A RELAÇÃO ENTRE ILHAS DE CALOR URBANA SUPERFICIAL, OCUPAÇÃO DO SOLO E CONFORTO TÉRMICO: UM ESTUDO DA CIDADE DE JOÃO PESSOA, BRASIL

Mirela Oliveira Medeiros (1); Eduardo Gonçalves Patriota (2); Luiz Bueno da Silva (3); Victor Hugo Rabelo Coelho (4)
(1) Engenheira Civil, Mestranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, mirela.jpa@gmail.com
(2) Engenheiro Civil, Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, edugoncalvespatriota@gmail.com
(3) Doutor, Professor do Departamento de Engenharia de Produção, bueno@ct.ufpb.br
(4) Doutor, Professor do Departamento de Geociências, victor-coelho@hotmail.com
Universidade Federal da Paraíba, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECAM), Campus I, João Pessoa - PB, 58.051-900, Tel.: (083) 3216-7393

RESUMO
A rápida urbanização e o crescimento populacional trazem alterações no uso e cobertura do solo, desencadeadas principalmente pelo desmatamento e substituição de áreas verdes por áreas impermeáveis. Dessa forma, compreender os impactos causados pela urbanização é de grande interesse para a comunidade acadêmica e para os gestores urbanos, contribuindo para o entendimento da dinâmica climática em escala local e para a compreensão de medidas preventivas da formação de ilhas de calor urbano. O presente artigo visa analisar a variabilidade espaço-temporal entre os anos de 2013, 2016, 2019 e 2022 da temperatura de superfície (LST) e NDVI, bem como a dinâmica local de uso e ocupação do solo, a partir de imagens da série Landsat que cobrem a cidade de João Pessoa, Paraíba. Além disso, foram utilizadas a temperatura do ar (T_{ar}) e a umidade relativa do ar (UR) provenientes de duas estações meteorológicas do INMET, a fim de analisar o Índice de Desconforto de Thom (IDT). Os resultados comprovam que o desmatamento e a perda de áreas verdes com o crescimento da área urbana contribuem para a amplificação térmica e para a consequente formação das ilhas de calor urbano. Tais áreas apresentaram temperatura de superfície próxima dos 40ºC e valores de NDVI entre 0 e 1. A cidade João Pessoa recebeu classificação predominantemente "pouco confortável" ao longo da série histórica, atingindo um IDT máximo de 24,99 no ano de 2020. Tais resultados certificam a demanda por estratégias mitigadoras e preventivas que garantam a saúde e a qualidade de vida da população.

Palavras-chave: temperatura, sensoriamento remoto, Índice de Desconforto de Thom.

ABSTRACT
Rapid urbanization and population growth bring changes in land use and land cover, triggered mainly by deforestation and replacement of green areas by impermeable areas. Thus, understanding the impacts caused by urbanization is of strong interest to the academic community and urban managers, contributing to the understanding of climate dynamics on a local scale and to the understanding of preventive measures for the formation of urban heat islands. The present article aims to analyze the space-time variability between the years 2013, 2016, 2019 and 2022 of the land surface temperature (LST) and NDVI, as well as the local dynamics of land use and land cover change, based on images from the Landsat series covering the city of João Pessoa, Paraíba. In addition, air temperature (T_{air}) and relative humidity (RH) from two INMET meteorological stations were used in order to analyze the Thom Discomfort Index (TDI). The results prove that deforestation and the loss of green areas with the growth of the urban area, contribute to thermal amplification and the consequent formation of urban heat islands. Such areas had a surface temperature close to 40°C and NDVI values between 0 and 1. The city of João Pessoa received a predominantly "little uncomfortable" classification throughout the historical series, reaching a maximum TDI of 24,99 in 2020. Such results certify the demand for mitigating and preventive strategies that guarantee the health.

Keywords: temperature, remote sensing, Thom Discomfort Index.

1. INTRODUÇÃO

As tecnologias geoespaciais possibilitam uma análise mais aprofundada das transformações naturais que ocorrem na superfície terrestre. Com o uso do sensoriamento remoto orbital, é possível coletar dados de imagens da Terra que podem ser empregados em diversos estudos sobre planejamento urbano.

Com o passar do tempo, a expansão da área urbana tem aumentado os fluxos entre as cidades e aumentado a densidade das áreas construídas. Sabe-se que a cobertura e uso do solo são determinados pela distribuição geográfica dos tipos de uso (áreas urbanas, rurais, etc.), que podem ser identificados por meio de padrões homogêneos de cobertura terrestre (IBGE, 2013). Essas informações, juntamente com a distribuição da temperatura da superfície da Terra, podem ser usadas para ajudar pesquisadores e gestores urbanos a monitorar e identificar o fenômeno das ilhas de calor urbanas (FIALHO, 2012).

A ilha de calor de superfície é um fenômeno que ocorre em áreas urbanas densamente construídas, onde a temperatura da superfície do meio urbano é significativamente mais alta do que as áreas circundantes. Isso se deve à absorção de calor pelos materiais urbanos, como asfalto, concreto e edifícios, e à falta de vegetação para absorver a radiação solar. Esse fenômeno pode levar a um aumento da temperatura do ar, resultando em desconforto térmico, aumento dos custos de resfriamento e maiores emissões de poluentes no ar.

Na revisão de literatura realizada neste trabalho sobre o tema, destacamos os autores Oke e Lombardi nos estudos sobre o clima urbano, quando são afetados pelo processo de urbanização, através de fatores como: tamanho da cidade, população urbana, velocidade do vento e a geometria dos vales e dos prédios.

O termo ilha de calor surgiu do fato dos padrões isotérmicos da temperatura do ar próximo à superfície se assemelharem aos contornos de uma ilha no "mar" da paisagem circundante mais fria (OKE, 1995). Existem diferentes tipos de ilhas de calor, classificadas em: de superfície, da atmosfera urbana superior e da atmosfera urbana inferior (VOOGT; OKE, 1997).

Os tipos de ilhas são determinados conforme o método e técnica empregada no processo de registro de temperatura, que pode ser do ar ou de superfície (FIALHO, 2012). Para a identificação de calor vertical ou atmosférica, são feitas medições de temperatura do ar e umidade relativa em diferentes alturas acima da superfície urbana. A diferença de temperatura e umidade entre a camada de ar próxima à superfície urbana e as camadas superiores é o indicador da presença de uma ilha de calor vertical ou atmosférica. Nesse processo, são aplicados balões meteorológicos com sensores de temperatura e umidade. Os balões são liberados em diferentes pontos da cidade e permitem a medição vertical da temperatura e umidade ao longo do tempo (VOOGT; OKE, 1997).

Por outro lado, as ilhas de calor de superfície são caracterizadas pelas medições de temperatura de superfície terrestre a partir de sensores remotos, como satélites, aeronaves e veículos terrestres equipados com sensores de temperatura.

Voogt e Oke (2003) afirmam que o advento da tecnologia do sensoriamento remoto termal, através de satélites, permitiu novas possibilidades de observações sobre as ilhas de calor urbano, bem como a compreensão de suas causas e combinações com os arranjos urbanos.

Existem vários satélites de observação da Terra em órbita, alguns dos mais utilizados são Landsat, Sentinel, GOES, e os sensores MODIS a bordo dos satélites Terra e Aqua.

O presente trabalho utiliza imagens do satélite Landsat, que fornece imagens da superfície terrestre em diferentes comprimentos de onda, esses dados são usados para pesquisa em diversas áreas, particularmente para estudos de mudanças climáticas e desenvolvimento urbano (WULDER et al., 2022). Sendo assim, apresenta-se um estudo de ilhas de calor de superfície através do uso de dados de satélites para compreender a relação entre ilha de calor urbana superficial, ocupação do solo e conforto térmico na cidade de João Pessoa, o que poderá contribuir para o campo de pesquisa, além de fornecer subsídios adicionais para o planejamento urbano.

2. OBJETIVO

O objetivo principal deste artigo é apresentar uma análise da variabilidade espacial e temporal da temperatura de superfície, identificando a formação das ilhas de calor urbano na cidade de João Pessoa entre os anos de 2013 e 2022, a partir de imagens de sensoriamento remoto, bem como avaliar o conforto térmico com dados de temperatura do ar e umidade relativa obtidos em estações meteorológicas. Como objetivos específicos, o presente trabalho visa estudar também a dinâmica do uso e ocupação do solo e quantificar um índice de vegetação a fim de obter um panorama anual da perda de vegetação na cidade.

3. MÉTODO

O método deste trabalho está dividido em três etapas principais:

1. Obtenção da variabilidade anual do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e Temperatura de superfície (Tsup) com dados de sensoriamento remoto;

2. Determinação das condições de conforto térmico com a estimativa do Índice de Desconforto de Thom (TDI) utilizando dados do INMET para o período de 2013 a 2022;

3. Análise da dinâmica de uso e ocupação do solo entre os anos da série temporal.

3.1. Área de estudo

A cidade de João Pessoa é a capital do estado da Paraíba e de acordo com de Souza e Silva (2022), tem clima quente e úmido, com temperatura média anual de 25ºC. Possui população de 825.796 habitantes e uma área de 210,044 Km² (IBGE, 2010).

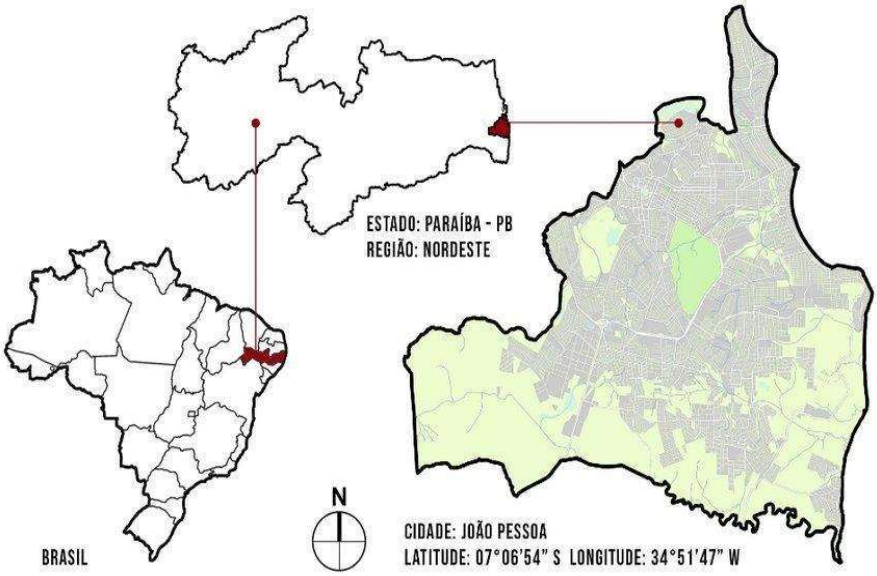


Figura 1 - Localização do município de João Pessoa – PB.

3.2. Variabilidade anual do NDVI e da Temperatura de Superfície

Inicialmente, foram escolhidas imagens da série Landsat, programa contínuo de missões de satélites de observação da Terra, realizado pela NASA em conjunto com o Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS). Mais especificamente, foram utilizadas imagens dos sensores OLI e TIRS a bordo dos satélites Landsat 8 (2013 e 2016) e 9 (2022), com resoluções espaciais de 30 (OLI) e 100 m (TIRS).

O Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), proposto inicialmente por Rouse et al. (1973), foi obtido a partir dos valores de reflectância das faixas espectrais do vermelho (RED, 0.636-0.673 μm) e do infravermelho próximo (NIR, 0.851-0.879 μm) para cada um dos anos analisados, a partir da Equação 1:

$$\mathrm{NDVI} = \frac{\mathrm{NIR} - \mathrm{RED}}{\mathrm{NIR} + \mathrm{RED}} \qquad \text{Equação 1}$$

O NDVI varia de -1 a 1, no qual valores de NDVI próximos de 1 correspondem a altos vigores vegetativos. Por outro lado, valores positivos próximos de 0 correspondem às superfícies com baixo vigor vegetativo e solos expostos, enquanto valores negativos correspondem a corpos hídricos ou nuvens.

Em seguida, outra estimativa importante foi a temperatura de superfície (*Land Surface Temperature – LST*), utilizando-se as bandas termais (10.60-11.19 μm) dos sensores TIRS, a partir da Equação 2:

$$\mathrm{LST} = \frac{\mathrm{T_{brightness}}}{\left(1 + \left(0{,}00115 \frac{\mathrm{T_{brightness}}}{1{,}4388}\right) \ln(\varepsilon)\right.} \qquad \text{Equação 2}$$

Na qual, $T_{brightness}$ corresponde à temperatura de brilho calculada e disponibilizada nos produtos Landsat (8 e 9) e posteriormente convertida em ºC, e ε se refere a emissividade da superfície, estimada a partir da Equação 3:

$$\varepsilon = 0{,}004\mathrm{Fc} + 0{,}986 \qquad \text{Equação 3}$$

onde, Fc é a fração de cobertura vegetal, obtida a partir do NDVI por meio da seguinte expressão:

$$Fc = \frac{NDVI - NDVI_{mínimo}}{(NDVI_{máximo} - NDVI_{mínimo})^2} \quad \text{Equação 4}$$

Para a análise do índice de vegetação e LST, o território urbano foi dividido em duas zonas, Norte e Sul, para que se pudesse fazer a comparação dos valores médios estimados da temperatura de superfície para cada uma das zonas com os valores de temperatura do ar obtidos em campo pelas estações disponíveis.

3.3. Estimativa do Índice de Desconforto de Thom

As condições de conforto térmico para a cidade de João Pessoa foram calculadas na escala anual a partir do Índice de Desconforto de Thom (Thom, 1959), que oferece uma abordagem simples e prática para avaliar o desconforto térmico, com a combinação de dois fatores amplamente reconhecidos como influenciadores do conforto humano: a temperatura e a umidade relativa do ar. Essa combinação fornece uma medida abrangente que pode ser facilmente interpretada e compreendida por pessoas com diferentes níveis de conhecimento técnico, com base científica sólida, embora tenha sido desenvolvido há décadas, seu embasamento teórico continua válido e é respaldado por estudos e pesquisas na área de conforto térmico.

A partir dos valores de umidade relativa do ar (UR, %) provenientes de duas estações do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) presentes nas zonas Norte (-34.84W e -7.09S) e Sul (-34.81W e -7.16S) da cidade, chegou-se aos valores de umidade absoluta, efetuando-se a conversão com o auxílio da carta psicrométrica e os respectivos valores de temperatura do ar (T_{ar}) das mesmas estações.

Após a conversão, os valores de umidade absoluta foram agregados através da média anual que posteriormente foi convertida para UR anual utilizando novamente a carta psicrométrica e agora o valor da temperatura média do ar anual, valor este que assim como a UR anual, também seria utilizado na equação geral do Índice de Desconforto de Thom (IDT).

Assim, tendo em mãos os valores de UR anual (%) e a temperatura média do ar anual (ºC), aplicou-se o IDT por meio da Equação 5:

$$IDT = T_{ar} - (0{,}55 - 0{,}005UR)\,(T_{ar} - 14{,}5) \quad \text{Equação 5}$$

Para caracterizar o grau de desconforto, classificou-se o IDT de acordo com Marçal *et al.* (2019), com os seguintes intervalos: pouco confortável ($22 \leq IDT \leq 25$), desconfortável ($25 < IDT \leq 28$), muito desconfortável ($28 < IDT < 31$) e início de estado de emergência ($IDT \geq 31$). A classificação foi realizada individualmente para cada estação e de forma geral para a cidade.

O coeficiente de correlação amostral de Pearson (r) foi escolhido como método estatístico para a análise da correlação entre as variáveis quantificadas a um nível de significância de 95%. As variáveis utilizadas nesse tratamento estatístico foram o NDVI e a temperatura de superfície estimados no pixel de 30 m da estação e o seu respectivo IDT calculado. O procedimento permitiu expressar numericamente a associação linear entre as variáveis, sendo possível medir o grau com que as mesmas se associam. É importante mencionar que o coeficiente assume valores entre -1 e 1, dos quais r positivo indica associação positiva entre variáveis (diretamente proporcionais) e r negativo demonstra associação negativa (inversamente proporcionais). Quanto maior o módulo de r, mais forte a correlação entre as variáveis.

A matriz de correlação estabelecida foi montada com os valores estimados para a estação da Zona Norte e para a estação da Zona Sul, a fim de se analisar localmente esse parâmetro estatístico.

3.4. Dinâmica do uso e ocupação do solo

Para a análise da variabilidade dos tipos de uso e ocupação do solo na área de estudo, foi utilizada a coleção 7 da iniciativa MapBiomas Brasil (SOUZA et al., 2020), que possui resolução espacial de 30 m, com classificação para todo o território nacional desde o ano de 1985.

As classes escolhidas para caracterizar a dinâmica urbana neste estudo foram: 1. Floresta; 2. Formação natural não florestal; 3. Agropecuária; 4. Área não vegetada; 5. Corpos d'água. Vale salientar que a classe 4 (área não-vegetada) inclui os pixels correspondentes a área urbana da cidade.

4. RESULTADOS

4.1. Variabilidade das classes de uso e ocupação do solo

Devido à disponibilidade dos dados da Coleção 7 do MapBiomas Brasil (1985 a 2021), o último ano escolhido para análise dos quantitativos das classes de uso e ocupação do solo foi o ano de 2021, admitindo-se que ocorreram pequenas mudanças de 2021 para 2022.

Os valores encontrados na classificação mostram mudanças sutis nas áreas de todas as classes adotadas, como mostram as curvas suaves presentes na Figura 2. A primeira classe verificada corresponde à "Floresta", que contempla todas as formações vegetais nativas do bioma local (Mata Atlântica). Essa classe sofreu um aumento de 1,86% entre os anos de 2013 e 2021. Por outro lado, outras "formações naturais não florestais" sofreram supressão de cerca de 0,09%. A terceira classe correspondente à "agropecuária", que foi a que mais diminuiu entre os anos da série temporal, cerca de 6,38%. Pode-se inferir que a diminuição dessa classe se deve à substituição das atividades de agropecuária pelas atividades industriais, cada vez mais presentes no contexto da cidade, diminuindo assim as áreas de plantio e colheita.

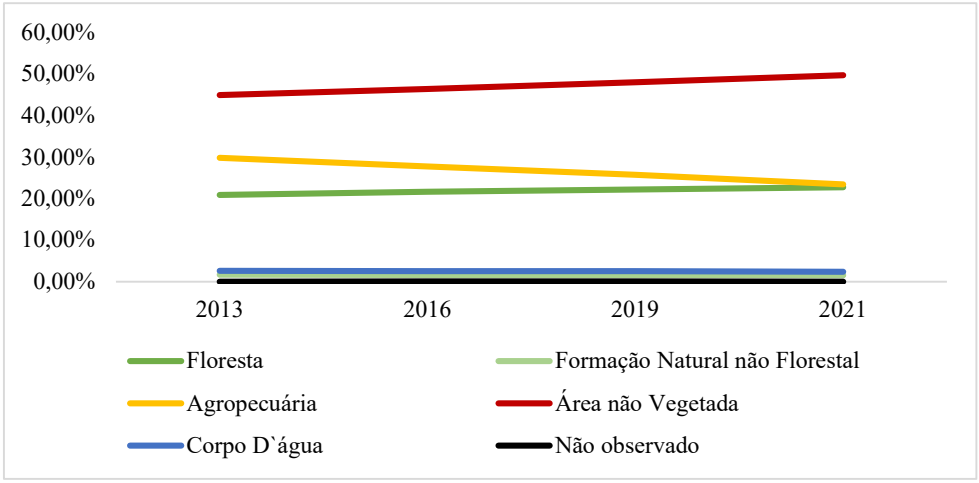


Figura 2 – Variação das classes de uso e ocupação do solo entre 2013 e 2021

Um destaque nos quantitativos obtidos foi encontrado na classe de "área não vegetada" que cresceu aproximadamente 4,80% de 2013 a 2021, integrando assim o conjunto de evidências que revelam a expansão da malha urbana e o espraiamento das superfícies impermeáveis no município.

Tal dinâmica pode ser observada no comparativo esquematizado na Figura 3, na qual a expansão da área não vegetada ocorreu principalmente na Zona Sul da cidade, em detrimento da diminuição de áreas de formação natural não florestal e agropecuária.

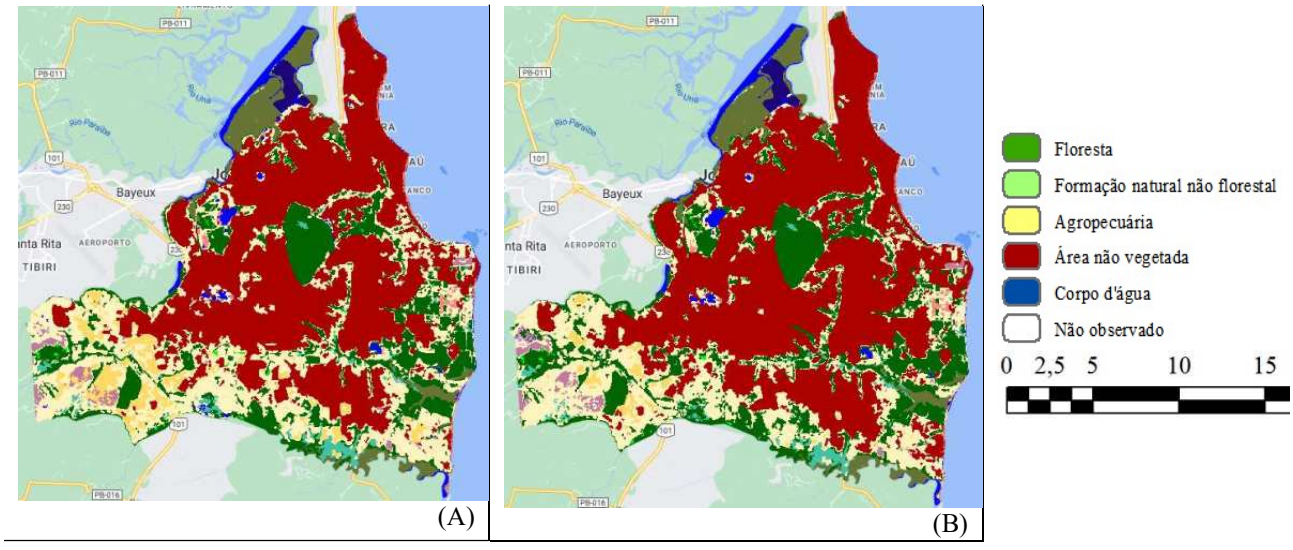


Figura 3 – Mapas de uso e ocupação do solo para 2013 (A) e 2021 (B)

4.1. Variabilidade anual do NDVI e de LST

O padrão da variabilidade do índice de vegetação se mostrou capaz de captar de forma clara o processo de mudança na superfície da cidade, principalmente no que se refere à substituição de áreas verdes por áreas impermeáveis.

Através dos mapas obtidos, observou-se que o NDVI geral variou espacialmente entre os anos, atingindo uma menor média anual no ano de 2022 (0,2422) em comparação com a média estimada para o ano inicial da série, 2013 (NDVI = 0,5011), comprovando assim que o território urbano de João Pessoa perdeu cobertura vegetal através do desmatamento, dando espaço para locais de solo exposto e áreas impermeáveis.

A queda mais brusca nos valores médios do índice se deu entre os dois últimos anos analisados (2019 e 2022), cenário observado na Figura 4, na qual alguns bairros específicos da cidade sofreram perda nos valores de NDVI para os pixels presentes nas imagens, bairros estes que passaram por intenso processo de urbanização, como por exemplo os bairros de Manaíra e Bessa, pertencentes à Zona Norte da cidade, e os bairros de Mangabeira e Valentina, situados na Zona Sul da capital paraibana.

Por outro lado, algumas localidades permaneceram com valores de NDVI acima da média anual, como por exemplo a Mata do Buraquinho, com NDVI igual a 0,88. Tais pontos da cidade servem como importantes "reguladores térmicos" do microclima local, uma vez que as áreas verdes são agentes importantes no processo de evapotranspiração e no consequente resfriamento das zonas vizinhas.

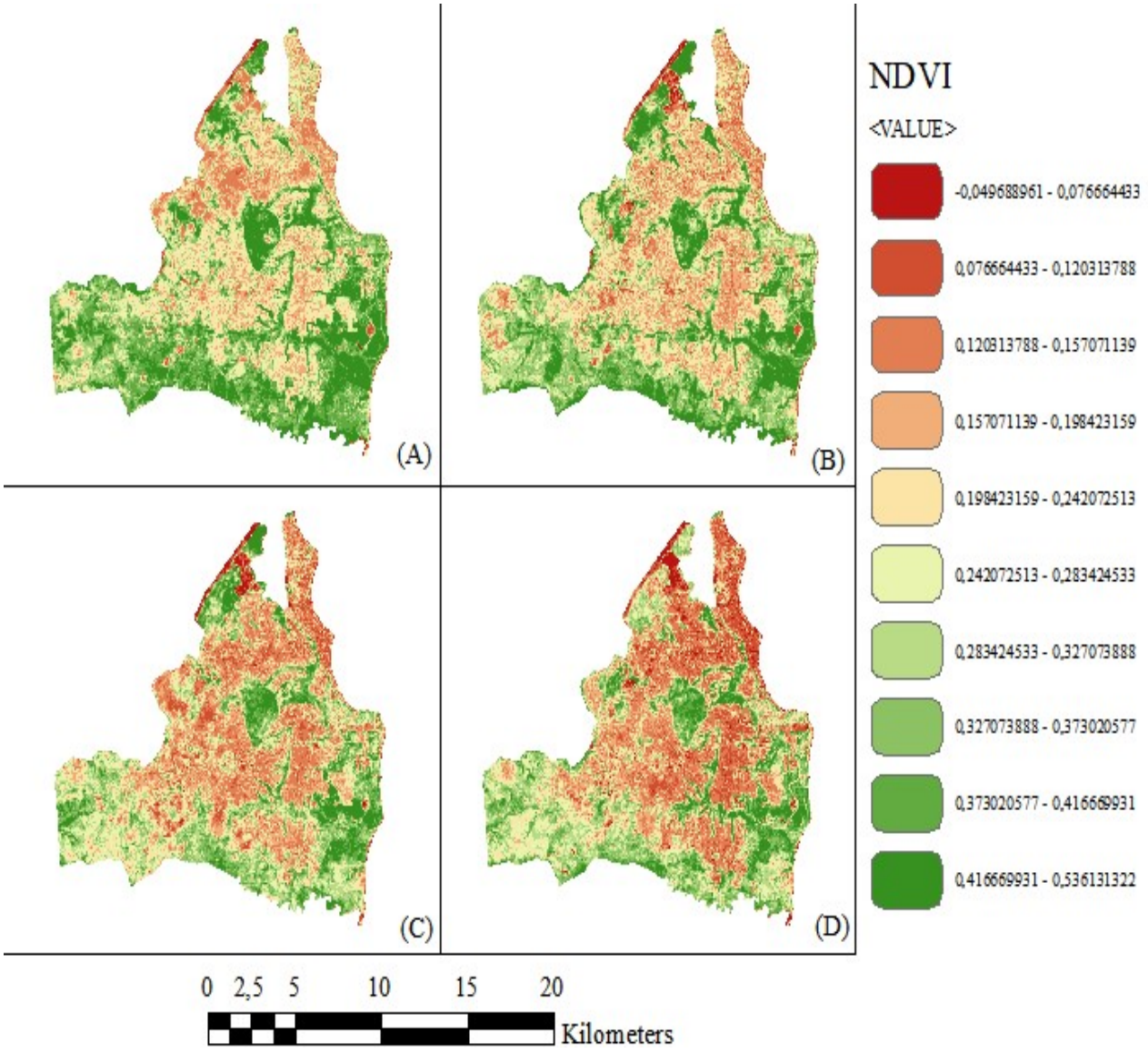


Figura 4 – Variabilidade espacial do NDVI para os anos de 2013 (A), 2016 (B), 2019 (C) e 2022 (D).

A análise espacial dos valores de temperatura de superfície (LST) mostrou uma intensificação da magnitude dessa grandeza nos bairros que apresentaram queda e perda espacial de valores de NDVI,

comprovando-se assim que a perda da vegetação observada e apontada anteriormente acarretou o aumento da temperatura de superfície e contribuiu para a formação de zonas mais quentes no interior da cidade.

No ano de 2022, a média da temperatura de superfície anual alcançou valores máximos próximos de 40ºC, como observado nos bairros de Mangabeira, Valentina, Bessa, Manaíra, Tambaú e Cabo Branco. Tais bairros apresentaram comportamentos diferentes das porções mais vegetadas da cidade, que para o mesmo ano (2022) apresentaram temperaturas próximas dos 20ºC, como por exemplo a Mata do Buraquinho e o bairro Gramame.

As diferenças de temperatura entre os diversos pontos da cidade corroboram para a inferência de que o crescimento da malha urbana, a expansão de regiões densamente povoadas e o desmatamento, contribuem para a formação de ilhas de calor urbano na cidade de João Pessoa, fenômeno presente principalmente em áreas predominantemente residenciais (e.g., bairros do Bessa, Manaíra, Tambaú, Cabo Branco, Bancários, Mangabeira e Valentina).

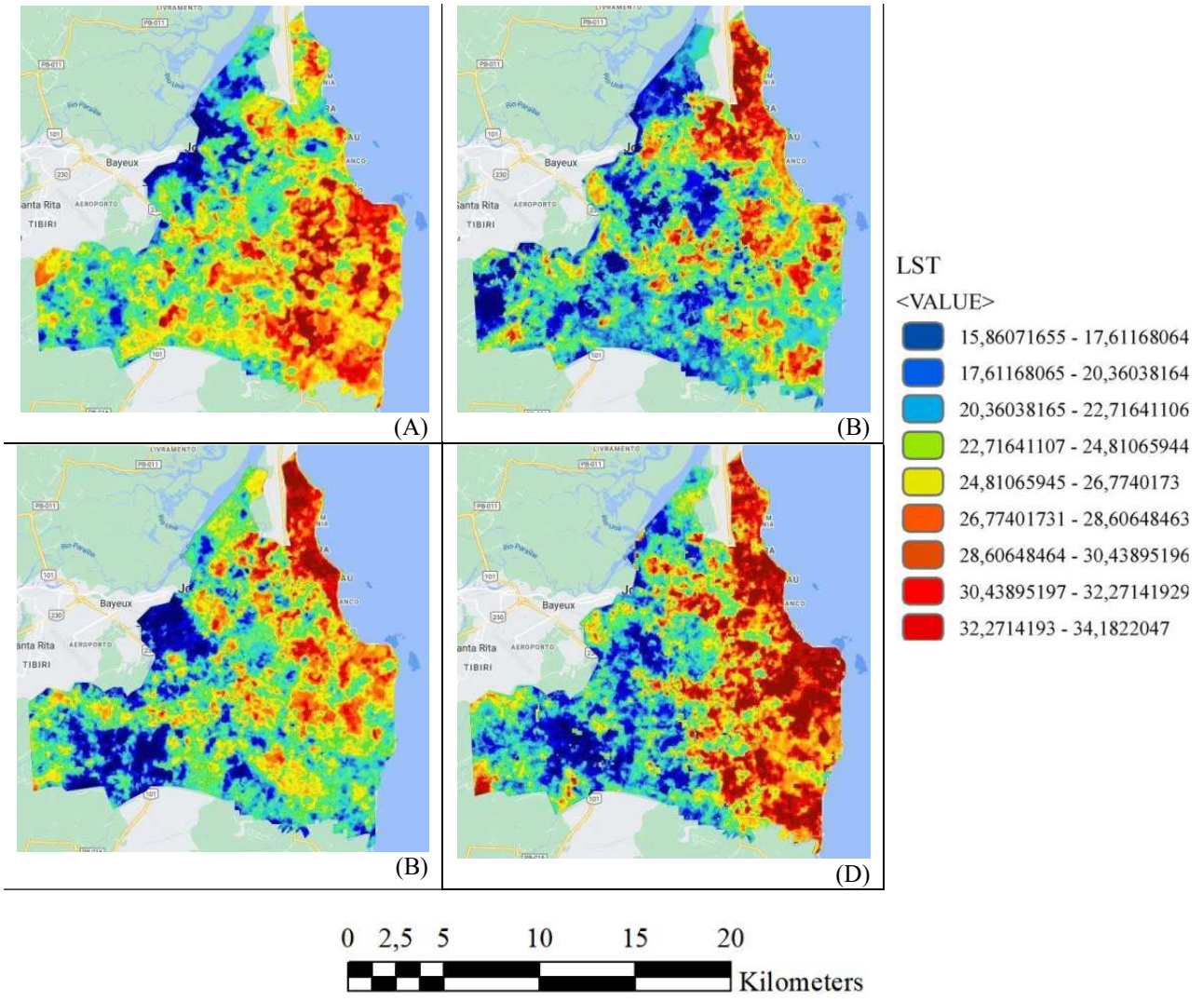


Figura 5– Variabilidade espacial da temperatura de superfície (LST) para os anos de 2013 (A), 2016 (B), 2019 (C) e 2022 (D).

4.2. Estimativa e classificação do conforto térmico local

A Tabela 2 traz os valores de temperatura do ar e umidade relativa anuais para as estações do INMET da Zona Norte e da Zona Sul da cidade:

Tabela 2 – Temperatura média anual do ar e umidade relativa por estação

Ano	Estação Norte		Estação Sul	
	Temperatura do ar (ºC)	Umidade relativa (%)	Temperatura do ar (ºC)	Umidade relativa (%)
2013	26,59	73,95	27,23	76,65
2014	26,27	75,98	26,94	75,47
2015	26,56	73,47	27,23	74,75
2016	26,60	75,51	27,25	76,26

2017	26,28	75,92	27,12	76,87
2018	26,02	75,48	27,28	76,06
2019	26,57	75,17	27,28	77,12
2020	27,02	74,76	27,15	78,77
2021	27,23	73,48	26,98	78,66
2022	26,48	75,44	26,93	77,60

Observa-se que os valores de temperatura do ar estão no intervalo de 26,02°C a 27,23°C na estação Norte e 26,93°C a 27,28°C na estação Sul, cujos valores caracterizam o clima tropical úmido da cidade, de acordo com a carta bioclimática da NBR 15220-333 (ABNT, 2005), com temperaturas elevadas durante todo o ano.

A faixa de umidade relativa do ar entre 30 a 50% atribui condições favoráveis para a saúde humana, porém, níveis superiores a 65% podem aumentar a incidência de doenças respiratórias e alergias segundo Prüss-Üstün et al. (2016). Observa-se que em ambas as estações a umidade relativa do ar apresenta percentuais altíssimos, acima de 74%, cuja condição influencia diretamente no bem-estar das pessoas na cidade e no consumo de energia.

Com relação aos valores obtidos do Índice de Desconforto de Thom (IDT) para a cidade de João Pessoa e a posterior classificação obtida, tem-se cenário de crescimento do índice (Figura 6), tanto para a estação Norte quanto para Sul, assim como para o valor médio em João Pessoa:

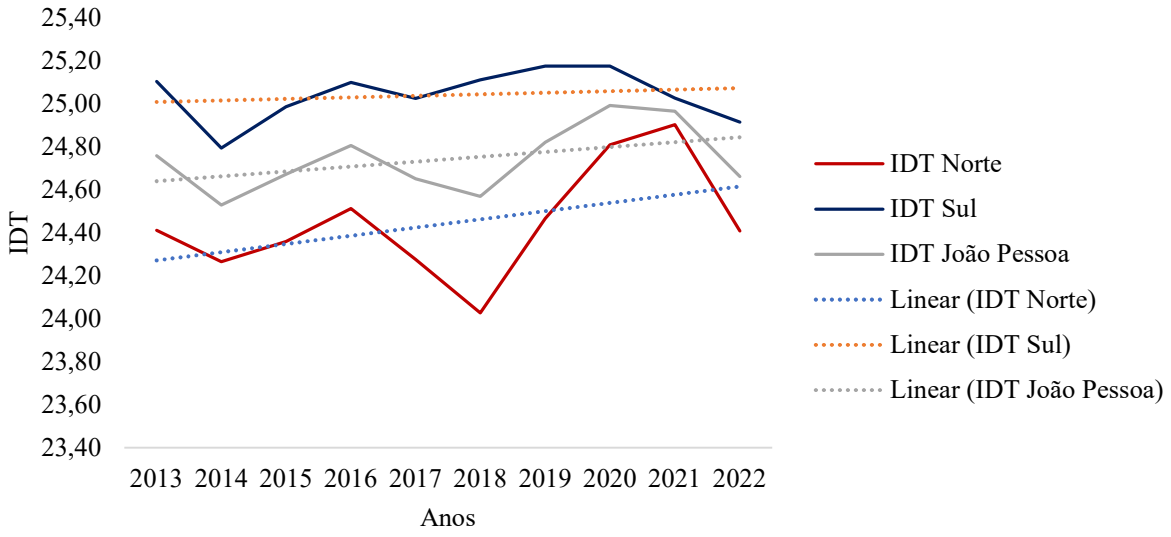


Figura 6 – Variabilidade anual do IDT para as estações e para a cidade de João Pessoa

Pode-se observar que ao longo do período analisado, houve um aumento gradual da média anual do IDT, indicando que a cidade de João Pessoa tem enfrentado condições de desconforto térmico cada vez mais severas. Podemos notar, ainda, que os valores do IDT ficaram acima do limite considerado pouco confortável (25) em todos os anos analisados, demonstrando assim que a população da cidade de João Pessoa tem enfrentado condições de desconforto térmico durante grande parte da série estudada.

A Tabela 3 mostra a classificação anual obtida por estação e a classificação geral para o município:

Tabela 3 – IDT e classificação anuais para as estações Norte e Sul e para toda a cidade de João Pessoa

Ano	IDT Norte	Classificação Norte	IDT Sul	Classificação Sul	IDT João Pessoa	Classificação João Pessoa
2013	24,41	Pouco confortável	25,11	Desconfortável	24,76	Pouco confortável
2014	24,26	Pouco confortável	24,80	Pouco confortável	24,53	Pouco confortável
2015	24,36	Pouco confortável	24,99	Desconfortável	24,67	Pouco confortável
2016	24,51	Pouco confortável	25,10	Desconfortável	24,81	Pouco confortável
2017	24,28	Pouco confortável	25,03	Desconfortável	24,65	Pouco confortável
2018	24,03	Pouco confortável	25,11	Desconfortável	24,57	Pouco confortável
2019	24,47	Pouco confortável	25,18	Desconfortável	24,82	Pouco confortável
2020	24,81	Pouco confortável	25,18	Desconfortável	24,99	Pouco confortável
2021	24,90	Pouco confortável	25,03	Desconfortável	24,97	Pouco confortável
2022	24,41	Pouco confortável	24,92	Pouco confortável	24,66	Pouco confortável

Os valores de IDT variaram de 24,47 a 25,38 na estação Norte, com a classificação “Pouco confortável” predominante na série histórica anual (90%). Já na estação Sul, o valor mínimo de IDT foi de 25,41 e o valor máximo 25,18, com a classificação “Desconfortável” permanente entre os anos de 2019 e 2020.

A classificação geral encontrada para a cidade de João Pessoa é predominantemente “Pouco confortável” (73%) e os demais anos apresentou classificação “desconfortável” (27%).

As matrizes de correlação obtidas entre as variáveis para as estações Norte e Sul estão presentes nas Tabelas 4 e 5, respectivamente:

Tabela 4 – Matriz de correlação de Pearson (r) para a estação da Zona Norte

	LST	NDVI
NDVI	-0,813763	
IDT	-0,092453	0,573748

Tabela 5 – Matriz de correlação de Pearson (r) para a estação da Zona Sul

	LST	NDVI
NDVI	-0,655554	
IDT	-0,960760	0,778956

Para a estação Norte, o valor da correlação forte e inversamente proporcional de -0,813763 entre NDVI e a temperatura de superfície (LST) sinaliza que a queda de NDVI anual, decorrente da perda de vegetação por desmatamento e mudança dos tipos de uso e ocupação do solo, aumentam os valores de temperatura de superfície e, consequentemente, a formação das ilhas de calor urbano. O mesmo pode ser observado para a Zona Sul, uma vez que a correlação se apresenta negativa e moderada entre NDVI e LST (r = - 0,655554).

O Índice de Desconforto de Thom (IDT) apresentou associação negativa com a temperatura de superfície, atestando assim que a formação das ilhas de calor urbano de superfície, ou seja, o aumento dos valores de temperatura de superfície contribui para a diminuição do IDT. Isso se deve ao fato da ocorrência da transferência de calor entre superfície e atmosfera, uma vez que com o aumento da temperatura de superfície, ocorre diminuição da temperatura do ar (atmosférica), consequentemente, diminuição dos valores de IDT e aumento do conforto térmico do meio circundante.

O conteúdo da pesquisa demonstra que as consequências negativas associadas ao clima provocam a condições de aquecimento urbano e o desconforto térmico urbano, que na escala da cidade colaboram para o efeito da ilha de calor urbana de superfície. Esses resultados encontrados reforçam a importância de medidas para mitigar os efeitos do calor na cidade, como a arborização urbana, a criação de espaços públicos com sombra e ventilação adequadas e a conscientização da população sobre os cuidados que devem ser tomados para evitar problemas de saúde decorrentes do calor.

5. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos é possível perceber a importância da determinação da relação espacial das mudanças de uso e ocupação do solo com o crescimento das ilhas de calor urbano de superfície. Os valores de temperatura de superfície obtidos pelas técnicas de sensoriamento remoto foram fundamentais para mapear os pontos mais vulneráveis à formação das ilhas de calor no município de João Pessoa.

A quantificação do NDVI apresentou quedas nas médias anuais que validaram a hipótese do crescimento das áreas não vegetadas em João Pessoa com a consequente amplificação da temperatura de superfície. Tal associação se mostrou estatisticamente forte, corroborando assim para a conclusão de que as áreas verdes constituem grandes ferramentas de resfriamento do microclima urbano, atentando para a importância da preservação e persistência dessas áreas dentro e fora das cidades.

A quantificação do IDT possibilitou comprovar que a temperatura do ar possui forte relação com a umidade relativa do ar e que ambas contribuem para a qualidade de vida da população residente no interior das cidades. Com base nos dados apresentados, pode-se concluir que as duas estações monitoradas apresentaram níveis de desconforto térmico ao longo dos anos, com valores classificados como "pouco confortável" ou "desconfortável", com predominância de desconforto na região Sul da cidade com a classificação “Desconfortável” nos anos de 2015 a 2021. A partir disso, pode-se concluir que a realidade atual do IDT em João Pessoa é de crescimento, esperando-se assim um aumento do desconforto térmico no interior da cidade.

Nesse contexto, os dados apresentados indicam a necessidade urgente de intervenção por parte dos órgãos públicos, no sentido de preservar as áreas verdes, diminuir o desmatamento local e mitigar de forma direta o incremento das temperaturas do ar e de superfície e a diminuição da umidade relativa do ar, a fim de frear a formação de ilhas de calor e a expansão de locais extremamente desconfortáveis que prejudicam a saúde da população local.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. NBR 15220-3. Associação Brasileira de Normas Técnicas, p. 16, 2005.

DE SOUZA E SILVA, R. et al. Thermal comfort conditions at microclimate scale and surface urban heat island in a tropical city: A study on João Pessoa city, Brazil. International Journal of Biometeorology, v. 66, n. 6, p. 1079–1093, 2022.

THOM, Earl Crabill. O índice de desconforto. Weatherwise, v. 12, n. 2, pág. 57-61, 1959.

FIALHO, E. S. Ilha de calor: reflexões acerca de um conceito. Revista ACTA Geográfica, p. 61–76, 2012.

IBGE. Censo Demográfico de 2010. Rio de Janeiro: IBGE, 2010.

IBGE. Manual Técnico de Uso da Terra. 3ª Edição. IBGE, 2013.

MARÇAL, N. A. et al. Analysis of the environmental thermal comfort conditions in public squares in the semiarid region of northeastern Brazil. Building and Environment, v. 152, n. January, p. 145–159, 2019.

OKE, T. R. The Heat Island of the Urban Boundary Layer: Characteristics, Causes and Effects. Wind Climate in Cities, p. 81–107, 1995.

PRÜSS-ÜSTÜN, Annette et al. Prevenção de doenças por meio de ambientes saudáveis: uma avaliação global da carga de doenças dos riscos ambientais . Organização Mundial da Saúde, 2016.

ROUSE, J. W., HAAS; R. H., SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS, Third ERTS Symposium, NASA SP-351 I, 309-317, 1973.

SOUZA, C. M. et al. Reconstructing three decades of land use and land cover changes in brazilian biomes with landsat archive and earth engine. Remote Sensing, v. 12, n. 17, 2020.

VOOGT, J. A.; OKE, T. R. Complete urban surface temperatures. Journal of Applied Meteorology, v. 36, n. 9, p. 1117–1132, 1997.

VOOGT, J. A.; OKE, T. R. Thermal remote sensing of urban climates. Remote Sensing of Environment, v. 86, n. 3, p. 370–384, 2003.

WULDER, M. A. et al. Fifty years of Landsat science and impacts. Remote Sensing of Environment, v. 280, n. July, p. 113195, 2022.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal da Paraíba, ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECAM) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Paraíba (FAPESQ-PB) pelo incentivo à pesquisa e auxílio financeiro.