

MÉTRICAS PARA AVALIAÇÃO DO CONFORTO TÉRMICO HUMANO: UMA COMPARAÇÃO ENTRE OS ÍNDICES TE E TE_v APLICADOS À CIDADE DE ITAJUBÁ/MG

Rafael Rodrigues Ferreira ¹
Aline Pascoalino ²

INTRODUÇÃO

O homem é um ser vivo homeotérmico que mantém sua temperatura interna entre 36,1°C e 37,2°C, podendo atingir até 32°C ou 42°C em limites extremos para a sobrevivência (FROTA; SCHIFFER, 2001). Para tanto, o organismo humano apresenta uma série de mecanismos de termorregulação que controlam o ritmo das trocas de calor entre o corpo e o ambiente, de modo a garantir o equilíbrio do balanço térmico corporal e, assim, o seu bom funcionamento fisiológico (GOBO, 2013). Dessa maneira, em função das condições climáticas em vigor, são acionadas diferentes reações, como a vasoconstrição, o tiritar e a termogênese frente às situações de frio ou, no caso do calor, a vasodilatação, a exsudação e a termólise (FROTA; SCHIFFER, 2001).

Quando o organismo humano recorre minimamente ou, ainda, não recorre aos mecanismos de autorregulação térmica, define-se uma situação de conforto térmico, em que a maioria das pessoas alegam se sentir bem (FERNÁNDEZ-GARCÍA, 1996). Um conjunto de condições regulam a percepção dos indivíduos quanto ao conforto térmico. Além das variáveis ambientais que envolvem a temperatura do ar, a umidade relativa, o vento e a radiação, Fante, Dubreuil e Sant'Anna Neto (2017) também destacam as variáveis humanas inerentes às características individuais, como sexo, idade e massa corporal, e aos processos fisiológicos, como metabolismo, e as variáveis subjetivas, que compreendem experiências pretéritas, tempo de exposição e preferências culturais.

O que se pode considerar confortável termicamente a um indivíduo ou grupo, em razão de alterações em alguma dessas variáveis, pode ser desconfortável para outros. Por conta dessa complexidade, vêm se mobilizando esforços para aferir as condições necessárias ao conforto térmico e, portanto, à garantia do bem-estar humano. Nesse sentido, existem metodologias que são utilizadas para estabelecer limiares de conforto e

¹ Graduando do Curso de Geografia da Universidade Estadual de Campinas, r243468@dac.unicamp.br;

² Professora orientadora: Professora Doutora, Universidade Estadual de Campinas, apascoal@unicamp.br.

desconforto térmico, destacando-se os índices que, por meio de fórmulas matemáticas, quantificam as respostas humanas diante do ambiente térmico, traduzindo-as em uma relação de causa e efeito (FANTE; DUBREUIL; SANT'ANNA NETO, 2017).

Ao revisar a bibliografia nacional e internacional, Fante (2019) identificou 44 índices e 53 equações que são utilizados nas avaliações de conforto térmico. Cada um toma um conjunto específico de variáveis em seus cálculos, o que, somado ao método predominante e ao critério interpretativo adotados, pode incorrer em resultados diversos (MONTEIRO; ALUCCI, 2007). Dessa forma, são conduzidos estudos comparativos a fim de determinar em que situações é mais ou menos adequado o uso de cada índice. Fante, Dubreuil e Sant'Anna Neto (2017) analisaram quatro índices aplicados à cidade de Presidente Prudente/SP, destacando as diferenças entre os resultados. Xavier e Fialho (2021) compararam as sensações térmicas apontadas por dois índices na cidade de Vitória/ES. Gobo (2013) elegeu, por sua vez, índices mais adequados a cada estação do ano para regionalizar o estado do Rio Grande do Sul com base no conforto térmico.

Nesse sentido, o objetivo desta pesquisa foi comparar os resultados obtidos a partir da aplicação de dois índices TE e TE_v à cidade de Itajubá/MG durante episódios representativos das sazonalidades de inverno e verão. Comparando-os, é possível inferir as limitações e as potencialidades de cada um, de modo a eleger o índice que potencialmente mais se aproxime da realidade experienciada pelos cidadãos. Assim como em outras cidades no Brasil e no mundo, evidenciam-se problemas relacionados ao aquecimento da área urbana e a decorrente formação de ilhas de calor em Itajubá, o que afeta o bem-estar da população e requer, portanto, a utilização e o aperfeiçoamento de metodologias de avaliação do conforto térmico, a fim de oferecer subsídios para o planejamento urbano e ambiental do município (FERREIRA; PASCOALINO, 2023).

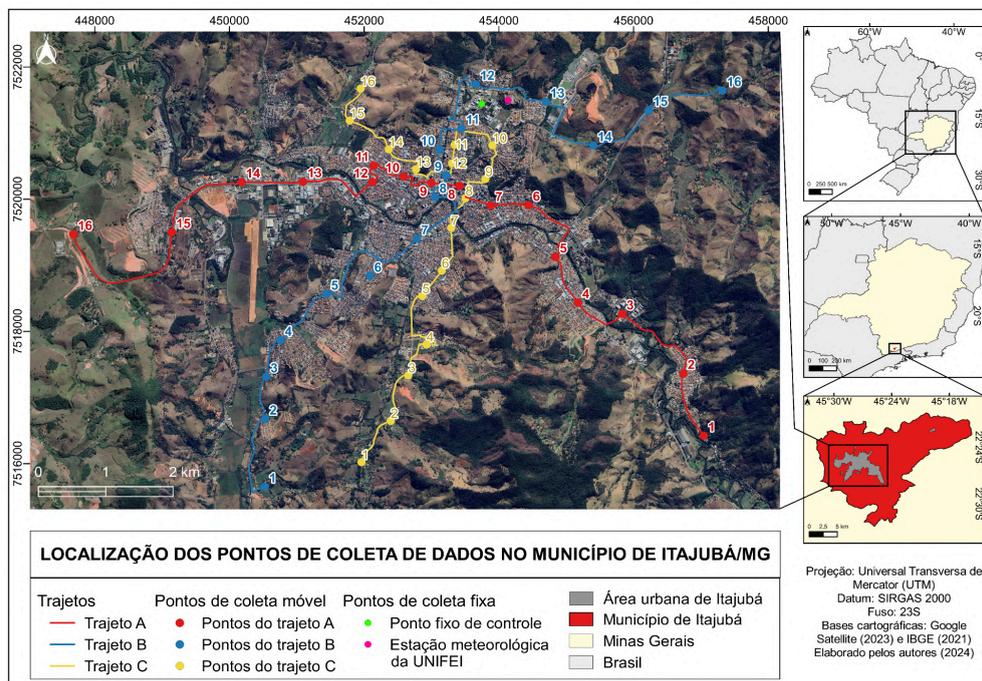
MATERIAIS E MÉTODOS

Para a execução desta pesquisa, foram articuladas cinco etapas metodológicas que se organizaram na seguinte sequência: os preparativos pré-trabalhos de campo, as coletas itinerantes de dados, o tratamento e processamento dos dados, o cálculo dos índices de conforto térmico e a análise comparativa dos resultados.

Visto que se optou pelo uso da técnica de transectos móveis na etapa das coletas de dados, de início, foram construídos os equipamentos de mensuração. Utilizaram-se termo-higrômetros digitais, da marca *Incoterm* e modelo 7666.02.0.00, instalados em

suportes de PVC conectados a hastes de PVC com 1,5 metro, as quais foram, durante as coletas, acopladas à lateral de veículos (FIALHO, 2009). Os termo-higrômetros digitais foram previamente calibrados por meio de testes de regressão linear segundo a estação meteorológica da Universidade Federal de Itajubá. Com base no *Google Earth Pro*, definiram-se as rotas que foram percorridas pelos transectos móveis: os trajetos A e B para o episódio de inverno e, para o de verão, adicionou-se o C, ao longo dos quais se delimitaram pontos de coleta de dados em função dos diferentes padrões de uso da terra na cidade, totalizando respectivamente 32 e 48 pontos no inverno e no verão (Figura 1).

Figura 1 - Localização dos pontos de coleta de dados no município de Itajubá/MG.



Fonte: Elaboração própria.

As coletas de dados foram realizadas de 23 a 26 de julho de 2022 e de 26 a 29 de dezembro de 2023, coincidindo com tipos de tempo derivados de dinâmicas sinóticas características do inverno e do verão no Sudeste. Os transectos móveis percorreram os trajetos pré-definidos entre 21 e 22 horas, mensurando dados de temperatura e umidade relativa por meio da estratégia de *stop-and-go*. Os bancos de dados obtidos foram tabulados em planilhas do programa *LibreOffice Calc 6.4* e corrigidos segundo a técnica de correção de simultaneidade, que minimiza o efeito da defasagem temporal sobre os dados durante as coletas, utilizando um ponto fixo como parâmetro (FIALHO, 2009).

Para o cálculo do conforto térmico, selecionaram-se dois índices: o Índice de Temperatura Efetiva (TE) e o Índice de Temperatura Efetiva com Vento (TEv). De

acordo com Souza e Nery (2012), são índices largamente utilizados em pesquisas científicas relacionadas ao conforto térmico em ambiente tropical, baseados na mesma fundamentação teórica, sendo obtidos respectivamente pelas Equações 1 e 2.

$$TE = Ta - 0,4(Ta - 10) \left(1 - \frac{Ur}{100}\right) \quad (1)$$

$$TEv = 37 - \frac{(37-Ta)}{\left[0,68 - 0,0014Ur + \frac{1}{(1,76 + 1,4v^{0,75})}\right]} - 0,29Ta \left(1 - \frac{Ur}{100}\right) \quad (2)$$

Onde T_a é a temperatura do ar em °C, U_r é a umidade relativa em % e v é a velocidade do vento em m/s.

Quanto à classificação dos limiares de conforto e desconforto térmico, o TE e o TEv podem compartilhar sete, nove ou onze classes de sensação térmica a depender da referência utilizada (SOUZA; NERY, 2012; GOBO; GALVANI, 2012; XAVIER; FIALHO, 2021). Optou-se, nesta pesquisa, pelo maior número de classes, visto que se mostraram mais adequadas à sensação térmica experienciada durante a realização das coletas itinerantes de dados pela cidade (Quadro 1).

Quadro 1 - Classes de sensação térmica dos índices TE e TEv.

Valores de TE e TEv	Sensação térmica	Grau de estresse fisiológico
<5	Muito Frio	Extremo estresse ao frio
5 - 10	Frio	Forte 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	Moderadamente Quente	Suando
31 - 34	Quente	Suor em profusão
>34	Muito Quente	Falha na termorregulação

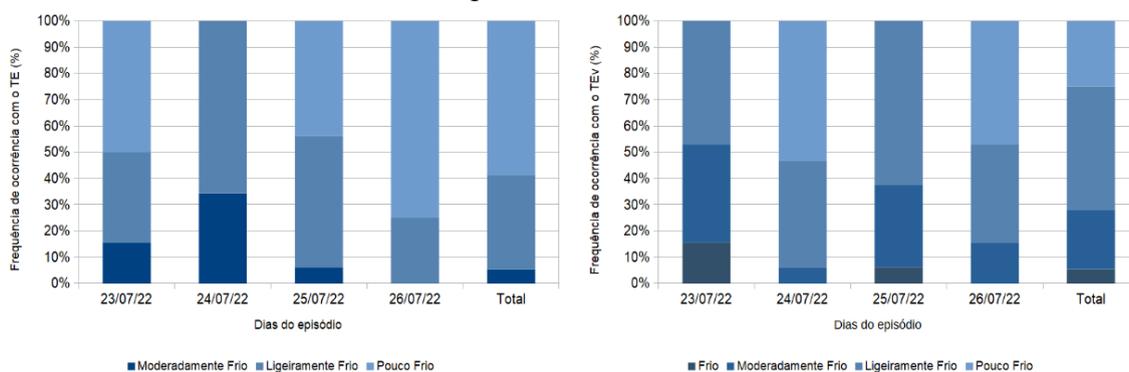
Fonte: Organização própria com base em Meteorologia Aplicada a Sistemas de Tempo Regionais MASTER-IAG/USP (apud Souza; Nery, 2012).

A análise dos resultados tomou uma abordagem comparativa. No programa *LibreOffice Calc 6.4*, foram construídos gráficos de colunas empilhadas que apresentam as frequências das classes de sensação térmica nos dias dos episódios. Por sua vez, no programa *Surfer 24.3.218*, produziram-se cartas de isolinhas de conforto térmico, utilizando a krigagem ordinária. Assim, foi possível comparar a sensação térmica indicada por cada índice, bem como de que forma a incorporação da variável velocidade do vento, obtida a partir da estação meteorológica da Universidade Federal de Itajubá, refletiu-se na avaliação do conforto térmico humano ao longo da cidade.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante o episódio de inverno, não houve registros de situações de conforto térmico. Ambos os índices indicaram estritamente desconforto ao frio, distinguindo-se, porém, em relação à intensidade e à frequência das classes de sensação térmica obtidas com cada aplicação. Considerando apenas a temperatura do ar e a umidade relativa, o TE classificou 58,6% dos registros em “pouco frio”, 35,9% em “ligeiramente frio” e 5,5% em “moderadamente frio”, de modo que, nos dias 23 e 24 de julho, o desconforto ao frio foi mais intenso que o restante do episódio. Já, o TEv indicou 25% em “pouco frio”, 46,9% em “ligeiramente frio”, 22,6% em “moderadamente frio” e 5,5% em “frio”, englobando mais classes se comparado ao TE (Figura 2).

Figura 2 - Frequência das classes de sensação térmica obtidas durante o episódio de inverno pelos índices TE e TEv.

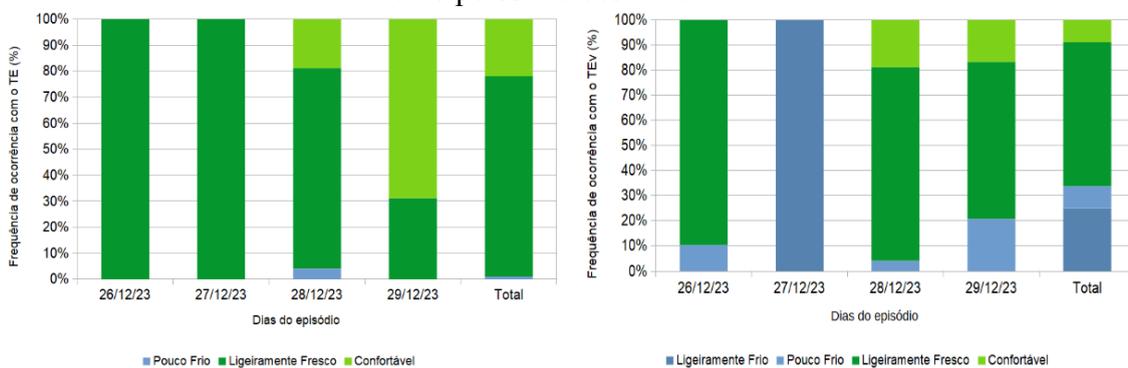


Fonte: Elaboração própria.

A elevação da temperatura do ar e umidade relativa no episódio de verão alterou os resultados obtidos por cada índice, reduzindo, ainda que não totalmente em função do arrefecimento inerente à noite, os registros de desconforto ao frio. De um lado, a

classe predominante de sensação térmica obtida pelo TE foi “ligeiramente fresco”, com o alcance de 77,1% dos registros, seguida de “confortável” (21,9%) e “pouco frio” (1,0%). De outro, o TEv permaneceu captando leve desconforto ao frio, especialmente no dia 27 de dezembro quando uma frente fria se direcionou ao sul de Minas Gerais implicando ventos com 14,66 km/h. Assim, 8,8% dos registros se enquadraram em “confortável”, 57,4% em “ligeiramente fresco”, 8,8% em “pouco frio” e 25,0% em “ligeiramente frio” (Figura 3).

Figura 3 - Frequência das classes de sensação térmica obtidas durante o episódio de verão pelos índices TE e TEv.

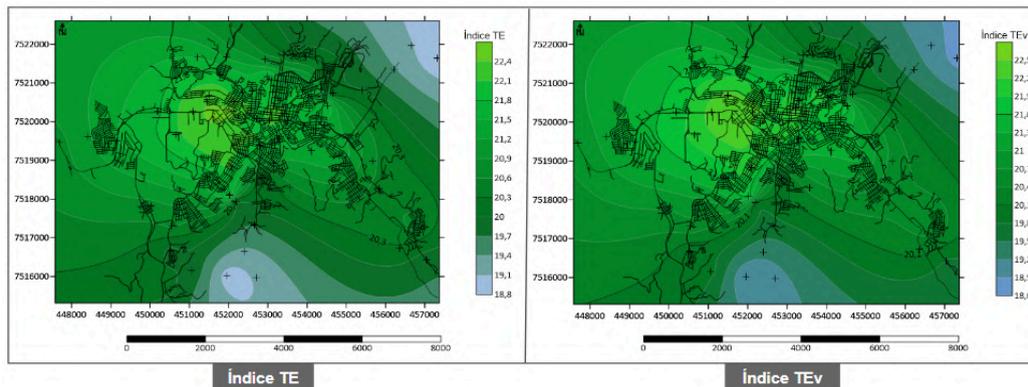


Fonte: Elaboração própria.

Observou-se que a sensação térmica durante o período noturno na cidade de Itajubá variou conforme a sazonalidade. No verão, predominaram situações de frescor a conforto térmico, ao passo que, no inverno, o desconforto ao frio foi mais frequente. O TEv mostrou acentuar o resfriamento, maximizando a influência do vento sobre a sensação térmica e obtendo frequências elevadas das classes associadas ao desconforto para o frio, o que se alinha aos resultados de Fante, Dubreuil e Sant’Anna Neto (2017) e Gobo e Galvani (2012). Foi o TE, portanto, que caracterizou mais adequadamente a sensação térmica durante os episódios, bem como apontam Xavier e Fialho (2021).

Embora se distingam quanto às frequências das classes de sensação térmica, em termos espaciais, o TE e o TEv apresentaram variações semelhantes ao longo dos trajetos percorridos pelos transectos móveis. Nas extremidades rurais, onde predominam áreas com vegetação arbórea ou rasteira, o desconforto ao frio assumiu maior frequência e intensidade. Ao longo dos bairros periurbanos, o valor de ambos os índices sofreu um gradativo aumento, refletindo a influência da cidade sobre o balanço de radiação entre a superfície e a atmosfera que, na região central da cidade, promoveu o registro frequente, sobretudo no verão, de situações de frescor e conforto térmico (Figura 4).

Figura 4 - Cartas de isolinhas de conforto térmico do dia 28 de dezembro de 2023 obtidas pelos índices TE e TEv na cidade de Itajubá/MG.



Fonte: Elaboração própria.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O cotidiano da população é diretamente influenciado pelas condições de tempo, o que atribui relevância aos estudos dedicados ao conforto térmico humano. Nesse sentido, comparar metodologias utilizadas na avaliação de situações potencialmente desconfortáveis possibilita encontrar as formas mais adequadas de aferir a sensação térmica em uma localidade, viabilizando, desse modo, o monitoramento do conforto térmico dos indivíduos. Na cidade de Itajubá, a aplicação dos índices de Temperatura Efetiva (TE) e de Temperatura Efetiva com Vento (TEv) resultou em distintas frequências das classes de sensação térmica. No inverno, o TE indicou a predominância de “pouco frio”, enquanto o TEv captou um resfriamento mais intenso. Já, no verão, ao passo que o TE registrou majoritariamente “ligeiramente fresco”, o TEv ainda apontou “pouco frio”. Ambos os índices, porém, apresentaram variação espacial semelhante. Por fim, o TE se mostrou mais fidedigno à sensação térmica experienciada nos episódios.

Palavras-chave: Desconforto térmico, Sensação térmica, Termorregulação, Ilhas de calor, Itajubá.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à FAPESP pelo financiamento do processo nº 2023/06816-4, ao CEPReMG pelo acesso à estação meteorológica para a calibragem dos equipamentos e à Unifei pela disponibilização de um local para o posicionamento do ponto de coleta fixo.

REFERÊNCIAS

- FANTE, K. P. **Eventos extremos de temperatura e seus impactos no conforto térmico humano**: estudo de caso em Presidente Prudente, Brasil, na perspectiva da Geografia do Clima. 2019. 327f. Tese (Doutorado em Geografia) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho, Presidente Prudente, 2019.
- FANTE, K. P.; DUBREUIL, V.; SANT’ANNA NETO, J. L. Avaliação comparativa entre metodologias de identificação de situações de conforto térmico humano aplicado ao contexto tropical, Presidente Prudente/Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, [S. l.], v. 21, n. 13, p. 588-612, jul./dez. 2017.
- FERNÁNDEZ-GARCÍA, F. **Manual de Climatología Aplicada**: clima, medio ambiente y planificación. Madrid: Editorial Síntesis S. A., 1996.
- FERREIRA, R. R.; PASCOALINO, A. Variação térmica do ar na cidade de Itajubá/MG em um episódio atmosférico de inverno: primeiros experimentos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CLIMATOLOGIA GEOGRÁFICA, 15., 2023, Guarapuava. **Anais...** [S. l.]: ABCLima, 2023, p. 2235-2249.
- FIALHO, E. S. **Ilha de calor em cidade de pequeno porte**: caso de Viçosa, na Zona da Mata Mineira. 2009. Tese (Doutorado em Geografia Física) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.
- FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. **Manual de Conforto Térmico**. 5 ed. São Paulo: Studio Nobel, 2001.
- GOBO, J. P. A. **Regionalização climática do Rio Grande do Sul com base no zoneamento do conforto térmico humano**. 2013. 184f. Dissertação (Mestrado em Geografia Física) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.
- GOBO, J. P. A.; GALVANI, E. Aplicação do Índice de Temperatura Efetiva com Vento (TEv) nos estudos de conforto térmico para o estado do Rio Grande do Sul. **Revista Geonorte**, [S. l.], v. 1, n. 5, p. 403-413, 2012.
- MONTEIRO, L. M.; ALUCCI, M. P. Questões teóricas de conforto térmico em espaços abertos: consideração histórica, discussão do estado da arte e proposição de classificação de modelos. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 7, n. 3, p. 43-58, jul./set. 2007.
- SOUZA, D. M.; NERY, J. T. O conforto térmico na perspectiva da Climatologia Geográfica. **Geografia**, Londrina, v. 21, n. 2, p. 65-83, mai./ago. 2012.
- XAVIER, T. C.; FIALHO, E. S. Avaliação comparativa entre metodologias de identificação de conforto térmico urbano na cidade de Vitória, ES. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CLIMATOLOGIA GEOGRÁFICA, 14., 2021, João Pessoa. **Anais...** [S. l.]: ABCLima, 2021, p. 167-181.