

Análise da influência da composição dos materiais urbanos nas temperaturas do ar e da superfície para a cidade de Fortaleza durante o biênio 2022/2023

João Paulo Alves Façanha^{1*}, Arielle Elias Arantes²

¹Aluno de Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará. (*Autor correspondente: joaopaulo.facanha@gmail.com)

²Doutora em Ciências Ambientais, Universidade Federal do Ceará, Brasil.

Histórico do Artigo: Submetido em: 02/04/2024 – Revisado em: 08/07/2024 – Aceito em: 22/09/2024

RESUMO

As cidades são fenômenos que contam a história da organização humana em assentamentos fixos há séculos. No entanto, o crescimento populacional dos últimos séculos resultou em uma expansão exacerbada das mesmas, que, motivadas pelas necessidades cada vez maiores de recursos, alimentaram a degradação ambiental e o caos climático. Assim, o presente artigo tem por objetivo analisar a influência da composição do solo urbano nas temperaturas superficiais e do ar na cidade de Fortaleza, capital do Ceará, para o biênio 2022 e 2023. Para a classificação do uso e cobertura do solo, utilizou-se uma imagem Planet-NICFI com 4,77 metros de resolução espacial, e para a determinação das temperaturas superficiais, imagens Landsat-8, sensor TIRS, mensais de 2022 a 2023. Todo o processamento das imagens foi feito na plataforma do *Google Earth Engine*. Os resultados demonstram que áreas de pavimento e teto argiloso apresentaram temperaturas superiores em até 5°C comparativamente a áreas de vegetação densa. As regionais 2 e 12, densos polos comerciais e habitacionais, sofrem com elevadas temperaturas, por outro lado, as regionais 7 e 9 apresentam alta cobertura vegetal e menores temperaturas. A partir das análises, observa-se que há alternativas que podem ser tomadas a fim de prevenir um aumento considerável das temperaturas, respeitando o meio ambiente citadino e democratizando o espaço da cidade.

Palavras-Chaves: Uso e cobertura do solo, Satélites de alta resolução, Classificação de imagens, Temperatura de superfície, Temperatura do ar.

Analysis of the influence of the composition of urban materials on air and surface temperatures for the city of Fortaleza during the 2022/2023 biennium

ABSTRACT

Cities are phenomena that tell the history of human organization in fixed settlements for centuries. However, the populational growth of the last few centuries has resulted in an exacerbated expansion of the cities, which, motivated by the ever-growing needs for resources, have fueled the environmental degradation and the climate chaos. Thus, this article aims to analyze the influence of urban soil composition on surface and air temperatures in the city of Fortaleza, capital of Ceará, for the 2022 and 2023 biennium. To classify land use and cover, a Planet-NICFI image with 4.77 meters of spatial resolution was used, whereas to estimate surface temperatures, Landsat-8, TIRS sensor, monthly images from 2022 to 2023 were used. The results demonstrate that areas with clay floors and ceilings presented higher temperatures by up to 5°C compared to areas with dense vegetation. Regions 2 and 12, dense commercial and housing hubs, suffer from high temperatures, on the other hand, regions 7 and 9 have high vegetation cover and lower temperatures. From the analyses, it is observed that there are alternatives that can be taken in order to prevent a considerable increase in temperatures, respecting the city environment and democratizing the city's space.

Keywords: Land cover land use, High-resolution satellites, Image classification, Surface temperature, Air temperature.

1. Introdução

Nas últimas décadas têm-se observado o avanço de dois fenômenos, em escala planetária, que estão intrinsecamente relacionados: a urbanização e as mudanças climáticas. O êxodo maciço ao ambiente urbano teve como apogeu o século XIX, em virtude do advento das revoluções industriais. De acordo com Pagnossin

Façanha, J. P. A., e Arantes, A. E. A. (2024). Análise da influência da composição dos materiais urbanos nas temperaturas do ar e da superfície para a cidade de Fortaleza durante o biênio 2022/2023. *Revista Brasileira de Sensoriamento Remoto*, v.5, n.3, p.10-26.



et al. (2001), a interação entre o ser humano e o ambiente, por meio dos processos de urbanismo e industrialização, provocou impactos demasiados à natureza. Devido à falta de planejamento estrutural nas cidades e a liberação de compostos químicos tóxicos pelas indústrias fundamentais no desenvolvimento industrial e tecnológico oitocentista, houve um aumento nocivo da temperatura global, que pôs em risco ecossistemas frágeis.

A partir disso, surge nas cidades o acontecimento das ilhas de calor, que na definição de Bias et al. (2003, p. 1) “caracteriza-se pelo incremento da temperatura nos centros urbanos em relação às áreas de entorno”. Como evidenciado por Barros e Lombardo (2016), este fenômeno está relacionado a diversos fatores como poluição do ar e precipitação desigual, os quais contribuem para uma sensação térmica insuportável às formas de vida nas urbes ao redor do mundo. O uso e cobertura do solo pode ser considerado um fator preponderante para a formação das ilhas de calor. Conforme explicado por Alves e Vecchia (2012), as áreas urbanas passam por intensos processos de transformação do seu terreno, fomentados por ação humana, substituindo o componente natural pelo antrópico e isso ocasiona danos, muitas vezes irreparáveis, ao meio ambiente.

Apoiado nisso, em sua dissertação do mestrado, Moura (2008) concluiu a existência de ilha de calor (IC) na cidade de Fortaleza, evidenciando uma amplitude térmica de 5° C entre as áreas mais quentes, regiões com maior adensamento populacional, e os espaços naturais da cidade. Ademais, partindo dessa premissa, em estudos desenvolvidos por diversos outros pesquisadores, de diferentes partes do mundo, é de senso científico comum que alguns materiais urbanos contribuem ou desfavorecem o fenômeno da ilha de calor. Na pesquisa desenvolvida por Kottmeier et al. (2007) na cidade de Berlim, capital da Alemanha, destacam-se as áreas de tráfego (ruas e calçadas), geralmente cobertas por superfícies impermeáveis como o pavimento e o concreto, como os maiores contribuidores e as superfícies naturais (vegetação e corpos de água) como maiores retardadores das IC.

Outro fator estrutural da composição das cidades que apresenta a capacidade de interferir consideravelmente na sensação térmica é o desenho urbano. Como dissecado por Romero (2013), o espaço citadino, sendo um conceito concreto, é passível de alterações constantes, provenientes das utilidades nele aplicada. Logo, esta concepção pode ser “desenhada, construída e ocupada” por aqueles que a manuseiam, sendo uma demonstração da sociabilidade empregada nesses espaços. Assim, a relação do ser humano com o meio ambiente urbano, em especial o clima, pôde ser analisada por Romero através de um viés espacial amplo, uma vez que o alinhamento das vias, assim como a existência de áreas nativas e edificações de materiais e tamanhos diversos, estão condicionadas a influenciar a percepção de temperatura local.

Segundo Souza et al. (2016) as imagens provenientes de satélites artificiais, obtidas por meio dos sensores neles instalados, geram informações cruciais para o entendimento de fenômenos naturais e sociais causados na superfície terrestre, como a variação da cobertura do solo, a expansão das áreas urbanas e dados meteorológicos. Essas informações fomentam análises que contribuem para com a sociedade contemporânea, em especial no trato de questões ambientais, em virtude da emergência climática provocada pelo aquecimento global. A partir disso, tem-se que uma das avaliações fundamentais provenientes dessas imagens trata-se das temperaturas de superfície, que, de acordo com Jensen (2009), são obtidas através de sensores de infravermelho fincados nas plataformas aeroespaciais orbitando o planeta Terra, captando o fluxo de calor emitido pelos componentes da cobertura terrestre.

No entanto, na visão de Naserikia et al. (2023), pela temperatura de superfície ser obtida majoritariamente por meio de imagens de satélites, isto acaba autossabotando os resultados da análise social do efeito da temperatura na saúde humana. Contornando este problema, Martilli et al. (2020) defende que a temperatura do ar é mais apropriada para verificar os efeitos dos fluxos de calor no bem-estar da população, uma vez que a temperatura urbana abaixo do dossel é a mais representativa da sensação térmica aos seres humanos. Contudo, como esclarecido por Kloog et al. (2016), a temperatura do ar é provida exclusivamente por estações meteorológicas, que, em virtude das variações constantes de fatores sócio climáticos em uma mesma área urbana, inviabilizaria uma observação mais ampla e detalhada da temperatura em todo o espaço.

Em contrapartida, uma única imagem de satélite com bandas termais seria capaz de determinar todas as temperaturas de superfície daquela região.

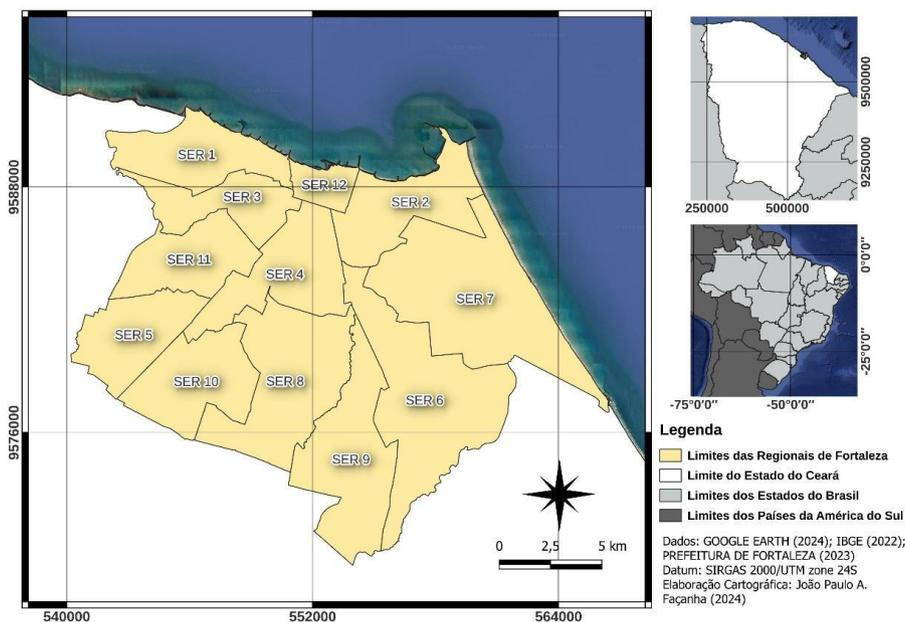
Assim, apesar da existência de um Plano Diretor Municipal, carta que prevê uma ordenação do desenvolvimento urbano com base na democratização do acesso aos bens da cidade e na proteção do meio ambiente, este instrumento, no caso de Fortaleza, é rotineiramente desrespeitado, favorecendo a especulação imobiliária e o crescimento desordenado, contribuindo com o aprofundamento das desigualdades sociais e da degradação ambiental e climática. Desse modo, partindo da urgência sócio climática, bem como da carência de trabalhos científicos acerca da influência do uso e cobertura do solo na temperatura, este artigo objetiva analisar a relação entre a temperatura da superfície e do ar e a composição dos materiais urbanos, compreendendo o biênio 2022/23 na cidade de Fortaleza e as suas subdivisões, na forma das Secretarias Executivas Regionais (SER), a fim de produzir informações precisas, necessárias e fundamentais para o combate da problemática proposta, exacerbada pelas transformações constantes do espaço citadino, que alteram a paisagem natural por materiais sintéticos.

2. Material e Métodos

2.1 Área de Estudo

A cidade de Fortaleza (Figura 1), capital do estado do Ceará, está localizada no norte da região Nordeste do Brasil. Possui, de acordo com IBGE (2022), uma área de 312,353 km² e uma população de 2.428.708 habitantes, tendo, portanto, uma densidade demográfica de 7.775,52 habitantes/km² – o maior aglomerado de pessoas pela área entre as capitais estaduais brasileiras. É delimitada ao Norte e ao Leste pelo Atlântico tropical, a Oeste pelo município de Caucaia e ao Sul por Maracanaú, Itaitinga, Pacatuba e Eusébio, sendo que estas são cidades da Região Metropolitana de Fortaleza (RMF). O município de Fortaleza é composto por 121 bairros que, por sua vez, são adensados nas 12 Secretarias Executivas Regionais (Prefeitura de Fortaleza, 2023).

Figura 1 – Mapa de localização do município de Fortaleza
Figure 1 – Location map of the municipality of Fortaleza



Caracterizado como bioma Caatinga, pelo IBGE, a capital cearense apresenta um esquema de precipitação irregular, com chuvas abundantes no primeiro semestre do ano (janeiro a junho), influenciada principalmente pela passagem da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) sobre o oceano Atlântico, e um segundo semestre seco (julho a dezembro), com pico de estiagem no mês de outubro. Analisando dados pluviométricos de 1981 a 2010, a Fundação Cearense de Meteorologia e Recurso Hídricos (FUNCEME, 2018) atesta que a precipitação média de Fortaleza é de 1500 mm/ano. Outra característica climática imprescindível na presente análise é a temperatura média da cidade, que é em torno de 27° C.

Já a amplitude térmica pode variar consideravelmente entre os períodos de seca e de chuva. A variação média observada durante o período seco foi de 23° C durante à manhã e 34° C à noite. Já no período chuvoso, a diferença térmica foi de 22° C no período diurno e 33° C no período noturno. A partir desses fatores climáticos, Mendonça e Danni-Oliveira (2011) definem o clima da cidade como tropical equatorial.

2.2 *Imagens de Satélite e Dados Meteorológicos*

Para a classificação do uso e cobertura do solo foi utilizada uma imagem sem nuvem com resolução espacial de 4,77 metros durante o ano de 2022, sendo que esta foi provida pela empresa estadunidense Planet, através do programa NICFI (Norway's International Climate & Forests Initiative) por meio da plataforma *Google Earth Engine (GEE)*. A fim de determinar as temperaturas da superfície terrestre (TST) da região estudada, utilizou-se de imagens dos satélites Landsat-8 e Landsat-9, sensor TIRS, nível de processamento 2, obtidas da plataforma *GEE*. As imagens de temperatura possuem resolução espacial de 30 metros, sendo que as mesmas são disponibilizadas a cada 16-dias. Para fins deste estudo, após a remoção das nuvens foi calculado a média mensal dos valores das temperaturas da superfície em Celsius para o biênio 2022 e 2023.

Dados que retratam as temperaturas do ar foram obtidos por meio de estações meteorológicas disponibilizadas pela FUNCEME nas localidades Praia do Futuro (lat. -38.4417, long. -3.7622) e Itaperi (lat. -38.5574, long. -3.7951). Em função da disponibilidade, foram angariadas informações de apenas 2 estações. No entanto, a partir da média aritmética entre os valores de temperatura das duas coordenadas, obteve-se uma representação adequada da temperatura média do ar de Fortaleza.

2.3 *Classificação do Uso e Cobertura do Solo*

Utilizando-se da imagem Planet-NICFI para o mês de julho de 2022, sendo esta a melhor imagem disponível para 2022, foi realizada a classificação do uso e cobertura do solo. A fim de representar a variabilidade da composição da superfície da região estudada foram estabelecidas 8 classes de uso e cobertura do solo. Este procedimento é fundamental, pois o solo urbano pode ter seus materiais, sejam eles naturais ou sintéticos, aleatoriamente distribuídos no espaço, muitas vezes até se fundindo perante as imagens de satélites, favorecendo erros na classificação dos materiais urbanos.

As classes naturais estabelecidas foram: (1) vegetação rala, áreas rasteiras caracterizadas por campos naturais com vegetação dispersa; (2) vegetação densa, descrita por Braga (1979) como espaços verdes com alta quantidade de biomassa e baixa iluminação abaixo do dossel; (3) corpos de água, definidos pelos diferentes espelhos de água como rios, lagos e canais; (4) solo exposto, correspondente às áreas naturais cobertas por sedimentos, onde destacam-se as areias das praias e dunas, e (5) sombra, fenômeno natural exacerbado pela verticalização da cidade. Já as classes antrópicas do solo foram divididas em: (6) teto argiloso, caracterizado por telhados cujo principal material presente é a argila; (7) teto metálico, representado por coberturas estruturais feitas de metais e seus derivados, e (8) pavimento, definido por Bernucci et al. (2008) como camadas de mistura asfálticas sobrepostas entre si a fim de suportar cargas constantes de veículos e do clima, bem como o desgaste com o tempo.

Para a classificação supervisionadas foram coletadas amostras de treinamento, correspondendo a um total de 1155 pontos, distribuídos equitativamente pela imagem de satélite da cidade de Fortaleza. Individualmente, para cada classe de uso e cobertura do solo, as unidades de pixels foram coletadas de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1 – Amostras coletadas por classe
Table 1 – Samples collected per class

Classe de uso e cobertura do solo	Pontos coletados
Corpos de Água	165
Pavimento	175
Solo Exposto	110
Sombra	130
Teto Argiloso	150
Teto Metálico	125
Vegetação Densa	150
Vegetação Rala	150

Fonte: Elaborado pelo autor.
Source: Elaborated by the author.

A classificação supervisionada, que de acordo com Ganem (2017, p. 68) é “realizada utilizando como base um conjunto de amostras de treinamento coletado pelo analista”, foi executada por meio do classificador *Random Forest* (RF). Este método, definido por Sousa et al. (2023) como um modo de aprendizagem que permite a criação computacional de modelos que trabalham com uma diversidade de elementos soberanos entre si, é comprovadamente um dos mais adequados e com maior precisão para a determinação do uso e cobertura do solo, como evidenciado na pesquisa científica Estrabis et al. (2019). Após a classificação foi calculado uma matriz de confusão e parâmetros de confiabilidade, tais quais as acurácias do produtor, consumidor e geral, bem como o índice *kappa*.

2.4 Temperatura da Superfície e NDVI

A partir da imagem classificada produzida no GEE pôde-se prosseguir com as etapas para obter como produto os dados de temperatura de superfície para a cidade de Fortaleza. Utilizando-se do GEE aplicou-se uma máscara de nuvem nas imagens dos satélites Landsat-8 e 9 a cada 16-dias, calculou-se a média mensal das bandas espectrais para o período de 2022 a 2023. As imagens da banda 10, temperatura da superfície em Kelvin, foram convertidas para Celsius. Por fim, calculou-se a média da TST (°C) para cada classe de cobertura e uso do solo e para cada uma das 12 Regionais de Fortaleza. Não foi possível calcular a TST média de cada classe para todo o município de Fortaleza, visto que o GEE possui limitação de memória para o processamento de grandes áreas, sendo necessário a divisão das análises por regionais.

A fim de avaliar a saúde da vegetação e a influência da cobertura vegetal na TST foi calculado o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI, do inglês *Normalized Difference Vegetation Index*). De acordo com Rouse et al. (1973), a folhagem verde das vegetações absorve e reflete diferentemente a depender da faixa espectral, indo do espectro visível até o infravermelho próximo. Ainda em seus estudos, os pesquisadores perceberam que a interação entre as bandas do vermelho (Red) e do infravermelho próximo (NIR) é capaz de resultar em um índice do bem-estar de áreas verdes de uma certa localidade. Logo, uma análise temporal seria fundamental para determinar o comportamento da vegetação ao longo de períodos e suas variações, sejam elas naturais ou antrópicas.

A partir dessa definição, calculou-se o NDVI (Equação 1), cujo resultado pode variar entre -1 e 1, onde quanto mais próximo de 1, melhor a condição e a densidade vegetal, e quanto mais próximo de -1, maior a presença de superfícies não vegetativas. Em geral, valores positivos retratam vegetações, sejam estas rasteiras ou densas, e valores negativos ou próximos de 0 caracterizam coberturas não-verdes, como sombra, água e solo exposto.

$$NDVI = \frac{NIR-Red}{NIR+Red} \quad (1)$$

Para a determinação do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), obteve-se imagens de satélites de alta resolução da empresa Planet correspondentes aos meses de abril e outubro de cada ano estudado, representativos dos semestres mais chuvoso e mais seco do biênio. A ação foi realizada diretamente no software QGIS v3.18, responsável pelo cálculo do índice e pela elaboração dos mapas, através de *basemaps* disponibilizados pelo *Plugin Planet Explore*.

3. Resultados e Discussão

3.1 Uso e cobertura do solo

Com o intuito de verificar a confiabilidade da classificação, foram calculados importantes parâmetros de qualidade e eficácia, como o índice *kappa* e a acurácia geral e individual para cada classe de uso e cobertura do solo (Tabela 2).

Tabela 2 – Parâmetros de eficácia
Table 2 – Efficiency parameters

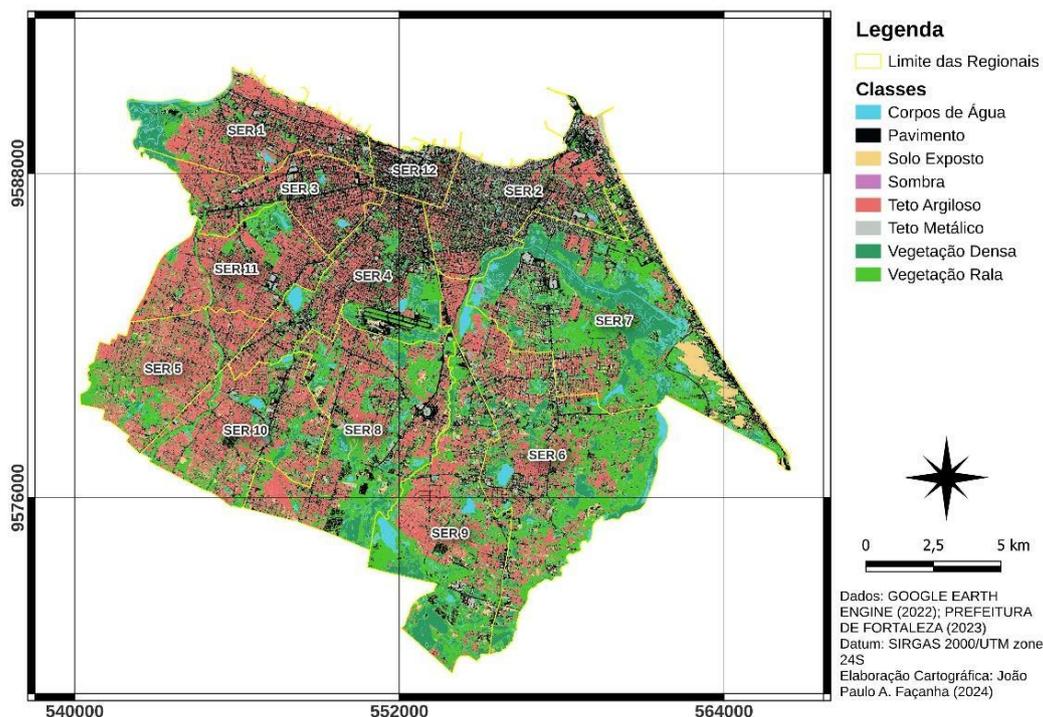
Classe de uso e cobertura do solo	Acurácia individual (%)
Corpos de Água	96,97
Pavimento	96,53
Solo Exposto	98,21
Sombra	100
Teto Argiloso	100
Teto Metálico	96,83
Vegetação Densa	97,99
Vegetação Rala	95,48
Acurácia geral (%)	Índice <i>kappa</i> (%)
97,66	97,32

Fonte: Elaborado pelo autor.
Source: Elaborated by the author.

De acordo com Thomlinson et al. (1999), em uma análise bem-sucedida de uso e cobertura de terra para qualquer classificador, o critério mínimo de acurácia geral deve ser de 85% e, por classe, tem de ser 70%. Considerando o algoritmo RF, foi obtido uma acurácia geral de 97,32%, sendo considerada alta, corroborando com a literatura.

A Figura 2 mostra a classificação do uso e cobertura do solo para o município de Fortaleza durante o mês de julho de 2022, onde as características predominantes de cada classe de estudo são indicadas por uma cor referente à sua visualização na realidade. Nessa classificação, os pixels são evidenciados a partir de uma resolução espacial de 4,77 metros.

Figura 2 – Mapa de uso e cobertura do solo do município de Fortaleza
 Figure 2 – Land cover land use map of the municipality of Fortaleza



Fonte: Elaborado pelo autor. *Software* Qgis.
 Source: Elaborated by the author. *Software* Qgis.

Este mês foi tomado como referência para todo o período, visto que no curto período compreendendo o biênio estudado, não houve alteração significativa da composição do solo fortalezense. Observa-se uma predominância de cobertura vegetal na região leste do município, em particular nas regionais SER 6, SER 7 e SER 9. A região costeira apresenta uma menor concentração de cobertura vegetal e água.

Na Tabela 3 destaca-se a distribuição geral de cada classe no município de Fortaleza. Os dados mostram que a vegetação rala cobre mais de um quarto do solo urbano, sendo a classe predominante nas áreas de várzeas dos rios e lagoas que cortam a cidade, como os rios Cocó e Ceará e a lagoa da Precabura.

Tabela 3 – Área e o percentual das classes na cidade de Fortaleza
 Table 3 – Area and the percentage of classes in the city of Fortaleza

Classe de uso do solo	Área (km ²)	Distribuição (%)
Corpos de Água	10,66	3,41
Pavimento	80,81	25,86
Solo Exposto	15,70	5,02
Sombra	1,58	0,5
Teto Argiloso	75,25	24,08
Teto Metálico	10,58	3,39
Vegetação Densa	27,85	8,91
Vegetação Rala	90,02	28,81

Fonte: Elaborado pelo autor.
Source: Elaborated by the author.

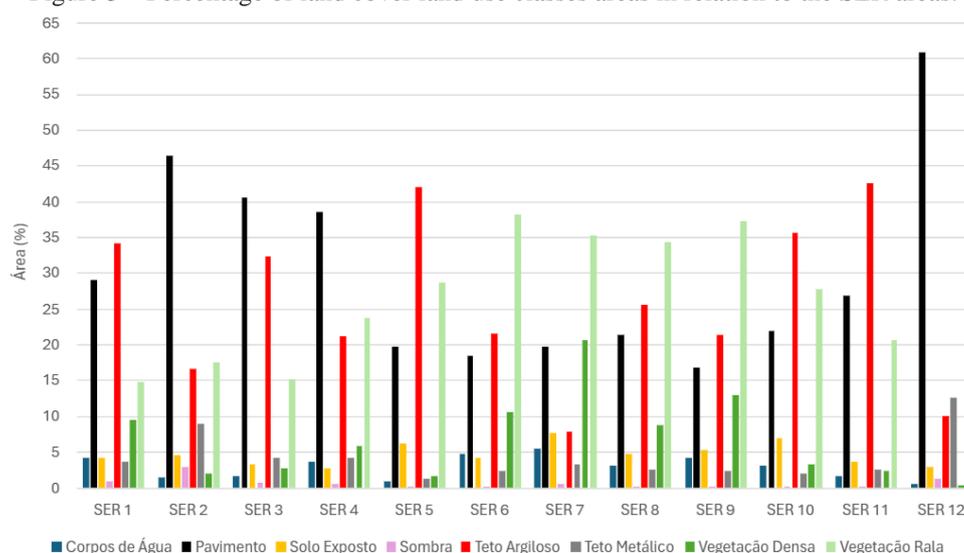
Após a classe anteriormente citada, há a predominância do pavimento, material antrópico responsável por revestir aproximadamente 25% da área total de Fortaleza, que caracteriza os caminhos que conectam as diferentes partes da cidade e sua distribuição é proveniente do crescimento econômico que Fortaleza passou nas últimas décadas, bem como da integração com os municípios da Região Metropolitana de Fortaleza (RMF). Posteriormente, em virtude da expansão urbano-populacional à Sudoeste e a conurbação com as cidades da RMF, há cada vez mais a construção de lares residenciais unifamiliares dentro dos limites de Fortaleza, fato este que contribui para a prevalência de tetos argilosos em algumas regionais, em especial àquelas localizadas nos limites com Caucaia e Maracanaú, quando comparada às outras.

A análise regional faz-se imprescindível, visto que é evidente que algumas Secretarias Executivas Regionais apresentam a dominância de uma e/ou poucas coberturas em específico, o que favorece comportamentos climáticos distintos em relação às outras. A partir disso, observa-se (Figura 2) que a SER 7 é dominada por coberturas naturais, como vegetação e cursos de água, em virtude da presença do Parque Estadual do Cocó, Unidade de Conservação que é caracterizada, na visão de Souza (2000), por apresentar diferentes tipos de composição do solo, com destaque às planícies fluvial e litorânea, áreas de mangues e dunas, respectivamente. Estas áreas necessitam de proteção integral a fim de preservar este que é um dos maiores parques urbanos brasileiros. Ademais, outra região particularizada pelo predomínio do espaço natural é a SER 1, onde fica localizada o Estuário do Rio Ceará, Área de Proteção Ambiental (APA) estadual coberta por vegetação densa e pelo curso do rio Ceará, caracterizando um manguezal que é um ecossistema fundamental para a sobrevivência e proliferação de uma infinidade de espécies que a chamam de lar ou a utilizam a fim de procriação (SEMACE, 2010). Ainda cabe mencionar, nesse sentido, as SERs 6 e 9, que apresentam grandes extensões de áreas verdes como parte de seus terrenos, compreendendo como bolsões naturais, respectivamente, a macrozona de transição entre o espaço urbano e o rural e a APA da Precabura.

Por outro lado, há regionais em que o adensamento urbano, composto de materiais antrópicos, domina a paisagem local. Nesse cenário, destacam-se a SER 12, dominada pela região central de Fortaleza, principal área comercial da cidade, onde a quase totalidade da cena natural foi retirada e substituída por asfalto e coberturas de materiais metálicos, com proeminência dos galpões e armazéns. No mesmo sentido, a SER 2, onde se localiza os bairros mais nobres da capital cearense, possui um solo marcado pela pavimentação e por telhados argilosos, representativo das comunidades marginalizadas em decorrência da constante gentrificação que ocorre na região há décadas. Além do mais, a cobertura de sombra presente na Figura 2 é dominante nessa regional, uma vez que nela a verticalização é mais presente que em outras localidades de Fortaleza, favorecendo a interceptação da luz solar e, em certa medida, o calor retido no solo desta classe. Seguindo nessa temática, nota-se que as demais regionais, compreendidas pelos bairros periféricos da cidade, apresentam uma composição do solo dominada pelas coberturas argilosas, características dos telhados das casas unifamiliares fortalezenses.

A partir desta análise visual do uso e cobertura do solo urbano em Fortaleza, a Figura 3 demonstra, em valores numéricos, a distribuição de cada classe para cada regional, evidenciando a disposição dos componentes urbanos nos territórios.

Figura 3 – Percentual das áreas das classes de uso e cobertura do solo em relação às áreas das SER
 Figure 3 – Percentage of land cover land use classes areas in relation to the SER areas:



Fonte: Elaborado pelo autor.
 Source: Elaborated by the author.

Como previamente citada, a SER 7 apresenta a maior proporção de vegetação densa em seu território dentre todas as regionais, com cerca de 20% de cobertura. Nesse mesmo sentido, a SER 6, área que apresenta uma gama de corpos hídricos e vegetais, apresenta cobertura originária relativamente dominante, com pouco menos de 50% de seu território sendo coberto por vegetação. Por outro lado, a SER 12, onde se localiza o principal polo comercial de Fortaleza, apresenta mais de 60% de seu território coberto por pavimento e menos 0,5% de vegetação densa, evidenciando a falta de espaços naturais nas dependências da regional. De outro modo, as SERs 5 e 11, onde se localizam bairros periféricos, possuem como principal uso do solo o teto argiloso, com aproximadamente 40% de cobertura, representante do alastramento da população de baixa renda à periferia da cidade. A SER 2, regional que compreende os bairros nobres da cidade, destaca-se pelo domínio de pavimento, assim como a SER 4, onde importantes vias arteriais e colaterais cortam seu território.

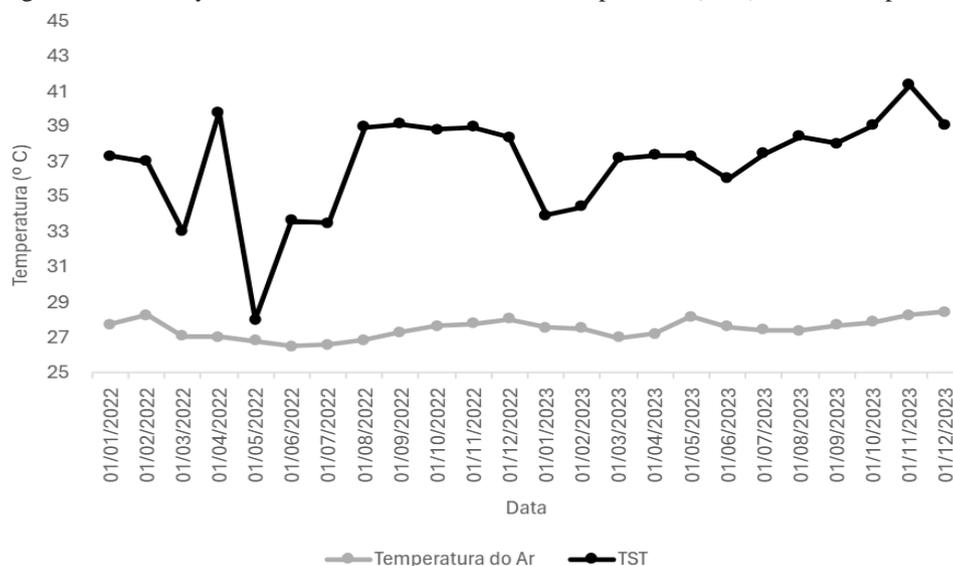
As SERs 8 e 9 contemplam espaços que ainda não há alteração antrópica em níveis elevados em razão de serem classificados como zonas de transição, onde o espaço urbano encontra o rural, tendo como consequência a dominação da classe vegetação rala. Nas SERs 1 e 3, bairros residenciais e vias que conectam Fortaleza à Caucaia caracterizam as principais classes de uso e cobertura do solo: teto argiloso e pavimento. Analogamente, a cobertura do solo da SER 10 é caracterizada por pavimento e teto argiloso, uma vez que a regional envolve bairros periféricos que experimentaram um considerável crescimento populacional e econômico nas últimas décadas em razão da proximidade com o município de Maracanaú, importante polo industrial da RMF.

3.2 Temperaturas de superfície e do ar em Fortaleza

A partir de dados mensais de temperatura média do ar provenientes de estações meteorológicas geridas pela FUNCEME pôde-se realizar uma comparação com os dados mensais de Temperatura de Superfície Terrestre (TST) obtidos por meio do processamento de imagens de satélites na plataforma GEE, a fim de verificar uma possível relação entre as variáveis. A Figura 4 demonstra o comportamento da TST e a temperatura do ar ao longo dos meses que compreendem o período analisado. A partir desses dados, atesta-se que há uma discrepância considerável ao comparar as duas medidas, uma vez que a TST é representativa de

uma visão térmica mais geral, enquanto a temperatura do ar, a dois metros acima da superfície, corresponde ao espaço onde a sensação térmica é sentida pelos seres vivos.

Figura 4 – Relação mensal entre Temperatura de Superfície Terrestre (TST) e temperatura do ar
Figure 4 – Monthly relation between Land Surface Temperature (TST) and air temperature



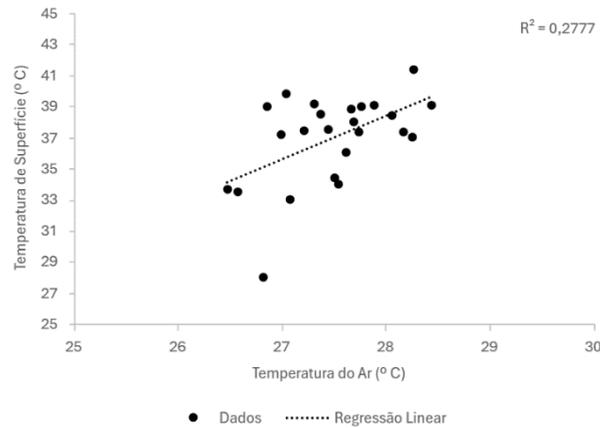
Fonte: Elaborado pelo autor. *Software* Excel.
Source: Elaborated by the author. *Software* Excel.

A TST é diretamente influenciada por fatores climáticos como o albedo, que representa a capacidade de reflectância e/ou absorção dos materiais componentes da superfície terrestre. De acordo com Giordano e Krüger (2013), o albedo apresenta uma relação direta com a temperatura da superfície, uma vez que quanto maior for o valor do albedo maior a capacidade de o material refletir a radiação, resultando em uma menor transferência de calor e produzindo menores temperaturas naquela cobertura. Por outro lado, a umidade relativa do ar e o vento são capazes de influenciar a temperatura do ar.

Observa-se que o comportamento da temperatura de superfície condiz com as variações climáticas da cidade de Fortaleza, um primeiro semestre com temperaturas mais amenas, motivados pelos altos índices de precipitação, que contrastam com o segundo semestre do ano, período com temperaturas mais estáveis, porém elevadas (Figura 4). Em relação à temperatura do ar, abaixo do dossel, a variável apresenta valores mais baixos e constantes ao longo dos meses, no entanto, com amplitudes térmicas próximas de 2° C, justamente nos meses que antecedem a pré-estação chuvosa. Ademais, observa-se que não há uma correlação direta entre a temperatura do ar e da superfície com $R^2 = 0,28$ (Figura 5).

A título de exemplo, avaliando a amplitude térmica entre os meses de março e abril do ano de 2022, os períodos mensais com os maiores volumes de precipitação, a TST varia cerca de 8° C e a temperatura do ar não apresenta variação real de temperatura. Verifica-se ainda o decréscimo de 13° C na TST e a constância da temperatura do ar nos dados dos meses de abril e maio do mesmo ano, correspondentes ao período chuvoso.

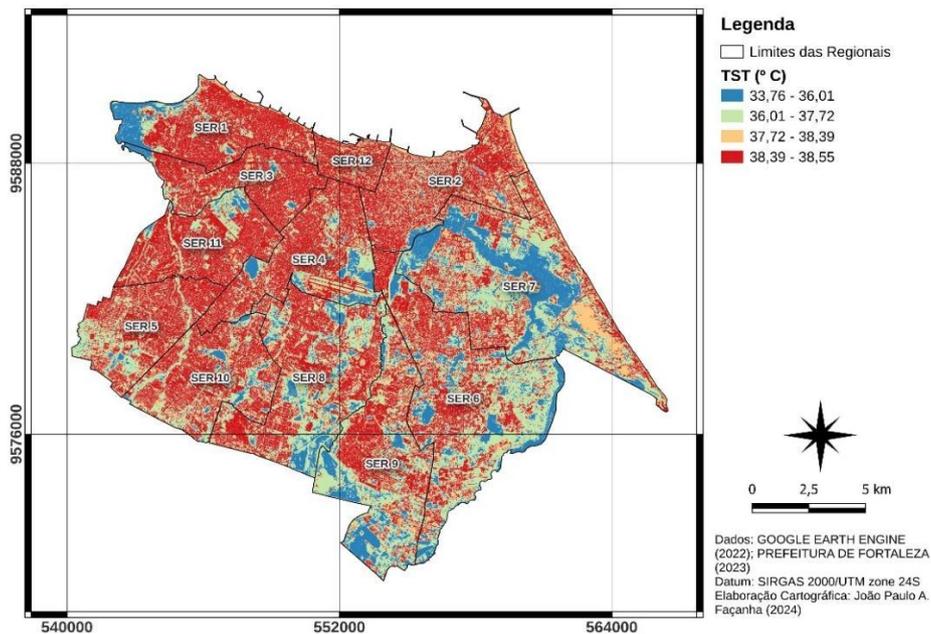
Figura 5 – Gráfico de regressão linear entre Temperatura de Superfície Terrestre (TST) e temperatura do ar
 Figure 5 – Linear regression graph between Land Surface Temperature (TST) and air temperature



Fonte: Elaborado pelo autor. *Software* Excel.
 Source: Elaborated by the author. *Software* Excel.

Como não há estações meteorológicas espalhadas por todo o município de Fortaleza, avaliou-se a relação da TST com as classes de cobertura e uso do solo, a fim de determinar quais as regiões mais quentes do município. Assim, determinou-se a média aritmética das temperaturas mensais para cada classe de uso e cobertura do solo. A partir dos dados resultados, distribui-se as temperaturas por meio do método estatístico quartil, resultando no mapa da TST média (Figura 6).

Figura 6 – Mapa da Temperatura de Superfície Terrestre (TST) média no biênio 2022/2023 em Fortaleza
 Figure 6 – Average Land Surface Temperature (TST) map in the 2022/2023 biennium in Fortaleza

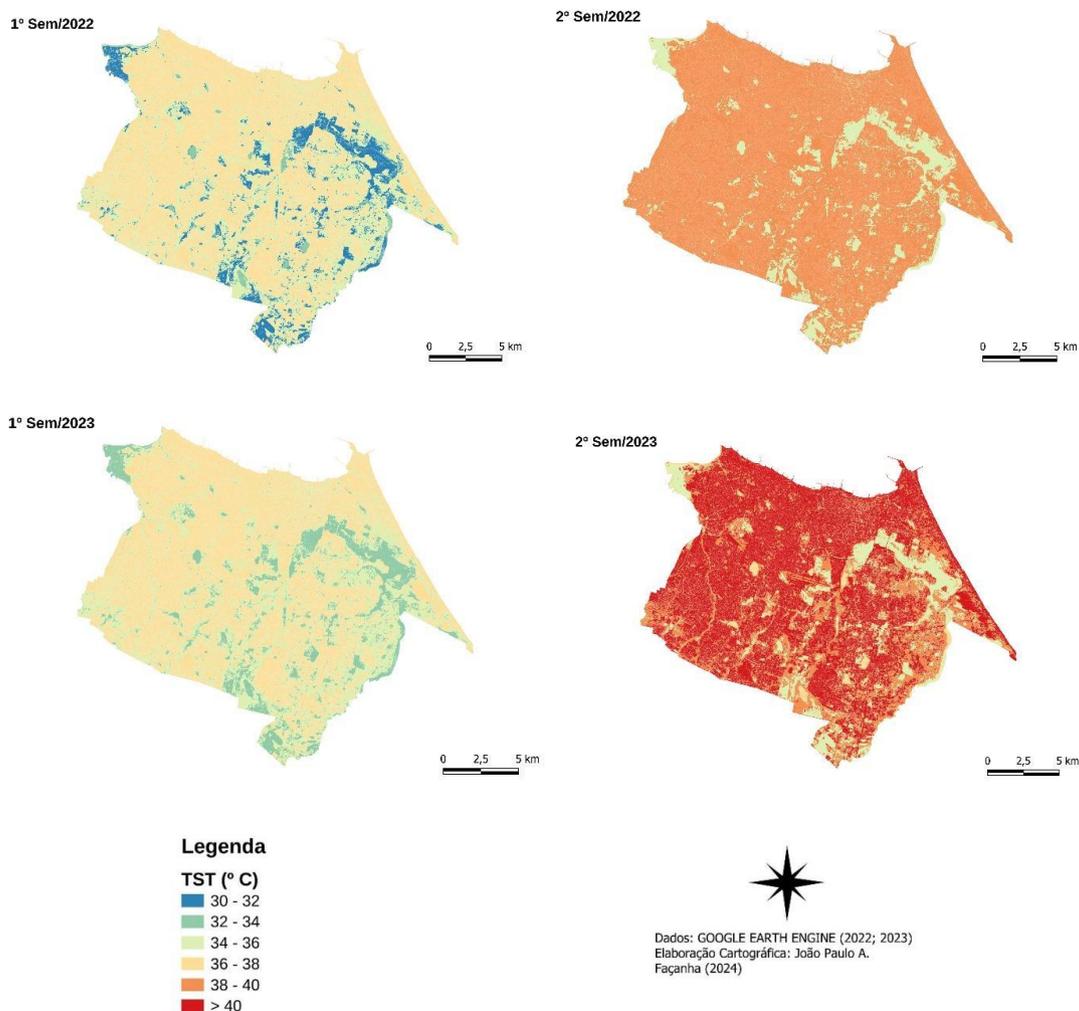


Fonte: Elaborado pelo autor. *Software* Qgis.
 Source: Elaborated by the author. *Software* Qgis.

Como exposto nas Figuras 2 e 6, observa-se que as áreas correspondentes aos espaços naturais da cidade como o Parque Estadual do Cocó, Unidade de Conservação (UC) situada na SER 7, e o Estuário do Rio Ceará, Área de Proteção Ambiental (APA) localizado na SER 1, atuam como refrigeradores térmicos na cidade de Fortaleza. Tal conclusão é determinada visto que as áreas de classes com alterações antrópicas, com destaque ao pavimento e aos telhados argilosos e metálicos, apresentam temperaturas médias até 5° C maiores do que as regiões com cobertura natural. Assim, a relação entre as variáveis uso da terra e temperatura de superfície é incontestavelmente perceptível. Enquanto as zonas com predomínio de adensamento urbano são caracterizadas por uma temperatura média entorno de 38 °C, os territórios naturais apontam uma temperatura média ao redor de 33 °C.

Nos mapas presentes na figura 7 observa-se a distribuição das temperaturas médias por semestre do período de estudo. Utilizando de uma graduação de cores para determinar os valores da TST, variando do azul (mais frio) ao vermelho (mais quente), foi possível propor uma representação adequada do comportamento e variação da temperatura ao longo do tempo.

Figura 7 – Mapas de Temperatura de Superfície Terrestre (TST) semestrais
 Figure 7 – Semi-annual Land Surface Temperature (TST) maps



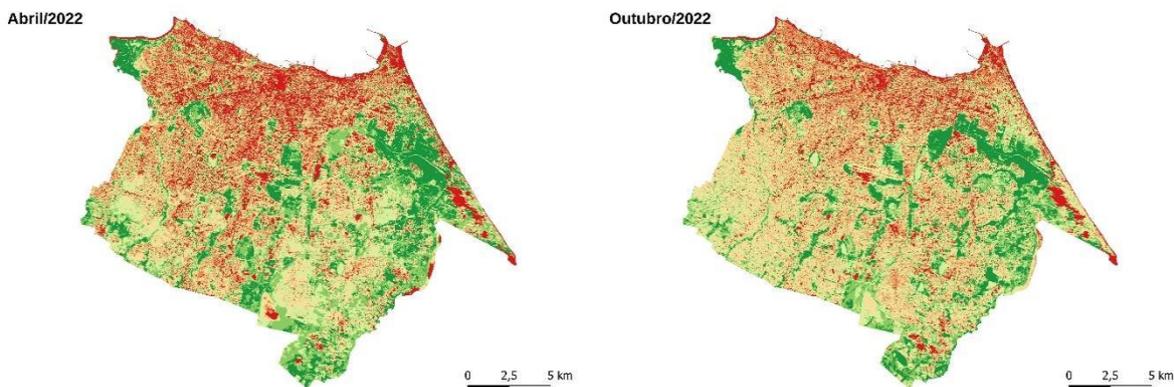
Fonte: Elaborado pelo autor. *Software* Qgis.
 Source: Elaborated by the author. *Software* Qgis.

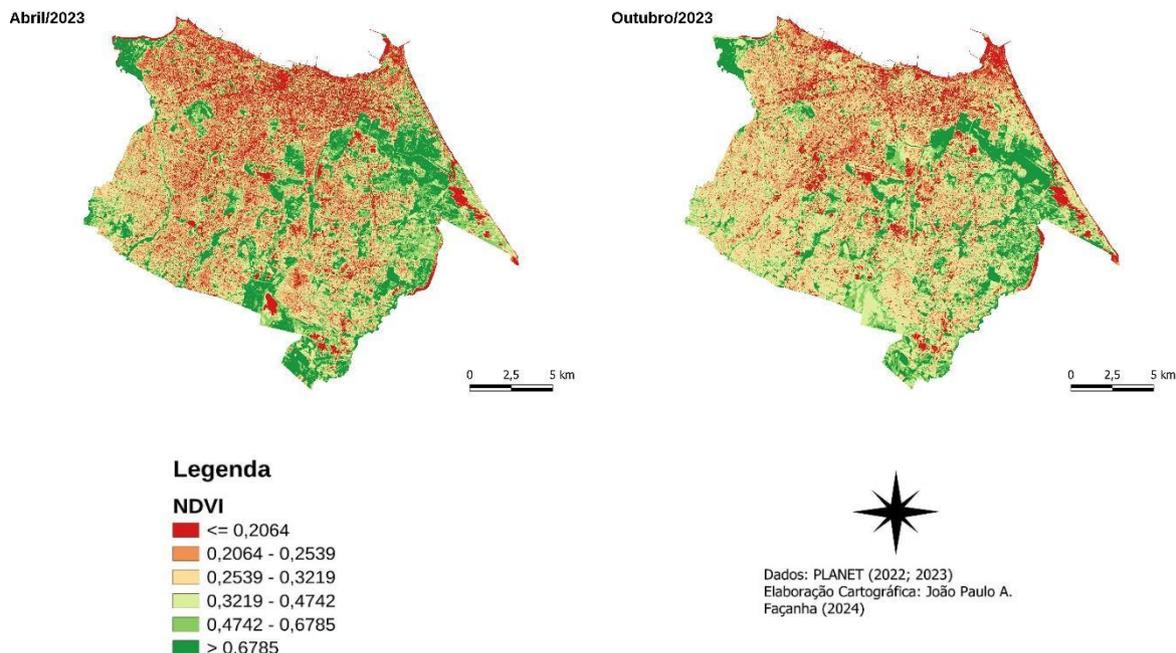
A partir da Figura 7 percebe-se um comportamento térmico já determinado, primeiro semestre do ano com temperaturas mais amenas, variando dos 30° C nas classes de coberturas naturais a 38° C nas classes antrópicas, e um segundo semestre com temperatura mais elevadas, oscilando entre 34° C nas classes naturais e mais de 40° C nas classes antrópicas. No entanto, os dados atestam que no segundo semestre do ano de 2023 houve um aumento considerável da TST, tanto comparado ao semestre passado quanto ao mesmo período do ano anterior. Isto pode ser explicado pela ocorrência do fenômeno climático El Niño (Nature, 2023), que ocasiona um aquecimento substancial das águas do oceano Pacífico e tem como consequências ao Nordeste brasileiro, de acordo com Melo (1999), períodos sem chuva prolongados, que, ao se relacionar com a seca costumeira da região, favorece temperaturas mais elevadas que o normal, sendo consideravelmente prejudicial às formas de vida.

Corroborando com a análise, observa-se o estudo desenvolvido por Barboza et al. (2020), onde os pesquisadores, examinando a influência das classes urbanas com a temperatura de superfície, verificaram que no período de 3 anos, entre 2013 e 2016, houve um aumento da TST média em toda a cidade de Fortaleza. Em ambos os períodos constataram uma amplitude térmica de 6 °C entre as classes antrópicas e as classes naturais. Ademais, os autores da pesquisa perceberam um deslocamento do calor, acompanhando o avanço da ocupação de Fortaleza à periferia Sul e Sudoeste. Este fato foi atestado através da diferença térmica entre os dados de 2013 e 2023, em que as regiões periféricas apresentaram maior aumento de temperatura comparadas às regiões de áreas vegetadas.

Através da análise do NDVI (Figura 8), responsável pela determinação da saúde de áreas verdes, conclui-se o bem-estar da vegetação nos principais resquícios de mata nativa na capital cearense. Destaca-se o Parque Estadual do Cocó, o Estuário do Rio Ceará e a Lagoa da Precabura, uma vez que o NDVI dos mesmos se manteve relativamente constante e elevado ao longo do período de estudo (variando em um intervalo entre 0,6 e 0,9), demonstrando uma vegetação saudável, mesmo em períodos de seca.

Figura 8 – Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) em Fortaleza
Figure 8 – Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) in Fortaleza





Fonte: Elaborado pelo autor. *Software* Qgis.
Source: Elaborated by the author. *Software* Qgis.

Motivada pela estiagem, bem como por outros fatores climáticos excepcionais ao segundo semestre do último ano, houve uma diminuição da cobertura de vegetação moderadamente sadia, com valores de NDVI variando entre 0,3 e 0,6. A exemplo da região do Campus do Pici da Universidade Federal do Ceará (UFC) e nas coberturas vegetais que traçam os limites entre a cidade de Fortaleza e os municípios da região metropolitana, tal como em parques municipais verdes espalhados pela extensão da cidade.

Ademais, a malha urbana, corpos de água e solos expostos destacam-se por apresentarem os menores valores do índice, independentemente de fatores climáticos, uma vez que o NDVI é caracterizado pela demonstração do nível de saúde de áreas verdes, logo os valores baixos e, em alguns casos, até negativo, demonstram uma boa representação do índice nessas classes não-vegetais de uso e cobertura do solo. Assim, salienta-se a região das Dunas da Sabiaguaba, responsável pela proteção de espécies endêmicas e pelo freio ao aquecimento térmico na cidade, as porções Norte, Nordeste e Noroeste de Fortaleza – áreas de grande adensamento urbano, com extensa malha viária e marcada pela ausência de bolsões de áreas naturais –, e o corpos hídricos, como os lagos, canais e rios que cruzam a cidade até desaguar no oceano.

4. Conclusão

A partir das análises feitas e dos resultados obtidos percebe-se que existe uma relação direta entre o uso do solo e a temperatura de superfície. Em classes caracterizadas por um adensamento de alterações antrópicas sobre a cobertura natural, a temperatura atinge valores acima de 38° C, diferentemente das classes naturais cujas temperaturas variaram em torno de 33° C. Tal amplitude térmica gera o fenômeno das ilhas de calor em diversas localidades da cidade de Fortaleza, uma vez que a distribuição espacial de determinadas classes é desigual e concentradas em alguns pontos do município. As regionais 2 e 12, densos polos comerciais e habitacionais, sofrem com elevadas temperaturas, uma vez que a ausência de bolsões verdes é evidente e há uma alta densidade de pavimento e concreto. Por outro lado, as regionais 7 e 9 contrastam às previamente

mencionadas pelo fato de conterem, dentro de seus limites, importantes corpos vegetais que atuam de modo a balancear a temperatura nas localidades.

Tem-se, portanto, a importância dos espaços naturais, com destaque para as vegetações e os corpos de água, como mitigadores de desconfortos térmicos na cidade de Fortaleza. Assim, fica a cargo das autoridades públicas, por meio do Plano Diretor Municipal, desenvolverem projetos que protejam as áreas naturais da cidade e promovam uma ocupação ordenada do solo urbano, favorecendo a construção de parques e moradias coletivas, visando conter a expansão desordenada da malha urbana com materiais nocivos ao bem-estar climático em Fortaleza, bem como a oferta de lares confortáveis e em zonas seguras para a população em situação de vulnerabilidade.

No que tange a oferta de moradia à população vulnerável, cabe ao governo municipal aproveitar as estruturas existentes e fazer valer a função social da habitação, instrumento constitucional que determina o papel desempenhado pelas habitações para a sociedade, coibindo a mercantilização exacerbada de um direito humano. Partindo disso, urge-se à prefeitura de Fortaleza ações de modo a oferecer as edificações vazias e a infraestrutura subutilizada, a exemplo de prédios vazios no centro da cidade, através do processo arquitetônico de *retrofit* – revitalização de construções degradadas – para aqueles que necessitam, contribuindo assim com a renovação de regiões degeneradas da capital cearense e combatendo práticas de periferização dos habitantes de baixa renda. Isto, em conjunto com o desenvolvimento de áreas verdes e abertas, terá como consequências: a democratização do direito à cidade e a amenização dos efeitos da temperatura média nos espaços afetados.

Em relação à cobertura vegetal de Fortaleza, através da comparação entre a temperatura de superfície, independentemente do período analisado, e o índice de vegetação, tem-se o fortalecimento da importância de preservar os espaços verdes e áreas de proteção ambiental, uma vez que estes atuam de modo a contornar a mazela das ilhas de calor, que persistem motivadas pela ânsia dos setores imobiliários e industriais em auferir lucro, avançando seus empreendimentos sobre os bolsões de áreas conservadas, para uma pequena classe detentora de capital enquanto a maior parte da população da cidade sofre e sofrerá, caso se mantenha o status quo, com os efeitos das crises climáticas.

5. Agradecimentos

O autor agradece à Universidade Federal do Ceará pela concessão da bolsa de Iniciação Acadêmica, fundamental no aporte financeiro que permitiu o desenvolvimento desta pesquisa. Agradecimentos ao Laboratório de Geomática Aplicada (LAG) por disponibilizar o espaço e os instrumentos técnicos necessários ao estudo.

6. Referências

Alves, E. D. L., & Vecchia, F. A. S. (2012). Influência de diferentes superfícies na temperatura e no fluxo de energia: um ensaio experimental Influence of different surfaces on the temperature and energy flux: an experimental trial. **Ambiência**, 8(1), 101-111.

BARBOZA, Eliezio Nascimento; NETO, Francisco das Chagas Bezerra; CAIANA, Clarice Ribeiro Alves. Geoprocessamento aplicado na análise dos efeitos da urbanização no campo térmico em Fortaleza, Ceará. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 7, p. e57973731-e57973731, 2020.

Barros, H. R., & Lombardo, M. A. (2016). A ilha de calor urbana e o uso e cobertura do solo em São Paulo-SP. **GEOUSP Espaço e Tempo (Online)**, 20(1), 160-177.

Bernucci, L. L. B., Motta, L. M. G. D., Ceratti, J. A. P., & Soares, J. B. (2008). Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros.

Bias, E. D. S., Baptista, G. D. M., & LOMBARDO, M. A. (2003). Análise do fenômeno de ilhas de calor urbanas, por meio da combinação de dados Landsat e Ikonos. **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, 11, 1741-1748.

Braga, P. I. S. (1979). Subdivisão fitogeográfica, tipos de vegetação, conservação e inventário florístico da floresta amazônica. **Acta amazonica**, 9, 53-80.

de Oliveira Moura, M. (2008). O CLIMA URBANO DE FORTALEZA SOB O NÍVEL DO CAMPO TÉRMICO. **Mercator-Revista de Geografia da UFC**, 7(13), 156.

de Melo, J. C. (1999). O fenômeno El Niño e as secas no Nordeste do Brasil. **Raízes: Revista de Ciências Sociais e Econômicas**, (20), 13-21.

ESTRABIS, Nayara Vasconcelos; MARCATO JUNIOR, J.; PISTORI, Hemerson. Mapeamento da Vegetação Nativa do Cerrado na Região de Três Lagoas-MS com o Google Earth Engine. **Revista Brasileira de Cartografia [Online]**, v. 71, p. 702-725, 2019.

FUNCEME – FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS. Projetos e Mapas. Mapa de Climatologia do Estado do Ceará Período 1981 a 2010. Disponível em: <www.funceme.br/wp-content/uploads/2019/02/14-Mapa_CE_Climatologia_A2.pdf>. Acesso em: 16 de jan. 2024.

GANEM, Khalil Ali. Classificação da Cobertura do Solo na Caatinga a partir de imagens Do Landsat-8 e da ferramenta Google Earth Engine: uma comparação entre dados com e sem correção atmosférica. 2017.

Giordano, D. E., & Krüger, E. (2014). Potencial de redução da temperatura de superfície pelo aumento do albedo nas diversas regiões brasileiras. **Paranoá**, 7(11), 1-22.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Cidades e Estados. Panorama (2022). Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ce/fortaleza/panorama>>. Acesso em: 16 de jan. 2024.

Jensen, J. R., & Epiphanyo, J. C. N. (2009). Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres.

Kloog, I., Nordio, F., Coull, B. A., & Schwartz, J. (2014). Predicting spatiotemporal mean air temperature using MODIS satellite surface temperature measurements across the Northeastern USA. **Remote sensing of environment**, 150, 132-139.

Kottmeier, C., Biegert, C., & Corsmeier, U. (2007). Effects of urban land use on surface temperature in Berlin: Case study. **Journal of urban planning and development**, 133(2), 128-137.

Magalhães, G. B., & Zanella, M. E. (2011). COMPORTAMENTO CLIMÁTICO DA REGIÃO METROPOLITANA DE FORTALEZA (dynamics of climate of Metropolitan Region of Fortaleza). **Mercator**, 10(23), 129-a.

Martilli, A., Roth, M., & Chow, W. T. (2020). Summer average urban-rural surface temperature differences

do not indicate the need for urban heat reduction.

Naserikia, M., Hart, M. A., Nazarian, N., Bechtel, B., Lipson, M., & Nice, K. A. (2023). Land surface and air temperature dynamics: The role of urban form and seasonality. **Science of The Total Environment**, *905*, 167306.

Pagnossin, E. M., Buriol, G. A., & de Araujo Gracioli, M. (2001). Influência dos elementos meteorológicos no conforto térmico humano: bases biofísicas. **Disciplinarum Scientia| Saúde**, *2*(1), 149-161.

PREFEITURA DE FORTALEZA. Fortaleza em Mapas. Disponível em: <<https://mapas.fortaleza.ce.gov.br>>. Acesso em: 16 de jan. 2024.

Romero, M. A. B. (2013). *Princípios bioclimáticos para o desenho urbano*. SciELO-Editora UnB.

Rouse Jr, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1973). *Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation* (No. NASA-CR-132982).

SEMACE. **Área de Proteção Ambiental do Estuário do Rio Ceará**. Disponível em: <<https://www.semace.ce.gov.br/2010/12/08/area-de-protecao-ambiental-do-estuario-do-rio-ceara/>>. Acesso em: 15 de fev. 2024.

Sousa, J. H. S. D., Ribeiro, G. D. N., Francisco, P. R. M., Moraes, J. M. D., & Nedeiros, P. D. C. (2023). Classificação do uso e cobertura da terra da bacia hidrográfica do Rio Sucuru utilizando o Google Earth Engine e aplicação do algoritmo Random Forest.

Souza, J. F. D., Silva, R. M., & Silva, A. M. (2016). Influência do uso e ocupação do solo na temperatura da superfície: o estudo de caso de João Pessoa-PB. **Ambiente Construído**, *16*, 21-37.

Souza, M. D. (2000). Bases naturais e esboço do zoneamento geoambiental do estado do Ceará. **Compartimentação territorial e gestão regional do Ceará**. Fortaleza: FUNECE, 13-98.

Thomlinson, J. R., Bolstad, P. V., & Cohen, W. B. (1999). Coordinating methodologies for scaling landcover classifications from site-specific to global: Steps toward validating global map products. **Remote Sensing of Environment**, *70*(1), 16-28.

Witze, Alexandra. **El Niño is here – how bad will it be?** NATURE, 2023. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/d41586-023-02122-6>>. Acesso em: 15 de fev. 2024.