



NORMAL CLIMATOLÓGICA DO CONFORTO TÉRMICO NAS CAPITALS BRASILEIRAS: CONTRIBUIÇÕES PARA A GEOGRAFIA DO CLIMA E A BIOCLIMATOLOGIA APLICADA

João Batista Ferreira Neto ¹

Gabriel Pereira ²

RESUMO

O estudo do conforto térmico humano tem se consolidado como um campo central na climatologia aplicada, em especial diante da intensificação de extremos de calor e frio em diferentes regiões do globo. Este estudo tem como objetivo estabelecer uma normal climatológica do conforto térmico nas capitais brasileiras, a partir do Universal Thermal Climate Index (UTCI) calculado com dados horários do reanálise ERA5-HEAT para o período de 1979 a 2020. O referencial teórico ancora-se na bioclimatologia aplicada e na geografia do clima, destacando o papel de variáveis como a Temperatura Radiante Média (MRT) na compreensão da ambiência térmica urbana. A metodologia consistiu na extração das séries temporais do UTCI para cada capital, seguida da classificação em categorias de estresse térmico conforme os limites fisiológicos do índice. Os resultados evidenciam contrastes regionais marcantes: o Norte e o Nordeste apresentam predominância de estresse por calor, com Teresina e Manaus entre os casos mais desconfortáveis por calor; o Sul concentra capitais sob estresse por frio, com destaque para Curitiba; o Sudeste revela maior heterogeneidade. As conclusões reforçam a relevância de diagnósticos multiescalares para compreender a diversidade térmica do Brasil e apontam para a necessidade de integrar variáveis radiativas e socioeconômicas em análises futuras, de modo a subsidiar políticas públicas de adaptação às mudanças climáticas.

Palavras-chave: Variabilidade climática, Ambiência urbana, Estresse térmico, Justiça ambiental, Adaptação climática.

ABSTRACT

The study of human thermal comfort has become a central field within applied climatology, particularly in light of the intensification of heat and cold extremes across different regions of the world. This study aims to establish a climatological normal of thermal comfort in Brazilian capitals using the Universal Thermal Climate Index (UTCI), derived from hourly ERA5-HEAT reanalysis data for the period 1979–2020. The theoretical framework is grounded in applied bioclimatology and climate geography, emphasizing the role of variables such as Mean Radiant Temperature (MRT) in understanding urban thermal environments. The methodology involved extracting UTCI time series for each capital and classifying them into thermal stress categories according to the physiological thresholds of the index. The results highlight marked regional contrasts: the North and Northeast exhibit a predominance of heat stress, with Teresina and Manaus among the most critical cases; the South concentrates capitals under cold stress, particularly Curitiba; and the Southeast reveals greater heterogeneity. The conclusions reinforce the importance of multiscale diagnostics to understand Brazil's thermal diversity and point to the need for integrating radiative and socioeconomic variables in future analyses, thereby supporting public policies for climate change adaptation.

Keywords: Climate variability, Urban environment, Thermal stress, Environmental justice, Climate adaptation.

¹ Doutorando do Curso de Geografia Física da Universidade de São Paulo - USP, joao.geo@usp.br;

² Doutor em Sensoriamento Remoto pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, pereira@ufsj.edu.br;



INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, os eventos climáticos extremos, particularmente as ondas de calor e frio, intensificaram-se em frequência, intensidade e duração, configurando-se como uma das principais ameaças à saúde humana e à qualidade de vida em escala global (TESFAYE; KEBEDE; GETACHEW; WONDIMU, 2025; TRESKOVA; SCHMIDT; PETROVA; LANGE; KLEIN, 2024; AUNAN; ORRU; SJÖDIN, 2024; ESMAEILI; ZAREI; REZAEI; NOORI; HEIDARI, 2024). Essa intensificação não afeta de forma homogênea todos os territórios: populações urbanas de países tropicais como o Brasil estão entre as mais vulneráveis, tanto pela exposição elevada ao calor quanto pela desigualdade socioambiental que limita a adaptação (VIEIRA DE SOUSA, 2024; DEVECÍ SEVIM; ÜNÜVAR, 2023).

Diante desse cenário, a Geografia do Clima e a Bioclimatologia Aplicada têm avançado na construção de indicadores capazes de mensurar o desconforto térmico, considerando as interações entre variáveis meteorológicas, características fisiológicas humanas e condições urbanas. Entre esses, destaca-se o Universal Thermal Climate Index (UTCI), concebido a partir de modelos termofisiológicos dinâmicos e hoje consolidado como referência internacional em análises biometeorológicas (BRÖDE; BLANKE; FIALA; HAVENITH; JENDRITZKY; KUNZ, 2012). O acesso a bases de reanálise climática, como o ERA5-HEAT, tem ampliado sua aplicabilidade, permitindo análises em escala contínua desde 1979 (DI NAPOLI; BRÖDE; LAUTENSCHLAGER; ZARETTE; PIRSCH; JENDRITZKY, 2020).

O estudo do conforto térmico também requer compreender o papel da Temperatura Radiante Média (MRT), variável central do balanço energético da superfície, por sintetizar fluxos de radiação de ondas curtas e longas. Ao integrar a MRT em índices como o UTCI, torna-se possível captar a influência de fatores como albedo, emissividade e geometria urbana sobre a ambiência térmica (THORSSON; MATZARAKIS, 2014; MATZARAKIS, 2010). Nesse sentido, a literatura tem destacado a relevância da cobertura vegetal como fator regulador da MRT e elemento fundamental para mitigar extremos térmicos em ambientes urbanos, reduzindo a carga radiativa e melhorando a qualidade ambiental em cidades brasileiras e latino-americanas (PEDRO; SILVA, 2025).

Essa perspectiva é particularmente relevante no Brasil, país de forte heterogeneidade climática e urbana, onde extremos de calor e frio coexistem e se intensificam em função de condições regionais e socioespaciais. Pesquisas recentes ressaltam ainda que a intensificação do calor urbano amplia a dependência de sistemas de climatização artificial, o que acarreta maior consumo energético e reforça desigualdades socioeconômicas (DELL'SANTO;



FERREIRA, 2025). Tais questões se inserem em um debate mais amplo sobre justiça térmica e adaptação climática, no qual a bioclimatologia aplicada e o planejamento urbano assumem papel central (LIMA et al., 2023).

No contexto latino-americano, o estudo do clima urbano tem evidenciado que processos de urbanização acelerada, crescimento populacional e carência de infraestrutura potencializam a vulnerabilidade ao estresse térmico. Esses fatores reforçam que a análise brasileira deve ser compreendida dentro de uma realidade regional mais ampla, na qual desigualdades sociais e urbanas condicionam fortemente a exposição e a adaptação ao calor e ao frio (CASTELLO et al., 2025).

No contexto brasileiro, a avaliação do conforto térmico adquire relevância não apenas científica, mas também política e social. Estudos recentes evidenciam os efeitos diretos da exposição ao calor sobre mortalidade, hospitalizações e produtividade laboral, especialmente entre populações idosas e grupos socialmente vulneráveis (PUGA-BONILLA; MARTÍNEZ-SÁNCHEZ; LÓPEZ-GARCÍA; GÓMEZ-CASTRO, 2025; TSELIU; ZERVAS, 2024). Outros trabalhos destacam ainda os impactos do estresse térmico sobre a saúde mental, o desenvolvimento cognitivo e a resiliência dos sistemas de saúde pública (SUGDEN; MERLO, 2024; THOMAS; FLEMING, 2024). Além disso, estudos prospectivos apontam que cenários climáticos futuros tendem a intensificar esses contrastes térmicos, ampliando riscos socioambientais e reforçando a urgência de diagnósticos multiescalares (NOVAES; MONTEIRO, 2025).

Assim, este trabalho tem como objetivo estabelecer uma normal climatológica do conforto térmico nas capitais brasileiras, utilizando a série histórica do UTCI (1979–2020), de modo a identificar padrões espaciais e sazonais do desconforto térmico e contribuir para a compreensão geográfica das desigualdades climáticas no país.

METODOLOGIA

Para a elaboração da normal climatológica do conforto térmico, foram utilizados os dados horários do *Universal Thermal Climate Index* (UTCI), disponibilizados pelo conjunto de reanálise ERA5-HEAT, produzido pelo *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF). A escolha pelo índice UTCI se fundamenta em sua concepção como um padrão internacional em biometeorologia humana, apoiado em modelos termofisiológicos avançados que o tornam universalmente aplicável a diferentes climas, estações do ano e condições ambientais, superando limitações de índices mais antigos.

A base de dados ERA5-HEAT apresenta resolução espacial de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ e abrange o período contínuo de 1º de janeiro de 1979 a 31 de dezembro de 2020. A utilização deste conjunto de dados é justificada por sua ampla cobertura temporal e alta resolução, que viabilizam a construção de uma climatologia detalhada e confiável do conforto térmico em escala global. A extração das séries temporais para cada uma das capitais brasileiras foi realizada no software GrADS (versão 2.2.1), selecionando-se o ponto da grade mais próximo das coordenadas geográficas centrais de cada cidade. A Figura 1 apresenta a localização das capitais brasileiras consideradas no estudo, destacando os pontos de grade extraídos do ERA5-HEAT.

Figura 1 - Localização do Brasil, limites estaduais e capitais consideradas no estudo.



Fonte: Autores

A classificação do estresse térmico, apresentada nos resultados, seguiu a escala de avaliação fisiológica do UTCI. Esta escala traduz os valores do índice (em $^\circ\text{C}$) em 10 categorias



de estresse térmico, que variam desde "estresse por frio extremo" (abaixo de -40°C) até "estresse por calor extremo" (acima de $+46^{\circ}\text{C}$), incluindo uma faixa de "sem estresse térmico" (entre $+9^{\circ}\text{C}$ e $+26^{\circ}\text{C}$). A categorização final para cada capital (apresentada na Tabela 1) foi definida com base na análise da frequência e intensidade média do UTCI ao longo da série histórica de 42 anos, conforme os procedimentos operacionais do índice.

Tabela 1 – Categorias de estresse térmico segundo o UTCI

CLASSIFICAÇÃO UTCI	INTERVALO UTCI ($^{\circ}\text{C}$)
Extremo estresse por frio	< -40
Muito forte estresse por frio	-40 a -27
Forte estresse por frio	-27 a -13
Moderado estresse por frio	-13 a 0
Pouco estresse por frio	0 a 9
Conforto térmico	9 a 26
Pouco estresse por calor	26 a 32
Moderado estresse por calor	32 a 38
Forte estresse por calor	38 a 46
Muito forte estresse por calor	46 a 52
Extremo estresse por calor	> 52

Fonte: adaptado de Jendritzky; De Dear e Havenith (2012).

REFERENCIAL TEÓRICO

O interesse em compreender como o clima influencia no bem-estar humano remonta às civilizações antigas, passando por Hipócrates de Cós (460–375 a.C.), que já descrevia relações entre tempo atmosférico, saúde e habitação. Na modernidade, esse interesse se traduziu em experimentos sistemáticos, como os de Houghten e Yaglou (1923) nos Estados Unidos, considerados precursores na proposição de índices de conforto térmico. Durante a Revolução Industrial, estudos de Bedford (1936) e Winslow, Herrington e Gagge (1937) marcaram a consolidação da bioclimatologia aplicada ao ambiente de trabalho, enquanto pesquisadores europeus como Vernon e Warner (1932) introduziram medições mais integradas com a temperatura de globo.

A evolução dos índices bioclimáticos ao longo do século XX reflete o esforço em traduzir a experiência térmica em parâmetros quantificáveis. A Temperatura Efetiva (ET) de Houghten e Yaglou (1923), a Temperatura Efetiva Corrigida da ASHRAE (1967), o Índice de Globo e Bulbo Úmido (WBGT) de Yaglou e Minard (1957) e o Índice de Estresse Térmico de



Belding e Hatch (1955) representam etapas fundamentais dessa trajetória. Nos anos 1960–70, avanços metodológicos como o Índice PMV/PPD de Fanger (1970) e, posteriormente, o Índice PET de Höppe (1999) incorporaram balanços energéticos e modelos fisiológicos mais complexos.

Enquanto a bioclimatologia aplicada se consolidava internacionalmente com foco no ambiente de trabalho e na fisiologia, no Brasil, emergiam iniciativas pioneiras que, embora dialogando com essa tradição, direcionavam a análise para as grandes questões de saúde pública e as endemias. Pesquisadores como Afrânio Peixoto (1938) e Josué de Castro (1946) estabeleceram correlações entre clima e saúde, estabelecendo as bases para uma abordagem social do clima no país. Posteriormente, Galvão (1967) apresentou o primeiro zoneamento bioclimático para o Brasil, ainda fortemente baseado na classificação de Köppen, e outros esforços se seguiram, como a dissertação de Silva (1994), que buscou consolidar um zoneamento nacional com foco em edificações. Essa trajetória culminou na publicação da norma de *Zoneamento Bioclimático Brasileiro* pela ABNT (2003), que se tornou referência para a arquitetura e a engenharia brasileiras.

O Universal Thermal Climate Index (UTCI) foi concebido no âmbito da *International Society of Biometeorology (ISB)*, com suporte da *World Meteorological Organization/Commission for Climatology (WMO/CCI)* e da *COST Action 730*, como um padrão internacional em biometeorologia humana (JENDRITZKY; DE DEAR; HAVENITH, 2012). Seu desenvolvimento partiu da constatação de que os índices existentes – em grande parte baseados em combinações simples de variáveis meteorológicas ou em modelos limitados de balanço térmico – apresentavam restrições de aplicabilidade entre diferentes contextos climáticos, faixas fisiológicas e tipos de vestimenta. Assim, o UTCI buscou superar essas limitações ao se apoiar no estado-da-arte em termo-fisiologia, com a proposta de ser um índice universalmente aplicável a todas as regiões do globo, em qualquer estação do ano e sob diferentes condições ambientais.

Do ponto de vista metodológico, o UTCI foi construído a partir do modelo multi-nó de Fiala (*Fiala Physiological Model, FPC*), que simula a resposta dinâmica do corpo humano às variações ambientais por meio da representação de diferentes compartimentos corporais e mecanismos de termorregulação. Esse modelo foi acoplado a um modelo de vestimenta adaptativo, o que possibilitou a consideração de ajustes térmicos realistas em função de condições ambientais específicas. O UTCI é definido, portanto, como a temperatura equivalente de um ambiente de referência (umidade relativa de 50% até 20 hPa, ar calmo, que induz no modelo fisiológico a mesma resposta térmica do organismo em relação às condições reais



(BRÖDE et al., 2011). Essa concepção confere ao índice maior robustez teórica, pois não se trata de um ajuste empírico, mas da equivalência fisiológica entre diferentes situações ambientais.

Para uso operacional, foi desenvolvido um procedimento de cálculo rápido que preserva a responsividade do modelo completo, permitindo sua ampla aplicação em contextos científicos, técnicos e de formulação de políticas públicas (BRÖDE et al., 2011; JENDRITZKY; DE DEAR; HAVENITH, 2012). A consolidação do UTCI como referência global foi fortalecida pela incorporação em produtos de reanálise climática, notadamente o ERA5-HEAT, que disponibiliza séries históricas globais de temperatura radiante média (MRT) e UTCI em grade de 0,25°, com resolução horária desde 1979 (DI NAPOLI et al., 2020). Esse avanço ampliou de maneira significativa a aplicabilidade do índice, permitindo a elaboração de normais climatológicas e análises multiescalares, que hoje sustentam diagnósticos comparativos entre diferentes regiões e períodos.

A produção científica brasileira sobre conforto e sensação térmica apresentou expressiva expansão nas últimas duas décadas, consolidando-se como campo de investigação relevante tanto na climatologia geográfica quanto na arquitetura e no urbanismo. A revisão sistemática conduzida por Neto et al. (2024) evidencia que, além dos trabalhos já consolidados de Krüger e Gobo, emergem outros nomes de destaque, como Simone Queiroz da Silveira Hirashima, com forte atuação em Belo Horizonte, Francine Aidie Rossi, Nely Alexandre Marçal e João de Athaydes Silva Júnior, além de grupos liderados por Lucchese, Silva, Xavier e Alvarez, Vecchi, Cândido e Lamberts, Carfan e Dobbert, entre outros. Essa diversidade de autores e abordagens reflete tanto a consolidação metodológica do campo — com uso de índices clássicos e modernos, medições de campo, modelagens computacionais e simulações microclimáticas — quanto sua concentração espacial em contextos urbanos. O mapeamento realizado por essa revisão sistemática confirma que há uma comunidade científica estruturada, com continuidade de linhas de pesquisa e expansão geográfica gradual.

A consolidação da bioclimatologia aplicada no Brasil também se manifesta no papel desempenhado pelo Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído (ENCAC), criado em 1991 e realizado bianualmente em parceria com o Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído (ELACAC). O evento constitui o principal fórum científico brasileiro dedicado ao tema do conforto ambiental, congregando pesquisadores, profissionais e estudantes em torno da climatologia, arquitetura e urbanismo.

Na edição de 2025, realizada em São Carlos (USP – Campus São Carlos), o ENCAC reafirmou sua relevância ao reunir pesquisas aplicadas que abordaram desde a calibração e



validação de índices de conforto térmico (como UTCI e PET) até estudos sobre resiliência térmica local, estratégias de mitigação baseadas em vegetação urbana e materiais de cobertura, e o uso de simulações microclimáticas com softwares especializados e medições in situ. Muitos dos trabalhos reforçam a atuação de autores já consolidados, como Krüger, Gobo, Rossi e Marçal, ao mesmo tempo em que revelam a entrada de novos pesquisadores e grupos emergentes, ampliando a diversidade temática e geográfica da produção.

Para além disso, nos últimos anos, observa-se também o avanço de pesquisas em escala nacional, que extrapolam a predominância de estudos urbanos e locais. Esses trabalhos vêm aplicando o UTCI em séries históricas derivadas do ERA5-HEAT, possibilitando a elaboração do primeiro zoneamento bioclimático brasileiro com base nesse índice, além de análises específicas em biomas, como o Pantanal (NETO, 2022; NETO et al., 2024).

Nesse percurso, é importante destacar que a evolução dos índices bioclimáticos acompanhou transformações sociais e tecnológicas. Enquanto os primeiros indicadores estavam fortemente vinculados ao ambiente laboral e à fisiologia aplicada ao esforço físico, progressivamente passaram a dialogar com questões de urbanização, habitação e qualidade de vida. Essa transição evidencia a aproximação entre a bioclimatologia e a geografia, reforçando o caráter interdisciplinar da área e a necessidade de interpretar o clima não apenas como variável física, mas também como condicionante social e espacial

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A normal climatológica do conforto térmico para as capitais brasileiras evidencia contrastes marcantes entre diferentes regiões, resultado de condicionantes climáticos e geográficos como latitude, altitude, continentalidade, dinâmica atmosférica e ventilação costeira. Esses padrões sintetizam a diversidade térmica nacional e estão sistematizados na Tabela 2. De modo geral, as regiões Norte e Nordeste concentram capitais sob forte ou muito forte estresse térmico por calor, enquanto o Sul se caracteriza pelo predomínio do estresse térmico por frio. O Sudeste apresenta heterogeneidade, oscilando entre calor e frio, e Brasília (DF) constitui um caso singular, sem estresse térmico. Esses contrastes revelam como a variabilidade térmica brasileira não pode ser compreendida a partir de uma lógica uniforme, exigindo análises que articulem fatores naturais e socioespaciais. Além disso, os resultados reforçam a importância de diagnósticos regionais para orientar políticas de adaptação, uma vez que as condições de conforto e desconforto térmico afetam de maneira desigual diferentes capitais.



Tabela 2 – Classificação do estresse térmico nas capitais brasileiras 1979–2020.

REGIÃO	CAPITAL	CLASSIFICAÇÃO UTCI
Norte	Manaus (AM)	Muito forte estresse por calor
	Boa Vista (RR)	Muito forte estresse por calor
	Porto Velho (RO)	Muito forte estresse por calor
	Rio Branco (AC)	Forte estresse por calor
	Macapá (AP)	Forte estresse por calor
	Belém (PA)	Forte estresse por calor
	Palmas (TO)	Forte estresse por calor
Nordeste	Salvador (BA)	Moderado estresse por calor
	Recife (PE)	Moderado estresse por calor
	Maceió (AL)	Moderado estresse por calor
	João Pessoa (PB)	Moderado estresse por calor
	Natal (RN)	Moderado estresse por calor
	Aracaju (SE)	Moderado estresse por calor
	Fortaleza (CE)	Forte estresse por calor
	São Luís (MA)	Forte estresse por calor
	Teresina (PI)	Muito forte estresse por calor
Centro-Oeste	Cuiabá (MT)	Forte estresse por calor
	Campo Grande (MS)	Moderado estresse por calor
	Goiânia (GO)	Moderado estresse por calor
	Brasília (DF)	Sem estresse térmico
Sudeste	Rio de Janeiro (RJ)	Moderado estresse por calor
	Belo Horizonte (MG)	Pouco estresse por frio
	São Paulo (SP)	Pouco estresse por frio
	Vitória (ES)	Conforto térmico
Sul	Curitiba (PR)	Forte estresse por frio
	Florianópolis (SC)	Moderado estresse por frio
	Porto Alegre (RS)	Pouco estresse por frio

Fonte: Autores

Na região Norte, o estresse por calor é predominante. Manaus (AM) registrou os maiores valores médios de UTCI do país, classificados como muito forte estresse térmico, acompanhada de Boa Vista (RR) e Porto Velho (RO), ambas também nessa categoria. Cidades como Rio Branco (AC), Macapá (AP), Belém (PA) e Palmas (TO) apresentaram forte estresse térmico por calor, configurando um padrão de elevado desconforto térmico que reflete a combinação entre baixa latitude, elevada umidade relativa e altas temperaturas médias anuais.



No Nordeste, o desconforto por calor é igualmente dominante, mas em intensidades variadas. Capitais litorâneas como Salvador (BA), Recife (PE), Maceió (AL), João Pessoa (PB), Natal (RN) e Aracaju (SE) situaram-se em moderado estresse térmico, influenciadas pela ventilação marítima que atenua extremos. Fortaleza (CE) e São Luís (MA), expostas a regimes de maior insolação e menor influência de ventos alísios, apresentaram forte estresse, enquanto Teresina (PI), localizada no interior semiárido, destacou-se como uma das cidades mais críticas, sob muito forte estresse térmico, corroborando sua posição histórica como uma das capitais mais quentes do Brasil.

No Centro-Oeste, predomina o calor, porém em menor intensidade média que no Norte. Cuiabá (MT) apresentou forte estresse térmico por calor, enquanto Campo Grande (MS) e Goiânia (GO) registraram moderado estresse. Brasília (DF), por sua vez, foi a única capital brasileira classificada como sem estresse térmico, resultado de sua altitude elevada e da marcada sazonalidade, que combina períodos secos e amenos com maior ventilação.

O Sudeste apresentou a maior heterogeneidade térmica entre as regiões. Rio de Janeiro (RJ) e Belo Horizonte (MG) oscilaram entre moderado estresse para o calor e pouco estresse para o frio, influenciados tanto pela altitude quanto pela continentalidade relativa. São Paulo (SP), por sua latitude e urbanização densa, apresentou pouco estresse para o frio, enquanto Vitória (ES) destacou-se como a única capital brasileira classificada em conforto térmico, resultado de sua posição litorânea e equilíbrio entre radiação, ventilação e umidade.

No Sul, o padrão inverte-se, com predomínio do estresse por frio. Curitiba (PR) apresentou forte estresse térmico para o frio, destacando-se nacionalmente nesse aspecto. Florianópolis (SC) foi classificada em moderado estresse por frio, enquanto Porto Alegre (RS) registrou pouco estresse, coerente com sua latitude intermediária e maior influência de massas de ar subtropicais.

Esses resultados reforçam que o Brasil apresenta uma distribuição espacial do conforto térmico profundamente marcada por seus contrastes regionais. A interação entre fatores geográficos (latitude, altitude, distância do litoral) e características climáticas (dinâmica de massas de ar, regime de ventos, sazonalidade) molda a experiência térmica das capitais brasileiras, evidenciando a necessidade de análises multiescalares que integrem tanto os aspectos físicos quanto as implicações sociais e políticas do desconforto térmico.



CONSIDERAÇÕES FINAIS

A elaboração de uma normal climatológica do conforto térmico para as capitais brasileiras, fundamentada no UTCI e na série histórica do ERA5-HEAT (1979–2020), permitiu evidenciar contrastes regionais marcantes que refletem a diversidade climática e socioespacial do país. Os resultados demonstram que o Norte e o Nordeste concentram situações críticas de estresse térmico por calor, enquanto o Sul apresenta predominância de estresse por frio, e o Sudeste se caracteriza pela heterogeneidade, com Brasília constituindo um caso singular sem estresse térmico. Esses padrões confirmam a relevância de análises multiescalares que considerem simultaneamente fatores físicos, geográficos e sociais.

Do ponto de vista científico, esta pesquisa contribui para a consolidação da bioclimatologia aplicada e da geografia do clima ao fornecer um diagnóstico inédito em escala nacional, com potencial de servir como referência para estudos comparativos em diferentes contextos urbanos e regionais. Além disso, o uso de reanálises climáticas de alta resolução reforça a importância das novas tecnologias no avanço das metodologias geográficas e biometeorológicas, abrindo caminho para análises mais detalhadas em nível local e microclimático.

A partir desses resultados, emergem implicações diretas para a comunidade científica e para a formulação de políticas públicas. O reconhecimento da variabilidade espacial do desconforto térmico é essencial para subsidiar estratégias de adaptação às mudanças climáticas, incluindo o planejamento urbano, a definição de políticas de saúde pública e o desenho de intervenções voltadas à justiça térmica. Assim, esta normal climatológica pode ser empregada como base empírica para pesquisas aplicadas em áreas como arquitetura, urbanismo, epidemiologia e gestão ambiental.

Cabe destacar, ainda, a necessidade de aprofundar o debate interdisciplinar, especialmente por meio da integração entre dados biometeorológicos e indicadores socioeconômicos, de modo a revelar desigualdades de exposição e vulnerabilidade ao calor e ao frio. Tal abordagem é fundamental para avançar no campo da geografia crítica do clima, articulando a dimensão ambiental às questões sociais e políticas.

Por fim, abrem-se perspectivas para novas pesquisas que ampliem a escala de análise, incorporem cenários climáticos futuros e explorem variáveis complementares, como a Temperatura Radiante Média (MRT) em ambientes externos e a influência de elementos urbanos (vegetação, materiais de cobertura, densidade construtiva). O fortalecimento desses diálogos científicos e metodológicos será decisivo para compreender a produção das paisagens



térmicas brasileiras e para propor soluções inovadoras frente aos desafios impostos pelas mudanças climáticas.

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

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. ASHRAE Handbook of Fundamentals. New York: ASHRAE, 1967.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Desempenho térmico de edificações — Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro: ABNT, 2003. Disponível em: https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/projetos/normalizacao/Termica_parte3_SET2004.pdf. Acesso em: 13 set. 2025.

AUNAN, Kristin; ORRU, Heikki; SJÖDIN, Henrik. Perspectives on connecting climate change and health. *Scandinavian Journal of Public Health*, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1177/14034948241269748>.

BEDFORD, Thomas. The warmth factor in comfort at work: a physiological study of heating and ventilation. London: H. M. Stationery Office, 1936.

BELDING, Harold S. Index for evaluating heat stress in terms of resulting physiological strains. *Heating, Piping & Air Conditioning*, v. 8, p. 129-136, 1955.

BRÖDE, Peter; BLANKE, Ulrich; FIALA, Dusan; HAVENITH, George; JENDRITZKY, Gerd; KUNZ, Hans-Joachim. Deriving the operational procedure for the Universal Thermal Climate Index (UTCI). *International Journal of Biometeorology*, v. 56, n. 3, p. 481-494, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0454-1>.

BRÖDE, Peter; BLANKE, Ulrich; FIALA, Dusan; HAVENITH, George; JENDRITZKY, Gerd; KUNZ, Hans-Joachim. The Universal Thermal Climate Index UTCI in operational use. *International Journal of Biometeorology*, v. 56, n. 3, p. 429-441, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0454-1>.

CASTELLO, Ana Júlia Pilon; MASIERO, Érico; PEZZUTO, Cláudia Cotrim; ROMERO, Hugo. Clima urbano em cidades latino-americanas: abordagem bibliométrica. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 18., 2025. *Anais [...]*. [S. l.], 2025. DOI: 10.46421/encacelacac.v18i1.7240. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/encac/article/view/7240>. Acesso em: 13 set. 2025.



CASTRO, Josué de. Geografia da fome. 10. ed. rev. Rio de Janeiro: Antares, 1984. Disponível em: https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/473/o/CASTRO_Josu%C3%A9_de_-_Geografia_da_Fome.pdf. Acesso em: 13 set. 2025.

DEVECÍ SEVIM, Zeynep; ÜNÜVAR, Pınar. Climate change and growth development. Asian Journal of Environment & Ecology, v. 21, n. 2, p. 45–52, 2023.

DELL'SANTO, Luisa Fiorot; FERREIRA, Camila Carvalho. Conforto térmico e consumo energético nos climas atual e futuros: : Análise de tipologias residenciais unifamiliares em Vitória (ES). In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 18., 2025. **Anais [...]**. [S. l.], 2025. DOI: 10.46421/encacelacac.v18i1.6940. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/encac/article/view/6940>. Acesso em: 13 set. 2025.

DI NAPOLI, Claudia; BRÖDE, Peter; LAUTENSCHLAGER, Michael; ZARETTE, Stefano; PIRSCH, Jörg; JENDRITZKY, Gerd. ERA5-HEAT: a global gridded historical dataset of human thermal comfort indices from climate reanalysis. Geoscience Data Journal, v. 7, n. 1, p. 61-73, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/gdj3.102>.

ESMAEILI, Seyed Vahid; ZAREI, Fariba; REZAEI, Mahnaz; NOORI, Zahra; HEIDARI, Amir. Impact of climate change on public health in Iran: a systematic review. Health in Emergencies and Disasters Quarterly, v. 10, n. 1, p. 3–20, 2024. DOI: <https://doi.org/10.32598/hdq.10.1.374.1>.

FANGER, Poul Ole. Thermal comfort: analysis and applications in environmental engineering. Copenhagen: Danish Technical Press, 1970.

FIALA, Dusan; LOMAS, Kevin J.; STOHRER, Martin. Physiological modelling for predicting human thermal responses in cold, neutral and hot environments. Building and Environment, v. 36, n. 7, p. 791–800, 2001. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0360-1323\(00\)00061-5](https://doi.org/10.1016/S0360-1323(00)00061-5).

GALVÃO, Marília Velloso. Zoneamento bioclimático do Brasil para projetos arquitetônicos. 1967. Tese (Doutorado em Arquitetura) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1967.

HOUGHTON, Franklin C.; YAGLOU, Constantine P. Determining equal comfort lines. Journal of the American Society of Heating and Ventilating Engineers, v. 29, p. 165-176, 1923. HÖPPE, Peter. The physiological equivalent temperature – a universal index for the biometeorological assessment of the thermal environment. International Journal of Biometeorology, v. 43, n. 2, p. 71-75, 1999. DOI: <https://doi.org/10.1007/s004840050118>.

JENDRITZKY, Gerd; DE DEAR, Richard; HAVENITH, George. UTCI—Why another thermal index? International Journal of Biometeorology, v. 56, n. 3, p. 421-428, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0513-7>.

LIMA, Marcos Antônio da Silva; SANTOS, Júlio Cesar dos; BARBOSA, Maria Cleisyane Moura; TORRES, Simone Carnaúba; PEREIRA, Thiago Alberto da Silva. Bioclimatologia e planejamento urbano: elaboração de mapa de potencial dinâmico da cidade de Arapiraca-AL. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 17., 2023.



Anais [...]. [S. l.], 2023. p. 1–10. DOI: 10.46421/encac.v17i1.4057. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/encac/article/view/4057>. Acesso em: 13 set. 2025.

NETO, João Batista Ferreira; GOBO, João Paulo Assis; PEREIRA, Gabriel; CARDOZO, Francielle da Silva; TAVARES, Kássio Samay Ribeiro. Revisão sistemática acerca dos estudos de conforto e sensação térmica no Brasil. Boletim Alfenense de Geografia, v. 4, n. 7, p. 25–42, 2024. DOI: <https://doi.org/10.29327/243949.4.7-2>. Disponível em: <https://publicacoes.unifal-mg.edu.br/revistas/index.php/boletimalfenensedegeografia/article/view/2349>. Acesso em: 13 set. 2025.

NETO, João Batista Ferreira; PEREIRA, Gabriel; SILVA, Rosa Helena da; OLIVEIRA, Maxwell da Rosa; DAMASCENO JÚNIOR, Geraldo Alves. Zoneamento bioclimático do Pantanal. RAEGA – O Espaço Geográfico em Análise, v. 61, n. 1, p. 173–191, 2024. DOI: <https://doi.org/10.5380/raega.v61i1.96550>.

NETO, João Batista Ferreira. Zoneamento bioclimático brasileiro. 2021. 105 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de São João del-Rei, São João del-Rei, 2021. Disponível em: <https://ufsj.edu.br/portal2-repositorio/File/ppgeog/JoaaoBFNeto.pdf>. Acesso em: 13 set. 2025.

NOVAES, Gabriel Bonansea de Alencar; MONTEIRO, Leonardo Marques. Uma breve discussão sobre os diferentes cenários climáticos futuros. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 18., 2025. **Anais [...]**. [S. l.], 2025. DOI: 10.46421/encacelacac.v18i1.7149. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/encac/article/view/7149>. Acesso em: 13 set. 2025.

PEIXOTO, Afrânio. Medicina Legal. Psicologia Forense. 5. ed. Rio de Janeiro: Francisco Alves, 1938. 345 p. il.

PEDRO, Gabriela Capuano; SILVA, Caio Frederico e. Influência da vegetação no conforto térmico: simulação computacional do microclima urbano de Piracicaba, SP. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 18., 2025. **Anais [...]**. [S. l.], 2025. DOI: 10.46421/encacelacac.v18i1.6953. Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/encac/article/view/6953>. Acesso em: 13 set. 2025.

PUGA-BONILLA, Manuel; MARTÍNEZ-SÁNCHEZ, José; LÓPEZ-GARCÍA, Elena; GÓMEZ-CASTRO, Alejandro. Risk of mortality and disease attributable to the heat stress index and its variability during heat waves: an observational study on the city of Madrid. Sustainable Cities and Society, v. 121, p. 106189, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2025.106189>.

SILVA, Antônio César Silveira Baptista da. Zoneamento bioclimático brasileiro para fins de edificação. 1994. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994. Disponível em: https://labeee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/dissertacoes/DISSERTACAO_Antonio-Cesar.pdf. Acesso em: 13 set. 2025.

SUGDEN, Charlotte; MERLO, Lucas. Mental health effects of extreme heat events: a scoping review. Current Psychiatry Reports, 2024.



TESFAYE, Alemayehu Hailu; KEBEDE, Melat Tadesse; GETACHEW, Mekonnen Alemu; WONDIMU, Hanna Tarekegn. Impact of climate change on health workers: a scoping review. *Journal of Public Health*, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10389-025-02418-z>.

THOMAS, Kate; FLEMING, Henry. Climate stress and public health infrastructure resilience. *Environmental Health Perspectives*, 2024.

TRESKOVA, Maria; SCHMIDT, Johannes; PETROVA, Ekaterina; LANGE, Frederik; KLEIN, Andrea. From heatwaves to food systems: epidemiologists addressing climate challenges. *International Journal of Epidemiology*, v. 53, n. 5, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1093/ije/dyae117>.

TSELIYOU, Anna; ZERVAS, Efthimios. Review of the effect of air temperature on human mortality. *E3S Web of Conferences*, v. 585, p. 06001, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202458506001>.

VERNON, Horace Middleton; WARNER, Charles G. The influence of the humidity of the air on capacity for work at high temperatures. *The Journal of Hygiene*, v. 32, n. 3, p. 431-463, 1932. DOI: <https://doi.org/10.1017/s0022172400018167>.

VIEIRA DE SOUSA, Ana. Os impactos da mudança climática e os desafios das políticas públicas atuais. 2024. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2024.

WINSLOW, Charles-Edward Amory; HERRINGTON, Leonard Porter; GAGGE, Arthur Preston. Physiological reactions of the human body to varying environmental temperatures. *American Journal of Physiology*, v. 120, n. 1, p. 1-22, 1937. DOI: <https://doi.org/10.1152/ajplegacy.1937.120.1.1>.

YAGLOU, Constantine P.; MINARD, Daniel. Control of heat casualties at military training centers. *AMA Archives of Industrial Health*, v. 16, n. 4, p. 302-316, 1957. PMID: 13457450.