

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY RIBEIRO - UENF
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CLIMA E ENERGIA - PPGC&E

LUCIANA DA SILVA COSTA TEIXEIRA

**ESTRESSE TÉRMICO EM MACAÉ-RJ: ANÁLISE DO ÍNDICE DE CALOR E
PRINCIPAIS IMPLICAÇÕES**

MACAÉ-RJ, 2026

LUCIANA DA SILVA COSTA TEIXEIRA

**ESTRESSE TÉRMICO EM MACAÉ-RJ: ANÁLISE DO ÍNDICE DE CALOR E
PRINCIPAIS IMPLICAÇÕES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Clima e Energia, do Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Clima e Energia.

Orientador(a): Prof^a Dra. Maria Gertrudes Alvarez Justi da Silva

MACAÉ-RJ, 2026

FICHA CATALOGRÁFICA

UENF - Bibliotecas

Elaborada com os dados fornecidos pela autora.

T266

Teixeira, Luciana da Silva Costa.

ESTRESSE TÉRMICO EM MACAÉ-RJ : ANÁLISE DO ÍNDICE DE CALOR E PRINCIPAIS IMPLICAÇÕES / Luciana da Silva Costa Teixeira. - Campos dos Goytacazes, RJ, 2026.

95 f. : il.

Inclui bibliografia.

Dissertação (Mestrado em Clima e Energia) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciência e Tecnologia, 2026.

Orientadora: Maria Gertrudes Alvarez Justi da Silva.

1. Desconforto Térmico. 2. Calor Extremo. 3. Microclima Urbano. 4. Consumo de Energia Elétrica. 5. Adaptação Climática. I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. II. Título.

CDD - 123

ESTRESSE TÉRMICO EM MACAÉ-RJ: ANÁLISE DO ÍNDICE DE CALOR E PRINCIPAIS IMPLICAÇÕES

LUCIANA DA SILVA COSTA TEIXEIRA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Clima e Energia, do Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Clima e Energia.

Aprovado em 24/02/2026

Comissão Examinadora:

Prof^a Dra. Maria Gertrudes Alvarez Justi da Silva — Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (LAMET/CCT/UENF)

Prof. Dr. Diego Cunha Malagueta — Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

Prof.^a Dra. Gisele Silva Barbosa — Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

Prof.^a Dra. Lilian Maria Garcia Bahia de Oliveira — Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

MACAÉ-RJ, 2026

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela força e inspiração ao longo de toda a trajetória da minha existência.

Ao meu marido, Ricardo, e ao meu filho Ravi, pelo apoio, paciência, amor e motivação constante.

À professora Maria Gertrudes Alvarez Justi, minha orientadora, pela dedicação, profissionalismo e valiosa contribuição na definição do tema e no desenvolvimento deste projeto.

À Engenheira Meteorologista Tamilyes Ferreira de Souza, pela disponibilização dos dados das estações meteorológicas de Macaé, pela parceria nos artigos submetidos a temas correlatos, bem como pelo apoio constante ao longo deste projeto e agora como membro integrante da Defesa Civil de Macaé.

Ao bolsista da UENF/LAMET Valmir Monteiro Júnior, pelo comprometimento, empenho e contribuição técnica no desenvolvimento do produto tecnológico apresentado no Capítulo 5 desta dissertação, tendo papel fundamental na implementação da aplicação e no fortalecimento da interface entre ciência do clima, tecnologia e comunicação do risco térmico para o município de Macaé-RJ.

Ao pesquisador Andre de Arruda Lyra, do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC/INPE), pela disponibilização dos dados de projeções climáticas e pelo suporte científico essencial ao desenvolvimento deste trabalho.

À Prefeitura Municipal de Macaé, em especial à Coordenadoria de Iluminação Pública, representada pelo gestor Marcelo Oliveira Neves, e à secretária Mariene Jabor de Oliveira Almeida, pela disponibilização dos dados de consumo de energia, apoio e atenção.

À Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro (UENF) e ao Programa de Pós-Graduação em Clima e Energia, pela oportunidade de formação acadêmica.

Ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), pelo fornecimento dos dados meteorológicos utilizados neste estudo.

E, por fim, aos meus familiares e amigos, pelo carinho, incentivo e apoio que tornaram possível a concretização desta etapa.

RESUMO

As mudanças climáticas têm intensificado eventos extremos e ampliado desafios à saúde pública, ao planejamento urbano e à gestão energética, especialmente em regiões tropicais úmidas. Entre esses impactos, destaca-se o estresse térmico, associado à combinação entre altas temperaturas do ar e elevada umidade relativa, condição que reduz a eficiência dos mecanismos fisiológicos de dissipação de calor e eleva os riscos à saúde humana. Nesse contexto, este estudo analisa o comportamento recente do Índice de Calor no município de Macaé-RJ, localizado no litoral norte fluminense, e discute suas implicações para a saúde, o consumo de energia elétrica e o planejamento urbano. A metodologia baseou-se na análise de dados horários de temperatura do ar e umidade relativa, no intervalo entre 12h e 18h, referentes a três verões consecutivos (2022–2023, 2023–2024 e 2024–2025). Foram avaliados quatro bairros representativos do município (Glória, Miramar, Mirante da Lagoa e Serra – Trapiche), permitindo abordagem em escala intraurbana. O Índice de Calor foi calculado conforme a equação operacional da National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), amplamente empregada na avaliação do desconforto térmico e do risco fisiológico associado ao calor. Os resultados observacionais indicaram intensificação recente das condições de estresse térmico no período analisado, com aumento das horas classificadas em categorias mais severas e registro de valores máximos superiores a 54 °C em determinadas localidades, caracterizando situações de perigo extremo. Embora o recorte temporal não permita a detecção formal de tendências climáticas de longo prazo, os achados evidenciam a recorrência de episódios críticos de calor em escala intraurbana. De forma complementar, foram analisadas projeções climáticas regionais sob os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, com caráter contextual, que indicam agravamento potencial das condições térmicas ao longo do século XXI, sobretudo no cenário de altas emissões. Adicionalmente, a análise descritiva do consumo de energia elétrica em edificações públicas dos setores de saúde e educação indicou associação entre períodos de maior desconforto térmico e aumento da demanda por climatização. Os resultados reforçam a relevância do Índice de Calor como ferramenta aplicada para subsidiar ações de adaptação urbana, proteção da saúde e planejamento energético.

Palavras-chave: desconforto térmico; calor extremo; microclima urbano; consumo de energia elétrica; adaptação climática.

ABSTRACT

Climate change has intensified extreme events and expanded challenges for public health, urban planning, and energy management, particularly in humid tropical regions. Among these impacts, heat stress stands out, as it is associated with the combined effect of high air temperatures and elevated relative humidity, a condition that reduces the efficiency of physiological heat dissipation mechanisms and increases risks to human health. In this context, this study analyzes the recent behavior of the Heat Index (HI) in the municipality of Macaé, located on the northern coast of the state of Rio de Janeiro, Brazil, and discusses its implications for health, electricity consumption, and urban planning. The methodology was based on the analysis of hourly air temperature and relative humidity data between 12:00 and 18:00, covering three consecutive summers (2022–2023, 2023–2024, and 2024–2025). Four representative neighborhoods of the municipality (Glória, Miramar, Mirante da Lagoa, and Serra–Trapiche) were evaluated, allowing an intra-urban scale approach. The Heat Index was calculated using the operational equation of the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), widely applied in assessments of thermal discomfort and heat-related physiological risk. Observational results indicated a recent intensification of heat stress conditions during the analyzed period, with an increase in the number of hours classified into more severe categories and the occurrence of maximum values exceeding 54 °C in specific locations, characterizing extreme danger conditions. Although the short temporal record does not allow for the formal detection of long-term climatic trends, the findings highlight the recurrence of critical heat episodes at the intra-urban scale. Additionally, regional climate projections under the RCP 4.5 and RCP 8.5 scenarios were analyzed in a contextual manner, indicating potential worsening of thermal conditions throughout the 21st century, especially under the high-emissions scenario. A descriptive analysis of electricity consumption in public buildings from the health and education sectors also revealed an association between periods of higher thermal discomfort and increased demand for air conditioning. Overall, the results reinforce the relevance of the Heat Index as an applied tool to support urban adaptation strategies, health protection, and energy planning.

Keywords: thermal discomfort; extreme heat; urban microclimate; electricity consumption; climate adaptation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização das estações meteorológicas utilizadas no estudo no município de Macaé-RJ.	16
Figura 2. Localização da estação meteorológica IMACA6, no bairro Miramar (Macaé-RJ), com detalhe ampliado do ponto de instalação do sensor.	34
Figura 3. Localização da estação meteorológica IMACA7, no bairro Mirante da Lagoa (Macaé-RJ), com detalhe ampliado do ponto de instalação do sensor.	35
Figura 4. Localização da estação meteorológica IMACA13, no bairro Serra (Trapiche), Macaé-RJ, com detalhe ampliado do ponto de instalação do sensor.	35
Figura 5. Localização da estação meteorológica IMACA15, no bairro Glória (Macaé-RJ), com detalhe ampliado do ponto de instalação do sensor.	36
Figura 6. Tabela do índice de calor NOAA.	40
Figura 7. Temperatura média do ar (°C) por bairro nos três verões, considerando o período entre 12h e 18h.	48
Figura 8. Umidade relativa média (%) por bairro nos três verões (12h–18h).	49
Figura 9. Relação entre temperatura média (°C) e umidade relativa (%) para os três verões.	50
Figura 10. Distribuição percentual das categorias de estresse térmico segundo a classificação da NOAA, para os três verões.	52
Figura 11. Distribuição das categorias de estresse térmico segundo a classificação da NOAA, para os três verões.	53
Figura 12. Índice de Calor médio por hora do dia dos três verões.	54
Figura 13. Evolução do índice de calor máximo (°C) nos bairros ao longo dos três verões analisados.	55
Figura 14. Diferença máxima entre índice de calor e temperatura do ar por bairro e verão.	57
Figura 15. Diferença média entre índice de calor e temperatura do ar por bairro e verão.	58
Figura 16. Comparação entre temperaturas médias e máximas (12h–18h) nos bairros, durante os verões.	60
Figura 17. Consumo de energia - educação (Glória), verão, não verão e razão.	63
Figura 18. Educação – Consumo Verão/Não-Verão vs IC Máximo.	64
Figura 19. Saúde Consumo Verão/Não-Verão vs Razão (2023–2024).	65
Figura 20. Saúde Consumo Verão/Não-Verão vs IC Máximo (2023–2024).	66
Figura 21. Evolução do índice de calor (P50 e P90) no cenário RCP 4.5.	68
Figura 22. Evolução do índice de calor (P50 e P90) no cenário RCP 8.5.	69
Figura 23. Umidade Relativa e Índice de Calor (P50) nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5.	70
Figura 24. Parque Marechal Carmona, Cascais, Portugal.	73
Figura 25. Interface da aplicação web SIM-IC Macaé em dispositivos desktop e móvel.	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Estação, bairro e localização das estações meteorológicas utilizadas.	34
Tabela 2. Temperatura média e umidade relativa média por bairro e verão (12h-18h).	47
Tabela 3. Horas de exposição ao estresse térmico por categoria.	51
Tabela 4. Diferença máxima (IC – T) por bairro e verão (12h–18h).	56
Tabela 5. Diferença máxima entre IC e Temperatura do Ar por bairro e verão.	59
Tabela 6. Consumo de Energia – Educação (Glória), Verão e Não-Verão (2023–2024).	62
Tabela 7. Consumo de energia – saúde (HPM), Verão e Não-Verão (2023–2024).	64
Tabela 8. Temperatura e umidade – percentis P10, P50 e P90 por cenário e período.	67
Tabela 9. Síntese dos achados epidemiológicos e climáticos/energéticos relevantes para políticas públicas.	72

LISTAS DE SIGLAS

API – Application Programming Interface

CMIP5 – Coupled Model Intercomparison Project Phase 5

CPTEC – Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos

CSS3 – Cascading Style Sheets versão 3

CSV – Comma-Separated Values

DLNM – Distributed Lag Non-Linear Models

ES6 – ECMAScript 6

ETA – Modelo Regional ETA

GW – Gigawatt

HI – Heat Index

HPM – Hospital Público Municipal de Macaé

HTML5 – HyperText Markup Language versão 5

IBM – International Business Machines

IC – Índice de Calor

IEA – International Energy Agency

INEA – Instituto Estadual do Ambiente

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change

LAMET – Laboratório de Meteorologia

MIROC5 – Model for Interdisciplinary Research on Climate versão 5

NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration

NWS – National Weather Service

NV – Não-Verão

ODS – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

PET – Physiological Equivalent Temperature

RCP – Representative Concentration Pathways

RCP 4.5 – Cenário de mitigação intermediária de emissões

RCP 8.5 – Cenário de altas emissões de gases de efeito estufa

SPA – Single Page Application

UI – User Interface

UR – Umidade Relativa

UTCI – Universal Thermal Climate Index

UENF – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro

UFRJ – Universidade Federal do Rio de Janeiro

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	10
1.1. Objetivos	14
1.2. Área de Estudo.....	15
1.3. Estrutura do Trabalho.....	17
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	18
2.1. Definição e Abordagens do Estresse Térmico	18
2.2. Estudos Climáticos Relevantes	18
2.3. Climatologia da Região	20
2.4. Desconforto Térmico	22
2.5. Estudos Epidemiológicos Relevantes.....	23
2.6. Projeções Climáticas	25
2.7. Índice de Calor	26
2.8. Estresse Térmico e Consumo de Energia	29
2.9. Mudanças Climáticas e Agenda 2030	30
2.10. Síntese do capítulo.....	31
3. METODOLOGIA.....	33
3.1. Dados Observacionais.....	33
3.2. Dados Consumo de Energia.....	37
3.3. Dados de Projeção Climáticas.....	37
3.4. Etapa Observacional do Índice de Calor.....	38
3.5. Cálculo do Índice de Calor.....	38
3.6. Classificação do Estresse Térmico	39
3.7. Análises Descritivas e Estatísticas.....	40
3.8. Integração entre Índice de Calor e Consumo Energético.....	42
3.9. Etapa com Projeções Climáticas Futuras	44
3.10. Implicações para Políticas Públicas e Planejamento Urbano.....	45
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
4.1. Análise Estatística de Temperatura do Ar e Umidade Relativa	47
4.2. Cálculo do Índice de Calor e Classificação do Estresse Térmico.....	51
4.3. Diferença entre Temperatura Real e Índice de Calor	56
4.4. Testes Estatísticos de Tendência (Mann-Kendall e Sen's slope).....	58
4.5. Associação entre Índice de Calor e Consumo de Energia	61
4.6. Projeções Climáticas Futuras	67

4.7. Implicações para Políticas Públicas e Planejamento Urbano.....	71
5. PRODUTO TECNOLÓGICO.....	75
5.1. Finalidade e relevância do produto	75
5.2. Arquitetura geral da aplicação	76
5.3. Organização modular e fluxo de funcionamento	77
5.4. Arquitetura client-side e justificativa técnica.....	78
5.5. Tecnologias utilizadas.....	79
5.6. Código Fonte do Produto	79
5.7. Público-alvo e aplicabilidade.....	80
5.8. Potencial de evolução do produto	80
6. CONCLUSÃO	82
6.1. Trabalhos Futuros.....	83
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	85

1. INTRODUÇÃO

O estresse térmico é uma das manifestações mais críticas das mudanças no clima urbano, resultante da combinação entre altas temperaturas e elevada umidade relativa do ar. Essa condição afeta diretamente a capacidade fisiológica do organismo humano de dissipar calor, uma vez que a eficiência do resfriamento evaporativo por meio do suor diminui em ambientes quentes e úmidos (SEPPÄNEN; FISK; LEI, 2006). Assim, o estresse térmico configura-se como um fenômeno biometeorológico associado às condições atmosféricas e às respostas termorregulatórias humanas.

A exposição a condições de estresse térmico intensifica o desconforto térmico e configura um fator crítico de risco à saúde humana. A combinação entre temperaturas elevadas e alta umidade pode gerar efeitos severos, como desidratação, exaustão térmica e agravamento de doenças cardiovasculares e respiratórias, especialmente em populações vulneráveis (SEPPÄNEN; FISK; LEI, 2006; SOUZA et al., 2020).

Além dos impactos diretos sobre a saúde, o estresse térmico está associado a efeitos socioeconômicos relevantes, incluindo redução da produtividade e aumento da demanda por climatização artificial. Em ambientes urbanos, a necessidade de adaptação ao calor intenso resulta em maior consumo energético, especialmente em períodos de calor extremo, ampliando a pressão sobre a infraestrutura elétrica e os sistemas de climatização (SEPPÄNEN; FISK; LEI, 2006; SOUZA et al., 2020).

Em regiões costeiras tropicais, o risco costuma a ser ainda mais elevado, pois a influência oceânica mantém a umidade relativa persistentemente alta, reduzindo o potencial de resfriamento fisiológico e agravando a exposição ao calor úmido (SHERWOOD; HUBER, 2010; IPCC, 2019). Esses fatores tornam o litoral brasileiro especialmente sensível aos impactos do aquecimento climático recente.

Em regiões costeiras tropicais, o estresse térmico tende a ser intensificado pela persistência de elevados níveis de umidade relativa, decorrentes da influência oceânica, o que reduz a eficiência do resfriamento fisiológico e agrava a exposição ao calor úmido (SHERWOOD; HUBER, 2010; IPCC, 2019). Evidências recentes reforçam a gravidade desse fenômeno, demonstrando que episódios de calor úmido extremo já atingiram limites fisiológicos humanos em regiões costeiras subtropicais, com aumento do risco de hipertermia e mortalidade (RAYMOND; MATTHEWS; HORTON, 2020). No estado do Rio de Janeiro, análises epidemiológicas confirmaram

associação direta entre calor extremo e elevação de óbitos cardiovasculares e respiratórios durante ondas de calor prolongadas (SILVEIRA et al., 2023; MORAIS et al., 2025). Esses resultados sustentam a relevância de investigar o estresse térmico em contextos urbanos tropicais como Macaé-RJ, onde a combinação entre aquecimento atmosférico e elevada umidade potencializa substancialmente os riscos associados ao calor intenso.

Em países de clima tropical úmido, como o Brasil, o estresse térmico é especialmente preocupante devido à combinação de temperaturas elevadas durante grande parte do ano e elevada umidade relativa do ar, condição que intensifica a sensação térmica e reduz a eficiência do resfriamento evaporativo do corpo humano. Estudos urbanos demonstram que mesmo regiões muito próximas dentro de uma mesma cidade podem apresentar diferenças microclimáticas relevantes, resultantes de fatores como uso e cobertura do solo, densidade construtiva, altitude, proximidade de corpos d'água e características térmicas de superfícies urbanas (OKE, 2002; SANTAMOURIS, 2013). Essas variações locais podem modificar substancialmente a intensidade do estresse térmico percebido pela população, ampliando ou atenuando o impacto das mesmas condições atmosféricas em escala regional.

Trabalhos recentes reforçam que a análise em escala intraurbana é essencial para subsidiar políticas públicas, pois permite identificar áreas mais vulneráveis, orientar intervenções de mitigação e aperfeiçoar estratégias de planejamento territorial e de saúde pública (SILVEIRA et al., 2023; MORAIS et al., 2025). Assim, estudos que consideram microclimas de bairros apresentam maior poder explicativo e aplicabilidade prática do que análises generalizadas em escala municipal.

A escolha de Macaé como área de estudo fundamenta-se na combinação entre diversidade topográfica intraurbana, forte influência marítima, acelerado crescimento urbano e notável disparidade microclimática entre bairros geograficamente próximos, o que torna o município um caso representativo para avaliar estresse térmico em ambiente tropical costeiro.

Dentro desse contexto, o município de Macaé-RJ, situado no litoral norte do estado do Rio de Janeiro, apresenta clima tropical úmido com médias anuais de umidade próximas a 80% e variações térmicas relativamente pequenas devido à influência marítima (INEA, 2012; BARBOSA et al., 2023). No entanto, a urbanização acelerada e a configuração microclimática dos bairros, alguns próximos à Lagoa de

Imboassica e outros em áreas mais elevadas, intensificam ainda mais os efeitos do calor úmido sobre a população.

Existem diferentes índices utilizados na literatura para avaliar o estresse térmico humano, tais como PET (*Physiological Equivalent Temperature*), UTCI (*Universal Thermal Climate Index*) e o próprio Índice de Calor (IC). Estudos comparativos demonstram que o IC, por considerar simultaneamente temperatura e umidade relativa, apresenta elevada capacidade explicativa em cenários tropicais úmidos, sendo amplamente empregado em análises de desconforto térmico e risco fisiológico (STEADMAN, 1979; ROTHFUSZ, 1990; ANDERSON; BELL, 2011). Além disso, esses índices apresentam faixas de classificação de estresse térmico definidas em literatura, e no caso do IC, a NOAA estabelece categorias de risco variando de “Cuidado” a “Perigo Extremo”, o que facilita a interpretação e comunicação dos níveis de severidade térmica em diferentes contextos. Adicionalmente, a NOAA padroniza operacionalmente o uso do IC para comunicação de risco à população, o que favorece sua aplicação em estudos com foco em monitoramento, saúde pública e tomada de decisão (NWS, 2021). Assim, neste estudo, o IC foi adotado como indicador central de estresse térmico devido à sua validação científica ampla e aplicabilidade direta à realidade climática de Macaé-RJ.

O presente estudo concentra-se na análise empírica do IC em quatro bairros de Macaé (Glória, Miramar, Mirante da Lagoa e Serra (Trapiche)), durante três verões consecutivos (2022–2023, 2023–2024 e 2024–2025). Os cálculos do IC, realizados a partir de dados horários de temperatura do ar e umidade relativa entre 12h e 18h (período mais crítico de exposição), seguem a equação oficial da NOAA.

A comparação do IC com o consumo de energia elétrica tem como finalidade verificar se os períodos de maior estresse térmico correspondem a aumento da demanda por climatização em edificações públicas do município. Vale ressaltar que, do ponto de vista conceitual, o IC permanece indicador primário de risco fisiológico à saúde humana, e a análise energética aqui introduzida tem caráter complementar, considerando o calor como vetor indutor de demanda adicional de climatização, e não como desdobramento biológico direto. Essa etapa é relevante pois permite identificar se o calor extremo, além de representar risco à saúde humana, também pressiona o sistema energético local, especialmente em setores sensíveis como saúde e educação. Estudos demonstram que elevações sustentadas de temperatura e

estresse térmico aumentam o uso de climatização e podem resultar em sobrecarga das redes elétricas, inclinação também observada em análises recentes em contexto brasileiro (MILLER et al., 2008; GOMES et al., 2024). Assim, ao integrar os dados de IC aos registros reais de consumo de energia, busca-se evidenciar a relação entre desconforto térmico e uso intensivo de climatização, contribuindo para o planejamento energético, definição de estratégias de adaptação urbana e desenvolvimento de políticas públicas orientadas à redução de impactos em períodos de calor extremo.

Estudos prévios e análises exploratórias realizadas na fase inicial da pesquisa indicam sinal de intensificação do IC, com registros acima de 54 °C em determinadas localidades, valores classificados como de perigo extremo segundo a NOAA. Para compreender as implicações práticas desse quadro, serão avaliadas faturas de energia elétrica de edificações públicas, com o propósito de investigar se os picos de IC se relacionam ao aumento da demanda energética em bairros com maior estresse térmico, compondo uma etapa comparativa entre indicadores climáticos e consumo real.

Cabe destacar que os resultados apresentados neste estudo têm caráter estritamente observacional e referem-se a um diagnóstico climático recente, restrito a três verões consecutivos (2022–2023, 2023–2024 e 2024–2025). Dessa forma, as análises não configuram detecção formal de mudança climática, nem permitem inferências robustas sobre tendências de longo prazo. A intensificação do Índice de Calor mencionada ao longo do trabalho deve ser interpretada como evidência de agravamento recente do estresse térmico em escala intraurbana, contextualizada à luz do conhecimento consolidado sobre mudanças climáticas, mas sem extrapolação temporal além do período analisado.

Embora este trabalho utilize projeções climáticas oriundas do modelo regional ETA acoplado ao MIROC5 (cenários RCP 4.5 e RCP 8.5), seu foco principal está nos dados observacionais recentes e na relação direta entre estresse térmico e consumo de energia. As projeções são consideradas de forma tangencial, como elemento complementar para contextualizar a direção dos valores observados, mas não constituem a base central da análise.

Assim, este estudo busca contribuir com subsídios técnicos para a formulação de políticas públicas de saúde e de planejamento urbano, bem como para estratégias

de gestão energética em cenários de calor extremo (IPCC, 2014; ROSENTHAL et al., 2014).

Diferentemente de estudos que analisam isoladamente variáveis meteorológicas ou impactos setoriais do calor, esta pesquisa apresenta como diferencial científico a integração entre análise observacional do Índice de Calor em escala intraurbana, evidências epidemiológicas consolidadas e avaliação do consumo de energia elétrica em edificações públicas, permitindo uma abordagem aplicada e territorializada do estresse térmico em um município costeiro tropical.

1.1. Objetivos

Avaliar o estresse térmico no município de Macaé-RJ por meio do Índice de Calor, analisando sua variabilidade espacial e temporal nos verões recentes e sua relação com o consumo de energia elétrica em edificações públicas. Os objetivos específicos são:

- Caracterizar o comportamento da temperatura do ar e da umidade relativa nos bairros de Miramar, Glória, Mirante da Lagoa e Serra (Trapiche), no período entre 12h e 18h, durante os verões de 2022–2023, 2023–2024 e 2024–2025;
- Calcular o Índice de Calor a partir das variáveis meteorológicas observadas e classificar os níveis de estresse térmico segundo os critérios da NOAA;
- Analisar a diferença entre a temperatura do ar e o Índice de Calor, evidenciando o papel da umidade relativa na intensificação da sensação térmica;
- Identificar padrões horários e espaciais de maior exposição ao estresse térmico nos bairros analisados;
- Investigar a relação entre o Índice de Calor e o consumo de energia elétrica em edificações públicas dos setores de educação e saúde no município de Macaé-RJ;
- Avaliar indícios de aumento no estresse térmico a partir de projeções climáticas regionais, com foco nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, de forma contextual.

1.2. Área de Estudo

O município de Macaé, localizado no litoral norte do estado do Rio de Janeiro, aproximadamente nas coordenadas 22°22'S e 41°47'W, apresenta uma configuração territorial marcada pela combinação de zonas urbanizadas densas, áreas costeiras e regiões de relevo acidentado. Essa diversidade geográfica favorece a formação de microclimas distintos dentro do município, influenciados pela proximidade com o oceano Atlântico, pela presença da Lagoa de Imboassica e pelos contrastes topográficos que modulam a distribuição térmica no espaço urbano (INEA, 2012; CBH MACAÉ, 2020).

O clima predominante na região é tropical litorâneo, caracterizado por temperaturas elevadas durante o verão e altos índices de umidade relativa. Essas condições meteorológicas intensificam o desconforto térmico e tornam a cidade especialmente relevante para estudos sobre estresse térmico, sensações térmicas elevadas e efeitos associados ao aumento da temperatura e da umidade (INMET, 2020, 2023).

Nos últimos anos, o município registrou verões progressivamente mais quentes e úmidos, intensificando riscos para a população. A presença de corpos d'água e as diferenças de altitude e urbanização geram contrastes entre bairros como Serra (Trapiche), Mirante da Lagoa, Glória e Miramar. A presença dessas estações meteorológicas permite a análise detalhada da variabilidade térmica intraurbana no município. A Figura 1 apresenta a área de estudo e a localização das estações meteorológicas utilizadas na coleta dos dados observacionais.

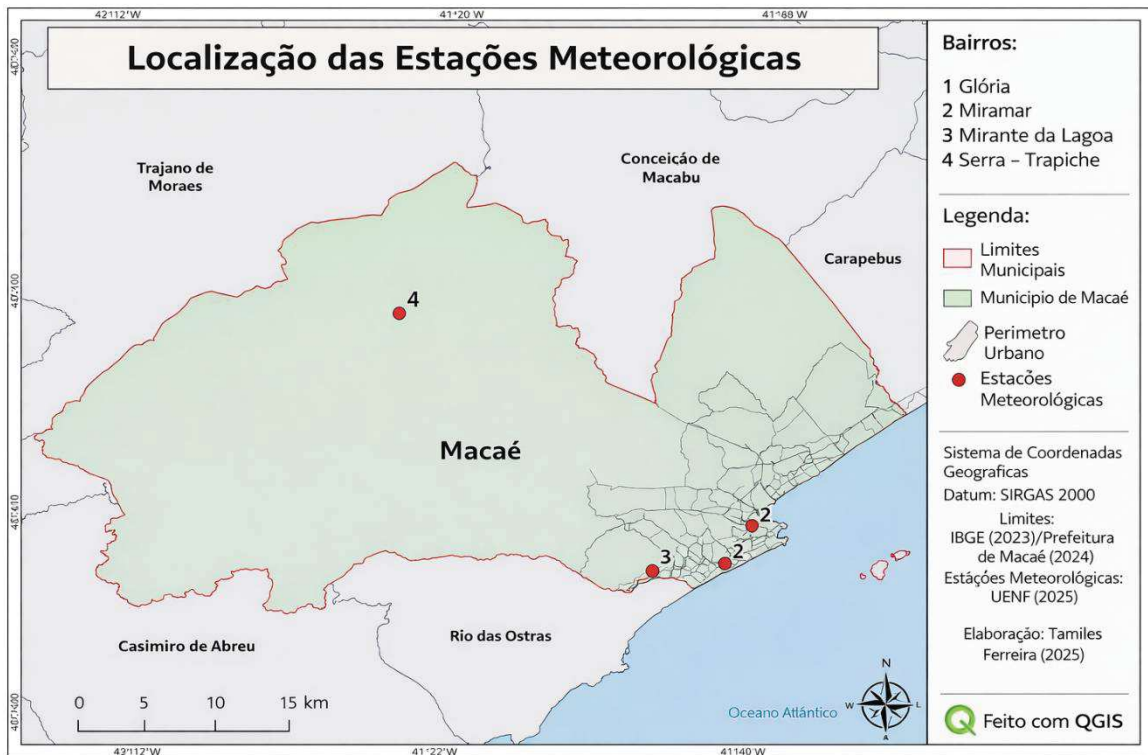


Figura 1. Localização das estações meteorológicas utilizadas no estudo no município de Macaé-RJ.

A seleção dos bairros analisados neste estudo, Miramar, Glória, Mirante da Lagoa e Serra (Trapiche), foi realizada com base em critérios técnicos e operacionais. Inicialmente, considerou-se a disponibilidade de séries de dados meteorológicos horários contínuos e consistentes para os três verões analisados (2022–2023, 2023–2024 e 2024–2025), condição essencial para a comparação interanual do Índice de Calor. Adicionalmente, os bairros selecionados apresentam características urbanas e geográficas distintas, permitindo captar contrastes microclimáticos relevantes no município de Macaé-RJ. Enquanto Miramar e Glória representam áreas mais consolidadas e densamente urbanizadas, Mirante da Lagoa caracteriza-se pela proximidade com a Lagoa de Imboassica e pela influência de corpos hídricos, e Serra (Trapiche) apresenta maior elevação topográfica e menor ventilação local. Essa diversidade espacial possibilita avaliar como diferentes configurações urbanas e ambientais modulam a interação entre temperatura do ar, umidade relativa e intensidade do estresse térmico, atendendo diretamente aos objetivos propostos na pesquisa.

A escolha do município de Macaé como área de estudo justifica-se pela disponibilidade de estações meteorológicas com dados horários consistentes, pela relevância climática observada nos verões recentes, marcados por condições térmicas mais severas, e por seu papel estratégico no estado do Rio de Janeiro, tanto como polo industrial quanto como município em acelerado processo de expansão urbana. Essas características reforçam a importância de avaliar o estresse térmico local e seus desdobramentos, especialmente com vistas a subsidiar ações de adaptação climática, planejamento urbano e formulação de políticas públicas.

1.3. Estrutura do Trabalho

Esta dissertação está estruturada em 5 capítulos.

O Capítulo 1 apresenta a introdução do trabalho, contextualizando o problema do estresse térmico em ambientes urbanos tropicais, sua relevância para a saúde humana e para o consumo energético, bem como os objetivos geral e específicos da pesquisa.

O Capítulo 2 apresenta a revisão da literatura, abordando os fundamentos teóricos relacionados ao estresse térmico, aos limites fisiológicos do calor úmido, ao Índice de Calor e às interações entre clima urbano, saúde e demanda energética.

O Capítulo 3 descreve a metodologia adotada, incluindo a caracterização da área de estudo, a base de dados observacionais, os procedimentos de cálculo do Índice de Calor, as análises estatísticas realizadas e a integração entre variáveis climáticas e consumo energético.

O Capítulo 4 apresenta os resultados e discussões, com a análise das variações espaciais e temporais do Índice de Calor nos bairros estudados, a avaliação do estresse térmico urbano, a relação com o consumo energético e a análise exploratória de projeções climáticas futuras.

O Capítulo 5 apresenta as conclusões do estudo, destacando os principais achados da pesquisa, suas limitações e as implicações para o planejamento urbano, a saúde pública e a gestão energética em cidades costeiras.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Definição e Abordagens do Estresse Térmico

O estresse térmico pode ser definido como a condição resultante do balanço inadequado entre a produção interna de calor do corpo humano e a capacidade de dissipação desse calor para o ambiente, processo altamente influenciado por variáveis térmicas, hídricas e aerodinâmicas como temperatura do ar, umidade relativa, radiação solar e velocidade do vento (BUDD, 2008; KOVATS; HIRST, 2020). Na literatura, diferentes abordagens têm sido utilizadas para quantificar essa condição, incluindo métricas fisiológicas diretas, índices empíricos, modelos termo-fisiológicos e equações combinadas, variando conforme o objetivo do estudo, o tipo de exposição e o contexto climático analisado (BŁAŻEJCZYK et al., 2012).

A caracterização do estresse térmico por meio de índices termo-higrométricos é amplamente adotada devido à sua aplicabilidade operacional, permitindo traduzir condições atmosféricas complexas em categorias interpretáveis de risco e desconforto térmico, diretamente relacionadas a efeitos fisiológicos adversos e eventos de impacto à saúde humana (ANDERSON; BELL, 2011; KANG et al., 2022).

Além do Índice de Calor, outros indicadores biometeorológicos amplamente utilizados na literatura incluem o PET (Physiological Equivalent Temperature) e o UTCI (Universal Thermal Climate Index), que integram variáveis como radiação, vento, temperatura e umidade em modelos termofisiológicos. Esses índices são empregados em estudos de conforto térmico urbano e permitem avaliar o estresse térmico considerando a resposta fisiológica humana em diferentes condições ambientais (HÖPPE, 1999; BŁAŻEJCZYK et al., 2012). Nesse contexto, o Índice de Calor apresenta operacionalidade mais direta e adequada, especialmente para análises em regiões tropicais úmidas, onde a combinação de temperatura e umidade relativa já é suficiente para capturar os principais mecanismos associados ao desconforto térmico.

2.2. Estudos Climáticos Relevantes

O estresse térmico tem se intensificado em várias regiões do mundo, especialmente em áreas urbanas, onde a combinação de altas temperaturas e elevada umidade relativa amplia os riscos à saúde. Evidências apresentadas por Raymond, Matthews e Horton (2020) indicam que episódios de calor úmido extremo,

caracterizados pela combinação simultânea de temperatura elevada e alta umidade relativa em níveis capazes de limitar o resfriamento evaporativo, já atingiram limites fisiológicos de tolerância humana, próximos a condições em que a termorregulação deixa de ser eficiente para manter a temperatura corporal interna estável. Esse tipo de evento ocorre quando o corpo humano perde a capacidade de dissipar calor mesmo em repouso e em ambientes ventilados, o que explica a relevância biometeorológica do fenômeno.

Na América do Sul, análises recentes indicam aumento expressivo do número de horas em condições críticas de estresse térmico, sobretudo nas regiões Norte e Centro-Oeste, o que evidencia a relevância do tema para países tropicais como o Brasil (MIRANDA et al., 2024). Esse padrão reforça que o desconforto térmico não é apenas uma projeção futura, mas já ocorre em escala regional, especialmente em cidades costeiras brasileiras, onde a elevada umidade relativa potencializa de forma substancial a sensação térmica e os riscos associados ao calor intenso.

A literatura aponta que o uso exclusivo do limiar de 35 °C de temperatura de bulbo úmido como indicador de risco fisiológico pode ser limitado, pois esse valor foi historicamente utilizado como referência teórica para o limite máximo de sobrevivência humana sob calor úmido extremo, mas não captura adequadamente a variabilidade das respostas térmicas em diferentes contextos ambientais. A temperatura de bulbo úmido corresponde ao menor valor de temperatura que pode ser atingido pela evaporação da água em um sistema adiabático, sendo uma medida integrada de temperatura e umidade relativa, normalmente obtida por termômetro envolto em tecido umedecido e ventilado. O Índice de Calor (IC), desenvolvido pela NOAA, surge como alternativa operacional mais sensível ao desconforto térmico real, pois integra simultaneamente temperatura e umidade relativa para representar de forma mais realista a sensação térmica percebida pelo corpo humano (LU; ROMPS, 2023).

Estudos globais sobre ondas de calor reforçam o papel da umidade como fator modulador. Uma onda de calor corresponde a períodos consecutivos de temperaturas máximas acima de percentis climatológicos de referência, geralmente por três dias ou mais, configurando um evento prolongado. Entretanto, um valor elevado de IC pode ocorrer mesmo em um único dia ou hora isolada sem configurar uma onda de calor, evidenciando que o IC é um indicador biometeorológico instantâneo e não

necessariamente dependente de eventos persistentes ou síncronos de aquecimento atmosférico (AWASTHI; VISHWAKARMA; PATTNAYAK, 2022).

Esses resultados internacionais oferecem o arcabouço conceitual para o presente estudo, que se concentra em Macaé-RJ. Ao adotar o IC como métrica central, busca-se evidenciar, a partir de dados observacionais, como a umidade relativa potencializa a sensação térmica e o desconforto humano, além de discutir as implicações para o consumo energético urbano. Neste estudo, o Índice de Calor (IC) é adotado como métrica central para avaliar o desconforto térmico, uma vez que combina temperatura do ar e umidade relativa, permitindo representar de forma mais realista a sensação térmica percebida pelo corpo humano. Além de caracterizar os níveis de estresse térmico nos bairros analisados, a pesquisa investiga a relação entre os valores do IC e o consumo de energia elétrica em edificações públicas, buscando compreender como esses eventos podem impactar a demanda energética urbana.

2.3. Climatologia da Região

Macaé (RJ) está localizada no litoral norte fluminense e apresenta clima tropical litorâneo, fortemente influenciado pelo oceano. Essa influência marítima atua sobre a camada limite atmosférica, definida como a porção mais próxima da superfície onde ocorrem trocas de calor, umidade e momentum, modulando a temperatura, a umidade relativa e a circulação local ao longo do ano. Em escala regional, regiões costeiras do Sudeste tendem a apresentar menor amplitude térmica diária e sazonal e maior umidade relativa, enquanto áreas mais interiores e elevadas apresentam maior variabilidade térmica, ainda sob modulação oceânica (NIMER, 1989; CBH MACAÉ, 2020).

No verão, entre dezembro e fevereiro, predominam condições quentes e úmidas associadas ao aporte de brisas marítimas e maior convecção local. No inverno, entre junho e agosto, as temperaturas tornam-se mais amenas sob maior frequência de sistemas frontais e intensificação da Alta Subtropical do Atlântico Sul, que favorece maior estabilidade atmosférica (NIMER, 1989). As Normais Climatológicas do INMET e os registros da estação automática de Macaé (A608) confirmam esse padrão térmico e higrométrico (INMET, 2020).

Do ponto de vista de estresse térmico, duas características se destacam no município. A primeira é a elevada umidade relativa durante o verão, que reduz a

eficiência do resfriamento evaporativo do corpo humano e potencializa o desconforto térmico. A segunda envolve períodos de ar mais quente e estável, que favorecem a persistência de condições desconfortáveis. Embora ainda não existam estudos publicados sobre o Índice de Calor especificamente para Macaé, análises apresentadas em conferências indicam que a umidade relativa é um modulador determinante na intensificação do desconforto térmico local, com possíveis implicações no consumo de energia elétrica para climatização em edificações públicas (TEIXEIRA; SOUZA, 2024).

Quanto aos critérios para episódios extremos de calor, diferentes instituições utilizam metodologias distintas. A cidade do Rio de Janeiro utiliza a escala de Níveis de Calor, baseada no Índice de Calor e em persistência mínima de 3 dias, com NC5 atribuído a valores superiores a 44 °C (RIO DE JANEIRO, 2022). O Instituto Nacional de Meteorologia define onda de calor como anomalias positivas de temperatura, cerca de 5 °C acima da climatologia, mantidas por 3 a 5 dias consecutivos (INMET, 2023). Apesar de úteis para contextualizar eventos prolongados, tais definições diferem do foco deste estudo, que se concentra no Índice de Calor como indicador instantâneo de desconforto biometeorológico.

Em relação aos extremos térmicos em períodos mais secos, geralmente entre junho e setembro, análises por satélite identificaram média de 144 focos de calor anuais entre 2014 e 2018 em Macaé (SIQUEIRA et al., 2022). Focos de calor correspondem a detecções de anomalias térmicas superficiais por sensores orbitais, associadas principalmente a queimadas ou aquecimento da superfície, e não refletem diretamente temperatura do ar. Embora não sejam indicadores de ondas de calor ou de estresse térmico humano, contribuem para caracterizar o contexto climático regional.

Por fim, estudos locais utilizando índices bioclimáticos como PET e UTCI identificaram desconforto térmico durante os meses mais quentes, com valores frequentemente acima das faixas de conforto propostas por seus respectivos modelos (BARBOSA et al., 2023). Esses resultados corroboram a climatologia regional e reforçam que a combinação entre temperatura e umidade é um condicionante relevante para o estresse térmico em Macaé.

De forma geral, o município apresenta características típicas de clima tropical úmido, com verão quente e úmido e forte influência marítima. Esse cenário reforça a

pertinência do Índice de Calor como ferramenta biometeorológica para avaliar a intensificação térmica relacionada à umidade relativa em escala intraurbana.

2.4. Desconforto Térmico

O desconforto térmico corresponde a um estado de mal-estar fisiológico provocado por condições ambientais que excedem a zona de conforto térmico humano. A intensidade desse fenômeno é influenciada por variáveis como temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento e radiação solar, fatores amplamente reconhecidos na literatura de biometeorologia ambiental (FANGER, 1970; BUDD, 2008). Esse conjunto de variáveis afeta diretamente a capacidade de termorregulação, processo responsável por manter a temperatura corporal interna estável.

A associação entre temperaturas elevadas e alta umidade relativa é uma das principais causas de desconforto térmico, pois limita a evaporação do suor e reduz a eficiência do resfriamento fisiológico. Essa combinação aumenta a incidência de eventos adversos à saúde, incluindo desidratação, hipertermia, agravamento de doenças cardiovasculares e respiratórias e maior vulnerabilidade entre idosos, crianças e indivíduos com comorbidades (KOVATS; HAJAT, 2008; LÓPEZ-BUENO et al., 2023). À medida que a capacidade de dissipação de calor diminui, cresce também a necessidade do uso de ventiladores e sistemas de climatização artificial para restaurar o conforto térmico e reduzir riscos fisiológicos.

No ambiente ocupacional, o estresse térmico está associado à queda de produtividade e ao aumento da probabilidade de acidentes de trabalho. Condições de calor acima dos limites de conforto reduzem a atenção, elevam a fadiga e prejudicam o desempenho físico e cognitivo, gerando perdas econômicas e riscos adicionais em atividades de maior demanda física (SEPPÄNEN; FISK; LEI, 2006).

A qualidade de vida urbana também é afetada por episódios de calor intenso. Evidências indicam que o desconforto térmico reduz a participação em atividades ao ar livre e aumenta significativamente a demanda por climatização artificial. Esse aumento repercute no consumo de eletricidade e, em matrizes energéticas baseadas em combustíveis fósseis, intensifica as emissões de gases de efeito estufa (IEA, 2018). Além disso, estudos em percepção climática mostram que a população tende a valorizar mais medidas de mitigação quando entende os benefícios térmicos

proporcionados por intervenções urbanas de resfriamento, como sombreamento urbano e vegetação, fenômeno descrito como “efeito de resfriamento percebido” (FAN et al., 2023).

Evidências regionais reforçam o impacto combinado entre temperatura e umidade. No Nordeste brasileiro, episódios de calor associado à alta umidade resultaram em índices de calor extremos, elevando substancialmente o risco de estresse térmico (LEITÃO et al., 2013). Estudos recentes mostram que diversas regiões do Brasil e da América do Sul vêm registrando aumento nas horas sob forte estresse térmico, indicando que o problema já ocorre de forma consistente e com implicações diretas para a saúde pública e o planejamento urbano (MOREIRA et al., 2024; REQUÍA et al., 2024). Esses trabalhos ressaltam a importância de investigar o desconforto térmico em cidades tropicais como Macaé, onde a combinação entre calor e elevada umidade tende a se intensificar sob o cenário das mudanças climáticas.

Apesar de o presente estudo não ter como foco a investigação de ondas de calor, é relevante mencionar que episódios prolongados de temperaturas anormalmente elevadas podem intensificar o desconforto térmico e ampliar riscos à saúde, sobretudo em ambientes urbanos densamente povoados. A literatura demonstra que a persistência do calor extremo reduz o resfriamento noturno, aumenta a carga térmica acumulada pelo organismo e eleva a incidência de agravos durante períodos prolongados de aquecimento atmosférico (SANTAMOURIS, 2013; EBI et al., 2021). Essa contextualização complementa a análise conduzida nesta pesquisa, que emprega o Índice de Calor como indicador instantâneo de estresse térmico, deixando evidente que extremos persistentes e valores horários representam fenômenos distintos, ainda que ambos sejam modulados pela combinação entre temperatura e umidade relativa.

2.5. Estudos Epidemiológicos Relevantes

Os impactos do calor sobre a saúde pública têm sido amplamente documentados em estudos epidemiológicos brasileiros e internacionais, demonstrando que temperaturas elevadas associadas à alta umidade relativa aumentam o risco de mortalidade e morbidade por causas cardiovasculares, respiratórias e metabólicas. Essa relação está diretamente ligada aos limites fisiológicos de termorregulação, que

são comprometidos quando a dissipação de calor do corpo se torna ineficiente, especialmente em ambientes úmidos (KOVATS; HAJAT, 2008).

Em escala global, estudos observacionais multicêntricos reforçam que a exposição a temperaturas extremas constitui fator de risco relevante para a mortalidade. Análises conduzidas em diferentes continentes indicam que o calor extremo responde por parcela significativa do risco atribuível à temperatura, sobretudo em áreas urbanas, confirmando a robustez da relação entre estresse térmico e mortalidade em diferentes contextos climáticos (GASPARRINI et al., 2015).

Pesquisas realizadas no estado do Rio de Janeiro apontam que a exposição a condições térmicas críticas, medidas por indicadores como o Índice de Calor ou por variáveis ambientais equivalentes, está associada ao aumento de óbitos por causas cardiorrespiratórias. Na capital fluminense, análises entre 2012 e 2017 identificaram que dias com desconforto térmico elevado apresentaram maior incidência de mortes relacionadas ao sistema cardiovascular e respiratório, particularmente entre idosos, que possuem menor capacidade de termorregulação (SILVEIRA et al., 2023).

Outro estudo sobre mortalidade entre 2007 e 2016 no Rio de Janeiro aplicou métodos estatísticos multivariados para avaliar o impacto de períodos prolongados de calor, identificando episódios térmicos críticos com duração média de 8 a 17 dias. Os autores observaram excesso de mortalidade durante tais eventos, reforçando que ambientes urbanos densos mostram maior vulnerabilidade fisiológica durante condições extremas de calor (PROSDOCIMI; KLIMA, 2020).

Avanços recentes na modelagem estatística permitiram a aplicação de *Distributed Lag Non-Linear Models* (DLNM), que avaliam efeitos cumulativos do calor ao longo de vários dias. Utilizando essa abordagem, Morais et al. (2025) analisaram dados de mortalidade no estado do Rio de Janeiro entre 2012 e 2024 e identificaram associação estatisticamente entre exposição a condições térmicas críticas e aumento de mortes por múltiplas causas. Os resultados reforçam a utilidade de indicadores combinados como o Índice de Calor na avaliação de risco à saúde em contextos urbanos.

Esses estudos mostram que a elevação do Índice de Calor não deve ser entendida apenas como medida de desconforto térmico, mas como indicador relevante de risco à saúde coletiva. Além dos impactos fisiológicos diretos, condições térmicas mais severas tendem a aumentar a demanda por climatização artificial, com

possíveis repercussões sobre o consumo energético, tema explorado nos resultados observacionais deste estudo.

2.6. Projeções Climáticas

As projeções climáticas fornecem estimativas sobre possíveis mudanças no sistema climático em escalas futura e regional, mas neste estudo têm função apenas contextual, uma vez que o foco central recai sobre a análise observacional recente em Macaé. Os modelos climáticos globais (GCMs) simulam a atmosfera e os oceanos por meio de equações físicas e, para aplicações em escala local, seus resultados são refinados por métodos de *downscaling*, que representam técnicas destinadas a aumentar a resolução espacial das projeções. O *downscaling* dinâmico utiliza modelos climáticos regionais para detalhar processos atmosféricos, enquanto o *downscaling* estatístico aplica relações matemáticas entre variáveis observadas e simuladas (WILBY et al., 2004; CHOU et al., 2014).

As projeções costumam ser apresentadas segundo os *Representative Concentration Pathways (RCPs)*, termo usado pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC). Os RCPs descrevem trajetórias possíveis de concentração de gases de efeito estufa, como o RCP 4.5, que pressupõe estabilização intermediária das emissões, e o RCP 8.5, considerado um cenário de altas emissões (MOSS et al., 2010; IPCC, 2014). Estudos que avaliam o Sudeste brasileiro indicam direção de aumento gradual das temperaturas médias e maior frequência de dias com calor intenso ao longo do século XXI, embora os resultados variem conforme o cenário de emissões e o modelo adotado (AWASTHI; VISHWAKARMA; PATTNAYAK, 2022; SILVEIRA et al., 2023).

No estado do Rio de Janeiro, projeções regionais apontam que, sob o cenário RCP 8.5, a temperatura média anual pode aumentar aproximadamente 3 °C a 4 °C até 2100, alteração suficiente para intensificar o desconforto térmico urbano e modificar padrões de demanda energética. Mudanças na umidade relativa previstas em alguns modelos indicam que a sensação térmica poderá se tornar ainda mais elevada em dias quentes, ampliando a relevância de índices termo-higrométricos, como o Índice de Calor, para análises futuras (SILVEIRA et al., 2023).

Neste trabalho, essas projeções são apresentadas apenas para contextualizar o comportamento observado no período analisado de longo prazo no litoral

fluminense. A análise central é baseada nos dados observacionais dos verões recentes (2022–2025) e na relação entre o Índice de Calor (IC) e o consumo de energia elétrica em Macaé-RJ, sem extensão interpretativa para cenários futuros.

2.7. Índice de Calor

A avaliação do desconforto térmico humano vem sendo discutida na climatologia aplicada desde a década de 1980, com o desenvolvimento de índices baseados na adaptação climática regional e na percepção fisiológica da população. Estudos pioneiros demonstraram que o desconforto térmico não depende apenas da temperatura absoluta, mas também do contexto climatológico local e da aclimação humana, estabelecendo as bases para o desenvolvimento de índices biometeorológicos amplamente utilizados posteriormente (KALKSTEIN; VALIMONT, 1986).

O Índice de Calor (IC) constitui um dos indicadores biometeorológicos mais amplamente utilizados para estimar o desconforto térmico humano, pois integra a temperatura de bulbo seco e a umidade relativa do ar em uma métrica única que representa a sensação térmica percebida pelo organismo. Desenvolvido pelo National Weather Service dos Estados Unidos, o IC foi baseado nos estudos clássicos de termorregulação conduzidos por Steadman (1979), que demonstraram que a evaporação do suor é o principal mecanismo fisiológico de dissipação de calor. Em ambientes úmidos, a eficiência desse processo diminui drasticamente, elevando a carga térmica percebida pelo corpo humano e ampliando os riscos à saúde. A formulação operacional do IC utiliza uma equação polinomial empírica, proposta por Rothfus (1990), originalmente definida em graus Fahrenheit (°F) e válida para condições acima de aproximadamente 27 °C e umidade relativa superior a 40%.

A interpretação do IC está diretamente associada aos mecanismos fisiológicos envolvidos na dissipação de calor. Em situações de alta umidade relativa, a evaporação do suor torna-se ineficaz, impedindo que o corpo mantenha a temperatura interna estável. Isso leva à elevação da frequência cardíaca, à sobrecarga do sistema cardiovascular, à intensificação da desidratação e, em casos mais graves, a quadros de hipertermia e colapso térmico. Estudos epidemiológicos indicam que valores elevados de IC estão associados a aumentos estatisticamente significativos de internações e óbitos por causas cardiorrespiratórias, especialmente em populações

vulneráveis, como idosos, crianças e pessoas com doenças pré-existentes (ANDERSON; BELL, 2011; MORAIS et al., 2025). Em ambientes tropicais úmidos, como o litoral brasileiro, observa-se um aumento repentino do IC mesmo quando a temperatura não é extremamente elevada, devido ao papel decisivo da umidade relativa na limitação do resfriamento evaporativo.

Além dos impactos diretos sobre a saúde humana, o IC elevado exerce forte influência sobre o ambiente de trabalho e a produtividade. Em condições de calor intenso, observam-se redução da atenção, fadiga acelerada, piora do desempenho cognitivo e aumento da probabilidade de acidentes, especialmente em atividades que exigem esforço físico ou elevada concentração (SEPPÄNEN; FISK; LEI, 2006). Setores como construção civil, agricultura, logística e operações industriais ao ar livre, incluindo atividades em plataformas offshore, tornam-se particularmente vulneráveis a períodos de calor úmido, exigindo medidas de gestão térmica para assegurar a segurança operacional e o desempenho das equipes.

No contexto das mudanças climáticas, a intensificação do estresse térmico tende a agravar as condições de trabalho, especialmente em atividades realizadas ao ar livre ou em ambientes com climatização limitada. Estudos indicam que o aumento das temperaturas pode comprometer o desempenho laboral, elevar riscos ocupacionais e demandar adaptações estruturais e organizacionais nos ambientes de trabalho ao longo do século XXI (SOUZA et al., 2020).

Em escala urbana, o aumento do IC está estreitamente relacionado ao crescimento da demanda por climatização artificial. A redução da capacidade fisiológica de dissipação de calor leva ao uso intensificado de ventiladores e aparelhos de ar-condicionado, impactando diretamente o consumo energético em residências, escolas, hospitais e edificações públicas. Estudos internacionais mostram que áreas urbanas expostas a valores elevados de IC apresentam aumento expressivo da carga elétrica nos horários mais críticos, ampliando o risco de sobrecarga das redes e elevação das emissões associadas ao uso de energia em matrizes fósseis (IEA, 2018; FAN et al., 2023). Esses efeitos são particularmente relevantes para cidades costeiras tropicais, onde a umidade relativa elevada faz com que a sensação térmica se distancie significativamente da temperatura real do ar.

Além do impacto sobre a demanda energética, estudos recentes demonstram que o calor extremo impõe custos econômicos substanciais associados à mortalidade

e à perda de bem-estar. Avaliações econômicas realizadas em cidades europeias indicam que a intensificação das ilhas de calor urbanas eleva significativamente os custos sociais relacionados à saúde pública, reforçando a importância de estratégias de mitigação térmica e adaptação urbana (HUANG et al., 2023).

Os impactos do IC também se estendem a sistemas naturais e produtivos. Em animais domésticos e silvestres, o estresse térmico pode causar redução da atividade metabólica, queda de desempenho, alterações comportamentais e risco de mortalidade em eventos extremos. Na agricultura, temperaturas elevadas combinadas com alta umidade provocam estresse hídrico, abortamento floral, perda de biomassa e diminuição da produtividade agrícola em culturas sensíveis ao calor, conforme documentado por estudos de fisiologia vegetal (LOBELL et al., 2013). Ecossistemas costeiros e ambientes urbanos densamente construídos experimentam ainda intensificação local de calor devido à baixa ventilação e à alta capacidade de armazenamento térmico das superfícies urbanas, amplificando valores de IC em bairros específicos.

Embora índices biometeorológicos mais complexos, como o PET (*Physiological Equivalent Temperature*) e o UTCI (*Universal Thermal Climate Index*), sejam amplamente utilizados na literatura para avaliação do conforto térmico humano, sua aplicação empírica demanda um conjunto mais amplo de variáveis meteorológicas, incluindo velocidade do vento, radiação solar, características metabólicas e parâmetros de vestimenta, nem sempre disponíveis de forma contínua e padronizada em estações meteorológicas operacionais de uso rotineiro.

No contexto deste estudo, realizado em ambiente tropical úmido costeiro, o Índice de Calor (IC) mostrou-se metodologicamente mais adequado, por utilizar exclusivamente temperatura do ar e umidade relativa, variáveis amplamente monitoradas e diretamente associadas aos mecanismos fisiológicos de dissipação de calor em condições de elevada umidade. Estudos comparativos indicam que, em climas quentes e úmidos, o IC apresenta desempenho equivalente ou superior a índices mais complexos na identificação de condições críticas de estresse térmico, especialmente quando o objetivo é a comunicação de risco e a aplicação operacional em saúde pública e planejamento urbano (STEADMAN, 1979; ANDERSON; BELL, 2011; RAYMOND; MATTHEWS; HORTON, 2020).

O Índice de Calor apresenta vantagens operacionais importantes para estudos aplicados. O IC possui cálculo simples, ampla disponibilidade de dados de entrada e uso consolidado por serviços meteorológicos, o que favorece sua aplicação em análises rápidas e em sistemas de alerta à população (ROTHFUSZ, 1990; NWS, 2021). Além disso, como a eficiência da evaporação do suor diminui drasticamente em ambientes úmidos, a combinação entre temperatura e umidade relativa exerce papel central na percepção térmica humana, tornando o IC particularmente informativo em regiões tropicais úmidas, onde a sensação térmica frequentemente se eleva devido à limitação do resfriamento evaporativo (STEADMAN, 1979; ANDERSON; BELL, 2011).

Por sua robustez metodológica, relevância fisiológica, capacidade de resposta às condições características do clima litorâneo e ampla validação científica, o Índice de Calor foi adotado como indicador central deste estudo. Sua aplicação permite caracterizar o desconforto térmico de forma sensível às particularidades microclimáticas dos bairros de Macaé e oferece suporte técnico para análises integradas entre clima e demanda energética em edificações públicas, contribuindo para o entendimento das implicações do calor úmido em contextos urbanos tropicais.

Dessa forma, a adoção do IC neste trabalho prioriza a consistência operacional, a replicabilidade e a aplicabilidade prática dos resultados, especialmente em contextos de monitoramento climático urbano, avaliação de risco térmico e análise integrada com o consumo energético, sem prejuízo conceitual frente a outros índices biometeorológicos consolidados na literatura.

2.8. Estresse Térmico e Consumo de Energia

O estresse térmico exerce influência direta sobre o consumo de energia elétrica, sobretudo em áreas urbanas onde a densidade populacional e a concentração de edificações aumentam a necessidade de climatização artificial. Em períodos de calor intenso, observa-se crescimento expressivo no uso de sistemas de ar condicionado e ventilação mecânica, o que resulta em maior demanda energética e, em muitos casos, pressões adicionais sobre a infraestrutura elétrica (SEPPÄNEN; FISK; LEI, 2006).

Estudos internacionais demonstram que elevações no Índice de Calor (IC) e na temperatura média diária estão associadas a sobrecarga nas redes de distribuição,

elevação dos custos operacionais e maior probabilidade de falhas no fornecimento. Em análises conduzidas em diferentes países, aumentos de IC foram acompanhados por picos abruptos de demanda energética em centros urbanos, sugerindo forte relação entre desconforto térmico e consumo elétrico (MILLER et al., 2008). Resultados recentes obtidos no Brasil confirmam sinal de intensificação e indicam que variações térmicas modificam o desempenho energético em edificações públicas e privadas, reforçando a necessidade de planejamento integrado entre clima, eficiência energética e infraestrutura urbana (GOMES et al., 2024).

Neste estudo, a análise integrada do Índice de Calor (IC) e do consumo energético busca avaliar como as condições térmicas típicas de Macaé-RJ influenciam a demanda por climatização em edificações públicas. A abordagem adotada destaca o papel do IC como indicador de desconforto térmico e como ferramenta útil para subsidiar estratégias de adaptação climática, planejamento energético municipal e políticas públicas voltadas à redução de vulnerabilidades associadas ao calor em regiões tropicais úmidas.

Estudos recentes ressaltam que intervenções voltadas à mitigação do calor urbano podem ser avaliadas também sob a ótica econômica, considerando benefícios associados à redução de riscos à saúde, ao consumo energético e às perdas produtivas. Abordagens teóricas e empíricas indicam que políticas de adaptação térmica apresentam elevado potencial de retorno social, reforçando a relevância de ferramentas tecnológicas capazes de apoiar a tomada de decisão em contextos urbanos (SCHNEIDER; ZAWADZKI, 2025).

2.9. Mudanças Climáticas e Agenda 2030

A discussão sobre mudanças climáticas e seus impactos locais, incluindo o aumento do estresse térmico urbano, insere-se em um marco global de políticas públicas estabelecido pela Organização das Nações Unidas por meio da Agenda 2030. Essa agenda, lançada em 2015, define 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) como diretrizes para promover saúde, resiliência climática, eficiência energética e cidades mais sustentáveis (UNITED NATIONS, 2015). A inclusão deste tópico na revisão de literatura tem o objetivo de contextualizar como indicadores meteorológicos, como o Índice de Calor, se relacionam com metas internacionais de mitigação e adaptação.

Entre os ODS, aqueles mais diretamente associados ao tema deste estudo incluem o ODS 3 (Saúde e Bem-Estar), uma vez que o calor extremo representa risco crescente à saúde humana; o ODS 7 (Energia Acessível e Limpa), que envolve a avaliação da demanda energética decorrente do uso intensivo de climatização; o ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis), que orienta a adoção de medidas de adaptação urbana frente às intensificações térmicas; e o ODS 13 (Ação contra a Mudança Global do Clima), que trata de estratégias governamentais relacionadas à mitigação e adaptação às mudanças climáticas.

Dessa forma, o estudo do Índice de Calor em Macaé se alinha às metas internacionais propostas pela Agenda 2030 ao relacionar estresse térmico, vulnerabilidade urbana e consumo energético, demonstrando a relevância do tema além da esfera municipal (UNITED NATIONS, 2015, 2019).

De forma integrada, a literatura revisada demonstra que o estresse térmico constitui um fenômeno multifatorial, fortemente condicionado pela interação entre temperatura do ar e umidade relativa, com impactos diretos sobre a saúde humana, a produtividade, a dinâmica urbana e a demanda energética. Estudos internacionais e nacionais convergem ao indicar que índices biometeorológicos, em especial o Índice de Calor, oferecem uma representação mais realista da sensação térmica percebida pela população em regiões tropicais úmidas, superando a análise baseada exclusivamente na temperatura do ar.

No contexto brasileiro e, particularmente, em áreas costeiras como o Sudeste, observa-se intensificação recente e projetada das condições de desconforto térmico, com implicações relevantes para a saúde pública e o planejamento urbano. Apesar desse avanço, ainda são escassas análises territorializadas que integrem dados observacionais recentes, indicadores biometeorológicos e consumo energético em escala intraurbana. Nesse sentido, o presente estudo se insere como contribuição original ao articular o Índice de Calor, a variabilidade microclimática e a demanda energética em Macaé-RJ, oferecendo subsídios científicos para estratégias locais de adaptação ao calor em cenários atuais e futuros.

2.10. Síntese do capítulo

A revisão de literatura apresentada evidência que o estresse térmico constitui um fenômeno multifatorial, resultante da interação entre condições meteorológicas,

características fisiológicas humanas e fatores urbanos, com impactos relevantes sobre a saúde pública, a dinâmica urbana e a demanda energética, especialmente em regiões tropicais úmidas. Os estudos revisados demonstram que índices biometeorológicos, como o Índice de Calor, PET e UTCI, são ferramentas consolidadas para a avaliação do desconforto térmico, sendo o Índice de Calor particularmente adequado para contextos costeiros úmidos devido à sua sensibilidade à combinação entre temperatura do ar e umidade relativa.

A literatura também destaca a importância da análise em escala intraurbana, uma vez que diferenças microclimáticas entre bairros podem intensificar ou atenuar significativamente o estresse térmico experimentado pela população. Além disso, trabalhos recentes apontam que episódios de calor extremo estão associados a impactos indiretos sobre sistemas urbanos, como o aumento da demanda por climatização e a pressão sobre a infraestrutura energética, sobretudo em edificações públicas sensíveis.

À luz desse referencial teórico, o presente estudo se ancora na necessidade de integrar a análise observacional do estresse térmico em escala intraurbana com a avaliação de seus desdobramentos aplicados, em especial no consumo de energia elétrica. Dessa forma, os conceitos, métodos e evidências discutidos neste capítulo fundamentam os objetivos da pesquisa e orientam a metodologia adotada, voltada ao diagnóstico recente do Índice de Calor em bairros de Macaé-RJ e à investigação de sua relação com o consumo energético em edificações públicas.

3. METODOLOGIA

A metodologia adotada neste estudo integra procedimentos observacionais, estatísticos e prospectivos, estruturados de modo a responder aos objetivos propostos: quantificar o estresse térmico em Macaé-RJ a partir do Índice de Calor (IC), analisar sua relação com o consumo de energia elétrica em edificações públicas e projetar indício de aumento futuro com base em cenários climáticos. As escolhas metodológicas foram fundamentadas na literatura climatológica e biometeorológica, buscando rigor, reprodutibilidade e aderência ao contexto local.

3.1. Dados Observacionais

Os dados observacionais utilizados nesta pesquisa consistem em séries horárias de temperatura do ar e umidade relativa coletadas em quatro estações meteorológicas automáticas instaladas nos bairros Glória, Miramar, Mirante da Lagoa e Serra (Trapiche), no município de Macaé-RJ. As estações fazem parte do projeto de extensão Tempo de Aprender em Clima de Ensinar da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Foram selecionadas por apresentarem séries completas, contínuas e consistentes nos três verões analisados: 2022–2023, 2023–2024 e 2024–2025.

Cabe ressaltar que a seleção dos quatro bairros analisados não tem por objetivo representar integralmente o município de Macaé-RJ em termos espaciais. Os resultados obtidos referem-se a microambientes urbanos específicos, caracterizados por distintas configurações geográficas, urbanísticas e microclimáticas, e devem ser interpretados dentro desse recorte. Dessa forma, as análises realizadas não configuram uma caracterização climática homogênea de todo o município, mas um diagnóstico intraurbano focalizado, voltado à compreensão de contrastes microclimáticos e de suas implicações sobre o estresse térmico e o consumo de energia em contextos urbanos representativos.

O intervalo horário analisado corresponde ao período entre 12h e 18h, período apontado pela literatura como o de maior risco de estresse térmico. A Tabela 1 apresenta a identificação e localização das estações utilizadas, atendendo às observações das avaliadoras sobre a necessidade de clareza e especificação completa.

Tabela 1. Estação, bairro e localização das estações meteorológicas utilizadas.

Estação	Bairro	Latitude	Longitude	Elevação
IMACA 15	Glória	-22,401262	-41,801545	11,9 m
IMACA6	Miramar	-22,380214	-41,786546	7,9 m
IMACA7	Mirante da Lagoa	-22,407311	-41,846106	2,1 m
IMACA13	Serra (Trapiche)	-22,232374	-42,020324	36,9 m

Fonte: Elaboração própria (2025).

A Figura 2 a Figura 5 apresentam imagens de satélite das estações meteorológicas utilizadas no estudo, com ampliação do ponto de instalação dos sensores. As imagens permitem visualizar o contexto urbano e ambiental em que cada estação está inserida, evidenciando diferenças de ocupação urbana, proximidade com corpos d'água e variações de relevo que podem influenciar a variabilidade microclimática observada entre os bairros analisados.



Figura 2. Localização da estação meteorológica IMACA6, no bairro Miramar (Macaé-RJ), com detalhe ampliado do ponto de instalação do sensor.



Figura 3. Localização da estação meteorológica IMACA7, no bairro Mirante da Lagoa (Macaé-RJ), com detalhe ampliado do ponto de instalação do sensor.



Figura 4. Localização da estação meteorológica IMACA13, no bairro Serra (Trapiche), Macaé-RJ, com detalhe ampliado do ponto de instalação do sensor.



Figura 5. Localização da estação meteorológica IMACA15, no bairro Glória (Macaé-RJ), com detalhe ampliado do ponto de instalação do sensor.

As diferenças microclimáticas entre esses bairros influenciam a variação espacial do Índice de Calor. A distribuição das estações meteorológicas permite captar contrastes ambientais relevantes no município, associados a fatores como proximidade com o oceano Atlântico, presença de corpos d'água continentais, diferenças de altitude e grau de urbanização. Essas características ambientais podem influenciar o comportamento local da temperatura do ar e da umidade relativa, variáveis fundamentais utilizadas no cálculo do Índice de Calor.

Entre os bairros analisados, a Serra (Trapiche) apresenta menor influência marítima e maior elevação topográfica. Miramar localiza-se próximo ao oceano Atlântico, condição que favorece maior interação com o ambiente costeiro. Mirante da Lagoa encontra-se na proximidade da Lagoa de Imboassica, cuja presença pode contribuir para a modulação das condições térmicas locais. Já o bairro Glória caracteriza-se por maior densidade de ocupação urbana.

Durante a etapa de organização e preparação da base de dados meteorológicos, foi realizada uma verificação sistemática da presença de valores

ausentes ou inconsistentes nas séries horárias de temperatura do ar e umidade relativa. Os dados foram inicialmente submetidos a procedimentos de controle de qualidade, incluindo a identificação de lacunas temporais, registros nulos e valores fisicamente implausíveis.

Considerando o objetivo do estudo e a curta extensão da série temporal analisada, optou-se por não realizar interpolação ou preenchimento artificial de dados ausentes, de modo a evitar a introdução de viés estatístico ou distorções nos valores extremos, particularmente relevantes para a análise do estresse térmico. Assim, registros horários com dados ausentes foram excluídos das análises, preservando apenas observações completas de temperatura e umidade relativa.

A seleção final das quatro estações meteorológicas utilizadas neste trabalho (Miramar, Glória, Mirante da Lagoa e Serra – Trapiche) considerou justamente a consistência e a completude dos registros ao longo dos três verões analisados, garantindo que a exclusão pontual de dados ausentes não comprometesse a representatividade temporal das séries nem a robustez das análises descritivas e estatísticas realizadas.

3.2. Dados Consumo de Energia

As faturas de energia elétrica foram fornecidas pela Prefeitura de Macaé e correspondem a edificações públicas dos setores de Educação e Saúde. Os registros incluem consumo mensal em kWh, valor faturado, número de dias medidos e identificação das unidades consumidoras.

Para permitir comparações adequadas, os valores mensais foram convertidos em consumo médio diário. Foram utilizadas as séries correspondentes aos mesmos verões da etapa observacional. O edifício do setor Educação está localizado no bairro Glória, enquanto o prédio do Hospital Público Municipal, no bairro Virgem Santa, foi analisado utilizando o IC do bairro Miramar como referência, devido à proximidade geográfica.

3.3. Dados de Projeção Climáticas

As projeções climáticas foram obtidas a partir do modelo regional ETA, desenvolvido pelo INPE, acoplado ao modelo global MIROC5. Foram considerados

os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5. As simulações possuem resolução espacial aproximada de 20 km e abrangem 2006 a 2099.

Avaliadoras solicitaram a inclusão explícita das especificações técnicas dos modelos. Assim, este estudo considera:

- Modelo regional ETA com resolução de 20 km;
- Forçamento do modelo global MIROC5 (CMIP5);
- Saída diária;
- Correção de viés realizada pelo próprio INPE;
- Variáveis utilizadas: temperatura média do ar e umidade relativa.

As projeções foram utilizadas exclusivamente para calcular Índices de Calor futuros, com o objetivo de contextualizar indício de aumento, sem constituir escopo principal da pesquisa.

3.4. Etapa Observacional do Índice de Calor

Os dados horários passaram por procedimentos de limpeza, padronização e organização em ambiente Python, utilizando bibliotecas como pandas e numpy. As análises consideraram:

- temperatura do ar;
- umidade relativa;
- Índice de Calor em °C.

Foram calculadas médias e máximas sazonais para cada verão, com foco na avaliação de episódios de estresse térmico e sua relevância para saúde humana e demanda energética.

3.5. Cálculo do Índice de Calor

O Índice de Calor (IC) foi calculado por meio da equação empírica padronizada pela National Weather Service, originalmente proposta por Rothfus (1990). A equação relaciona a temperatura do ar expressa em °F e a umidade relativa do ar (%), sendo amplamente utilizada para estimar a sensação térmica percebida pelo corpo humano em condições de calor e elevada umidade.

Para a aplicação da fórmula, as temperaturas observadas em °C foram inicialmente convertidas para °F, conforme exigido pela formulação original. Após o cálculo do índice de calor, os valores obtidos foram reconvertidos para °C, de modo a manter a padronização das análises e a consistência com os dados observacionais utilizados neste estudo, conforme procedimento operacional recomendado pela National Weather Service (ROTHFUSZ, 1990; NWS, 2021). Conforme a equação (1) expressa a seguir:

$$\begin{aligned}
 HI = & -42,379 + 2,04901523*T + 10,14333127*RH - & (1) \\
 & 0,22475541*T*RH - 0,00683783*T*T - 0,05481717*RH*RH + \\
 & 0,00122874*T*T*RH + 0,00085282*T*RH*RH - \\
 & 0,00000199*T*T*RH*RH
 \end{aligned}$$

Onde:

- HI é índice de calor.
- T é a temperatura do bulbo seco em °F.
- RH é a umidade relativa em porcentagem (%).

3.6. Classificação do Estresse Térmico

O Índice de Calor (IC) foi calculado a partir das variáveis de temperatura do ar (°C) e umidade relativa (%), registradas no intervalo crítico entre 12h e 18h durante os verões de 2022–2023, 2023–2024 e 2024–2025. O cálculo seguiu a equação empírica originalmente proposta por Rothfus (1990) e posteriormente padronizada operacionalmente pela *National Weather Service*, vinculada à *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), permitindo estimar a sensação térmica resultante da interação entre temperatura elevada e alta umidade relativa do ar.

A Figura 6 apresenta a tabela de referência da NOAA, amplamente utilizada para a classificação dos níveis de estresse térmico associados ao Índice de Calor. Essa tabela estabelece a relação entre temperatura do ar e umidade relativa e consolidou-se como referência operacional internacional para a interpretação do IC em cenários de calor úmido, especialmente em regiões tropicais e subtropicais.



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	Efeitos sobre a saúde
27-32	CUIDADO	Possível fadiga com exposição prolongada e/ou atividade física.
32-41	CUIDADO EXTREMO	Possibilidade de insolação, câibras musculares ou exaustão pelo calor com exposição prolongada e/ou atividade física.
41-54	PERIGO	Câibras musculares ou exaustão pelo calor são prováveis, insolação e dor de cabeça possíveis com exposição prolongada e/ou atividade física.
Acima 54	PERIGO EXTREMO	Insolação altamente provável e risco de desidratação grave com exposição prolongada e/ou atividade física.

Fonte: Tabela elaborada pelo National Weather Service (NWS, 2014). Tradução e adaptação por Luciana S. C. Teixeira (Mestranda em Clima e Energia - UENF).

Figura 6. Tabela do índice de calor NOAA.

A classificação do estresse térmico utilizada neste estudo segue as quatro categorias definidas pela NOAA, que orientam a interpretação dos valores de IC calculados:

- Cuidado (27–32°C)
- Cuidado Extremo (32–41°C)
- Perigo (41-54°C)
- Perigo Extremo (>54°C)

3.7. Análises Descritivas e Estatísticas

Para complementar a análise descritiva dos dados meteorológicos, foram aplicados procedimentos estatísticos com o objetivo de avaliar a consistência dos padrões observados nas séries temporais analisadas. Inicialmente, calcularam-se as médias sazonais (novembro a março) das variáveis temperatura média do ar (°C),

umidade relativa (%) e Índice de Calor (IC, °C), considerando a faixa horária de maior estresse térmico (12h às 18h) nos bairros de Miramar, Glória, Mirante da Lagoa e Serra (Trapiche). Essas médias permitiram caracterizar o comportamento geral das condições atmosféricas durante os três verões consecutivos analisados (2023, 2024 e 2025).

Adicionalmente, com o intuito de captar episódios de calor extremo, também foram calculadas as temperaturas máximas sazonais em cada bairro, no mesmo intervalo temporal. A análise de valores máximos é amplamente reconhecida na literatura climatológica como fundamental para a avaliação do estresse térmico, uma vez que extremos de calor estão diretamente associados a riscos à saúde humana e ao aumento da demanda por climatização e consumo energético.

A avaliação de possíveis padrões monotônicos foi realizada por meio do teste não paramétrico de *Mann-Kendall* (MANN, 1945; KENDALL, 1975), amplamente utilizado em estudos climatológicos por não exigir pressupostos de normalidade e por sua aplicação consolidada em análises de séries ambientais. O teste avalia a hipótese nula de ausência de tendência monotônica contra a hipótese alternativa de tendência crescente ou decrescente.

Evidencia-se, contudo, que o recorte temporal analisado neste estudo compreende apenas três valores sazonais consecutivos (verões de 2023, 2024 e 2025), o que confere caráter exploratório aos resultados dos testes estatísticos e reduz significativamente o poder de detecção de tendências robustas. Nesse contexto, a aplicação do teste de *Mann-Kendall* possui caráter estritamente exploratório, sendo utilizada para verificar a coerência estatística dos sinais identificados nas análises descritivas, não configurando evidência conclusiva de tendência climática de longo prazo ou detecção formal de mudança climática.

A magnitude dos sinais monotônicos, quando presentes, foi estimada por meio do estimador de Sen (SEN, 1968), que calcula a mediana das inclinações entre todos os pares de pontos ordenados cronologicamente na série temporal, permitindo quantificar a taxa média de variação das variáveis analisadas. Foram adotados níveis de significância de 1% ($p < 0,01$), 5% ($p < 0,05$) e 10% ($p < 0,10$), com o objetivo de indicar tanto associações estatísticas mais robustas quanto sinais consistentes em níveis menos restritivos, sempre interpretados à luz das limitações amostrais do estudo.

O processamento e a análise estatística foram realizados em ambiente de programação Python (versão 3.12), utilizando-se o pacote *pandas* (MCKINNEY, 2010) para manipulação dos dados e a biblioteca *pymannkendall* (HUSSAIN; MAHMUD, 2019) para a aplicação do teste de *Mann-Kendall* e do estimador de Sen.

3.8. Integração entre Índice de Calor e Consumo Energético

Para investigar a relação entre o estresse térmico e o consumo de energia elétrica em Macaé-RJ, foram integrados dados meteorológicos e registros de consumo energético de edificações públicas. O foco recaiu sobre dois setores estratégicos:

- Educação (bairro Glória): consumo do complexo universitário municipal, comparado diretamente com o Índice de Calor (IC) calculado para o mesmo bairro.
- Saúde (HPM – Hospital Público Municipal de Macaé, bairro Virgem Santa): consumo hospitalar comparado com o IC do bairro Miramar, utilizado como proxy devido à proximidade geográfica, já que não há estação meteorológica instalada na Virgem Santa.

O consumo de energia elétrica foi obtido em valores mensais (kWh) e convertido para médias diárias (kWh/dia), de modo a padronizar comparações entre períodos de diferentes durações. Para a metodologia sazonal, adotou-se como referência estudo que analisou o consumo elétrico de um edifício acadêmico em função das estações do ano, demonstrando maior demanda nos meses mais quentes (SHARMA; KUMAR, 2017).

Para fins analíticos, o ano foi dividido em dois blocos sazonais:

- Verão (novembro a março): período correspondente ao cálculo do IC.
- Não-Verão (abril a outubro): meses de menor ocorrência de calor extremo.

A análise foi restrita aos verões de 2023 (nov/2022–mar/2023) e 2024 (nov/2023–mar/2024), por serem os únicos anos com séries completas de dados tanto de consumo energético quanto de IC. O verão de 2025 foi desconsiderado devido à ausência de registros completos de consumo no Não-Verão e à indisponibilidade dos valores do IC para os primeiros meses desse verão.

O Índice de Calor (IC) foi calculado pela equação empírica da NOAA, considerando médias horárias de temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$) e umidade relativa (%) entre 12h e 18h. Adotou-se o IC Máximo Absoluto como variável comparativa, por representar de forma mais fiel as situações críticas de estresse térmico com impacto potencial no uso de climatização.

A integração entre consumo e IC foi realizada em duas etapas principais:

1. Cálculo da Razão Verão/Não-Verão (V/NV) – para cada ano, obteve-se a razão entre o consumo médio diário no Verão e no Não-Verão. Esse indicador padroniza a comparação e permite identificar se o consumo energético espera que se intensifique ou se reduza nos meses de maior estresse térmico em relação ao restante do ano. Valores > 1 indicam maior consumo no Verão; valores < 1 , maior consumo no Não-Verão.
2. Relação observada visual com IC – os consumos médios de Verão e Não-Verão foram representados em gráficos de barras, enquanto o IC máximo absoluto foi sobreposto em linha, permitindo observar a correspondência entre variações sazonais de consumo e extremos de calor.

Essa abordagem evidencia diferenças de sensibilidade entre os setores analisados: no setor Educação, o consumo elétrico é influenciado tanto pelo calendário acadêmico quanto pelas condições térmicas, enquanto no setor Saúde a resposta é mais diretamente ligada às variações climáticas. Esse comportamento é consistente com estudos brasileiros recentes, que identificaram correlações entre variáveis meteorológicas (temperatura máxima, umidade relativa) e a demanda elétrica em subestações de diferentes regiões do país (GOMES et al., 2024).

A análise da relação entre o Índice de Calor e o consumo de energia elétrica desenvolvida neste estudo possui caráter descritivo e exploratório. Não foram incorporadas variáveis operacionais adicionais, tais como taxa de ocupação das edificações, perfil de uso dos ambientes, eficiência dos sistemas de climatização, estratégias de gestão predial ou alterações operacionais ao longo do período analisado. Dessa forma, os resultados não permitem estabelecer inferência causal direta entre o aumento do estresse térmico e o consumo de energia elétrica, devendo ser interpretados como associações observacionais entre períodos de maior desconforto térmico e variações na demanda por climatização.

Adicionalmente, ressalta-se que a análise energética foi conduzida a partir de uma edificação representativa por setor, educação e saúde, o que impõe limitações à generalização dos resultados para o conjunto das edificações públicas do município de Macaé-RJ. Assim, os padrões observados refletem o comportamento energético específico das unidades analisadas e de seus respectivos contextos operacionais, configurando um diagnóstico pontual e setorial, sem pretensão de extrapolação para todo o parque edificado municipal.

3.9. Etapa com Projeções Climáticas Futuras

Com o objetivo de avaliar possíveis indícios de aumento futuro do estresse térmico no município de Macaé-RJ, foram utilizadas projeções climáticas obtidas a partir do modelo regional ETA acoplado ao modelo global MIROC5. Os dados passaram por *downscaling* dinâmico e correção de viés (MARAUN et al., 2013), assegurando maior representatividade local.

A análise foi conduzida considerando dois cenários de emissões definidos pelo Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2014):

- RCP 4.5 – mitigação moderada.
- RCP 8.5 – altas emissões.

Os períodos analisados foram organizados em três recortes temporais:

- Futuro 1 (2021–2040);
- Futuro 2 (2041–2070);
- Futuro 3 (2071–2099).

Foram extraídos os percentis 10 (P10), 50 (P50) e 90 (P90) das variáveis temperatura do ar (°C) e umidade relativa (%), restritos aos meses de verão (dezembro, janeiro e fevereiro). O P10 representa anos menos extremos, o P50 anos típicos e o P90 anos críticos.

Com base nesses valores, calculou-se o Índice de Calor (IC) utilizando a equação empírica originalmente proposta por Rothfus (1990) e padronizada operacionalmente pela *National Weather Service*, com conversão prévia das temperaturas de °C para °F, conforme exigido pela formulação original, e reconversão posterior para °C (ROTHFUSZ, 1990; NWS, 2021). As análises compreenderam:

1. Tabelas de percentis (P10, P50 e P90) de temperatura e umidade por cenário e período.
2. Gráficos evolutivos do IC para os percentis P50 e P90, permitindo identificar aumento no estresse térmico ao longo do século.
3. Frequência de dias com IC > 50 °C por década, considerando P50 e P90, no cenário RCP 8.5, para estimar a ocorrência de episódios classificados como “Perigo Extremo” pela NOAA.
4. Relação entre UR e IC (P50), explorando a contribuição relativa da umidade na intensificação do desconforto térmico futuro.

Esse conjunto metodológico permitiu avaliar de forma comparativa as diferenças entre os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, apresentando resultados de forma tangencial, dado que os dados disponíveis correspondem a médias diárias e percentis sazonais, e não a séries horárias completas.

3.10. Implicações para Políticas Públicas e Planejamento Urbano

A construção deste item baseou-se na integração de três eixos de análise complementares. Em primeiro lugar, foram considerados os resultados locais de Macaé-RJ, obtidos a partir da análise estatística do Índice de Calor (IC) e do consumo energético em escolas e hospitais públicos entre 2022 e 2025, permitindo identificar padrões de pressão térmica e de demanda elétrica.

Em segundo lugar, foram incorporadas evidências epidemiológicas provenientes de estudos conduzidos no estado do Rio de Janeiro, que demonstraram associação significativa entre calor extremo e mortalidade por doenças cardiorrespiratórias. Esses trabalhos utilizaram tanto análises tradicionais quanto modelos estatísticos avançados, como os *Distributed Lag Non-Linear Models* (DLNM), confirmando a robustez da relação entre calor extremo e saúde pública (ILVEIRA et al., 2023; PROSDOCIMI; KLIMA, 2020; MORAIS et al., 2025).

Evidências adicionais oriundas de eventos recentes reforçam a associação entre calor extremo e impactos adversos à saúde no estado do Rio de Janeiro. Durante episódios de temperaturas excepcionalmente elevadas registrados em novembro de 2023, observou-se excesso de mortalidade, especialmente em áreas urbanas densamente povoadas, evidenciando a elevada vulnerabilidade da

população a eventos térmicos persistentes e intensos (FERNÁNDEZ MEDINA et al., 2024).

Por fim, adotou-se como referência comparativa a experiência internacional de Cascais, Portugal, documentada no Plano de Ação para a Adaptação às Alterações Climáticas (PA3C2) e no projeto europeu LIFE CLIVUT. Esses relatórios oficiais apresentam indicadores sobre captura de carbono, retenção de partículas e mitigação de ilhas de calor por meio da arborização urbana, além da integração de sistemas de alerta e protocolos de saúde pública.

A articulação entre esses três conjuntos de evidências foi sistematizada por meio de uma tabela-síntese, relacionando os achados epidemiológicos do Rio de Janeiro com os resultados climáticos e energéticos de Macaé. Essa síntese foi complementada por uma análise narrativa das vulnerabilidades locais e das recomendações de adaptação urbana.

Com isso, o Índice de Calor (IC) foi tratado não apenas como uma variável climática, mas como um indicador estratégico de risco para a saúde coletiva, para a eficiência energética e para o planejamento urbano, fornecendo uma base científica sólida para subsidiar a formulação de políticas públicas locais.

A partir da metodologia descrita, que integrou a análise observacional das variáveis meteorológicas, o cálculo do Índice de Calor e a avaliação do consumo de energia elétrica em edificações públicas, tornou-se possível estabelecer uma abordagem articulada entre clima, estresse térmico e demanda energética no município de Macaé-RJ. Essa integração metodológica permite avaliar não apenas a variação interanual recente e futuro, mas também seus desdobramentos diretos sobre setores sensíveis ao calor extremo, como saúde e energia. No capítulo seguinte, são apresentados e discutidos os resultados obtidos, evidenciando como a intensificação do estresse térmico se reflete tanto nos indicadores biometeorológicos quanto nos padrões de consumo energético, reforçando a interdependência entre variabilidade climática, conforto térmico e sustentabilidade urbana.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados observacionais apresentados neste capítulo devem ser interpretados como um diagnóstico climático recente, restrito ao período analisado e aos microambientes específicos representados pelos bairros avaliados. Os valores elevados do Índice de Calor (IC) observados são coerentes com a climatologia regional de um ambiente tropical úmido costeiro e compatíveis com evidências reportadas na literatura para localidades com elevada umidade relativa e urbanização intensa. No entanto, os padrões aqui descritos representam variabilidade interanual recente e não constituem, por si só, evidência formal de tendência climática de longo prazo, nem detecção de mudança climática.

4.1. Análise Estatística de Temperatura do Ar e Umidade Relativa

A análise estatística inicial dos dados horários de temperatura do ar (°C) e umidade relativa (%), registrados entre 12h e 18h durante os verões de 2022–2023, 2023–2024 e 2024–2025, permite compreender a base climática sobre a qual se desenvolvem as condições de estresse térmico em Macaé-RJ.

A Tabela 2 apresenta os valores médios de temperatura e umidade relativa para cada bairro e verão analisado. Observa-se aumento da temperatura média ao longo dos três verões consecutivos e, em sentido oposto, redução discreta dos valores médios de umidade relativa, ainda assim superiores a 66% em todos os bairros.

Tabela 2. Temperatura média e umidade relativa média por bairro e verão (12h-18h).

Bairro	Verão 2022–2023	Verão 2023–2024	Verão 2024–2025
Miramar	30,1 °C / 70%	30,6 °C / 68%	30,9 °C / 66%
Glória	30,3 °C / 72%	30,8 °C / 70%	31,0 °C / 68%
Mirante da Lagoa	31,0 °C / 75%	31,7 °C / 73%	32,3 °C / 70%
Serra (Trapiche)	31,4 °C / 78%	32,0 °C / 76%	32,8 °C / 74%

Fonte: Elaboração própria (2025).

A Figura 7 apresenta a evolução da temperatura média por bairro nos três verões consecutivos. É possível ver aumento das médias de temperatura entre os verões analisados em todas as localidades avaliadas, com diferenças entre bairros compatíveis com seus contextos microclimáticos. O bairro Serra (Trapiche) registrou os valores mais elevados, alcançando 32,8 °C em 2024–2025, seguido por Mirante da

Lagoa com 32,3 °C. Glória e Miramar apresentaram médias ligeiramente inferiores, mas também crescentes ao longo do período.

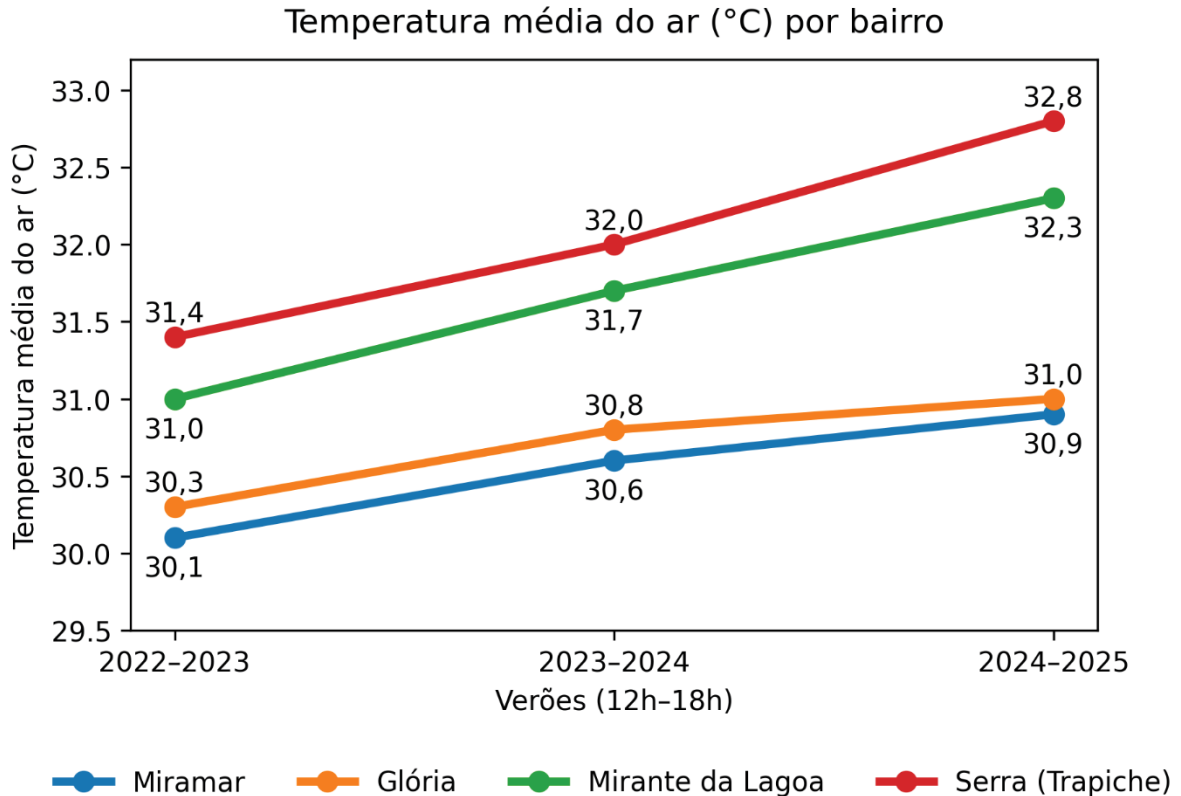


Figura 7. Temperatura média do ar (°C) por bairro nos três verões, considerando o período entre 12h e 18h.

O padrão de aumento das temperaturas médias ao longo dos verões é consistente com a maior recorrência de dias quentes no período analisado. As diferenças entre bairros sugerem influência de microcondicionantes locais, como maior densidade construtiva, menor sombreamento e menor ventilação em determinadas áreas, o que favorece maior armazenamento de calor e elevação das temperaturas no período mais crítico do dia.

A Figura 8 apresenta os valores médios de umidade relativa nos mesmos períodos. Apesar de queda leve ao longo dos três verões, os valores permaneceram sempre acima de 66% em todos os bairros, caracterizando umidade elevada mesmo em condições de calor intenso. Os maiores percentuais foram registrados no bairro Serra (Trapiche), variando de 78% em 2022–2023 para 74% em 2024–2025.

Umidade relativa média (%) por bairro nos três verões (12h–18h)

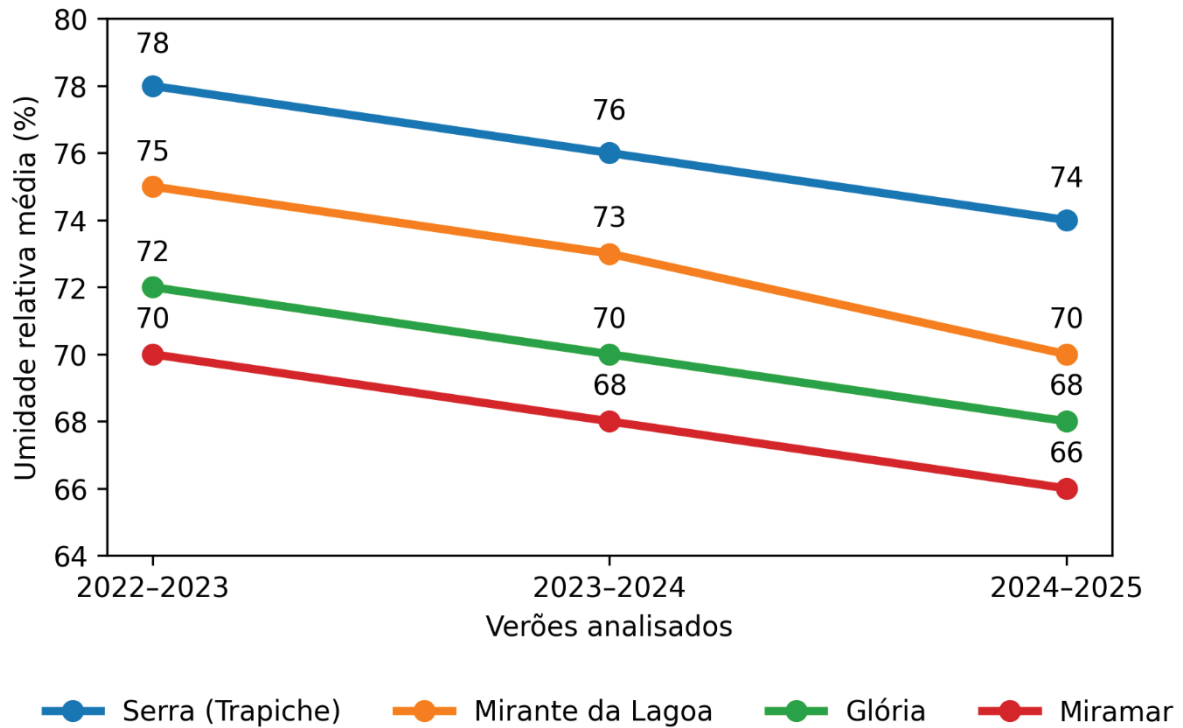


Figura 8. Umidade relativa média (%) por bairro nos três verões (12h–18h).

Apesar da redução discreta da umidade relativa média ao longo dos verões, os valores permanecem elevados, o que mantém condições típicas de calor úmido. Em termos biometeorológicos, essa persistência de umidade elevada é relevante porque reduz a eficiência do resfriamento evaporativo, contribuindo para a manutenção do desconforto térmico mesmo quando a umidade apresenta queda moderada.

A Figura 9 mostra a relação entre os valores médios de temperatura do ar e umidade relativa. Percebe-se um aumento das médias de temperatura entre os verões analisados em todas as localidades avaliadas, com diferenças entre bairros compatíveis com seus contextos microclimáticos. Esse comportamento foi consistente nos três verões analisados, refletindo a persistência de condições favoráveis ao estresse térmico: mesmo quando a umidade relativa diminui ligeiramente, permanece em níveis suficientemente altos para potencializar o desconforto térmico.

Relação entre temperatura média do ar e umidade relativa por bairro

Figura 9a - Verão 2022-2023

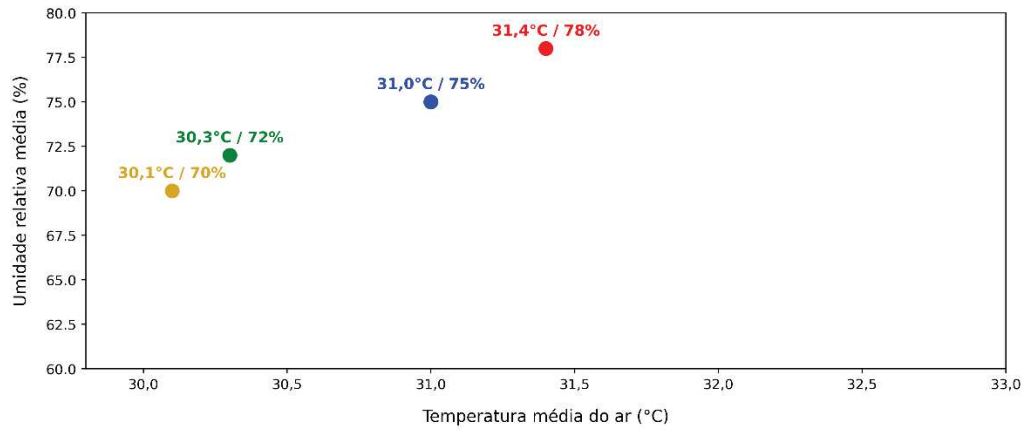


Figura 9b - Verão 2023-2024

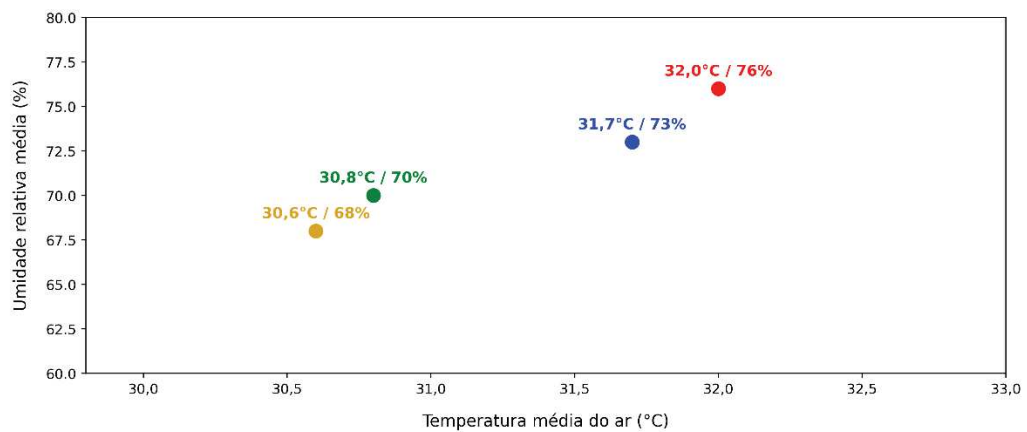
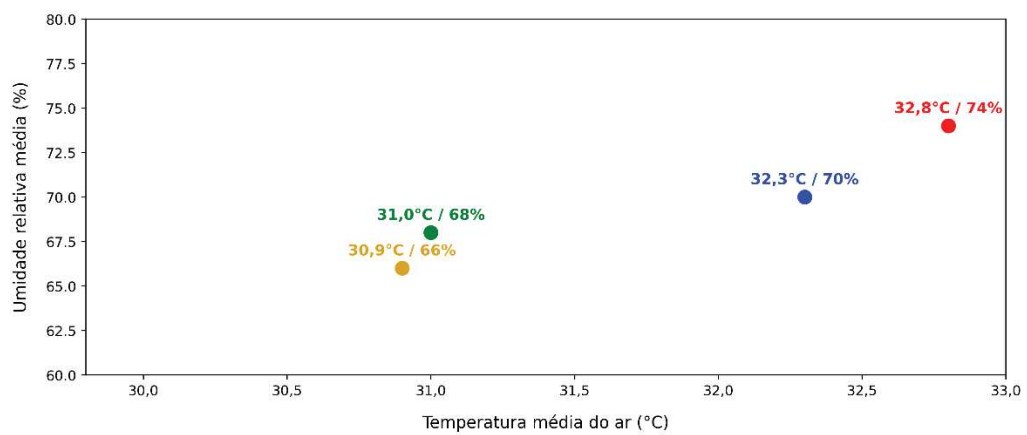


Figura 9c - Verão 2024-2025



● Serra (Trapiche) ● Mirante da Lagoa ● Glória ● Miramar

Figura 9. Relação entre temperatura média (°C) e umidade relativa (%) para os três verões.

Do ponto de vista físico, o aumento das temperaturas médias observado entre os verões analisados, mesmo acompanhado por leve redução da umidade relativa, não implica alívio do desconforto térmico. Em ambientes tropicais úmidos, valores de umidade ainda elevados, superiores a aproximadamente 65%, são suficientes para limitar a dissipação de calor corporal por evaporação. Assim, a combinação entre temperaturas crescentes e umidade persistentemente alta estabelece condições favoráveis à intensificação do estresse térmico, especialmente em áreas urbanas com ventilação reduzida e elevada densidade construtiva. Esses achados configuram a base climática para os cálculos do Índice de Calor (IC), discutidos no item a seguir.

4.2. Cálculo do Índice de Calor e Classificação do Estresse Térmico

O Índice de Calor (IC) foi calculado conforme metodologia apresentada no Capítulo 3, utilizando dados horários de temperatura do ar e umidade relativa entre 12h e 18h. A aplicação da classificação NOAA permitiu identificar a distribuição das horas de exposição ao estresse térmico nas categorias Cuidado, Cuidado Extremo, Perigo e Perigo Extremo ao longo dos três verões analisados.

A Tabela 3 apresenta o total de horas em cada categoria, considerando o período crítico entre 12h e 18h.

Tabela 3. Horas de exposição ao estresse térmico por categoria.

Verão	Cuidado (27-32°C)	Cuidado Extremo (32-41°C)	Perigo (41-54°C)	Total de Horas
2022-2023	105	94	12	211
2023-2024	86	117	21	224
2024-2025	65	141	28	234

Fonte: Elaboração própria (2025).

Os resultados mostram redução contínua das horas na categoria Cuidado e aumento consistente nas categorias mais severas. As horas classificadas como Perigo praticamente dobraram entre 2022–2023 e 2024–2025, indicando deslocamento do conjunto de horas para categorias mais severas no período analisado.

A Figura 10 apresenta a evolução percentual das categorias em cada verão, evidenciando a migração gradual das condições menos severas para as categorias Cuidado Extremo e Perigo.

Evolução percentual das categorias de estresse térmico (NOAA) por verão

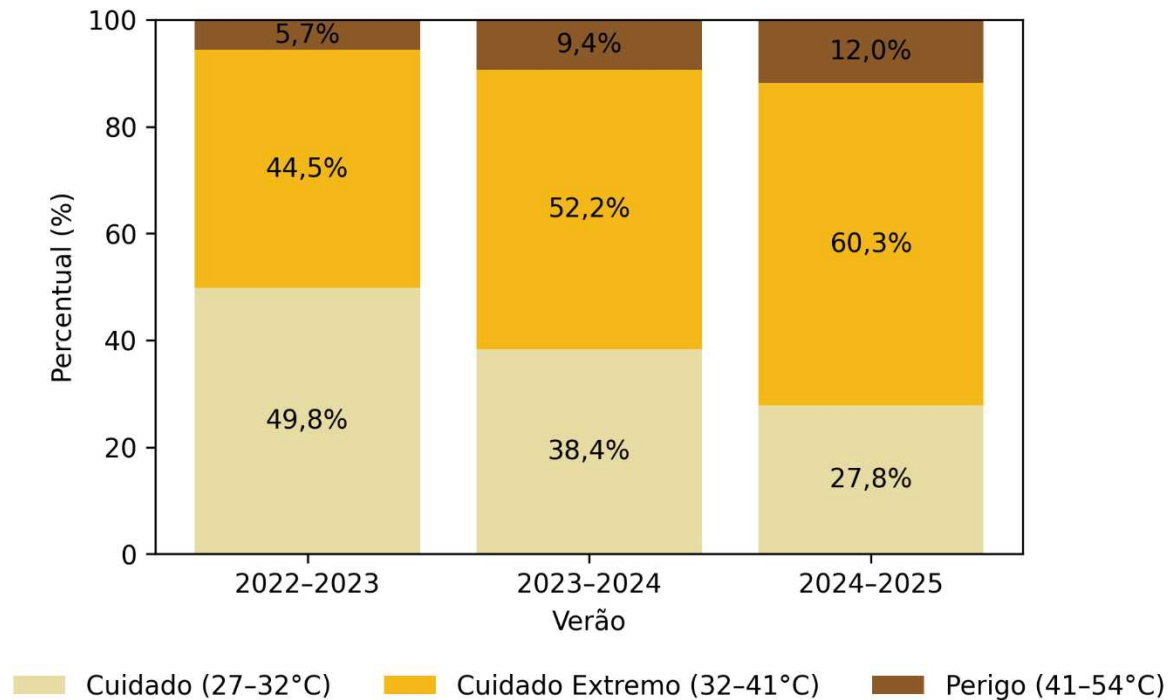


Figura 10. Distribuição percentual das categorias de estresse térmico segundo a classificação da NOAA, para os três verões.

O deslocamento percentual das horas para categorias mais severas indica que, no período analisado, aumentou a frequência de combinações atmosféricas capazes de elevar o Índice de Calor para faixas críticas. Esse comportamento é compatível com ambientes tropicais úmidos, nos quais a manutenção de umidade elevada intensifica a sensação térmica, fazendo com que pequenas elevações de temperatura resultem em aumentos desproporcionais do IC.

Figura 11 detalha a distribuição das categorias por bairro e verão, permitindo identificar as localidades com maior número de horas em condição crítica. Observa-se que:

- Serra (Trapiche) apresentou o maior número de horas em Perigo, totalizando 12h no verão de 2024–2025.
- Mirante da Lagoa também mostrou aumento expressivo em Perigo, passando de 4h em 2022–2023 para 8h em 2024–2025.
- Glória concentrou o maior número de horas em Cuidado Extremo (35h em 2024–2025).

- Miramar apresentou valores mais baixos, mas ainda com aumento em Cuidado Extremo ao longo da série.

Distribuição das categorias de estresse térmico (NOAA) por bairro e verão

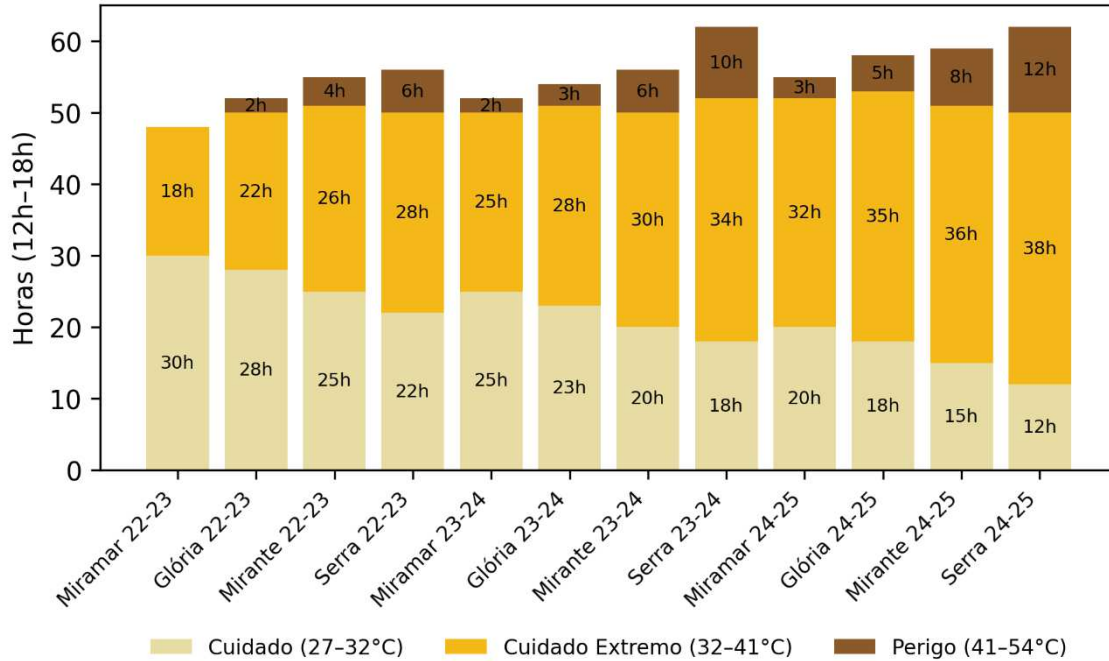


Figura 11. Distribuição das categorias de estresse térmico segundo a classificação da NOAA, para os três verões.

A migração progressiva das horas das categorias de menor severidade para as categorias de “Cuidado Extremo” e “Perigo” reflete a amplificação da sensação térmica resultante da interação entre temperatura elevada e umidade relativa persistente. Em climas tropicais úmidos, incrementos relativamente modestos na temperatura do ar podem produzir aumentos expressivos no Índice de Calor quando a umidade se mantém elevada, explicando a intensificação das condições críticas observada ao longo dos verões analisados.

A análise dos dados horários de Índice de Calor, calculados a partir das variáveis de temperatura e umidade relativa entre 12h e 18h, revelou que o pico do estresse térmico ocorre, de modo recorrente, no intervalo entre 13h e 15h, nos três verões e em todos os bairros avaliados. Esse comportamento está relacionado à combinação do aquecimento máximo do dia com níveis ainda elevados de umidade relativa nesse período, intensificando a sensação térmica percebida pela população.

Como o IC incorpora ambas as variáveis (temperatura e umidade), o valor atinge seu ápice no início da tarde, quando a radiação solar atinge níveis máximos e o ar ainda não se encontra suficientemente seco para atenuar a sensação de calor. Abaixo, o gráfico (Figura 12) apresenta os valores médios de IC por hora do dia, para cada verão analisado, consolidando a faixa horária mais vulnerável da população ao estresse térmico.

Diferença média entre IC e Temperatura do Ar por hora do dia (12h-18h)

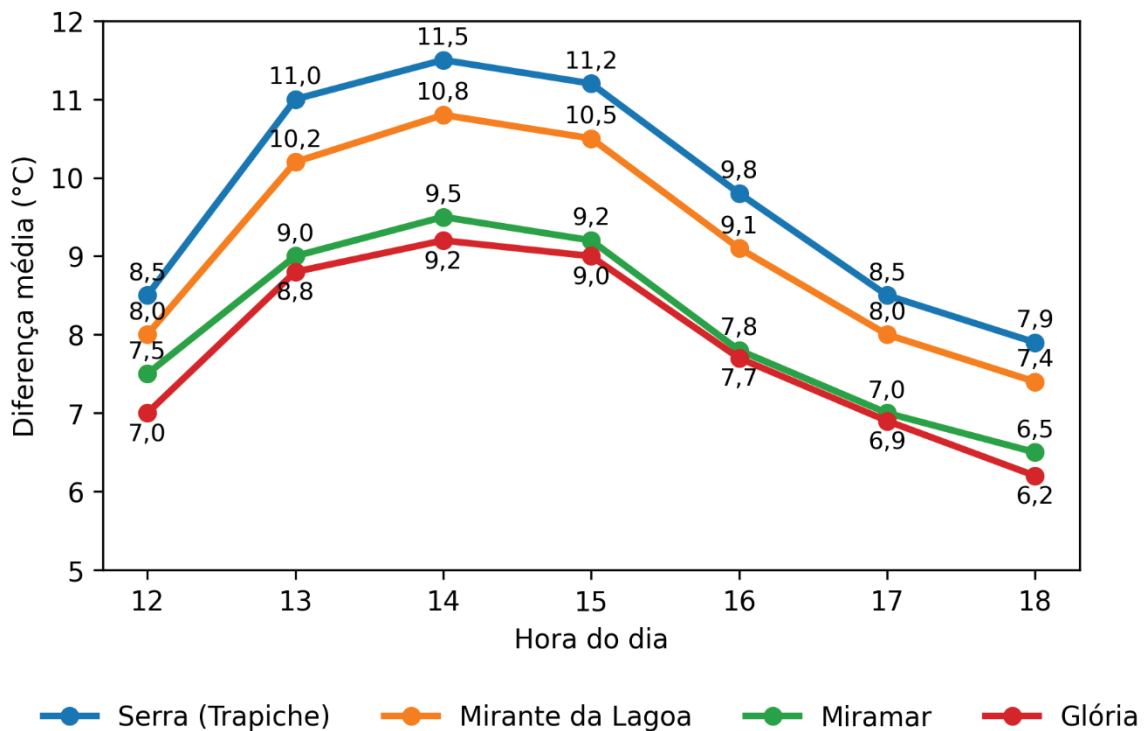


Figura 12. Índice de Calor médio por hora do dia dos três verões.

O pico do Índice de Calor observado entre 13h e 15h está associado ao máximo diário de radiação solar incidente, combinado à manutenção de níveis elevados de umidade relativa nesse intervalo. Nessas condições, o ar não se encontra suficientemente seco para favorecer o resfriamento evaporativo do corpo humano, fazendo com que a sensação térmica atinja seus valores máximos no início da tarde. Esse comportamento horário é consistente com padrões biometeorológicos descritos para regiões tropicais úmidas.

A análise por categorias, foi avaliado o comportamento do Índice de Calor máximo (ICMax) por bairro ao longo dos três verões analisados (Figura 13). Observa-se aumento dos valores máximos registrados no período, com destaque para Serra

(Trapiche), que atingiu 54,5 °C em 2023–2024, o maior valor observado na série. Os bairros Mirante da Lagoa e Glória também apresentaram elevação, alcançando valores acima de 49 °C em 2024–2025. Esses resultados reforçam a ocorrência de episódios críticos e o aumento recente dos máximos observados no período analisado.

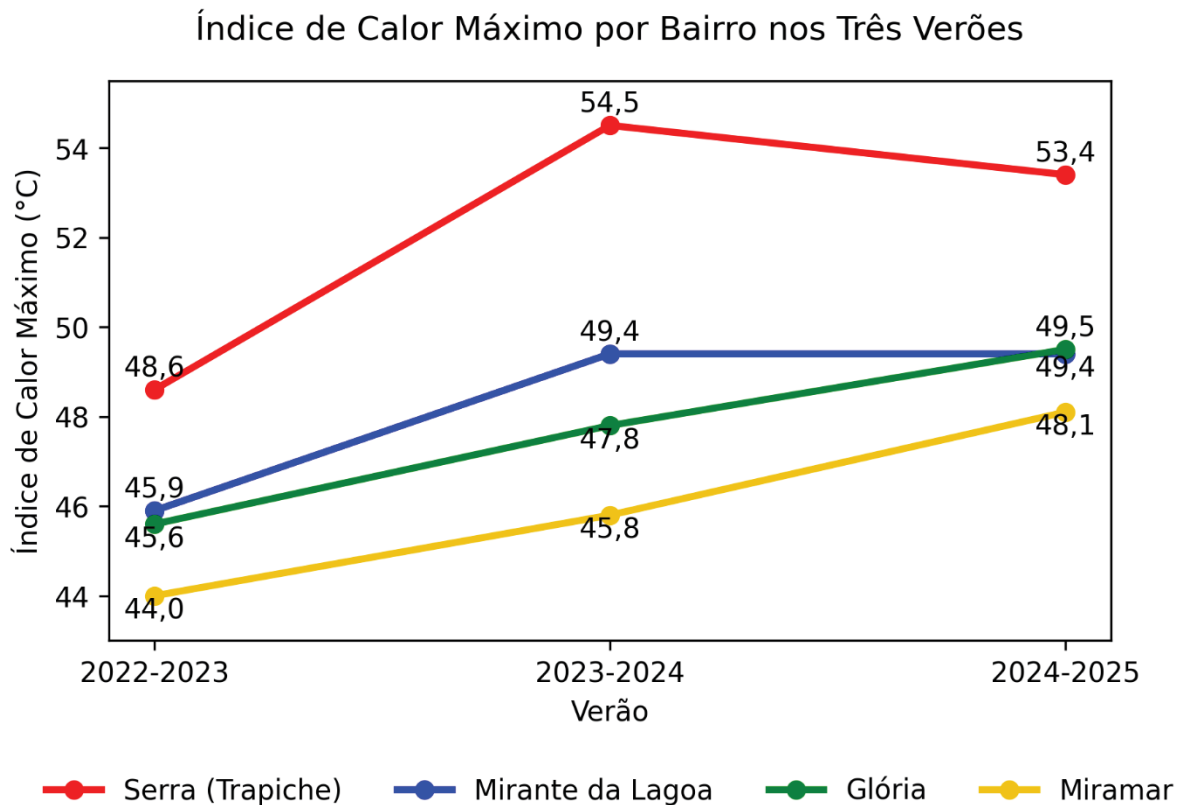


Figura 13. Evolução do índice de calor máximo (°C) nos bairros ao longo dos três verões analisados.

O aumento dos valores máximos do Índice de Calor ao longo dos verões reflete a ocorrência mais frequente de episódios extremos, quando temperatura elevada coincide com umidade relativa ainda alta no período de maior aquecimento diário. Esses máximos são particularmente relevantes por representarem as situações de maior risco fisiológico, com maior potencial de desencadear estresse térmico agudo e demandar maior uso de climatização.

Esses resultados evidenciam que, entre 2022 e 2025, houve intensificação gradual das condições de estresse térmico em Macaé, com aumento das horas em categorias críticas (≥ 41 °C).

4.3. Diferença entre Temperatura Real e Índice de Calor

A diferença entre a temperatura do ar e o Índice de Calor (IC) foi calculada para os verões de 2022–2023, 2023–2024 e 2024–2025, considerando a média horária entre 12h e 18h. Essa análise evidencia o efeito amplificador da umidade relativa sobre a sensação térmica, já que o IC integra simultaneamente essas duas variáveis.

A Tabela 4 apresenta os valores máximos de temperatura do ar, IC e a diferença máxima (IC – T) registrada em cada bairro e verão analisado. Observa-se que, em todos os bairros, o IC manteve-se sistematicamente superior à temperatura real, com diferenças que variaram entre 7,8 °C e 14,2 °C.

Tabela 4. Diferença máxima (IC – T) por bairro e verão (12h–18h).

Verão	Bairro	Temperatura Máxima (°C)	Índice de Calor Máximo (°C)	Média Diferença (°C)
2022-2023	Glória	36,2	45,2	9
2022-2023	Miramar	36,2	44	7,8
2022-2023	Mirante da Lagoa	35,6	45,4	9,8
2022-2023	Serra (Trapiche)	38,8	47	8,2
2023-2024	Glória	37	47,1	10,1
2023-2024	Miramar	36,4	45,8	9,4
2023-2024	Mirante da Lagoa	38,3	52,5	14,2
2023-2024	Serra (Trapiche)	42,7	54,5	11,1
2024-2025	Glória	38,2	49,5	11,3
2024-2025	Miramar	38,3	48,1	9,8
2024-2025	Mirante da Lagoa	38,4	49,4	11
2024-2025	Serra (Trapiche)	40,2	53,4	13,2

Fonte: Elaboração própria (2025).

A diferença sistematicamente positiva entre o Índice de Calor e a temperatura do ar evidencia o papel da umidade relativa como fator amplificador do desconforto térmico. Em condições de elevada umidade, o mecanismo fisiológico de resfriamento por evaporação do suor torna-se menos eficiente, fazendo com que o organismo perceba temperaturas superiores às medidas instrumentalmente. As maiores diferenças observadas indicam maior risco térmico, mesmo em situações nas quais a temperatura absoluta não atinge valores extremos.

A Figura 14 ilustra a evolução da diferença máxima entre IC e temperatura real ao longo dos três verões. Nota-se que os bairros Mirante da Lagoa e Serra (Trapiche) apresentaram os maiores valores, com destaque para o verão de 2023–2024, quando Mirante da Lagoa registrou diferença máxima de 14,2 °C. Em 2024–2025, Serra

(Trapiche) manteve valores elevados, chegando a 13,2 °C. Esse comportamento reforça que, mesmo em situações em que a temperatura do ar não apresenta os maiores extremos, a umidade relativa elevada pode intensificar significativamente a sensação térmica da população.

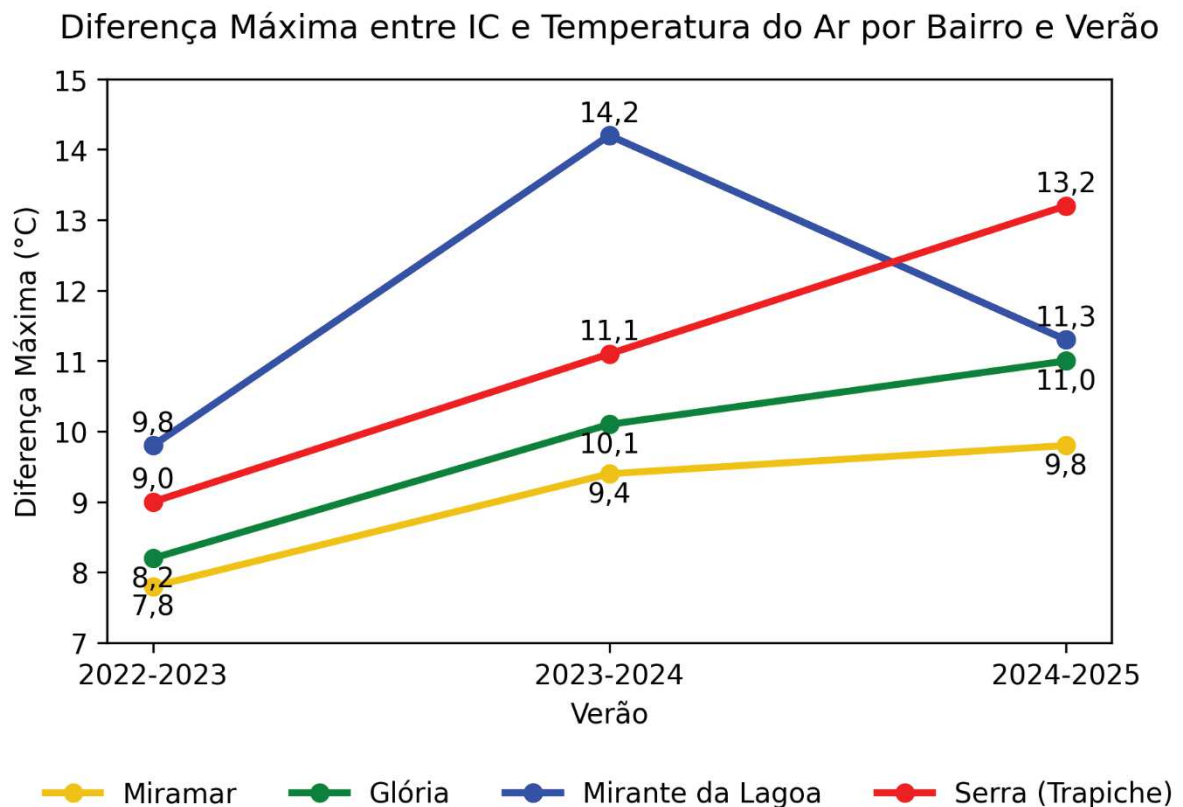


Figura 14. Diferença máxima entre índice de calor e temperatura do ar por bairro e verão.

A concentração das maiores diferenças entre o Índice de Calor e a temperatura do ar no intervalo entre 13h e 15h reflete a superposição entre o aquecimento máximo da superfície urbana e a permanência de elevados níveis de umidade relativa. Esse comportamento reforça que o estresse térmico não depende exclusivamente da temperatura do ar, mas da interação entre variáveis atmosféricas e características locais do ambiente urbano.

Além da análise anual, também foi observada a variação horária da diferença (IC – T). A Figura 15 mostra os valores médios por hora do dia (12h–18h), destacando o intervalo entre 13h e 15h como o mais crítico em todos os bairros. Nesse período, a diferença alcançou seus valores mais altos, refletindo a combinação entre aquecimento solar máximo e umidade relativa ainda elevada.

Diferença média entre IC e Temperatura do Ar por hora do dia (12h–18h)

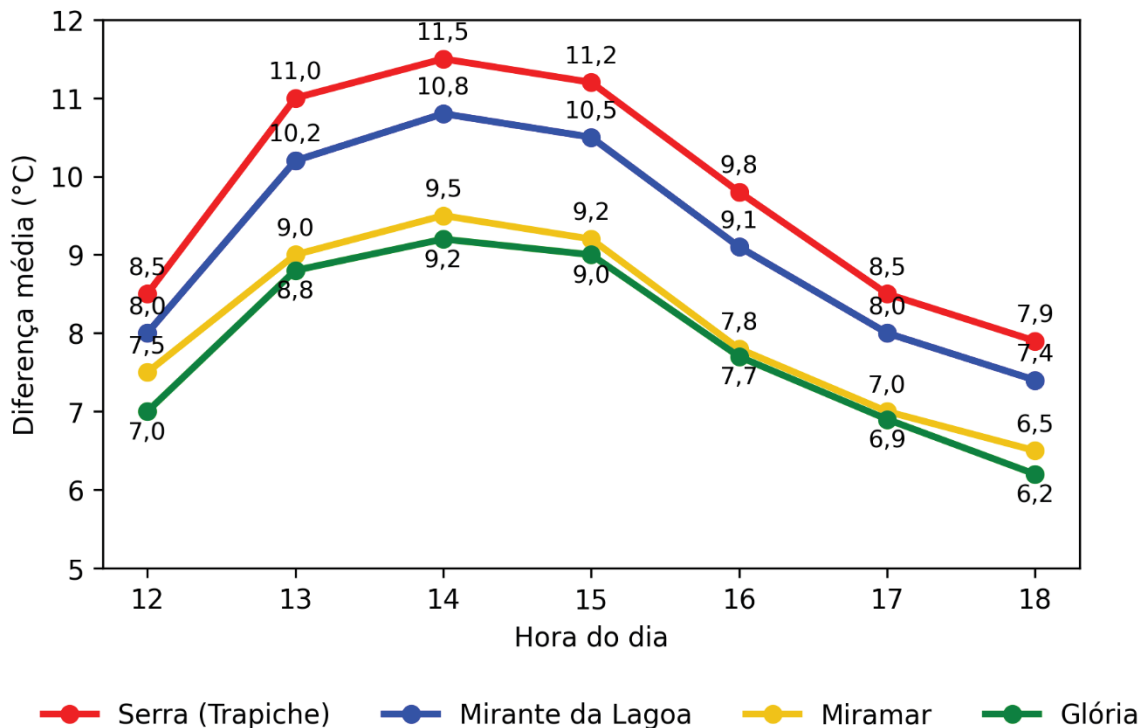


Figura 15. Diferença média entre índice de calor e temperatura do ar por bairro e verão.

De forma geral, os resultados confirmam que a diferença entre temperatura real e IC é consistente nos três verões avaliados, reforçando a importância de utilizar o IC como métrica de estresse térmico em vez da temperatura isolada.

4.4. Testes Estatísticos de Tendência (Mann-Kendall e Sen's slope)

Com o intuito de avaliar estatisticamente os padrões observados nas análises descritivas, aplicaram-se o teste não paramétrico de *Mann-Kendall* (KENDALL, 1975) e o estimador de *Sen* (*Sen's slope*) (SEN, 1968) às séries temporais sazonais de temperatura do ar, considerando tanto as médias quanto as máximas, além da umidade relativa e do Índice de Calor (IC). A análise contemplou o período das 12h às 18h nos verões de 2023, 2024 e 2025, abrangendo os bairros de Miramar, Glória, Mirante da Lagoa e Serra (Trapiche). A inclusão da temperatura máxima, paralelamente à média, teve como objetivo captar episódios de calor extremo, mais representativos para a avaliação do estresse térmico e de seus potenciais impactos à saúde da população.

Os resultados do teste de *Mann-Kendall*, acompanhados da estimativa de Sen, são apresentados na Tabela 5. Para todos os bairros e variáveis analisadas, não foram identificadas tendências estatisticamente significativas ao nível de 10%. Embora alguns coeficientes de Kendall (τ) tenham apresentado valores positivos, sugerindo indícios de aumento nas temperaturas máximas e no Índice de Calor em Glória, Miramar e Mirante da Lagoa, bem como da diferença IC–T em Serra (Trapiche), esses sinais devem ser interpretados com cautela, uma vez que os p-valores elevados indicam ausência de robustez estatística.

Tabela 5. Diferença máxima entre IC e Temperatura do Ar por bairro e verão.

Bairro	Variável	Tau	p-valor	Tendência
Glória	Temperatura	1	0,333	Sem tendência
Glória	Índice de Calor	1	0,333	Sem tendência
Glória	Média Diferença	1	0,333	Sem tendência
Miramar	Temperatura	1	0,333	Sem tendência
Miramar	Índice de Calor	1	0,333	Sem tendência
Miramar	Média Diferença	1	0,333	Sem tendência
Mirante da	Temperatura	1	0,333	Sem tendência
Mirante da	Índice de Calor	0,33	1	Sem tendência
Mirante da	Média Diferença	0,33	1	Sem tendência
Serra	Temperatura	0,33	1	Sem tendência
Serra	Índice de Calor	0,33	1	Sem tendência
Serra	Média Diferença	1	0,333	Sem tendência

Fonte: Elaboração própria (2025).

Embora os testes estatísticos não indiquem tendências significativas ao nível de confiança adotado, os sinais positivos observados em alguns coeficientes refletem a recorrência de episódios de calor mais intenso ao longo dos verões analisados. Do ponto de vista físico, esses sinais estão associados à variabilidade interanual recente e à ocorrência de extremos térmicos pontuais, não caracterizando um processo contínuo de aquecimento. Assim, os testes estatísticos corroboram a interpretação dos resultados como um diagnóstico climático recente em escala intraurbana.

Diferentemente de estudos que analisam tendências climáticas em séries temporais longas, da ordem de décadas, como os realizados para a América do Sul (MIRANDA et al., 2024), este trabalho baseia-se em um recorte temporal reduzido, composto por apenas três verões consecutivos (2023, 2024 e 2025). Nesse contexto, reconhece-se que o teste de *Mann-Kendall* apresenta baixo poder estatístico para

detecção de tendências consolidadas, razão pela qual sua aplicação neste estudo possui caráter exploratório.

A Figura 16 complementa a Tabela 5 ao destacar a diferença entre o comportamento das médias e das máximas. Enquanto as médias indicam relativa estabilidade entre os verões, as temperaturas máximas evidenciam episódios críticos de aquecimento, fundamentais para a compreensão dos riscos associados ao desconforto térmico e ao estresse fisiológico.

Temperatura média vs máxima (12–18h) por bairro

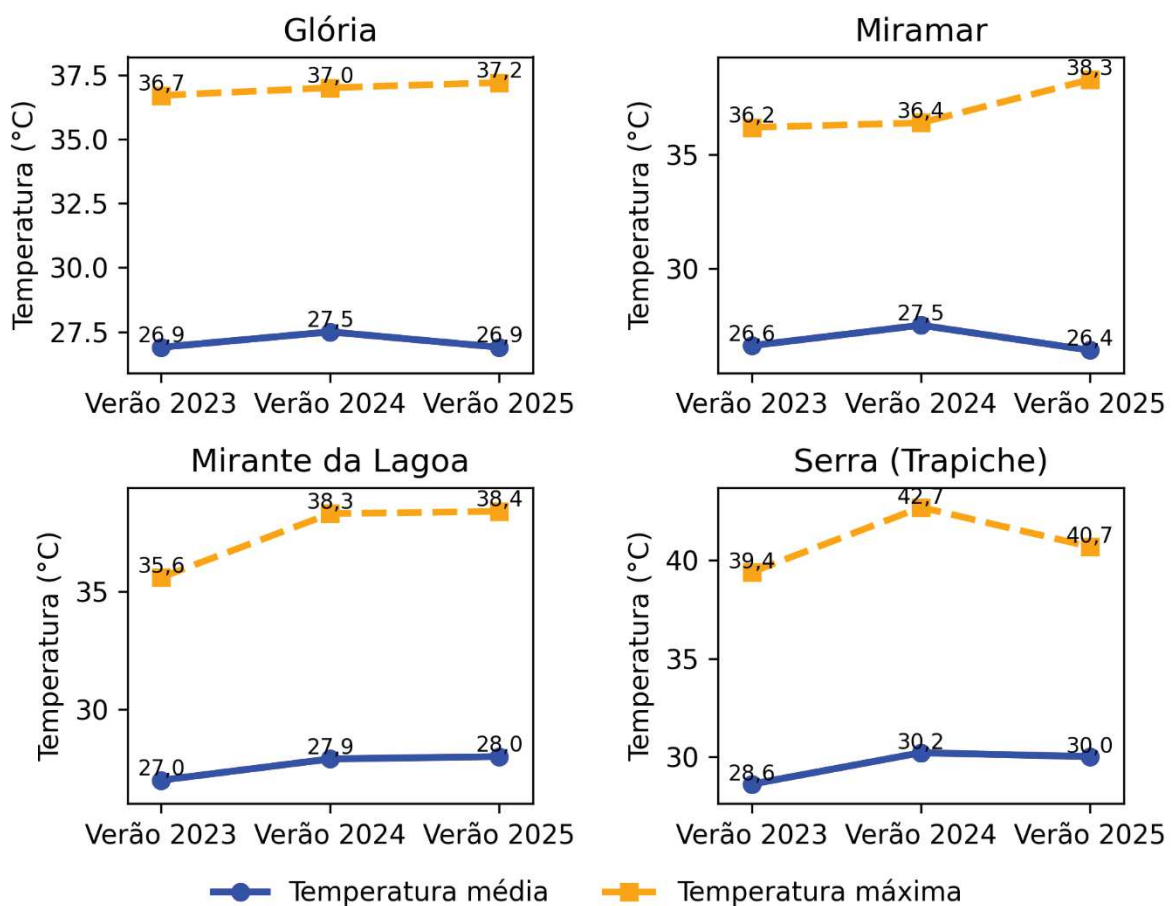


Figura 16. Comparação entre temperaturas médias e máximas (12h–18h) nos bairros, durante os verões.

A distinção entre estabilidade das médias e elevação das máximas indica que o comportamento recente é mais bem descrito pela ocorrência de picos térmicos do que por uma alteração uniforme do regime médio. Em termos físicos, isso é

consistente com a variabilidade interanual e com a maior frequência de eventos de calor intenso concentrados no período da tarde, que são os mais relevantes para a caracterização do estresse térmico.

Dessa forma, os resultados dos testes estatísticos indicam que os padrões identificados refletem um diagnóstico climático recente em escala intraurbana, não configurando evidência formal de mudança climática ou de tendência temporal de longo prazo. Considerando o reduzido comprimento das séries temporais analisadas, compostas por apenas três verões consecutivos, os resultados dos testes de *Mann-Kendall* e do estimador de *Sen* devem ser interpretados estritamente como exploratórios. A ausência de significância estatística ao nível de 10% confirma que os sinais positivos observados em alguns coeficientes de *Kendall* não apresentam robustez suficiente para caracterizar tendências consolidadas. Assim, os padrões observados representam variabilidade interanual recente e a ocorrência de episódios críticos de calor, sem permitir inferências sobre agravamento progressivo ao longo do tempo.

Esses resultados corroboram a abordagem adotada neste estudo, que privilegia a análise observacional do estresse térmico em escala intraurbana, em consonância com as limitações inerentes à base de dados disponível. A ampliação da série temporal em investigações futuras permitirá aumentar a robustez estatística e aprofundar a avaliação da persistência desses comportamentos climáticos.

4.5. Associação entre Índice de Calor e Consumo de Energia

A análise integrada entre as variáveis climáticas e os registros de consumo de energia elétrica permitiu investigar a associação entre o estresse térmico, representado pelo Índice de Calor (IC), e a demanda energética em edificações públicas do município de Macaé-RJ. Foram analisados dois setores com características operacionais distintas: Educação, representado pelo complexo educacional localizado no bairro Glória, e Saúde, representado pelo Hospital Público Municipal de Macaé (HPM), situado no bairro Virgem Santa. Para o setor saúde, o Índice de Calor do bairro Miramar foi adotado como proxy, em função da proximidade geográfica e da similaridade das condições meteorológicas.

Cabe ressaltar que a análise do consumo de energia elétrica foi realizada com base em uma edificação representativa de cada setor, o que impõe limitações à

generalização dos resultados para o conjunto das edificações públicas do município. Assim, os padrões observados refletem o comportamento energético específico das unidades analisadas, inseridas em seus respectivos contextos operacionais, não sendo recomendada extrapolação direta para todo o setor educacional ou de saúde.

Destaca-se ainda que a análise possui caráter descritivo e correlacional, não havendo controle para variáveis operacionais como ocupação, carga de equipamentos, estratégias de gestão predial e regime de funcionamento das unidades. Dessa forma, não se estabelece inferência causal entre o Índice de Calor e o consumo de energia elétrica, sendo os resultados interpretados como associações observadas no período analisado.

A comparação foi realizada entre os períodos de verão (novembro a março) e não-verão (abril a outubro) para os anos de 2023 e 2024, únicos com séries completas e consistentes de consumo energético e IC. Essa distinção sazonal permitiu avaliar se períodos de maior estresse térmico coincidem com alterações no padrão de demanda energética.

No setor educacional, conforme apresentado na Tabela 6, o consumo médio diário de energia elétrica foi superior no período de não-verão em ambos os anos analisados, refletindo o funcionamento pleno das atividades acadêmicas. No entanto, observa-se um aumento expressivo do consumo no verão de 2024 em relação a 2023, com a razão Verão/Não-Verão elevando-se de 0,79 para 0,84.

Tabela 6. Consumo de Energia – Educação (Glória), Verão e Não-Verão (2023–2024).

Ano	Consumo Verão (kWh/dia)	Consumo Não Verão (kWh/dia)	Razão V/NV
Verão 2023	2372	2988	0,79
Verão 2024	2838	3378	0,84

Fonte: Elaboração própria (2025).

A Figura 17 ilustra esse comportamento, evidenciando que, embora o consumo absoluto no não-verão permaneça maior, o consumo energético no verão apresenta crescimento relativo, aproximando-se do patamar observado fora do período estival. Esse resultado sugere que, mesmo em um setor fortemente condicionado pelo calendário acadêmico, o aumento do estresse térmico atua como fator complementar na intensificação do uso de sistemas de climatização.

Glória (Educação): Consumo Verão vs Não Verão e Razão

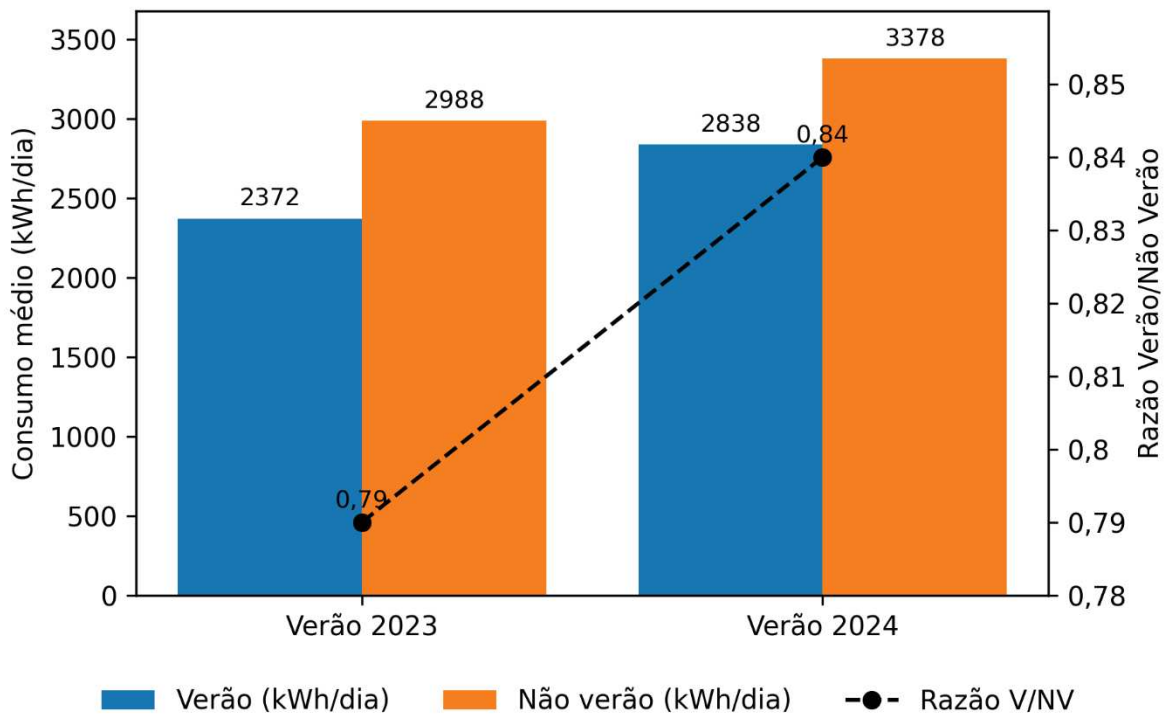


Figura 17. Consumo de energia - educação (Glória), verão, não verão e razão.

A Figura 18 reforça essa interpretação ao relacionar o consumo médio diário de energia elétrica com o Índice de Calor máximo no setor educacional. Observa-se que o aumento do consumo no verão de 2024 ocorre simultaneamente à elevação do IC máximo, indicando que episódios de calor extremo intensificam a demanda por resfriamento, mesmo em períodos de menor ocupação das edificações.

Glória (Educação): Consumo Verão/Não Verão vs IC Máximo

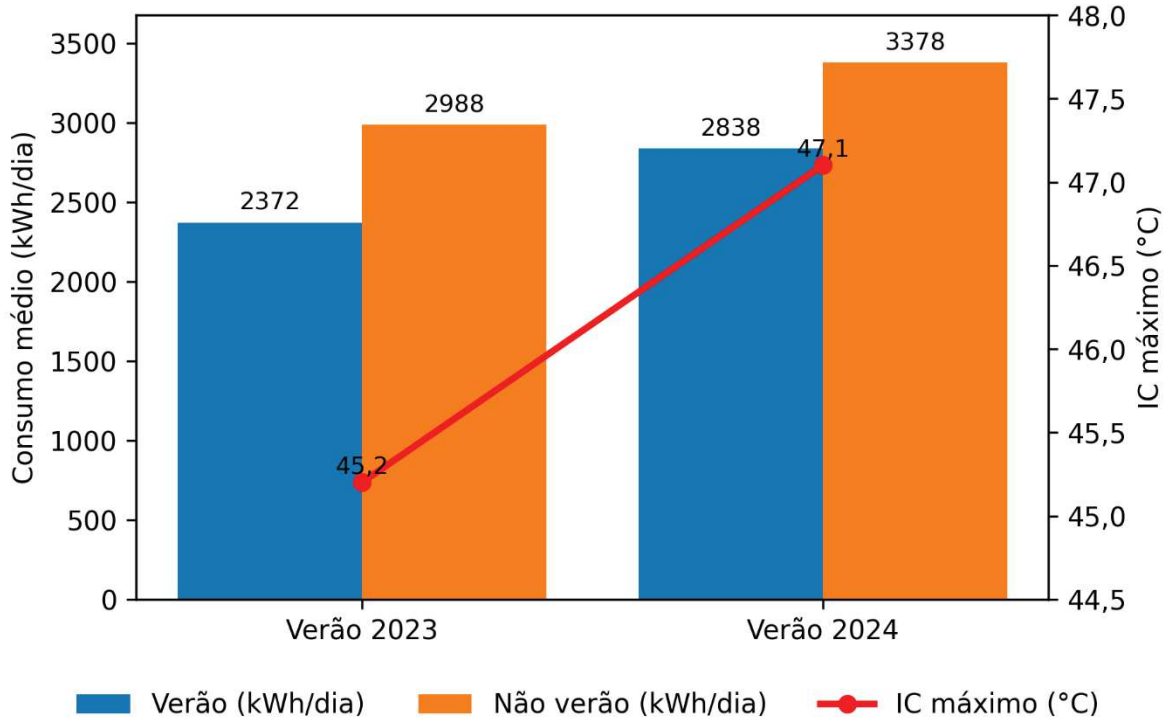


Figura 18. Educação – Consumo Verão/Não-Verão vs IC Máximo.

No setor saúde, os resultados apresentados na Tabela 7 revelam um comportamento distinto. Em ambos os anos analisados, o consumo médio diário de energia elétrica foi consistentemente maior no verão do que no não-verão, com razões Verão/Não-Verão superiores a 1 (1,12 em 2023 e 1,11 em 2024). Esse padrão reflete a natureza contínua e ininterrupta das atividades hospitalares, altamente sensíveis às condições térmicas.

Tabela 7. Consumo de energia – saúde (HPM), Verão e Não-Verão (2023–2024).

Ano	Consumo Verão (kWh/dia)	Consumo Não Verão (kWh/dia)	Razão V/NV
Verão 2023	6412	5726	1,12
Verão 2024	7482	6736	1,11

Fonte: Elaboração própria (2025).

A Figura 19 evidencia esse comportamento, mostrando que o consumo energético no verão se mantém elevado em relação ao não-verão,

independentemente do ano, o que confirma a maior vulnerabilidade energética do setor saúde frente ao aumento do estresse térmico.

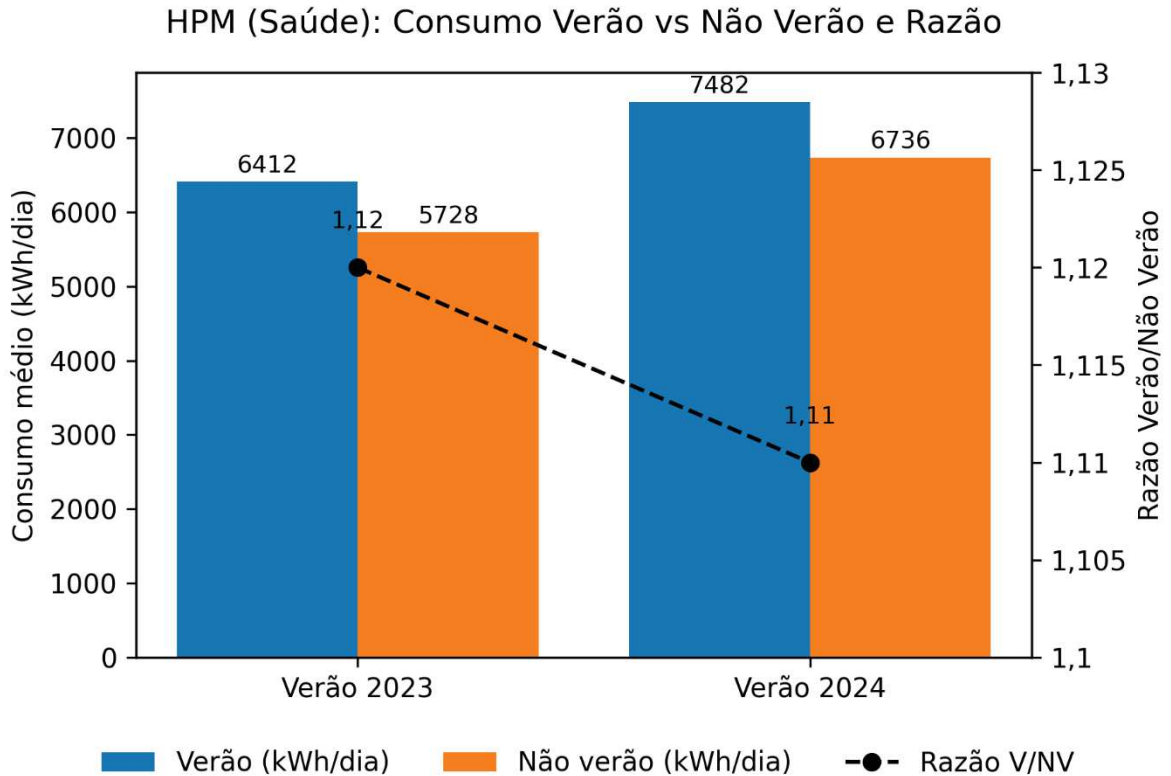


Figura 19. Saúde Consumo Verão/Não-Verão vs Razão (2023–2024).

Na Figura 20, observa-se a relação direta entre o aumento do consumo energético no verão e a elevação do Índice de Calor máximo no HPM. Entre 2023 e 2024, verifica-se crescimento simultâneo do IC máximo e da demanda energética, sugerindo que episódios de calor extremo intensificam o uso de sistemas de climatização e suporte térmico em ambientes hospitalares, onde a manutenção do conforto térmico é essencial para pacientes, equipes e equipamentos.

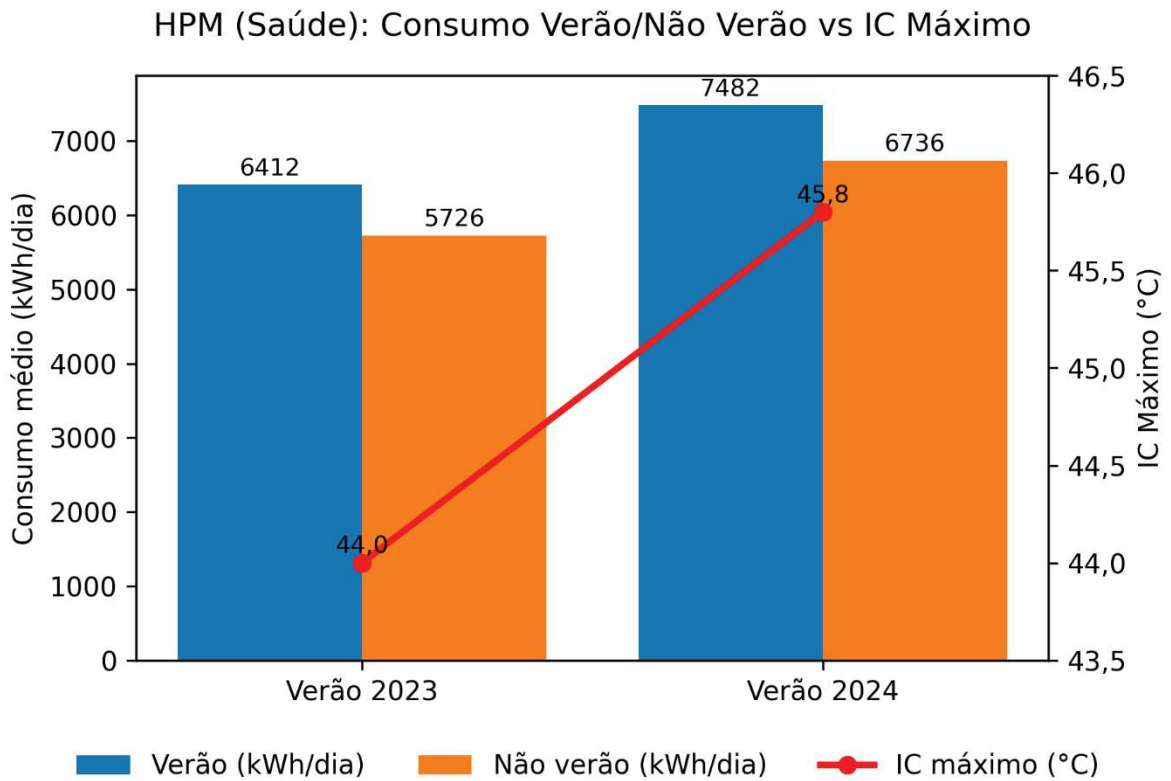


Figura 20. Saúde Consumo Verão/Não-Verão vs IC Máximo (2023–2024).

De forma geral, os resultados demonstram a existência de uma associação consistente entre o estresse térmico e o consumo de energia elétrica, embora com padrões distintos entre os setores analisados. No setor educacional, o calendário acadêmico exerce influência predominante, mas o aumento do Índice de Calor contribui para a elevação do consumo nos verões mais quentes. No setor saúde, a resposta ao calor é direta, com maior consumo energético no verão em todos os anos analisados, indicando pressão adicional sobre a infraestrutura elétrica urbana durante episódios de calor extremo.

Esses achados reforçam a importância de considerar o estresse térmico como fator estruturante no planejamento energético e nas estratégias de adaptação climática, especialmente em setores sensíveis como saúde e educação, em um contexto de intensificação do aquecimento climático.

4.6. Projeções Climáticas Futuras

As projeções climáticas futuras apresentadas neste item possuem caráter contextual e regional, sendo utilizadas para situar os resultados observacionais deste estudo no cenário climático esperado para o século XXI. Os dados modelados apresentam resolução espacial aproximada de 20 km, característica de modelos climáticos regionais, o que os torna adequados para análises em escala municipal e regional, mas não para representar contrastes intraurbanos ou microclimáticos em nível de bairro. Assim, os resultados prospectivos devem ser interpretados como um pano de fundo climático regional.

As projeções para Macaé-RJ indicam elevação gradual da temperatura do ar ao longo do século XXI em ambos os cenários analisados. Observa-se aumento progressivo dos percentis medianos (P50) e superiores (P90), com diferenças mais perceptíveis entre os cenários no período intermediário (2041–2070), quando o RCP 8.5 apresenta valores ligeiramente superiores aos do RCP 4.5.

No período final (2071–2099), os valores permanecem elevados em relação ao início da série, porém sem crescimento linear contínuo, refletindo variabilidade interna do modelo climático regional e incertezas associadas às simulações de longo prazo.

A Tabela 8 apresenta os percentis 10 (P10), 50 (P50) e 90 (P90) de temperatura do ar e umidade relativa por cenário e período. Observa-se que a umidade relativa permanece relativamente estável ao longo dos cenários analisados, enquanto a temperatura do ar apresenta elevação moderada. Esse comportamento sugere que o agravamento projetado do Índice de Calor decorre predominantemente do aumento térmico, e não de mudanças expressivas no conteúdo de umidade atmosférica.

Tabela 8. Temperatura e umidade – percentis P10, P50 e P90 por cenário e período.

Cenário	Período	T (°C) P10	T (°C) P50	T (°C) P90	UR (%) P10	UR (%) P50	UR (%) P90
RCP 4.5	Futuro 1	19,6	22,1	24,1	77,0	84,0	89,0
RCP 4.5	Futuro 2	19,7	22,7	24,8	77,2	83,8	88,0
RCP 4.5	Futuro 3	20,2	23,0	25,0	77,4	84,0	88,9
RCP 8.5	Futuro 1	19,6	22,3	24,2	77,4	83,9	89,0
RCP 8.5	Futuro 2	20,3	23,0	25,1	77,7	84,2	89,2
RCP 8.5	Futuro 3	20,5	22,5	24,5	85,1	86,6	88,0

Fonte: Elaboração própria (2025).

No cenário RCP 4.5, observa-se elevação moderada do Índice de Calor ao longo do século XXI, com aumento progressivo dos valores medianos (P50) e superiores (P90), especialmente a partir do período intermediário (2041–2070). O crescimento é gradual e permanece dentro da faixa esperada para a climatologia regional projetada.

Nos anos representados pelo percentil 90, verifica-se intensificação dos episódios de desconforto térmico em relação ao início da série, embora sem mudanças abruptas ou extrapolações extremas. A evolução temporal desses percentis está apresentada na Figura 21.

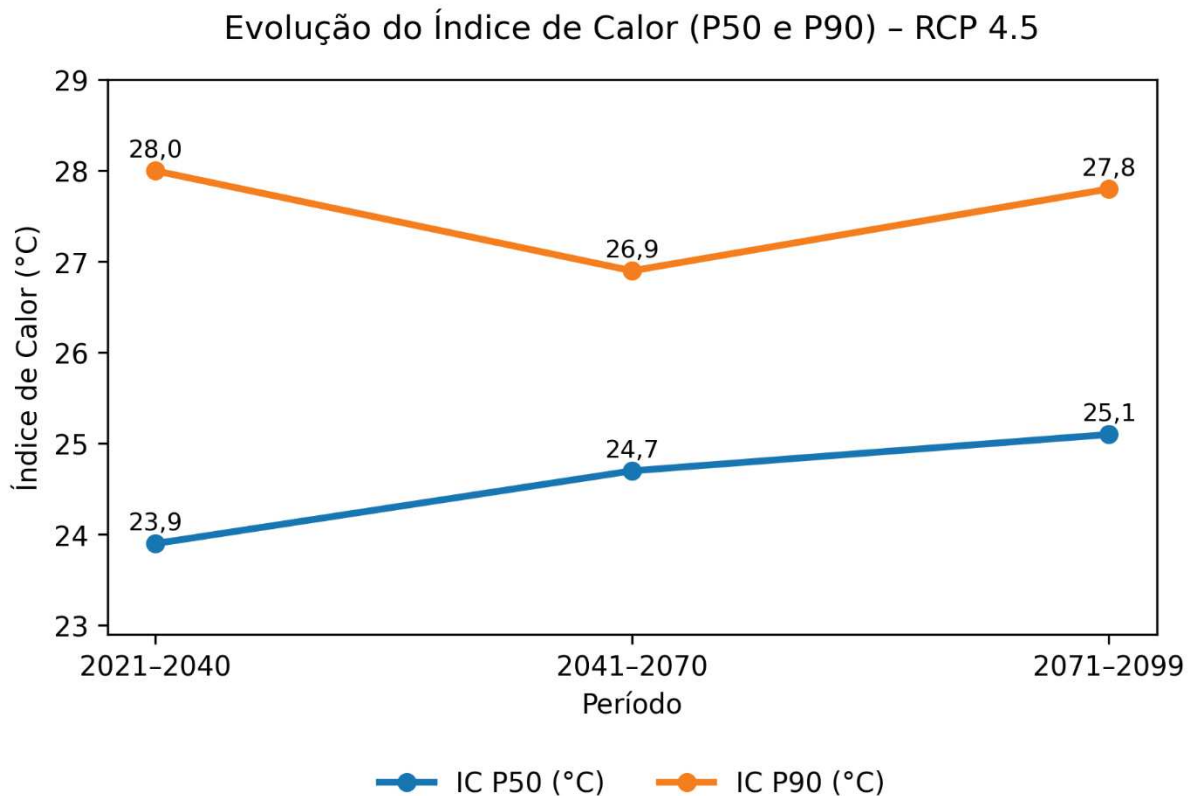


Figura 21. Evolução do índice de calor (P50 e P90) no cenário RCP 4.5.

No cenário RCP 8.5, observa-se intensificação progressiva do Índice de Calor ao longo do século XXI, com aumento tanto dos valores medianos (P50) quanto dos extremos (P90). A elevação torna-se mais evidente a partir do período intermediário (2041–2070), mantendo-se no final do século (2071–2099). Embora os incrementos sejam graduais, os percentis superiores indicam maior magnitude dos episódios de desconforto térmico em relação ao início da série, conforme ilustrado na Figura 22.

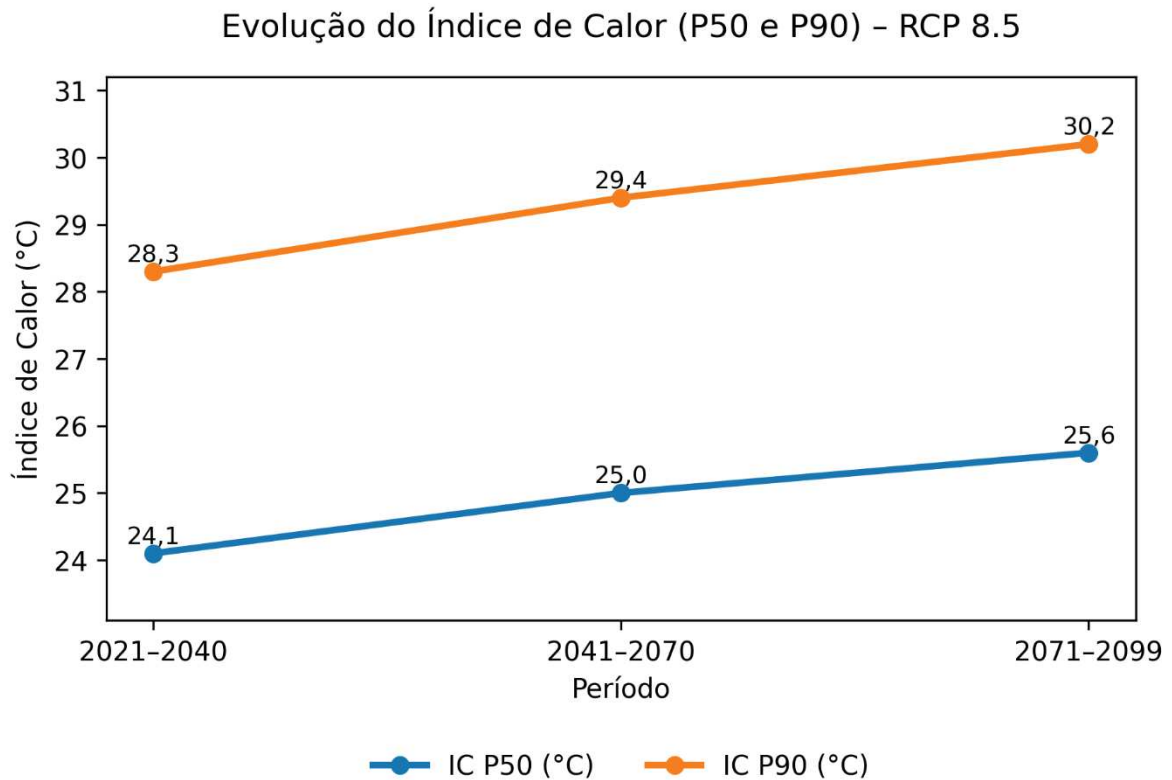


Figura 22. Evolução do índice de calor (P50 e P90) no cenário RCP 8.5.

A análise do cenário RCP 8.5 indica intensificação gradual dos valores extremos do Índice de Calor ao longo do século XXI. Os percentis superiores (P90) atingem valores próximos a 30 °C nas últimas décadas do período analisado, evidenciando aumento da magnitude dos episódios de desconforto térmico em relação ao início da série. Assim, as projeções regionais apontam para agravamento progressivo das condições térmicas, porém dentro de patamares compatíveis com a climatologia simulada pelo modelo. Os resultados sugerem intensificação moderada do estresse térmico regional ao longo do século XXI, especialmente sob o cenário de maiores emissões.

Complementarmente, a análise integrada entre o Índice de Calor e a umidade relativa indica que a UR tende a se manter relativamente estável ao longo dos cenários futuros, enquanto o IC apresenta elevação gradual. Esse comportamento reforça que o aumento projetado do IC decorre predominantemente da elevação da temperatura do ar, sendo a umidade um fator que contribui para a manutenção do desconforto

térmico, mas não o principal indutor da tendência de intensificação observada. Essa relação está apresentada na Figura 23.

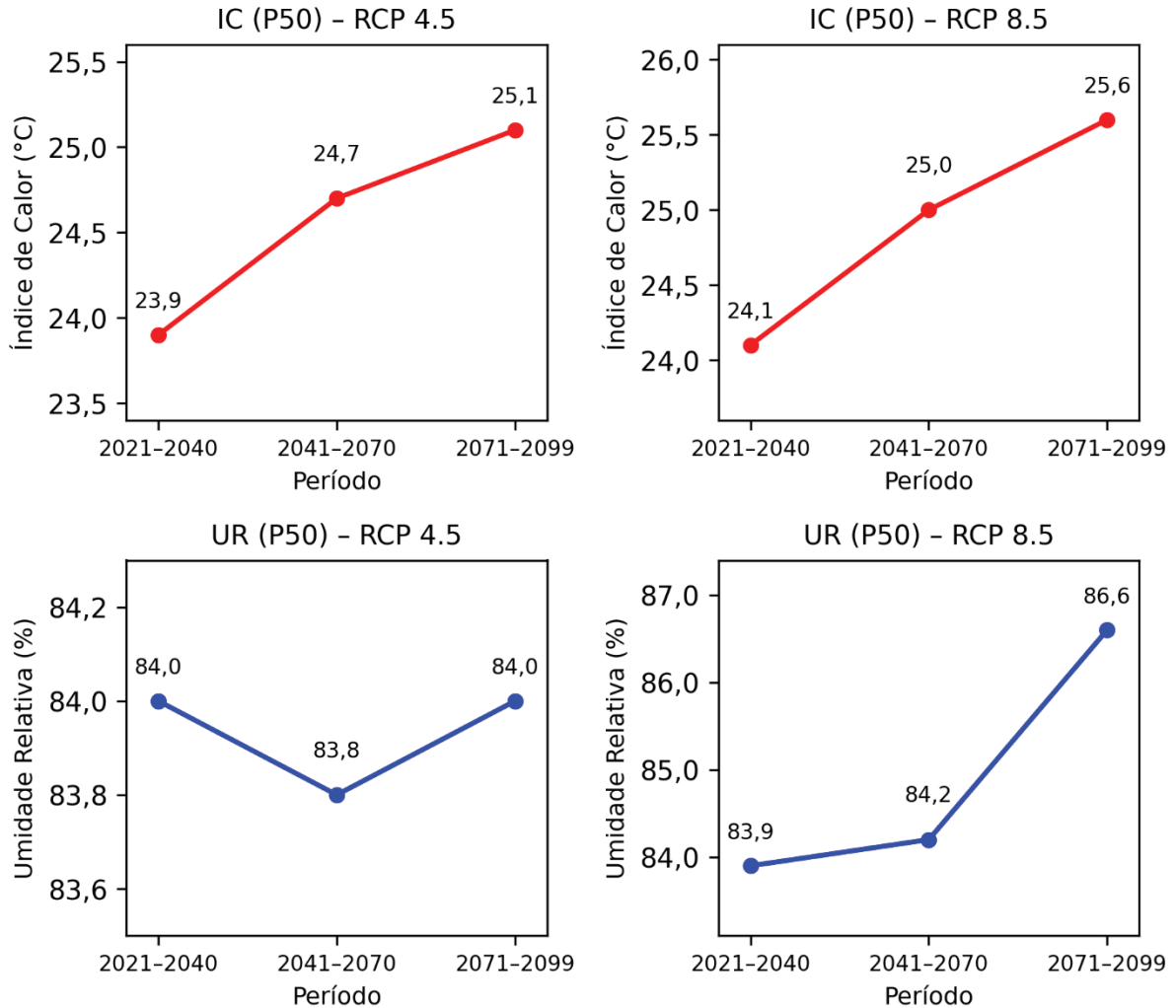


Figura 23. Umidade Relativa e Índice de Calor (P50) nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5.

De forma geral, a comparação entre os dois cenários aponta para aumento progressivo da severidade térmica ao longo do século XXI, com intensificação mais evidente sob o cenário RCP 8.5. Ainda que os incrementos projetados sejam moderados em magnitude, os resultados indicam agravamento consistente do estresse térmico regional.

Considerando que Macaé já apresenta episódios relevantes de desconforto térmico nas observações recentes, as projeções reforçam a importância de estratégias antecipatórias de adaptação urbana e planejamento setorial,

especialmente nas áreas de saúde, educação e infraestrutura, frente ao cenário de aquecimento gradual projetado.

4.7. Implicações para Políticas Públicas e Planejamento Urbano

Os resultados desta dissertação evidenciam que o estresse térmico em Macaé-RJ, representado pelo aumento no período analisado do Índice de Calor (IC), já impacta diretamente a população e apresenta sinal de intensificação em cenários futuros. Essa realidade exige medidas integradas de políticas públicas e de planejamento urbano, capazes de reduzir vulnerabilidades e preparar a cidade para enfrentar episódios de calor extremo.

Na área da saúde pública, a literatura epidemiológica brasileira reforça o caráter crítico do IC como indicador de risco. Estudos recentes no estado do Rio de Janeiro mostraram que episódios de calor extremo estiveram associados ao aumento da mortalidade por doenças cardiovasculares e respiratórias, com maior vulnerabilidade entre idosos (SILVEIRA et al., 2023; PROSDOCIMI; KLIMA, 2020; MORAIS et al., 2025). Modelos estatísticos avançados, como os *Distributed Lag Non-Linear Models* (DLNM), confirmaram a relação observada entre exposição prolongada ao calor e mortes por múltiplas causas, consolidando o IC como ferramenta estratégica para políticas preventivas (MORAIS et al., 2025).

A Tabela 10 sintetiza a convergência entre estudos epidemiológicos no estado do Rio de Janeiro e os resultados obtidos em Macaé. Enquanto a literatura científica confirma a associação entre calor extremo, mortalidade e morbidade por causas cardiorrespiratórias, os achados locais reforçam a intensificação do Índice de Calor (IC) e sua influência sobre o consumo energético em escolas e hospitais. Essa integração demonstra que o IC deve ser considerado não apenas como indicador de desconforto térmico, mas como variável central para políticas de saúde, planejamento urbano e eficiência energética, reforçando a urgência de estratégias de adaptação climática multissetoriais.

Tabela 9. Síntese dos achados epidemiológicos e climáticos/energéticos relevantes para políticas públicas.

Dimensão	Achados (Rio de Janeiro / Macaé)	Implicações para Políticas Públicas
Saúde	Rio de Janeiro: Aumento de mortalidade cardiovascular e respiratória (SILVEIRA et al., 2023); excesso de óbitos em períodos prolongados (PROSDOCIMI; KLIMA, 2020); DLNM confirmam associação com mortes (MORAIS et al., 2025). Macaé: IC máximo. 54,5 °C em 2023–24 (Serra); Diferença IC–T até 14,2 °C (Mirante da Lagoa).	Protocolos de alerta e resposta; planos para idosos e vulneráveis; reforço hospitalar em ondas de calor.
Clima Urbano	Rio de Janeiro: vulnerabilidade em áreas densamente urbanizadas. Macaé: Aumento do IC médio e máximo; projeções RCP 8.5 apontam IC > 55 °C (P90).	Arborização urbana; corredores de ventilação; áreas públicas sombreadas.
Energia	Rio de Janeiro: sobrecarga do sistema de saúde em picos de calor, ↑ consumo. Macaé: Hospitais → consumo maior no verão (HPM V/NV > 1,1). Educação → maior no não-verão, mas aumento em verões quentes (Glória 2024).	Eficiência energética em escolas e hospitais; climatização eficiente; energia renovável; retrofit de prédios.

Fonte: Elaboração própria (2025).

No campo do planejamento urbano climático, experiências internacionais reforçam o papel das soluções baseadas na natureza como estratégia de adaptação ao aumento do estresse térmico em cidades costeiras. O Município de Cascais, em Portugal, implementa desde 2015 o Plano de Ação para a Adaptação às Alterações Climáticas (PA3C2), que integra arborização urbana, infraestrutura verde e protocolos institucionais voltados à resposta a eventos de calor extremo.

A Figura 24 ilustra o Parque Marechal Carmona, um dos principais espaços verdes urbanos de Cascais, que exemplifica a aplicação prática dessas estratégias por meio do sombreamento, da moderação do microclima urbano e da oferta de áreas de refúgio térmico para a população. A experiência de Cascais evidencia como a

integração entre planejamento urbano, adaptação climática e infraestrutura verde pode contribuir para a redução da vulnerabilidade térmica em ambientes urbanos, especialmente em contextos de aquecimento progressivo.



Figura 24. Parque Marechal Carmona, Cascais, Portugal.

Fonte: Acervo pessoal da autora, Cascais (2025).

No setor de eficiência energética em edificações públicas, os achados deste estudo mostraram a pressão adicional do IC sobre escolas e hospitais, aumentando o consumo elétrico para climatização. Investimentos em equipamentos de maior eficiência, sistemas de ventilação natural, isolamento térmico e integração de energias renováveis são medidas prioritárias para reduzir custos e emissões sem comprometer o conforto térmico da população.

De forma geral, os resultados demonstram que Macaé deve alinhar-se a uma agenda de adaptação urbana setorial, que articule saúde, educação, infraestrutura e meio ambiente. A intensificação prevista de ondas de calor exige transformar o conhecimento científico em suporte direto para políticas públicas locais. O cruzamento

entre achados epidemiológicos e climáticos reforça que o IC não é apenas um índice de desconforto térmico, mas um indicador de risco vital para a saúde coletiva, exigindo ações preventivas e adaptativas diante do aquecimento futuro.

5. PRODUTO TECNOLÓGICO

O desenvolvimento da aplicação web para visualização do Índice de Calor e comunicação do risco térmico contou com a colaboração técnica do bolsista do LAMET/UENF Valmir Monteiro Júnior, responsável pela implementação da interface digital, pela programação da plataforma e pela estruturação do sistema de consulta das condições térmicas. Sua contribuição foi fundamental para a materialização do produto tecnológico desta pesquisa, estabelecendo a interface entre os resultados científicos obtidos e sua aplicação prática.

O produto tecnológico desenvolvido consiste em uma aplicação web interativa destinada ao cálculo, classificação e comunicação do estresse térmico por meio do Índice de Calor (IC). A ferramenta foi concebida para traduzir os resultados científicos desta dissertação em uma solução operacional acessível e de fácil interpretação, permitindo a visualização das categorias de risco térmico e facilitando a comunicação das condições de calor extremo para diferentes públicos.

Do ponto de vista da tipologia de produção técnica, o produto enquadra-se como software ou aplicação computacional, caracterizando-se como uma ferramenta tecnológica aplicada, desenvolvida a partir de métodos científicos consolidados e orientada à utilização em contextos institucionais e de gestão pública.

A plataforma apresenta potencial de aplicação em protocolos municipais de monitoramento de calor extremo, podendo apoiar estratégias de adaptação climática, comunicação de risco e tomada de decisão em áreas como saúde pública, planejamento urbano e gestão energética. Nesse sentido, a ferramenta constitui um desdobramento aplicado da pesquisa, ampliando o alcance dos resultados científicos e contribuindo para a integração entre ciência do clima, tecnologia e políticas públicas.

5.1. Finalidade e relevância do produto

A finalidade principal da aplicação é permitir que usuários obtenham, de forma rápida e intuitiva, o IC calculado a partir de dados meteorológicos observados, bem como sua classificação em categorias de estresse térmico, conforme referência operacional da NOAA. A aplicação busca reduzir a complexidade técnica envolvida na interpretação conjunta da temperatura do ar e da umidade relativa, apresentando

ao usuário final não apenas valores numéricos, mas também indicações visuais e categóricas de risco térmico.

A Figura 25 apresenta a interface principal da aplicação desenvolvida neste trabalho. A plataforma permite a visualização das condições térmicas e a classificação do estresse térmico a partir do Índice de Calor, traduzindo os resultados científicos da pesquisa em uma ferramenta digital de fácil interpretação. A interface foi projetada para facilitar o acesso às informações de risco térmico e apoiar ações de comunicação e monitoramento em nível municipal.



Figura 25. Interface da aplicação web SIM-IC Macaé em dispositivos desktop e móvel.

A relevância do produto está diretamente associada à crescente intensificação de episódios de calor extremo em regiões tropicais úmidas, como Macaé-RJ, onde elevados níveis de umidade potencializam o desconforto térmico e os impactos à saúde, à produtividade e ao consumo energético. Ao operacionalizar o IC em uma interface amigável, o produto contribui para a aproximação entre conhecimento científico e tomada de decisão, ampliando o uso do índice como ferramenta aplicada.

5.2. Arquitetura geral da aplicação

A aplicação foi desenvolvida seguindo o modelo Single Page Application (SPA), utilizando a biblioteca React. Nesse modelo, a aplicação carrega uma única página no

navegador e atualiza dinamicamente seu conteúdo à medida que o usuário interage com a interface, sem a necessidade de recarregar novas páginas a cada ação.

Essa abordagem foi escolhida por proporcionar maior fluidez na experiência do usuário, aproximando o comportamento do sistema ao de um aplicativo, mesmo sendo acessado via navegador. Diferentemente de aplicações web tradicionais, em que cada navegação implica uma nova requisição ao servidor e o carregamento de uma nova página, no modelo SPA apenas os dados são atualizados, enquanto a estrutura da página permanece ativa, resultando em melhor desempenho e usabilidade.

A aplicação foi projetada para ser acessada tanto em dispositivos desktop quanto móveis, garantindo portabilidade, acessibilidade e facilidade de uso.

5.3. Organização modular e fluxo de funcionamento

O funcionamento da aplicação está estruturado em três módulos principais, conforme ilustrado no diagrama arquitetural do sistema:

a) Módulo de Coleta e Tratamento de Dados

Este módulo é responsável pela obtenção dos dados meteorológicos. A aplicação realiza requisições à API do The Weather Company (IBM), que consolida informações provenientes de estações meteorológicas. Ressalta-se que a infraestrutura de coleta, armazenamento e disponibilização desses dados é mantida pela própria plataforma do The Weather Company, não sendo implementada diretamente neste projeto.

Após a requisição via API, os dados retornados passam por uma etapa de validação e tratamento, cujo objetivo é garantir a consistência mínima antes do processamento. Essa validação inclui, por exemplo, a verificação de valores nulos, dados ausentes ou valores fisicamente inconsistentes ou fora de intervalos climatologicamente plausíveis. Trata-se de um tratamento leve, voltado a assegurar a integridade dos dados de entrada para o cálculo do índice.

b) Módulo de Processamento e Categorização

Uma vez validados, os dados meteorológicos são encaminhados ao módulo de processamento, responsável pelo cálculo do Índice de Calor. O cálculo utiliza a

equação empírica operacional definida pela National Weather Service (NOAA), baseada na formulação de Rothfusz.

Considerando que a equação original é definida em °F, o sistema realiza automaticamente a conversão da temperatura de Celsius para Fahrenheit antes do cálculo, e a reconversão do resultado final para °C, garantindo a padronização das análises e a coerência com os dados apresentados nesta dissertação.

Após o cálculo do IC, o sistema executa a classificação do estresse térmico, enquadrando o valor obtido em categorias operacionais de risco, como conforto, cautela ou perigo, conforme os limites definidos pela NOAA.

c) Módulo de Interface e Visualização (UI)

O módulo de interface é responsável por apresentar os resultados ao usuário e por gerenciar as interações. A interface recebe o valor do Índice de Calor e sua respectiva categoria, selecionando a forma mais adequada de visualização, com apoio de elementos gráficos e sinais visuais.

Por exemplo, em situações classificadas como risco elevado, a interface pode destacar alertas visuais, cores mais intensas ou mensagens indicativas, facilitando a rápida interpretação das condições térmicas. Além disso, a interface captura as interações do usuário, como a seleção de uma estação ou localidade específica, e traduz essas ações em novas solicitações de dados ao módulo de coleta.

5.4. Arquitetura client-side e justificativa técnica

Toda a lógica da aplicação foi implementada em arquitetura exclusivamente *client-side*, ou seja, o processamento ocorre diretamente no navegador do usuário, sem a utilização de backend próprio. Essa decisão foi motivada por restrições de tempo para o desenvolvimento da primeira versão funcional do sistema, permitindo a rápida implementação, testes e validação das funcionalidades essenciais.

A arquitetura *client-side* apresenta vantagens como menor custo de infraestrutura, simplicidade de implantação e maior agilidade no desenvolvimento inicial. Contudo, essa abordagem também impõe limitações, especialmente no que se refere à segurança das credenciais da API, uma vez que a chave de acesso precisa estar presente no código do cliente, tornando-se mais suscetível a uso indevido.

Em uma arquitetura com backend, essas credenciais poderiam ser protegidas no servidor, além de permitir maior controle sobre autenticação, persistência de dados, histórico de consultas e escalabilidade.

5.5. Tecnologias utilizadas

As principais tecnologias empregadas no desenvolvimento do produto foram:

- React.js – construção da interface e gerenciamento de estado;
- JavaScript (ES6+) – processamento dos dados e cálculos do Índice de Calor;
- API The Weather Company (IBM) – fonte de dados meteorológicos;
- Equação da NOAA – cálculo e classificação do Índice de Calor;
- HTML5 e CSS3 – estrutura e apresentação visual;
- GitHub – versionamento e armazenamento do código-fonte;
- Vercel – plataforma considerada para futura hospedagem e disponibilização da aplicação online.

5.6. Código Fonte do Produto

O código-fonte do produto tecnológico desenvolvido neste trabalho encontra-se disponibilizado em repositório público, com o objetivo de garantir transparência metodológica, reprodutibilidade e possibilidade de evolução futura da aplicação. O repositório está hospedado na plataforma GitHub e pode ser acessado em: <https://github.com/Monteiro-Jr-Dev/SIM-IC-Macae>.

Para fins de apresentação e validação do fluxo funcional da aplicação, foi definido de forma provisória o nome SIM-IC Macaé para o sistema, em consonância com a proposta conceitual apresentada nesta dissertação. Também foi considerado, em caráter preliminar, o domínio <https://simicmacae.vercel.app/> como possível endereço de hospedagem da aplicação.

Ressalta-se, entretanto, que, no momento da conclusão deste trabalho, o domínio mencionado tem caráter apenas indicativo e poderá não se encontrar ativo, uma vez que a hospedagem definitiva e a consolidação do ambiente de produção serão realizadas em etapa posterior. Dessa forma, tanto o domínio quanto a infraestrutura de disponibilização pública do sistema poderão ser ajustados

futuramente, sem prejuízo aos objetivos científicos e tecnológicos do produto apresentado.

Assim, o produto tecnológico deve ser compreendido como uma aplicação funcional em fase inicial de implementação, cujo foco principal nesta dissertação é a validação conceitual, metodológica e operacional do uso do Índice de Calor como ferramenta de visualização e comunicação do risco térmico urbano.

5.7. Público-alvo e aplicabilidade

O produto foi concebido para atender a diferentes públicos, incluindo gestores públicos profissionais das áreas de saúde, energia e planejamento urbano, instituições de ensino e pesquisa, além de usuários em geral interessados em compreender condições de desconforto térmico.

Sua aplicabilidade abrange o suporte a ações de monitoramento térmico, comunicação de risco, planejamento energético e definição de estratégias de adaptação climática, especialmente em municípios costeiros e tropicais, onde o calor úmido representa risco crescente à população.

5.8. Potencial de evolução do produto

Após a consolidação da versão inicial, está prevista a evolução da aplicação para uma arquitetura mais robusta, com a incorporação de uma camada de backend. Essa reestruturação permitirá maior segurança, controle sobre o uso da API externa, armazenamento histórico dos dados, escalabilidade do sistema e implementação de funcionalidades adicionais, como alertas automáticos e painéis analíticos.

Dessa forma, o produto tecnológico apresentado configura-se como uma ferramenta aplicada, escalável e alinhada às necessidades contemporâneas de adaptação ao aumento do estresse térmico, fortalecendo a integração entre ciência do clima, tecnologia e políticas públicas.

Além disso, o desenvolvimento da aplicação dialoga diretamente com a interface clima e energia explorada nesta dissertação, uma vez que o monitoramento do Índice de Calor subsidia a compreensão dos impactos do calor extremo sobre o consumo de energia elétrica, especialmente em edificações públicas sensíveis, como escolas e unidades de saúde. Assim, o produto tecnológico reforçar a aplicabilidade

dos resultados científicos, contribuindo para o planejamento energético, a adaptação climática e a gestão do risco térmico em escala municipal.

6. CONCLUSÃO

Os resultados desta dissertação demonstram que o estresse térmico em Macaé-RJ se configura como um fenômeno relevante no período analisado, com ocorrência de episódios críticos de calor nos verões recentes. A elevação dos valores do Índice de Calor (IC) observada entre os verões de 2022–2023 e 2024–2025 indica um aumento recente da severidade do estresse térmico em escala intraurbana, refletindo variabilidade interanual e a intensificação de eventos extremos, sem configurar evidência formal de tendência climática de longo prazo.

Os contrastes observados entre os bairros analisados evidenciam a heterogeneidade microclimática do município, com localidades apresentando maior exposição ao calor úmido e valores mais elevados de IC. Esses padrões são compatíveis com a influência de microcondicionantes urbanos, como características do entorno construído, ventilação natural, altitude e proximidade de corpos d'água, reforçando a necessidade de abordagens territorializadas para a avaliação do estresse térmico e para o planejamento urbano adaptativo.

Do ponto de vista da saúde pública, os resultados observacionais obtidos em Macaé dialogam com a literatura epidemiológica nacional, que aponta associação consistente entre calor extremo e aumento da mortalidade e morbidade por causas cardiovasculares e respiratórias. A ocorrência de valores elevados de IC, classificados nas categorias de maior risco segundo a NOAA, reforça a utilidade do Índice de Calor como indicador operacional para subsidiar ações preventivas, estratégias de comunicação de risco e protocolos específicos para eventos de calor extremo, especialmente voltados a grupos populacionais mais vulneráveis.

No setor energético, a análise integrada entre o Índice de Calor e o consumo de energia elétrica em edificações públicas indicou associação entre períodos de maior estresse térmico e aumento da demanda por climatização, com padrões distintos entre os setores analisados. No setor educacional, o calendário acadêmico exerce influência predominante sobre o consumo, embora tenha sido observado incremento relativo em verões mais quentes. No setor de saúde, a demanda energética mostrou-se sistematicamente maior no verão, evidenciando maior sensibilidade dessas unidades às condições de calor extremo. Trata-se de uma análise descritiva e correlacional, sem inferência causal, mas com relevância aplicada para o planejamento energético municipal.

A etapa prospectiva, utilizada de forma contextual, indicou que o agravamento futuro do estresse térmico projetado decorre principalmente do aumento da temperatura do ar, uma vez que a umidade relativa tende a se manter relativamente estável nos cenários analisados. Os cenários RCP 4.5 e, sobretudo, RCP 8.5 apontam para maior frequência e severidade de episódios de calor crítico ao longo do século XXI, reforçando a urgência de ações antecipatórias de adaptação urbana e setorial.

Como contribuição original desta dissertação, destaca-se a integração entre a análise observacional do estresse térmico em escala intraurbana, a avaliação de sua associação com o consumo de energia elétrica em edificações públicas sensíveis e o desenvolvimento de um produto tecnológico voltado à visualização e comunicação do risco térmico. A aplicação proposta traduz os resultados científicos em uma ferramenta prática de apoio à interpretação do Índice de Calor, ampliando a aplicabilidade dos achados para gestores públicos e tomadores de decisão.

As conclusões deste estudo devem ser interpretadas à luz de suas limitações metodológicas. A base observacional é composta por uma série temporal curta, restrita a três verões consecutivos, o que não permite a detecção formal de tendências climáticas de longo prazo. Da mesma forma, a análise energética não controla variáveis operacionais específicas das edificações avaliadas, devendo os resultados ser compreendidos como indicativos de associação observada, com caráter exploratório e aplicado.

Em síntese, o estresse térmico em Macaé-RJ apresenta-se como um desafio multidimensional, com implicações diretas para a saúde pública, o planejamento urbano e a gestão energética. Os resultados reforçam a necessidade de incorporar o Índice de Calor como variável estruturante no planejamento territorial e setorial, alinhando monitoramento climático, estratégias urbanas de adaptação e políticas públicas voltadas à redução de vulnerabilidades frente ao aumento da frequência de eventos de calor extremo.

6.1. Trabalhos Futuros

Como desdobramentos futuros, recomenda-se a ampliação da série temporal observacional, de modo a permitir análises estatísticas mais robustas e a investigação formal de tendências de longo prazo do Índice de Calor em Macaé-RJ. A incorporação

de um número maior de bairros e estações meteorológicas também poderá ampliar a representatividade espacial e aprofundar a análise intraurbana do estresse térmico.

No campo energético, estudos futuros poderão integrar um conjunto mais amplo de edificações e setores, bem como considerar variáveis operacionais, como padrões de ocupação, tipologia construtiva e eficiência dos sistemas de climatização, permitindo análises mais detalhadas da relação entre estresse térmico e consumo de energia elétrica.

Adicionalmente, a evolução do produto tecnológico desenvolvido neste trabalho, com a implementação de uma arquitetura com backend próprio, armazenamento histórico de dados e sistemas automatizados de alerta, poderá ampliar sua aplicabilidade como ferramenta de apoio à gestão pública, ao planejamento urbano e à comunicação de risco térmico.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDERSON, Brooke G.; BELL, Michelle L. Heat waves in the United States: mortality risk during heat waves and effect modification by heat wave characteristics in 43 U.S. communities. *Environmental Health Perspectives*, v. 119, n. 2, p. 210–218, 2011. DOI: 10.1289/ehp.1002313.
- AWASTHI, Amit; VISHWAKARMA, Kirti; PATTNAYAK, Kanhu Charan. Retrospection of heatwave and heat index. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 147, n. 1, p. 589–604, 2022.
- BARBOSA, Gisele Silva *et al.* Análise dos dados das estações meteorológicas de Macaé no período de verão (2022/2023) e da morfologia urbana dos seus entornos imediatos. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GESTÃO E ENGENHARIA URBANA, 4., 2023. *Anais [...]*.
- CBH MACAÉ. RD-01: Relatório de caracterização da área do estudo. Macaé: Comitê de Bacia Hidrográfica do Rio Macaé e das Ostras, 2020. Disponível em: <https://cbhmacae.eco.br/wp-content/uploads/2020/03/RD-01-Relat%C3%B3rio-de-Caracteriza%C3%A7%C3%A3o-da-%C3%81rea-do-Estudo.pdf>. Acesso em: 21 set. 2025.
- CASCAIS AMBIENTE. *Relatório de Progresso 2024: Plano de Ação para a Adaptação às Alterações Climáticas de Cascais (PA3C2)*. Cascais: Cascais Ambiente, 2024. Disponível em: https://ambiente.cascais.pt/sites/default/files/anexos/relprogpa3c2_2024_final.pdf. Acesso em: 21 set. 2025.
- CASCAIS AMBIENTE. *Relatório de Progresso 2022: Plano de Ação para a Adaptação às Alterações Climáticas de Cascais (PA3C2)*. Cascais: Cascais Ambiente, 2022. Disponível em: https://ambiente.cascais.pt/sites/default/files/anexos/relprogpa3c2_2022_final.pdf. Acesso em: 21 set. 2025.

- CASCAIS (Município). *Ondas de calor: como se proteger?* Cascais, 26 jun. 2025. Disponível em: <https://www.cascais.pt/noticia/ondas-de-calor-como-se-proteger>. Acesso em: 21 set. 2025.
- CHOU, Sin Chan *et al.* Assessment of climate change over South America under RCP4.5 and RCP8.5 downscaling scenarios. *American Journal of Climate Change*, v. 3, n. 5, p. 512–525, 2014.
- EBI, Kristie L. *et al.* Hot weather and heat extremes: health risks. *The Lancet*, v. 398, n. 10301, p. 698–708, 2021. DOI: 10.1016/S0140-6736(21)01208-3.
- FAN, Y.; WANG, J.; OBRADOVICH, N.; ZHENG, S. Intraday adaptation to extreme temperatures in outdoor activity. *Scientific Reports*, v. 13, p. 473, 2023.
- FERNÁNDEZ MEDINA, X. *et al.* Excess mortality associated with extreme heat in Rio de Janeiro, Brazil, November 2023. *The Lancet Regional Health – Americas*, v. 32, p. 100669, 2024. DOI: 10.1016/j.lana.2024.100669.
- GASPARRINI, A. *et al.* Mortality risk attributable to high and low ambient temperature: a multicountry observational study. *The Lancet*, v. 386, n. 9991, p. 369–375, 2015. DOI: 10.1016/S0140-6736(14)62114-0.
- GOMES, H. B. *et al.* Effect of meteorological variables on energy demand in some substations in Brazil. *Energies*, v. 17, n. 19, p. 4776, 2024. DOI: 10.3390/en17194776.
- HUANG, W. T. K. *et al.* Economic evaluation of temperature-related mortality attributable to urban heat islands in European cities. *Nature Communications*, v. 14, p. 7438, 2023. DOI: 10.1038/s41467-023-43135-z.
- HUSSAIN, M.; MAHMUD, I. pymanckendall: a Python package for non-parametric trend tests and change point detection in time series data. *Journal of Open Source Software*, v. 4, n. 39, p. 1556, 2019. DOI: 10.21105/joss.01556.

- INEA – INSTITUTO ESTADUAL DO AMBIENTE. *Elaboração do plano de recursos hídricos da região hidrográfica Macaé e das Ostras: Relatório de Caracterização da Região Hidrográfica Macaé e das Ostras (RD-01)*. Rio de Janeiro: INEA, 2012.
- INMET – INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Normais climatológicas do Brasil (1991–2020). Brasília: INMET, 2020. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/uploads/normais/NORMAISCLIMATOLOGICAS.pdf>. Acesso em: 21 set. 2025.
- INMET – INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Critério operacional de “onda de calor”. Brasília: INMET, 2023. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/noticias/inmet-emite-alerta-para-onda-de-calor-nos-pr%C3%B3ximos-dias>. Acesso em: 21 set. 2025.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). *The future of cooling: opportunities for energy-efficient air conditioning*. Paris: IEA, 2018. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-cooling>. Acesso em: 21 set. 2025.
- IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. *Climate change 2014: synthesis report*. Genebra: IPCC, 2014.
- KALKSTEIN, Laurence S.; VALIMONT, Kathleen M. An evaluation of summer discomfort in the United States using a relative climatological index. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 67, n. 7, p. 842–848, 1986. DOI: 10.1175/1520-0477(1986)067<0842:AEOSDI>2.0.CO;2.
- KENDALL, M. G. *Rank correlation methods*. 4. ed. London: Charles Griffin, 1975.
- KOVATS, R. S.; HAJAT, S. Heat stress and public health: a critical review. *Annual Review of Public Health*, v. 29, p. 41–55, 2008. DOI: 10.1146/annurev.publhealth.29.020907.090843.
- LEITÃO, M. M. V. B. R. *et al.* Conforto e estresse térmico em ovinos no Norte da Bahia. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 17, n. 12, p. 1355–1360, 2013.

- LOBELL, David B. et al. The critical role of extreme heat for maize production in the United States. *Nature climate change*, v. 3, n. 5, p. 497-501, 2013.
- LÓPEZ-BUENO, José Antonio *et al.* Health effects of summer extreme heat and humidity in urban Rio de Janeiro (Brazil) by demographic and educational level. *Urban Climate*, v. 62, p. 102524, 2025.
- LU, Yi-Chuan; ROMPS, David M. Is a wet-bulb temperature of 35 °C the correct threshold for human survivability? *Environmental Research Letters*, v. 18, n. 9, p. 094021, 2023.
- MARAUN, Douglas. Bias correction, quantile mapping, and downscaling: revisiting the inflation issue. *Journal of Climate*, v. 26, n. 6, p. 2137–2143, 2013.
- MANN, H. B. Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, v. 13, n. 3, p. 245–259, 1945.
- MCKINNEY, Wes. Data structures for statistical computing in Python. In: PYTHON IN SCIENCE CONFERENCE, 9., 2010. *Proceedings [...]*. p. 51–56.
- MILLER, N. L. *et al.* Climate, extreme heat, and electricity demand in California. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, v. 47, n. 6, p. 1834–1844, 2008. DOI: 10.1175/2007JAMC1480.1.
- MIRANDA, Vitor F. V. V. *et al.* Heat stress in South America over the last four decades: a bioclimatic analysis. *Theoretical and Applied Climatology*, v. 155, n. 2, p. 911–928, 2024.
- MORAIS, J. H. A. *et al.* Quantifying heat exposure and its related mortality in Rio de Janeiro City: evidence to support Rio's recent heat protocol. *medRxiv*, 2025. Preprint. DOI: 10.1101/2025.01.17.25320740.
- MORAIS, T. O. *et al.* Assessing cumulative heat exposure and mortality in Brazil: a DLNM approach applied to Rio de Janeiro (2012–2024). *Environmental Research*, v. 245, p. 118956, 2025. DOI: 10.1016/j.envres.2025.118956.

- MOREIRA, A. B. *et al.* Atmospheric conditions related to extreme heat and human comfort in the city of Rio de Janeiro (Brazil) during the first quarter of the year 2024. *Atmosphere*, v. 15, n. 8, p. 973, 2024.
- MOSS, R. H. *et al.* The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, v. 463, p. 747–756, 2010.
- NATIONAL WEATHER SERVICE (NWS). *Heat index*. NOAA, 2021. Disponível em: <https://www.weather.gov/safety/heat-index>. Acesso em: 21 set. 2025.
- OKE, Timothy R. *Boundary layer climates*. London: Routledge, 2002.
- PROSDOCIMI, D.; KLIMA, K. Health effects of heat vulnerability in Rio de Janeiro: a validation model for policy applications. *SN Applied Sciences*, v. 2, n. 1948, p. 1–11, 2020. DOI: 10.1007/s42452-020-03750-7.
- RAYMOND, Colin; MATTHEWS, Tom; HORTON, Radley M. The emergence of heat and humidity too severe for human tolerance. *Science Advances*, v. 6, n. 19, p. eaaw1838, 2020.
- REQUÍA, W. J. *et al.* Thermal comfort conditions and mortality in Brazil. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 21, n. 9, p. 1248, 2024.
- RIO DE JANEIRO (Município). *Plano de contingência – calor extremo 2021–2022*. Rio de Janeiro: Prefeitura da Cidade do Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: <https://prefeitura.rio>. Acesso em: 21 set. 2025.
- ROSENTHAL, Joyce Klein; KINNEY, Patrick L.; METZGER, Kristina B. Intra-urban vulnerability to heat-related mortality in New York City, 1997–2006. *Health & Place*, v. 30, p. 45–60, 2014.
- ROTHFUSZ, L. P. *The heat index “equation” (or, more than you ever wanted to know about heat index)*. NOAA Technical Attachment, SR 90-23, 1990.
- SANTAMOURIS, Matheos. *Energy and climate in the urban built environment*. London: Routledge, 2013.

- SCHNEIDER, Antonia E.; ZAWADZKI, Wojciech. Urban heat mitigation: a theoretical and empirical assessment of economic valuation approaches. *Journal of Environmental Economics and Policy*, v. 14, n. 3, p. 313–335, 2025.
- SEN, Pranab Kumar. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, v. 63, n. 324, p. 1379–1389, 1968. DOI: 10.1080/01621459.1968.10480934.
- SEPPÄNEN, Olli; FISK, William J.; LEI, Q. H. *Effect of temperature on task performance in office environment*. Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2006.
- SHARMA, Arabinda; KUMAR, Happy. Seasonal variation on electricity consumption of academic building – a case study. *Journal of Thermal Energy Systems*, v. 2, n. 2, p. 1–6, 2017.
- SHERWOOD, Steven C.; HUBER, Matthew. An adaptability limit to climate change due to heat stress. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 107, n. 21, p. 9552–9555, 2010.
- SIQUEIRA, José Ricardo *et al.* Análise temporal dos focos de calor nos municípios de Macaé-RJ e Campos dos Goytacazes-RJ no período de 2014 a 2018. *Research, Society and Development*, v. 11, n. 15, e37111536643, 2022. DOI: 10.33448/rsd-v11i15.36643.
- SILVEIRA, I. H. *et al.* Effects of heat waves on cardiovascular and respiratory mortality in Rio de Janeiro, Brazil. *PLOS ONE*, v. 18, n. 4, e0283899, 2023. DOI: 10.1371/journal.pone.0283899.
- SOUZA, Plínio *et al.* Influência das mudanças climáticas sobre as condições de trabalho no final do século XXI. *Ambiente & Sociedade*, v. 23, p. e00113, 2020.
- STEADMAN, Robert G. The assessment of sultriness. Part I: A temperature-humidity index based on human physiology and clothing science. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, v. 18, n. 7, p. 861–873, 1979. DOI: 10.1175/1520-0450(1979)018<0861:TAOSPI>2.0.CO;2.

TEIXEIRA, Luciana da Silva Costa; SOUZA, Tamiles Ferreira de. O papel da umidade relativa no índice de calor e consumo de energia em Macaé-RJ. In: CONGRESSO DE TRANSIÇÃO ENERGÉTICA DO NORTE FLUMINENSE, 1., 2024, Macaé. *Anais [...]*. Macaé: CTENF, 2024. ISBN 978-65-5465-131-8. Disponível em: <https://eventos.congresse.me/ctenf/edicoes/CTENF>. Acesso em: 21 set. 2025.

UNITED NATIONS. *Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development*. New York: United Nations, 2015. Disponível em: <https://sdgs.un.org/2030agenda>. Acesso em: 21 set. 2025.

UNITED NATIONS. *The Sustainable Development Goals Report 2019*. New York: United Nations, 2019. Disponível em: <https://unstats.un.org/sdgs/report/2019/>. Acesso em: 21 set. 2025.

WILBY, R. L. *et al. Guidelines for use of climate scenarios developed from statistical downscaling methods*. IPCC Task Group on Data and Scenario Support for Impact and Climate Analysis (TGICA), 2004.