

Guilherme Silva de Sousa

Mestre em Geografia pela Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT) da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP)
guilherme.s.sousa@unesp.br

Margarete Cristiane de Costa Trindade Amorim

Doutorado em Geografia Física pela Universidade de São Paulo, Membro do Conselho Deliberativo do Associação Brasileira de Climatologia, bolsista de produtividade em pesquisa do CNPq, nível 1B
margarete.amorim@unesp.br

A precipitação como parâmetro interpretativo das ilhas de calor urbanas superficiais em Natal (RN)

Resumo

Este artigo teve como objetivo analisar as ilhas de calor urbanas superficiais na cidade de Natal, Rio Grande do Norte, considerando a cobertura da terra e os dados de precipitação como parâmetros de análise. Foram utilizadas duas imagens do satélite *Landsat 8* (sensores *OLI* e *TIRS-1*) dos meses de junho e setembro de 2018, além de quatro recortes distintos de uso e cobertura da terra urbana. Os procedimentos envolveram técnicas de Sensoriamento Remoto e o uso integrado de dados de precipitação para a compreensão e a análise das imagens de satélite. Os resultados indicaram que as intensidades das ilhas de calor superficiais em Natal estão relacionadas aos volumes de precipitação acumulados antes da captura das imagens e às diferentes formas de uso e cobertura da terra urbana. As maiores intensidades das ilhas de calor foram observadas, especialmente, nas áreas urbanas construídas, enquanto os menores valores foram identificados em áreas com vegetação arbórea ou uso misto para cultivo agrícola urbano/periurbano. Essa análise foi corroborada pelas cartas do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI). Os resultados deste estudo destacam a importância das áreas vegetadas no ambiente urbano e a necessidade de se desenvolver estratégias para atenuar os efeitos das ilhas de calor urbanas, ressaltando a centralidade da discussão sobre a qualidade ambiental urbana e a relação Sociedade-Natureza.

Palavras-chave: Ilhas de calor, Temperatura, Superfície, Clima urbano, Agricultura urbana e periurbana.

Abstract

PRECIPITATION AS AN INTERPRETATIVE PARAMETER OF SURFACE URBAN HEAT ISLANDS IN NATAL (RN)

This article aimed to analyze surface urban heat islands in the city of Natal, Rio Grande do Norte, considering land cover and precipitation data as analysis parameters. Two images from the *Landsat 8* satellite (*OLI and TIRS-1 sensors*) from June and September 2018 were used, in addition to four distinct segments of urban land use and cover. The procedures involved Remote Sensing techniques and the integrated use of precipitation data for the understanding and analysis of satellite images. The results indicated that the intensities of surface heat islands in Natal are related to the volumes of accumulated precipitation before the images were captured and the different forms of urban land use and cover. The highest intensities of heat islands were observed mainly in built urban areas, while the lowest values were identified in areas with tree vegetation or mixed use for urban/peri-urban agricultural cultivation. This analysis was corroborated by Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) maps. The results of this study highlight the importance of vegetated areas in the urban environment and the need to develop strategies to mitigate the effects of urban heat islands, emphasizing the centrality of the discussion on urban environmental quality and the Society-Nature relationship.

Key-words: Heat islands, Temperature, Surface, Urban climate, Agriculture.

1. Introdução

A compreensão, o diagnóstico e a caracterização das ilhas de calor urbanas (ICU) têm sido foco frequente de estudos científicos em diferentes contextos urbanos ao redor do mundo. Esse interesse se deve, principalmente, ao emprego e à evolução de diversas técnicas e procedimentos de análise que contribuem não apenas para a elucidação dos benefícios ou malefícios que tal fenômeno provoca nas estruturas térmicas das cidades, mas também para a reflexão sobre a qualidade ambiental urbana.

As investigações sobre áreas urbanas situadas em ambientes tropicais são mais recentes em comparação aos estudos realizados em áreas urbanas de clima temperado (AMORIM, 2020). No entanto, um número significativo de pesquisadores já tem dedicado suas reflexões teórico-metodológicas aos diversos contextos urbanos tropicais. No caso brasileiro, destacam-se trabalhos como os de Tarifa (1977), Lombardo (1985), Zamparoni (1995), Amorim (2000; 2020) e Nakata-Osaki, Souza e Rodrigues (2016).

No ambiente tropical, onde as altas temperaturas é uma característica predominante, há preocupação crescente com o desconforto térmico e a saúde da população (AMORIM, 2018). Isso torna necessário repensar a organização de nossas cidades, buscando oferecer contribuições relevantes para o planejamento territorial urbano e melhorar a qualidade de vida dos habitantes.

Países como China, Bangladesh e Turquia têm conduzido pesquisas sobre ilhas de calor urbanas atmosféricas e superficiais, analisando a composição paisagística das cidades, padrões meteorológicos de superfície e métodos estatísticos de análise. Essas pesquisas evidenciam o aumento significativo de investigações científicas sobre o tema, considerando metodologias que englobam diversas perspectivas interpretativas sobre o fenômeno (FENG et al., 2021; YANG; YAO, 2022; DEWAN; KISELEV; BOTJE, 2021; OKUMUS; TERZI, 2021).

Em cidades de clima temperado, estudos indicam que as ilhas de calor urbanas podem ajudar a amenizar condições de frio intenso, economizar energia e melhorar o conforto térmico. Este último está ligado ao bem-estar da população urbana, influenciando na saúde e na produtividade das atividades diárias (TEIXEIRA, 2019; MACINTYRE et al., 2021; CHEVAL et al., 2022).

De acordo com a literatura, as ilhas de calor urbanas podem ser definidas como um 'oásis inverso', onde tanto o ar quanto a superfície apresentam temperaturas mais elevadas nas áreas urbanas em comparação às áreas rurais circundantes (GARTLAND, 2010). Esse fenômeno é um dos principais efeitos do clima urbano observado nas cidades, exemplificando a intensa interferência humana nas dinâmicas dos sistemas ambientais.

As ilhas de calor atmosféricas se formam devido ao fluxo excedente de calor antropogênico produzido e lançado na atmosfera, assim como pelo calor retido e armazenado nas superfícies que compõem as áreas urbanas (GARTLAND, 2010). Este último fator é de extrema relevância para as análises e investigação da ilha de calor superficial (AMORIM, 2020), que é o objeto deste estudo.

No ambiente urbano, observa-se que determinados aspectos, especialmente os componentes urbanos, influenciam as repostas de temperaturas do ar e da superfície de maneiras particulares, sendo importantes fatores

geradores e/ou intensificadores da ilha de calor urbana. Nesse sentido, essas temperaturas tendem a ser mais elevadas nas áreas intraurbanas, especialmente onde há alta concentração de materiais construtivos e intensa impermeabilização do solo, em comparação com áreas rurais (providas de vegetação) e vegetadas.

A classificação das ilhas de calor urbanas compreende quatro tipos principais (OKE et al., 2017):

1. Ilha de calor superficial: diagnosticada por meio de técnicas e procedimentos de sensoriamento remoto (ARNFIELD, 2003; AMORIM, 2019; OKE et al., 2017);
2. Ilha de calor atmosférica inferior (*urban canopy layer*): identificada entre o nível do solo e o nível médio dos telhados. Seu diagnóstico é feito utilizando-se diferentes metodologias, como transectos móveis, pontos fixos com suporte de estações meteorológicas e/ou registradores automáticos (OKE, 1978);
3. Ilha de calor urbana da atmosfera superior (*urban boundary layer*): compreende o limite da camada anterior e, muitas vezes, se sobrepõe a ela, alcançando a atmosfera livre (OKE, 1978);
4. Ilha de calor urbana subsuperficial (*subsurface urban heat island*), analisada pela diferença dos parâmetros térmicos das construções subsuperficiais urbanas em comparação com o rural de entorno (OKE et al., 2017).

Neste artigo, optou-se por analisar as ilhas de calor superficiais (ICUs) na cidade de Natal, Rio Grande do Norte, com enfoque na cobertura da terra e nos dados de precipitação como parâmetros interpretativos. Para isso, foram utilizadas duas imagens do satélite *Landsat 8* (sensor *OLI/TIRS-1*) dos meses de junho e setembro de 2018, definindo-se recortes distintos de uso e cobertura da terra urbana.

As ilhas de calor urbanas superficiais foram e continuam sendo diagnosticadas utilizando-se produtos, técnicas e procedimentos de sensoriamento remoto, os quais permitem captar a interação da radiação eletromagnética com as diferentes superfícies no plano terrestre (AMORIM, 2020). Utilizando-se parte desse instrumental metodológico, admite-se

que as condições ambientais, climáticas e as propriedades térmicas dos diferentes materiais – capacidade térmica, condutividade térmica, inércia térmica – interferem nas temperaturas aparentes das superfícies, alterando-as em curtos intervalos de tempo (MENESES; ALMEIDA, 2012).

A literatura sobre ilhas de calor urbanas tem demonstrado que poucos estudos analisaram a temperatura aparente dos alvos considerando aspectos meteorológicos como parâmetros interpretativos, tais como dados de precipitação (WENG, 2003; AMORIM, 2020; TEIXEIRA, 2019; YANG; YAO, 2022). Neste contexto, esses dados se apresentam como importantes auxiliares para a interpretação das ilhas de calor urbanas superficiais, pois podem modificar as características dos alvos cuja aparência é influenciada pela sazonalidade climática e pela disponibilidade hídrica no recorte selecionado.

Um exemplo dessa influência dos elementos climáticos são as áreas vegetadas. Essas áreas possuem maior capacidade térmica, exigindo mais energia para aumentar sua temperatura em 1 °C. No entanto, essa capacidade térmica varia conforme a disponibilidade hídrica, a qual é determinada pelos totais pluviométricos registrados nos dias anteriores à passagem do satélite e à obtenção da imagem, especialmente nas áreas com cobertura vegetal (JENSEN, 2009).

Quando essas áreas apresentam estado de vigor vegetativo devido à maior disponibilidade hídrica, ocorre uma disparidade significativa nos valores de temperatura. Isso é particularmente evidente quando comparadas às áreas caracterizadas pela ausência ou insuficiência de vegetação, como as áreas construídas, que apresentam heterogeneidade de materiais e componentes físicos, ou áreas de solo exposto.

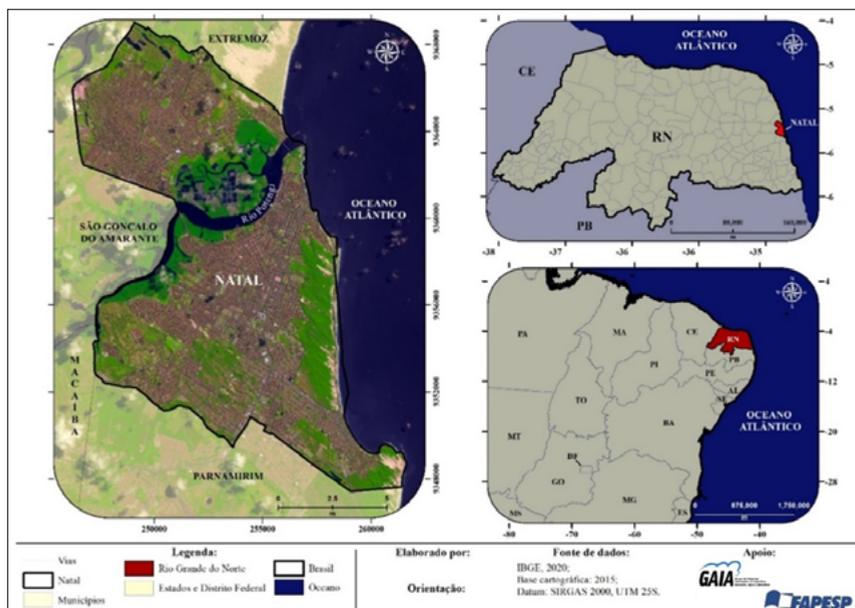
Nesse sentido, a análise dos diferentes tipos de alvos com base em parâmetros meteorológicos, como a chuva, destaca-se por contribuir não apenas para o diagnóstico das ilhas de calor superficiais, mas também para reflexões sobre as formas de uso e cobertura da terra em áreas urbanas.

2. Localização e caracterização da área de estudo

Natal é a capital do estado do Rio Grande do Norte (RN), localizada na região litorânea do leste do Nordeste brasileiro, a 5° de latitude sul e 35°

de longitude oeste. O município possui área de 167,40 km² e população residente de 751.300 habitantes, com densidade demográfica de 4.488,03 hab/km², de acordo com os dados do último censo demográfico do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2023) (figura 1).

Figura 1
LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO: NATAL/RN



Fonte: autores, 2021.

O clima de Natal é classificado como 'As', conforme a definição de frequência dos Tipos Climáticos Anuais (TCA) de Dubreuil et al. (2017). Este tipo climático é caracterizado por ser quente e úmido, com estação chuvosa que ocorre entre abril e agosto, e estação menos chuvosa entre setembro e março (NATAL, 2010).

Conforme dados históricos, os totais pluviométricos ao longo dos anos apresentam boa distribuição, com média anual de 1.721,4 mm, enquanto a temperatura média anual é de 29,6°C (INMET, 2018). Devido à sua localização geográfica, Natal recebe a influência de ventos de Leste (L) e ventos alísios provenientes de Sudeste (SE), o que contribui para a manutenção

da umidade relativa do ar em níveis superiores a 70% (NIMER, 1989; SERHID, 1998).

3. Procedimentos metodológicos

Os procedimentos metodológicos consistiram na elaboração de: 1) mapas de intensidades das ilhas de calor superficiais; 2) mapas do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI); 3) aquisição e tratamento de dados meteorológicos; 4) utilização de softwares de processamento de imagens de satélite e produção dos *layouts* dos mapas *IDRISI Selva*[®] e *ArcGis*[®] 10.7.1.

3.1 *Elaboração dos mapas de intensidade das ilhas de calor superficiais*

Os mapas de intensidade das ilhas de calor superficiais foram elaborados a partir de duas imagens da banda 10 do canal do infravermelho termal (sensor *TIRS 1*) do satélite *Landsat 8*¹.

As cenas das respectivas imagens se enquadraram nos seguintes parâmetros orbitais: *WRS Row 214* e *Path 064*. As imagens datam de 8 de junho de 2018 e 12 de setembro de 2018 e foram coletadas pelo sensor de imageamento às 09h28 (hora local).

A escolha das imagens foi baseada na menor cobertura de nuvens sobre a área de estudo. É importante destacar que, por ser uma cidade litorânea, Natal está sujeita a variações atmosféricas regionais que influenciam fortemente a dinâmica convectiva do ar, aumentando a possibilidade de formação de nuvens sobre a área. Portanto, esse fator não pôde ser completamente eliminado no tratamento das imagens de satélite, sendo necessário distinguir e trabalhar os valores de temperatura afetados por nuvens dos demais valores obtidos em escala.

As imagens também foram selecionadas considerando os dados de precipitação nos 30 dias anteriores às datas de imageamento, de modo a evidenciar o volume e a distribuição da chuva na área do município. Isso permitiu uma análise mais precisa para os diferentes recortes empregados.

O processamento das imagens para a obtenção das diferenças das temperaturas superficiais em grau Celsius (°C) foi realizado conforme as

seguintes etapas, tendo como referência as equações e parâmetros obtidos na *United States Geological Survey* (USGS)²:

1) conversão dos valores de níveis de cinza (NC) para radiância (Equação 1).

Equação 1 - Fórmula de conversão de NC para radiância

$$L_{\lambda} = ML * Q_{cal} + AL$$

Sendo:

L_{λ} = radiação do topo da atmosfera (Watts / (m² * srad * μm));

ML = Fator multiplicativo redimensionamento de cada banda presente nos metadados (RADIANCE_MULT_BAND_x, em que x é o número da banda) - (0.0003342);

AL = Fator aditivo de redimensionamento de cada banda presente nos metadados (RADIANCE_ADD_BAND_x, em que x é o número da banda) - (0.1000);

Q_{cal} = Valores de pixel quantificados e calibrados do produto (ND) - (imagem).

2) aplicação da correção atmosférica utilizando-se dados meteorológicos de superfície (Coll et al., 2010) (Equação 2).

Equação 2 - Fórmula de correção atmosférica com parâmetros de superfície

$$CV_{R2} = \frac{CV_{R1} - L_{\uparrow}}{\epsilon\tau} - \frac{1 - \epsilon}{\epsilon} L_{\downarrow}$$

Sendo:

CV_{R2} = Valor da célula da correção atmosférica como radiância;

CV_{R1} = Valor da célula como radiância da seção 1;

L_{\uparrow} = upwelling radiance;

L_{\downarrow} = downwelling radiance;

T = transmitância;

ε = emissividade (0.95).

3) Processamento da fórmula de conversão da temperatura dos alvos para escala Kelvin (K) (Equação 3).

Equação 3 - Fórmula de conversão da temperatura em escala Kelvin (K):

$$T = \frac{K2}{\ln\left(\frac{K1}{L\lambda} + 1\right)}$$

Sendo:

T = temperatura efetiva no satélite em (K);

$L\lambda$ = radiação espectral TOA (Watts / (m² * srad * μ m));

K1 = constante de conversão térmica específica da banda dos metadados; (K1_CONSTANT_BAND_x, onde x é o número da banda térmica) - (774.89);

K2 = Constante de conversão térmica específica da banda dos metadados; (K2_CONSTANT_BAND_x, onde x é o número da banda térmica) - (1321.08).

4) Conversão da temperatura dos alvos de Kelvin para Celsius (°C) (Equação 4).

Equação 4 - Operação de conversão das temperaturas em K para °C:

$$T(^{\circ}\text{C}) = [\text{imagem}] - 273,15$$

5) Por fim, foi realizada a subtração do menor valor de temperatura absoluta da cena, sendo igualado a '0', para obtenção dos valores de intensidades da ilha de calor de superfície (Equação 5).

Equação 5 - Operação para obtenção das intensidades de temperatura:

$$\Delta T(^{\circ}\text{C}) = [\text{imagem}] - T^{\circ}\text{CVD}$$

Sendo:

$\Delta T(^{\circ}\text{C})$ = variação da intensidade de temperatura dos alvos;

[imagem] = imagem processada com valores de temperatura dos alvos em escala Celsius (°C);

< T°C = temperatura registrada na área de vegetação ampla e densa.

Nesse sentido, os menores valores absolutos de temperatura da superfície foram obtidos através do processamento das imagens de satélite e subtraídos para determinar as intensidades, encontrando-se predominantemente em áreas com vegetação densa e/ou corpos d'água, como rios, lagos e lagunas. Por outro lado, os valores absolutos de temperatura dos alvos foram identificados em áreas construídas ou com solo exposto.

3.2 *Elaboração dos mapas de Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI)*

Para complementar os procedimentos anteriores, foram elaborados os mapas do NDVI, utilizando-se imagens do satélite *Landsat 8* com o sensor *OLI*, nas bandas 4 (vermelho visível) e 5 (infravermelho próximo). Os parâmetros orbitais dessas imagens são os mesmos descritos anteriormente, incluindo as datas de aquisição e os padrões de cobertura de nuvens já mencionados, e os dados de precipitação utilizados nas análises correspondentes (Equação 6).

Equação 6 - Operações e divisão das faixas espectrais de conformação do NDVI:

$$\text{NDVI} = (\text{NIR-Vermelho}) / (\text{NIR} + \text{Vermelho})$$

Sendo:

NIR (*Near Infra Red*) = fator de reflectância bidirecional de superfície para as bandas do infravermelho próximo;

RED (*Red*) = fator de reflectância bidirecional de superfície para as bandas do vermelho.

O NDVI tem como principal objetivo indicar o “realce das variações de densidade da cobertura vegetal” (MENESES; ALMEIDA, 2012, p. 147). Além disso, permite visualizar a distribuição espacial da vegetação e sua condição de vigor. Os valores medidos pelo NDVI variam de -1 a +1, os valores mais

baixos indicando menor quantidade de vegetação, áreas construídas e/ou solo exposto, enquanto valores mais altos estão associados a maior densidade vegetativa em bom estado de vigor (MENESES; ALMEIDA, 2012).

A utilização desse índice se destaca por atenuar as variações das condições atmosféricas de forma mais eficaz em comparação a outros índices de vegetação (MENESES; ALMEIDA, 2012). Essa característica torna o NDVI uma ferramenta valiosa para o monitoramento da vegetação.

Desse modo, a análise estatística das bandas espectrais associadas ao NDVI permitiu identificar a densidade vegetativa em termos de biomassa e sua distribuição na área de estudo. Esses dados foram correlacionados com as diferenças de temperatura da superfície, conforme obtido através dos mapas termais, proporcionando uma visão integrada das interações entre a vegetação e as variáveis térmicas na área analisada.

3.3 Aquisição e tratamento dos dados meteorológicos (precipitação)

Os dados meteorológicos de precipitação foram obtidos a partir da estação meteorológica automática A304 e da estação convencional n° 82598, ambas operadas e gerenciadas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e localizadas nas dependências da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN).

O tratamento e a organização dos dados foram realizados utilizando-se planilhas eletrônicas no Microsoft Office Excel® 2019³. Posteriormente, esses dados foram incorporados em cada mapa para proporcionar uma representação conjunta, facilitando a análise dos resultados. Foram considerados os acumulados de precipitação diária nos 30 dias anteriores à captura da imagem, divididos em intervalos de 5, 10, 15 e 30 dias (AMORIM, 2020).

4. Resultados

Tendo em vista o processamento das imagens de satélite e a elaboração de mapas termais e de NDVI, constatou-se que, em Natal, os alvos mais aquecidos e com maior intensidade das ilhas de calor urbanas superficiais corresponderam às áreas densamente construídas. Essas áreas

são caracterizadas pela diversidade de materiais construtivos, impermeabilização do solo e escassez de cobertura vegetal arbórea.

Em contraste, os alvos menos aquecidos e com menores intensidades das ilhas de calor urbanas superficiais apresentam ampla cobertura vegetal em bom estado de vigor vegetativo. Entre essas áreas destacaram-se parques, unidades de conservação, zonas de proteção ambiental e áreas de cultivo agrícola urbano e periurbano, como o Parque Estadual das Dunas de Natal, localizado a leste da malha urbana, e a área de agricultura urbana na porção norte do município.

Para a análise interpretativa dos mapas termais e de NDVI foram selecionados quatro recortes analíticos com o objetivo de evidenciar a diversidade paisagística do contexto intraurbano e periurbano de Natal. A ênfase foi colocada nas áreas vegetadas para demonstrar como essa diversidade pode ser influenciada por parâmetros meteorológicos de superfície, com destaque para precipitação.

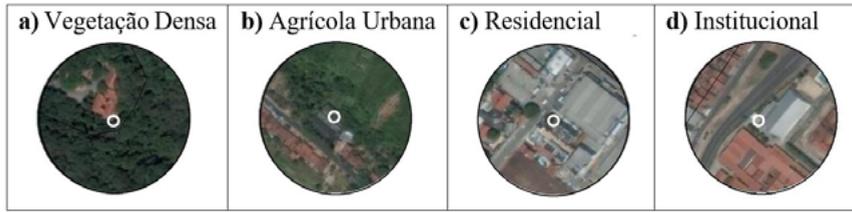
Os recortes foram definidos considerando o uso e a cobertura da terra, bem como a função que desempenham na estrutura socioeconômica e, conseqüentemente, térmica da cidade. Eles foram caracterizados da seguinte forma: a) Área de Vegetação Densa – representada pelo Parque das Dunas; b) Área de Prática Agrícola Urbana – onde ocorre o cultivo agrícola de origem urbana; c) Área Construída Residencial – predominantemente utilizada para moradia e hospedagem, incluindo casas, prédios, hotéis e pousadas; d) Área Construída Institucional – predominantemente destinada para instituições de ensino, empresas e comércios (figura 2).

A distinção dos recortes analíticos apresentados nas figuras 3, 4, 5 e 6 permitiu a visualização conjunta da diversidade paisagística da cidade de Natal, bem como a caracterização detalhada dos diversos contextos de uso e cobertura da terra na área estudada. Isso pode contribuir para a compreensão da intensificação do fenômeno das ilhas de calor urbanas superficiais.

A diferença das temperaturas dos alvos variou de 0°C a 11°C em 08 de junho (figura 3 – período mais chuvoso) e de 0°C a 14°C em 12 de setembro (figura 5 – período menos chuvoso). As maiores intensidades das ilhas de calor, representadas nas cores alaranjadas e vermelhas, concentraram-se em áreas densamente ocupadas, com elevada taxa de impermeabilização da terra e predominância de materiais construtivos.

Figura 2

RECORTES ANALÍTICOS URBANOS EM NATAL



Fonte: Autores, 2022.

Por outro lado, as menores intensidades, representadas nas cores azuis e verdes nas figuras 3 e 5, corresponderam a áreas vegetadas predominantemente localizadas em unidades de conservação (com preservação da vegetação nativa), parques e áreas com uso misto para cultivo agrícola. Essas áreas também corresponderam aos valores máximos nas escalas de densidade vegetativa, variando de -0,25 a 0,59 em 08 de junho e de -0,36 a 0,61 em 12 de setembro (figuras 4 e 6, respectivamente).

4.1 *Ilha de calor superficial em Natal no dia 08/06/2018 – período mais chuvoso*

A análise e interpretação das ilhas de calor superficiais em 8 de junho, representativo do período mais chuvoso, baseou-se nos registros pluviométricos dos 5, 10, 15 e 30 dias (tabela 1) que antecederam a tomada da imagem do satélite *Landsat 8* (09h28 hora local). O total pluviométrico nos 30 dias anteriores à captura da imagem foi de 259,2 mm, bem distribuídos ao longo desse período (gráfico 1).

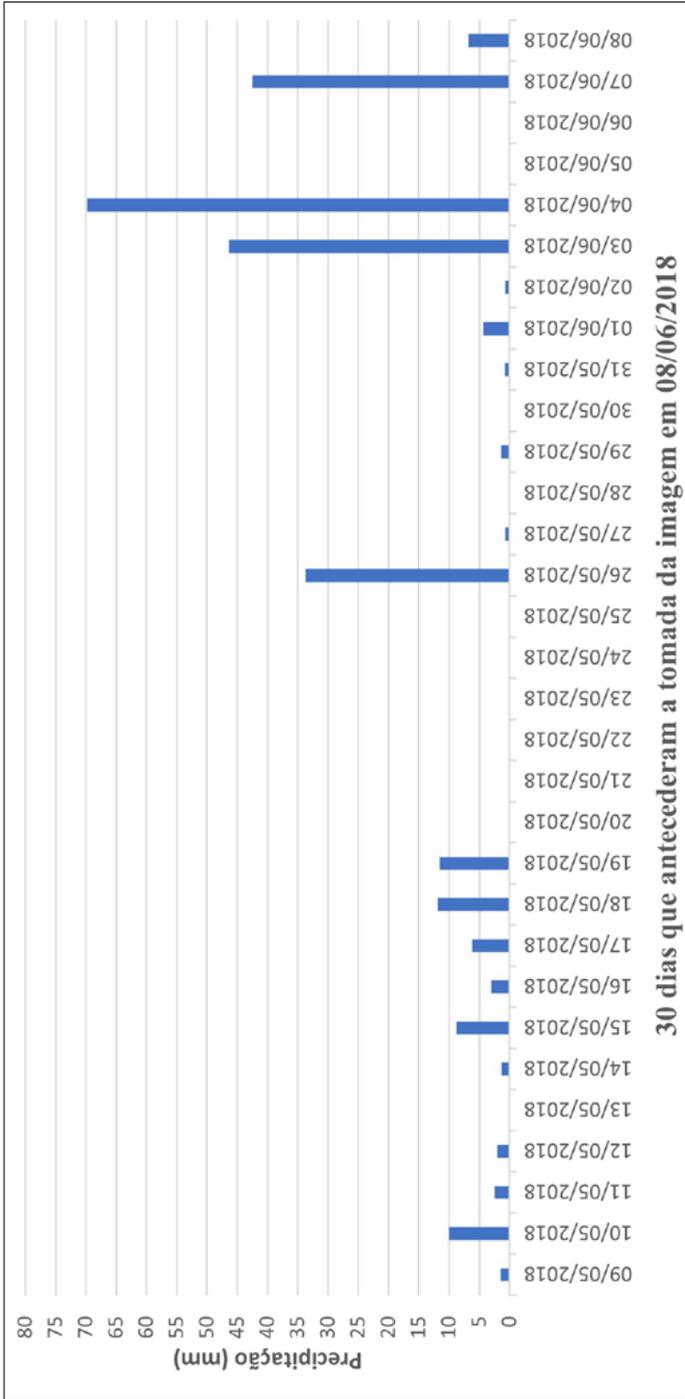
Tabela 1

VOLUME DE PRECIPITAÇÃO NOS 30 DIAS QUE ANTECEDERAM A TOMADA DA IMAGEM DO SATÉLITE *LANDSAT 8* EM 08/06/2018

08/06/2018	Dias que antecederam a tomada da imagem			
--	5 dias	10 dias	15 dias	30 dias
Precipitação. (mm)	158,7	166	200,4	259,2

Org.: Autores (2021).

Gráfico 1
DISTRIBUIÇÃO DA PRECIPITAÇÃO NOS DIAS QUE ANTECEDERAM A TOMADA DA IMAGEM DO SATÉLITE LANDSAT 8 EM 08/06/2018



Org.: Autores (2024).

No dia da tomada da imagem pelo satélite (08/06/2018), a área estava sob a influência da massa de ar Tropical Atlântica, com pouca nebulosidade, direção do vento de sudeste (SE) e velocidade média de 4,0 m/s. A temperatura máxima do dia foi de 29,6°C e a mínima de 25,2°C.

Nesse episódio de ilha de calor urbana, verificou-se intensidades que atingiram 11°C, com os valores máximos de temperatura registrados em áreas intraurbanas predominantemente construídas. Em contrapartida, as áreas menos densamente ocupadas ou com vegetação situaram-se no limite inferior da escala, variando de 0°C a 4°C (figura 3).

As figuras 3 e 4 demonstram que a precipitação influenciou significativamente as intensidades das ilhas de calor superficiais. Nas bordas do município, as intensidades foram menores em comparação com as áreas centrais, indicando que diferentes formas de uso e cobertura da terra podem atenuar ou intensificar as temperaturas superficiais.

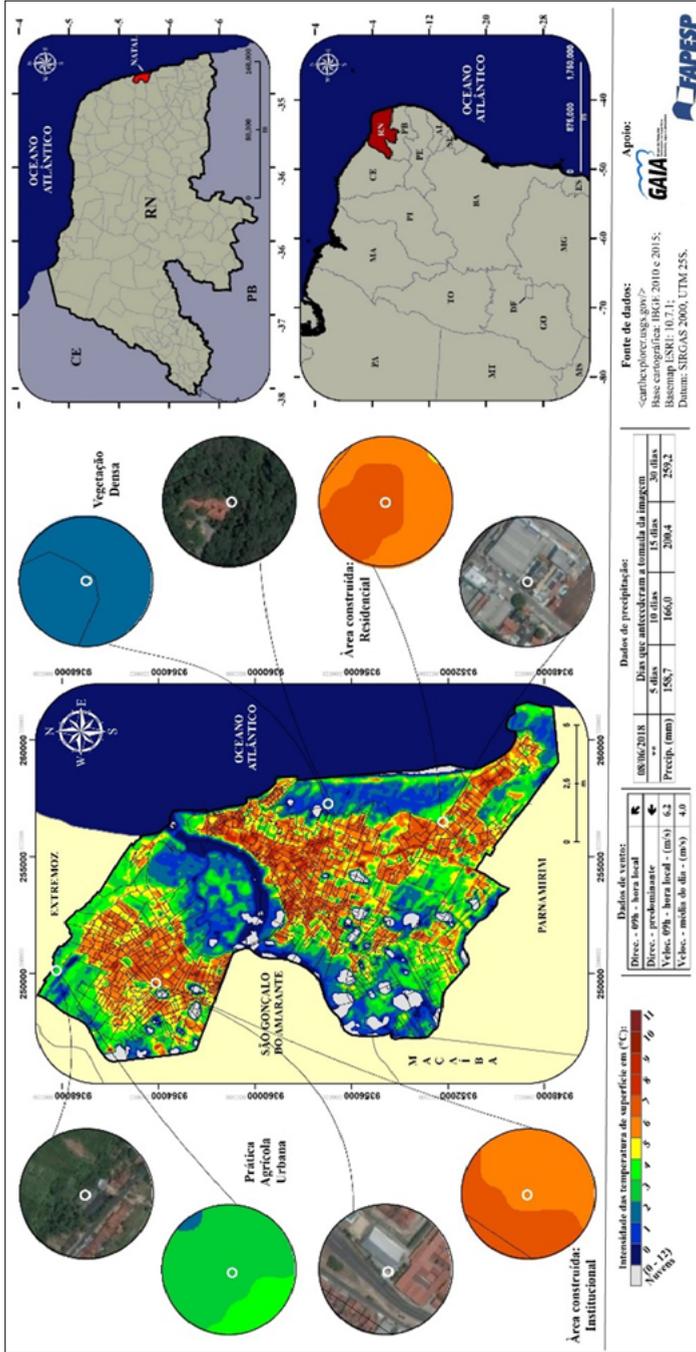
Nos recortes selecionados, os efeitos da precipitação também podem ser verificados nas figuras 3 e 4. As áreas representativas do ambiente construído, diferenciadas quanto ao uso e à ocupação da terra, apresentaram variações de temperatura entre 6°C e 7°C. Em contraste, as áreas com diferentes formas de vegetação, seja nativa ou agrícola, situaram-se na faixa de 2°C a 3°C no mesmo período.

A área de uso agrícola urbana, conforme observado nesse episódio, demonstra um potencial mitigador das maiores intensidades das ICUs no ambiente urbano. Isso é especialmente relevante, pois representa uma situação em que a ação humana combina o uso misto da paisagem com a conservação da vegetação densa. Assim, a intensidade de 3°C registrada nessas áreas é significativa, ressaltando a necessidade de promover a qualidade ambiental urbana por meio de formas alternativas de uso e cobertura da terra em áreas urbanas.

A influência da chuva nas características da superfície também pode ser observada na análise da densidade vegetativa de diferentes alvos distribuídos pela cidade (figura 4).

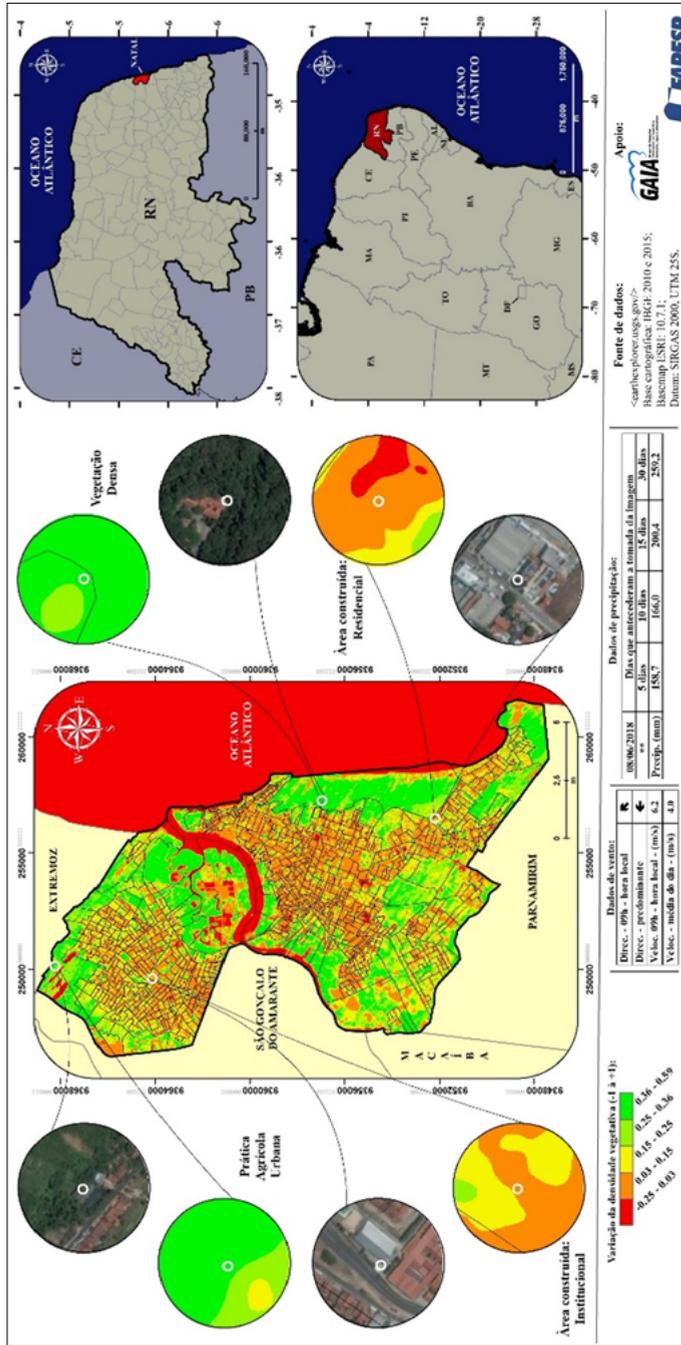
A maior parte das áreas construídas situou-se na faixa de NDVI entre 0,03 e 0,25, enquanto as áreas de vegetação, em suas múltiplas formas, variaram entre 0,36 e 0,59, representando o máximo da escala.

Figura 3
ILHA DE CALOR SUPERFICIAL EM NATAL NO DIA 08 DE JUNHO DE 2018



Fonte: Autores, 2021.

Figura 4
DENSIDADE VEGETATIVA EM NATAL NO DIA 08/06/2018



Fonte: Autores, 2021.

Quanto à densidade vegetativa, os recortes analíticos (figura 4) enquadraram-se nas seguintes faixas: as áreas caracterizadas como típicas do ambiente construído apresentaram NDVI entre 0,03 e 0,15; enquanto as áreas com vegetação, seja nativa ou agrícola, situaram-se entre 0,26 e 0,59, novamente representando o máximo da escala.

4.2 *Ilha de calor superficial em Natal em 12 de setembro de 2018 – período menos chuvoso*

A análise e interpretação das ilhas de calor superficiais em 12 de setembro, bem como a observação do período menos chuvoso, também foram baseadas nos totais pluviométricos acumulados nos 5, 10, 15 e 30 dias (tabela 2) anteriores à captura da imagem (09h28 hora local). No total, os 30 dias precedentes registraram precipitação acumulada de 77,1 mm, distribuída de maneira uniforme ao longo desse período (gráfico 2).

Tabela 2
VOLUME DE PRECIPITAÇÃO NOS 30 DIAS QUE ANTECEDERAM A TOMADA DA IMAGEM DO SATÉLITE LANDSAT 8 EM 12/09/2018

12/09/2018	Dias que antecederam a tomada da imagem			
--	5 dias	10 dias	15 dias	30 dias
Precipitação. (mm)	45,0	46,2	49,8	77,1

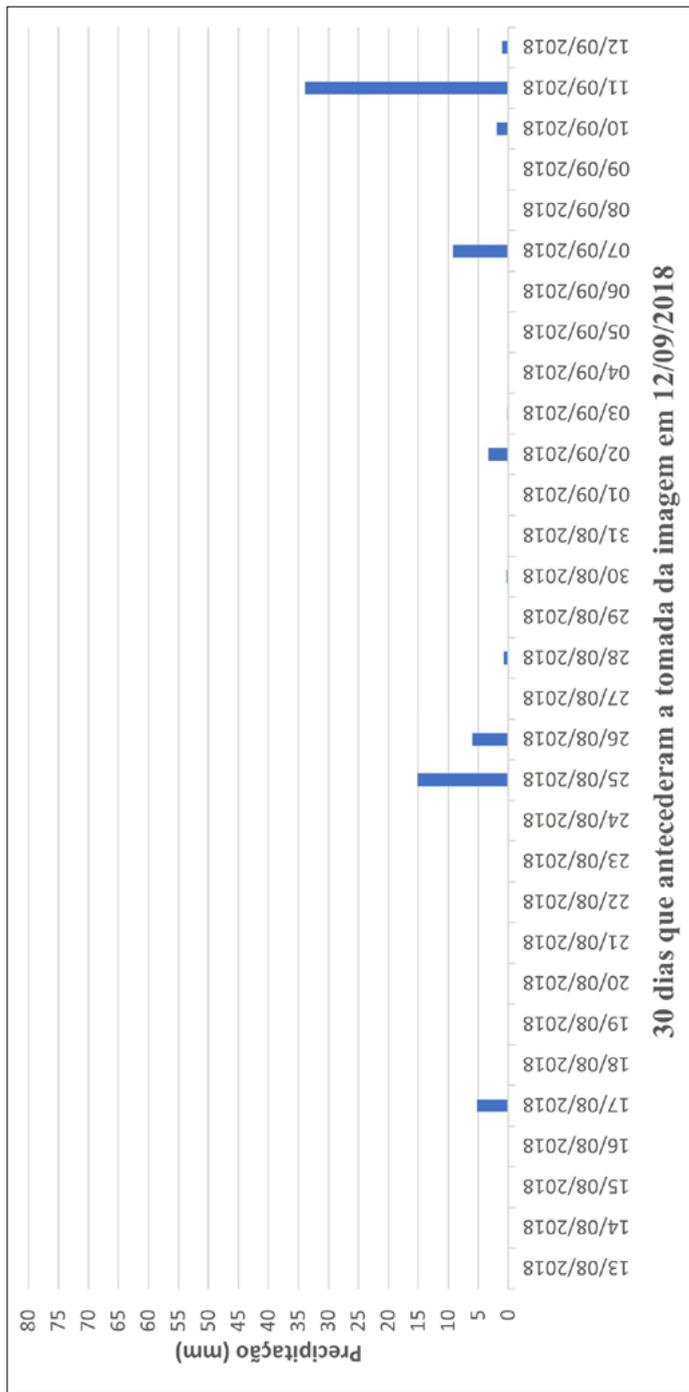
Org.: Autores (2021).

No dia 12/09/2018, Natal estava sob a influência da massa de ar Tropical Atlântica, com pouca nebulosidade, direção do vento proveniente de sudeste (SE) com velocidade média de 6,3 m/s. As temperaturas máxima e mínima diária foram de 28,8°C e 24°C, respectivamente.

As intensidades das ilhas de calor superficiais variaram entre 0°C e 14°C, com o valor máximo sendo identificado em áreas intraurbanas, características do ambiente urbano construído. Em contraste, as áreas menos construídas ou com vegetação situaram-se no extremo oposto da escala, entre 0°C e 4°C, similarmente ao observado durante o período mais chuvoso.

A interpretação das figuras 5 e 6 revelou que a precipitação corroborou com as diferenças de temperatura dos alvos. Particularmente, a vegetação nas bordas dos municípios apresentou intensidades menores em comparação com as áreas intraurbanas.

Gráfico 2
DISTRIBUIÇÃO DA DE PRECIPITAÇÃO NOS DIAS QUE ANTECEDERAM A TOMADA DA IMAGEM DO SATÉLITE LANDSAT 8 EM 12/09/2018



30 dias que antecederam a tomada da imagem em 12/09/2018

Org.: Autores (2024).

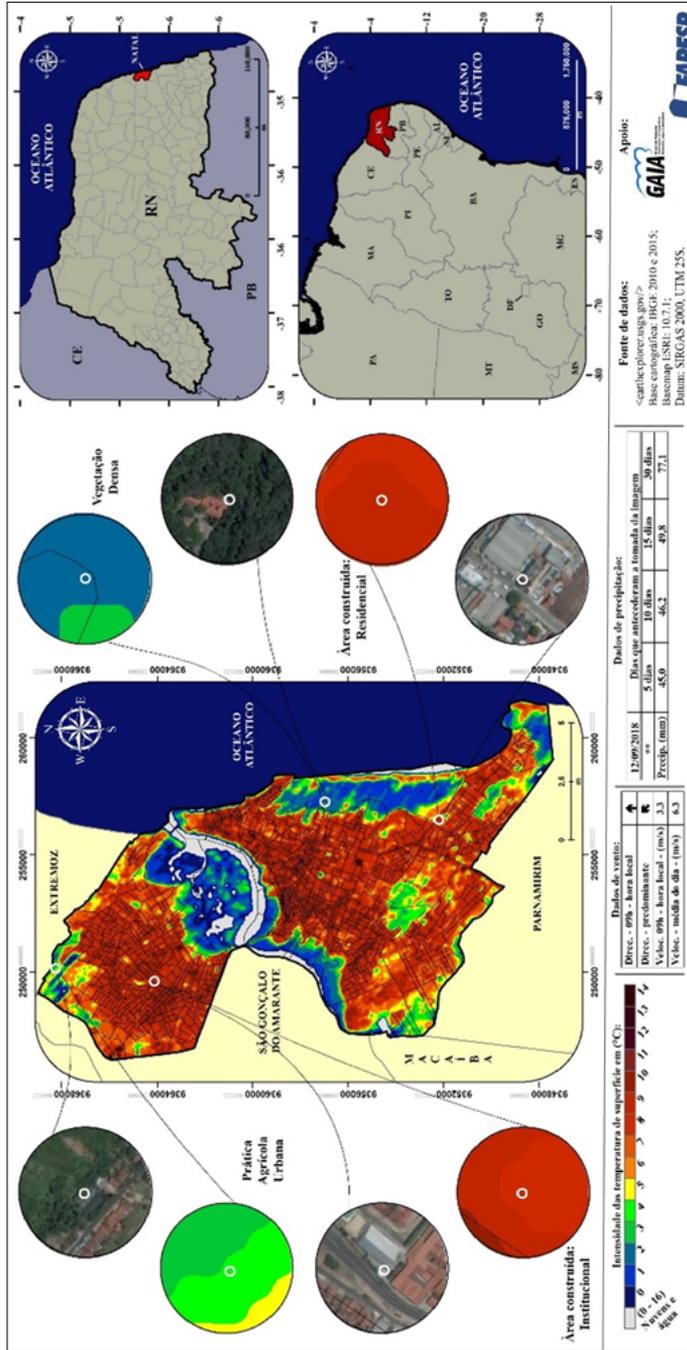
Apesar da redução significativa dos volumes pluviométricos neste período, comparado ao período mais chuvoso, foi possível observar que a precipitação é um elemento interpretativo importante. Ela contribui para a análise da interação dos diferentes tipos de alvos na superfície, mantendo a vegetação em estado vigoroso e possibilitando o contraste entre ambientes urbanos construídos e menos construídos/vegetados.

A importância de considerar os totais de precipitação também pode ser verificada na análise da densidade vegetativa de diferentes áreas distribuídas pela cidade, como no dia 12 de setembro de 2018 (figura 6). Nos 30 dias que antecederam a captura da imagem foram registrados 77,1 mm de chuva bem distribuídos. De acordo com os recortes analíticos, a maioria das áreas construídas apresentou índices de NDVI entre 0,00 e 0,15. Em contraste, as áreas de vegetação, em suas diversas formas, exibiram índices de NDVI entre 0,36 e 0,61, representando o máximo da escala. Isso demonstra que a vegetação manteve sua exuberância.

Considerando a análise dos diferentes recortes urbanos selecionados na paisagem de Natal, cabe ressaltar que as práticas ou atividades humanas, quando avaliadas sob a ótica da estrutura térmica que envolve uma cidade, também podem atuar como atenuantes dos efeitos das ilhas de calor urbanas superficiais. Isso foi evidenciado pela área de agricultura urbana/periurbana destacada nos resultados.

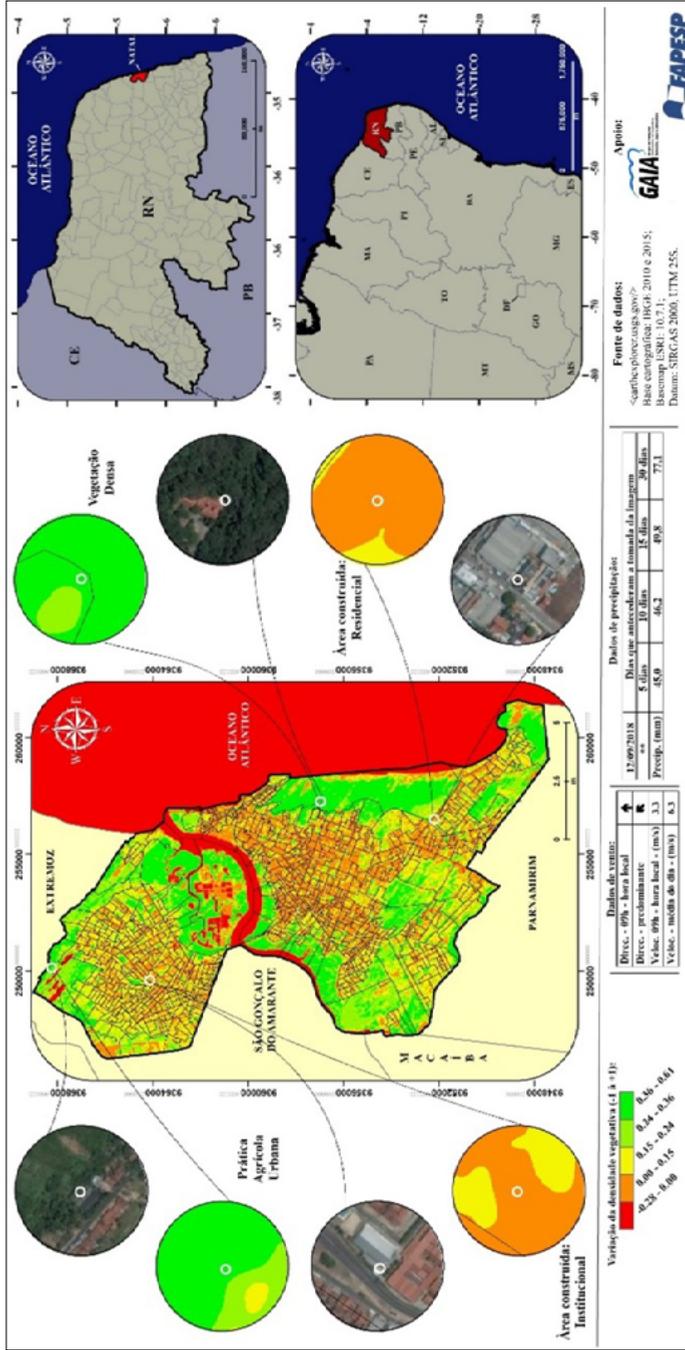
Esse recorte paisagístico de uso e cobertura da terra urbana, observado ao longo dos produtos apresentados, juntamente com a área de conservação da vegetação densa, apresenta um potencial mitigador das adversidades ocasionadas pelas ilhas de calor urbanas superficiais. Isso pode fomentar ações e estratégias de planejamento territorial urbano que promovam qualidade de vida e ambiental mais adequada, articulando-se com outras áreas de interesse do poder público.

Figura 5
ILHA DE CALOR SUPERFICIAL EM NATAL NO DIA 12/09/2018



Fonte: Autores, 2021.

Figura 6
DENSIDADE VEGETATIVA EM NATAL EM 12/09/2018



Fonte: Autores, 2021.

5. Considerações finais

As considerações acerca dos resultados apresentados neste trabalho permitiram evidenciar que as ilhas de calor superficiais estão relacionadas aos diferentes padrões de uso e cobertura da terra urbana, tomando como exemplo a cidade de Natal e seus variados recortes.

As maiores diferenças de temperatura da superfície, tanto em episódios mais chuvosos quanto nos menos chuvosos, foram identificadas em áreas densamente construídas e impermeabilizadas, variando entre 11°C e 14°C. Em contrapartida, as menores intensidades das ICUs foram observadas em áreas caracterizadas pela presença de remanescentes de vegetação, especialmente do tipo arbórea ou de uso misto voltado para o cultivo agrícola urbano, com variações entre 2°C e 4°C.

Além disso, observar os valores de precipitação antes da tomada das imagens mostrou-se essencial para a análise das diferentes superfícies urbanas. Destacaram-se particularidades que dependem da presença ou ausência de chuvas, incluindo a vegetação, que necessita de precipitação para manter seu estado de exuberância e, conseqüentemente, contribuir para menores variações de temperatura no contexto urbano.

Além do volume de precipitação observado nos dois períodos de análise, outro aspecto a ser apontado, e que deverá merecer maior atenção em trabalhos futuros, refere-se à diferença das intensidades das ilhas de calor em junho de 2018 e em setembro de 2018. As imagens representam dois períodos com variação do balanço de radiação decorrentes do movimento de translação da Terra, conforme mostraram Praxedes e Medina (2016). Os referidos autores, tendo como referência Duffie e Beckman (2013), mostraram que, em Natal, os valores médios mensais para a radiação diária variam de 31,4 MJ/m² em junho para 36,9 MJ/m² em setembro. Considerando-se que os tipos de tempos nos dias de capturas das imagens em junho e setembro de 2018 estavam muito parecidos, sob a atuação da massa de ar Tropical Atlântica, e que, embora o volume de precipitação tenha diferenças (259,2mm para junho e 77,1mm para setembro), a precipitação foi bem distribuída nos dois casos, o que permitiu a permanência do vigor da vegetação.

Assim, a declinação solar, que em 12 de setembro está mais próxima ao equinócio da primavera, pode ter interferido no aumento das

temperaturas dos alvos, especialmente nas áreas construídas. Esse fato pode ter contribuído para o aumento das intensidades das ilhas de calor quando comparada com a imagem do mês de junho de 2018, já que, nas áreas com vegetação, as diferenças nas intensidades das ilhas de calor foram insignificantes.

Este trabalho também suscitou, a partir de seus resultados, uma reflexão sobre formas alternativas de uso e cobertura da terra em cidades de clima tipicamente tropical. Estes resultados, que também poderão ser mais bem explorados em futuros estudos, destacam a necessidade de mitigar as intensidades das ilhas de calor urbanas superficiais. Isso pode ser alcançado por meio de estratégias de uso da terra voltadas para cultivos agrícolas urbanos e periurbanos. Essa abordagem ressalta a centralidade da discussão sobre a qualidade de vida e ambiental urbana, bem como a relação Sociedade-Natureza, questões altamente relevantes para a ciência geográfica em suas múltiplas abordagens.

Agradecimentos

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo apoio financeiro (Processo n. 2018/08308-8); à CAPES - Edital 042/2014 - Desenvolvimento Socioeconômico no Brasil (PGPSE), processo: 88887.115964/2016-01; e ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia, campus Presidente Prudente.

Notas

- 1 O download das imagens com pixel de 30 metros pode ser feito no endereço eletrônico: <<http://earthexplorer.usgs.gov/>>.
- 2 <<https://www.usgs.gov/landsat-missions/using-usgs-landsat-level-1-data-product>>. Acesso: junho de 2019.
- 3 Microsoft Office Excel é marca registrada da Microsoft Co.

Referências

- AMORIM, M. C. C. T. **O clima urbano de Presidente Prudente/SP**. 2000. 378f. Tese (Doutorado em Geografia) - Faculdade de Filosofia Letras e Ciência Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.
- AMORIM, M. C. C. T. Ilhas de calor urbanas: métodos e técnicas de análise. **Revista Brasileira de Climatologia**, Edição Especial - Simpósio Brasileiro de Climatologia Geográfica - 2018, p. 22-46, jun. 2019. DOI: 10.5380/abclima.v0i0.65136.
- AMORIM, M. C. C. T. Spatial variability and intensity frequency of surface heat island in a Brazilian city with continental tropical climate through remote sensing. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v. 9, p. 10-16, 2018. DOI: 10.1016/j.rsase.2017.11.001.
- AMORIM, M. C. C. T. **Ilhas de calor em cidades tropicais de médio e pequeno porte**: teoria e prática. Curitiba: Appris, 2020. 161p.
- ARNFIELD, A. J. Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. **International Journal of Climatology**, v. 23, n. 01, p. 1-26, 2003. DOI: 10.1002/joc.859.
- CHEVAL, S. et al. MODIS-based climatology of the Surface Urban Heat Island at country scale (Romania). **Environment International**, v. 41, 2022. DOI: 10.1016/j.envint.2021.106530.
- COLL, C.; GALVE, J. M.; SANCHEZ, J. M.; CASELLES, V. Validation of Landsat-7/ETM+ thermal-band calibration and atmospheric correction with ground-based measurements. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 48, n. 1, p. 547-555, Jan. 2010. DOI: 10.1109/TGRS.2009.2024934.
- DEWAN A.; KISELEV, G.; BOTJE, D. Diurnal and seasonal trends and associated determinants of surface urban heat islands in large Bangladesh cities. **Environment International**, v. 135, 2021. DOI: 10.1016/j.uclim.2021.101056.
- DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar Engineering of Thermal Processes**. John Wiley & Sons, 2013.
- DUBREUIL, V. et al. Les types de climats annuels au Brésil: une application de la classification de Köppen de 1961 à 2015. **EchoGéo**, v. 41, 2017. DOI: 10.4000/echogeo.15017.
- FENG, R. et al. Urban ecological land and natural-anthropogenic environment interactively drive surface urban heat island: An urban agglomeration-level

study in China. **Environment International**, v. 157, 2021. DOI: 10.1016/j.envint.2021.106857.

GARTLAND, L. **Ilhas de calor**: como mitigar zonas de calor em áreas urbanas. São Paulo: Oficina de textos, 2010. 256p.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo demográfico de 2022**. Rio de Janeiro: IBGE, 2023.

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. **Normais Climatológicas do Brasil 1981-2010**. INMET, Brasília-DF, Brasil, 2018. Disponível em: < <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisclimatologicas>. Acesso em: 27 jan. 2024.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente**: uma perspectiva em recursos terrestres. São José dos Campos: Parêntese, 2009. 604p.

KÖPPEN W. Versuch einer Klassifikation der Klimate, vorzugweise nach ihren Beziehungen zur Pflanzenwelt. **Geogr. Zeitschrift**, v. 6, p. 657–679, 1900.

LOMBARDO, M. A. **Ilha de calor nas metrópoles**: o exemplo de São Paulo. São Paulo: Hucitec, 1985. 244p.

MACINTYRE, H. L.; HEAVISIDE, C.; CAI, X.; PHALKEY, R. The winter urban heat island: Impacts on cold-related mortality in a highly urbanized European region for present and future climate. **Environment International**, v. 154, 2021. DOI: 10.1016/j.envint.2021.106530.

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. de (Org.). **Introdução ao Processamento de imagens de sensoriamento remoto**. Brasília: UNB/CNPq, 2012. 266 p.

NAKATA-OSAKI, C. M.; SOUZA, L. C. L de; RODRIGUES, D. S. Impacto da geometria do cânion urbano na intensidade da ilha de calor noturna: análise através de um modelo simplificado adaptado a um SIG. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 16, n. 3, p. 73-87, jul./set. 2016. DOI: 10.1590/s1678-86212016000300093.

NATAL. Prefeitura Municipal. Secretaria Municipal de Meio Ambiente e Urbanismo -SEMURB. **Natal**: geografia e meio ambiente. Natal: SEMURB, 2010.

NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. IBGE, Rio de Janeiro, 1989. 421 pp.

OKE, T. R. **Boundary Layer Climates**. London: Methuem & Ltd. A. Halsted Press Book, John Wiley & Sons, New York, 1978. 372p.

OKE, T. R.; MILLS, G.; CHRISTEN, A.; VOOGT, J. A. **Urban Climates**. Cambridge: Cambridge University Press, 2017. DOI:10.1017/9781139016476.

OKUMUS, D. E.; TERZI, F. Evaluating the role of urban fabric on surface urban heat island: The case of Istanbul. **Environment International**, v. 73, 2021. DOI: 10.1016/j.scs.2021.103128.

PRAXEDES, K. C.; MEDINA, G. I. T. Avaliação da Irradiação Normal Direta na Cidade de Natal. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 6., Belo Horizonte, 2016. **Anais...** Belo Horizonte, 2016.

SERHID. **Plano Estadual de Recursos Hídricos do Rio Grande do Norte - Relatório Síntese**. Natal: HIDROSERVICE, 1998.

TARIFA, J. R. Análise comparativa da temperatura e umidade na área urbana e rural de São José dos Campos (SP). **Geografia**, v. 2, n. 4, p. 59-80, outubro 1977.

TEIXEIRA, D. C. F. **O clima urbano das cidades de pequeno porte do oeste paulista**: análise do perfil térmico de Presidente Venceslau, Santo Anastácio e Álvares Machado. 2019. 225f. Tese (Doutorado em Geografia) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2019.

WENG, Q. Fractal analysis of satellite-detected urban heat island in a tropical city. **Habitat International**, Oxford, v. 29, p. 547-558, 2003. DOI: 10.14358/PERS.69.5.555.

YANG, X.; YAO, L. Reexamining the relationship between surface urban heat island intensity and annual precipitation: Effects of reference rural land cover. **Environment International**, v. 41, 2022. DOI: 10.1016/j.uclim.2021.101074.

ZAMPARONI, C. A. P. G. **Ilha de Calor em Barra do Bugres e Tangará da Serra-MT**: uma contribuição ao estudo do clima urbano em cidades de pequeno porte em área tropical. 1995. 116f. Dissertação (Mestrado em Geografia Física) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995.

Recebido em 09/07/2024

Aceito em 04/10/2024

