ISSN:2594-6153

Bioclimatologia do Conforto Térmico do Estado de São Paulo

João Batista Ferreira Neto, Gabriel Pereira

[1] Universidade de São Paulo (USP)
[2] Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ)

E-mail: joao.geo@usp.br

Resumo: Este estudo analisa a evolução do índice UTCI entre 1979 e 2024, considerando tanto a área urbana da cidade de São Paulo quanto a escala estadual, com base em dados da reanálise ERA5-HEAT. A pesquisa investiga as variações térmicas anuais e os efeitos da altitude sobre os padrões de desconforto. Identificou-se uma tendência estatisticamente significativa de aumento térmico e uma mudança abrupta em 2014. Os anos mais críticos apresentaram níveis elevados de desconforto, evidenciando os efeitos do aquecimento urbano e regional sobre a ambiência externa.
Palavras-chave: Índice biometeorológico; Risco climático urbano; Intensificação térmica; Dinâmica termoclimática; Climatologia aplicada.

Bioclimatology of thermal comfort in the state of São Paulo

Abstract: This study analyzes the evolution of the UTCI between 1979 and 2024, considering both the urban area of the city of São Paulo and the state scale, based on ERA5-HEAT reanalysis data. The research investigates annual thermal variations and the influence of elevation on discomfort patterns. A statistically significant warming trend and an abrupt change in 2014 were identified. The most critical years presented high levels of thermal stress, highlighting the effects of urban and regional warming on the outdoor environment.
Keywords: Biometeorological index; Urban climate risk; Thermal intensification; Thermoclimatic dynamics; Applied climatology.

Introdução

O desconforto térmico ao ar livre tem se intensificado nas últimas décadas como consequência do aumento das temperaturas médias, da frequência de extremos térmicos e da expansão urbana não planejada. Esses processos estão associados à modificação das interações entre variáveis atmosféricas e fisiológicas, afetando a sensação térmica humana em diferentes escalas (Di Napoli et al., 2020; Bröde et al., 2012) [1,2]. Em países tropicais como o Brasil, tais alterações assumem proporções preocupantes, uma vez que amplificam riscos sanitários e reduzem a qualidade de vida em ambientes urbanos (Sánchez & Olcina, 2021) [3].

Nesse contexto, o índice biometeorológico Universal Thermal Climate Index (UTCI) tem sido amplamente utilizado para estimar o estresse térmico humano, integrando múltiplas variáveis ambientais — temperatura do ar, velocidade do vento, umidade relativa e temperatura

radiante média — a modelos avançados de termorregulação corporal (Jendritzky et al., 2012) [4]. Estudos recentes têm evidenciado a importância de se adaptar as faixas do UTCI às realidades regionais, como proposto por Neto (2022) [5], a fim de interpretar com maior precisão os impactos térmicos em territórios tropicais e subtropicais.

O estado de São Paulo, dada sua diversidade altimétrica e densidade urbana, representa um excelente recorte espacial para o estudo do conforto térmico. A heterogeneidade fisiográfica influencia diretamente os padrões de temperatura e umidade, condicionando diferentes níveis de estresse térmico entre regiões serranas e áreas de baixa altitude. No entanto, análises sistemáticas sobre a distribuição espaciotemporal do UTCI em escala estadual ainda são escassas. A presente pesquisa busca preencher essa lacuna, associando tendências térmicas à variabilidade altimétrica do território paulista em um recorte de mais de quatro décadas.

Objetivos

O presente estudo tem como objetivo principal estabelecer a normal climatológica do conforto térmico para o estado de São Paulo com base no índice UTCI. Especificamente, pretende-se:

- Analisar a variação temporal do UTCI entre 1979 e 2024;
- Identificar padrões espaciais associados à altitude;
- Detectar tendências e pontos de inflexão na série temporal;

Materiais e Métodos

Este estudo utilizou dados horários do índice UTCI provenientes da base ERA5-HEAT, disponibilizada pelo Copernicus Climate Change Service, com resolução espacial de 0,25° × 0,25° e abrangência temporal de 1979 a 2024. A área de estudo corresponde ao estado de São Paulo.

O processamento dos dados foi realizado no software GrADS, a partir de séries temporais contínuas de UTCI, convertidas para médias anuais por célula de grade. Os dados médios anuais foram posteriormente integrados em ambiente QGIS para a espacialização dos resultados e elaboração de mapas temáticos.

A tendência temporal foi determinada por meio de regressão linear simples, com cálculo do coeficiente angular (°C/ano), coeficiente de determinação (R^2) e teste de significância estatística (p-valor). Para identificar mudanças abruptas no comportamento da série, foi aplicado o teste de Pettitt, amplamente utilizado para detectar pontos de ruptura em séries climatológicas (Pettitt, 1979) [6].

A classificação dos valores de UTCI foi feita conforme a tipologia adaptada por Neto (2022), que ajusta os limiares biometeorológicos à realidade climática brasileira.

Resultados e discussões

Os resultados obtidos e evidenciados na figura 1 revelam uma clara diferenciação espacial no UTCI ao longo do território paulista, cuja principal justificativa físico-geográfica pode ser atribuída ao fator altimétrico. A altitude, enquanto variável fisiográfica, atua diretamente sobre a temperatura do ar e demais componentes microclimáticos, sendo amplamente reconhecida como moduladora das condições térmicas percebidas em ambientes externos (ZHENG et al., 2024) [7].

No estado de São Paulo, observa-se um gradiente altitudinal que se estende das regiões mais elevadas do Planalto Atlântico e da Serra da Mantiqueira (acima de 800 metros) até áreas de baixa altitude nas porções norte e noroeste, como a Depressão Periférica e o Planalto Ocidental Paulista (com altitudes médias inferiores a 400 metros). Essa variação altimétrica repercute diretamente nos valores do UTCI: regiões elevadas tendem a registrar menores valores de estresse térmico por calor devido às menores temperaturas médias do ar, à maior ventilação orográfica e à redução da densidade do ar, fatores que favorecem maior dissipação de calor sensível e latente (LI et al., 2024; SILVA et al., 2024).

Segundo Li et al. (2024) [8], o aumento da altitude contribui para uma redução térmica média de 0,72 °C a cada 100 metros de elevação. Esse efeito é coerente com os padrões observados em municípios do sul e sudeste paulista, como Campos do Jordão, São Bento do Sapucaí e Apiaí, que registram valores médios de UTCI significativamente mais baixos, configurando-se como áreas de conforto térmico ou até mesmo de estresse por frio em determinados períodos do ano. Em contrapartida, municípios como São José do Rio Preto, Barretos e Presidente Prudente, localizados em áreas de baixa altitude e forte continentalidade térmica, exibem valores elevados de UTCI, com predominância de estresse térmico por calor severo.

Estudos recentes demonstram que a interação entre relevo e variáveis atmosféricas como radiação, albedo e circulação de ventos potencializa a heterogeneidade térmica em escala regional (Alcoforado e Andrade, 2006; Silva et al., 2024) [8, 9]. Além disso, a altitude influencia a carga térmica acumulada durante o dia e a taxa de resfriamento noturno, conforme evidenciado por análises microclimáticas que integram sensoriamento remoto e observações in situ (LOPES et al., 2024) [10]. Portanto, a altimetria constitui um fator físico determinante na

variabilidade espacial do UTCI em São Paulo, sendo responsável por mitigar ou intensificar os efeitos de calor extremo conforme a morfologia do relevo local. Sua consideração é imprescindível para uma análise climática integrada e para a delimitação de zonas de risco térmico em contextos urbanos e rurais, especialmente em um cenário de intensificação das ondas de calor sob influência das mudanças climáticas globais.

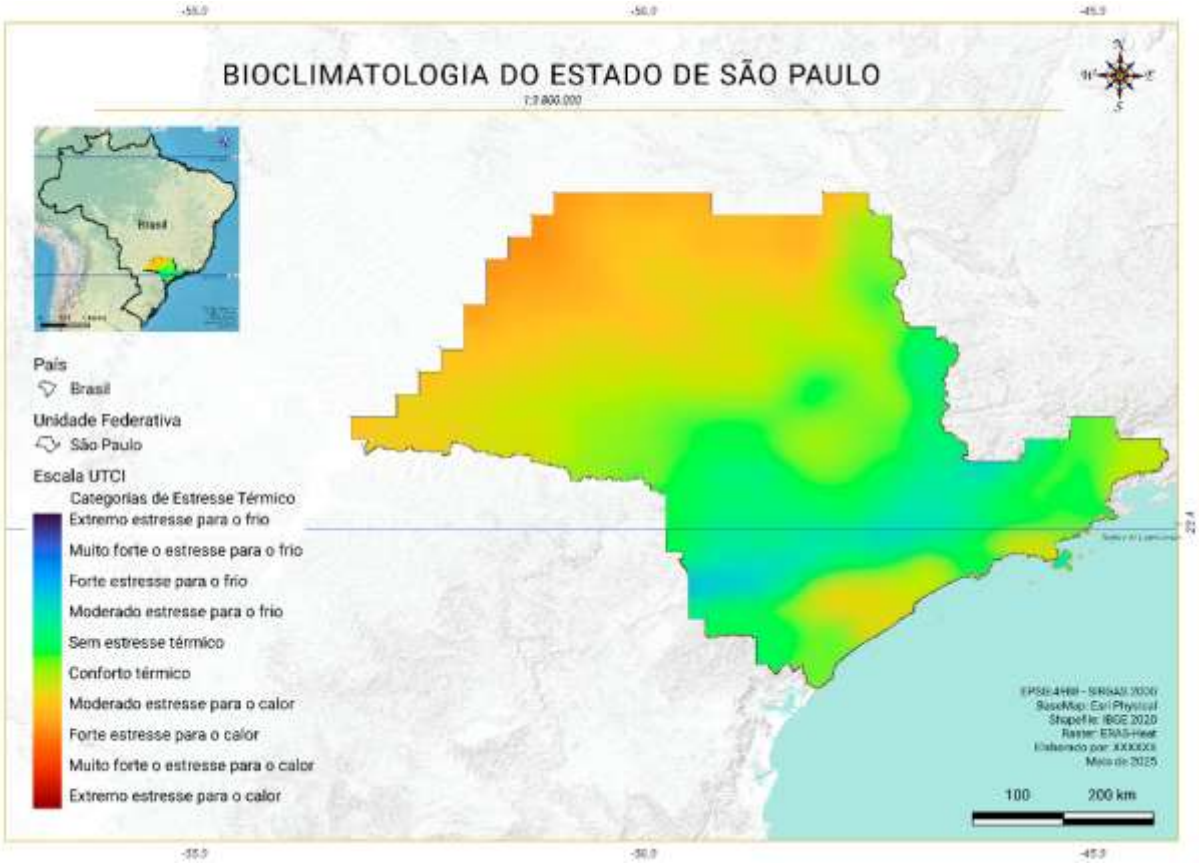

Figura 1. Mapa com o zoneamento bioclimático para o estado de São Paulo.

Com resolução espacial de 0,25° × 0,25°, centrados na coordenada 23° 35′ 4,27″ S, 46° 38′ 8,53″ W, foi investigado como o UTCI variou na área urbana ao longo do tempo na cidade de São Paulo. Por meio de regressão linear simples aplicada à série anual de 1979 a 2024, identificou-se uma inclinação positiva de 0,031 °C por ano (coeficiente angular = 0,03126), com p-valor = $4{,}25 \times 10^{-7}$, evidenciando uma tendência estatisticamente significativa. O coeficiente de determinação ($R^2 = 0{,}444$) indica que cerca de 44% da variação no UTCI pode ser explicada pela progressão dos anos. Esses resultados apontam para um aumento consistente do desconforto térmico por calor, na capital paulista. Complementarmente, a aplicação do teste de Pettitt à série temporal do UTCI médio anual para São Paulo revelou uma mudança estatisticamente significativa no ano de 2014 (p-valor = 0,0014), indicando uma alteração abrupta no comportamento da tendência apontando que a partir de 2014 os valores de UTCI passaram a se manter sistematicamente mais elevados. Considerando que o UTCI expressa o

grau de conforto ou desconforto térmico ao ar livre, esse ponto de inflexão sugere o início de um período caracterizado por maior desconforto térmico por calor.

A análise da série anual do UTCI médio (em °C) para a cidade de São Paulo, apresentada no gráfico da figura 2. Os anos de 2024 (24,15 °C), 2023 (23,79 °C) e 2022 (23,63 °C) destacam-se como os mais desconfortáveis termicamente por calor, evidenciando níveis elevados dentro da zona limítrofe superior de conforto, próximos ao início do estresse térmico. Em contrapartida, os três anos com menor UTCI médio foram 1990 (21,58 °C), 1984 (21,62 °C) e 1983 (21,65 °C), configurando períodos com o maior conforto térmico relativo no contexto urbano.

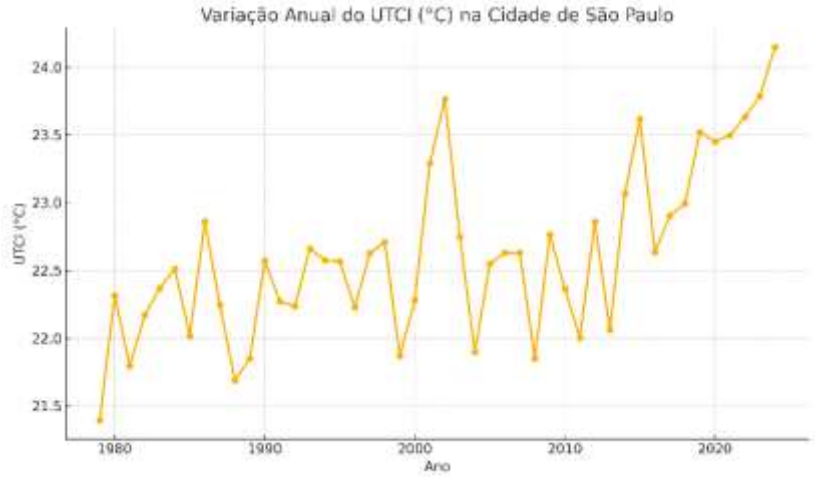

Figura 2. Gráfico com a distribuição do UTCI na cidade de São Paulo.

Conclusão

Os resultados obtidos demonstram que o índice UTCI apresenta uma tendência estatisticamente significativa de intensificação do desconforto por calor no estado de São Paulo ao longo do período de 1979 a 2024, com destaque para uma inflexão observada a partir de 2014, a qual evidencia o agravamento das condições de estresse térmico por calor. A influência da altitude revelou-se determinante na configuração espacial do conforto térmico, com áreas de maior elevação associadas a menores níveis de estresse térmico. Os anos mais desconfortáveis termicamente foram identificados no recorte mais recente da série, corroborando o avanço das condições climáticas adversas sobre os centros urbanos. Esses achados reforçam a importância da bioclimatologia como ferramenta diagnóstica e aplicada na avaliação de vulnerabilidades térmicas regionais e no planejamento ambiental urbano.

Agradecimentos:

O autor agradece à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio concedido durante o desenvolvimento deste estudo (Processo nº 88887.001625/2024-00).

Referências:

1. Di Napoli C, Pappenberger F, Cloke HL. Assessing heat stress across Europe through the Universal Thermal Climate Index (UTCI). *Int J Biometeorol*. 2020;64:1555–1568. DOI: 10.1007/s00484-020-01965-6
2. Bröde P, Fiala D, Blazejczyk K, Epstein Y, Jendritzky G, Kampmann B, et al. Derivation and validation of the Universal Thermal Climate Index (UTCI). *Int J Biometeorol*. 2012;56(3):481–494. DOI: 10.1007/s00484-011-0454-1
3. Sánchez J, Olcina J. Riesgos climáticos y planificación territorial: nuevas perspectivas. *Investig Geogr*. 2021;(75):35–50. DOI: 10.14198/INGEO.18043
4. Jendritzky G, de Dear R, Havenith G. UTCI—Why another thermal index? *Int J Biometeorol*. 2012;56(3):421–428. DOI: 10.1007/s00484-011-0513-7
5. Ferreira Neto JB. *Zoneamento bioclimático brasileiro* [dissertação]. São João del-Rei (MG): Universidade Federal de São João del-Rei – UFSJ; 2022. Disponível em: https://ufsj.edu.br/portal2-repositorio/File/ppgeog/JoaaoBFNeto.pdf
6. Pettitt AN. A non-parametric approach to the change-point problem. *Appl Stat*. 1979;28(2):126–135. DOI: 10.2307/2346729
7. Zheng Y, Peng J, Liu Y, Jiang S, Cheng X, Liu X, et al. GloUTCI-M: a global monthly 1 km Universal Thermal Climate Index dataset from 2000 to 2022. *Earth Syst Sci Data*. 2024;16(5):2407–2424. DOI: 10.5194/essd-16-2407-2024
8. Alcoforado MJ, Andrade H. Urban climate and thermal comfort in Lisbon. *Finisterra*. 2006;41(81):7–21. DOI: 10.18055/Finis1383
9. Silva T, Lopes A, Vasconcelos J. A micro-scale look into pedestrian thermophysiological comfort in an urban environment: The case of Lisbon. *Urban Climate*. 2024;50:101123. DOI: 10.1016/j.uclim.2024.101123
10. Lopes A, Silva T, Vasconcelos J. Assessing outdoor thermal comfort in urban areas: A case study in Lisbon.