bulbo seco do ar mínima (<math>t_{bs,\min}</math>, °C), compensada (<math>t_{bs,\text{comp}}</math>, °C) e máxima (<math>t_{bs,\max}</math>, °C), umidade relativa média (<math>UR</math>, %) e velocidade do vento média (<math>V</math>, <math>\text{m s}^{-1}</math>). Dados, oriundos de 34 estações meteorológicas, foram submetidos às análises de tendências por meio do teste não-paramétrico de Mann-Kendall, permitindo assim, a simulação de cenários futuros (para os anos 2028 e 2038). Mapas bioclimáticos do <math>TEv_{\min}</math>, <math>TEv_{\text{méd}}</math> e <math>TEv_{\max}</math> foram gerados a partir de análise geoestatística. No geral, os resultados evidenciam tendências de aquecimento para as duas próximas décadas nos municípios de Minas Gerais. Portanto, verifica-se ao considerar cenários futuros para as estações de outono e inverno, propensões a sensações térmicas de conforto térmico humano, especialmente nas mesoregiões Central de Minas, Metropolitana de Belo Horizonte, Sul/Sudoeste de Minas, Campos das Vertentes e Zona da Mata. As estações verão e primavera possuem disposições para climas moderadamente quentes, em respeito a áreas das mesoregiões do Triângulo Mineiro, Noroeste e Norte de Minas, Jequitinhonha e Vale do Mucuri.</p>

<sup>1</sup> Mestrando em Engenharia de Sistemas e Automação, DEG/UFLA, (0XX37) 99135.6815, lucasrodriguesoliveira@hotmail.com

<sup>2</sup> Prof. Adjunto, DEG/UFLA, Caixa Postal 3037, Lavras - MG, Brasil, (0XX35) 3829.1374, yanagi@deg.ufla.br

<sup>3</sup> Prof. Adjunto, DEG/UFLA, Caixa Postal 3037, Lavras - MG, Brasil, (0XX35) 3829.4566, gabriel.ferraz@deg.ufla.br

<sup>4</sup> Profa. Adjunta, DEG/UFLA, Caixa Postal 3037, Lavras - MG, Brasil, (0XX35) 2142.2025, silvia.yanagi@deg.ufla.br

## 1. Introdução

A região sudeste do país possui aproximadamente 40% da população brasileira e abrange as maiores metrópoles e uma grande infraestrutura produtiva. Apesar de possuir áreas urbanas sofisticadas e bem equipadas, municípios de pequeno porte são igualmente proeminentes a oferta de empregos formais devido a existência de atividades produtivas diversificadas. A metade da produção nacional, praticamente, situa-se no Sudeste (Matos e Ferreira, 2017).

O estado de Minas Gerais (latitude 13°94-22'50''S, longitude 41°73-52'87''W) ocupa 586,528 km<sup>2</sup> na região sudeste do Brasil e apresenta cinco classificações climáticas (Köppen, 1948): Am (clima de monção), Aw (clima tropical com estação seca de inverno. Predomina maior extensão territorial do estado), Bsh (clima das estepes quentes de baixa latitude e altitude), Cwa (clima temperado úmido com inverno seco e verão quente) e Cwb (clima temperado úmido com inverno seco e verão temperado) (Aparecido et al., 2018).

O estado caracteriza-se por uma geografia peculiar, tendo distintos complexos topográficos como as serras da Mantiqueira, da Canastra e do Espinhaço, e não possui divisas com o oceano. Essas características influenciam o clima regional, pois a distância do oceano colabora para uma maior amplitude do ciclo diurno da temperatura do ar (Reboita et al., 2015).

Outra causa de influência climática de Minas Gerais é o tipo de uso e ocupação do solo: áreas florestadas tendem a usar a energia solar na evapotranspiração, enquanto áreas descobertas ou urbanizadas fazem o uso dessa energia para se aquecer, causando impacto direto na variação diurna da temperatura do ar (Reboita et al., 2015).

O estado conta com rios importantes que são utilizados na produção de energia elétrica, além de possuir importante potencial turístico. Como todos estados do Brasil, Minas

Gerais apresenta mau gerenciamento de falhas socioambientais e desigualdade social. Parte da população se encontra em condições precárias de moradia, como em encostas ou margens de rios vulneráveis a eventos como enchentes e desmoronamentos. Esta situação aliada a políticas públicas pouco efetivas e a ampliação desordenada de centros urbanos justificam estudos acerca de eventos climáticos extremos e suas consequências na região (Natividade, Garcia e Torres, 2017).

Mudanças climáticas intervêm no bem-estar e desempenho humano. Em Minas Gerais, a maior parte dos trabalhadores agrícolas atuam em ambientes externos, sendo expostos a variações climáticas e ao desconforto térmico. Além do estresse originado pelo exercício de atividades em ambientes térmicos desconfortáveis, esses trabalhadores ficam mais propensos a redução de desempenho e a acidentes de trabalho.

De acordo com determinados níveis de variações térmicas, os mecanismos termorreguladores centrais de seres homeotérmicos não são capazes de manter a temperatura do núcleo corporal próxima a ideal, situação assinalada pela indisposição, cansaço, aumento ou redução da pressão sanguínea e da frequência cardíaca.

Com o intuito de prover condições aceitáveis de jornadas de trabalho a partir da adequação de horários, uso de coberturas quando aplicáveis e sistemas que permitam o controle de climatização, diferentes índices de conforto térmico humano foram desenvolvidos objetivando mensurar e estabelecer métodos que proporcionem níveis aceitáveis de conforto e que possibilitem o não comprometimento da execução de atividades físicas e a integridade da saúde.

Desta forma, é relevante a concepção do mapeamento bioclimático de uma determinada região fundamentado em um índice de avaliação do ambiente térmico. Condições térmicas do ambiente podem ser classificadas e ações que as promovam podem

ser implementadas de forma a auxiliar no processo de tomadas de decisão relacionadas ao planejamento de atividades, inclusive, na avaliação do uso de técnicas de climatização.

Neste contexto, objetiva-se com o presente trabalho, propor o zoneamento bioclimático relacionado às condições de conforto e desconforto humano para o estado de Minas Gerais, considerando os cenários histórico e futuros (anos 2028 e 2038).

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1. Base de dados

Séries de dados obtidas em 34 estações meteorológicas (tabela 1), localizadas no estado de Minas Gerais e pertencentes ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), foram usados para avaliação da variabilidade

espacial e temporal do conforto térmico e desempenho humano. Esses dados correspondem aos valores médios mensais de temperatura de bulbo seco do ar mínima ( $t_{bs,mín}$ , °C), compensada ( $t_{bs,comp}$ , °C) e máxima ( $t_{bs,máx}$ , °C), umidade relativa média do ar ( $UR$ , %) e velocidade do vento média do ar ( $V_{10}$ , m s<sup>-1</sup>) à 10 m de altura em relação ao solo, registrados no período de 1961 a 2017.

Os municípios selecionados possuem séries históricas de dados igual ou superior a 29 anos, sendo que, os dados mensais perdidos foram recuperados por meio do ajuste de equações de regressão que representassem a tendência de comportamento das variáveis analisadas.

A figura 1 ilustra a localização das estações meteorológicas utilizadas no presente estudo.

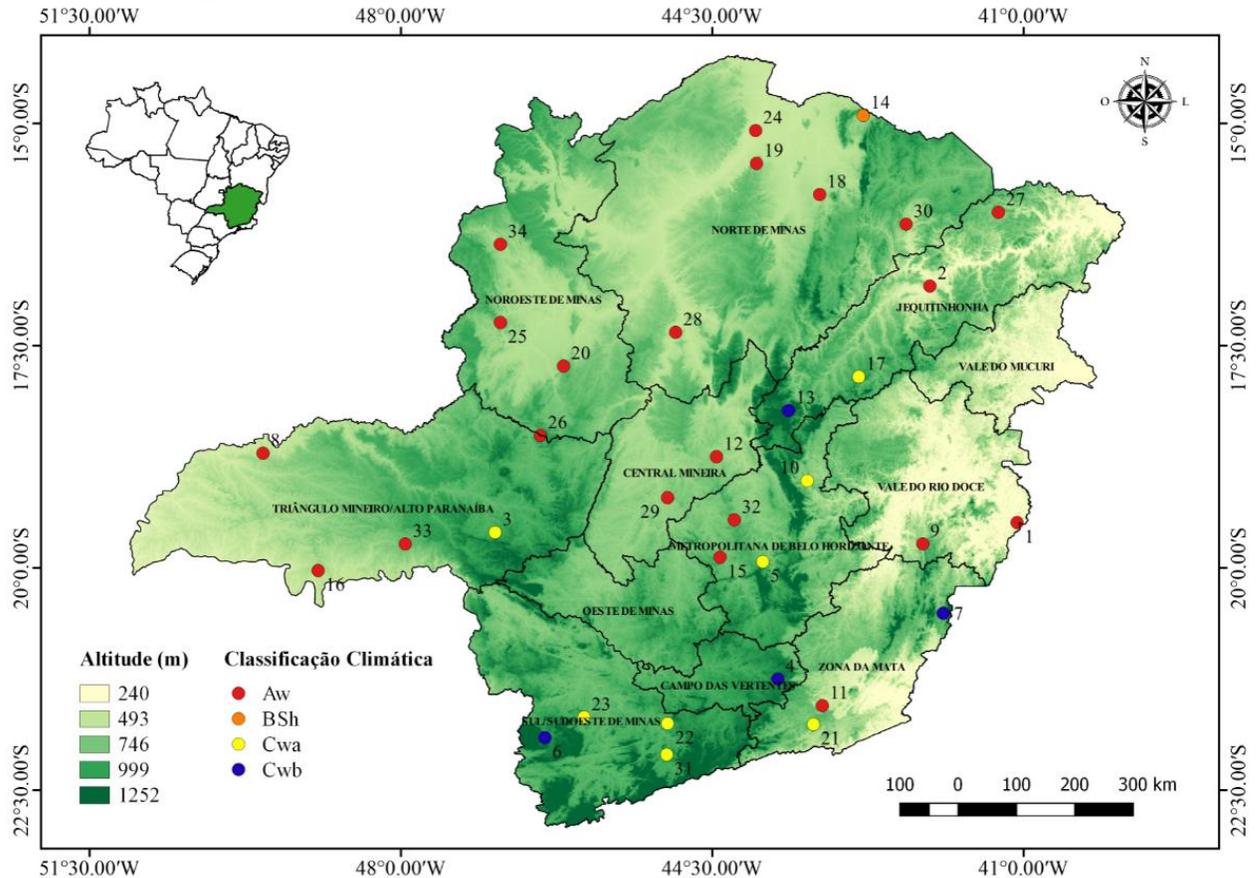
**Tabela 1**

Estações meteorológicas utilizadas e suas respectivas identificações numéricas e altitudes.

Número	Estação	Altitude (m)	Número	Estação	Altitude (m)
1	Aimorés	82.74	18	Janaúba	516
2	Araçuaí	289	19	Januária	473.71
3	Araxá	1023.61	20	João Pinheiro	760.36
4	Barbacena	1126	21	Juiz de Fora	939.96
5	Belo Horizonte	915	22	Lavras	918.84
6	Caldas	1150	23	Machado	873.35
7	Caparão	843.18	24	Mocambinho	452
8	Capinópolis	620.6	25	Paracatu	712
9	Caratinga	609.65	26	Patos de Minas	940.28
10	C. do Mato Dentro	652	27	Pedra Azul	648.91
11	Coronel Pacheco	435	28	Pirapora	505.24
12	Curvelo	672	29	Pompéu	690.91
13	Diamantina	1296.12	30	Salinas	471.32
14	Espinosa	569.64	31	São Lourenço	953.2
15	Florestal	760	32	Sete Lagoas	732
16	Frutal	543.67	33	Uberaba	737
17	Itamarandiba	914	34	Unai	460

Fonte: INMET (2018).

**Fig. 1.** Localização das estações meteorológicas utilizadas neste estudo.



Aw: clima tropical com estação seca de inverno; BSh: clima das estepes quentes de baixa latitude e altitude; Cwa: clima temperado úmido com inverno seco e verão quente; Cwb: clima temperado úmido com inverno seco e verão temperado.

## 2.2. Índice de temperatura efetiva em função do vento ( $TEv$ )

O índice de temperatura efetiva em função do vento ( $TEv$ ), originalmente denominado *effective temperature as a function of wind* (ETW), é baseado nas variáveis temperatura de bulbo seco do ar ( $t_{bs}$ , °C), umidade relativa ( $UR$ , %) e na velocidade do vento a uma altura em relação ao solo de 1,2 m ( $V_{1,2}$ ,  $m s^{-1}$ ) (Houghton e Yaglou, 1923). O  $TEv$  pode ser calculado por meio da equação 1 (Missenard, 1937).

$$TEv = 37 - (37 - t_{bs}) / (0,68 - 0,0014 \cdot UR + 1 / (1,76 + 1,4 \cdot V_{1,2}^{0,75})) - 0,29 \cdot t_{bs} \cdot (1 - 0,01 \cdot UR) \quad (1)$$

em que,

$TEv$ : temperatura efetiva em função do vento (°C);

$t_{bs}$ : temperatura de bulbo seco do ar (°C);

$UR$ : umidade relativa do ar (%);

$V_{1,2}$ : velocidade do vento a uma altura em relação ao solo de 1,2 m ( $m s^{-1}$ ).

A classificação adotada para concepção do zoneamento bioclimático proposto e comumente aceita para avaliação do  $TEv$  é a recomendada pelo laboratório de meteorologia aplicada a sistemas de tempo regionais (MASTER) do Instituto de

Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo, a qual é empregada na previsão das condições de conforto térmico nas regiões Sul, Sudeste e Centro-oeste do Brasil (tabela 2) (Souza e Nery, 2013).

**Tabela 2**

Classificação do  $TEv$  de acordo com o laboratório MASTER – IAG/USP.

$TEv$ (°C)	Sensação térmica	Grau de estresse fisiológico
< 05	Muito frio	Extremo estresse ao frio
05 – 10	Frio	Extremo estresse ao frio
10 – 13	Moderadamente frio	Tiritar
13 – 16	Ligeiramente frio	Resfriamento do corpo
16 – 19	Pouco frio	Ligeiro resfriamento do corpo
19 – 22	Ligeiramente fresco	Vasoconstrição
22 – 25	Confortável	Neutralidade térmica
25 – 28	Ligeiramente quente	Ligeiro suor; Vasodilatação
28 – 31	Quente moderado	Suando
31 – 34	Quente	Suor em profusão
> 34	Muito quente	Falha na termorregulação

Fonte: Adaptação de MASTER - IAG/USP (2009).

A escolha do  $TEv$  para ser aplicado neste trabalho se dá por este gerar resultados condizentes com sensações térmicas sob frio e calor e por haverem disponíveis dados do INMET que possibilitem sua avaliação ( $t_{bs}$ ,  $UR$  e  $V$ ).

Os valores de  $TEv$  (°C) foram calculados após a conversão dos valores médios mensais da  $V$  disponíveis nas bases de dados do INMET, os quais são mensurados à 10 m de altura em relação ao solo para 1,2 m por meio da equação (2), proposta por Pasquill (1949).

$$\left(\frac{U_2}{U_1}\right) = \left(\frac{z_2}{z_1}\right)^{0.143} \quad (2)$$

em que,

$U_2$  e  $U_1$ : são as velocidades ( $m\ s^{-1}$ ) para as alturas  $z_2$  (m) e  $z_1$  (m) respectivamente. Sendo  $U_2$  e  $z_2$  variáveis que assumiram os valores condizentes aos armazenados nas bases de dados, neste caso,  $U_2$  a velocidade (m

$s^{-1}$ ) mensurada a altura de 10m ( $z_2$ ),  $U_1$  o valor da velocidade ( $m\ s^{-1}$ ) convertida para a altura de 1,2m ( $z_1$ ).

### 2.3. Análise de tendências

O teste de Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975) é um método considerado como sequencial e não paramétrico aplicado para determinar se uma série de dados possui alterações temporais estatisticamente significantes. A variável estatística  $S$  para uma série de  $n$  dados é ponderada por meio da somatória dos sinais ( $sgn$ ) da diferença, par a par, de todos os valores da série ( $x_i$ ) em relação aos valores que a eles são futuros ( $x_j$ ). Em casos em que  $n \geq 10$ ,  $S$  pode ser comparada com uma distribuição normal, na qual sua variância ( $V(S)$ ) pode ser obtida (Salviano, Groppo e Pellegrino, 2016).

Neste teste, a hipótese nula ( $H_0$ ) representa a não existência de tendências

significantes, enquanto a hipótese alternativa ( $H_1$ ) indica a presença de tendência crescente ou decrescente ao longo do tempo. As seguintes equações são aplicadas para o cálculo das estatísticas de Mann-Kendall:  $S$  (equação 3),  $V(S)$  (equação 4) e  $Z$  (equação 5).

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (3)$$

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} +1 & \text{se } (x_j - x_i) > 0 \\ 0 & \text{se } (x_j - x_i) = 0 \\ -1 & \text{se } (x_j - x_i) < 0 \end{cases}$$

$$V(S) = \frac{1}{18} \cdot [n \cdot (n-1) \cdot (2 \cdot n + 5) - \sum_{p=1}^q t_p \cdot (t_p - 1) \cdot (2 \cdot t_p + 5)] \quad (4)$$

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{VAR(S)}} & \text{se } S > 0 \\ 0 & \text{se } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{VAR(S)}} & \text{se } S < 0 \end{cases} \quad (5)$$

Nas equações 3 a 5,  $x_i$  e  $x_j$  representam as observações da série temporal em ordem cronológica,  $n$  o comprimento da série temporal,  $t_p$  o número de relações do valor  $p$ th e  $q$  o número de valores vinculados. Valores positivos de  $Z$  indicam uma tendência ascendente na série temporal, enquanto valores negativos indicam uma tendência negativa. Se  $|Z| > Z_{1-\alpha/2}$ ,  $H_0$  é rejeitado indicando que há uma tendência estatisticamente significativa. O valor crítico de  $Z_{1-\alpha/2}$  para o valor  $p$  de 0,05 da tabela normal padrão é de 1,96 (Ahmad et. al, 2015).

O teste de Mann-Kendall foi aplicado a partir do *software* XLSTAT versão 2018.2.50494, tendo de forma isolada como dados de entrada, valores médios mensais dos  $TEv$  mínimos ( $TEv_{\min}$ , °C), calculados a partir de dados médios mensais da  $t_{bs,\min}$ ,  $UR$  e  $V_{1,2}$ ;  $TEv$  médios ( $TEv_{\text{méd}}$ , °C), calculados a partir de dados médios mensais da  $t_{bs,comp}$ ,

$UR$  e  $V_{1,2}$  e;  $TEv$  máximo ( $TEv_{\max}$ , °C), calculado a partir de dados médios mensais da  $t_{bs,\max}$ ,  $UR$  e  $V_{1,2}$ . Em decorrência, obteve-se separadamente para cada mês os valores de  $S$  e  $V(S)$ , que viabilizaram os cálculos de  $Z$  e consequentes verificações da existência de tendências significantes. Para os meses cujas tendências foram relevantes, foram obtidos por meio de linhas de tendências lineares o valor do coeficiente angular, aplicado para predição do  $TEv$  futuro do mês associado. Quando não foram apresentadas tendências relevantes, o valor do  $TEv$  obtido no último ano de dados do mês analisado era mantido nas predições para os anos 2028 e 2038.

As estimativas de valores mensais de temperaturas para as duas próximas décadas (2028 e 2038) foram realizadas por meio da adição ao valor do  $TEv$  obtido no último ano disponível associado ao mês cujo o cálculo era desejado, o valor resultante do produto do coeficiente angular do mês correspondente a operação e a diferença de tempo entre o ano da predição (2028 ou 2038) e o último ano disponível na base de dados do município.

Uma vez obtidas as projeções de temperaturas para as décadas futuras, foram computados os valores de  $TEv$  que representam as estações do ano (verão: janeiro, fevereiro e março; outono: abril, maio e junho; inverno: julho, agosto e setembro; primavera: outubro, novembro e dezembro).

## 2.4. Zoneamento bioclimático brasileiro

O zoneamento bioclimático foi realizado por meio da elaboração de mapas com valores médios mensais do  $TEv_{\min}$ ,  $TEv_{\text{méd}}$  e  $TEv_{\max}$  expressos por estações do ano para os cenários histórico e futuros (anos 2028 e 2038).

A dependência das variáveis em estudo foi analisada por meio de ajustes de semivariogramas, clássico e interpolação por Krigagem ordinária. O semivariograma clássico foi estimado pela equação 6.

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N \cdot (h)} \cdot \sum_{i=1}^{N(h)} [Z \cdot (X_i) - Z \cdot (X_i + h)]^2 \quad (6)$$

em que,  $N(h)$  é o número de pares experimentais de observações  $Z(x_i)$  e  $Z \cdot (x_i + h)$  separados por uma distância  $h$ . O semivariograma é representado pelo gráfico  $\hat{\gamma}(h)$  versus  $h$ . Do ajuste de um modelo matemático aos valores calculados de  $\hat{\gamma}(h)$ , são estimados os coeficientes do modelo teórico para o semivariograma denominado de efeito pepita,  $C_0$ ; contribuição,  $C_1$ ; patamar,  $C_0 + C_1$ ; e o alcance,  $a$ , conforme descrito por Bachmaier e Backes (2008).

O ajuste dos semivariogramas foi realizada por meio do método dos mínimos quadrados ordinários (*ordinary least square* - OLS) e pelo modelo esférico. A interpolação dos dados foi realizada pela krigagem ordinária de forma a possibilitar a visualização dos padrões de distribuição espacial de  $TEv$  para o estado de Minas Gerais.

As análises geostatísticas foram realizadas por meio do sistema computacional estatístico R e sua biblioteca geoR (Ribeiro Junior e Diggle, 2001) e para a confecção dos mapas foi utilizado o *software* ArcGis for Desktop 10.4, por meio de sua extensão *Spatial Analyst and Geostatistical Analyst*.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores de  $TEv$  (mínimos, médios e máximos) calculados e classificados por estações do ano indicam o comportamento climático espaço-temporal via zoneamento bioclimático.

Para a estação de verão (figura 2), considerado o  $TEv_{min}$ , verifica-se tendências de aquecimento para o ano 2028 nas mesorregiões Norte e Nordeste de Minas e em áreas das mesorregiões do Triângulo Mineiro, Sul/Sudoeste de Minas, Central Mineira, Jequitinhonha, Vale do Mucuri e Vale do Rio Doce (figura 2B). Estas tendem a

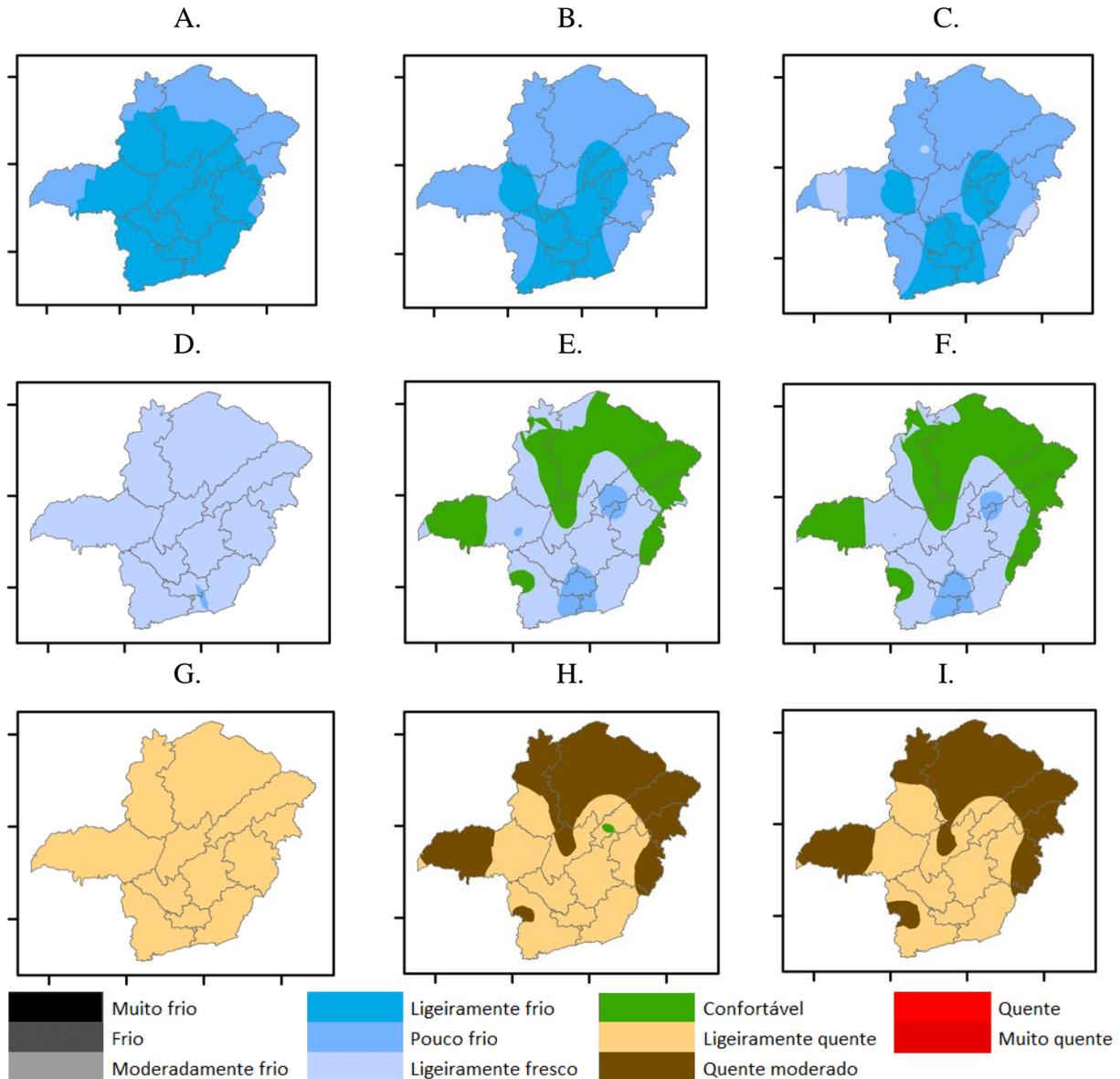
acentuarem quando considerado o ano 2038, com o aparecimento de zonas qualificadas como ligeiramente fresco em partes do Triângulo Mineiro, Vale do Rio Doce e Zona da Mata, com ligeira aparição na mesorregião Noroeste de Minas (figura 2C).

Avaliados dados do  $TEv_{med}$ , evidencia-se a presença dominante do clima ligeiramente fresco em todas as regiões para a série histórica de dados, exceto para uma pequena parte das mesorregiões do Campo das Vertentes e da Zona da Mata que são classificados como pouco frio (figura 2D), tendo para o ano 2028 o surgimento de zonas térmicas classificadas como confortável em grande parcela territorial das mesorregiões Norte de Minas, Jequitinhonha, Vale do Mucuri, Triângulo Mineiro e Central Mineira, e em pequenas áreas do Sul/Sudeste de Minas e Vale do Rio Doce. Ocorrências da classificação pouco frio foram observadas nas mesorregiões de Campo das Vertentes, Sul/Sudoeste de Minas, Zona da Mata, Jequitinhonha, Vale do Rio Doce, Metropolitana de Belo Horizonte e Triângulo Mineiro. Desta forma, verifica-se a tendência geral de aumento do  $TEv_{med}$  quando se compara os dados históricos com as projeções para o ano 2028, entretanto, existem algumas áreas localizadas onde foram observadas reduções deste índice de avaliação térmica (figura 2E). Este comportamento se mantém para o ano 2038, ampliando e reduzindo ligeiramente as classificações de conforto e pouco frio, respectivamente (figura 2F).

O aumento da temperatura em conjunto ao aquecimento global e a ondas de calor podem promover aparições de eventos extremos de precipitação de curto prazo. Fato acrescentado a ampliação das cidades e da emissão de gases que promovam ilhas de calor, podem causar interferências maiores nos ciclos de chuvas em torno de grandes centros urbanos. Esta situação, mesmo que gere um número menor de chuvas regulares, pode intensificar o número de ventos de chuva intensa, o que pode trazer problemas a uma

parcela da população (Natividade, Garcia e Torres, 2017). Essas alterações climáticas e microclimáticas podem influenciar

municípios com grande número de habitantes (Ribeiro, Pesquero e Coelho, 2016).



**Fig. 2.** Zoneamento bioclimático de Minas Gerais para a estação verão (dados médios mensais do  $TEv_{\min}$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) para a série de dados históricos (A) e os anos 2028 (B) e 2038 (C), do  $TEv_{\text{méd}}$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) para a série de dados históricos (D) e os anos 2028 (E) e 2038 (F), e do  $TEv_{\max}$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) para a série de dados históricos (G) e os anos 2028 (H) e 2038 (I).

A classificação ligeiramente quente predomina nas mesorregiões do estado de Minas Gerais quando se analisa os dados do  $TEv_{\max}$  na série de dados históricos (figura 2G). Entretanto, as previsões para o ano 2028

indicam o aumento do  $TEv_{\max}$ , fazendo com que áreas de classificação quente moderado ocorram em grande parte das mesorregiões do Triângulo Mineiro, Nordeste e Norte de Minas, Jequitinhonha, Vale do Mucuri e Vale

do Rio Doce e em uma pequena área das mesorregiões Central Mineira, Sul/Sudoeste de Minas e Zona da Mata (figura 2H). Esse comportamento se mantém em 2038, com uma pequena ampliação das áreas classificadas como quente moderado (figura 2I). Um estudo realizado por Zivin e Shrader (2016) relatam que crianças são mais vulneráveis ao calor, devido a suas características fisiológicas e por possuírem comportamentos e respostas distintas dos adultos. Altas temperaturas resultam em um número maior de mortes, principalmente entre fetos e crianças pequenas (assim como nos idosos). A situação pode ser pior quando combinada com alta umidade, doenças e poluição. Os autores discutem políticas que podem auxiliar, como a exigência de ar-condicionado em escolas e infraestruturas públicas que permitam que pessoas permaneçam em locais fechados durante ondas de calor.

Feitas análises de comportamento do clima para a estação outono (figura 3), relata-se ao considerar o  $TEv_{min}$ , na série de dados históricos, a sensação moderadamente frio com abrangência em maior parcela territorial, tendo o frio em parte das mesoregiões Campo das Verdentes, Sul/Sudoeste de Minas e Zona da Mata. A classificação ligeiramente frio ocorre em parte das mesorregiões Norte de Minas, Jequitinhonha, Vale do Mucuri e Vale do Rio Doce (figura 3A). Projetados estes dados para o ano 2028, verifica-se notada ampliação da sensação ligeiramente frio em todo território, com ressalva das mesorregiões Sul/Sudoeste de Minas, Campo das Vertentes, Oeste de Minas, Metropolitana de Belo Horizonte e em áreas das mesorregiões do Triângulo Mineiro, Central Mineiro, Jequitinhonha, Vale do Rio Doce e Zona da Mata marcadas pelo moderadamente frio, e em parte das mesorregiões do Noroeste e Norte de Minas pelo pouco frio (figura 3B). A situação tende permanecer igual em 2038, exceto por partes das mesorregiões do Noroeste e Norte do estado, Triangulo

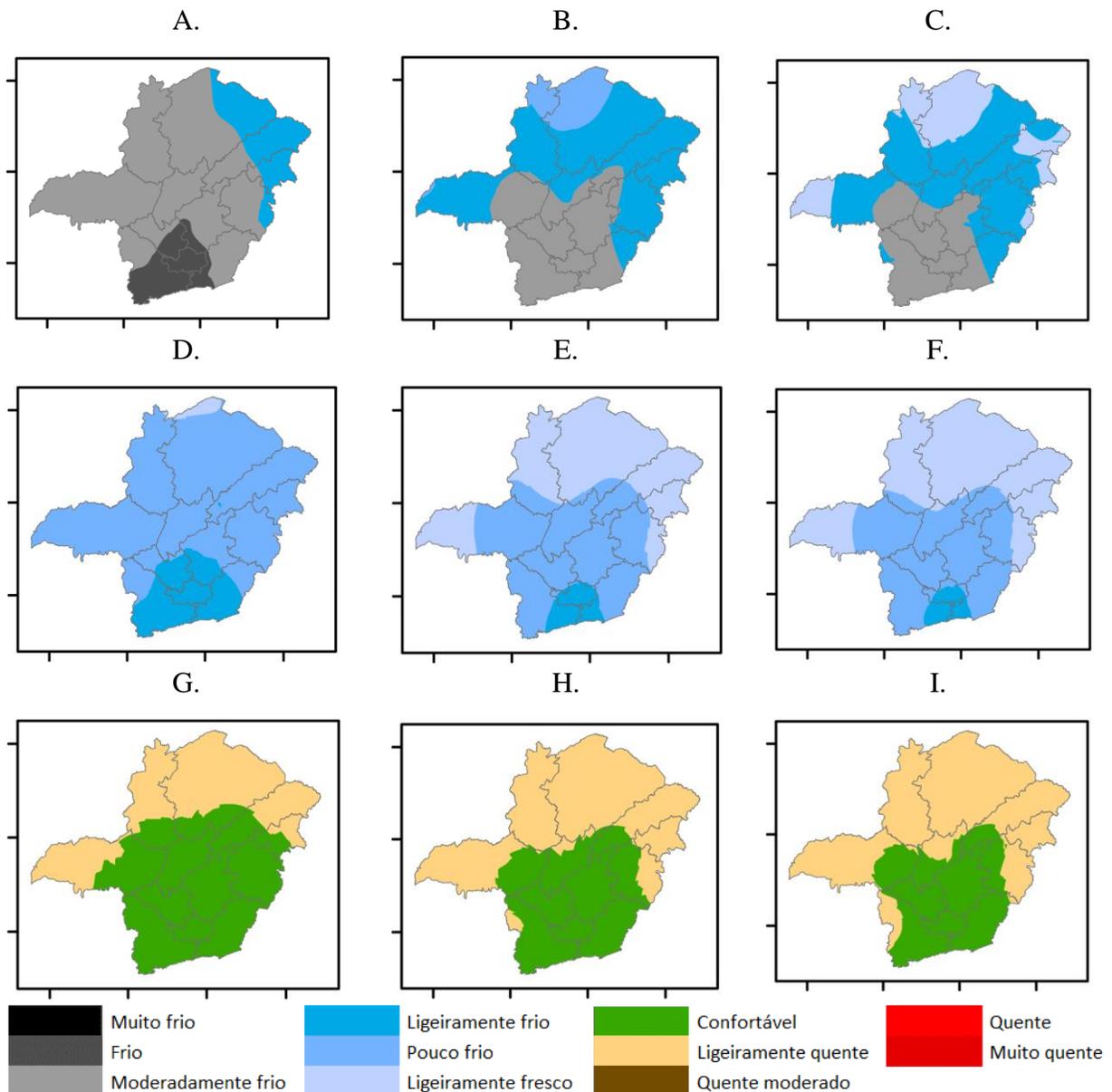
Mineiro e pequenas áreas do Jequitinhonha, Vale do Mucuri e Vale do Rio Doce classificadas como ligeiramente fresco (figura 3C).

Mediante valores do  $TEv_{med}$ , na série de dados históricos, grande área do estado se encontra qualificada em uma sensação térmica de pouco frio, salvo mesorregiões Sul/Sudoeste de Minas, Campo das Vertentes e áreas menores do Oeste de Minas, da região Metropolitana de Belo Horizonte e da Zona da Mata (ligeiramente frio) e do extremo norte do estado (ligeiramente fresco) (figura 3D). Para os anos 2028 e 2038, existe tendências de redução da sensação ligeiramente frio no sul do estado e predominância do ligeiramente fresco nas mesorregiões Noroeste e Norte de Minas e em partes das mesorregiões do Triângulo Mineiro, Jequitinhonha, Vale do Mucuri e Vale do Rio Doce (figuras 3E, 3F).

Ao se analisar os dados de  $TEv_{max}$ , expõe-se a redução da sensação térmica confortável ao longo dos anos, predominando o ligeiramente quente (figuras 3G a 3I). Ondas de calor aumentaram em 12,9% o risco global de internações hospitalares cardiovasculares na cidade tropical mais populosa do Vietnam, evidenciando a necessidade de desenvolvimento de programas de prevenção adicional de redução deste risco de doença (Phung et al., 2016).

Os resultados corroboram aos obtidos no estudo realizado por Amaro et al. (2018), em que são relatadas ocorrências de condições quentes no verão e outono, as quais tendem a serem piores no ano 2024.

Dentre os efeitos ocasionados pelo estresse de calor, estão a deficiência de saúde e a redução do desempenho humano na capacidade de exercer atividades físicas. Em condições ambientais quentes, quando a transferência de calor é limitada, o núcleo corporal tem sua temperatura elevada, resultando em sérios riscos à saúde (Kjellstrom et al., 2016).



**Fig. 3.** Zoneamento bioclimático de Minas Gerais para a estação outono (dados médios mensais do  $TEv_{\min}$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) para a série de dados históricos (A) e os anos 2028 (B) e 2038 (C), do  $TEv_{\text{méd}}$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) para a série de dados históricos (D) e os anos 2028 (E) e 2038 (F), e do  $TEv_{\max}$  ( $^{\circ}\text{C}$ ) para a série de dados históricos (G) e os anos 2028 (H) e 2038 (I).

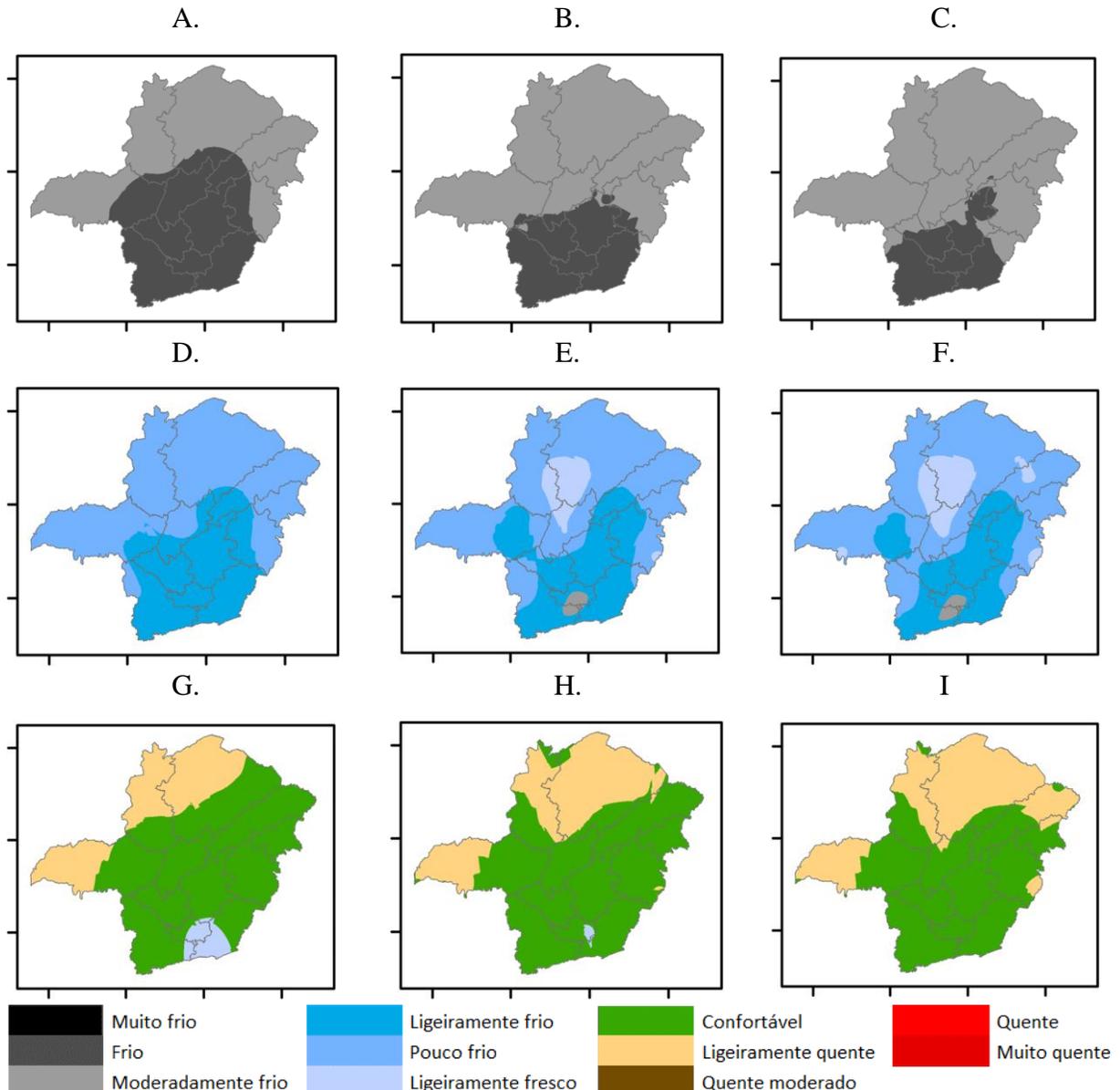
Minas Gerais, a partir de estudos da variabilidade do clima que avaliam a estação inverno (figura 4) e quando considerados dados do  $TEv_{\min}$ , é assinalada por sensações moderadamente frias e fria, tendo esta última tendências de redução nas próximas duas décadas especialmente nas mesorregiões Central Mineira, Vale do Rio Doce, Metropolitana de Belo Horizonte e Alto

Paranaíba (figuras 4A a 4C). Temperaturas altas e baixas são associadas a ampliação de riscos de uma gama de consequências cardiovasculares e respiratórias. Reforça-se a relevância do aumento de investigações para entendimento dos efeitos associados da temperatura ambiente em relação a saúde, essencial para o planejamento de adequadas intervenções de saúde pública e para predições

confiáveis dos efeitos das alterações do clima (Gasparrini et al., 2015).

Dados do  $TEv_{méd}$  apresentam as sensações térmicas pouco e ligeiramente frias em todo o território estadual quando consideradas a série de dados históricos (figura 4D), tendo as sensações ligeiramente

fresco (em maior abrangência em partes das mesorregiões do Noroeste e Norte de Minas e Central Mineira) e moderadamente frio (em pequenas proporções nas mesorregiões Sul/Sudoeste de Minas e Campos das Vertentes) ampliadas nas previsões para as duas próximas décadas (figuras 4E, 4F).



**Fig. 4.** Zoneamento bioclimático de Minas Gerais para a estação inverno (dados médios mensais do  $TEv_{mín}$  (°C) para a série de dados históricos (A) e os anos 2028 (B) e 2038 (C), do  $TEv_{méd}$  (°C) para a série de dados históricos (D) e os anos 2028 (E) e 2038 (F), e do  $TEv_{máx}$  (°C) para a série de dados históricos (G) e os anos 2028 (H) e 2038 (I).

Valores do  $TEv_{m\acute{a}x}$  mostram o estado caracterizado por zonas térmicas de conforto em maior proporção de área ao considerar a série de dados históricos, salvo parte das mesorregiões Sul/Sudoeste de Minas, Campos das Vertentes e Zona da Mata (ligeiramente fresco), Triângulo Mineiro, Noroeste e Norte de Minas (ligeiramente quente) (figura 4G). Com estes valores, a década de 2028 apresenta significativa redução da sensação ligeiramente fresco e das zonas de conforto em mesorregiões do Norte de Minas (figura 4H), as quais tendem a permanecerem em diminuição na década seguinte (figura 4I). Estes dados corroboram com os observados de Ávila et al. (2014), os quais constataram em termos espaciais, que a quantidade de municípios com mudanças significativas das temperaturas médias é superior à média que se desloca para as mesorregiões Central, Norte, Nordeste e Noroeste do estado, evidenciando que estas regiões demonstram maiores tendências de aquecimento nos últimos 40 anos.

Apurados valores da estação primavera (figura 5) e realizadas considerações iniciais destes a partir de resultados do  $TEv_{m\acute{i}n}$  e da série histórica de dados (figuras 5A a 5C), nota-se o estado essencialmente qualificado por sensações condizentes ao frio (figura 5A), situação que tende se amenizar em poucas proporções nas duas próximas décadas (figuras 5B, 5C). Valores do  $TEv_{m\acute{e}d}$  ao serem considerados junto a série histórica de dados, apresentam sensações de frio ao longo de todo o território, embora em menor proporção quando comparado aos resultados ponderados pelo  $TEv_{m\acute{i}n}$  (figuras 5D a 5F).

Visando analisar efeitos das mudanças climáticas na saúde humana no Reino Unido para cenários futuros, foi determinado no estudo elaborado por Hajat et al. (2014), um risco significativamente elevado de mortalidades devido ao frio em todas as regiões, sobretudo em idosos. Na ausência de qualquer adaptação da população, deve haver

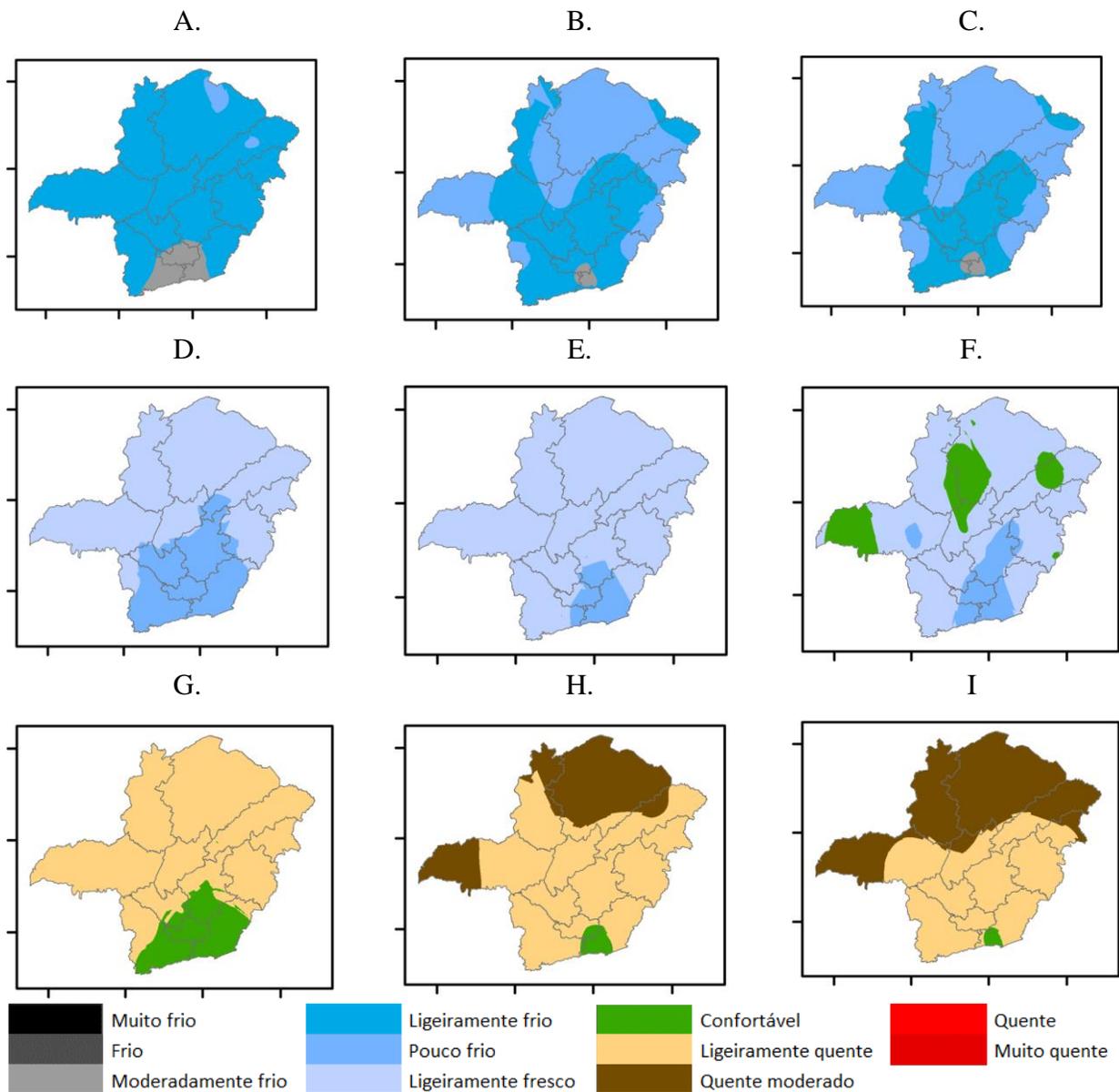
uma ampliação de 257% das mortes relacionadas ao calor até o ano 2050, tendo para essa mesma época a redução de 2% das mortes relacionadas ao frio. Estas causas são parcialmente impulsionadas pelo crescimento populacional e envelhecimento.

Percebe-se, com valores do  $TEv_{m\acute{e}d}$ , a abrangência da sensação ligeiramente fresco em maior parte territorial, a não ser pelas mesorregiões Sul/Sudoeste e Oeste de Minas, Metropolitana de Belo Horizonte, Campos das Vertentes, Zona da Mata, e sudoeste do Jequitinhonha assinaladas pela sensação pouco frio (figura 5D). A predição de sensações térmicas para o ano 2028 quando comparada a série histórica de dados, apresenta redução significativa da sensação pouco frio, sendo estável apenas em pequenas áreas das mesorregiões Sul/Sudoeste de Minas, Campos das Vertentes, sul da Metropolitana de Belo Horizonte e em maior proporção na Zona da Mata (figura 5E). A situação descrita é alterada quando considerado o ano 2038, por meio da aparição da sensação térmica confortável em maior abrangência em áreas da mesorregião do Triângulo Mineiro e ainda em menores proporções, nas mesorregiões do Noroeste, Norte de Minas e Jequitinhonha, tendo ainda destaque a expansão da sensação pouco frio na mesorregião Metropolitana de Belo Horizonte (figura 5F).

Em relação ao  $TEv_{m\acute{a}x}$ , considerando a série histórica de dados, verifica-se a ocorrência de sensação ligeiramente quente abrangendo maior extensão territorial do estado, exceto pela mesorregião Campo das Vertentes e áreas abrangentes das mesorregiões Sul/Sudoeste de Minas, Metropolitana de Belo Horizonte, Zona da Mata e sudeste do Oeste de Minas com características de sensação térmica confortável (figura 5G). Para a década seguinte, a sensação quente moderado predomina principalmente nas mesorregiões Norte de Minas e oeste do Triângulo Mineiro, apresentando considerável redução da

sensação confortável presente nas mesorregiões Sul/Sudoeste de Minas, Campos das Vertentes, Metropolitana de Belo Horizonte e Zona da Mata (figura 5H). No ano 2038 observa-se o aumento da sensação quente moderado, qualificando maior

território da mesorregião do Triângulo Mineiro e mesorregiões do Noroeste de Minas e Jequitinhonha, e por singela aparição da sensação confortável em área do sudoeste da mesorregião Zona da Mata (figura 5I).



**Fig. 5.** Zoneamento bioclimático de Minas Gerais para a estação primavera (dados médios mensais do  $TEv_{mín}$  ( $^{\circ}C$ ) para a série de dados históricos (A) e os anos 2028 (B) e 2038 (C), do  $TEv_{méd}$  ( $^{\circ}C$ ) para a série de dados históricos (D) e os anos 2028 (E) e 2038 (F), e do  $TEv_{máx}$  ( $^{\circ}C$ ) para a série de dados históricos (G) e os anos 2028 (H) e 2038 (I).

Verifica-se o aumento da condição quente moderado na primavera quando

considerados dados do  $TEv_{máx}$ . Em um estudo realizado por Gobo et al. (2017), no

qual buscou avaliar entre outros fatores, a percepção climática de homens e mulheres, evidenciou-se que mulheres são mais sensíveis aos desvios de um ambiente térmico e menos satisfeitas do que homens, principalmente em condições mais frias ou mais quentes.

Quando comparados resultados encontrados do  $TEv$  neste estudo com análises de comportamento da  $t_{bs}$  realizadas por Reboita et al. (2015) e Garcia et al. (2018), percebe-se consistência nos relatos de menores valores de  $t_{bs}$  registrados na região Sul e na estação de inverno, enquanto que os

maiores valores foram observados na primavera, verão e início de outono.

As frequências de ocorrência (%) de valores do  $TEv_{mín}$ ,  $TEv_{méd}$  e  $TEv_{máx}$  nos cenários analisados associando-as às sensações térmicas são listadas na tabela 3. No geral, verifica-se a tendência de aumento dos valores de  $TEv_{mín}$ ,  $TEv_{méd}$  e  $TEv_{máx}$  para as quatro estações do ano quando se compara os cenários futuros ao histórico, ocasionando o incremento da frequência de ocorrência de valores de  $TEv$  em classes superiores de sensação térmica ou, inclusive, ocorrendo em novas classes.

**Tabela 3**

Frequências de ocorrência (%) de valores do  $TEv_{mín}$  (°C),  $TEv_{méd}$  (°C) e  $TEv_{máx}$  (°C) relacionadas às sensações térmicas nas estações (A) verão, (B) outono, (C) inverno e (D) primavera, para os cenários históricos (1961 a 2017) e futuros (2028 e 2038) nos municípios analisados do estado de Minas Gerais, Brasil.

**A.**

	Muito frio	Frio	Moderadamente frio	Ligeiramente frio	Pouco frio	Ligeiramente fresco	Confortável	Ligeiramente quente	Quente moderado	Quente	Muito quente
$TEv_{mín}$	1961 - 2017	-	-	8,8	52,9	38,2	-	-	-	-	-
	2028	-	-	2,9	35,3	44,1	14,7	2,9	-	-	-
	2038	-	-	2,9	35,3	41,2	17,6	2,9	-	-	-
$TEv_{méd}$	1961 - 2017	-	-	-	-	23,5	58,8	17,6	-	-	-
	2028	-	-	-	-	17,6	44,1	38,2	-	-	-
	2038	-	-	-	-	17,6	41,2	38,2	2,9	-	-
$TEv_{máx}$	1961 - 2017	-	-	-	-	-	2,9	11,8	50,0	35,3	-
	2028	-	-	-	-	-	-	14,7	35,3	47,1	2,9
	2038	-	-	-	-	-	-	14,7	35,3	47,1	2,9

**B.**

	Muito frio	Frio	Moderadamente frio	Ligeiramente frio	Pouco frio	Ligeiramente fresco	Confortável	Ligeiramente quente	Quente moderado	Quente	Muito quente
$TEv_{mín}$	1961 - 2017	-	23,5	55,9	20,6	-	-	-	-	-	-
	2028	-	14,7	35,3	32,4	14,7	2,9	-	-	-	-
	2038	-	14,7	29,4	29,4	20,6	5,9	-	-	-	-
$TEv_{méd}$	1961 - 2017	-	-	2,9	29,4	52,9	14,7	-	-	-	-
	2028	-	-	-	20,6	38,2	38,2	2,9	-	-	-
	2038	-	-	-	20,6	35,3	38,2	5,9	-	-	-
$TEv_{máx}$	1961 - 2017	-	-	-	-	2,9	11,8	44,1	38,2	2,9	-
	2028	-	-	-	-	-	8,8	35,3	47,1	8,8	-
	2038	-	-	-	-	-	5,9	32,4	50,0	11,8	-

**C.**

	Muito frio	Frio	Moderadamente frio	Ligeiramente frio	Pouco frio	Ligeiramente fresco	Confortável	Ligeiramente quente	Quente moderado	Quente	Muito quente
$TEv_{mín}$	1961 - 2017	-	52,9	41,2	5,9	-	-	-	-	-	-
	2028	5,9	38,2	32,4	20,6	2,9	-	-	-	-	-
	2038	5,9	38,2	26,5	20,6	8,8	-	-	-	-	-
$TEv_{méd}$	1961 - 2017	-	-	11,8	38,2	41,2	8,8	-	-	-	-
	2028	-	-	11,8	35,3	32,4	17,6	2,9	-	-	-
	2038	-	-	11,8	29,4	35,3	20,6	2,9	-	-	-
$TEv_{máx}$	1961 - 2017	-	-	-	-	5,9	17,6	38,2	38,2	-	-
	2028	-	-	-	-	20,6	38,2	32,4	8,8	-	-
	2038	-	-	-	-	20,6	35,3	35,3	8,8	-	-

**D.**

	Muito frio	Frio	Moderadamente frio	Ligeiramente frio	Pouco frio	Ligeiramente fresco	Confortável	Ligeiramente quente	Quente moderado	Quente	Muito quente
$TEv_{mín}$	1961 - 2017	-	-	17,6	55,9	26,5	-	-	-	-	-
	2028	-	-	14,7	47,1	29,4	8,8	-	-	-	-
	2038	-	-	14,7	41,2	23,5	20,6	-	-	-	-
$TEv_{méd}$	1961 - 2017	-	-	-	8,8	35,3	47,1	8,8	-	-	-
	2028	-	-	-	2,9	26,5	41,2	29,4	-	-	-
	2038	-	-	-	2,9	20,6	44,1	32,4	-	-	-
$TEv_{máx}$	1961 - 2017	-	-	-	-	-	5,9	26,5	41,2	26,5	-
	2028	-	-	-	-	-	2,9	11,8	58,8	23,5	2,9
	2038	-	-	-	-	-	2,9	8,8	55,9	26,5	5,9

No verão, para o  $TEv_{mín}$  observaram o surgimento de ocorrências nas classes ligeiramente frio e confortável nos cenários futuros, por sua vez, para o  $TEv_{méd}$  e  $TEv_{máx}$  verificaram-se as ocorrências das classificações ligeiramente quente e quente, respectivamente (tabela 4A).

No outono, ao se analisar o  $TEv_{mín}$ , verificou-se o surgimento de ocorrências nas classes pouco frio e ligeiramente fresco. Em relação ao  $TEv_{méd}$  verificou-se o surgimento de ocorrência na classificação confortável, enquanto que, para  $TEv_{máx}$  a ocorrência de pouco frio observada no cenário histórico desapareceu (tabela 4B).

Durante o inverno, ao se analisar o  $TEv_{mín}$  observou-se o surgimento das classificações muito frio e pouco frio quando se compara os cenários futuros ao histórico, indicando possíveis aumentos de amplitudes mensais. Por sua vez, para o  $TEv_{méd}$  e  $TEv_{máx}$  verificaram-se o surgimento das ocorrências confortável e quente moderado, respectivamente (tabela 4C).

Na primavera verificou-se apenas o surgimento de novas classificação ao se analisar o  $TEv_{mín}$  (ligeiramente fresco) e o  $TEv_{máx}$  (quente) (tabela 4D). Esses aumentos de  $TEv$  na estação de verão, intensificam as condições de desconforto térmico vivenciados pelas pessoas, reduzindo a capacidade laboral (Krishnamurthy et al., 2017), aumentando o surgimento de doenças cardiovasculares e respiratórias (Li et al., 2015) e os casos de transmissão de dengue, chikungunya e Zika (Huber et al., 2018).

Por sua vez, no inverno, a ocorrência de alguns extremos de baixas temperaturas, bem como o aumento da amplitude térmica, pode ampliar o estado de desconforto da população aumentando os riscos de hospitalização por pneumonia (Qiu et al., 2016), o número de casos de gripe e resfriados (Van Wyk, 2016) e a incapacidade funcional em pessoas diagnosticadas com asma e rinite alérgica (Hyrkäs-Palmu et al., 2018).

As tendências de aquecimento relatadas conferem com as citadas no estudo desenvolvido por Natividade, Garcia e Torres (2017), no qual foram encontradas tendências de aumento de dias e noites quentes e redução de dias e noites frias, expressando tendência de aumento da temperatura em todo o estado.

Ações do clima sobre seres humanos interferem no exercício de atividades diárias, tendo como principais consequências sensações de estresse e desconforto. Determinantes de saúde e ambientes possuem estreita associação na melhoria da qualidade de vida da população e é de conhecimento do indivíduo a capacidade de alterar as características do ambiente que o cerca (Conceição et al., 2016).

Analisadas as atuais condições e tendências climáticas, é necessária a aplicação e desenvolvimento de técnicas que reduzam os efeitos térmicos do ambiente em seres humanos, como a análise de desempenho de diferentes telhados verdes no conforto térmico urbano (Panziera et al., 2015), na avaliação da interferência da cobertura arbórea no desempenho térmico (Dobbert et al., 2015), no estudo do desconforto térmico provocado pelos equipamentos de proteção individual (EPI) utilizados na aplicação de agrotóxicos (Veiga, Almeida e Duarte, 2016) e na revisão de recursos energeticamente eficientes na arquitetura vernacular para melhorar as condições de conforto térmico interno (Chandel, Sharma e Marwah, 2016).

O conforto térmico é uma condição essencial na prevenção da saúde de um indivíduo. Informações relacionadas a efeitos do calor e do frio tornam-se importantes ferramentas para o desenvolvimento de melhores estratégias de redução de doenças ocasionadas por variações climáticas.

#### 4. CONCLUSÃO

Análises de dados do  $TEv$ , com base no zoneamento bioclimático, indicam a

tendência de aumento dos valores de  $TEv_{mín}$ ,  $TEv_{méd}$  e  $TEv_{máx}$  para as quatro estações do ano quando se compara os cenários futuros ao histórico. No inverno, observou-se a ocorrência de valores  $TEv_{mín}$  na classificação muito frio nos cenários futuros, indicando a ocorrência de extremos climáticos e o aumento da amplitude térmica.

Os resultados obtidos auxiliam na tomada de decisão referentes às ações relacionadas a adaptações as mudanças do clima futuro visando mitigar os efeitos térmicos do ambiente térmico sobre os seres humanos, uma vez que estes interferem na saúde do trabalhador, aumentando as doenças e conseqüentemente, reduzindo o desempenho, situações que podem ser agravadas conforme a variabilidade climática.

## AGRADECIMENTOS

A Universidade Federal de Lavras, a FAPEMIG, CAPES e ao CNPq pelo apoio financeiro.

## REFERÊNCIAS

- Ahmad, I., et al. 2015. **Precipitation trends over time using Mann-Kendall and spearman's rho tests in swat river basin, Pakistan.** Advances in Meteorology.
- Amaro, A. LN et al. 2018. **Climate change and rural workers thermal confort: historical and future impacts.** Engenharia Agrícola, v. 38, n. 2, p. 173-179.
- Aparecido, L. E. de O. et al. 2018. **Agroclimatic zoning for urucum crops in the state of Minas Gerais, Brazil.** Bragantia, v. 77, n. 1, p. 193-200.
- Ávila, L. F. et al. 2014. **Tendências de temperaturas mínimas e máximas do ar no Estado de Minas gerais.** Pesq. agropec. bras., Brasília, v.49, n.4, p.247-256, abr.
- Bachmaier, M.; Backes, M. 2008. **Variogram or semivariogram? Understanding/the variances in a variogram.** Precision Agriculture, Dordrecht, v 9, p. 173–175.
- Chandel, S. S.; Sharma, V; Marwah, B. M. 2016. **Review of energy efficient features in vernacular architecture for improving indoor thermal comfort conditions.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 65, p. 459-477.
- Conceição, R. S. da et al. 2016. **A temperatura do ar e sua relação com algumas doenças respiratórias em Vitória da Conquista–BA.** Revista Geoaraguaia, v. 5, n. 2.
- Dobbert, L. Y. et al. 2015. **Avaliação da interferência da cobertura arbórea no desempenho térmico por meio de simulação computacional.** Anais ENCAC.
- Fanger, P.O. 1970. **Thermal comfort.** Analysis and Application in Environment Engineering. Copenhagen: Danish Technical Press.
- Garcia, S. R. et al. 2018. **Aspectos climatológicos associados ao cultivo da oliveira (Olea europeia) em Minas Gerais.** Revista Brasileira de Climatologia, v. 22.
- Gasparrini, A. et al. 2015. **Mortality risk attributable to high and low ambient temperature: a multicountry observational study.** The Lancet, v. 386, n. 9991, p. 369-375.

- Gobo, J. P. A. et al. 2017. **Avaliação da percepção climática de homens e mulheres e do conforto térmico em Santa Maria - RS.** Boletim Paulista de Geografia, n. 96, p. 31-50.
- Hajat, S. et al. 2014. **Climate change effects on human health: projections of temperature-related mortality for the UK during the 2020s, 2050s and 2080s.** J Epidemiol Community Health, v. 68, n. 7, p. 641-648.
- Hyrkäs-Palmu, H. et al. 2018. **Cold weather increases respiratory symptoms and functional disability especially among patients with asthma and allergic rhinitis.** Scientific reports, v. 8.
- Houghton, F. C; Yaglou, C. P. 1923. **Determining equal comfort lines.** J Am Soc Heat Vent Eng.; 29:165–176.
- Kendall, M. G. 1975. **Rank correlation methods.** London: Charles Griffin, 210p.
- Kjellstrom, T. et al. 2016. **Heat, human performance, and occupational health: a key issue for the assessment of global climate change impacts.** Annual review of public health, v. 37, p. 97-112.
- Köppen, W. 1948. **Climatologia: con un estudio de los climas de la tierra.** México. Fondo Cult. Econ. 479p.
- Krishnamurthy, M. et al. 2017. **Occupational heat stress impacts on health and productivity in a steel industry in southern India.** Safety and health at work, v. 8, n. 1, p. 99-104.
- Li, T. et al. 2015. **Heat-related mortality projections for cardiovascular and respiratory disease under the changing climate in Beijing, China.** Scientific reports, v. 5, p. 11441.
- Mann, H.B., 1945. **Nonparametric tests against trend,** Econometrica, 13, 245-259.
- MASTER – Meteorologia Aplicada a Sistemas de Tempo - IAG/USP. **Distribuição das zonas de conforto para diferentes graus de percepção térmica e suas respostas fisiológicas.** Disponível em: <[http://www.master.iag.usp.br/conforto/previsao.php?ant=&var=temp\\_efet&t=2&gr=2&pref=2g&inic=00](http://www.master.iag.usp.br/conforto/previsao.php?ant=&var=temp_efet&t=2&gr=2&pref=2g&inic=00)>. Acesso em: 31 out. 2009.
- Matos, R.; Ferreira, R. N. 2017. **Brasil em crise e o emprego formal no sudeste.** Caminhos de Geografia, v. 18, n. 61, p. 150-164.
- Missenard, A. 1937. **L'Homme et le climat.** Paris.
- Natividade, U. A.; Garcia, S. R.; Torres, R. R. 2017. **Trend of observed and projected extreme climate indices in Minas Gerais state.** Revista Brasileira de Meteorologia, v. 32, n. 4, p. 600-614.
- Panziera, A. G. et al. 2015. **Desempenho de diferentes tipos de telhado verde no conforto térmico urbano na cidade de Santa Maria, RS.** Disciplinarum Scientia| Naturais e Tecnológicas, v. 16, n. 3, p. 445-457.
- Pasquill, F. 1949. **Eddy diffusion of water vapour and heat near the ground.** Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences, v. 198, n. 1052, p. 116-140.

- Phung, D. et al. 2016. **The effects of high temperature on cardiovascular admissions in the most populous tropical city in Vietnam.** Environmental pollution, v. 208, p. 33-39.
- Qiu, H. et al. 2016. **Pneumonia hospitalization risk in the elderly attributable to cold and hot temperatures in Hong Kong, China.** American journal of epidemiology, v. 184, n. 8, p. 570-578.
- Reboita, M.S.; Rodrigues, M.; Silva, L. F.; Alves, M. A. 2015. **Aspectos climáticos do estado de Minas Gerais.** Revista Brasileira de Climatologia, v. 17, p. 206-226.
- Ribeiro, H.; Pesquero, C.R.; Coelho, M. S. Z. S. 2016. **Clima urbano e saúde: uma revisão sistematizada da literatura recente.** Estudos Avançados, 30(86): 67-82.
- Ribeiro Junior, P. J.; Diggle, P. J. 2001. **GeoR: a package for geostatistical analysis.** R-News, New York, v. 1, n. 2, p. 14-18.
- Salviano, M. F.; Groppo, J. D.; Pellegrino, G. Q. 2016. **Análise de tendências em dados de precipitação e temperatura no Brasil.** Revista Brasileira de Meteorologia, 31.1: 64-73.
- Souza, D. M. de.; Nery, J. T. 2013. **O conforto térmico na perspectiva da Climatologia Geográfica.** Geografia (Londrina), v. 21, n. 2, p. 65-83.
- Van Wyk, H. 2016. **The common cold and influenza: colds & flu.** SA Pharmacist's Assistant, v. 16, n. 1, p. 7-10.
- Veiga, M. M.; Almeida, R.; Duarte, F. 2016. **O desconforto térmico provocado pelos equipamentos de proteção individual (epi) utilizados na aplicação de agrotóxicos.** Laboreal, v. 12, n. 2, p. 83-94.
- Zivin, J. G.; Shrader, J. 2016. **Temperature extremes, health, and human capital.** The Future of Children, p. 31-50.