

MAPEAMENTO CLIMÁTICO URBANO COMO INSTRUMENTO PARA A GESTÃO E PLANEJAMENTO URBANO DE FORTALEZA

Antonio Ferreira Lima Júnior

Universidade Federal do Ceará, Departamento de Geografia, Fortaleza, CE, Brasil
antoniojunior@ufc.com

Maria Elisa Zanella

Universidade Federal do Ceará, Departamento de Geografia, Fortaleza, CE, Brasil
elisazv22@gmail.com

RESUMO

Como consequência do processo de urbanização, o clima das cidades desenvolve características singulares, que interferem na qualidade de vida dos cidadãos. Este estudo objetivou aplicar o Mapeamento Climático Urbano para estabelecer Zonas Climáticas Urbanas, direcionando o planejamento da cidade de Fortaleza, tendo em vista os parâmetros de uso e cobertura do solo (UCMap), a temperatura de superfície da Terra (Landsat 8) e as condições de velocidade do vento (Global Wind Atlas), integralizando essas informações para estabelecer áreas homogêneas. Através de Sistema de Informações Geográficas, foram estabelecidas três zonas climáticas urbanas (UCZ 1, 2 e 3), onde se recomenda preservar e melhorar os ambientes, implementar algumas medidas de preservação e mitigação e implementar ações mitigadoras, respectivamente. As ações baseiam-se na interpretação das características das zonas, tendo em vista a vegetação, o sombreamento, o albedo e a carga térmica. Conclui-se que, o mapeamento climático urbano oferece aos planejadores urbanos e às autoridades governamentais os dados essenciais para tomar decisões que levem em conta as condições climáticas. A metodologia proposta para Fortaleza e os resultados apresentados mostram que o mapeamento pode ser reproduzido e ajustado com facilidade para auxiliar na tomada de decisões em diferentes cidades.

Palavras-chave: Clima urbano. Recomendações climáticas. Campo térmico.

URBAN CLIMATIC MAPPING AS AN TOOL FOR URBAN MANAGEMENT AND PLANNING IN FORTALEZA

ABSTRACT

Because of the urbanization process, the climate of cities develops unique characteristics that interfere with the quality of life of city dwellers. This study aimed to apply Urban Climate Mapping to establish Urban Climate Zones, guiding the planning of the city of Fortaleza, considering the parameters of soil use and coverage (UCMap), the surface temperature of the Earth (Landsat 8) and the wind speed conditions (Global Wind Atlas), integrating this information to establish homogeneous areas. Through the Geographic Information System, we established three urban climate zones (UCZ 1, 2 and 3), where we recommended preserving and improving the environments, implementing some preservation and mitigation measures and implementing mitigating actions, respectively. Based on the interpretation of the characteristics of the zones, the actions consider vegetation, shading, albedo and thermal field. We concluded that urban climate mapping provides urban planners and government authorities with essential data to make decisions that take into account climatic conditions. The methodology proposed for Fortaleza and the presented results show that it is easily possible to reproduce and adjust the mapping to assist in decision-making in different cities.

Keywords: Urban climate. Climate recommendations. Thermal field.

INTRODUÇÃO

Diante da atual configuração social, que propicia uma condição de valorização econômica dos espaços urbanos, considerar os aspectos ambientais constitui-se como um desafio para promover a qualidade de vida cidadina. Santos (1993) argumenta que as cidades brasileiras surgiram e cresceram por meio de um processo de urbanização que se mostrou incompleto, desorganizado, tendendo à exclusão e caracterizado por uma escassez quase total de planejamento urbano adequado. A urbanização no Brasil, portanto, desempenha um papel crucial na configuração da estrutura da sociedade moderna no país. As áreas

urbanas tornam-se o centro das atividades econômicas mais significativas e abrigam a maior parte da população (Brito; Pinho, 2012). A consolidação das cidades brasileiras como um fenômeno peculiar resultante do avanço do capitalismo, destacando tanto sua magnitude quanto sua natureza multifacetada, traz consigo uma série de impactos ambientais (Sposito, 1988).

De acordo com Monteiro (1976), as cidades representam o ponto de encontro mais intenso entre a humanidade e o ambiente natural, exercendo a maior transformação na paisagem natural, manifestando-se através de várias formas de poluição do ar, água, solo e subsolo, e também por meio de alterações na morfologia e na estrutura do ambiente urbano. Esse processo de urbanização exerce influência significativa sobre o clima regional, gerando características distintas na atmosfera denominadas clima urbano (Bryson; Ross, 1972; Chandler, 1965; Landsberg, 1981; Lowry, 1977; Oke, 1978).

O processo de urbanização causa uma significativa alteração no padrão de distribuição de calor na superfície (Souza; Silva; Silva, 2016). Nesse contexto, estudos sobre a compatibilidade entre a estrutura urbana e as condições climáticas locais têm recebido maior atenção. Brandão (2009) buscou desenvolver um método para avaliar o ambiente térmico nas áreas urbanas, visando fornecer orientações para o planejamento urbano. Amorim (2011) propõe uma análise do clima urbano através da identificação das ilhas de calor com medidas fixas, contribuindo para o planejamento urbano de cidades médias.

Diversos estudos abordam o clima urbano a partir de diferentes perspectivas, como a análise das ilhas de calor de superfície (Amorim, 2019; Barros; Lombardo, 2016; Porangaba; Amorim, 2019), a compreensão do conforto térmico (Silva Júnior *et al.*, 2013; Xavier; Oliveira; Fialho, 2021; Yin *et al.*, 2023) e a abordagem através das Zonas Climáticas Locais (Cardoso; Amorim, 2017; Fernandes; Masiero, 2020; Yang *et al.*, 2021). Esses estudos visam compreender a dinâmica do clima das cidades e sua interação com as infraestruturas urbanas e o planejamento das cidades.

Apesar dos esforços, a consideração climática urbana teve, no decorrer da história, um baixo impacto no planejamento (Schiller; Evans, 1991; Eliasson, 2000), sendo necessário construir um sistema interdisciplinar de informações espaciais (Ren *et al.*, 2010, como o Mapa Climático Urbano (*Urban Climatic Map* – UCMaP). Em meados das décadas de 1950 e 1960, na Alemanha, foi proposto pela primeira vez um sistema de mapeamento climático para fins de planejamento urbano. Ren (2015) menciona que a partir dos anos 1970, a Alemanha Ocidental aumentou suas iniciativas nas áreas geocientíficas, enfatizando a produção de mapas climáticos para o propósito de planejamento.

O sistema UCMaP é composto por uma série de camadas de entrada básicas, que contêm mapas analíticos de dados geográficos de terreno, informações sobre vegetação e parâmetros de planejamento (Ren *et al.*, 2010). O Mapa de Análise Climática Urbana (UC-AnMaP) fornece uma plataforma para informação e avaliação climática de uma cidade. Quando consideradas as estratégias de planejamento, essa abordagem oferece uma ferramenta de avaliação que aproveita dados espaciais disponíveis para propor estratégias para o planejamento urbano através de uma avaliação especializada e fundamentada em conhecimento.

He *et al.* (2015) aplicaram o UCMaP em conjunção com observações meteorológicas na cidade de Pequim, demonstrando a eficácia do modelo para o planejamento urbano. Este resultado está em linha com as conclusões de Albuquerque *et al.* (2022), que identificaram o modelo como uma ferramenta crucial, destacando a importância de aprimorar as discussões no campo do planejamento urbano para embasar decisões mais informadas.

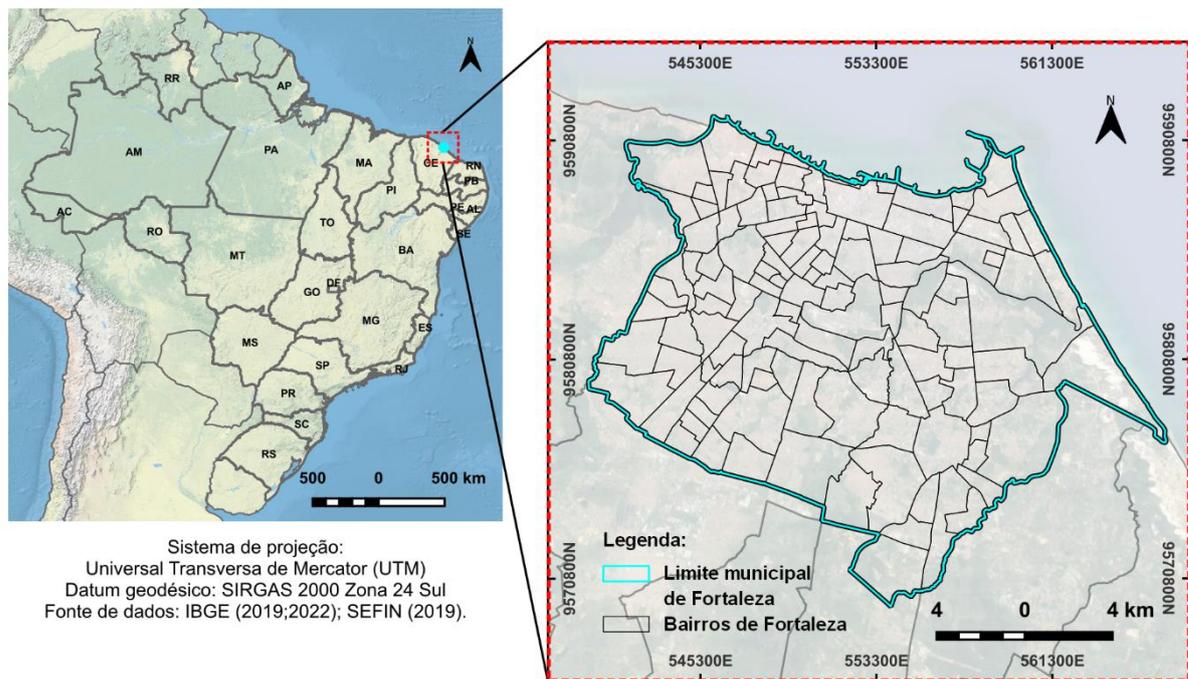
Diversos estudos relacionaram o UCMaP com as condições térmicas de superfície, determinando parâmetros de interpretação das diferentes zonas climáticas a partir da leitura térmica superficial (Ren *et al.*, 2012; Chen *et al.*, 2019; Barpete; Mehrotra, 2023). Essas interpretações, associadas às análises de temperatura do ar e velocidade dos ventos, servem de indicadores para a indicação de ações para o planejamento das cidades. Portanto, faz-se necessário integrar os dados de uso e cobertura do solo, temperatura, velocidade do vento entre outros, para identificar zonas homogêneas para direcionar ações de planejamento estratégico para as cidades.

Desta forma, este trabalho teve como principal objetivo estabelecer Zonas Climáticas Urbanas para direcionar o planejamento da cidade de Fortaleza, considerando os parâmetros de uso e cobertura do solo (UCMaP), a temperatura de superfície da Terra (Landsat 8) e as condições de velocidade do vento (*Global Wind Atlas*), integralizando essas informações para estabelecer áreas homogêneas. Em suma, foi utilizado Sistema de Informação Geográfica (SIG) para realizar os processamentos e estabelecer um roteiro metodológico.

ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi conduzido na cidade de Fortaleza, capital do estado do Ceará. Essa cidade está situada nas coordenadas centrais UTM 552409.32E e 9581533.31N, zona 24 Sul, SIRGAS 2000. (Figura 1). Ao Norte, Fortaleza é limitada pelo Oceano Atlântico e Caucaia; ao Sul, por Maracanaú, Pacatuba, Itaitinga e Eusébio; a Leste, por Eusébio, Aquiraz e novamente o Oceano Atlântico; e a Oeste, por Caucaia e Maracanaú. Pertencente à Região Metropolitana de Fortaleza (RMF), a cidade está integrada a outros 18 municípios.

Figura 1 - Localização geográfica do município de Fortaleza



Fonte: Os autores, 2024.

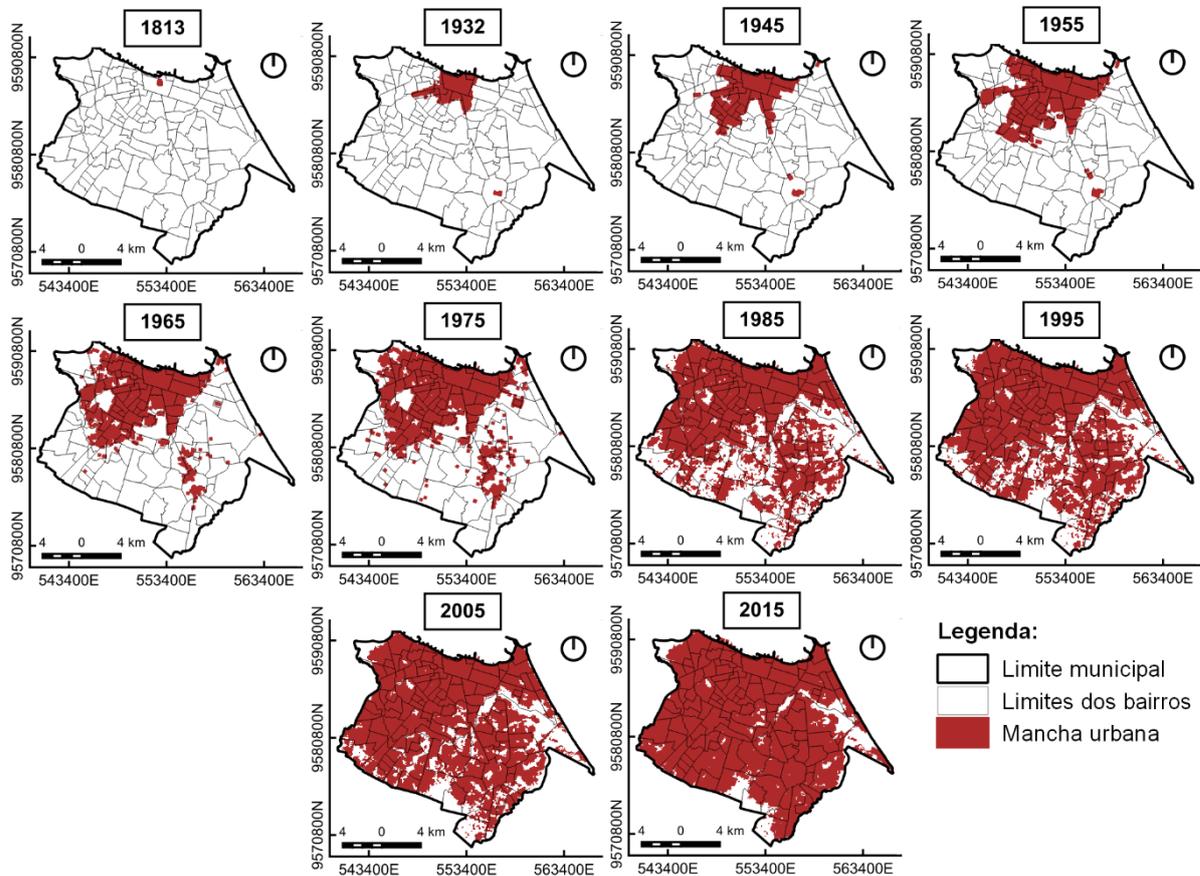
Fortaleza é reconhecida como uma das capitais mais importantes do Brasil. De acordo com a prévia do censo demográfico de 2022, divulgada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2024), a população de Fortaleza é de 2.428.678 habitantes, colocando-a como o quarto município mais populoso do Brasil. Com uma densidade populacional de 7.775,43 habitantes por km², Fortaleza é a oitava cidade mais densamente povoada do país e a líder nesse aspecto entre as capitais brasileiras. Nesse sentido, a cidade representa um relevante centro urbano, sem áreas rurais significativas e com grande quantidade de mudanças na paisagem. A substituição dos materiais que cobrem o solo é uma ocorrência comum em praticamente toda a extensão do município. Na Figura 2, é possível visualizar a evolução da ocupação urbana da cidade no decorrer do tempo.

Na primeira metade do século XIX, a ocupação de Fortaleza esteve intimamente ligada à economia algodoeira, iniciando assim seu processo de urbanização (Andrade, 2012). O crescimento da cidade iniciou-se na região em que hoje se delimita o centro comercial da cidade (1813), expandindo-se para o oeste e para o sul no decorrer do século XX. Quanto à ampliação do tecido urbano e ao início da verticalização, Fortaleza demonstra um notável aumento durante os anos 1970 e 1980, especialmente quando a Região Metropolitana de Fortaleza foi estabelecida oficialmente pela Lei Complementar Federal nº 14.

Costa (2007) afirma que a migração rural-urbana para Fortaleza experimentou um aumento significativo durante os anos 1980, mantendo-se também na década seguinte. A ausência de preparação e planejamento resultou em um aumento das ocupações na periferia da cidade, levando à formação de aglomerados subnormais com alta densidade populacional e pouca ou nenhuma infraestrutura básica, onde os estratos sociais mais desfavorecidos da população foram predominantemente localizados, especialmente nas áreas oeste e sul, próximas às vias férreas e às estradas que conectavam a cidade. Em contrapartida, nas regiões leste e sudeste, houve um notável aumento da valorização imobiliária, dando

início e fortalecendo os processos de verticalização, acompanhados pela oferta de serviços e de infraestrutura (Souza, 2006).

Figura 2 - Evolução da ocupação urbana do município de Fortaleza



Fonte: Fortaleza 2040. Elaboração: Os autores, 2024.

O intenso processo de urbanização, associado à ausência de planejamento adequado, fez com que as condições climáticas locais de Fortaleza se desenvolvessem de maneira singular, demandando estudos específicos sobre o clima urbano da cidade. Zanella e Claudino-Sales (2002), Malveira (2003), Moura (2007; 2008), Moura, Zanella e Sales (2008; 2010) e Lima Júnior (2023) descreveram as condições de temperatura e/ou conforto humano em Fortaleza, indicando que a cidade possui uma variedade de condições microclimáticas, influenciadas pelos padrões de uso e ocupação resultantes dos diversos processos de urbanização.

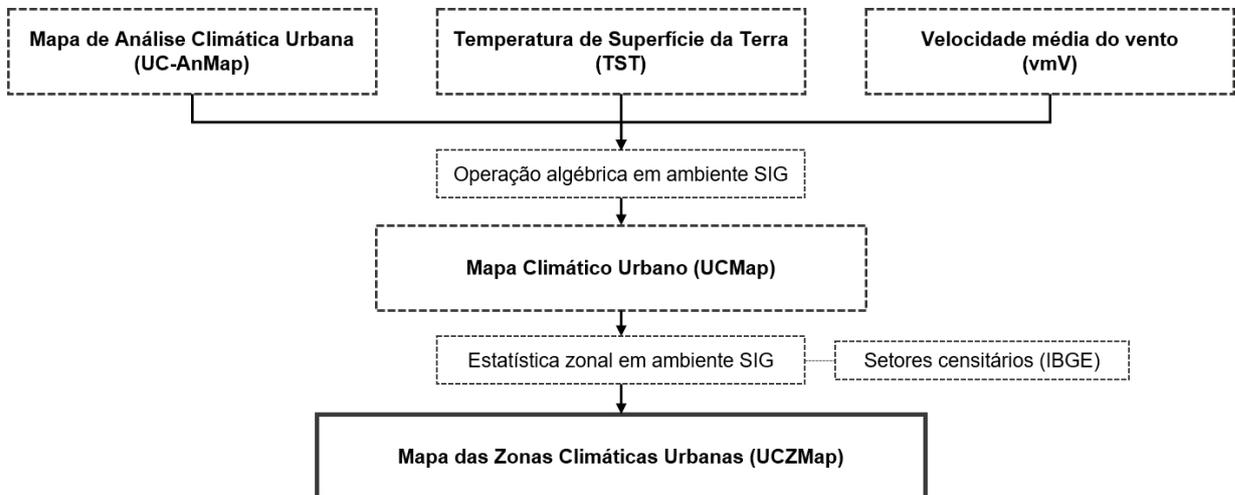
Em Fortaleza, as variações de temperatura entre os meses mais quentes e os mais frios raramente excedem os 2°C, sendo os meses de outubro, novembro e dezembro os mais quentes em média (cerca de 27,4°C). A principal influência na variabilidade climática do município é a quantidade de chuva, a qual é fortemente afetada pela Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), pelos Eventos *El Niño*-Oscilação Sul (ENOS) e pela Temperatura da Superfície do Mar (TSM) na região do Oceano Atlântico, pelos Vórtices Ciclônicos em Altos Níveis (VCAN), pelos Complexos Convectivos de Mesoescala (CCM), e pelas Ondas de Leste (OL), principalmente no primeiro semestre do ano. No segundo semestre, predominam condições de estabilidade atmosférica devido à influência da Massa Equatorial Atlântica (mEa). O comportamento dos ventos é diretamente influenciado pelos Ventos Alísios de Sudeste e pelos sistemas de brisas, ventos de escala local, sendo inversamente proporcional ao ritmo de evolução da precipitação, podendo alcançar velocidades médias mensais de até 4,8 m/s (Ferreira; Mello, 2005; Moura, 2008; Barbieri, 2014; Lima Júnior, 2023).

PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para as diferentes representações cartográficas foram coletadas características físicas e dados climáticos do município de Fortaleza. A condução do trabalho está resumida no fluxograma (Figura 3). Plataformas de Sistema de Informações Geográficas (SIG) livres foram utilizadas como principais ferramentas de análise para as características climáticas e de planejamento urbano. Para tanto, foram utilizados o *software* QGIS 3.28.10 e a plataforma on-line Google Earth Pro.

As camadas principais foram associadas através de álgebra de mapas, tendo como base a análise multicritério, tendo em vista a necessidade de integração de diversas variáveis para representar o fenômeno e alcançar o objetivo em questão (Moura, 2007). A álgebra de mapas é capaz de modelar a superfície da Terra com uma infinidade de camadas ou temas independentes e coincidentes, interagindo de acordo com modelos matemáticos e com base em observações do mundo real (Steinitz; Parker; Jordan, 1976). Sendo assim, as camadas utilizadas para construir o Mapa de Zonas Climáticas Urbanas (UCZMap) de Fortaleza correspondem ao UC-AnMap, TST e vmV.

Figura 3 - Fluxograma para a condução do estudo

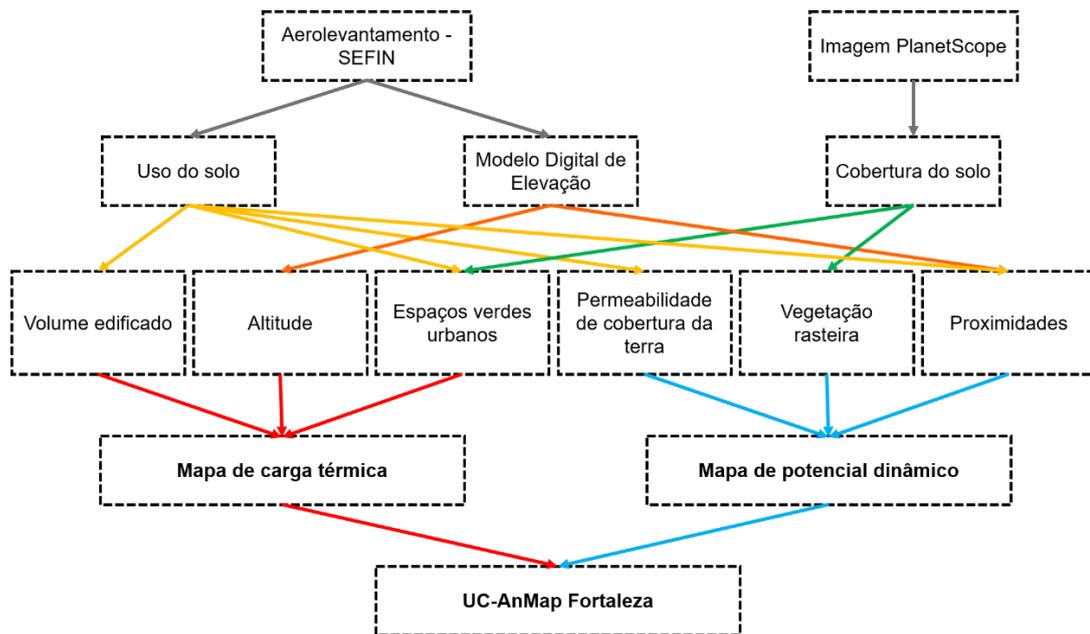


Fonte: Os autores, 2024.

Mapa de Análise Climática Urbana (UC-AnMap)

A partir de esquemas processuais de aplicação da metodologia (Ng *et al.*, 2009) foi necessário realizar uma coleta de dados para a caracterização geral da cidade, tendo em vista as características climáticas e urbanas, constituindo a construção das camadas que compõem o UC-AnMap, que são: volume edificado, espaços verdes urbanos, altimetria, permeabilidade da cobertura do solo, vegetação rasteira e proximidades. Através da soma dessas camadas, resultam-se os mapas de carga térmica e de potencial dinâmico (Figura 4).

Figura 4 - Metodologia de trabalho do UC-AnMap



Fonte: Os autores, 2024.

Tendo como base os trabalhos de Katschner (1997), Ribeiro (2013), Souza (2018), Lima Júnior (2018; 2023), Ferreira, Pimentel e Vianna (2019) e Barpete e Mehrotra (2023), foram avaliadas as variáveis utilizadas, elencando a realidade do município e a disponibilidade de dados. Sendo assim, foram definidas seis camadas para composição dos mapas de leitura climática: três referentes ao mapa de carga térmica e três para compor a interpretação do potencial dinâmico.

Os valores atribuídos para cada camada estão diretamente relacionados à interpretação de seus efeitos, tanto no ganho de calor quanto no arrefecimento, relacionados às cargas térmicas e potenciais dinâmicos. Na Tabela 1, é possível visualizar a descrição das camadas utilizadas, bem como os respectivos critérios físicos e efeitos sobre o clima urbano. Critérios físicos negativos recebem valores iguais ou acima de 0, uma vez que contribuem para o ganho de calor, enquanto aos critérios físicos positivos são inferidos valores abaixo de 0, tendo em vista sua capacidade dinâmica para o arrefecimento da atmosfera urbana do município de Fortaleza.

Tabela 1 - Descrição das camadas para construção do UC-AnMap

Balanco de energia	Camada	Dado utilizado	Critério físico	Aspecto no clima urbano
Carga térmica	1 – Volume edificado	Edificações (SEFIN)	Térmico (negativo)	Armazenamento de calor
	2 – Altitude	Curvas de nível (MDE/SEFIN)	Térmico (positivo)	Mitigação de efeitos adversos de aumento da carga térmica urbana
	3 – Espaços verdes urbanos	NDVI (PlanetScope) Parques e áreas verdes urbanas (SEUMA)	Térmico (positivo)	Resfriamento adiabático do ar em altas altitudes
Potencial dinâmico	4 – Permeabilidade urbana	Edificações (SEFIN)	Térmico e dinâmico (negativo)	Armazenamento de calor e redução dos fluxos de ar
	5 – Vegetação rasteira	NDVI (PlanetScope)	Dinâmico (positivo)	Movimento do ar
	6 – Proximidades	Massas de água Declividade (MDE/SEFIN)	Dinâmico (positivo)	Dinâmica da ventilação e arrefecimento

Fonte: Os autores, 2024.

Para a realização das operações algébricas em ambiente SIG, foi necessário normalizar os dados utilizados, que foram adquiridos em diferentes resoluções espaciais e formatos. Todas as camadas foram convertidas ou mantidas em formato matricial (raster), respeitando a resolução espacial de 30x30 metros por *pixel*. Todos os procedimentos de tratamento e conversão foram realizados no *software* SIG QGIS 3.28.10, por se tratar de uma ferramenta livre e de código aberto, permitindo sua utilização com maior acessibilidade.

A atribuição dos valores de acordo com a classe das camadas (Tabela 2) deu-se a partir da interpretação dos atributos como: potencial de ganho de calor, resfriamento adiabático do ar pela altitude, processos de evapotranspiração, escoamento das correntes de ar e proximidade de espaços abertos (Olgay, 1998; Ribeiro, 2013; Souza; Katzschner, 2018).

Tabela 2 - Critérios de reclassificação das camadas do UC-AnMap

Balanco de energia	Camada	Classes	Valor atribuído	
Carga térmica	1 – Volume edificado (porcentagem do volume)	>25%	4	
		10 – 25%	3	
		4 – 10%	2	
		0 – 4%	1	
		0%	0	
	2 – Altitude	<100 metros	0	
		>100 metros	-1	
3 – Espaços verdes urbanos		Sem vegetação	0	
		Espaços arborizados	-1	
		Parques urbanos	-2	
Potencial dinâmico	4 – Permeabilidade urbana (porcentagem coberta por edificações)	>50%	0	
		30 – 50%	-1	
		0 – 30%	-2	
		0%	-3	
	5 – Vegetação rasteira		Sem vegetação/vegetação densa	0
			Vegetação rasteira	-1
6 – Proximidades (massas d'água e declividades)		Baixa	0	
		Média	-1	
		Alta	-2	
		Muito alta	-3	

Fonte: Os autores, 2024.

O resultado da soma dos mapas de Carga térmica e Potencial dinâmico consiste no UC-AnMap, que sintetiza os elementos mapeados que interferem diretamente nas condições de ganho de calor e arrefecimento da atmosfera urbana da cidade de Fortaleza. Após a interpretação dessas variáveis, é necessário incluir os elementos climáticos pertinentes para a análise. Neste caso, pelas limitações de cobertura de estações, optou-se por utilizar a temperatura de superfície e a velocidade média do vento estimada, que somadas ao UC-AnMap, indicaram uma leitura mais coerente da realidade local, resultando no UCMMap de Fortaleza.

Temperatura de Superfície da Terra (TST)

Diversos estudos realizaram a análise da TST para compreender o clima em escala regional e local (Alhawiti; Mitsova, 2016; Peres *et al.*, 2018; Souto; Cohen, 2021), abordando os aspectos espaço-temporais da evolução das condições térmicas superficiais e sua relação com os padrões de uso e ocupação do solo urbano, sendo um elemento fundamental para compreender o fenômeno das ilhas de calor e do clima das cidades. Rajeshwari (2014) define a TST como a temperatura sentida ao toque das mãos à superfície da terra, sendo um dos parâmetros mais aceitos para a análises em diferentes áreas das ciências.

Neste estudo, foram utilizadas as bandas TIR 10 e TIR 11 do Landsat 8 para estimar a TST. Para obter os resultados da TST em graus Celsius, foi preciso realizar uma série de etapas para converter os coeficientes de reescalamento. O primeiro passo foi realizar a conversão dos níveis de cinza para radiancia espectral do Topo da Atmosfera (TOA). Os dados de calibração e a quantização dos coeficientes essenciais estão incluídos nos metadados do Landsat 8 (USGS, 2022). Em seguida, procedeu-se à transformação para Refletância e, por fim, obteve-se a temperatura de brilho do topo da atmosfera através da conversão dos dados da banda térmica em graus Kelvin, sendo então essencial converter para a unidade de graus Celsius. Os valores de TST são calculados a partir da Equação 1:

$$T = \frac{T_b}{1 + \left(k * \frac{T_b}{\rho}\right) \ln \varepsilon} \quad (1)$$

Em que T_b = temperatura de brilho, k = comprimento de onda de brilho emitido, ρ = constante e ε = emissividade. Os valores das variáveis foram obtidos através dos metadados das imagens, no arquivo MTL, em que as constantes de calibração térmica para as bandas B10 e B11 são: K1_CONSTANT_BAND_X (K1) e K2_CONSTANT_BAND_X (K2). Essa camada foi utilizada para representar a condição térmica real do município, complementando o mapa de carga térmica.

O satélite Landsat captura imagens na órbita de linha 217/caminho 63, que abrange o limite territorial da área de estudo em consideração. Essas capturas são realizadas a cada 16 dias, no horário local de 10h25min (considerando -3h GMT). No entanto, essa frequência de captura limita análises periódicas devido à instabilidade climática causada pela presença de nuvens densas em certos períodos do ano sobre a área de estudo.

Os passos descritos foram executados usando algoritmos na plataforma *Google Earth Engine* (GEE), que oferece acesso às camadas e coleções de imagens dos satélites estudados na nuvem, acessando os dados disponíveis nos metadados das imagens. O GEE é uma plataforma que agiliza o processamento de vastas séries de dados geoespaciais, incluindo produtos Landsat e outros. Através dela, usando as linguagens de programação Python e Java, é possível realizar operações algébricas nas imagens de satélite, gerando uma variedade de informações e produtos em diferentes formatos (Gorelick *et al*, 2017). Neste estudo, optou-se por usar o GEE para adquirir a base de dados de sensoriamento remoto, a qual foi refinada através do aplicativo SIG QGIS 3.28.10.

Velocidade Média do Vento (vmV)

Informações sobre o ambiente eólico existente foram utilizadas para preparar a camada de vento (vmV), uma camada importante para um zoneamento climático urbano coerente, principalmente na região em que se localiza a cidade de Fortaleza. O potencial eólico pode ser utilizado para reduzir o aquecimento térmico de uma área urbana. Sendo assim, as condições de vento existentes foram calculadas a partir do *Global Wind Atlas*, em que foram descarregados arquivos matriciais da plataforma on-line e usados como parâmetro de potencial de resfriamento para mapeamento sensível ao clima da área de estudo.

Os dados foram baixados com resolução de 150 m, de onde foram extraídos os pontos centrais dos *pixels*, e foi realizado um procedimento de interpolação para padronizar a resolução com as outras fontes de dados descritas da Tabela 1 (30 m). Os procedimentos para elaboração do mapa de velocidade média do vento foram realizados no *software* QGIS 3.28.10.

Mapa Climático Urbano e Mapa de Zonas Climáticas Urbanas (UCZMap)

O UCMap é preparado usando a carga térmica e o potencial dinâmico (UC-AnMap). Com base nos indicadores de potencial de aquecimento e arrefecimento, os mapas são preparados para entender a distribuição espacial dos indicadores e permitem a análise de sensibilidade climática usando o sistema baseado em SIG, a partir de uma análise de adequabilidade. O primeiro passo para a indicação das zonas climáticas urbanas é o cálculo para obtenção do UCMap, integrando o UC-AnMap, a TST e a vmV, traduzindo os aspectos de uso do solo e os atributos climáticos verificados. O UCMap pode ser considerado como o resultado da Equação 2, executada em ambiente SIG através da calculadora raster, como procedimento da álgebra de mapas.

$$UCMap = ((2 * UCAnMap) + TST) - vmV \quad (2)$$

Após a aplicação da álgebra para obtenção do UCMap, o resultado do processamento é submetido à função de estatística zonal do QGIS, a partir da unidade administrativa de setor censitário estabelecida pelo IBGE. Cumprindo o objetivo de aplicação na gestão e planejamento urbano, o setor censitário mostra-se eficiente para a adoção de políticas públicas em decorrência da escala espacial.

De acordo com o IBGE (2024), a criação da Malha de Setores Censitários segue as diretrizes estabelecidas na Constituição Federal de 1988, especialmente no que diz respeito à estrutura político-administrativa do país, levando em consideração as competências atribuídas a estados e municípios na definição dos limites municipais, como descrito a seguir:

O Setor Censitário é a unidade territorial de coleta e divulgação de dados estatísticos do IBGE. Cada setor censitário corresponde a uma porção em que o território nacional é fragmentado, considerando-se as estruturas territoriais, para permitir o levantamento de estatísticas nos prazos estabelecidos para a coleta. São identificados por um geocódigo único em nível nacional, composto a partir dos geocódigos do Subdistrito, do Distrito, do Município, do Estado e da Grande Região em que cada setor está inserido. É a unidade territorial de coleta dos Censos Demográficos (IBGE, 2024, p. 13).

Foi estabelecido o cálculo da mediana dos *pixels* inseridos nos limites de cada setor censitário do município de Fortaleza, totalizando 4.346 setores censitários. O resultado da estatística zonal foi agrupado em 6 classes, de acordo com intervalos iguais das respectivas medianas, agrupando as características de uso do solo, temperatura de superfície e padrão de velocidade do vento, sendo possível indicar medidas de conservação e mitigação para os efeitos adversos do campo térmico do clima urbano.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O mapa de carga térmica foi elaborado levando em consideração dois fatores principais. O primeiro envolve a capacidade de retenção de calor devido à presença e concentração de grandes volumes de edifícios, o que pode resultar em efeitos climáticos adversos ao aumentar o calor. O segundo fator diz respeito à capacidade de redução térmica proporcionada pela vegetação e pela variação de altitude, ajudando a reduzir a temperatura nas áreas urbanas. Em Fortaleza, o mapa de carga térmica (Figura 5) é dividido em sete classes, com valores variando de -2 a 4. Essas classes representam a capacidade dos elementos analisados de reduzirem ou aumentarem a temperatura do ar, com base na capacidade de reter calor, considerando as características da superfície na região urbana da cidade.

Assim como constatado em outros estudos (Peterson; Owen, 2005; Kotharkar; Surawar, 2015; Chen; Lin; Lin, 2017), as áreas da cidade com maior densidade populacional e as áreas centrais concentram valores elevados de carga térmica também em Fortaleza, onde os espaços abertos e com densidade considerável de cobertura vegetal indicam os menores valores (negativos), denotando um baixo potencial de carga térmica, o que ajuda a diminuir o estresse térmico urbano.

Os efeitos positivos estão associados aos impactos bioclimáticos gerados pela presença de vegetação de pequeno porte, que proporciona uma superfície mais irregular, permitindo uma melhor circulação do ar. Além disso, áreas próximas a corpos d'água e regiões com inclinação superior a 40% também contribuem positivamente para o potencial dinâmico, pois criam ambientes favoráveis e influenciam diretamente a circulação do vento na cidade. Ao examinar o mapa de potencial dinâmico (Figura 5), nota-se que Fortaleza desfruta de uma posição privilegiada em termos de circulação de ventos. O mapa apresenta sete classes, com variação de -6 a 0, sendo -6 a classe com o maior potencial dinâmico e 0 com o menor.

Duarte *et al.* (2015) indica que o aquecimento do ar é inversamente proporcional à vegetação, sendo essas áreas as que propiciam maior arrefecimento pelo potencial dinâmico. Os ambientes de vales dos rios, que mantêm na cidade de Fortaleza grande parte da vegetação remanescente em relação ao restante da cidade, associados aos corpos hídricos, destacam-se como importantes locais com valores significativos de potencial dinâmico através do fluxo do vento, realidade verificada também em outros estudos ao redor do mundo (Fahmy; Sharples, 2009; Sasaki *et al.*, 2018).

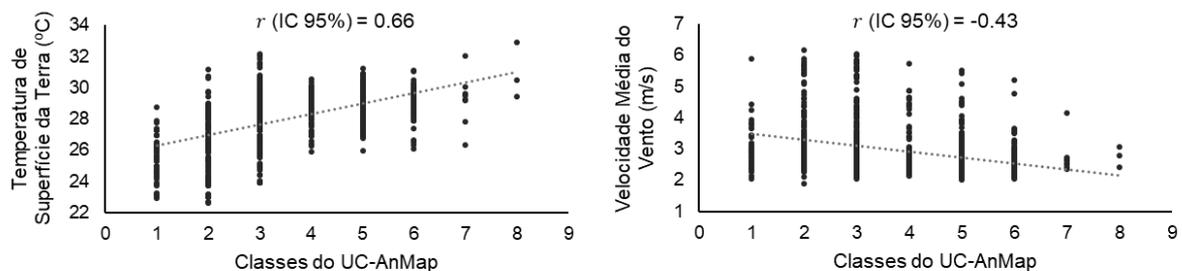
É necessário compreender que a interpretação do UC-AnMap já é capaz de estabelecer certas diretrizes para o planejamento das cidades, uma vez que o procedimento metodológico consiste em um primeiro passo para o entendimento do clima local, oferecendo suporte para futuras tomadas de decisão, tendo em vista as particularidades verificadas pelas camadas de carga térmica e potencial dinâmico (Freitas *et al.*, 2021; Moura *et al.*, 2022). Essa realidade é semelhante ao resultado verificado em Fortaleza, onde é possível definir ações voltadas para o uso do solo a partir da leitura do UC-AnMap.

É preciso, então, complementar as informações de uso do solo com dados climatológicos do ambiente citadino. Sabendo da deficiência da coleta de dados meteorológicos *in situ* em diversas regiões do globo e também no Brasil, principalmente em escala local, optou-se por utilizar produtos de modelagem e sensoriamento remoto para compor as análises do Mapeamento Climático Urbano, uma vez que a aquisição e tratamento desses dados é simples e acessível. Para essa operação, optou-se por utilizar a TST para representar a função da carga térmica da cidade e a vmV indicando a questão dinâmica, de acordo com o padrão do vento, tendo em vista sua velocidade média, sendo possível estabelecer relações estatísticas entre as variáveis.

A partir da correlação de Pearson, foi possível estabelecer uma relação linear entre os valores de TST e vmV e as classes do UC-AnMap, cujo teste descrito por Spiegel (1972) leva em consideração as variáveis mencionadas (X e Y) e o número de observações (n). O coeficiente de correlação de Pearson, representado por r , avalia tanto a direção quanto a intensidade da relação entre duas variáveis, variando de -1 a 1. Um valor de -1 indica uma relação negativa perfeita, significando que quando uma variável aumenta, a outra diminui consistentemente. Um valor de 1 indica uma relação positiva perfeita, sugerindo que ambas as variáveis aumentam ou diminuem juntas de forma consistente. Um coeficiente de correlação próximo de zero indica uma relação fraca ou inexistente entre as variáveis.

O teste foi aplicado para as combinações UC-AnMap/TST e UC-AnMap/vmV e os resultados podem ser visualizados nos gráficos da Figura 6. A TST apresentou padrão linear proporcional, ou seja, quanto maior a classe do UC-AnMap, maior a temperatura superficial identificada, indicando maior potencial de ganho de calor, enquanto a vmV foi inversamente proporcional ao UC-AnMap, em que as maiores velocidades do vento correspondem aos valores mais baixos do mapeamento climático, indicando seu potencial dinâmico.

Figura 6 - Resultado da correlação de Pearson (UC-AnMap/TST/vmV)

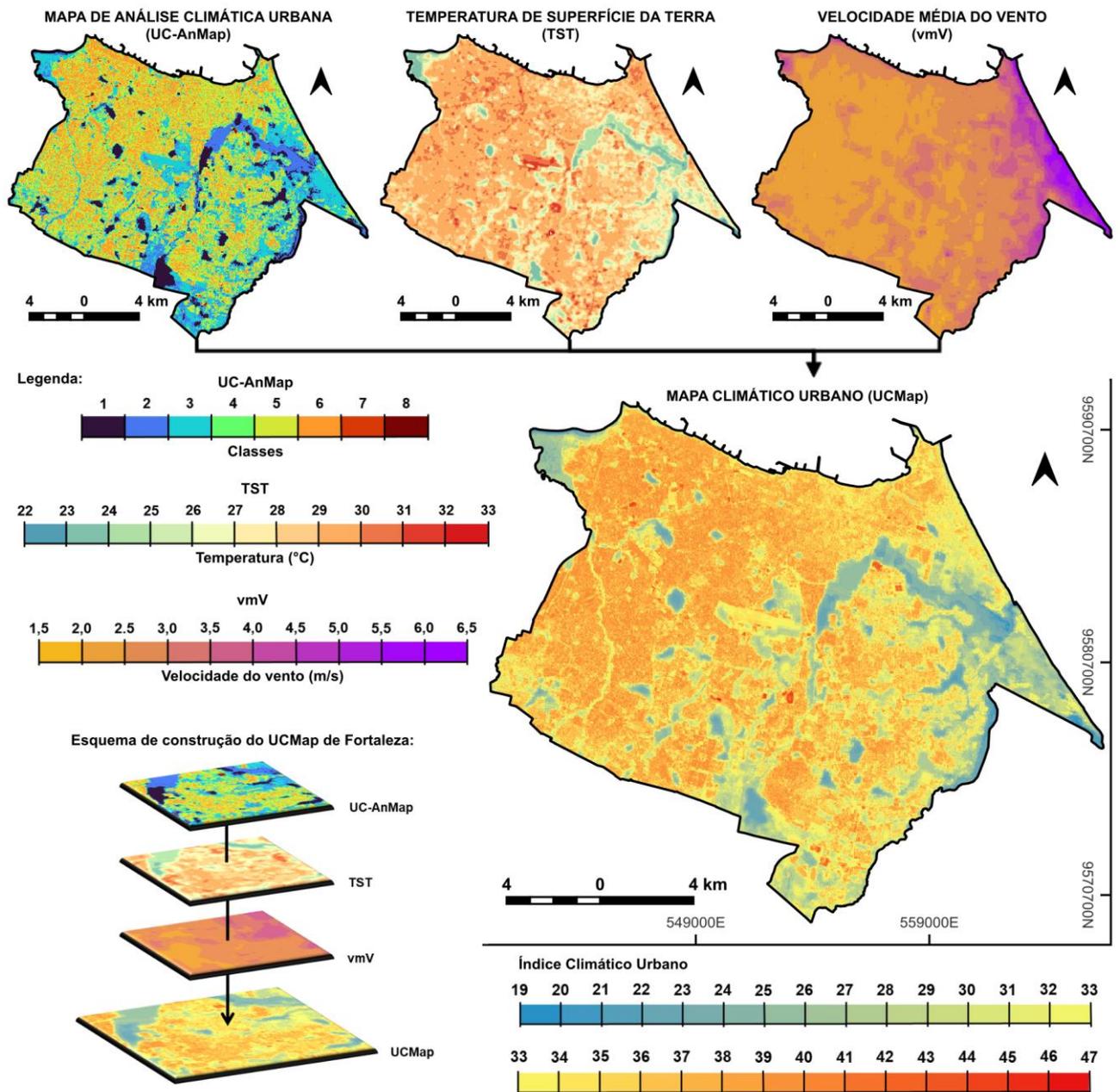


Fonte: Os autores, 2024.

Esse comportamento também é notável através da análise dos mapas. A Figura 7 ilustra o UC-AnMap, a TST e a vmV para a cidade de Fortaleza. A TST para o ano de 2020 variou de 22,2°C a 32,6°C, onde os ambientes naturais registraram as menores temperaturas, sendo possível visualizar no Leste uma maior concentração de temperaturas superficiais mais amenas. Esse setor da cidade também apresenta as áreas com maior velocidade do vento, podendo alcançar até 6,5 m/s, devido à influência dos ventos alísios, que sopram predominantemente de leste/sudeste.

A partir da integração das três variáveis (UC-AnMap/TST/vmV), por meio da álgebra de mapas em ambiente SIG, foi desenvolvido o Mapa Climático Urbano da cidade de Fortaleza (Figura 7). Essa camada integraliza, através de uma operação algébrica, as variáveis anteriores, resultado em um Índice Climático Urbano, refletindo aspectos de uso e cobertura do solo, o campo térmico e o potencial dinâmico do território fortalezense.

Figura 7 - Esquema de construção do UCMMap de Fortaleza (UC-AnMap/TST/vmV)



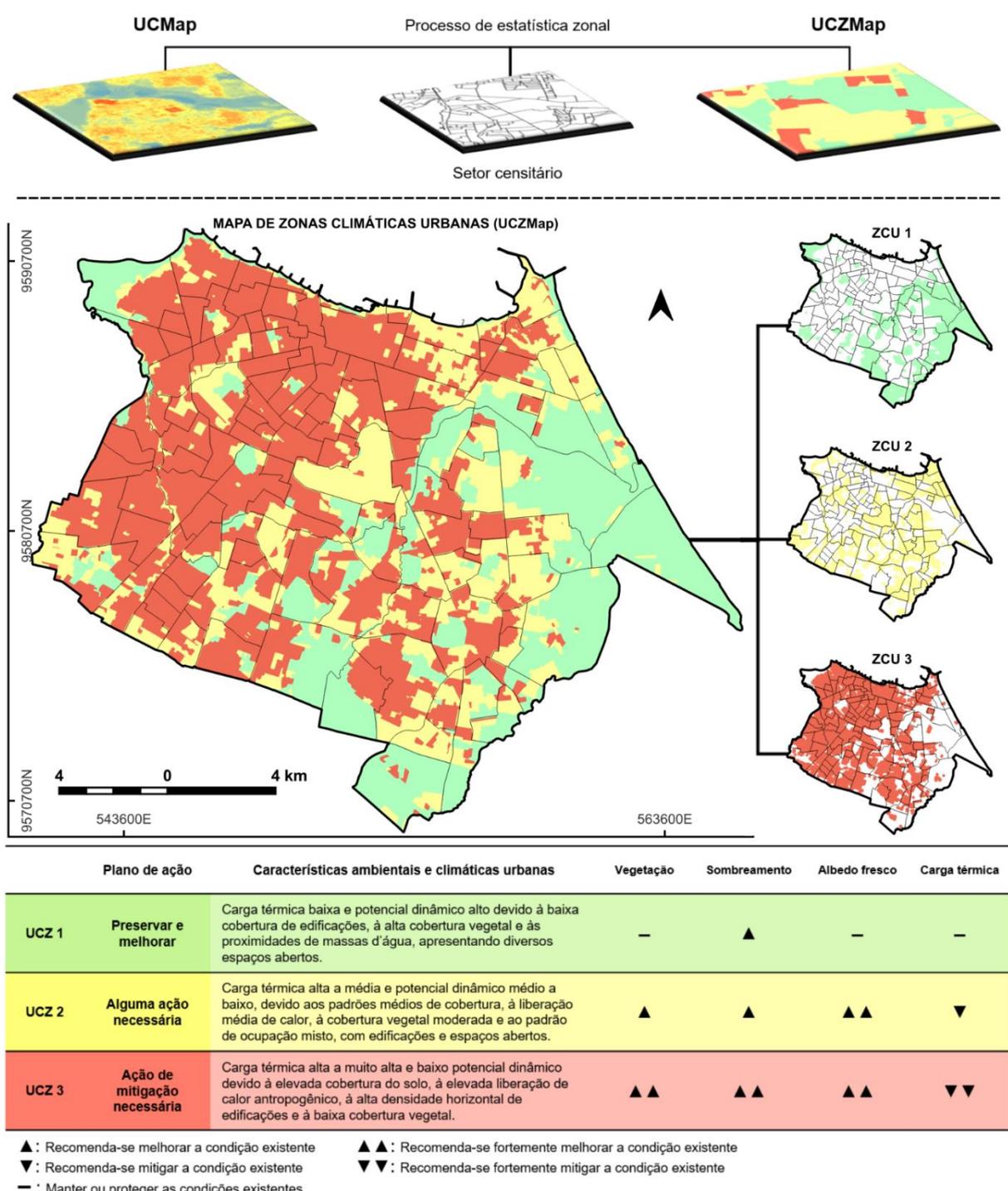
Fonte: Os autores, 2024.

O UCMMap representa bem a realidade climática urbana da cidade de Fortaleza. No entanto, seu caráter delimitador não é capaz de indicar áreas específicas para implementação de políticas públicas, sendo necessário um processo de releitura e reclassificação dos indicadores para definir zonas específicas para atuação do poder público e dos planejadores urbanos. Sabendo disso, foi realizado processo de estatística zonal, utilizando-se como unidade espacial os setores censitários do IBGE.

O Índice Climático Urbano do UCMMap foi submetido aos cálculos estatísticos de média, mediana, valores mínimos, máximos e variância, para compreender o comportamento do indicador dentro dos limites vetoriais dessa unidade administrativa. Dentre as medidas calculadas, a mediana mostrou-se mais adequada para a representação do indicador, sendo eleita a variável para a reclassificação dos valores. O resultado foi reclassificado em três unidades zonais, tendo em vista o agrupamento em intervalos iguais do *range* de valores verificados. O resultado dessa reclassificação gerou três Zonas Climáticas Urbanas (*Urban Climatic Zones – UCZ*), baseadas no trabalho de Ren *et al.* (2012), indicando níveis de ações para o planejamento

urbano de acordo com as características climáticas urbanas identificadas. A síntese desse processamento é representada pelo Mapa de Zonas Climáticas Urbanas (UCZMap), ilustrado na Figura 8.

Figura 8 - Mapa de Zonas Climáticas Urbanas (UCZMap) de Fortaleza



Fonte: Os autores, 2024.

A UCZ 1 representa as áreas de menor potencial de carga térmica, com presença de arborização densa, associada principalmente aos vales fluviais, às massas d'água e aos espaços abertos. Essa zona representa um total de 19,07% do território fortalezense, cobrindo uma área de 61,6 km². Com cargas térmicas baixas, muitos elementos de potencial dinâmico, temperaturas superficiais mais amenas e velocidade dos ventos

relativamente elevadas, recomenda-se que nessas zonas haja a preservação, a manutenção e a melhora de seus elementos naturais.

A UCZ 2 consiste em territórios mistos, onde existe uma moderada carga térmica e alguns elementos de potencial dinâmico. São consideradas áreas de maior heterogeneidade espacial, uma vez que a ocupação é composta por zonas residenciais verticalizadas e de expansão (loteadas). Os elementos mapeados indicam a necessidade de implementação de algumas ações de mitigação e preservação dos recursos. Essa zona ocupa cerca de 36,09% da área total de Fortaleza, representando um território de 116,5 km² espalhado pela cidade, com uma concentração mais homogênea entre o centro/leste da cidade.

A UCZ 3 indica as áreas de maior prioridade para implementação de medidas mitigadoras, sendo composta por setores altamente adensados por edificações, com ausências significativas de massas vegetacionais e hídricas, tendo em vista a grande pressão por território devido ao processo de urbanização. São os espaços com maior carga térmica e menor potencial dinâmico, de acordo com a análise do uso do solo. A temperatura de superfície elevada e a velocidade dos ventos reduzida interferem para o processo climático urbano, impactando negativamente para o campo térmico local. Essa zona ocupa uma área de 144,8 km², representado 44,84% do total da cidade de Fortaleza, sendo a zona mais representativa.

A partir da definição das zonas, é possível traçar estratégias de proteção e mitigação dos efeitos adversos da temperatura no ambiente cidadão. O sombreamento da estrutura e a vegetação urbana afetam o armazenamento da radiação solar durante o dia, contribuindo significativamente para a mitigação do estresse térmico (Wang; Berardi; Akbari, 2016), mostrando-se muitas vezes a medida mais eficaz para enfrentar e mitigar as ilhas de calor urbanas (Nuruzzaman, 2015).

A utilização de materiais construtivos e pavimentos mais frescos, principalmente através da condição do albedo, é fundamental para a mitigação do estresse térmico (Ifeey *et al.*, 2023). Synnefa *et al.* (2008) relatam que o padrão construtivo das edificações e seus respectivos albedos interferem intensamente para atenuação do estresse térmico, em que materiais frios e de cores frias recém-desenvolvidos podem ter impacto na mitigação das ilhas de calor. Os efeitos e benefícios dos pavimentos reflexivos, permeáveis e frios são estratégias para a amenização das questões climáticas urbanas, cuja aplicação corrobora para um planejamento urbano sustentável (Wang *et al.*, 2021). Levando-se em conta as prioridades e as ações a serem implementadas, é possível definir estratégias de planejamento, tendo como referência os aspectos climáticos urbanos da cidade de Fortaleza.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

É crucial que as autoridades e os planejadores do urbanismo considerem atentamente os parâmetros climáticos ao desenvolver o planejamento urbano, especialmente em cidades como Fortaleza, cujo clima local tende a gerar estresse térmico devido à sua localização geográfica. Infelizmente, muitas vezes, os estudos sobre o clima urbano são negligenciados durante a elaboração dos planos legais de desenvolvimento local, pois enfrentam dificuldades para integrar medidas no local e para harmonizá-las com as estruturas administrativas da cidade.

O estudo proposto ressalta a importância do mapeamento climático urbano, uma abordagem relativamente simples que pode auxiliar os planejadores a compreenderem melhor os diferentes padrões climáticos dentro da cidade. Esse mapeamento fornece uma base técnica sólida para a formulação de políticas e recomendações urbanas, fundamentadas nos atributos climáticos específicos da região. Ao integrar informações espaciais sobre o uso da terra, a cobertura do solo, a temperatura da superfície e os padrões de ventilação, é possível obter uma análise detalhada e abrangente dos atributos climáticos urbanos, essencial para o desenvolvimento de estratégias eficazes de planejamento urbano.

Essa pesquisa demonstrou que: o mapeamento climático urbano oferece um arcabouço de informações para compreensão do clima urbano, utilizando dados geoespaciais; há a necessidade de integração entre os elementos de uso do solo e as variáveis climáticas; os dados de sensoriamento remoto e modelagem, como TST e vmV, correlacionam-se com o mapeamento climático urbano, podendo ser utilizados para suprir a falta de dados coletados em superfície; é possível, através da integração de variáveis, definir um zoneamento climático urbano com base nos parâmetros analisados; a leitura do mapeamento climático urbano é eficaz para definição de estratégias para proteção e mitigação dos atributos identificados.

Na prática, o UCMaP fornece aos planejadores e ao governo informações necessárias para tomar decisões sensíveis ao clima. A metodologia sugerida no estudo e os resultados demonstram que o mapa climático urbano poderia ser facilmente replicado e adaptado para a tomada de decisões em outras cidades

brasileiras. Destaca-se a importância de avançar nas análises sazonais do fenômeno, através da temporalidade dos atributos climáticos, o que constitui um grande desafio para a aplicação da metodologia.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, F. R. de; DOS SANTOS, J. S.; LOPES, W. R. L.; ZANELLA, M. E. Uma discussão metodológica da viabilidade dos mapas climáticos urbanos para o planejamento urbano-ambiental. **Revista Brasileira De Climatologia**, v.31, n. 18, p. 879–908, 2022. <https://doi.org/10.55761/abclima.v31i18.15736>.
- ALHAWITI, R. H.; MITSOVA, D. Using Landsat-8 data to explore the correlation between urban heart island and urban land uses. **IJRET: Int. J. Res. Eng. Technol.**, v.5, n. 3, p. 457-466, 2016. <https://doi.org/10.15623/ijret.2016.0503083>
- AMORIM, M. C. C. T. Climatologia e Gestão do Espaço Urbano. **Mercator**, Fortaleza, v. 9, n. 1, p. 71 a 90, jan. 2011.
- AMORIM, M. C. C. T. Ilhas de calor superficiais: frequência da intensidade e variabilidade espacial em cidade de clima tropical continental. **Geo UERJ**, Rio de Janeiro, n.34, 2019. <https://doi.org/10.12957/geouerj.2019.40959>.
- ANDRADE, M. J. F. S. **Fortaleza em perspectiva histórica: poder público e iniciativa privada na apropriação e produção material da cidade 1810-1933**. (Tese de Doutorado). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.
- BARBIERI, G. M. L. **Eventos de chuva extrema associados a sistemas atmosféricos de escala sinótica e escala local no estado do Ceará**. (Tese de Doutorado). Fortaleza: PPGG/UFC- Programa de Pós-Graduação em Geografia, 2014.
- BARPETE, K.; MEHROTRA, S. Climate-Informed Planning through Mapping of Urban Thermal Load and Cooling Potential: Case of Tropical City of Bhopal. **Journal of the Indian Society of Remote Sensing**, v. 51, n. 7, p. 1375–1391, 2023. <https://doi.org/10.1007/s12524-023-01710-3>.
- BARROS, H. R.; LOMBARDO, M. A. A ilha de calor urbana e o uso e cobertura do solo em São Paulo-SP. **Geosp – Espaço e Tempo (On-line)**, v. 20, n. 1, p. 160-177, 2016. <https://doi.org/10.11606/issn.2179-0892.geosp.2016.97783>
- BRANDÃO, R. **As interações espaciais urbanas e o clima**. São Paulo. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo — Faculdade de Arquitetura e Urbanismo), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.
- BRITO, F. A.; PINHO, B. A. T. D. **A dinâmica do processo de urbanização no Brasil, 1940-2010**. Texto para discussão, 464. Belo Horizonte, UFMG/Cedeplar, 2012.
- BRYSON, R. A., ROSS, J. E. **The climate of the city. Urbanization and environment**, Belmont: Duxbury Press, 1972.
- CARDOSO, R.; AMORIM, M. C. C. T. Estimativa da distribuição espacial da temperatura do ar com base em zonas climáticas locais (LCZ) e modelos de regressão. **Revista de Geografia e Ordenamento do Território (GOT)**, n. 12, p. 75-99, 2017. <https://doi.org/10.17127/got/2017.12.004>
- CHANDLER, T. J. **The climate of London**. London: Hutchison of London, 1965.
- CHEN, Y. C.; LIN, T. P.; LIN, C. T. A simple approach for the development of urban climatic maps based on the urban characteristics in Tainan, Taiwan. **Int J Biometeorol**, v. 61, p. 1029–1041, 2017. <https://doi.org/10.1007/s00484-016-1282-0>.
- CHEN, Y.; LO, T.; SHIH, W.; LIN, T. Interpreting air temperature generated from urban Climatic map by urban morphology in Taipei. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 137, p. 2657–2662, 2019. <https://doi.org/10.1007/s00704-018-02764-x>.

- COSTA, M. C. L. Fortaleza: expansão urbana e organização do espaço. In: BORZACCHIELLO, J.; CAVALCANTE, T.; DANTAS, E. (Org.). **Ceará: um novo olhar geográfico**. 2ª edição. Fortaleza: Edições Demócrito Rocha, 2007. p. 51-100.
- DUARTE, D. H. S.; SHINZATO, P.; GUSSON, C. dos S.; ALVES, C. A. The impact of vegetation on urban microclimate to counterbalance built density in a subtropical changing climate. **Urban Climate**, v. 14, p. 224–239, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2015.09.006>.
- ELIASSON, I. The use of climate knowledge in urban planning. **Landscape and Urban Planning**, v. 48, n. 31–44, 2000. [https://doi.org/10.1016/S0169-2046\(00\)00034-7](https://doi.org/10.1016/S0169-2046(00)00034-7).
- FAHMY, M.; SHARPLES, S. On the development of an urban passive thermal comfort system in Cairo, Egypt. **Building and Environment**, v. 44, p. 1907–1916, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.01.010>.
- FERNANDES, M. E.; MASIERO, E. Relação entre conforto térmico urbano e Zonas Climáticas Locais. **Urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v. 12, p. e20190247, 2020. <https://doi.org/10.1590/2175-3369.012.e20190247>.
- FERREIRA, A. G.; MELLO, N. G. da S. Principais Sistemas Atmosféricos atuantes sobre a região Nordeste do Brasil e a influência dos oceanos pacífico e atlântico no clima da região. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 1, n. 1, 2005. <https://doi.org/10.5380/abclima.v1i1.25215>
- FERREIRA, C. C. M.; PIMENTEL, F. O.; VIANNA, Y. C. G. Proposta Metodológica Aplicada ao Estudo de Clima Urbano. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 12, p. 2023–2040, 2019. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v12.6.p2023-2040>.
- FREITAS, R. F. M. de; AZERÊDO, J. de F. F. A. de; CARVALHO, L. T. de; COSTA, R. F. da. Mapa climático como instrumento para o planejamento urbano. **Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais**, v. 23, 2021. <https://doi.org/10.22296/2317-1529.rbeur.202108pt>
- GOOGLE. **Google Earth Engine**. 2024. Disponível em: <https://earthengine.google.com/>. Acesso em: 30 ago. 2024.
- GORELICK, N.; HANCHER, M.; DIXON, M.; ILYUSHCHENKO, S.; THAU, D.; MOORE, R. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. **Remote sensing of Environment**, v. 202, p. 18–27, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>,
- HE, X.; SHEN, S.; MIAO, S.; DOU, J.; ZHANG, Y. Quantitative detection of urban climate resources and the establishment of an urban climate map (UCMap) system in Beijing. **Building and Environment**, v. 92, p. 668–678, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.05.044>.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo Demográfico 2022. Malha de Setores Censitários preliminares, Rio de Janeiro, 2024. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv102072.pdf>. Acesso em: 01 de mai. 2024.
- IRFEEY, A. M. M.; CHAU, H-W.; SUMAIYA, M. M. F.; WAI, C. Y.; MUTTIL, N.; JAMEI, E. Sustainable Mitigation Strategies for Urban Heat Island Effects in Urban Areas. **Sustainability**, v. 15, n. 14, p. 10767, 2023. <https://doi.org/10.3390/su151410767>.
- KATZSCHNER, L. The contribution of urban Climate studies to a new urbanity. **Anais Encac**, 1997.
- KOTHARKAR, R.; SURAWAR, M. Land use, land cover, and population density impact on the formation of canopy urban heat islands through traverse survey in the Nagpur urban area, India. **J Urban Plann Dev**, v. 142, n. 1, 2015. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)UP.1943-5444.0000277](https://doi.org/10.1061/(ASCE)UP.1943-5444.0000277).
- LANDSBERG, M. E. **The Urban Climate**. New York: Academia Press, 1981.
- LIMA JÚNIOR, A. F. **Análise espaço-temporal da dengue em Fortaleza e sua relação com o clima urbano e variáveis socioeconômicas**. 169 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) –Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.
- LIMA JÚNIOR, A. F. **Clima Urbano: análise do campo térmico e sugestão de áreas prioritárias para implementação de medidas mitigadoras**. (Tese de Doutorado). Fortaleza: PPGG/UFC- Programa de Pós-Graduação em Geografia, 2023.
- LOWRY, W. P. Empirical estimation of urban effects on climate: a problem analysis. **Journal of applied meteorology**, v. 16, p. 129-135, fev. 1977. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1977\)016<0129:EEOUEO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1977)016<0129:EEOUEO>2.0.CO;2)

- MALVEIRA, E. C. H. **Estudo de Mudanças Climáticas num ambiente urbano: Evolução da Ilha de Calor na Região Metropolitana de Fortaleza.** (Dissertação de Mestrado). Fortaleza: Programa de Pós-Graduação em Geografia/UECE, 2003.
- MONTEIRO, C. A. de F. **Teoria e Clima Urbano.** IGEOG, USP, Série Teses e Monografias nº 25, São Paulo, 1976.
- MOURA, A. C. M. **Geoprocessamento na gestão e planejamento urbano.** 2. ed. Belo Horizonte, 2007, 272 p.
- MOURA, M. O. Os estudos de clima urbano na cidade de Fortaleza-CE. In: **IX Workshop Internacional de Avaliação Climática para o Semi-Árido Nordeste/ II Encontro Internacional de Estudos Climáticos Aplicados ao Nordeste Brasileiro.** Fortaleza/CE, 2007. CD ROM.
- MOURA, M. O. **O clima urbano sob o nível do conforto térmico.** (Dissertação de Mestrado). Fortaleza: PPGG/UFC- Programa de Pós-Graduação em Geografia, 2008.
- MOURA, T.; NERY, J.; PRADO, E.; VIEIRA, C.; ROCHA, H. M.; KATZSCHNER, L. Urban Climatic Map of Salvador, Brazil, using a Land Use Pattern Methodology. **Cybergeo: European Journal of Geography**, n. 1010, 2022. <https://doi.org/10.4000/cybergeo.38634>.
- MOURA, M. O.; ZANELLA, M. E.; SALES, M. C. L. Ilhas térmicas na cidade de Fortaleza/CE. **Boletim Goiano de Geografia**, v. 28, n. 2, p.33-44, 2008. <https://doi.org/10.5216/bgg.v28i2.5718>
- MOURA, M. O.; ZANELLA, M. E.; SALES, M. C. L. Conforto Térmico em Fortaleza-CE. **Revista da ANPEGE**, Rio de Janeiro, v. 6, n. 1, p.177-189, 2010. <https://doi.org/10.5418/RA2010.0606.0011>
- NG, E.; REN, C.; KATZSCHNER, L. Urban Climatic Studies for hot and humid tropical coastal city of Hong Kong. In **the seventh international Conference on Urban Climate.** Yokohama, Japan. 2009.
- NURUZZAMAN, M. Urban Heat Island: Causes, Effects and Mitigation Measures - A Review. **International Journal of Environmental Monitoring and Analysis**, v. 3, n. 2, p. 67-73, 2015. <https://doi.org/10.11648/j.ijema.20150302.15>.
- OKE, T. R. **Boundary Layer Climates.** London: Methuen & Ltd. A. Halsted Press Book, John Wiley & Sons, New York, 1978.
- OLGYAY, V. **Arquitetura e Clima: manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas.** Barcelona: Gustavo Gili, 1998.
- PERES, L. de F.; LUCENA, A. J. de; ROTUNNO FILHO, O. C. FRANÇA, J. R. de A. The urban heat island in Rio de Janeiro, Brazil, in the last 30 years using remote sensing data. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 64, p. 104-116, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.08.012>.
- PETERSON, T. C.; OWEN, T. W. Urban heat island assessment: metadata are important. **J Clim** v. 18, p. 2637–2646, 2005. <https://doi.org/10.1175/JCLI3431.1>.
- PORANGABA, G. F. O.; AMORIM, M. C. C. T. Geotecnologias Aplicadas à Análise de Ilhas de Calor de Superfície em Cidades do Interior do Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.12, n. 06, 2019. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162010000500019>.
- QGIS DEVELOPMENT TEAM. **QGIS Geographic Information System**, versão 3.28.10. Open Source Geospatial Foundation Project, 2024. Disponível em: <https://qgis.org/>. Acesso em: 30 ago. 2024.
- RAJESHWARI, A. Estimation of land surface temperature of Dindigul District using Landsat 8 data. **International Journal of Research in Engineering and Technology**, v. 03, p. 122–126, 2014. <https://doi.org/10.15623/ijret.2014.0305025>.
- REN, C.; NG, E. Y.; KATZSCHNER, L. Urban climatic map studies: a review. **International Journal of Climatology**, v. 31, n. 15, p. 2213–2233, 2010. <https://doi.org/10.1002/joc.2237>.
- REN, C.; SPIT, T.; LENZHOLZER, S.; YIMD, H. L. S.; HEUSINKVELDE, B.; HOVEE, B. V.; CHENA, L.; KUPSKIF, S.; BURGHARDT, R.; KATZSCHNER, L. Urban Climate Map System for Dutch spatial planning. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 18, p. 207–221, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.01.026>.
- REN, C. A review of the historical development of urban climatic map study. In. NG; REN (Eds.). **The Urban Climatic Map**, Routledge, New York, 2015.

- RIBEIRO, C. A. M. **Atualização e aprofundamento do Mapa de Análise Climática do município de João Pessoa – Paraíba**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo). Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, 2013.
- SANTOS, M. **A urbanização brasileira**. São Paulo: Hucitec, 1993.
- SASAKI, Y.; MATSUO, K.; YOKOYAMA, M.; SASAKI, M.; TANAKA, T.; SADOHARA, S. Sea breeze effect mapping for mitigating summer urban warming: For making urban environmental climate map of Yokohama and its surrounding area. *Urban Climate*, v. 24, p. 529–550, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2017.07.003>.
- SCHILLER, S. D.; EVANS, J. M. Bridging the gap between climate and design at the urban and building scale: research and application. *Energy and Buildings*, v.15–16, p. 51–55, 1991. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(90\)90115-Y](https://doi.org/10.1016/0378-7788(90)90115-Y).
- SILVA JÚNIOR, J. de A.; COSTA, A. C. L. da; PEZZUTI, J. C. B; COSTA, R. F. da. Variabilidade espacial do conforto térmico e a segregação social do espaço urbano na cidade de Belém. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 28, n. 4, p. 419-428, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862013000400008>.
- SOUTO, J. I. O.; COHEN, J. C. P. Spatiotemporal variability of urban heat island: Influence of urbanization on seasonal pattern of land surface temperature in the Metropolitan Region of Belém, Brazil. *Revista Brasileira de Gestão Urbana*, v. 13, 2021. <https://doi.org/10.1590/2175-3369.013.e20200260>.
- SPIEGEL, M. R. **Estatística**. McGrawHill, São Paulo, 1972.
- SPOSITO, M. E. B. **Capitalismo e urbanização**. São Paulo: Contexto, 1988.
- SOUZA, M. S. Análise da estrutura urbana. In: DANTAS, E. W. C.; SILVA, J. B. da; COSTA, M. C. L. (Org.). **De cidade à metrópole: (trans)formações urbanas em Fortaleza**. Fortaleza: Edições UFC, 2006.
- SOUZA, V. S.; KATZSCHNER, L. Mapa climático da cidade de João Pessoa - PB. *Pluris*, Coimbra, 24, 25 e 26 de out. de 2018.
- SOUZA, J. F. de; SILVA, R. M.; SILVA, A. M. Influência do uso e ocupação do solo na temperatura da superfície: o estudo de caso de João Pessoa –PB. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 16, n. 1, p. 21-37, 2016. <https://doi.org/10.1590/s1678-86212016000100058>
- STEINITZ, C.; PARKER, P.; JORDAN, L. Hand Drawn Overlays: Their History and Prospective Uses. *Landscape Architecture*, v. 66, n. 5, p. 444-455, 1976.
- SYNNEFA, A.; DANDOU, A.; SANTAMOURIS, M.; TOMBROU, M.; SOULAKELLIS, N. On the Use of Cool Materials as a Heat Island Mitigation Strategy. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, v. 47, p. 2846–2856, 2008. <https://doi.org/10.1175/2008JAMC1830.1>.
- TECHNICAL UNIVERSITY OF DENMARK; WORLD BANK GROUP. **Global Wind Atlas 4.0**. 2024. Disponível em: <https://globalwindatlas.info/>. Acesso em: 30 ago. 2024.
- USGS – United States Geological Survey. **Landsat Satellite Missions**. EUA. 2022. Disponível em: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-satellitemissions>. Acesso em: 06 mar 2024.
- WANG, C.; WANG, Z-H.; KALOUSH, K. E.; SHACAT, J. Cool pavements for urban heat island mitigation: A synthetic review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 146, p. 111171, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111171>.
- WANG, Y.; BERARDI, U.; AKBARI, H. Comparing the effects of urban heat island mitigation strategies for Toronto, Canada, *Energy and Buildings*, v.114, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.046>.
- XAVIER, T. C.; OLIVEIRA, W. D.; FIALHO, E. S. Análise das condições de conforto térmico da cidade de Vitória, ES. *Revista do Departamento de Geografia*, v. 41, 2021. <https://doi.org/10.11606/eISSN.2236-2878.rdg.2021.172471>.
- YANG, J.; REN, J.; SUN, D.; XIAO, X.; XIA, J.; JIN, C.; LI, X. Understanding land surface temperature impact factors based on local climate zones. *Sustainable Cities and Society*, v. 69, p. 102818, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102818>.

YIN, Z.; LIU, Z.; LIU, X.; ZHENG, W.; YIN, L. Urban heat islands and their effects on thermal comfort in the US: New York and New Jersey. **Ecological Indicators**, v. 154, p. 110765, 2023.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110765>.

ZANELLA, M. E; CLAUDINO-SALES, V. Considerações sobre o clima urbano frente às emendas propostas à lei do uso e ocupação do solo na cidade de Fortaleza-CE. In: **Anais do V Simpósio Brasileiro de Climatologia Geográfica**, 2002.

Recebido em: 07/06/2024

Aceito para publicação em: 20/09/2024