INTEGRAÇÃO DE BALANÇO HÍDRICO, TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE TERRESTRE E NDVI: POTENCIALIDADE DE ILHAS DE CALOR NA REGIÃO METROPOLITANA DE ARACAJU (SE)

Debora Silva Nunes[1]; Jonas Xavier Santos[2] & Paulo Sérgio de Rezende Nascimento[3]

RESUMO – O adensamento populacional em cidades impulsiona a urbanização de áreas arborizadas, afetando a regulação da umidade e elevando a temperatura, tornando o ambiente urbano suscetível à formação de ilhas de calor. Assim, este trabalho analisou a potencialidade de formação de ilhas de calor urbanas superficiais a partir da temperatura da superfície terrestre, do índice de vegetação por diferença normalizada e do balanço hídrico climático, para a Região Metropolitana de Aracaju, nos anos de 2015, 2020 e 2025. Dessa forma, utilizou-se o software QGIS para o processamento digital das imagens dos satélites Landsat8/9 e planilhas do Excel para o tratamento dos dados climatológicos. Observou-se que zonas mais urbanizadas apresentaram menores valores do índice de vegetação e maiores valores da temperatura da superfície terrestre, identificando uma possível ilha de calor na região intensamente urbanizada de Aracaju. A metodologia utilizada pode ser replicada para outras regiões, ampliando a compreensão da relação entre o aumento da temperatura da superfície e da expansão urbana e do balanço hídrico.

ABSTRACT – Population density in cities drives the urbanization of wooded areas, affecting humidity regulation and raising temperatures, making the urban environment susceptible to the formation of heat islands. Therefore, this study analyzed the potential for the formation of surface urban heat islands based on land surface temperature, the normalized difference vegetation index, and the climatic water balance for the Metropolitan Region of Aracaju in the years 2015, 2020, and 2025. The QGIS software was used for digital processing of Landsat 8/9 satellite images, and Excel spreadsheets were used for processing climatological data. It was observed that more urbanized areas presented lower values for the vegetation index and higher values for land surface temperature, identifying a possible heat island in the intensely urbanized region of Aracaju. The methodology used can be replicated for other regions, expanding the understanding of the relationship between increased surface temperature, urban expansion, and water balance.

Palavras-chave – Balanço Hídrico Climatológico. Aspectos geomorfométricos. Geoprocessamento.

[1]) Graduanda do Departamento de Engenharia Ambiental – DEAM/UFS, São Cristóvão, Sergipe. E-mail: debora.silnun@gmail.com
[2]) Graduando do Departamento de Engenharia Ambiental – DEAM/UFS, São Cristóvão, Sergipe. E-mail: jonasxavier677@gmail.com
[3]) Professor do Departamento de Engenharia Ambiental e Programa de Pós-graduação em Geociências e Análise de Bacia - UFS. E-mail: psrn.geologia@gmail.com

INTRODUÇÃO

O crescente aumento populacional tem demandado a expansão da urbanização, resultando na substituição da vegetação por áreas pavimentadas e impermeáveis, o que contribui para o aumento da temperatura local e para a formação de ilhas de calor urbanas (ICU). De acordo com o último censo do IBGE, em 2022, Aracaju é a quarta capital menos arborizada do Brasil, com 44,55% de áreas arborizadas e, dentre os municípios da Região Metropolitana de Aracaju (RMA), ocupa o segundo lugar, atrás apenas do município de Barra dos Coqueiros, com 49,42%.

A vegetação é essencial para a regulação do microclima urbano, devido às interações solo–vegetação–atmosfera, pois mantém, por meio da evapotranspiração, a superfície terrestre mais úmida. Estudos indicam redução da temperatura do ar entre 1,5 ºC e 4,0 ºC em áreas urbanas arborizadas, pois na ausência de vegetação, predomina a evaporação da água do solo e de corpos hídricos, tornando a superfície mais quente. Além disso, a radiação solar em superfícies úmidas converte-se em calor latente, sem elevar muito a temperatura, enquanto em superfícies secas, como solo exposto e edificações, transforma-se em calor sensível, aumentando a temperatura urbana (Romero, 2010).

A redução do conforto térmico humano em ambientes urbanos abertos está diretamente relacionada à temperatura da superfície terrestre (TST), elemento fundamental do balanço energético, pois influencia o clima interno das edificações e o conforto térmico dos moradores (Borges; Batista, 2020). Além de impactar a saúde humana, como o estresse térmico, as elevadas temperaturas também aumentam o consumo de energia para resfriamento. Nesse contexto, a vegetação modula a temperatura ao absorver radiação solar por fotossíntese e evapotranspiração, reduzindo sua reemissão; já áreas sem cobertura vegetal apresentam desequilíbrio no balanço radiométrico.

Nesse contexto, a ilha de calor urbana de superfície (ICUS) destaca-se como a manifestação mais evidente das transformações antrópicas em escala local, e dependente das condições climáticas (Rodríguez-Álvarez, 2016). A precipitação e a evapotranspiração são os indicadores centrais do balanço hídrico climatológico (BHC). A evapotranspiração apresenta relação inversa com a TST, pois o aumento do fluxo de calor latente reduz o aquecimento superficial, enquanto a precipitação atua indiretamente ao controlar a disponibilidade hídrica e, consequentemente, a intensidade das ICUS.

Para a avaliação da ICUS, analisa-se a temperatura da superfície terrestre (TST) como parâmetro do fluxo de calor, com base no balanço radiométrico da superfície. Quando a radiação solar incide sobre a Terra, parte é refletida e parte é absorvida; esta última é posteriormente emitida e

registrada na faixa do infravermelho termal por sensores remotos. Dessa forma, o calor cinético interno dos objetos é convertido em energia radiante que pode ser convertida em valores de TST por meio do processamento digital de imagens orbitais. Uma forma de mitigar os efeitos da urbanização sobre a TST é a presença de espaços verdes, os quais podem ser estimados por meio do Índice de Vegetação de Diferença Normalizada (NDVI).

Assim, este trabalho analisa a potencialidade de formação de ICUS a partir da TST, do NDVI e do balanço hídrico climático, nos anos de 2015, 2020 e 2025, na Região Metropolitana de Aracaju (RMA).

MATERIAL E MÉTODO

A Região Metropolitana de Aracaju é composta pelos municípios de Aracaju, Barra dos Coqueiros, Nossa Senhora do Socorro e São Cristóvão, totalizando uma área de cerca de 860,11 km². A região está delimitada pelos paralelos 10°44'37" e 11º9'38" de latitude Sul e meridianos 36°51'24" e 37°9'21" de longitude Oeste, e os principais acessos à área são as BR-101 e BR-235 (Figura 1).

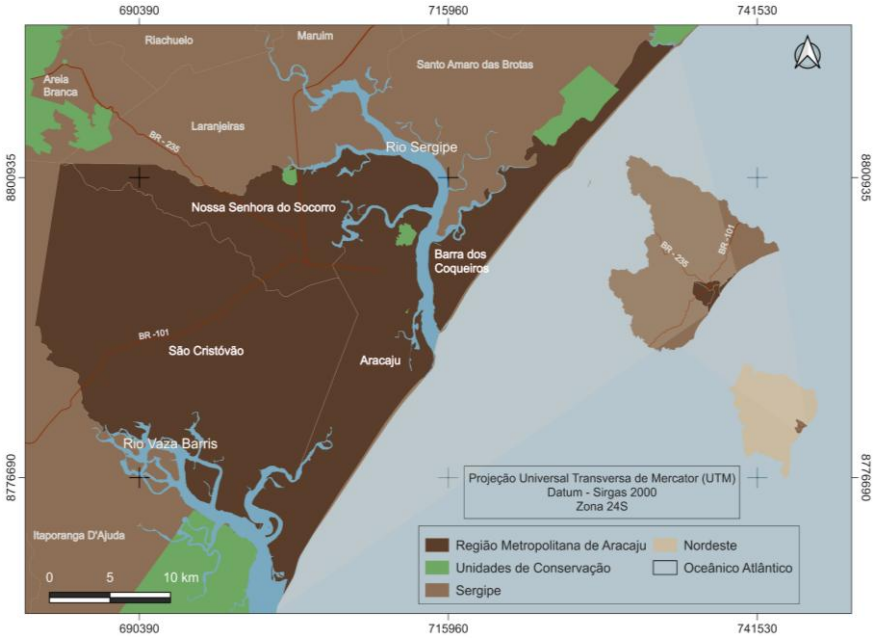


Figura 1 – Mapa de localização da Região Metropolitana de Aracaju. Fonte: Autores (2026).

Para o cálculo da TST, foi utilizada a banda espectral 10 do infravermelho termal dos sensores TIRS e TIRS-2, dos satélites Landsat-8 e Landsat-9, respectivamente, reamostrada para a resolução espacial de 30 metros. Para o cálculo do NDVI, foram empregadas as bandas 4 e 5 das regiões espectrais do vermelho e do infravermelho próximo, dos sensores OLI e OLI-2, com resolução espacial de 30 metros. Para a seleção das imagens orbitais, priorizaram-se aquelas com menor

incidência de nuvens nos períodos chuvosos e secos. Assim, para os anos de 2015, 2020 e 2025, as datas de aquisição foram: 20/04 e 14/11; 20/06 e 10/10; e 18/06 e 03/12, respectivamente.

O processamento digital para a obtenção da TST considerou a superfície terrestre com emissividade unitária, sendo necessária a aplicação de correções radiométricas nas imagens da banda espectral 10. As constantes exigidas pelas equações foram extraídas dos metadados das imagens dos satélites Landsat-8 e Landsat-9, conforme apresentado na Equação 1. A partir da matriz de TST calculada, realizou-se a reclassificação dos valores, agrupando os dados em intervalos de temperatura homogêneos, por meio da ferramenta "r.reclass", do GRASS GIS integrado ao ambiente do QGIS.

$$T = \frac{K_2}{ln\left(\frac{K_1}{M_L Q_{cal} + A_L} + 1\right)} - 273{,}15 \quad (1)$$

Onde: T - TST; M_L - Fator de escala multiplicativo da radiância para a banda; Q_{cal} - Imagem da banda 10; A_L - Fator de escala aditivo de radiância para a banda; K_1 e K_2 - Constantes de conversão térmica específica da banda a partir dos metadados.

O NDVI é obtido a partir da razão normalizada entre a reflectância do infravermelho próximo (NIR) e do vermelho (RED), conforme a Equação 2.

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (2)$$

Os diários e mensais de precipitação, evapotranspiração, temperatura, radiação solar e umidade relativa da área de estudo foram obtidos na plataforma *Brazilian Daily Weather Gridded Data* (BR-DWGD) construída sobre o ambiente digital *Google Earth Engine* (GEE). Os dados foram reorganizados para os períodos de estiagem e de chuva.

RESULTADOS

Para o período chuvoso, a TST variou entre 8,11 °C e 27,5 °C (Figura 2). Em 2020, a TST apresentou valores mais elevados em comparação a 2015 e 2025, concentrando-se majoritariamente entre 23 °C e 27 °C. As temperaturas mais baixas observadas nos anos analisados estão associadas à presença de nuvens, especialmente em 2025, quando houve maior interferência na estimativa da temperatura superficial. Todos os anos do período chuvoso sofreram influência do anuviamento; em 2015, essa interferência foi pequena, aumentando em 2020 e tornando-se mais expressiva em 2025, com maior cobertura de nuvens sobre a área de estudo, o que intensificou a interferência atmosférica e reduziu os valores de TST registrados.

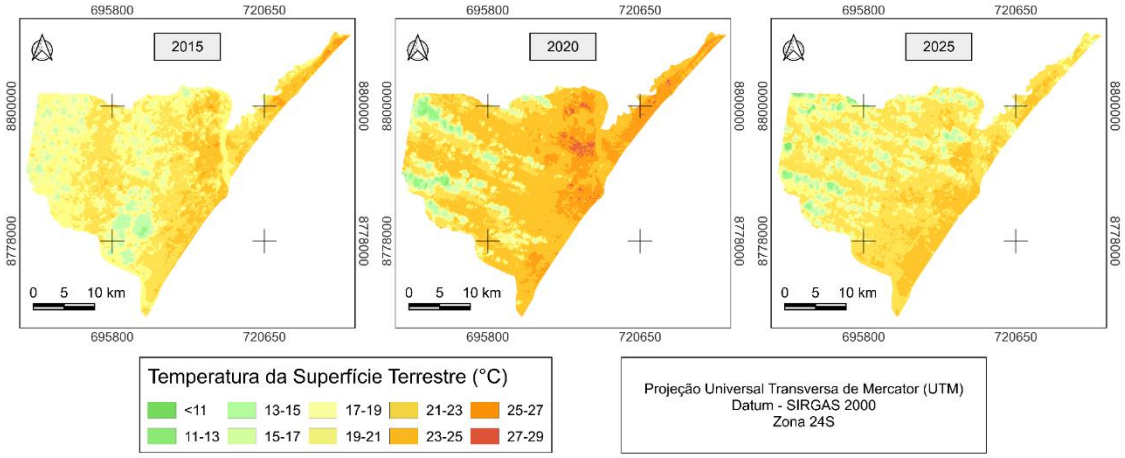


Figura 2 – Temperatura da Superfície Terrestre durante o período chuvoso na RMA. Fonte: Autores (2026).

Durante o período de estiagem, a temperatura da superfície terrestre (TST) variou entre 17 °C e 37 °C, com maior concentração entre 27 °C e 33 °C (Figura 3). Ressalta-se a exceção de 2025, cujos valores foram parcialmente afetados pela alta cobertura de nuvens durante a aquisição das imagens. Em comparação com a Figura 2, observa-se que as maiores TST se concentram em áreas mais urbanizadas ou intensamente modificadas por atividades antrópicas, enquanto os menores valores estão associados a corpos hídricos e a áreas com maior densidade de cobertura vegetal. Destaca-se que as medidas remotas da temperatura radiante são ligeiramente inferiores à energia cinética, com diferenças em torno de ±0,5 °C (Jensen, 2009).

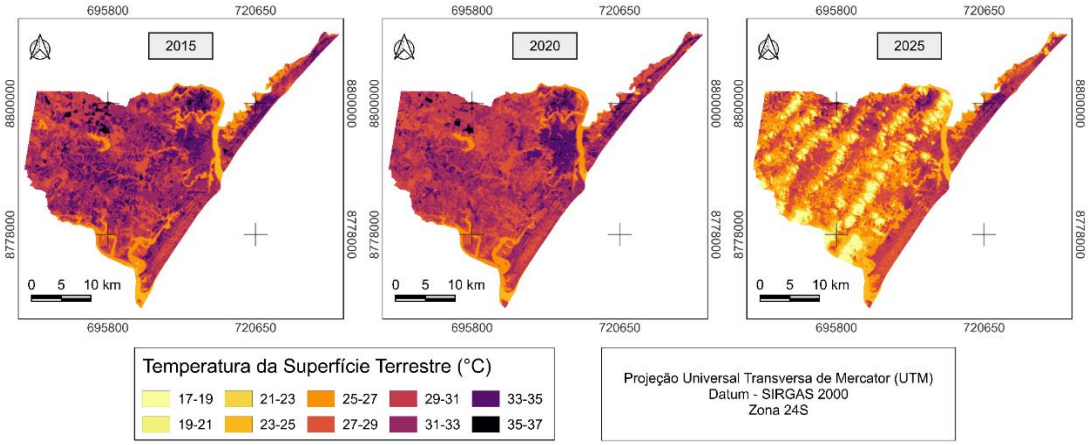


Figura 3 – Temperatura da Superfície Terrestre durante o período de estiagem na RMA. Fonte: Autores (2026).

As temperaturas mínimas e máximas de cada ano estão apresentadas na Tabela 1. Observa-se que 2025 apresenta a menor temperatura mínima e também valores máximos inferiores no período de estiagem, devido à maior interferência atmosférica nas imagens. Ressalta-se que as temperaturas obtidas por sensores remotos dependem da emissividade dos alvos (Jensen, 2009) e da energia

radiante média registrada no campo de visada instantâneo (IFOV), podendo ocorrer pequenas variações nos valores estimados.

Tabela 1 – Valores mínimos e máximos de TST.

TST	2015		2020		2025	
	Chuvoso	Estiagem	Chuvoso	Estiagem	Chuvoso	Estiagem
Mínima (°C)	12,11	23,05	9,84	23,06	8,11	16,13
Máxima (°C)	25,78	37,61	27,50	37,66	24,36	34,58

De acordo com a escala de sensação térmica (Shinzato e Duarte, 2018), no período chuvoso, os valores mínimos de TST correspondem à sensação de frio nos três anos, enquanto os máximos indicam sensação de neutralidade. No período de estiagem, os valores mínimos de TST correspondem à neutralidade em 2015 e 2020 e à sensação de leve frio em 2025; já os valores máximos indicam sensação de leve calor em 2025 e de calor em 2015 e 2020.

Neste trabalho, foram adotadas as seguintes faixas para o resultado do NDVI: −1,0 a 0,0 (corpos hídricos); 0,0 a 0,1 (nuvens e solos expostos); 0,1 a 0,2 (solos expostos e/ou vegetação rala); 0,2 a 0,5 (grama e vegetação esparsa); e 0,5 a 1,0 (vegetação densa) (Ferreira, 2015). Na Figura 4, observa-se que, na Região Metropolitana de Aracaju (RMA), a vegetação densa é escassa, predominando a vegetação esparsa. Ao longo do período analisado, verifica-se aumento gradual tanto da vegetação densa quanto das áreas de solo exposto. Na Tabela 2, são apresentados os valores mínimos e máximos de NDVI para cada ano analisado.

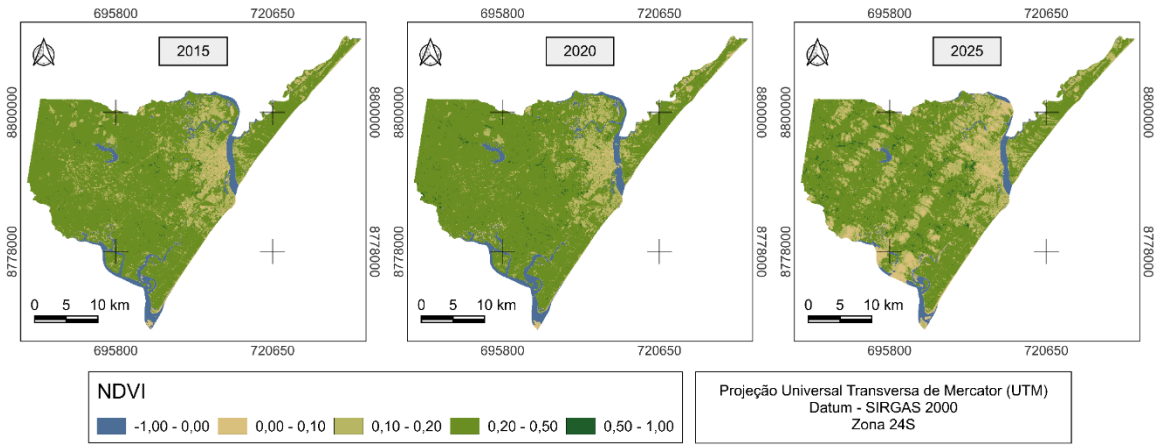


Figura 4 – Índice de Vegetação por Diferença Normalizada na RMA. Fonte: Autores (2026).

Tabela 2 – Mínimos e máximos valores de NDVI.

NDVI	2015	2020	2025
Mínimo	-0,27	-0,23	-0,17
Máximo	0,62	0,63	0,59

Essa distribuição pode ser correlacionada com as Figuras 2 e 3, pois áreas com menor NDVI concentram maiores temperaturas da superfície terrestre. A RMA apresenta setores com valores de TST significativamente mais elevados em relação às áreas adjacentes, indicando a possível formação de Ilhas de Calor Urbanas Superficiais (ICUS), com destaque para a região apresentada na Figura 4. Essa área caracteriza-se por intensa urbanização (Figura 5A), TST superior ao entorno (Figura 5B) e NDVI positivo próximo de zero (Figura 5C), indicando baixa cobertura vegetal e/ou predominância de solos expostos.

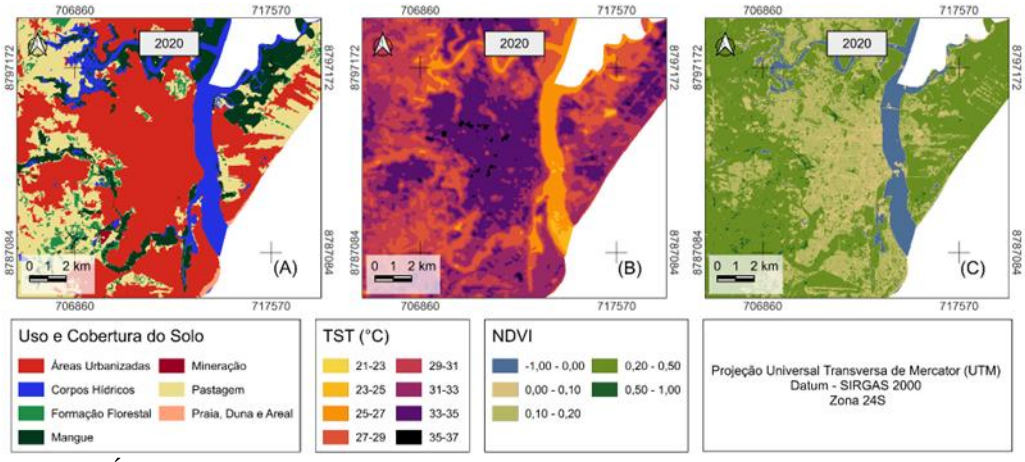


Figura 5 – Área com possível formação de ilha de calor urbana superficial. Fonte: Autores (2026).

Diante do BHC (Tabela 3) é perceptível que durante o período de estiagem a precipitação foi inferior à evapotranspiração em todos os anos e municípios analisados; durante o período chuvoso, o inverso ocorre. Assim, na estiagem, há um déficit hídrico, que pode secar o solo e causar estresse hídrico na vegetação, diminuindo o arrefecimento do ambiente pela transpiração das plantas, e, em conjunto com o solo mais exposto, aumenta a absorção da radiação solar, que, somado aos índices de radiação solar mais elevados do período, aumentam também a TST. Já no período chuvoso, acontece um excedente hídrico, que revigora a vegetação, capaz de regular a troca de calor latente e resfriar naturalmente o ambiente, por isso as temperaturas são menores no período chuvoso. Diante do exposto, justifica-se as maiores umidades relativas no período de chuva e menores na seca.

Os ventos foram repetidamente mais intensos no período de estiagem em todos os municípios e anos avaliados, acarretando na aceleração da evapotranspiração, pois o vento remove rapidamente a camada de ar úmido por um ar mais seco, forçando o ambiente a perder água pela evapotranspiração (Ayoade, 1996). Entretanto, também há um efeito positivo para moradores das áreas urbanizadas, pois os ventos rápidos são fundamentais para dissipar parte do calor que é acumulado pelas construções, aliviando ligeiramente a sensação térmica.

Tabela 3 – Balanço hídrico climático dos municípios da RMA.

Período	P (mm/mês)	ETo (mm/mês)	RS (MJ/m²)	$T_{Mín}$ (°C)	$T_{Máx}$ (°C)	$T_{méd}$ (°C)	VV (m/s)	UR (%)
2015								
Aracaju								
Estiagem	222,99	935,72	24,76	22,09	30,78	26,44	2,03	70,65
Chuvoso	1058,42	660,55	23,22	16,90	29,79	23,35	1,39	76,87
Barra dos Coqueiros								
Estiagem	197,14	950,16	24,58	22,17	30,82	26,49	2,15	69,79
Chuvoso	1007,95	668,06	23,16	17,01	29,79	23,40	1,42	76,19
Nossa Senhora do Socorro								
Estiagem	214,52	944,23	24,29	21,99	30,67	26,33	2,26	70,32
Chuvoso	1034,25	660,87	22,97	16,83	29,62	23,22	1,51	77,19
São Cristóvão								
Estiagem	240,79	929,63	24,15	21,87	30,71	26,29	2,22	71,59
Chuvoso	1102,99	651,17	22,82	16,72	29,52	23,12	1,55	78,59
2020								
Aracaju								
Estiagem	446,08	885,13	24,97	20,98	31,45	26,21	1,95	73,93
Chuvoso	1259,16	616,26	23,16	16,32	29,51	22,91	1,34	83,03
Barra dos Coqueiros								
Estiagem	429,46	888,77	24,83	21,23	31,39	26,31	1,91	73,79
Chuvoso	1392,40	616,85	23,24	16,37	29,35	22,86	1,30	82,62
Nossa Senhora Socorro								
Estiagem	395,80	886,47	24,52	21,26	31,24	26,25	1,91	73,65
Chuvoso	1334,35	610,23	23,17	16,37	29,04	22,70	1,23	82,85
São Cristóvão								
Estiagem	434,58	882,12	24,35	21,01	31,27	26,14	1,98	73,66
Chuvoso	1245,31	606,47	22,99	16,27	28,98	22,63	1,32	83,42
2025								
Aracaju								
Estiagem	308,37	896,71	23,55	21,10	32,72	26,91	1,86	73,48
Chuvoso	1013,43	627,89	21,86	15,99	29,52	22,76	1,46	78,07
Barra dos Coqueiros								
Estiagem	298,11	890,37	23,63	21,04	32,69	26,86	1,83	73,83
Chuvoso	995,83	623,71	21,93	15,94	29,49	22,71	1,40	78,08
Nossa Senhora do Socorro								
Estiagem	307,84	908,24	23,47	21,46	32,92	27,19	1,82	73,35
Chuvoso	993,28	624,05	21,72	16,04	29,48	22,76	1,38	78,07
São Cristóvão								
Estiagem	319,16	914,82	23,25	21,58	32,89	27,24	1,86	73,12
Chuvoso	1023,49	626,44	21,53	16,04	29,47	22,75	1,44	78,09

Legenda: P - Precipitação; ETo - Evapotranspiração; RS - Radiação Solar; $T_{mín}$ - Temperatura Mínima; $T_{máx}$ - Temperatura Máxima; $T_{méd}$ - Temperatura Média; VV - Velocidade do Vento; e UR - Umidade Relativa.

O ano de 2020 apresentou um padrão de precipitação mais intensa e a evapotranspiração inferior aos demais anos, representando um excedente hídrico vigoroso e o BHC menos crítico; sobretudo durante a estiagem, que, em comparação com 2015, corresponde à quase seu dobro, dessa forma, correlacionando com a Figura 3, justifica-se as TST mais brandas. Para o ano de 2025,

observou-se um aumento nas temperaturas máximas e menores valores de velocidade do vento, no período de estiagem, em relação aos anos anteriores, proporcionando um ambiente em que o ar quente fica mais estagnado sobre as cidades, dificultando seu resfriamento.

O ciclo da água sofre alterações nas áreas mais urbanizadas da RMA, pois a substituição das áreas verdes por áreas cinzas impedem a infiltração da água no solo (Villela, 1975). Mesmo nos períodos chuvosos, a água escoa precipitadamente e não fica retida no solo, consequentemente, essas áreas representam temperaturas mais altas, como pode ser observado na Figura 2.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aplicação integrada de técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento permitiu analisar, comparar e correlacionar a Temperatura da Superfície Terrestre (TST), o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e o Balanço Hídrico Climático (BHC), além de avaliar a dinâmica espaço-temporal dessas variáveis em 2015, 2020 e 2025 na Região Metropolitana de Aracaju (RMA). Os resultados evidenciaram que as maiores TST se concentram em áreas de baixa cobertura vegetal, e áreas arborizadas apresentam temperaturas mais amenas, reforçando o papel da vegetação na regulação do microclima urbano. Nesse contexto, identificou-se a possível formação de uma Ilha de Calor Urbana Superficial (ICUS) ao norte de Aracaju, associada à intensa urbanização. A partir do BHC, observou-se que a combinação da alta radiação solar, da baixa precipitação somada à alta evapotranspiração, e ventos velozes, aceleram o estresse hídrico das plantas no período de estiagem. Do ponto de vista teórico-metodológico, o estudo apresenta uma abordagem consistente e replicável em outras áreas urbanas, contribuindo para reduzir a lacuna de estudos sobre a relação entre urbanização, cobertura vegetal e clima urbano na RMA. Sob a perspectiva socioambiental, foi evidenciada a importância estratégica das áreas verdes na mitigação do estresse térmico, além de subsidiar a identificação de áreas prioritárias para revegetação e planejamento urbano, visando à melhoria da qualidade ambiental e do conforto térmico da população.

REFERÊNCIAS

AYOADE, J. O. (1996). *Introdução à Climatologia para os Trópicos* 4. ed. Bertrand Brasil, Rio de Janeiro - RJ, 332p.

BORGES, J. C. A.; BATISTA, L. F. A. *"Índice de vegetação e temperatura de superfície terrestre: comparativo entre formação de ilhas de calor nos perímetros urbanos de Londrina e Maringá no PR"*. Revista Brasileira de Geomática, Curitiba, v. 8, n. 4, p. 256-274, out/dez. 2020.

FERREIRA, Z. A. *Diagnóstico físico-conservacionista do ambiente cárstico da Bacia do córrego Cana - Brava, Aurora do Tocantins – TO*. 2015. Dissertação (Mestrado em Ciências do Ambiente). Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2015.

JENSEN, J. R. *Remote sensing of the environment: an earth resource perspective*, 2. ed. New Jersey: Prentice Hall, 2009, 598p.

ROMERO, M. A. B. *"Correlação entre o microclima e a configuração do espaço residencial em Brasília"*. Paranoá, Brasília, v. 4, n. 5, p. 67-76, jul. 2010. Disponível em: https://periodicos.unb.br/index.php/paranoa/article/view/10570/9289. Acesso em 27 out. 2025.

RODRÍGUEZ-ÁLVAREZ, J. *"Surface urban heat island and buildings energy: visualization of urban climatic flows"*. PosFAUUSP, São Paulo, v. 23, n. 41, p. 122-139, 2016. Disponível em: https://revistas.usp.br/posfau/article/view/116464/122685. Acesso em: 27 out. 2025.

SHINZATO, P.; DUARTE, D. H. S. *"Impacto da vegetação nos microclimas urbanos e no conforto térmico em espaços abertos em função das interações solo-vegetação-atmosfera"*. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 18, n. 2, p. 197-215, abr./jun. 2018. https://doi.org/10.1590/s1678-86212018000200250.

VILLELA, S. M. (1975). *Hidrologia Aplicada*. McGraw-Hill do Brasil, São Paulo – SP, 245 p.