



CTENF 2024
1º CONGRESSO DE
TRANSIÇÃO ENERGÉTICA
DO NORTE-FLUMINENSE

1º Congresso de Transição Energética do Norte-Fluminense

Site: <https://eventos.congresse.me/ctenf/edicoes/CTENF>

O PAPEL DA UMIDADE RELATIVA NO ÍNDICE DE CALOR E CONSUMO DE ENERGIA EM MACAÉ-RJ

1º Congresso de Transição Energética do Norte Fluminense, 1ª edição, de 11/11/2024 a 12/11/2024
ISBN dos Anais: 978-65-5465-131-8

TEIXEIRA; Luciana da Silva Costa¹, SOUZA; Tamiles Ferreira de²

RESUMO

Título: O PAPEL DA UMIDADE RELATIVA NO ÍNDICE DE CALOR E CONSUMO DE ENERGIA EM MACAÉ-RJ

Luciana da Silva Costa Teixeira¹ e Tamiles Ferreira de Souza²,

1 - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro - lucianascteixeira@gmail.com

2 - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro - 20111180029@pq.uenf.br

Palavras-chave: Análise climática; Calor urbano; Conforto térmico; Energia elétrica

Resumo

Este estudo investiga como a umidade relativa interfere no estresse térmico em Macaé-RJ, destacando seu impacto sobre o índice de calor (IC) e o consumo de energia elétrica. Motivado pela necessidade de entender melhor o papel da umidade na sensação térmica, este trabalho diferencia-se ao considerar a influência direta da umidade relativa na amplificação do IC e na demanda por resfriamento artificial. Para avaliar essas interações, foram analisados dados climáticos de 2022 a 2024, utilizando a fórmula da NOAA para calcular o IC e o método de Ponderação pelo Inverso da Distância (IDW) para interpolação espacial. Os resultados revelaram que o último verão (dez./2023-fev./2024) não só foi mais quente que o anterior como apresentou índices de calor com variações de até 10°C entre a temperatura real e a sensação térmica em diferentes bairros, principalmente nas áreas com maior umidade, que possivelmente intensifica o uso de eletricidade em sistemas de refrigeração. Conclui-se que a variabilidade do IC, amplificada pela umidade, traz implicações diretas para o consumo energético e o bem-estar térmico, reforçando a importância do monitoramento microclimático urbano e implementação de políticas públicas para mitigar esses efeitos e promover um planejamento energético mais eficiente para Macaé.

Introdução

As mudanças climáticas globais, impulsionadas pela atividade humana, têm aumentado a intensidade, frequência e duração de eventos extremos, como ondas de calor. Esses fenômenos impactam a saúde humana e a demanda por energia, principalmente em áreas urbanas onde as condições climáticas ideais são prejudicadas pela urbanização excessiva e falta de áreas verdes. O índice de calor (IC), que combina a temperatura do ar e a umidade relativa, é uma métrica usada para avaliar a sensação térmica do ser humano e os riscos de estresse térmico (OPITZ-STAPLETON *et al.*, 2016). O índice de calor é amplamente utilizado em avaliações de conforto térmico, pois leva em conta tanto a temperatura quanto a umidade relativa para estimar o estresse térmico (STAIGER *et al.*, 2019). Ressalta-se que a evaporação do suor é o mecanismo fisiológico usado pelo corpo humano para evitar que a temperatura corporal suba para valores insuportáveis e, na presença de altos valores de umidade relativa, essa evaporação diminui muito ou chega a ser inviável, devido à saturação do ar (PARSONS, 2014). Compreender a variabilidade espacial do índice é fundamental para avaliar os impactos regionais e prever os efeitos no consumo de energia. A literatura aponta que a umidade relativa alta amplifica a sensação térmica, aumentando a demanda por resfriamento artificial em climas tropicais ou subtropicais como em Macaé. Assim, este estudo visa avaliar como as variações na umidade relativa impactam o valor do índice de calor, influenciam o estresse térmico e o consumo de energia em Macaé-RJ, considerando a variabilidade espacial observada nos verões recentes.

Métodos

O estudo utilizou dados horários de temperatura do ar e umidade relativa fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2023) em sua estação situada em Macaé. Os dados foram coletados em oito estações meteorológicas do Projeto de Extensão "Tempo de Aprender em Clima de Ensinar", uma iniciativa da UENF voltada para a capacitação e a análise climática, com o objetivo de monitorar as variabilidades climáticas na região de Macaé-RJ e contribuir para estudos de impacto ambiental e transição energética (UENF, 2023). A coleta de dados ocorreu durante os períodos de 01 de dezembro de 2022 a 29 de fevereiro de 2023 e de 01 de dezembro de 2023 a 29 de fevereiro de 2024. Para o cálculo do índice de calor, empregamos a fórmula desenvolvida pela National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA, 2016), que combina a temperatura do bulbo seco (T) e a umidade relativa (RH) para estimar o estresse térmico. A importância de integrar esses fatores, como temperatura e umidade, está fundamentada na relevância de obter uma avaliação precisa do desconforto térmico (ALFANO *et al.*, 2011). A fórmula utilizada foi a seguinte:

$$HI = -42,379 + 2,04901523 \cdot T + 10,1433127 \cdot RH - 0,22475541 \cdot T \cdot RH - 0,00683783 \cdot T^2 + 0,05481717 \cdot RH \cdot RH + 0,00122874 \cdot T \cdot T \cdot RH + 0,00085282 \cdot T \cdot RH \cdot RH - 0,00000199 \cdot T \cdot T \cdot RH$$

Onde:

¹ Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, lucianascteixeira@gmail.com

² Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, 20111180029@pq.uenf.br

- **T** é a temperatura do bulbo seco em graus Fahrenheit (convertida de Celsius para os cálculos),
- **RH** é a umidade relativa em porcentagem.

Para as representações espaciais dos resultados, os valores foram interpolados usando o método da Ponderação pelo Inverso da Distância (IDW), uma técnica de interpolação espacial amplamente utilizada (LU E WONG, 2008). A fórmula aplicada foi:

$$\hat{Y}(s_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Y_{S_i}$$

- $\hat{Y}(s_0)$ - Valor que se pretende interpolar
- (s_0) - Ponto
- Y_{S_i} - Valores observados
- S_i - Ponto
- λ_i - Pesos

$$\lambda_i = \frac{d_0^{-p}}{\sum_{j=1}^n d_0^{-p}}$$

- d_0 - Inverso da distância
- p - Potência - Parâmetro

Resultados e Discussão

Os resultados indicam um aumento no índice de calor (IC) em todos os bairros de Macaé durante os verões de 2022-2023 e 2023-2024, com variações observadas de até 10°C entre a temperatura real e a sensação térmica, como é possível observar na figura 1 abaixo:

¹ Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, lucianascteixeira@gmail.com

² Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, 20111180029@pq.uenf.br

Índice de Calor por bairro para os dois períodos

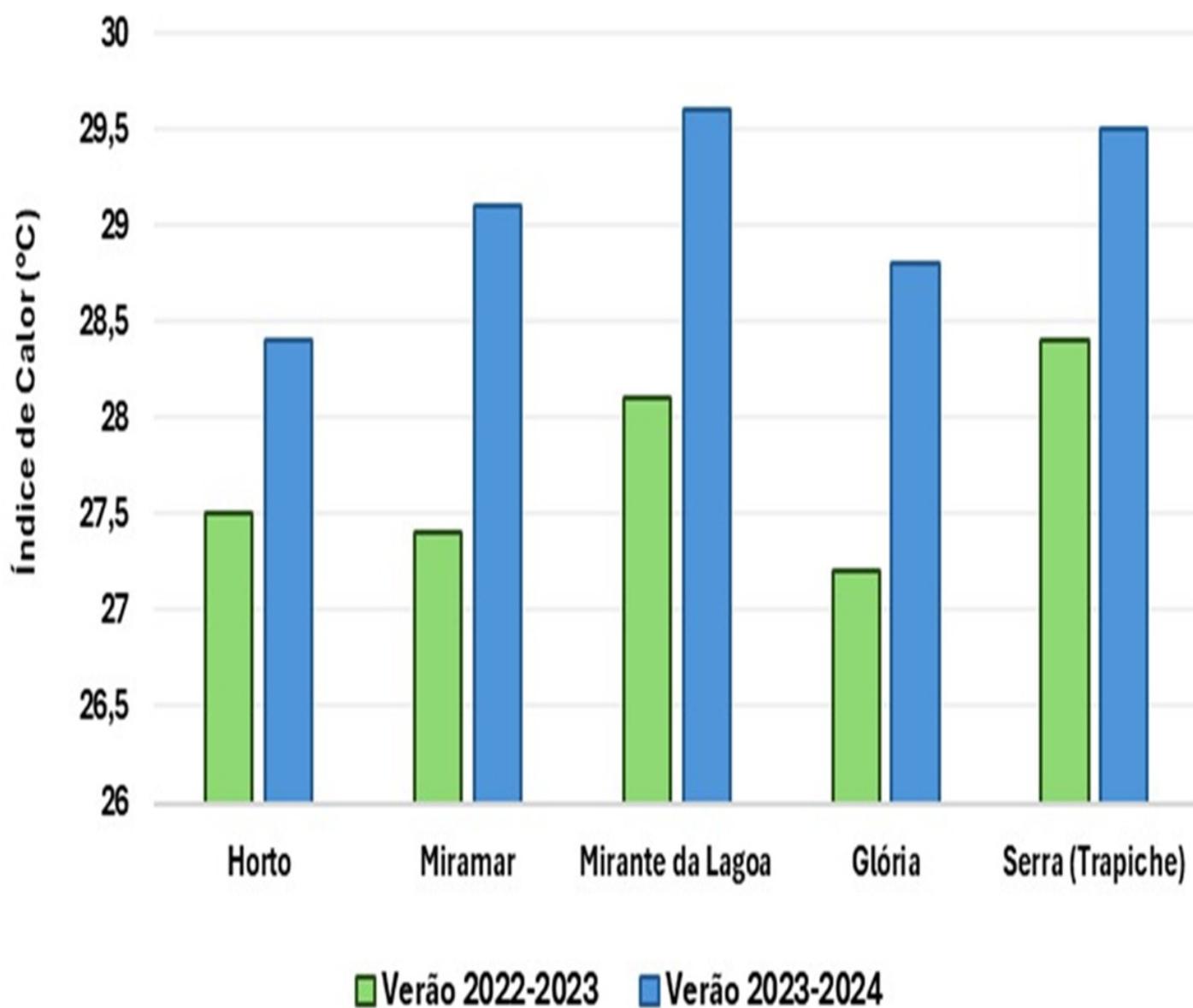


Figura 1: Gráfico do Índice de Calor

A figura 2 a seguir, que correlaciona temperatura do ar e umidade relativa, é utilizada para avaliar o risco de estresse térmico e seus potenciais impactos na saúde. As categorias variam de Cuidado a Perigo Extremo, de acordo com os valores de índice de calor (NWS, 2014).

¹ Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, lucianascteixeira@gmail.com

² Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, 20111180029@pq.uenf.br

	Tabela de Índice de Calor	Temperatura (°C)																
		27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43
Umidade Relativa (%)	40	27	28	30	31	32	33	34	35	37	39	41	43	46	48	51	54	57
	45	27	28	29	30	32	33	35	37	39	41	43	46	49	51	54	57	
	50	27	28	30	31	33	34	36	38	41	43	46	49	52	55	58		
	55	28	29	30	32	34	36	38	40	43	46	48	52	55	59			
	60	28	29	31	33	35	37	40	42	45	48	51	55	59				
	65	28	30	32	34	36	39	41	44	48	51	55	59					
	70	29	31	33	35	38	40	43	47	50	54	58						
	75	29	31	34	36	39	42	46	49	53	58							
	80	30	32	35	38	41	44	48	52	57								
	85	30	33	36	39	43	47	51	55									
	90	31	34	37	41	45	49	54										
	95	31	35	38	42	47	51	57										
	100	32	36	40	44	49	54											

Índice de estresse térmico (°C)	Categoria	Perigos
27-32	Cuidado	Possível fadiga com exposição prolongada e/ou atividade física.
32-41	Cuidado Extremo	Insolação, câibras musculares, possível exaustão pelo calor com exposição prolongada e/ou atividade física.
41-54	Perigo	Insolação, câibras musculares, possível exaustão pelo calor, dor de cabeça devido a insolação com exposição prolongada e/ou atividade física.
Acima 54	Perigo Extremo	Calor/insolação desidratação grave com exposição prolongada e/ou atividade física.

Tabela de índice de calor do NWS e impactos na saúde amplamente correspondentes (NWS, 2014), adaptado por Luciana Teixeira.

Figura 2: Tabela do Índice de Calor

A tabela 1 apresenta a análise do índice de calor em diferentes bairros de Macaé, destacando os riscos de estresse térmico e os potenciais impactos na saúde pública no dia 17 de janeiro de 2024. Para chegar aos resultados apresentados, foram utilizados os parâmetros da Tabela de Índice de Calor do NWS (2014), que correlaciona a temperatura do ar e a umidade relativa para avaliar o risco de estresse térmico. As categorias variam de Cuidado a Perigo Extremo, conforme os valores de índice de calor calculados, sendo amplamente utilizadas para prever os impactos na saúde.

Tabela 1: Avaliação do Índice de Calor e Risco de Estresse Térmico (17/01/2024 - 12:00)

Bairro

Índice de

Calor (°C)

Categoria de

Risco

Risco à Saúde

TRAPICHE (Serra)

¹ Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, lucianascteixeira@gmail.com

² Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, 20111180029@pq.uenf.br

51,8

Perigo/Perigo Extremo

Alto risco de insolação, desidratação grave e outros problemas

MIRANTE DA LAGOA

49,1

Perigo

Risco considerável de insolação e exaustão pelo calor

GLÓRIA

41,4

Cuidado Extremo/Perigo

Possível exaustão pelo calor e câimbras musculares

MIRAMAR

41,5

Cuidado Extremo

Risco menor, mas presente durante períodos prolongados de calor

HORTO

37,9

Cuidado/Cuidado Extremo

Menor risco, mas importante monitorar e tomar medidas preventivas

GRANJA DOS CAVALEIROS

40,8

Cuidado

Necessidade de precaução devido a possíveis riscos relacionados ao calor

IMBOASSICA

49,1

Perigo

Risco significativo de insolação e exaustão pelo calor

VIRGEM SANTA

49,5

Perigo

Risco significativo de insolação e exaustão pelo calor

PARQUE AEROPORTO

47,0

Cuidado Extremo

Risco elevado de insolação e câimbras musculares

Conforme demonstrado, a elevação da umidade relativa amplifica o índice de calor, intensificando o estresse térmico, o que está alinhado com estudos que destacam o impacto da umidade como um fator central para prever o desconforto térmico em regiões urbanas (STAIGER *et al.*, 2019).

O mapa (figura 3) mostra a diferença entre a temperatura do ar (°C) e o índice de calor (°C) no município de Macaé, no dia 17 de janeiro de 2024, às 12h. As regiões próximas à Serra e à Lagoa registram as maiores variações, com valores que ultrapassam 14°C, evidenciando um nível elevado de desconforto térmico para os moradores dessas áreas.

¹ Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, lucianascteixeira@gmail.com

² Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, 20111180029@pq.uenf.br

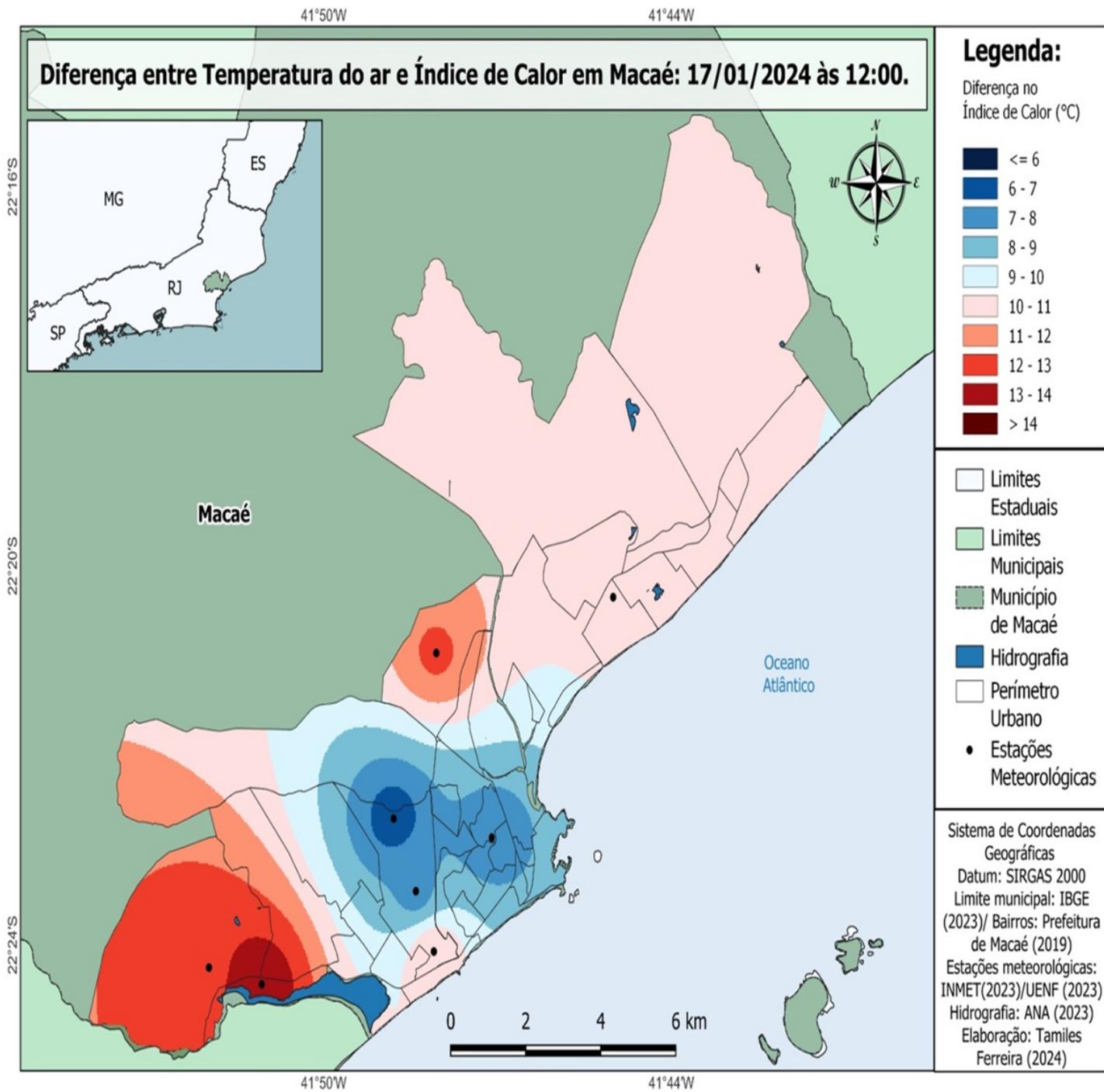


Figura 3: Mapa de Macaé

O aumento do consumo de energia elétrica em 2023, segundo a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), foi de 3,7%, impulsionado por ondas de calor que intensificaram o uso de ventiladores e ar-condicionado. No mercado regulado, que atende residências e pequenas empresas, o consumo cresceu 2,5%, especialmente nos últimos meses do ano, devido ao uso intensivo de sistemas de resfriamento para combater o estresse térmico (CCEE, 2023).

Conclusão

Este estudo demonstrou que a umidade relativa exerce uma influência significativa na amplificação da diferença entre a temperatura real e a sensação térmica, com variações de até 10°C, conforme observado nos verões de 2022-2023 e 2023-2024 em Macaé. A cidade apresentou microclimas distintos, que resultaram em uma variabilidade espacial considerável no índice de calor (IC) entre diferentes bairros. As áreas próximas à Serra e à Lagoa, por exemplo, registraram as maiores disparidades entre a temperatura medida e a sensação térmica. Os resultados indicam que o IC variou significativamente entre os bairros, impactando diretamente o estresse térmico e os riscos à saúde da população. Essas variações também influenciaram o aumento do consumo de energia elétrica, refletido nos dados nacionais de 2023. Segundo a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), o consumo de energia no Brasil cresceu 3,7% devido às ondas de calor, que intensificaram o uso de sistemas de refrigeração, como ventiladores e ar-condicionado, especialmente no mercado regulado, que apresentou um aumento de 2,5% no consumo residencial e de pequenas empresas. A rede de estações meteorológicas distribuídas em Macaé permitiu uma análise detalhada do microclima, possibilitando a identificação de variações espaciais no IC ao longo do tempo e entre diferentes áreas da cidade. Esse monitoramento revelou as flutuações do índice de calor e sua correlação direta com o consumo energético e os impactos climáticos em nível local.

¹ Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, lucianascteixeira@gmail.com

² Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, 20111180029@pq.uenf.br

Referências

1. OPITZ-STAPLETON, Sarah et al. Heat index trends and climate change implications for occupational heat exposure in Da Nang, Vietnam *Climate Services*, v. 2, p. 41-51, 2016.
2. STAIGER, Henning; LASCHEWSKI, Gudrun; MATZARAKIS, Andreas. Selection of appropriate thermal indices for applications in human biometeorological studies. *Atmosphere*, v. 10, n. 1, p. 18, 2019.
3. PARSONS, K. *Human Thermal Environments: The Effects of Hot, Moderate, and Cold Environments on Human Health, Comfort, and Performance*. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2014.
4. INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (INMET). *Dados meteorológicos de Macaé, RJ Brasília, 2023*. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br>. Acesso em: 04 abr. 2023.
5. UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO (UENF). *Dados meteorológicos do Projeto de Extensão "Tempo de Aprender em Clima de Ensinar"*: 2023.
6. NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA). *Heat Index Calculation Formula*. Disponível em: <http://www.noaa.gov>. Acesso em: 17 abr. 2023.
7. ALFANO, Francesca Romana d'AMBROSIO; PALELLA, Boris Igor; RICCIO, Giuseppe. Thermal environment assessment reliability using temperature—humidity indices. *Industrial health*, v. 49, n. 1, p. 95-106, 2011.
8. LU, George Y.; WONG, David W. An adaptive inverse-distance weighting spatial interpolation technique. *Computers & geosciences*, v. 34, n. 9, p. 1044-1055, 2008.
9. NATIONAL WEATHER SERVICE (NWS). *Heat Index*. Washington, DC: U.S. Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, 2014 Disponível em: <https://www.weather.gov/safety/heat-index>. Acesso em: 17 abr. 2024.
10. STAIGER, Henning; LASCHEWSKI, Gudrun; MATZARAKIS, Andreas. Selection of appropriate thermal indices for applications in human biometeorological studies. *Atmosphere*, v. 10, n. 1, p. 18, 2019.
11. CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (CCEE). *Balanço 2023: Cenário do Mercado de Energia Elétrica*. Disponível em: <http://www.ccee.org.br>. Acesso em: 29 set. 2024.

PALAVRAS-CHAVE: Análise climática, Calor urbano, Conforto térmico, Energia elétrica

¹ Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, lucianascteixeira@gmail.com

² Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, 20111180029@pq.uenf.br