III SIMPOSIO BRASILEIRO DE BIOMETEOROLOGIA HUMANA
26 a 28 de agosto de 2026

ESTRESSE TÉRMICO REGIONAL EM GRANDES CIDADES BRASILEIRAS: REORGANIZAÇÃO DAS CLASSES DO UTCI NO FUTURO PRÓXIMO (2041–2060)

João Batista Ferreira Neto (1), Gabriel Pereira (2)
(1) Doutorando, Universidade de São Paulo, joao.geo@usp.br
(2) Professor Doutor, Universidade Federal de São João del-Rei, pereira@ufsj.edu.br

RESUMO

Avaliou-se a reorganização futura das classes do Universal Thermal Climate Index (UTCI) em 57 grandes cidades brasileiras no período de 2041–2060. A partir de simulações diárias do CORDEX (MPI-ESM-LR/REMO2009), calculou-se o UTCI para o período histórico de 1971–2005 e para os cenários RCP2.6, RCP4.5 e RCP8.5. Propôs-se o Índice de Reorganização Térmica (IRT) para quantificar o número equivalente de dias·ano^{-1} redistribuídos entre as dez classes do índice. A média do IRT entre as cidades aumentou de 38 dias·ano^{-1} no RCP2.6 para 68 dias·ano^{-1} no RCP8.5, revelando forte gradiente regional: alcançou 83 dias·ano^{-1} no Norte e reduziu-se a 28 dias·ano^{-1} no Sul. A natureza da reorganização, contudo, variou espacialmente. Em cidades de baixas latitudes, os maiores IRTs estiveram associados principalmente à redistribuição entre classes intermediárias, possivelmente favorecida pela baixa variabilidade térmica anual e pela proximidade das distribuições aos limiares das classes. Em algumas cidades do interior e de latitudes médias, valores menores de IRT coexistiram com a expansão das classes de calor muito forte e extremo (UTCI ≥ 38 °C), enquanto no Sul predominou a retração das classes de frio. Conclui-se que o IRT quantifica a magnitude da reorganização do calendário térmico histórico, mas não sua direção ou severidade, devendo ser analisado em conjunto com as classes que ganham ou perdem frequência para subsidiar estratégias territoriais de adaptação.

Palavras-chave: biometeorologia humana; modelagem numérica; habitabilidade; saúde ambiental; exposição populacional.

1. INTRODUÇÃO

A exposição ao estresse térmico constitui uma das principais vias pelas quais as mudanças climáticas afetam a saúde, o bem-estar e a habitabilidade, com impactos sobre a mortalidade e as perdas econômicas associadas ao calor e ao frio (GASPARRINI et al., 2015; TOBÍAS et al., 2024). Nas cidades, a concentração populacional amplia a relevância da avaliação das mudanças futuras na exposição térmica.

O Universal Thermal Climate Index (UTCI) expressa a carga térmica ambiental por meio da integração de variáveis meteorológicas com modelos de termorregulação humana e de vestimenta permitindo classificar a exposição em diferentes níveis de estresse térmico (JENDRITZKY; DE DEAR; HAVENITH, 2012; BRÖDE et al., 2012). Estudos recentes apontam aumento do desconforto térmico por calor no Brasil (NETO; PEREIRA, 2025), mas ainda são limitadas as análises sobre como as frequências das classes do UTCI poderão se reorganizar nas cidades brasileiras sob diferentes trajetórias de emissão.

Nesse contexto, parte-se da hipótese de que a magnitude e a direção da reorganização das classes do UTCI serão espacialmente desiguais, em função das condições térmicas históricas e da posição das distribuições em relação aos limiares das classes.

2. OBJETIVO

Avaliar a reorganização futura das classes do UTCI em 57 grandes cidades brasileiras, comparando o período histórico de 1971–2005 com as projeções para 2041–2060 sob os cenários RCP2.6, RCP4.5 e RCP8.5.

3. MÉTODO

3.1. Dados climáticos e períodos de referência

O UTCI foi calculado com dados diários do projeto CORDEX no domínio SAM-44, utilizando o modelo regional REMO2009, forçado pelo modelo global MPI-ESM-LR. Os dados foram obtidos por meio da API do Climate Data Store e processados em Python. Foram utilizadas a temperatura do ar a 2 m (tas), a velocidade

do vento a 10 m (sfcWind), a umidade específica (huss), a pressão à superfície (ps) e as radiações descendentes de ondas curta (rsds) e longa (rlds). A umidade relativa foi derivada de huss, ps e tas, enquanto a temperatura radiante média foi estimada a partir dos fluxos radiativos diários, considerando absortividade de onda curta de 0,70 e emissividade corporal de 0,97. O UTCI foi calculado com a biblioteca pythermalcomfort, seguindo seu procedimento operacional (JENDRITZKY; DE DEAR; HAVENITH, 2012; BRÖDE et al., 2012; TARTARINI; SCHIAVON, 2020).

O viés foi corrigido diretamente no nível do UTCI, utilizando médias diárias do ERA5-HEAT interpoladas para a grade SAM-44. O viés médio de cada célula no período de 1971–2005 foi aplicado de forma aditiva à série histórica e às séries futuras. Após a correção, os valores diários do UTCI foram classificados nas dez classes operacionais de estresse térmico (BRÖDE et al., 2012).

Foram analisados o período histórico de 1971–2005 e o período futuro de 2041–2060, considerando os cenários RCP2.6, RCP4.5 e RCP8.5. O período histórico termina em 2005 devido à disponibilidade da simulação utilizada, enquanto o intervalo de 2041–2060 representa meados do século XXI e permite a comparação entre as três trajetórias de emissão.

3.2. Seleção das cidades

Foram analisadas 57 cidades brasileiras: as 27 capitais e os 30 municípios não capitais com maior população, segundo as estimativas do IBGE para 2025. O critério populacional foi utilizado exclusivamente para selecionar centros com elevada concentração potencial de população exposta, não como variável explicativa dos padrões climáticos.

3.3. Índice de reorganização térmica

O índice de reorganização térmica quantifica o afastamento entre as distribuições históricas e futuras das classes do UTCI. Para cada cidade, calculou-se a frequência média anual de dias em cada uma das dez classes no período histórico e em cada cenário futuro. O IRT foi definido como metade da soma das diferenças absolutas entre as frequências correspondentes:

$$IRT_s = \frac{1}{2}\sum_{k=1}^{10}\left|f_{k,s} - f_{k,h}\right|$$

Onde:

IRT_s é o índice de reorganização térmica no cenário s [dias·ano^{-1}];

$f_{k,s}$ é a frequência média anual da classe k no cenário futuro [dias·ano^{-1}];

$f_{k,h}$ é a frequência correspondente no período histórico [dias·ano^{-1}];

k é o índice da classe do UTCI [adimensional].

A divisão por dois evita a dupla contagem entre perdas e ganhos de frequência, de modo que o IRT representa o número equivalente mínimo de dias redistribuídos entre as classes do UTCI. Como não pondera a distância ordinal nem a gravidade das transições, valores mais elevados indicam maior afastamento da distribuição histórica, e não necessariamente intensificação do estresse térmico. A partir dos três cenários, calcularam-se o IRT médio, correspondente à média dos índices de RCP2.6, RCP4.5 e RCP8.5, e o IRT mínimo, definido pelo menor valor entre eles e representando a menor reorganização da cadeia analisada, não a incerteza intermodelos. Também foram obtidas as variações médias dos dias sem estresse e das classes com UTCI ≥ 38 °C pela média das diferenças entre os períodos futuro e histórico nos três cenários.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A distribuição espacial do IRT médio revela concentração dos maiores valores em cidades das faixas equatorial e costeira das regiões Norte e Nordeste (Figura 1). As dez primeiras cidades do ranking pertencem exclusivamente a essas duas regiões. Embora os valores mais elevados predominem em baixas latitudes, Cuiabá (MT) apresenta IRT médio de 57 dias·ano^{-1}, superior aos observados em Palmas (51) e Teresina (52) e igual ao de Boa Vista (57). Esse resultado sugere que o padrão espacial não é explicado exclusivamente pela latitude. Em termos agregados, a média do IRT entre as 57 cidades aumenta com o nível de emissões. No

RCP8.5, essa média alcança 68 dias·ano⁻¹, valor aproximadamente 80% superior ao observado no RCP2.6, de 38 dias·ano⁻¹.

ID	Município	UF	IRT médio
1	Ananindeua	PA	145
2	São Luís	MA	130
3	Macapá	AP	119
4	Fortaleza	CE	109
5	Manaus	AM	84
6	Belém	PA	74
7	Rio Branco	AC	71
8	Porto Velho	RO	69
9	Maceió	AL	66
10	João Pessoa	PB	65
11	Aracaju	SE	62
12	Boa Vista	RR	58
13	Cuiabá	MT	57
14	Campo Grande	MS	55
15	Serra	ES	53
16	Recife	PE	53
17	Jaboatão dos Guararapes	PE	53
18	Natal	RN	53
19	Teresina	PI	52
20	Palmas	TO	52
21	São José do Rio Preto	SP	52
22	Vila Velha	ES	52
23	Vitória	ES	52
24	Aparecida de Goiânia	GO	51
25	Goiânia	GO	51
26	Brasília	DF	50
27	Salvador	BA	50
28	Uberlândia	MG	50
29	Campos dos Goytacazes	RJ	49
30	Duque de Caxias	RJ	49
31	Rio de Janeiro	RJ	49
32	Belford Roxo	RJ	49
33	Niterói	RJ	49
34	São João de Meriti	RJ	49
35	São Gonçalo	RJ	49
36	Ribeirão Preto	SP	47
37	Feira de Santana	BA	46
38	Nova Iguaçu	RJ	45
39	Campinas	SP	45
40	Belo Horizonte	MG	42
41	Contagem	MG	42
42	Londrina	PR	40
43	Jundiaí	SP	37
44	São José dos Campos	SP	37
45	Juiz de Fora	MG	36
46	Guarulhos	SP	36
47	São Bernardo do Campo	SP	36
48	Santo André	SP	36
49	São Paulo	SP	36
50	Sorocaba	SP	34
51	Mogi das Cruzes	SP	34
52	Osasco	SP	33
53	Joinville	SC	31
54	Curitiba	PR	27
55	Caxias do Sul	RS	25
56	Florianópolis	SC	25
57	Porto Alegre	RS	23

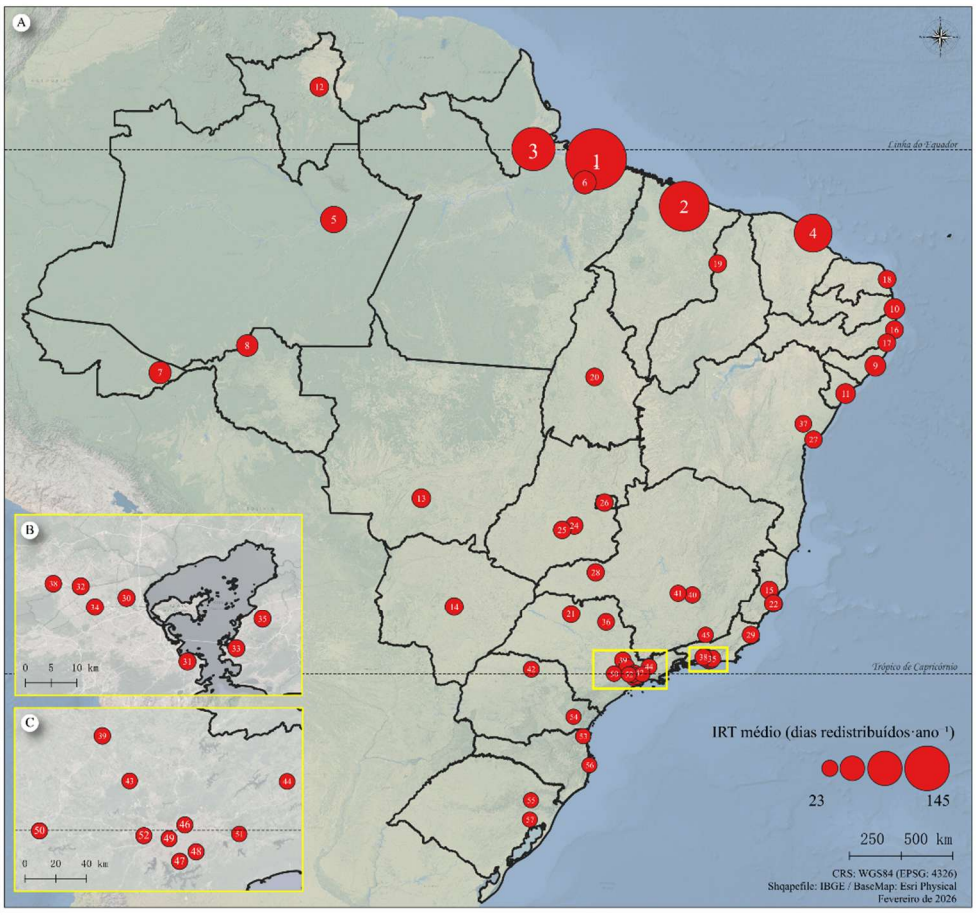


Figura 1. Distribuição espacial do índice médio de reorganização térmica das classes do UTCI (IRT médio; dias·ano⁻¹) nos municípios brasileiros analisados. O tamanho dos círculos representa o número equivalente médio anual de dias redistribuídos entre as classes do UTCI. (A) Distribuição nacional. (B) Região Metropolitana do Rio de Janeiro. (C) Região Metropolitana de São Paulo.

Mesmo considerando o menor IRT entre os três cenários, os valores permanecem elevados no topo do ranking, variando de 112 a 45 dias·ano⁻¹ entre as dez primeiras cidades. O predomínio dos maiores valores no Norte e Nordeste é consistente com projeções de intensificação do desconforto térmico nas regiões mais quentes do Brasil e com a expansão global das regiões térmicas de baixa latitude sob diferentes cenários climáticos (SCOLARO; VAZ; GHISI, 2025; ZHENG et al., 2025). Tendências crescentes do UTCI também foram identificadas em ambientes tropicais e úmidos do Caribe (DI NAPOLI et al., 2023). Contudo, a composição da reorganização varia entre as cidades. Como as faixas de conforto e as respostas térmicas apresentam diferenças entre contextos climáticos brasileiros (KRÜGER et al., 2021), o IRT deve ser interpretado como medida da magnitude da redistribuição entre classes, e não como indicador isolado de sua severidade.

Tabela 1. Variação média projetada das frequências anuais das classes do UTCI na cidade com maior IRT médio de cada macrorregião, considerando os cenários RCP2.6, RCP4.5 e RCP8.5 em relação ao período histórico.

Região	Município	Δ sem estresse (dias·ano⁻¹)	Δ UTCI ≥ 38 °C (dias·ano⁻¹)
Norte	Ananindeua	−12	0
Nordeste	São Luís	−12	0
Centro-Oeste	Cuiabá	−43	+23
Sudeste	Serra	−52	+1
Sul	Londrina	−37	0

Os indicadores direcionais mostram que valores elevados de IRT podem representar reorganizações biometeorológicas distintas. Ananindeua e São Luís perdem, em média, 12 dias sem estresse, sem aumento relevante das classes com UTCI ≥ 38 °C, enquanto Cuiabá perde 43 dias sem estresse e ganha 23 dias com UTCI médio diário nas classes de calor muito forte e extremo. O contraste entre Ananindeua e Belém reforça essa distinção: embora Ananindeua apresente maior reorganização total, Belém registra maior aumento das

classes com UTCI ≥ 38 °C. Parte dessa diferença pode estar associada à posição das células selecionadas em contextos costeiros e estuarinos, hipótese que deverá ser avaliada em trabalhos futuros.

Considerando o conjunto das cidades, o IRT médio alcança 83 dias·ano^{-1} no Norte e 67 dias·ano^{-1} no Nordeste, diminuindo para 28 dias·ano^{-1} no Sul. Mesmo o menor IRT projetado permanece acima de 16 dias·ano^{-1} em todas as cidades. A reorganização ocorre em todas as cidades analisadas, mas apresenta intensidade regionalmente desigual. Parte do gradiente regional pode também refletir a posição das distribuições históricas em relação aos limiares das classes do UTCI. Em climas de baixa variabilidade anual, distribuições concentradas próximas aos limiares podem ser particularmente sensíveis a pequenos deslocamentos do UTCI. Essa hipótese ajuda a interpretar os valores elevados no Norte e Nordeste, mas deverá ser avaliada por análises de sensibilidade.

5. CONCLUSÕES

As projeções para 2041–2060 corroboram a hipótese de que a reorganização das classes do UTCI nas grandes cidades brasileiras é espacialmente desigual e sensível às trajetórias de emissão. A principal contribuição do trabalho é demonstrar que a magnitude do afastamento em relação às condições históricas não determina, isoladamente, a direção ou a severidade da mudança biometeorológica.

Nas cidades de baixas latitudes com maiores valores de IRT, especialmente no Norte e Nordeste, a reorganização concentrou-se em transferências entre classes intermediárias, possivelmente associadas à baixa variabilidade térmica anual e à proximidade das distribuições históricas aos limiares do UTCI. Em algumas cidades do interior, particularmente Cuiabá, valores comparativamente menores de IRT coexistiram com expansão expressiva das classes de calor muito forte e extremo. No Sul, a reorganização também envolveu a retração das classes de frio.

Os resultados baseiam-se em uma única cadeia GCM–RCM e em dados médios diários, que não representam máximos subdiários. Estudos futuros deverão incorporar ensembles multimodelos, utilizar dados em resolução subdiária e avaliar a sensibilidade dos resultados aos limiares das classes do UTCI.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRÖDE, P. et al. Deriving the operational procedure for the Universal Thermal Climate Index (UTCI). International Journal of Biometeorology, [s. l.], v. 56, n. 3, p. 481-494, 2012. DOI: 10.1007/s00484-011-0454-1.

DI NAPOLI, C.; ALLEN, T.; MÉNDEZ-LÁZARO, P. A.; PAPPENBERGER, F. Heat stress in the Caribbean: climatology, drivers, and trends of human biometeorology indices. *International Journal of Climatology*, v. 43, n. 1, p. 405–425, 2023. DOI: 10.1002/joc.7774.

GASPARRINI, A. et al. Mortality risk attributable to high and low ambient temperature: a multicountry observational study. The Lancet, [s. l.], v. 386, n. 9991, p. 369-375, 2015. DOI: 10.1016/S0140-6736(14)62114-0.

JENDRITZKY, G.; DE DEAR, R.; HAVENITH, G. UTCI—Why another thermal index? International Journal of Biometeorology, [s. l.], v. 56, n. 3, p. 421-428, 2012. DOI: 10.1007/s00484-011-0513-7.

KRÜGER, E. L.; SILVA, T. J. V.; HIRASHIMA, S. Q. S.; CUNHA, E. G.; ROSA, L. A. Calibrating UTCI's comfort assessment scale for three Brazilian cities with different climatic conditions. *International Journal of Biometeorology*, v. 65, n. 9, p. 1463–1472, 2021. DOI: 10.1007/s00484-020-01897-x.

NETO, J. B. F.; PEREIRA, G. Zoneamento bioclimático para o Brasil. GEOUSP Espaço e Tempo (Online), São Paulo, v. 29, n. 2, 2025. DOI: 10.11606/issn.2179-0892.geousp.2025.230159.

SCOLARO, T. P.; VAZ, I. C. M.; GHISI, E. Assessing thermal comfort in naturally ventilated residential buildings under current and projected regional climates in Brazil. *Energy and Buildings*, v. 349, 116566, 2025. DOI: 10.1016/j.enbuild.2025.116566.

TARTARINI, F.; SCHIAVON, S. pythermalcomfort: A Python package for thermal comfort research. SoftwareX, [s. l.], v. 12, 100578, 2020. DOI: 10.1016/j.softx.2020.100578.

TOBÍAS, A. et al. Mortality burden and economic loss attributable to cold and heat in Central and South America. Environmental Epidemiology, [s. l.], v. 8, n. 1, e281, 2024. DOI: 10.1097/EE9.0000000000000335.

ZHENG, J.; DU, Y.; ZHU, X.; DONG, W. Mapping global human thermal comfort: spatiotemporal variability of UTCI regions under climate change. *Sustainable Cities and Society*, v. 119, 106111, 2025. DOI: 10.1016/j.scs.2024.106111.