

LCZ4R: UM NOVO SOFTWARE PARA MAPEAMENTO DE *LOCAL CLIMATE ZONES* E ANÁLISE DE ILHAS DE CALOR URBANAS EM ARACAJU - SE

Max Anjos

Antônio Campos Neto

Dayvid Medeiros

Francisco Jablinski Castelhana

Universidade Federal do Rio Grande do Norte

RESUMO

Este estudo apresenta o LCZ4r, um novo software projetado para facilitar a aplicação do sistema de Zonas Climáticas Locais (LCZ) e a análise de Ilhas de Calor Urbanas (ICU). Desenvolvido em linguagem R, o LCZ4r utiliza o mapa global de LCZ e dados do Open Street Map para extrair LCZ de qualquer cidade ou área continental do globo. O LCZ4r também realiza séries temporais, calcula anomalias térmicas e a intensidade da ICU. A ferramenta combina métodos de interpolação, como a *krigagem* para modelar a variabilidade espacial e temporal da temperatura em alta definição, abrangendo escalas de horas a anos e resolução espacial de metros a vários quilômetros. Este estudo demonstra a aplicação do LCZ4r na cidade de Aracaju-SE, utilizando dados de temperatura coletados em diferentes LCZ entre 2014 e 2016. Os resultados demonstram que a ferramenta LCZ4r não só facilitou a obtenção e análise das classes de LCZ, mas também, permitiu uma melhor compreensão das variações climáticas locais, revelando padrões térmicos frequentemente negligenciados por abordagens de interpolação tradicionais. Isso evidencia o seu potencial como uma ferramenta útil para os estudos de climatologia urbana.

Palavras-chave: Zonas Climáticas Globais; ilhas de calor urbanas, LCZ4r, *software*; R.

ABSTRACT

This study introduces LCZ4r, a new software designed to facilitate access to the Local Climate Zones (LCZ) system and analyze Urban Heat Islands (UHI). Developed in R, LCZ4r uses global LCZ maps and OpenStreetMap data to generate LCZ maps for any city worldwide. Additionally, LCZ4r performs time series analysis, computes thermal anomalies, and quantifies UHI intensity. The tool combines interpolation methods with LCZ classes to model high-definition spatial and temporal temperature variability, spanning frequencies from hours to years and spatial resolutions from meters to several kilometers. This study demonstrates the application of LCZ4r in the city of Aracaju-SE, using temperature data collected across different LCZs between 2014 and 2016. The results highlight that the LCZ4r tool not only simplifies the classification and analysis of LCZs but also enhances the understanding of local variations in urban thermal patterns through its combined kriging-LCZ approach. This underscores its potential as a practical and valuable tool for urban climatology studies.

Key words: Local Climate Zones; urban heat islands; LCZ4r; *software*; R.

INTRODUÇÃO

O sistema de classificação das *Local Climate Zones* (LCZ) caracteriza as paisagens urbanas com base no uso e ocupação do solo e nas propriedades físicas de superfície. Esse sistema fornece 17 tipos de classes distintas que cobrem desde áreas densamente urbanizadas até regiões vegetadas e corpos d'água, permitindo uma análise padronizada das variações de temperatura influenciadas pelo ambiente construído (Stewart e Oke, 2012).

Desde a sua concepção, o sistema da LCZ tem sido amplamente aplicado em estudos de ilhas de calor urbanas (ICU) ao redor do mundo (Huang et al., 2023; Han et al., 2024), incluindo o Brasil (Castro 2022; Ferreira e Ugeda Júnior, 2020; Anjos et al., 2020). Ferramentas como as plataformas *World Urban Database and Access Portal Tools* (WUDAPT) e o *Web LCZ Generator* facilitam o mapeamento de LCZ utilizando Sistemas de Informações Geográficas (SIG) como SAGA e Google Earth (Ching et al., 2018; Demuzere, Kittner e Bechtel, 2021). Contudo, essas ferramentas geralmente exigem conhecimento técnico especializado em SIG e um processo de trabalho que pode ser demorado, limitando o acesso ao sistema da LCZs por parte de pesquisadores e usuários sem essa formação específica.

Neste contexto, o software LCZ4r surge como uma solução prática e acessível para a análise de LCZ e ICU (Anjos et al., 2025) (Figura 1). Desenvolvido em linguagem computacional R (R Core Team, 2021), o LCZ4r possibilita, na forma de linhas de códigos, a geração rápida de mapas LCZ para qualquer cidade ou área continental do globo. Além disso, oferece funcionalidades para o cálculo das frações de cobertura de classes LCZ e a extração de parâmetros físicos urbanos, como albedo, rugosidade, e frações de superfície permeáveis e impermeáveis, entre outros. O *software* LCZ4r também realiza séries temporais de temperatura do ar associadas às classes de LCZ, incluindo interpolação espacial que combina *krigagem* e classes de LCZ, e a análise da intensidade das ICU em resoluções temporais que vão de horas a anos e de metros a vários quilômetros.

Este artigo apresenta as principais funcionalidades do LCZ4r, aplicando-as na análise dos padrões térmicos na cidade de Aracaju, localizada na região Nordeste do Brasil. Com suas características climáticas tropicais e posição costeira, Aracaju fornece um estudo de caso representativo para avaliar a intensidade das ICUs e os padrões térmicos locais associados às classes de LCZ, utilizando a nova ferramenta.

METODOLOGIA

Descrição geral do software LCZ4r

As funcionalidades do LCZ4r estão organizadas em dois grupos principais: funções gerais e funções locais (Quadro 1).



Figura 1 – Logo do software LCZ4r. Fonte: disponível em <https://github.com/ByMaxAnjos/LCZ4r>. Acesso em 22 de outubro de 2025.

As funções gerais foram projetadas para a extração de mapas de LCZ, o cálculo da fração de áreas cobertas pelas classes de LCZ e a obtenção de mapas de parâmetros físicos urbanos, como albedo, fração de áreas impermeáveis e rugosidade aerodinâmica. Essas funções são aplicáveis a qualquer região do globo, sem necessitar de dados de entrada locais. Por exemplo, para obter um mapa de LCZ, o usuário precisa de apenas de uma linha de código em um ambiente R: `lcz_get_map(city = "sua cidade")`. Esta função utiliza dados vetoriais do *OpenStreetMap* (OSM) por meio da API *Overpass* diretamente no R. O nome da área (por exemplo, "Aracaju") é selecionado no banco de dados OSM usando o mecanismo de busca *Nominatim* (<https://nominatim.openstreetmap.org/ui/search.html>). Em seguida, a função `lcz_get_map()` importa automaticamente a versão 3 do mapa global de LCZ (Demuzere *et al.* 2022), disponível no repositório Zenodo (<https://zenodo.org/records/8419340>), e recorta o mapa das LCZ para a área da cidade ou Região de Interesse (ROI). O resultado é um arquivo *raster* GeoTIFF com resolução de 100 metros, contendo valores de 1 a 17 que representam as classes padrão de LCZ. O mapa global das LCZ, desenvolvido por Demuzere *et al.* (2022), foi criado com base em modelos aplicados em 410 regiões de interesse distribuídas por 16 ecorregiões ao redor do mundo. A função `lcz_get_map_generator()` amplia essa funcionalidade, permitindo o acesso a mapas de LCZ no formato GeoTIFF, hospedados na Plataforma *LCZ Generator* (<https://lcz-generator.rub.de/>). Isso é feito por meio de um identificador único (ID =63e913f886a311de3bfc6d678dee669f2a6c24f6) extraído do *LCZ Facsheet*.

Categoria	Função	Dado de entrada	Descrição	Tipo de saída	Descrição da saída
Mapeamento e Caracterização da Paisagem Urbana	<i>lcz_get_map()</i>	Nome da cidade	Baixa o mapa de LCZ do conjunto de dados global (global dataset).	Raster (GeoTIFF)	Mapa de LCZ com valores entre 1 e 17.
	<i>lcz_get_map_euro()</i>	Nome da cidade	Baixa o mapa de LCZ do conjunto de dados europeu.	Raster (GeoTIFF)	Mapa de LCZ com valores entre 1 e 17.
	<i>lcz_get_map_usa()</i>	Nome da cidade	Baixa o mapa de LCZ do conjunto de dados dos Estados Unidos.	Raster (GeoTIFF)	Mapa de LCZ com valores entre 1 e 17.
	<i>lcz_get_map_generator()</i>	ID do mapa de LCZ	Baixa o mapa de LCZ da Plataforma LCZ Generator.	Raster (GeoTIFF)	Mapa de LCZ com valores entre 1 e 17.
	<i>lcz_plot_map()</i>	Mapa de LCZ	Visualiza graficamente o mapa de LCZ.	Gráfico (ggplot e PNG)	Visualização do mapa de LCZ.
	<i>lcz_cal_area()</i>	Mapa de LCZ	Calcula e visualiza as áreas de cobertura para cada LCZ.	Gráfico (ggplot e PNG) e Dataframe (CSV)	Áreas calculadas para cada classe de LCZ.
	<i>lcz_get_parameters()</i>	Mapa de LCZ	Recupera os parâmetros físicos urbanos das LCZs (albedo, rugosidade etc.).	Raster (stack GeoTIFF)	Mapa com os parâmetros físicos urbanos das LCZs.
	<i>lcz_plot_parameters()</i>	Mapa de parâmetros físicos	Visualiza graficamente os mapas de parâmetros físicos das LCZs.	Gráfico (ggplot e PNG)	Visualização dos mapas de parâmetros físicos.
Análise de Dados de Temperatura ou Similares	<i>lcz_ts()</i>	Dados de temperatura e mapa de LCZ	Analisa séries temporais de temperatura para cada LCZ.	Gráfico (ggplot e PNG) e Dataframe (CSV)	Variações temporais de temperatura por LCZ.

	<i>lcz_anomaly()</i>	Dados de temperatura e mapa de LCZ	Calcula e visualiza anomalias térmicas para cada LCZ.	Gráfico (ggplot e PNG) e Dataframe (CSV)	Anomalias térmicas por LCZ.
	<i>lcz_uhi_intensity()</i>	Dados de temperatura e mapa de LCZ	Avalia e visualiza a intensidade de Ilhas de Calor Urbanas (ICUs) por LCZ.	Gráfico (ggplot e PNG) e Dataframe (CSV)	Intensidade das ICUs por classe de LCZ.
Modelagem e Avaliação Espacial e Temporal	<i>lcz_interp_map()</i>	Dados de temperatura e mapa de LCZ	Interpola e mapeia dados de temperatura para todas as LCZs.	Raster (stack GeoTIFF)	Mapa da temperatura do ar.
	<i>lcz_anomaly_map()</i>	Dados de temperatura e mapa de LCZ	Mapeia as anomalias térmicas das LCZs.	Raster (stack GeoTIFF)	Mapa de anomalias térmicas.
	<i>lcz_plot_interp()</i>	Mapa interpolado de temperatura ou anomalias	Visualiza graficamente o mapa interpolado (temperatura ou anomalias).	Gráfico (ggplot e PNG)	Visualização do mapa interpolado de LCZ.
	<i>lcz_interp_eval()</i>	Mapa interpolado de temperatura ou anomalias	Avalia a qualidade da interpolação de LCZ.	Dataframe (R) ou arquivo CSV	Métricas de avaliação da qualidade da interpolação.

Quadro 1 – Resumo das funções do pacote LCZ4r v. 0.1.0. Fonte: Elaborado pelos autores, 2025, adaptado de Anjos et al., 2025.

As funções locais, por sua vez, foram projetadas para realizar análises de séries temporais de temperatura, calcular anomalias térmicas, modelar a temperatura do ar e quantificar a intensidade da ICU, utilizando dados de temperatura do ar coletados localmente. Neste estudo, utilizamos ambas as funções, gerais e locais, da versão v0.1.0 do LCZ4r para mapear a paisagem de Aracaju em LCZ, extrair parâmetros físicos urbanos e analisar as variações de temperatura do ar entre as diferentes classes.

Para garantir a transparência e a possibilidade de replicação dos resultados deste estudo, convida-se o leitor a utilizar os scripts nos apêndices. Vale destacar que todos os códigos referentes ao LCZ4r são abertos e reproduzíveis, e, o mais importante, podem ser adaptados a outros contextos locais.

Para obter mais informações sobre as funções gerais e locais do pacote LCZ4r, bem como instruções detalhadas para a instalação do R e RStudio, recomenda-se consultar os tutoriais

disponíveis na documentação oficial do pacote: <https://bymaxanjos.github.io/LCZ4r/articles/tutorials.html>.¹

Dados e área de estudo

Para este estudo, foram utilizados dados horários de temperatura coletados em Aracaju, capital do estado de Sergipe, Brasil. Os dados foram obtidos por meio de uma rede climatológica urbana durante o período de outubro de 2014 a abril de 2016 (Figura 2). Essa rede de monitoramento foi composta por cinco sensores de temperatura e duas estações meteorológicas automáticas: uma pertencente ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e outra localizada no Aeroporto de Aracaju. No total, oito pontos de coleta foram utilizados para garantir uma representação minimamente abrangente das condições térmicas urbanas e rurais. A distribuição dos sensores foi planejada para refletir as características térmicas distintas das LCZs presentes na área de estudo, variando desde as classes do tipo construída como LCZ 3 (*compact low-rise*) até classes do tipo natural como a LCZ 16 (*Bare and soil*). Detalhes adicionais sobre a localização das estações urbanas, as especificações técnicas dos sensores de temperatura e os procedimentos de coleta de dados podem ser encontrados em trabalhos anteriores (Anjos *et al.*, 2017; Anjos, 2017).

Modelagem da temperatura do ar

As funções *lcz_interp_map()* e *lcz_plot_interp()* foram criadas para interpolar os valores de temperatura do ar, associando-os às LCZs. O método de *Kriging* estima dados de temperatura do ar com base nos dados observados e nas distâncias entre os pontos de coleta, assumindo que valores de temperatura medidos próximos são mais semelhantes que os valores mais distantes. A integração das características das classes LCZ como deriva externa no modelo de *kriging* opera sob a premissa que o valor de temperatura observado em uma célula de grade classificada por uma classe de LCZ, onde a estação de coleta está instalada, pode ser generalizada para as células de grade não amostrada que compartilham a mesma classe de LCZ. Isto resulta em uma representação espacial detalhada e fisicamente coerente das variações térmicas (Anjos *et al.*, 2020). A função *lcz_interp_eval()* complementa a modelagem de temperatura do ar avaliando a qualidade do mapa interpolado em diferentes escalas espaciais e temporais, por meio da validação cruzada *leave-one-out* (LOOCV) e o método de divisão em estações de treinamento e teste, que comparam os valores estimados e observados.

¹ Acesso em 28/10/2025.

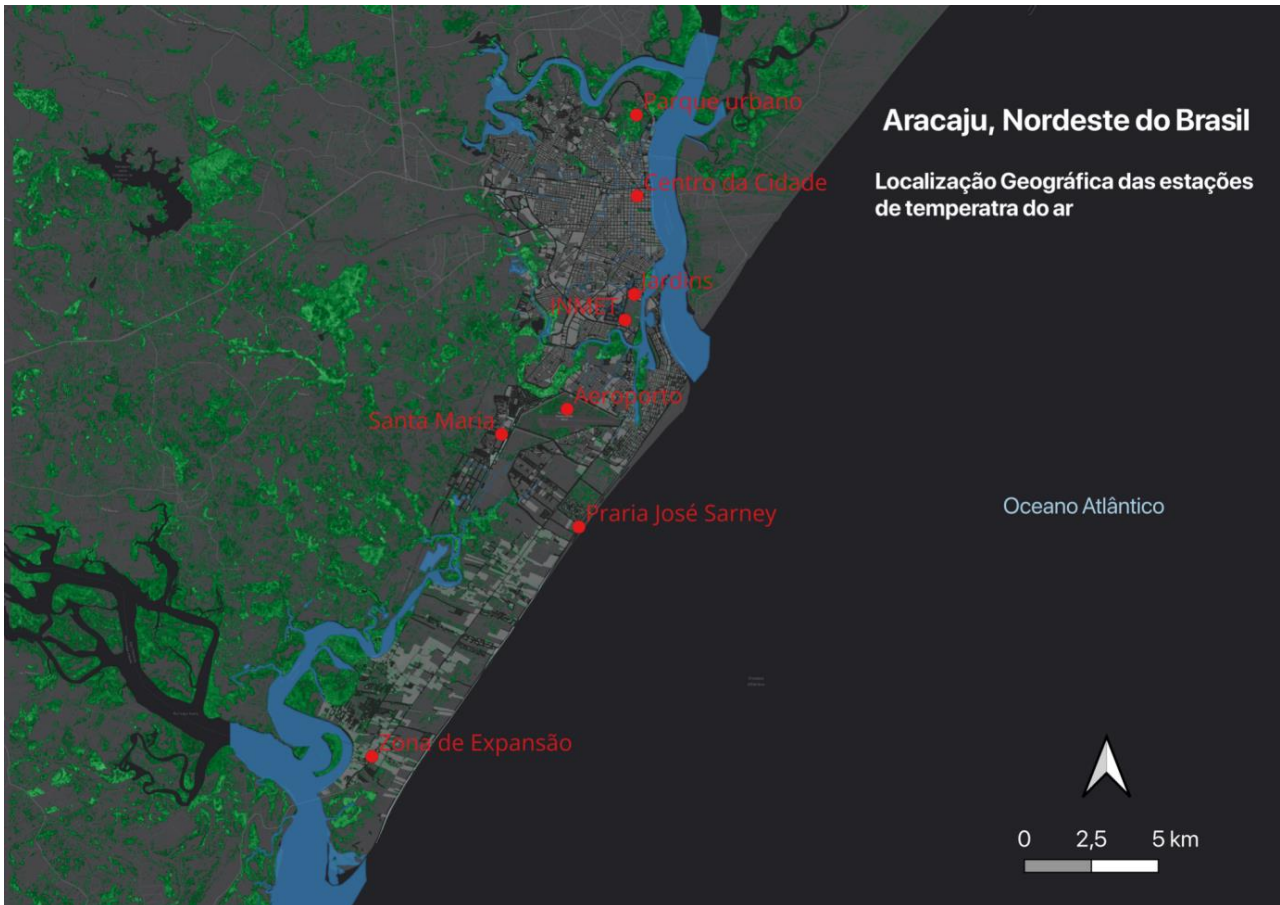


Figura 2 – Localização geográfica dos sensores de temperatura do ar em Aracaju (SE). Fonte: *OpenStreetMap*, 2024.

Cálculo da intensidade da ICU

A intensidade da ICU (IICU) foi calculada utilizando a função *lcz_uhi_intensity()*, que inclui os métodos padrão LCZ e manual. No método LCZ, a IICU é calculada pela diferença entre a temperatura entre as classes de LCZ urbanas e rurais, conforme a abordagem padronizada (Stewart e Oke, 2012):

$$IICU = \underline{LCZ}x_{urbano} - \underline{LCZ}y_{rural} \quad (1)$$

onde $\underline{LCZ}x_{urbano}$ representa a média das temperaturas na(s) classe(s) LCZ urbana (tipos 1 a 10) e $\underline{LCZ}y_{rural}$ representa a média das temperaturas na(s) classe(s) LCZ rural (tipos B a D). Esse método padronizado facilita a comparação dos resultados entre cidades.

Para maior flexibilidade, o método manual permite que o usuário selecione estações específicas para representar as temperaturas das áreas urbanas e rurais. Neste caso, a intensidade de ICU é calculada pela fórmula:

$$UHII = T_{urbano} - T_{rural} \quad (2)$$

onde T_{urbano} e T_{rural} são as temperaturas das estações urbanas e rurais selecionadas pelo usuário, respectivamente. Esta abordagem permite uma análise personalizada, ajustada ao contexto local e à disponibilidade de dados

RESULTADOS

Mapa, área e parâmetros físicos

O pacote LCZ4r oferece duas abordagens para a criação de mapas de Zonas Climáticas Locais (LCZ): a função `lcz_get_map()`, que utiliza o banco de dados global de LCZ, e a `lcz_get_map_generator()`, que obtém mapas da plataforma *LCZ Generator*. A primeira garante cobertura global, enquanto a segunda pode oferecer maior precisão para cidades específicas onde os mapas estão disponíveis.

Para este estudo, ambas as funções foram aplicadas para Aracaju. A Figura 3 (painéis A e B) apresenta uma comparação visual entre os mapas gerados. Uma vez obtido o mapa, a função `lcz_cal_area()` foi utilizada para quantificar a distribuição espacial das classes. Os gráficos de pizza (C), donut (D) e barras (E) na Figura 3, todos gerados por esta função, ilustram a composição das LCZ na área de estudo, mostrando o predomínio de determinadas classes.

Além do mapeamento, a função `lcz_get_parameters()` permite a extração de parâmetros físicos urbanos associados a cada classe de LCZ, com base nos valores de referência de Stewart e Oke (2012). Parâmetros como albedo, fator de visão do céu e fração de superfície impermeável (Figura 4) são cruciais para estudos de modelagem do clima urbano e para a identificação de áreas de vulnerabilidade térmica (Anjos *et al.*, 2021). A função permite exportar estes dados como *rasters* individuais ou como um único arquivo *stack*, facilitando análises espaciais avançadas.

Monitoramento térmico das LCZ

A função `lcz_ts()` foi aplicada ao conjunto de dados de temperatura de Aracaju (2014 e 2016) para analisar o comportamento térmico das diferentes LCZ. A Figura 5A ilustra a variação temporal da temperatura do ar, destacando os padrões térmicos distintos entre as LCZs. As estações CEN (LCZ 3) e JAR (LCZ 4), em áreas centrais e urbanizadas, registraram temperaturas consistentemente mais elevadas. Em contraste, a estação PAR (LCZ 11, localizada no parque urbano) e a estação JOS (LCZ 16, na zona costeira) exibiram temperaturas mais amenas, evidenciando o efeito termorregulador da vegetação e da proximidade com o oceano.

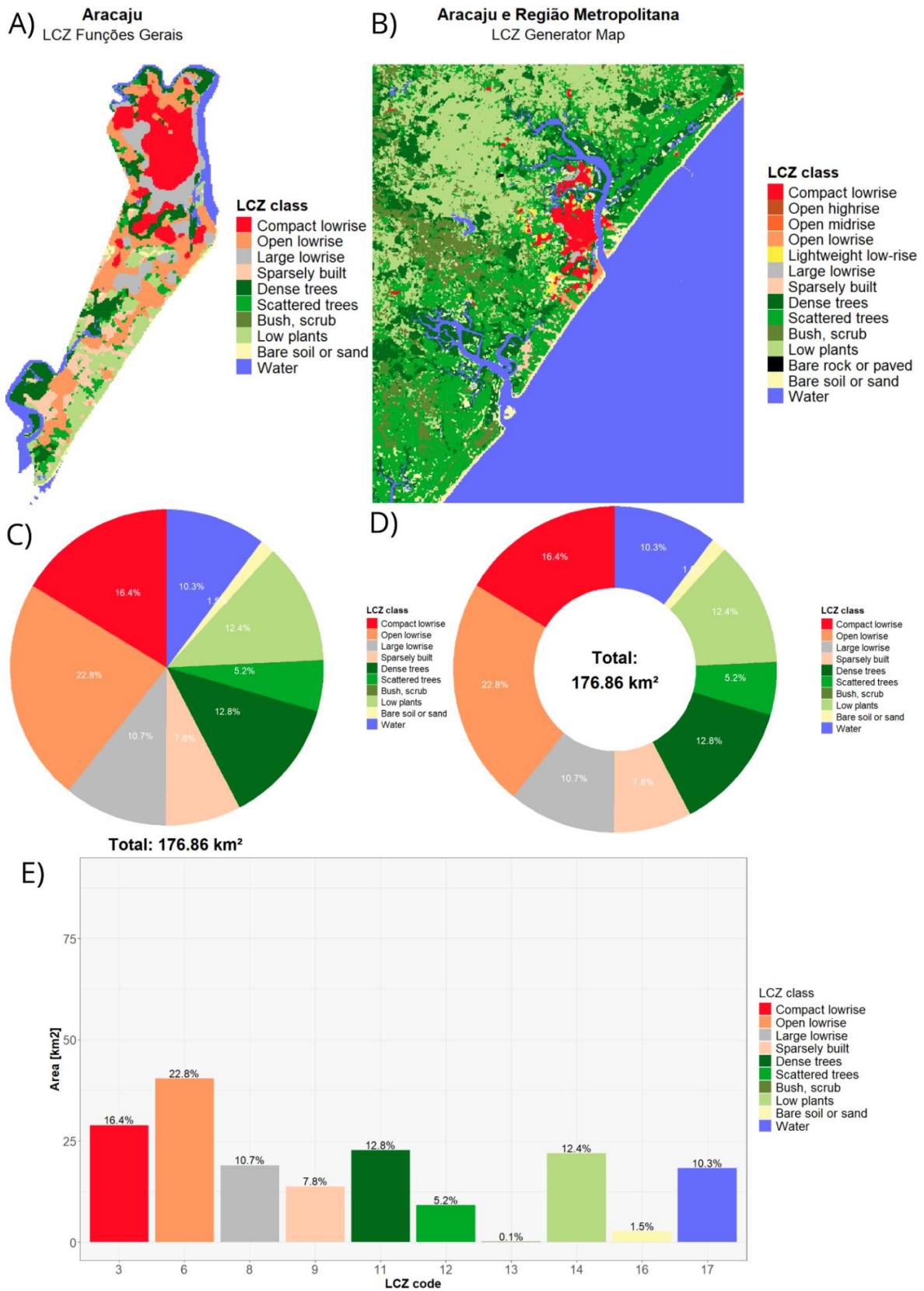


Figura 3 – Mapas de LCZ para Aracaju (SE) e análise de área com o LCZ4r. (A): Mapa obtido com *lcz_get_map()*. (B): Mapa obtido com *lcz_get_map_generator()*. (C), (D) e (E): Gráficos de pizza, donut e barras de distribuição de área das LCZ, gerados com *lcz_cal_area()*. Elaboração: autoral, 2024.

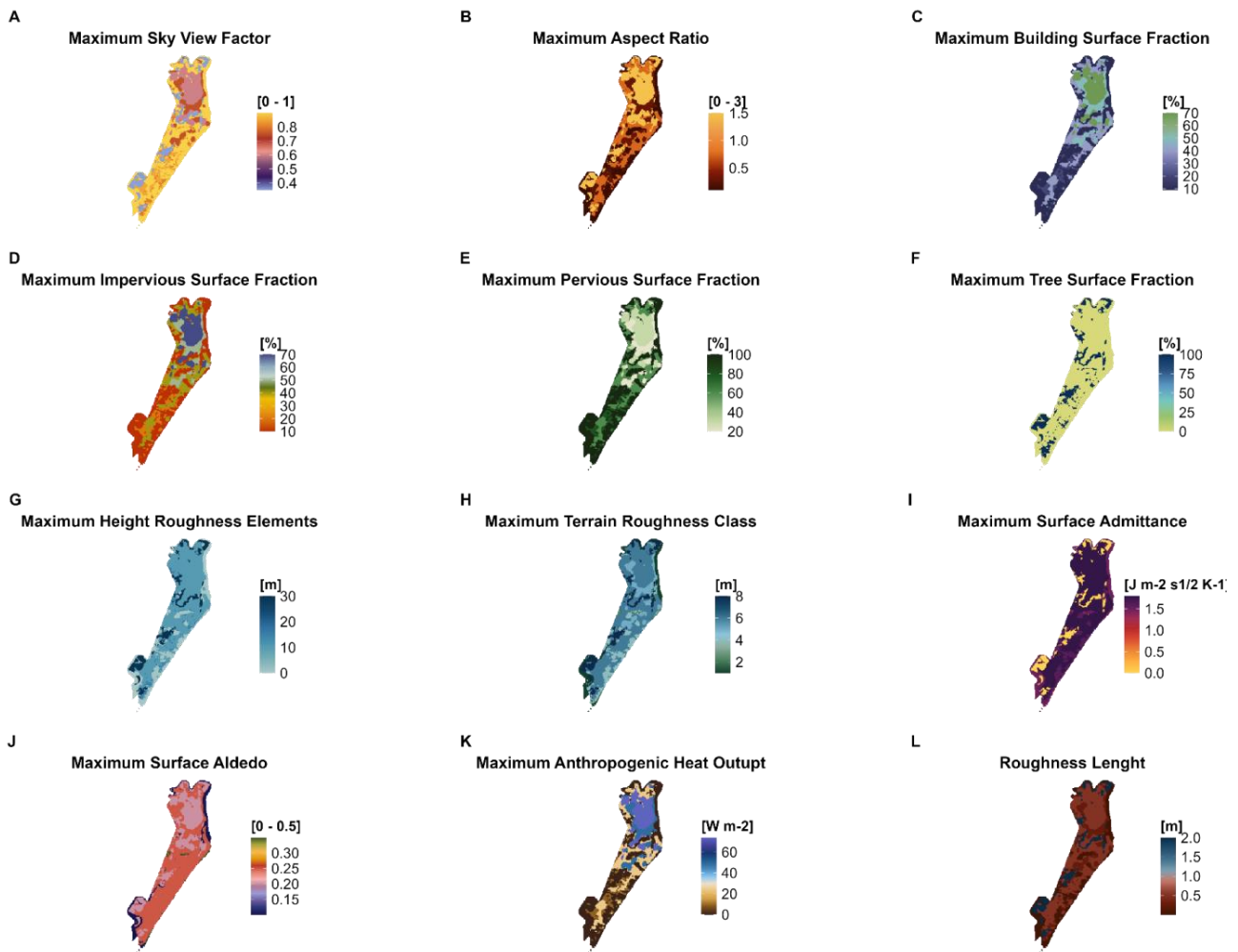


Figura 4 – Demonstração da função *lcz_get_parameters()* para a cidade de Aracaju (SE). Elaboração: autoral, 2024.

A função *lcz_ts()* também permite análises sazonais através do argumento *by = "season"*. A Figura 5B exemplifica essa funcionalidade, mostrando as temperaturas diárias para cada LCZ ao longo das estações de 2015. Observa-se que as áreas urbanas compactas (LCZ 3 e 4) mantêm temperaturas mais altas durante todo o ano, enquanto as áreas vegetadas (LCZ 11) e costeiras (LCZ 16) apresentam maior resiliência térmica, especialmente no verão.

Intensidade das ICU

A intensidade da ICU foi quantificada com a função *lcz_uhi_intensity()*. A Figura 6 apresenta a série temporal da intensidade horária da ICU entre 2014 e 2016. Os valores variaram de aproximadamente -4 °C a +6 °C, indicando a predominância de Ilhas de Calor (valores positivos), mas também a ocorrência de Ilhas de Frescor Urbanas (valores negativos), conforme reportado em trabalhos anteriores (por exemplo, Anjos e Lopes, 2017). Picos de intensidade, superando +5 °C, podem representar episódios de forte desconforto térmico, considerando o clima quente e úmido da cidade.

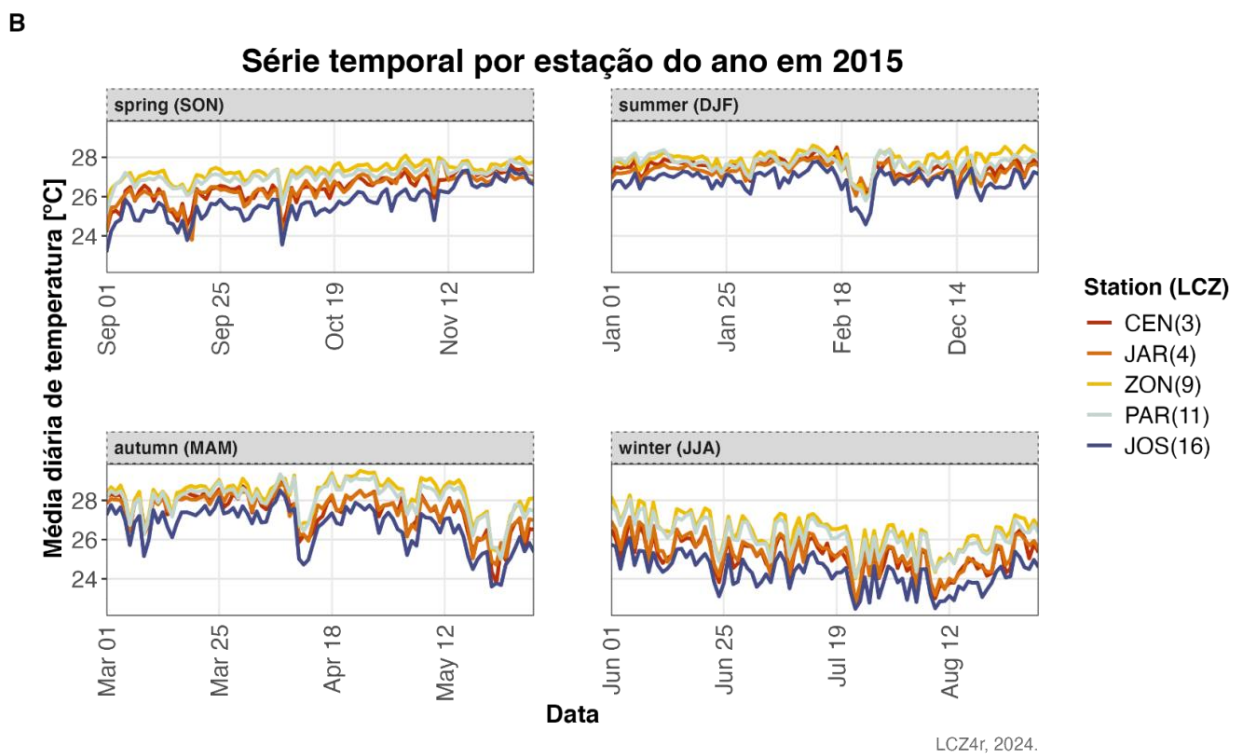
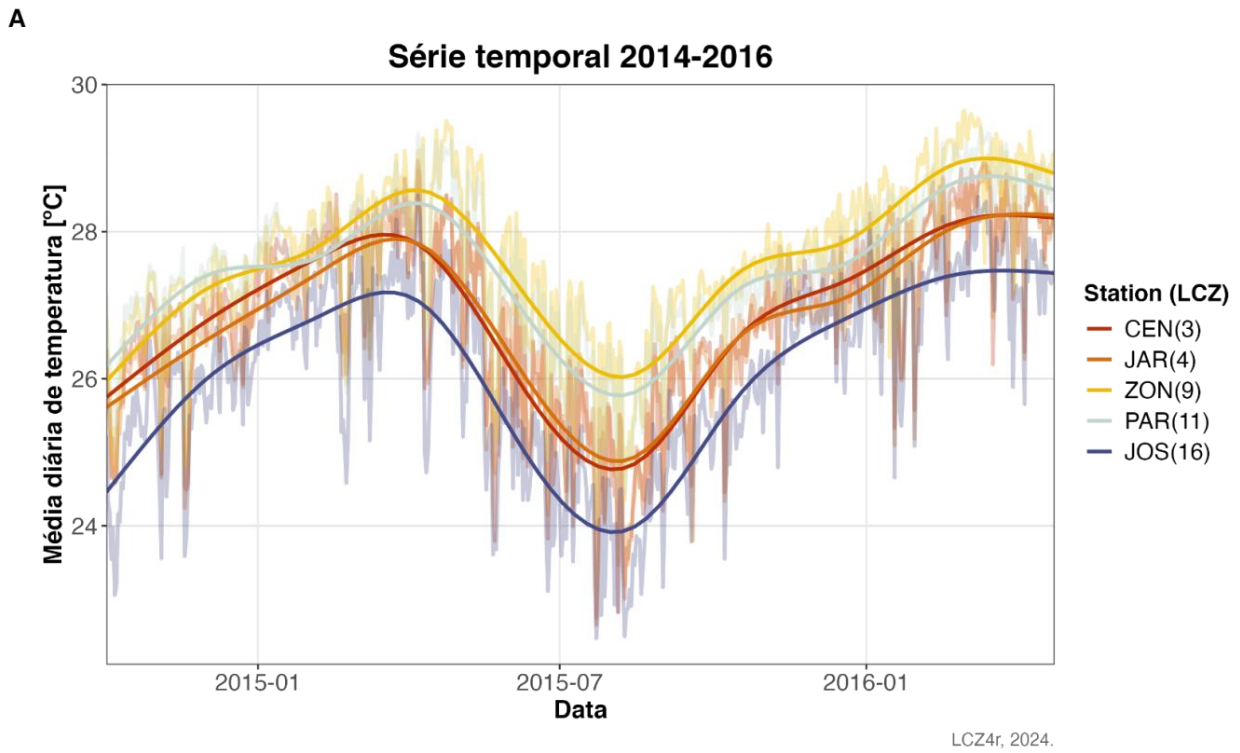


Figura 5 – Séries temporais de 2014 a 2016 (A) e por estações do ano de 2015 (B) para Aracaju (SE). Elaboração: autoral, 2024.

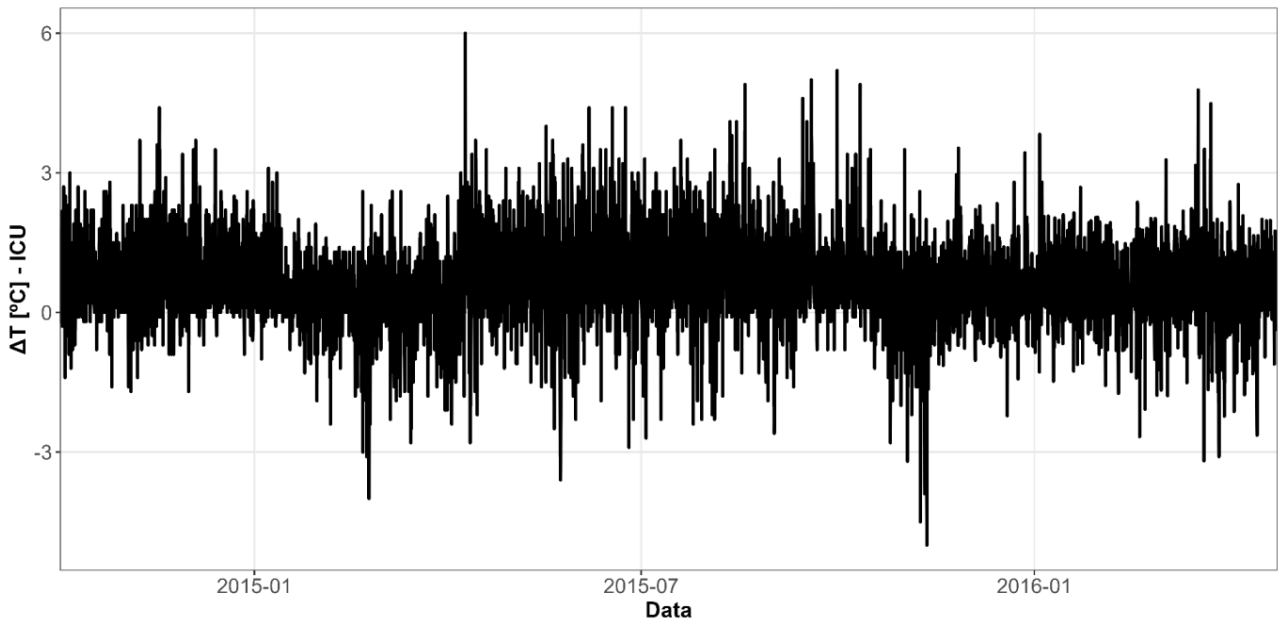


Figura 6 – Intensidades horárias da ICU em Aracaju (SE), 2014-2016. Elaboração: autoral, 2014.

A função referida permite agregar os dados em diferentes escalas temporais (anual, mensal, horária) e filtrar por períodos específicos. A Figura 7 demonstra essa capacidade ao isolar o ciclo diurno médio da ICU para um dia específico (18 de fevereiro de 2016), ilustrando o padrão clássico de intensificação da ICU após o pôr do sol.

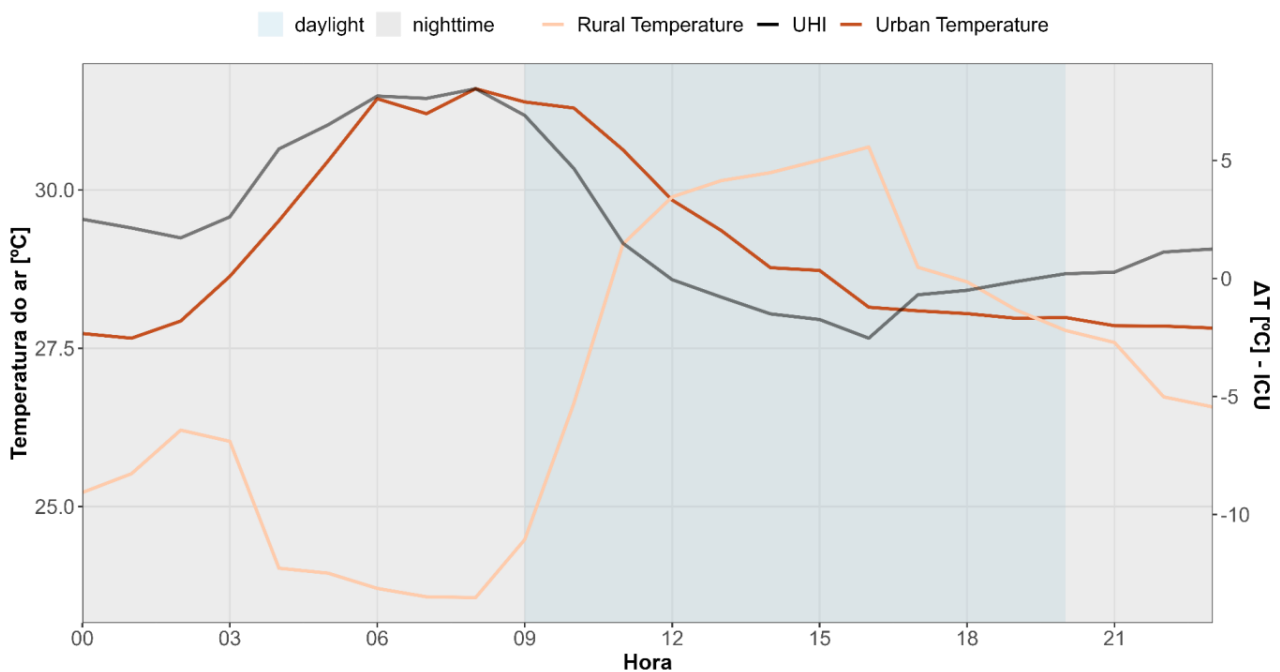
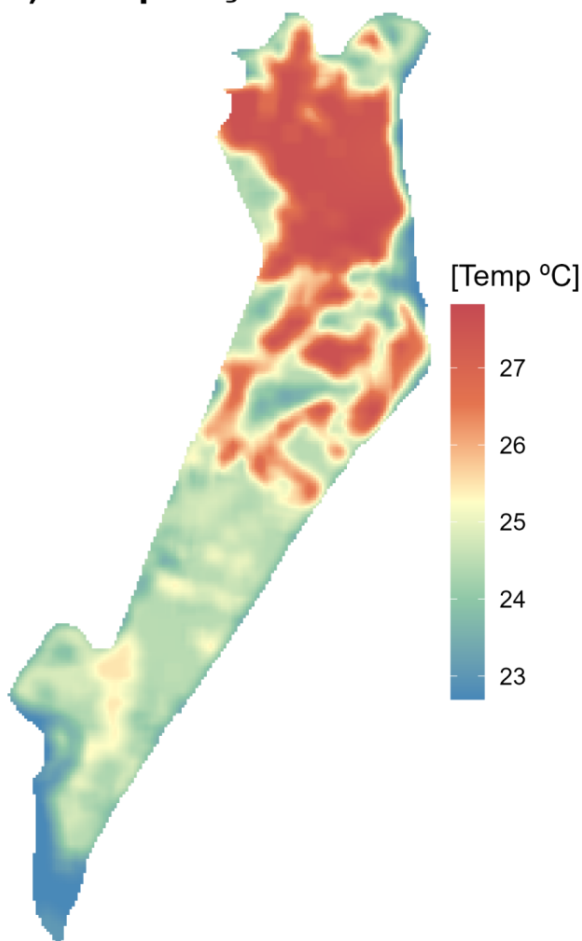


Figura 7 – Ciclo diurno da intensidade horária da ICU no dia 18 de fevereiro de 2016 (hora UTC) em Aracaju (SE). Elaboração: autoral, 2014.

Interpolando a temperatura do ar com as LCZ

A capacidade de modelagem espacial do LCZ4r é demonstrada pelas funções *lcz_interp_map()* e *lcz_plot_interp()*. A Figura 8 compara diretamente a interpolação da temperatura do ar para Aracaju em um momento específico (18 de fevereiro de 2016) usando duas abordagens: (A) *Krigagem* utilizando as classes de LCZ e (B) *krigagem* convencional.

A) Interpolação com LCZ



B) Interpolação sem LCZ

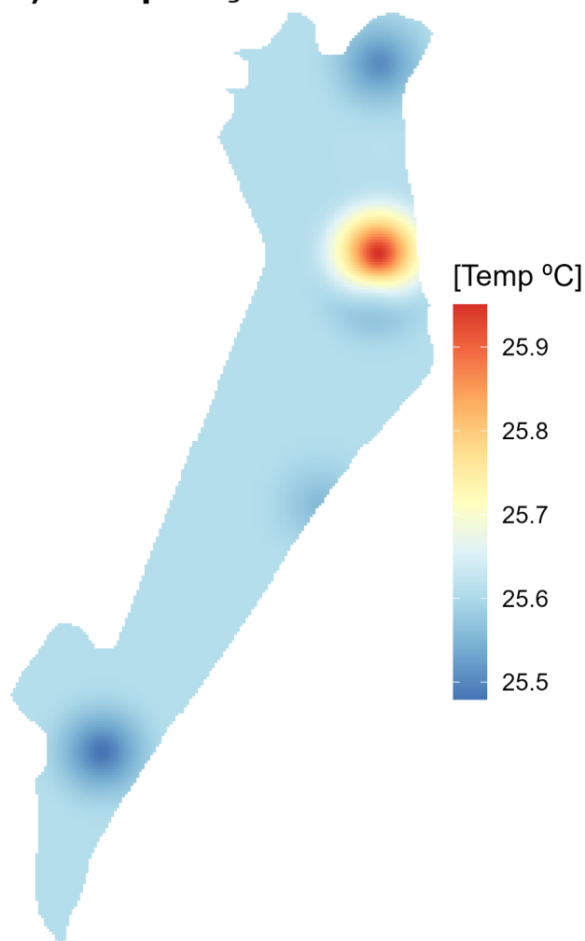


Figura 8 – Comparação entre a (A) interpolação baseada em *krigagem*-LCZ e (B) interpolação convencional sem LCZ em Aracaju (SE). O mapa foi gerado com a função *lcz_interp_map()* do pacote LCZ4r com resolução 100 metros para o dia 18 de fevereiro de 2016, às 08:00h. Elaboração: autoral, 2024.

O mapa (A), gerado com a integração das LCZ, revela uma heterogeneidade térmica espacialmente detalhada, com temperaturas mais altas (cerca de 27 °C) em áreas urbanas densas e mais baixas (cerca de 24 °C) em áreas vegetadas. Em contraste, o mapa (B) apresenta uma distribuição suavizada que mascara estas variações locais cruciais.

Para validar estes resultados, a acurácia dos modelos foi avaliada com a função *lcz_interp_eval()*. Os dados foram divididos em conjuntos de treino (80%) e teste (20%). A Tabela 1

apresenta os resultados para duas estações de teste independentes. Para a estação ZON (LCZ 9 – *Sparseely built*), o resíduo (diferença entre estimado e observado) foi menor para a interpolação com LCZ (-1.8 °C) do que para a convencional (-2.2 °C). De forma similar, para a estação PAR (LCZ A – *Dense trees*), o resíduo foi de -1.5 °C com LCZ, contra -2.4 °C na abordagem convencional.

Classes de LCZ	Estação urbana	Interpolação baseada <i>krigagem</i> -LCZ			Interpolação convencional sem LCZ		
		Valor observado (°C)	Valor estimado (°C)	Resíduos (°C)	Valor observado (°C)	Valor estimado (°C)	Resíduos (°C)
9 (<i>Sparseely built</i>)	ZON	24.2	26.0	-1.8	24.2	26.4	-2.2
A (<i>Dense trees</i>)	PAR	23.9	25.5	-1.5	26.3	23.9	-2.4

Tabela 1 – Comparação estatística entre interpolação baseada em *krigagem*-LCZ e interpolação convencional sem LCZ, em Aracaju (SE). Foi utilizada a função *lcz_interp_eval()* do pacote LCZ4r com resolução de 100 metros para o dia 18 de fevereiro de 2016, às 08:00h. Fonte: elaboração própria, 2025

Estes resultados, com resíduos menores, demonstram quantitativamente que a incorporação das classes de LCZ no processo de interpolação, facilitada pelo LCZ4r, melhora significativamente a acurácia das estimativas de temperatura do ar, produzindo mapas termicamente mais realistas.

DISCUSSÃO

Estudos recentes sobre a variabilidade climática no estado de Sergipe revelaram cenários problemáticos no que tange a tendências de índices térmicos para a capital do estado. O incremento nas temperaturas máximas, médias e mínimas foi constatado com elevado grau de significância, justificando a relevância de estudos sobre a distribuição de calor na área em questão (Castelhamo e Pinto, 2022).

Embora o estudo da Ilha de Calor em Aracaju já tenha sido performado em outros trabalhos, com distintas técnicas, a aplicação da modelagem espacial por *Local Climate Zones* na área ainda é nova.

O estudo de Santos e Pinto (2020), por exemplo, realizado no bairro Atalaia em Aracaju, identificou que o intenso processo de urbanização, marcado pela verticalização e pela substituição de áreas verdes por superfícies impermeáveis, resultou no aumento das temperaturas locais e na formação de ilhas de calor. A análise temporal (1984, 2008 e 2015), com base em imagens de satélite, revelou que as áreas com maior adensamento urbano e menor cobertura vegetal apresentaram valores mais elevados de temperatura, enquanto áreas próximas a corpos hídricos e com vegetação mantiveram-se como ilhas de frescor. Além disso, observou-se uma relação direta entre o albedo e a variação térmica: locais com maior impermeabilização e edificações apresentaram menores índices de albedo, o que favoreceu maior absorção de calor. Esses resultados reforçam como a expansão urbana em Aracaju tem contribuído para a intensificação do fenômeno de ilhas de calor, em especial em regiões de verticalização recente.

A pesquisa de Pereira (2019) analisou a distribuição espacial da temperatura de superfície em Aracaju a partir de imagens do sensor TIRS/Landsat 8, evidenciando a formação de ilhas de calor urbano em áreas de maior adensamento populacional e ocupação desordenada. Os resultados mostraram que as zonas centrais e bairros mais verticalizados apresentaram temperaturas significativamente superiores às áreas periféricas com maior presença de vegetação e corpos d'água, que funcionaram como ilhas de frescor. Além disso, constatou-se que a expansão urbana associada à substituição da cobertura vegetal por superfícies impermeáveis intensificou as diferenças térmicas intraurbanas, destacando a relevância do planejamento urbano e da manutenção de áreas verdes para mitigação do fenômeno.

O estudo de Lima e Pinto (2008), realizado no bairro 13 de Julho em Aracaju, mostrou que a população percebe claramente os efeitos do aumento do calor associado à verticalização, à redução da ventilação natural e à baixa arborização. Os moradores relataram maior sensação de mormaço e desconforto térmico, atribuindo também ao ecossistema de manguezal e às áreas verdes um papel importante na amenização do clima local.

A aplicação do software LCZ4r neste estudo possibilitou uma análise detalhada dos padrões térmicos urbanos em Aracaju, confirmando a presença e dinâmica da ICU relatadas nos estudos anteriores. A capacidade do LCZ4r de integrar, visualizar e interpretar dados de temperatura do ar associados às LCZ oferece uma abordagem padronizada, reproduzível e flexível para avaliar o impacto das ICU em diferentes escalas e contextos geográficos.

Em escala urbana, a compreensão da dinâmica temporal e da localização dos padrões térmicos é fundamental para o planejamento de ações climáticas eficazes. Os mapas climáticos avaliados e de alta resolução, como os gerados pela interpolação baseados em LCZ (figuras 8 e 9), são ferramentas indispensáveis para pesquisadores, planejadores urbanos e formuladores de políticas (Anjos *et al.*, 2021, Alcoforado *et al.*, 2009; Ren *et al.*, 2011; Ng e Ren, 2015). A análise do perfil de temperatura (Figura 9) ilustra de forma clara a conexão direta entre a morfologia urbana (densidade de construções, presença de vegetação, tipo de material) e a temperatura do ar. A ferramenta permite identificar *hotspots* térmicos em áreas densamente construídas e *cool spots* em áreas vegetadas ou próximas a corpos d'água, reforçando a necessidade de abordagens integradas para o planejamento urbano sustentável e a adaptação às mudanças climáticas locais.

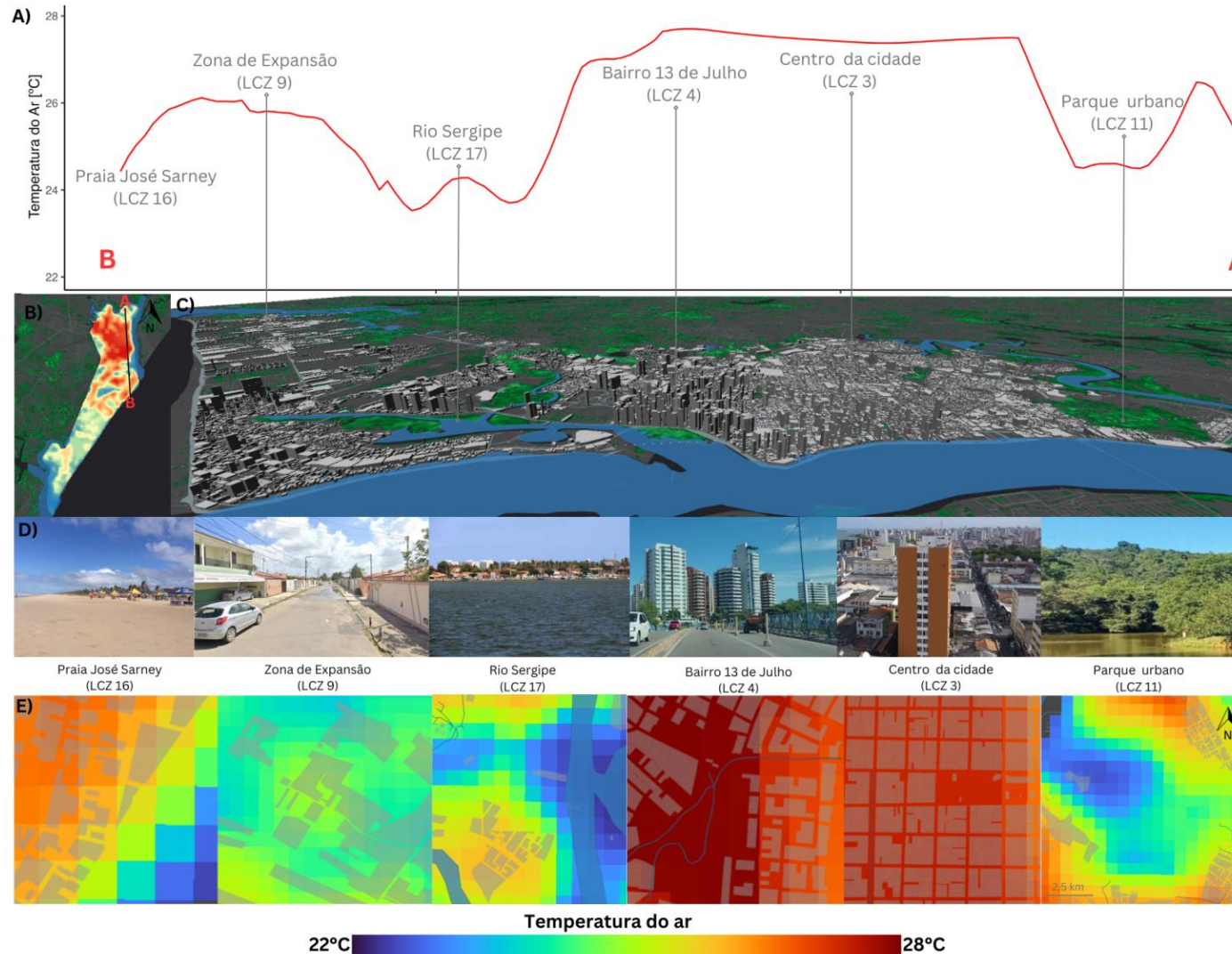


Figura 9: (A) Perfil de temperatura do ar (°C) ao longo dos segmentos A e B em Aracaju (SE), extraído do mapa de temperatura interpolada (B), gerado pela função *lcz_interp_map()* do pacote LCZ4r, referente ao dia 18 de fevereiro de 2016 às 08:00h. (C) Morfologia urbana representada por edifícios em 3D. (D) Imagens de satélite e suas respectivas classes de LCZ, indicando os diferentes usos e cobertura do solo. (E) Recorte da distribuição espacial em 2D da temperatura do ar, com valores extraídos do mapa de temperatura (B), para cada imagem de satélite. Fonte: Elaboração própria. Base cartográfica fornecida pela prefeitura de Aracaju, 2014. Imagens de satélite extraídas do Google Street View, Google Maps, 2025.

A principal inovação metodológica do LCZ4r reside na sua função de interpolação, que combina krigagem com as classes de LCZ. Conforme avaliado quantitativamente nos resultados (Tabela 1), esta abordagem se mostrou superior ao método de interpolação convencional sem LCZ. Ao incorporar as características da superfície terrestre, representadas pelas LCZ, o modelo gera uma representação mais realista e fisicamente coerente das variações térmicas, superando a simples dependência da distância euclidiana entre os pontos de medição.

Limitações e recomendações de uso

Embora os resultados demonstrem o potencial da abordagem, é importante reconhecer as suas limitações. A acurácia da interpolação baseada em LCZ depende da qualidade tanto dos dados de temperatura de entrada quanto do próprio mapa de LCZ. Além disso, o sistema LCZ, embora robusto, é uma simplificação da complexa realidade urbana e pode não capturar todas as variações térmicas locais.

Portanto, recomenda-se que os usuários realizem uma análise exploratória prévia com as funções *lcz_ts()* e *lcz_anomaly()* e, quando possível, incluir as condições meteorológicas para compreender a relação entre temperatura e as classes de LCZ em sua área de estudo. A validação dos resultados, utilizando a função *lcz_interp_eval()*, é um passo indispensável para garantir a confiabilidade das análises espaciais.

Desenvolvimentos futuros

O LCZ4r é uma ferramenta aberta e em desenvolvimento contínuo, que se beneficiará do *feedback* e das sugestões da comunidade de usuários. Os planos para aprimoramentos futuro incluem:

- Estimativa da temperatura de superfície: incorporar métodos para analisar a ICU de superfície, complementando os dados de temperatura do ar.
- Integração com SIG: desenvolver um plugin ou uma interface amigável e multilíngue para plataformas como o QGIS, facilitando o uso do LCZ4r em fluxos de trabalho geoespaciais em contextos linguísticos diferentes.²
- Expansão para outras linguagens de programação: portar as funcionalidades para linguagens como Python (Van Rossum & Drake, 1995) e Matlab (The MathWorks Inc., 2022), ampliando o alcance da ferramenta para uma comunidade de usuários ainda maior.
- Modelagem avançada de ICU: implementar métodos que considerem o impacto de variáveis meteorológicas adicionais (vento, umidade e radiação solar) na intensidade das ICU.

² <https://bymaxanjos.github.io/LCZ4r/articles/Introd_QGIS_LCZ4r.html>. Acesso em 28/10/2025.

- Modelagem de cenários futuros: adicionar funções para simular o impacto de diferentes cenários de planejamento (ex: aumento de áreas verdes, adensamento) sobre o clima local.

CONCLUSÃO

O LCZ4r demonstrou ser uma ferramenta robusta, acessível e de código aberto que preenche uma lacuna importante entre o quadro teórico das LCZ e sua aplicação prática por uma comunidade científica mais ampla. Ao automatizar a aquisição de dados, a análise e a modelagem espacial dentro do ambiente R, o software reduz significativamente as barreiras técnicas associadas aos estudos de climatologia urbana.

A aplicação em Aracaju mostrou a utilidade da ferramenta, destacando-se a superioridade da interpolação de temperatura assistida por LCZ em relação aos métodos convencionais nos dados analisados. Esta abordagem produziu mapas térmicos mais realistas e detalhados, essenciais para a identificação da ICU.

O LCZ4r não é apenas um pacote R, mas uma contribuição para a ciência aberta e reproduzível. Seu desenvolvimento contínuo e sua futura expansão têm o potencial de capacitar pesquisadores e planejadores urbanos globalmente, fomentando cidades mais resilientes e climaticamente inteligentes.

Submetido em 28 de janeiro de 2025

Aceito para publicação em 21 de outubro de 2025

REFERÊNCIAS

- ALCOFORADO, M. J., ANDRADE, H., LOPES, A., VASCONCELOS, J. Application of climatic guidelines to urban planning: The example of Lisbon (Portugal). **Landscape and Urban Planning**, v. 90 (1-2), p. 56-65, 2009. DOI: <<https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2008.10.006>>
- ANJOS, M. **Orientações climáticas para o planejamento urbano numa cidade costeira do nordeste do Brasil: Aracaju-SE**. 2017. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais) – Universidade de Lisboa, Lisboa, 2017.
- ANJOS, M. *et al.* Assessment of Climatic Guidelines and Urban Planning in North-Eastern Coast of Brazil. *In*: SINGH, R. B. *et al.* (ed.). **Practices in Regional Science and Sustainable Regional Development**. Singapore: Springer, p. 199-220, 2021.
- ANJOS, M., TARGINO, A. C., KRECL, P., OUKAWA, G. Y, BRAGA, R. F. Analysis of the urban heat island under different synoptic patterns using local climate zones. **Building and Environment**, v. 185, p. 107268, 2020. DOI: <<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107268>>
- ANJOS, M., MEDEIROS, D., CASTELHANO, F., MEIER, F., SILVA, T., CORREIA, E, LOPES, A. LCZ4r package R for local climate zones and urban heat islands. **Scientific Reports**, v. 15, p. 7710, 2025. DOI: <<https://doi.org/10.1038/s41598-025-92000-0>>
- ANJOS, M., LOPES, A. S., LUCENA, A. J., MENDONÇA, F. Sea Breeze Front and Outdoor Thermal Comfort during Summer in Northeastern Brazil. **Atmosphere**, v. 11, n. 9, p. 1013, 2020. DOI: <<https://doi.org/10.3390/atmos11091013>>
- ANJOS, M.; LOPES, A. Urban Heat Island and Park Cool Island Intensities in the Coastal City of Aracaju, North-Eastern Brazil. **Sustainability**, v. 9, p. 1379, 2017. DOI: <<https://doi.org/10.3390/su9081379>>
- CASTELHANO, F. J.; PINTO, J. E. S. de S. Tendências e alterações climáticas no Estado de Sergipe, nordeste do Brasil. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, v. 42, p. e185565, 2022. DOI: <<https://doi.org/10.11606/eISSN.2236-2878.rdg.2022.185565>>
- CASTRO, L. G. de. **Zonas climáticas locais em cidades pequenas: relação entre temperatura e morfologia urbana**. 2022. 115 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.
- CHING, J. *et al.* WUDAPT: An Urban Weather, Climate, and Environmental Modeling Infrastructure for the Anthropocene. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 99, n. 9, p. 1907-1924, 2018. DOI: <<https://doi.org/10.1175/BAMS-D-16-0236.1>>
- DEMUZERE, M.; KITTNER, J.; BECHTEL, B. LCZ Generator: a web application to create Local Climate Zone maps. **Frontiers in Environmental Science**, v. 9, p. 637455, 2021. DOI: <<https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.637455>>
- DEMUZERE, M.; VAN COILLIE, F. M. B.; BECHTEL, B. A global map of Local Climate Zones to support earth system modelling and urban-scale environmental science. **Earth System Science Data**, v. 14, n. 8, p. 3835–3868, 2022. DOI: <<https://doi.org/10.5194/essd-14-3835-2022>>

- FERREIRA, H. V. L.; UGEDA JÚNIOR, J. C. Variação da temperatura da superfície através de imagens ASTER em Zonas Climáticas Locais da cidade de Cuiabá, Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 26, p. 393-410, 2020. DOI: <<https://doi.org/10.5380/abclima.v26i0.67546>>
- HAN, J., MO, N., CAI, J., OUYANG, L., LIU, Z. Advancing the local climate zones framework: a critical review of methodological progress, persisting challenges, and future research prospects. **Humanities and Social Sciences Communications**, v. 11, p. 538, 2024. DOI: <<https://doi.org/10.1057/s41599-024-03072-8>>
- HUANG, F. *et al.* Mapping local climate zones for cities: A large review. **Remote Sensing of Environment**, v. 292, p. 113573, 2023. DOI: <<https://doi.org/10.1016/j.rse.2023.113573>>
- LIMA, E. S.; PINTO, J. E. S. S. Teoria e Clima Urbano: Percepção Ambiental da População do Bairro 13 de Julho em Aracaju/SE. *In*: ENCONTRO SERGIPANO DE EDUCAÇÃO AMBIENTAL, 1., 2008, São Cristóvão. **Anais [...]**. São Cristóvão: Universidade Federal de Sergipe, 2008.
- NG, E.; REN, C. **The Urban Climatic Map: A Methodology for Sustainable Urban Planning**. New York: Routledge, 2015.
- OpenStreetMap**. 2024. Disponível em: <https://www.openstreetmap.org>. Acesso em: 16 jan. 2025.
- PEREIRA, J. F. **Clima urbano e (des)conforto térmico na cidade de Aracaju-SE**. 2019. 114 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) – Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2019.
- R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2021. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Acesso em: 29/10/2025.
- REN, C.; NG, E.; KATZSCHNER, L. Urban climatic map studies: a review. **International Journal of Climatology**, v. 31, n. 15, p. 2213-2233, 2011. DOI: <<https://doi.org/10.1002/joc.2237>>
- SANTOS, B. F.; PINTO, J. E. S. de S. Urbanização e Clima Urbano: Teoria e Aplicação no Bairro Atalaia-Aracaju/Sergipe/Nordeste do Brasil. **Revista Geonordeste**, v. 31, n. 2, p. 261-279, 2020.
- STEWART, I. D.; OKE, T. R. Local Climate Zones for Urban Temperature Studies. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 93, n. 12, p. 1879-1900, 2012. DOI: <<https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>>
- THE MATHWORKS INC. **MATLAB version: 9.13.0 (R2022b)**. Natick: The MathWorks Inc., 2022.
- VAN ROSSUM, G.; DRAKE JR., F. L. **Python reference manual**. Amsterdam: Centrum voor Wiskunde en Informatica, 1995.

Anexo

Código R utilizado para análise de dados e geração de resultados no trabalho:

```
# -----  
# 1. Carregamento dos pacotes necessários  
# -----  
  
# Instalação e carregamento do pacote LCZ4r (disponível no GitHub)  
if (!require(remotes)) install.packages("remotes")  
remotes::install_github("ByMaxAnjos/LCZ4r", upgrade = "never")  
  
# Ativação das bibliotecas utilizadas  
  
library(LCZ4r) # Para análise de LCZ  
library(data.table) # Para manipulação eficiente de dados  
library(cowplot) # Para combinação de gráficos  
  
# -----  
# 2. Carregamento dos dados  
# -----  
  
# Carregar o banco de dados para Aracaju/SE automaticamente do repositório  
  
my_data <- fread("https://raw.githubusercontent.com/ByMaxAnjos/MachineLearning_for_geospa-  
tial_analysis/refs/heads/main/LCZ4r_Education/lcz_data_aracaju.csv")  
  
# -----  
# 3. Obtenção dos mapas de LCZ  
# -----  
  
# Obter mapas do LCZ Generator Map  
  
lcz_map <- lcz_get_map_generator(ID = "63e913f886a311de3bfc6d678dee669f2a6c24f6")  
lcz_map2 <- lcz_get_map2(lcz_map, city = "Aracaju")  
  
# Visualização dos mapas  
  
lcz_plot_map(lcz_map) # Mapa generator  
lcz_plot_map(lcz_map2) # Mapa específico para área de Aracaju  
  
# -----  
# 4. Análise da intensidade da Ilha de Calor Urbana (ICU)  
# -----  
  
# 4.1. Série Temporal (2014 a 2016)  
  
lcz_ts(lcz_map,  
  data_frame = my_data,  
  var = "airT",  
  station_id = "station",
```

```

time.freq = "day",
  year = 2014:2016,
  ylab = "Air temperature [°C]",
  xlab = "Date",
  title = "LCZ - Timeseries",
  caption = "Source: LCZ4r, 2024."
)

```

4.2. Sazonalidade da ICU (2014)

```

lcz_uhi_intensity(
  lcz_map,
  data_frame = my_data,
  var = "airT",
  station_id = "station",
  time.freq = "hour",
  method = "LCZ",
  year = 2014,
  by = "season",
  ylab = "Temperatura do Ar [°C]",
  xlab = "Tempo",
  title = "Sazonalidade da ICU em Aracaju, 2014",
  caption = "Source: LCZ4r, 2024",
  group = TRUE
)

```

4.3. Ciclo diurno da ICU (Dia de Maior Variação Térmica - 18/02/2016)

```

lcz_uhi_intensity(
  lcz_map,
  data_frame = my_data,
  var = "airT",
  station_id = "station",
  time.freq = "hour",
  method = "manual",
  Turban = "JAR",
  Trural = "ZON",
  year = 2016,
  month = 2,
  day = 18,
  by = "daylight",
  ylab = "Temperatura do ar [°C]",
  xlab = "Hora",
  ylab2 = "ΔT [°C] - ICU",
  title = "Ciclo Diurno da ICU",
  isave = TRUE,
  group = TRUE
)

```

```

# -----
# 5. Interpolação da temperatura do Ar
# -----

# 5.1. Interpolação com o uso das LCZs

interp_map <- lcz_interp_map(
  lcz_map2,
  data_frame = my_data,
  var = "airT",
  station_id = "station",
  sp.res = 100,
  tp.res = "hour",
  year = 2016,
  month = 2,
  day = 18,
  hour = 8
)

map_com_lcz <- lcz_plot_interp(
  interp_map,
  title = "A) Interpolação com LCZ",
  fill = "[Temp °C]"
)

# 5.2. Interpolação sem o uso das LCZs

interp_map_sem <- lcz_interp_map(
  lcz_map2,
  data_frame = my_data,
  var = "airT",
  station_id = "station",
  sp.res = 100,
  tp.res = "hour",
  year = 2016,
  month = 2,
  day = 18,
  hour = 8,
  LCZinterp = FALSE
)

map_sem_lcz <- lcz_plot_interp(
  interp_map_sem,
  title = "B) Interpolação sem LCZ",
  fill = "[Temp °C]"
)

# 5.3. Combinação das Interpolações em uma Única Figura

figura_final <- plot_grid(map_com_lcz, map_sem_lcz, ncol = 2, nrow = 1)
ggsave2("caminho/figura_artigo.png", width = 9, height = 7, figura_final, dpi = 300)

```

```
# -----  
# 6. Avaliação da Interpolação  
# -----  
  
interp_eval <- lcz_interp_eval(  
  lcz_map2,  
  data_frame = my_data,  
  var = "airT",  
  station_id = "station",  
  sp.res = 500,  
  tp.res = "hour",  
  LOOCV = FALSE,  
  LCZinterp = FALSE,  
  year = 2016,  
  month = 2,  
  day = 18  
)
```