

# 41 ANOS DO SATÉLITE LANDSAT TERMAL E A SUA CONTRIBUIÇÃO NO ESTUDO DA ILHA DE CALOR URBANA DE SUPERFÍCIE (ICUS) NA REGIÃO METROPOLITANA DO RIO DE JANEIRO (RMRJ)

Andrews Lucena

*Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro*

Vitor Fonseca Vieira Vasconcelos de Miranda

*Universitat de Valencia*

Liz Barreto Coelho Belém

*Universidade Federal do Rio de Janeiro*

Randy Rodrigo Gonçalves Santos

*Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro*

## RESUMO

Este trabalho apresenta a contribuição do satélite Landsat termal, desde a sua origem, em 1984, no estudo da Ilha de calor Urbana de Superfície (ICUS) na Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ). O objetivo é mapear a Ilha de calor urbana de superfície (ICUS) por meio da Temperatura da Superfície Continental (TSC), oriunda das bandas termais do satélite Landsat, e da cobertura vegetal por meio do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), conforme as estações do ano. Os resultados mostram que a RMRJ é um espaço favorável à ocorrência da ilha de calor urbana, espacialmente polinucleada, uma vez que a complexidade de espaços e usos da terra/ solo na metrópole oferece uma diversidade de núcleos, seja na Área Central, Zona Norte e Zona Oeste da capital ou nas entradas urbanas da Baixa Fluminense e Leste metropolitano, com diferentes magnitudes de temperatura. Este fato sugere um conceito mais adequado ao fenômeno do clima urbano nas metrópoles: a Ilha de Calor Metropolitana (de superfície).

**Palavras-chave:** Satélites Landsat; ilha de calor urbana de superfície; Região Metropolitana do Rio de Janeiro.

## ABSTRACT

This study examines the contribution of the Landsat thermal satellite, since its launch in 1984, to research on the Surface Urban Heat Island (SUHI) in the Metropolitan Region of Rio de Janeiro (MRRJ). The main objective is to map the SUHI using Land Surface Temperature (LST), derived from Landsat thermal bands, alongside vegetation cover, assessed through the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), across different seasons of the year. The findings indicate that the MRRJ provides favorable conditions for the occurrence of urban heat islands, characterized by a multinucleated spatial pattern. This is largely due to the complexity of land uses and urban structures within the metropolis, which generate diverse thermal nuclei—whether in the Central Area, the North and West Zones of the capital, or in the urbanized areas of the Baixada Fluminense and the eastern metropolitan region—each displaying distinct temperature magnitudes. These results point to the need for a more comprehensive concept of urban climate phenomena in large metropolitan areas: the Metropolitan Surface Heat Island.

**Key words:** Landsat satellites; surface urban heat island; Metropolitan Region of Rio de Janeiro.

## INTRODUÇÃO

**A**s cidades são cenários de intensas alterações ambientais, de diversas origens, e geram impactos expressivos no espaço geográfico. Tais impactos configuram-se como problemas, que afetam todas as formas de vida, seja humana, animal ou vegetal. A diversidade dos problemas ambientais é evidente nas cidades, com destaque para as grandes cidades e metrópoles, que transformam e ressignificam a paisagem. As cidades, de diferentes grandezas e magnitudes, desempenham um papel central na questão ambiental atual e consequentemente pelo interesse, com um misto de apreensão e urgência, aos temas relacionados às mudanças climáticas.

O clima urbano é uma das derivações ambientais do sistema ambiental físico, e faz parte do ecossistema urbano, formado pela biosfera, hidrosfera, litosfera/pedosfera urbanas e pelo ambiente construído (Oke *et al.*, 2017), sendo uma combinação de todas as alterações nos parâmetros e fenômenos atmosféricos gerados, bem como nos processos modificados pelas cidades. A complexidade das formas (a rugosidade e propriedades dos terrenos, ruas e espaços construídos etc.) e funções urbanas (uso do solo, fluxo de veículos, atividades industriais etc.) afetam, transformam e regulam a química e a física da atmosfera, i.e. a dinâmica do vento e os balanços/saldos de radiação, energia, água e carbono na atmosfera.

Neste contexto, a ciência do clima urbano se concentra na descrição e análise dos efeitos urbanos nos fluxos atmosféricos, i.e. massa, momentum, radiação, energia, calor, umidade, nebulosidade, precipitação e na poluição atmosférica (emissão, dispersão, transporte, dissipação e transformação).

A escola Monteriana, de Carlos Augusto Figueiredo Monteiro (Monteiro, 1976) que inaugura e consolida o estudo do clima urbano na Geografia do Brasil, sintetiza a descrição e análise dos efeitos urbanos na atmosfera da cidade a partir dos “canais de percepção do Sistema Clima Urbano (SCU)”, organizados em três subsistemas: termodinâmico, físico-químico e hidrometeorológico. O canal termodinâmico engloba os aspectos da temperatura e tem como principal produto a ilha de calor urbana (ICU); o segundo canal foca nas transformações relacionadas à química da atmosfera, sendo a poluição do ar seu produto principal; o terceiro canal explora as chuvas urbanas e seus impactos no espaço geográfico. Acerca do panorama nacional das pesquisas em Clima Urbano na década de 2012-2022 há predominância do subsistema termodinâmico, com mais de 90% das investigações (Silva, Amorim e Castelhano, 2024).

Entendemos que a ilha de calor urbana é a expressão máxima do clima urbano nas cidades e áreas metropolitanas, estímulo para a escrita deste artigo, mas antecedido por trabalhos anteriores para a cidade do Rio de Janeiro e a sua região metropolitana (Lucena e Peres, 2012; Lucena *et al.*, 2013; Carvalho *et al.*, 2018; Peres *et al.*, 2018; Miranda *et al.*, 2022; França *et al.*, 2024). A ilha de calor urbana representa a espacialidade das anomalias de temperatura nos espaços complexos das áreas metropolitanas, expõe as disfunções térmicas da atmosfera na paisagem da urbe e reverbera em estudos e análises conjugadas a outros subsistemas do clima urbano, como o físico-químico (Zhong *et al.*, 2015) e o hidrometeorológico (Dixon e Mote, 2003).

A abrangência do estudo da ilha de calor urbana nas grandes cidades e regiões metropolitanas do Brasil, consultado em periódicos, é ampla, assim como em outras metrópoles mundiais.

No Brasil, sem esgotar todas as capitais e regiões metropolitanas, citamos em ordem de tamanho demográfico, além do Rio de Janeiro, contemplado exclusivamente no parágrafo anterior, inúmeros trabalhos nesta última década: São Paulo (Barros e Lombardo, 2016; Almeida e Ribeiro, 2024); São Paulo e Rio de Janeiro conjugados (Pereira Filho e Karan, 2016); Recife (Nóbrega e Dubreuil, 2022); Salvador (Ferreira, Oliveira e Estevam, 2021); Curitiba (Krüger e Rossi, 2015); Manaus (Corrêa et al., 2016); Vitória (Correa et. al., 2022) e Florianópolis (Rocha, Debret e Mendonça, 2021).

Um destaque ao trabalho de Patriota et al., (2024) que analisou a influência da urbanização na expansão das intensidades de ilhas de calor urbanas de superfície (IICUSs) e a variabilidade de outros cinco parâmetros biofísicos (Índice de Vegetação Aprimorado; albedo de superfície; crescimento de área urbana; radiação líquida de superfície e evapotranspiração real) em vinte e uma regiões metropolitanas brasileiras (RMs), de 2003 a 2022. As RMs foram divididas entre os cinco biomas do Brasil, a saber: Amazônia, Caatinga, Cerrado, Floresta Atlântica e Pampa. Foram usados dados de temperatura da superfície continental (TSC) do sensor MODIS para quantificar as IICUSs diurnas e noturnas. Quanto às IICUSs, todas as RMs estão sujeitas aos seus efeitos, variando de 0,08°C (João Pessoa) a 6,1°C (Manaus) durante o dia. À noite, os valores estavam entre -0,24°C (Florianópolis) e 2,71°C (Manaus e Recife). O teste de MannKendall destaca as tendências de crescimento em dezessete RMs, das quais nove exibem tendências de crescimento estatisticamente significativas, duas localizadas na Amazônia (Belém e São Luís) e sete na Mata Atlântica (Recife, João Pessoa, Salvador, Vitória, Santos, Curitiba e Florianópolis). No geral, o valor médio de IICUSs durante o dia foi de 1,64°C, 60% superior quando comparado às estimativas noturnas. As análises da tendência diurna da IICUSs revelaram que as maiores e menores taxas de crescimento foram observadas nas RMs de Belém/Recife (0,05°C/ano) e Maceió (0,01°C/ano), respectivamente. A análise noturna apresentou taxas positivas em onze RMs, das quais três no bioma Mata Atlântica exibiram tendências estatisticamente significativas (João Pessoa, Salvador e Campinas). Os maiores e menores níveis noturno foram observados em Salvador (0,02°C/ano) e João Pessoa (0,01°C/ano), respectivamente. Sem esgotar a análise do artigo, muito robusto, as RMs no bioma Amazônia exibiram as maiores médias históricas para as IICUSs diurnas (3,69°C), principalmente influenciadas pelo cenário observado em Manaus, com média de 5,18°C. O segundo bioma proeminente foi a Mata Atlântica (2,62°C), seguido pela Caatinga (2,47°C), Cerrado (2,42°C) e Pampa (2,38°C). Durante o período noturno, as magnitudes das IICUSs foram observadas nos seguintes biomas, em ordem decrescente: Caatinga (1,52°C), Amazônia (1,33°C), Mata Atlântica (1,04°C), Cerrado (0,99°C) e Pampa (0,83°C). Na escala do país, os resultados demonstram que os gradientes latitudinais e demográficos parecem ser de grande importância ao explicar o desenvolvimento das IICUSs. Em contraste, a ausência de uma influência direta da continentalidade e densidade populacional sugere que o tamanho da área urbana e a densidade de construção, combinadas com uma redução do resfriamento evaporativo e alteração do albedo, podem desempenhar um papel importante na escala metropolitana.

Dentre as cidades e metrópoles mundiais de grande envergadura quanto ao tamanho da sua população e complexidade de suas urbes, destacamos: Déli/Índia, (Budhiraja, Agrawal e Pathak, 2020); Beijing/China (Chen et al., 2020); Cidade do México/México (Mendez-Astudillo, Caetano e Pereyra-Castro, 2022); Cairo/Egito e Roma/Itália (Aboulnaga et al., 2024); Lagos/Nigéria (Bassett et al., 2020); Istambul/Turquia (Ünal et. al., 2020); Paris/França (Johannsen, Soares e Langendijk,

2024); Osaka/Japão (Zheng *et al.*, 2022); Bogotá/Colômbia (Ramírez-Aguilar e Souza, 2019); Nova York e Nova Jersey/EUA (Yin *et al.*, 2023); Melbourne/Australia (Wai *et al.*, 2022).

Gonzalez-Trevizo *et al.*, (2021) apresentam uma visão geral das tendências de pesquisa dos impactos ambientais, energéticos e de vulnerabilidade oriundos das Ilhas de Calor Urbanas. Trata-se de uma revisão para identificar e caracterizar os impactos dos campos urbanos, lideranças globais, estratégias de mitigação, índices de sensoriamento remoto, entre outros aspectos no contexto da degradação ambiental e energia. Os resultados mostraram que os estudos foram realizados em 37 países e 92 cidades, principalmente na América do Norte (33%), Europa (31%) e Ásia (27%), concentrados em cinco países (59%), na seguinte ordem: EUA, Grécia, Itália, China e Canadá. Os tópicos predominantes são o estudo da degradação da qualidade ambiental urbana (95%) e a demanda de energia (25%). É fato também que há demandas dos diferentes tipos de climas e que a tendência demográfica projetada para 2050 estima que as regiões com maior crescimento urbano serão Ásia, África e América Latina, e é nessas duas últimas que a pesquisa relatada em editoras de prestígio é pequena.

Finalmente, mas sem esgotar o tema quanto à revisão dos estudos internacionais, duas referências para estudos da ilha de calor urbana para a América latina mostram um pouco da realidade regional. Sarricolea e Meseguer-Ruiz (2019) revisitam a literatura das oito maiores cidades da América Latina e as diferenças e semelhanças entre elas e seus climas urbanos. Os autores concluíram que as intensidades das ilhas de calor variam entre 3°C e 8°C, e a densidade populacional e a latitude oferecem explicações parciais para essas diferenças entre temperaturas urbanas e não urbanas. Palme (2021) faz uma revisão do estado da arte em cidades de clima tropical latina colocando em evidência que tipo de métodos são usados para determinar as intensidades de UHI, quais impactos são pesquisados e quais estratégias de mitigação são propostas para as cidades latino-americanas.

O conceito e o monitoramento da ilha de calor urbana foram aprimorados ao longo da sua história. Inicialmente, o conceito estava restrito a comparação entre a temperatura da cidade e entornos (áreas não urbanizadas ou rurais), onde na primeira as isotermas (as linhas de igual valor de temperatura) são mais altas, assim o solo é mais aquecido e, portanto, ali estava a ilha de calor (urbana). As causas da ilha de calor urbana são as mudanças (e agressivas) que o espaço urbano exerce no balanço de energia do espaço “pré-urbano”, no qual a cidade é construída. Aquela conceito ainda é atual, mas existem vários tipos de ICU, cada um dos quais é temporalmente e espacialmente dinâmico, o que a torna metodologicamente complexa de estudar (Oke *et al.*, 2017). Estes autores sugerem quatro tipologias para a Ilha de Calor Urbana, a saber: a Ilha de calor urbana subterrânea ( $ICU_{Sub}$ ); a Ilha de calor urbana superficial – ou de superfície ( $ICU_{Sup}$ ); a Ilha de calor urbana da camada do dossel ( $ICU_{CDU}$ ) e a Ilha de calor urbana da camada limite ( $ICU_{CLU}$ ). Esses tipos surgem de diferenças nas taxas de resfriamento e aquecimento entre o urbano e o rural na superfície, no substrato e no ar.

Neste contexto, entende-se que o conceito de ilha de calor urbana, que compara o campo térmico do espaço urbano com o de espaços rurais e identifica temperaturas mais elevadas no núcleo urbano, é considerado válido, mas limitado, principalmente quando se trata de espaços urbanos extensos e complexos, como de áreas metropolitanas, especialmente aquelas localizadas nos países periféricos, como na América latina, África e sudeste asiático. A escala metropolitana destes continentes, que pontualmente pode ser observada em regiões de países centrais, como

Europa e América do Norte, revela espaços muito alterados ou transformados, e por vezes até “confusos” quanto a sua paisagem urbana, uma vez que muitas áreas não atravessaram do rural para o urbano em definitivo, resultando em uma mescla dos espaços rurais (não necessariamente de uso rural) com elementos típicos do ambiente urbano, i.e. com ruas, avenidas, calçadas, edificações de diversas naturezas, intenso trânsito entre outros usos típicos da complexidades da urbe.

É importante destacar que os resquícios do rural e/ou do substrato de paisagem natural sobre o qual a cidade foi, e está sendo construída, não se aplica para as áreas ou espaços verdes existentes, seja os cunhados ou remanescentes na cidade, pois estes constituem usos urbanos, e são extremamente valorizados, seja tanto na especulação imobiliária, quanto no seu papel na regulação térmica. Para uma discussão aprofundada sobre essa realidade paisagística complexa entre o urbano e o rural na metrópole, bem como a complexidade da definição dos seus usos, o trabalho de Lucena (2012) explora com detalhes, e expõe os diversos usos e contrastes ao abordar os conceitos da Geografia urbana, como periferia, periurbano e autoconstrução, aplicados à realidade da região metropolitana do Rio de Janeiro, e que ajudam na compreensão da diversidade complexa de uma metrópole na periferia do Sul global.

Para os espaços metropolitanos, considerando o método das observações de campo, o sensoriamento remoto é uma técnica valiosa, pois é uma observação independente, de baixo custo e com melhor cobertura espacial do que um dado in-situ. Podemos destacar o monitoramento da Ilha de calor urbana de superfície ou mesmo a Ilha de calor urbana da camada limite, ambas com as devidas adaptações, uma vez que a última tem sua classificação definida para a observação da temperatura do ar, e não da superfície (Oke et al., 2017). Como inicialmente a observação por sensoriamento remoto esteve voltada para a identificação da ilha de calor urbana, i.e. em função de “cânions urbanos” formados pelas fileiras de edificações em ruas e avenidas, a Ilha de calor urbana da camada limite, acaba por abranger uma área maior, compreendendo tanto a micro (i.e. fenômenos com extensão espacial pequena, menores do que 2 km, compreendendo uma duração espacial de segundos a horas), como a mesoescala (i.e. fenômenos de 2 a 2000 km de extensão horizontal com duração temporal de 10 minutos até várias horas), ampliando o espaço geográfico e atendendo, parcialmente, a área metropolitana.

Diante deste conflito quanto ao uso da técnica do sensoriamento remoto perante o conceito de ilha de calor urbana, é que entendemos a importância e necessidade da renovação deste conceito, justamente por conta da evolução ou disposição urbana tardia, e defeituosa, das áreas metropolitanas dos países periféricos e semiperiféricos, como o Brasil. Assim, atestamos que para a pesquisa em clima urbano nas áreas metropolitanas, o sensoriamento remoto é uma técnica adequada para o monitoramento e mapeamento da Ilha de calor urbana de superfície, uma vez que este conceito pode ir além da microescala. Os sensores podem identificar diversos núcleos da Ilha de calor, de diferentes magnitudes e características, em uma tão difusa região metropolitana. Obviamente que o papel do sensoriamento remoto para os cânions urbanos por meio de câmeras térmicas ou sensores de maior resolução espacial são adequados e necessários para qualificar e quantificar as propriedades térmicas das estruturas e superfícies que constroem o calor nas entradas do urbano, mas esta técnica vai além do escopo deste trabalho.

Descrevendo os diversos produtos de sensoriamento remoto, é possível destacar a série de satélites polares da *National Oceanic Atmospheric Administration* (NOAA), equipada com o instrumento *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR), que possui bandas no infravermelho

termal e oferece uma série temporal extensa desde 1979. No entanto, sua resolução espacial é de 1,1 km, o que limita em detalhe o produto para estudos que levem em consideração os diferentes impactos locais da ICU. Além disso, produtos da série AVHRR enfrentam uma deriva orbital, resultando em uma mudança lenta no tempo de observação, levando a descontinuidades nas séries temporais (REINERS *et al.*, 2025). Outros Instrumentos que possuem bandas no infravermelho termal, incluem o *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) e o *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER), a bordo das plataformas TERRA e AQUA. Não obstante, além de começar a operar somente a partir de 1999, o MODIS apresenta uma resolução espacial de 1km para bandas termais, enquanto a resolução do ASTER é de 90 m.

A partir da segunda década dos anos 2000, outros sistemas sensores-satélites de órbita polar foram lançados, e.g. o *Visible Infrared Imaging Radiometer Suite* (VIIRS) a bordo do *Suomi National Polar-orbiting Partnership* (Suomi NPP), além das plataformas NOAA e o *Copernicus Sea and Land Surface Temperature Radiometer* (SLSTR) da série SENTINEL-3. Apesar de possuírem bandas termais, apresentam uma série temporal mais recente e/ou resoluções espaciais menores.

Há ainda outros sistemas sensores-satélites que também operam com bandas do infravermelho termal, os geoestacionários e.g. *Advanced Baseline Imager* (ABI) a bordo do *Geostationary Operational Environmental Satellites* (GOES), *Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager* (SEVIRI) e *Flexible Combined Imager* (FCI) ambos operando na série METEOSAT. Neles há uma periodicidade excelente, que lhes permite observar o ciclo diurno (frequências de revista inferior a 1h), mas com resolução temporal baixa (acima de 1 km), o que impossibilita o estudo local da ICU.

Por último, além de todos citados acima, a missão *ECOsystem Spaceborne Thermal Radiometer Experiment on Space Station* (ECOSTRESS), a bordo da estação espacial internacional, teve o seu início em 2018, como missão principal de identificação dos limiares de stress hídrico para a biosfera, porém o instrumento também é útil para documentar outros fenómenos relacionados com o calor, tais como os efeitos locais da ICU, muito em função de sua altíssima resolução espacial (em torno de 70 m). Apesar das grandes vantagens de sua resolução espacial, o ECOSTRESS também sofre com os efeitos orbitais promovidos por estar posicionado na ISS.

Todas estas plataformas de satélites e sensores tem suas especificações e contribuição para a pesquisa em clima urbano, porém apenas a série de satélites do LANDSAT oferece uma série temporal relativamente longa (datam desde 1984) e possuem bandas do infravermelho termal com uma resolução espacial entre 60 e 120 metros, a depender da sua plataforma (5, 7, 8 e 9).

Alguns trabalhos demonstram o papel do sensor termal do Landsat para o estudo do clima urbano e da sua ilha de calor urbana em regiões metropolitanas do Brasil. Destacamos três que mais se aproximam deste objetivo. Lucena et. al., (2013) mapearam o campo térmico da região metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ) considerando as características atmosféricas e o uso do solo. Três amostras de imagens do satélite Landsat 5-TM para três eventos de inverno escolhidos para as décadas de 1980, 1990 e 2000 revelam uma concentração de núcleos mais quentes em áreas centrais da metrópole, bem como na região suburbana, expondo uma ilha de calor urbana “polinucleada”. O trabalho enfatiza a importância da análise combinada da temperatura da superfície com o uso do solo e as condições atmosféricas, retratando um padrão distinto de ilhas de calor urbana para o clima tropical.

Souza e Galvani (2022) comparam a temperatura de superfície de uma área de 458 km<sup>2</sup> da região metropolitana de São Paulo, para várias amostras em 2019, estimada pelos sensores OLI (*Operational Terra Imager*) e TIRS (*Thermal Infrared Sensor*) do satélite Landsat 8 com os valores observados em geotermômetros de duas estações meteorológicas. Os dois modelos matemáticos adotados indicaram um padrão de distribuição espacial da temperatura de superfície semelhante: valores menores e intermediários no oeste, noroeste e em partes do sul e mais elevados dispostos no leste, sudeste e nordeste da área de estudo da metrópole paulista.

Uma busca na literatura internacional recente, os estudos com o Landsat para o monitoramento da ilha de calor urbana em áreas metropolitanas são vastos, mesclando metrópoles bem conhecidas e outras não no cenário mundial (o que mostra a abrangência do tema ao satélite Landsat), algumas ultrapassando 20 anos de dados para a análise temporal-espacial, a saber: Barranquilla/Colômbia (Díaz-Chávez, Meléndez-Surmay e Arregocés, 2024); Chennai/India (Mathivanan e Duraisekaran, 2025); Mérida/México (Sánchez-Sánchez *et al.*, 2024); Bangkok/Tailândia (IAMTRAKUL, PADON e CHAYPHONG, 2024); Pequim, Xangai e Tianjin/China (XU *et al.*, 2024).

Neste contexto, o objetivo deste trabalho é mapear a Ilha de calor urbana de superfície (ICUS) na Região metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ) desde o início (1984) da série temporal do satélite Landsat até o presente (2024). Este objetivo se desdobra em outros específicos, a saber:

- Realizar o mapeamento temporal da ICUS (pela TSC) e da massa vegetal (pelo NDVI), segundo as estações do ano, i.e. no verão, outono, inverno e primavera;
- Apresentar o ranqueamento sazonal das cidades mais quentes/mais amenas (pela TSC) e com maior/menor área de cobertura vegetal (por NDVI) da RMRJ;
- Analisar a tendência temporal sazonal da ICUS e da cobertura vegetal nas duas cidades de maior TSC e de mais baixo NDVI, respectivamente, da RMRJ.

O artigo se apresenta em cinco seções: nesta Introdução com uma discussão sobre o papel das cidades no clima urbano; Ilha de calor urbana e sensoriamento remoto; o satélite Landsat e a Ilha de calor urbana de superfície (ICUS) e os objetivos; a Área de estudo, a Região metropolitana do Rio de Janeiro; a metodologia com a fonte dos dados, as técnicas e métodos utilizados; os resultados e, finalmente, as considerações finais.

## ÁREA DE ESTUDO

Em julho de 2024 a Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ) completou 50 anos. É a segunda maior e mais importante do país, uma das grandes metrópoles mundiais e compõe uma das oito regiões de governo do estado do Rio de Janeiro. Atualmente, a Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ) conta com vinte e dois municípios, a saber: Belford Roxo, Cachoeiras de Macacu, Duque de Caxias, Guapimirim, Itaboraí, Itaguaí, Japeri, Magé, Maricá, Nilópolis, Niterói, Nova Iguaçu, Paracambi, Petrópolis, Queimados, Rio Bonito, Rio de Janeiro, São Gonçalo, São João de Meriti, Seropédica, Mesquita e Tanguá. Para fins deste trabalho, a RMRJ será composta pela regionalização que permaneceu até 2013, i.e., sem os municípios de Cachoeiras de Macacu, Petrópolis e Rio Bonito (Figura 1), e que ainda consta oficialmente em alguns documentos do

governo do estado para outros fins, como o de divisão geoconômica (Rio de Janeiro, 2019), ainda que este desconsidere a capital “Rio de Janeiro” na divisão.

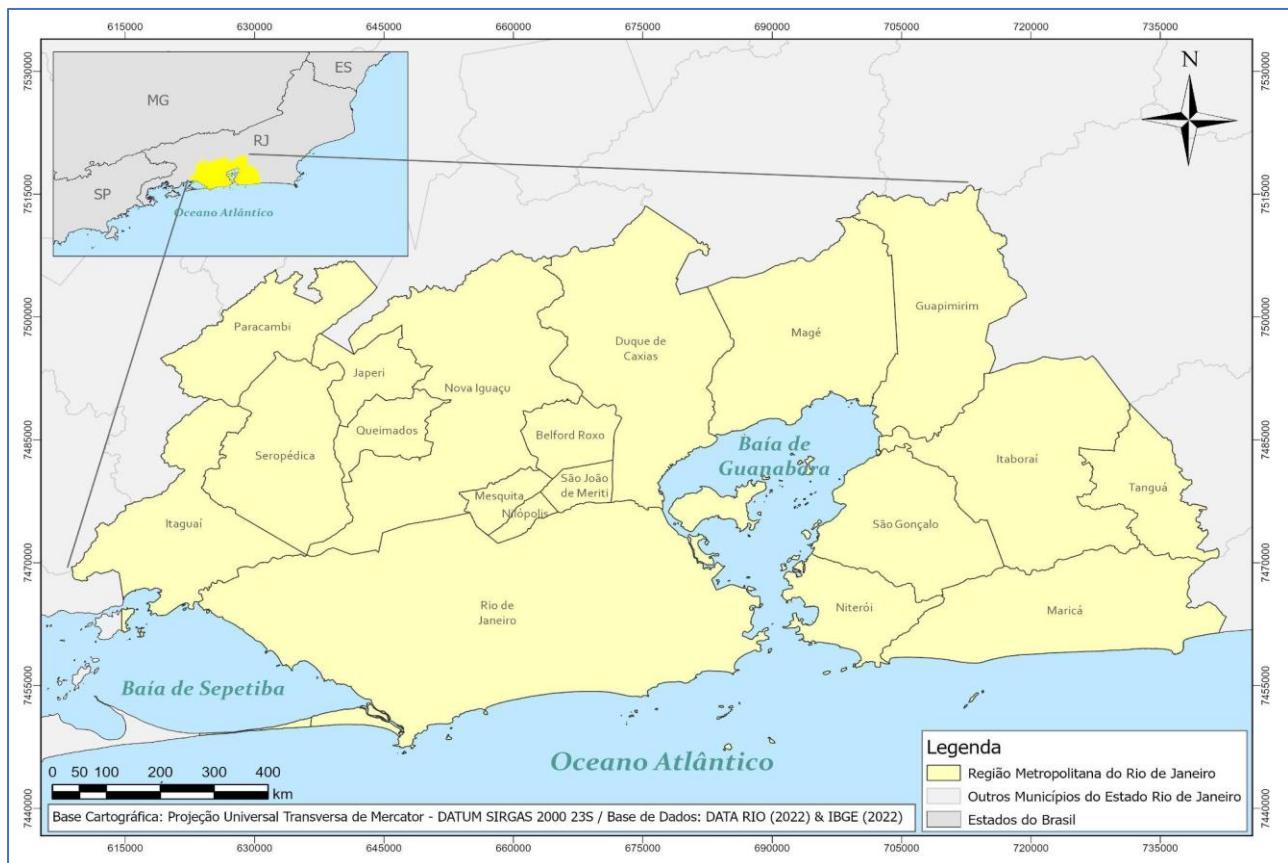


Figura 1 – Mapa de localização da Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ).

A intenção em manter a divisão político administrativa anterior a 2013 é por conta do recorte da órbita/ponto 217/76 da cena Landsat que abrange por inteiro aqueles 19 municípios. A plataforma Landsat tem sua passagem sempre na mesma órbita ponto a cada 16 dias, que no caso da RMRJ acontece desde 1984 (considerando as bandas termais). Por esse motivo, para a composição de todas as imagens do período de estudo (1984 a 2024) em uma imagem única, a RMRJ terá aquela divisão. A inserção dos demais municípios, além de incluir mais de uma cena, no caso três, o dia da passagem não seria a mesma, o que inviabilizaria a composição de todas as imagens (mais detalhes na seção Metodologia).

A RMRJ concentra, em média, 90% da população estadual e é sobrecarregada regionalmente pela concentração de grande parte dos serviços, reduzindo a força política e econômica do interior fluminense (MARAFON *et al.*, 2011). O uso do solo é marcado por um mosaico de paisagens que mesclam e camuflam o espaço físico natural e aquele transformado pela ação humana. As transformações ocorridas ao longo da história resultaram em uma série de modificações no sistema ambiental, atingindo os subsistemas hídrico, geomorfológico, biogeográfico e atmosférico.

## METODOLOGIA

A plataforma Landsat

A base de toda a pesquisa se concentrou na análise dos dados dos sensores *Thematic Mapper* (TM), *Enhaced Thematic Mapper Plus* (ETM+), *Operational Land Imager* (OLI), o *Thermal Infrared Sensor* (TIRS), *Operational Land Imager 2* (OLI-2) e o *Thermal Infrared Sensor 2* (TIRS-2) a bordo dos satélites Landsat-5, Landsat-7, Landsat-8 e para os dois últimos sensores sendo referentes ao Landsat-9.

As imagens Landsat estão disponíveis no site do *United States Geological Survey* (USGS, 2024). O Landsat-5, 7, 8 e 9 possui a mesma resolução temporal (16 dias), mas com algumas diferenças em relação à quantidade de bandas e resoluções espaciais (correspondências das bandas na Figura 2). A resolução espacial das bandas é de 30m, exceto para a banda 6 a qual precisou ser reamostrada para que todas as bandas utilizadas fossem comparativas e pudessem ficar na mesma resolução espacial.

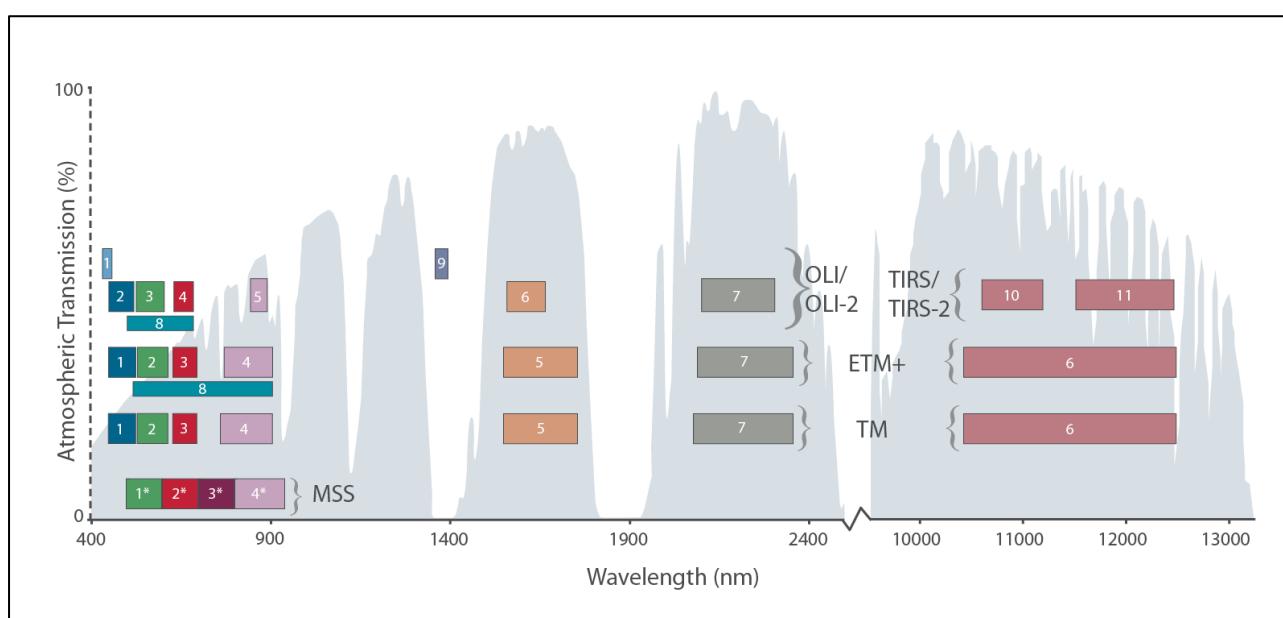


Figura 2 – Correspondência das bandas e comprimentos de ondas do Landsat-5 (TM), Landsat-7 (ETM+), Landsat-8 (OLI e TIRS) e Landsat-9 (TIRS-2). Fonte: Rocchio e Barsi, 2020.

No pré-processamento, foi composta uma série temporal com 218 imagens dos satélites Landsat-5, 7, 8 e 9 abrangendo o período de 1984 a 2024 (Tabela 1). Todas as imagens pertencem à órbita-ponto 217-76, que cobre a RMRJ, e correspondem ao período da manhã. As imagens do Landsat-5, 7, 8 e 9 foram processadas e georreferenciadas no software SPRING versão 4.3 e no ENVI versão 4.7. O georreferenciamento se deu a partir de uma correção geométrica segundo o elipsoide de referência WGS84 e teve como base as imagens Geocover 2003 (Peres et al. 2018).

30/05/1984	07/09/1991	09/12/1996	06/06/2001	29/12/2003	19/09/2007	02/08/2013	28/11/2015	24/02/2019	09/12/2022
01/07/1984	25/10/1991	11/02/1997	14/06/2001	30/01/2004	05/10/2007	03/09/2013	31/01/2016	13/04/2019	02/01/2023
19/09/1984	05/06/1992	03/06/1997	01/08/2001	02/03/2004	23/10/2008	09/01/2014	19/03/2016	16/06/2019	31/03/2023
15/04/1985	08/08/1992	09/10/1997	09/08/2001	03/04/2004	10/12/2008	25/01/2014	20/04/2016	26/01/2020	24/04/2023
04/07/1985	30/12/1992	02/03/1998	17/08/2001	19/04/2004	28/02/2009	07/02/2014	06/05/2016	02/06/2020	11/06/2023
05/08/1985	15/01/1993	06/06/1998	02/09/2001	06/06/2004	19/05/2009	10/02/2014	09/07/2016	18/06/2020	27/06/2023
28/01/1986	31/01/1993	08/07/1998	04/10/2001	22/06/2004	04/06/2009	26/02/2014	26/08/2016	20/07/2020	05/07/2023
17/03/1986	05/04/1993	25/08/1998	28/10/2001	31/12/2004	20/06/2009	14/03/2014	13/10/2016	05/08/2020	22/08/2023
20/05/1986	30/10/1993	01/02/1999	05/03/2002	09/06/2005	08/09/2009	02/06/2014	18/02/2017	28/01/2021	17/03/2024
11/08/1987	15/11/1993	21/03/1999	09/06/2002	11/07/2005	15/02/2010	04/07/2014	09/05/2017	17/03/2021	04/05/2024
18/01/1988	18/01/1994	24/05/1999	27/07/2002	28/08/2005	20/04/2010	21/08/2014	25/05/2017	04/05/2021	12/05/2024
22/03/1988	10/05/1994	27/07/1999	12/08/2002	16/11/2005	07/06/2010	06/09/2014	28/07/2017	05/06/2021	28/05/2024
10/04/1989	27/06/1994	11/01/2000	28/08/2002	04/02/2006	09/07/2010	08/10/2014	14/09/2017	08/08/2021	13/06/2024
03/10/1989	29/07/1994	28/02/2000	29/09/2002	27/05/2006	26/08/2010	24/10/2014	17/11/2017	24/08/2021	21/06/2024
24/02/1990	01/10/1994	26/05/2000	04/02/2003	14/07/2006	11/09/2010	27/12/2014	25/03/2018	22/12/2021	08/08/2024
12/03/1990	11/04/1995	14/08/2000	20/02/2003	31/08/2006	09/05/2011	12/01/2015	10/04/2018	23/01/2022	16/08/2024
28/03/1990	27/04/1995	22/08/2000	25/04/2003	23/02/2007	12/07/2011	13/02/2015	12/05/2018	04/03/2022	24/08/2024
27/02/1991	29/05/1995	02/11/2000	06/07/2003	11/03/2007	13/08/2011	18/04/2015	29/06/2018	29/04/2022	01/09/2024
16/04/1991	16/07/1995	05/01/2001	22/07/2003	27/03/2007	30/09/2011	20/05/2015	01/09/2018	23/05/2022	09/09/2024
02/05/1991	31/05/1996	14/02/2001	23/08/2003	12/04/2007	28/04/2013	05/06/2015	03/10/2018	24/06/2022	25/09/2024
21/07/1991	02/07/1996	27/04/2001	24/09/2003	15/06/2007	14/05/2013	25/09/2015	22/12/2018	10/07/2022	
06/08/1991	06/10/1996	29/05/2001	26/10/2003	02/08/2007	17/07/2013	11/10/2015	07/01/2019	22/10/2022	
DJF	MAM	JJA	SON						

Tabela 1 – Data das imagens utilizadas conforme os períodos sazonais DJF (azul), MAM (verde), JJA (amarelo) e SON (lilás). Fonte: os autores.

Após o georreferenciamento, foi realizada a correção radiométrica, que consiste na transformação dos dados brutos que estão em números digitais (ND) em dados de radiância. As equações e constantes de calibração estão presentes nos trabalhos de Chander e Markhan (2003) e Chander *et al.* (2009). Na sequência, realizou-se o mascaramento de nuvens para melhorar as medições de TSC e NDVI, uma vez que as nuvens podem interferir no resultado das imagens. O mascaramento e detecção de nuvens foram obtidas através de três técnicas de França e Cracknell (1995) e Chen *et al.* (2002), classificados como:

- Técnica com base em limiar do valor da reflectância na banda do vermelho;
- Técnica com base em limiar do valor de temperatura de brilho (menor ou igual a 278 K) na banda 6;
- Técnica da razão entre as bandas do infravermelho próximo e vermelho, onde foi determinado valores próximos a 1 indicam pixels contaminados por nuvens, menos de 0,8 para água e maiores que 1,6 para vegetação. Destaca-se ainda que, os pixels são classificados como livres de nuvens mesmo se a razão cair entre 0,8 e 1,6, mas se a temperatura de brilho no canal 6 for maior que 290K.

### *Ilha de Calor Urbana de Superfície (ICUsup)*

Trata-se do núcleo mais elevado da temperatura, monitorado por sensoriamento remoto. Historicamente e inicialmente, mas ainda hoje, a ilha de calor urbana tinha seu monitoramento executado por equipamentos convencionais, como os termômetros de estações meteorológica e, principalmente, por redes fixas e móveis de termômetros espalhados em diferentes áreas da cidade para ampliar as amostras e espaços monitorados. Com o advento do sensoriamento remoto, o recorte espacial é expandido, o que amplia as possibilidades de análise espacial da ilha de calor urbana.

Neste contexto, a ilha de calor urbana se diferencia em duas categorias: Ilha de Calor Urbana Atmosférica (monitorada e definida por meio de termômetros convencionais) e Ilha de Calor Urbana de Superfície (monitorada por sensoriamento remoto). Para os propósitos deste artigo, a Ilha de Calor Urbana de Superfície (ICUsup) será oriunda da varredura matutina do canal termal do satélite Landsat.

### *Temperatura da Superfície Continental (TSC)*

A estimativa da TSC é realizada utilizando a banda termal do Landsat, com base em diferentes parametrizações (Qin et al., 2001; Souza e Silva, 2005), e faz uso de dados de estações meteorológicas locais para a correção atmosférica. A TSC resulta da combinação entre a temperatura de brilho (TB) da banda 6 e um fator de correção que considera a influência atmosférica e a emissividade da superfície no sinal captado pelo sensor do satélite. A emissividade é calculada a partir do Índice de Vegetação de Diferença Normalizada (NDVI), conforme Van de Griend e Owe (1993).

Vale ressaltar que utilizamos mais de um sensor devido as versões do Landsat. Desta forma a TSC foi estimada utilizando a banda 6 do Landsat-5 e 7 e a banda 10 do Landsat-8 e 9. A explicação teórica das equações e algoritmos de correção geométrica e atmosférica pode ser encontrada em Lucena (2012) ou em Lucena et al. (2013).

## *Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI)*

O Índice de Vegetação de Diferença Normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index* – NDVI) é uma técnica que utiliza imagens de satélite para indicar a presença de vegetação fotosintetizante ativa. O NDVI (Rouse *et al.*, 1974) é calculado com base na diferença entre a máxima absorção de radiação na região do vermelho, causada pela presença de pigmentos como a clorofila, e a máxima reflexão de radiação na região do infravermelho próximo, resultante da estrutura celular das folhas. Além disso, a assinatura espectral do solo, por não possuir esses mecanismos, não apresenta uma diferença espectral significativa entre essas duas regiões.

O NDVI tem como objetivo combinar as bandas do espectro visível (vermelho) e do infravermelho próximo para ressaltar o sinal da vegetação, ao mesmo tempo em que minimiza a influência do solo. A fórmula do NDVI é composta da seguinte forma (Huete *et al.* 2002):

$$NDVI = \frac{\rho_4 - \rho_3}{\rho_4 + \rho_3}$$

onde  $\rho_3$  representa a reflectância na banda 3 e o  $\rho_4$  representa a reflectância na banda 4.

## *Composições*

As imagens foram subdivididas em períodos sazonais sendo elas: verão (DJF), outono (MAM), inverno (JJA), primavera (SON) para o período de 1984 a 2024 (Figura 3), permitindo assim, analisar a evolução temporal dos parâmetros utilizados e, por conseguinte monitorar o impacto da RMRJ. Posteriormente, compósitos de imagens de TSC e NDVI foram calculados com base na média, tais composições resultaram em mapas de médias dos parâmetros mencionados.

## *O ranqueamento das cidades mais quentes*

O ranqueamento foi realizado pela análise de dados *raster*, pela função “Estatística Zonais”, do software *Quantum Gis* (QGIS). Os dados *raster* da TSC/NDVI e o *shapefile* da área de interesse são inseridos e cruzados, e calculada a média, a mínima e a máxima. Os dados ranqueados saem na tabela de atributos do arquivo *shapefile*, mas exportados em formato “xlsx” para tratamento no software *Excel*.

A proposta do ranqueamento é identificar as duas cidades mais quentes (a partir da TSC) e com baixa cobertura vegetal, ou mais estressada/pouco sadia (a partir do NDVI) na RMRJ, e selecioná-las para a análise de tendência sazonal.

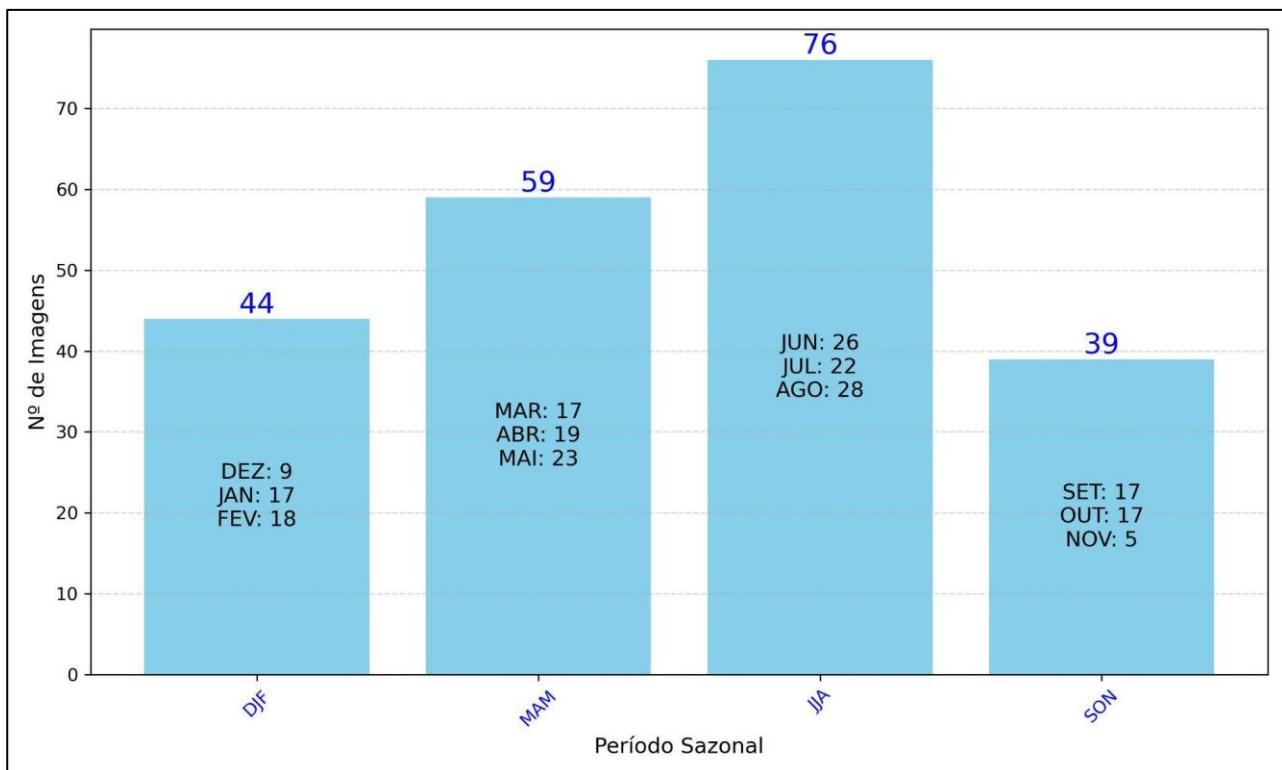


Figura 3 – Número de cenas usadas do LANDSAT por períodos sazonais e meses. Fonte: os autores.

A apresentação do ranqueamento será sazonal e dar-se-á em mapas com a gradação das cores do vermelho (valores mais altos da TSC e mais baixos do NDVI) ao verde (valores baixos da TSC e elevados do NDVI). Os valores serão indicados na legenda dos mapas com duas casas decimais. Caso haja valores iguais, especialmente para o NDVI, o ranqueamento mostrará a hierarquia correta, mesmo sem apresentar as casas decimais consequentes. Restringir a duas casas decimais têm o intuito de mostrar a figura limpa, sem excesso de números, por exemplo.

### Análise da tendência

Foi realizada uma análise de tendência através do teste Mann-Kendall (Kendall, 1975; Mann, 1945) implementado em *python* disponível na biblioteca Pymannkendall (Hussain e Mahmud, 2019), que é um teste não paramétrico amplamente utilizado para detectar tendências monotônicas em séries temporais sem a necessidade de pressupor a normalidade nos dados. O teste calcula a soma dos sinais das diferenças entre os pares de observações ao longo do tempo. A significância estatística da tendência (*p*) é calculada a partir de uma distribuição cumulativa normal. Para a tendência ser considerada “significativa”, o nível de significância não pode ser superior a 0,05. Para se estimar a magnitude da tendência, utiliza-se o estimador de Theil-Sen (Theil, 1992 e Sen, 1968), que corresponde à mediana de todas as inclinações possíveis entre pares de pontos da série temporal. Esse método é robusto contra outliers e fornece uma estimativa confiável da taxa de variação (*slope*) ao longo do tempo.

## RESULTADOS: ANÁLISE E DISCUSSÃO

### *A dimensão espacial sazonal da ICUS na RMRJ*

A Ilha de Calor Urbana de Superfície sobressalta em diversos espaços da RMRJ, bem notório no verão (DJF) e primavera (SON), seguido pelo outono (MAM) – Figura 4. Estes espaços são os grandes sítios de início e expansão da ocupação e urbanização na metrópole fluminense, a saber: as planícies (Baixadas e vales) da Guanabara, Jacarepaguá, Bangu e Santa Cruz na cidade do Rio de Janeiro, onde se originou e instalou a Zona Sul e Zona Norte na primeira, e a Zona Oeste nas três últimas; as terras baixas, a leste da baía de Guanabara (cidades de Niterói, São Gonçalo, Itaboraí e Tanguá) e diante das escarpas e planalto da Serra dos Órgãos, a saber, as cidades oficiais da Baixada Fluminense (nome político a essa área da RMRJ). Os tons de cor, do laranja ao vermelho, com valores entre 32,1 até acima de 41 graus, definem a mancha da ICUS na RMRJ.

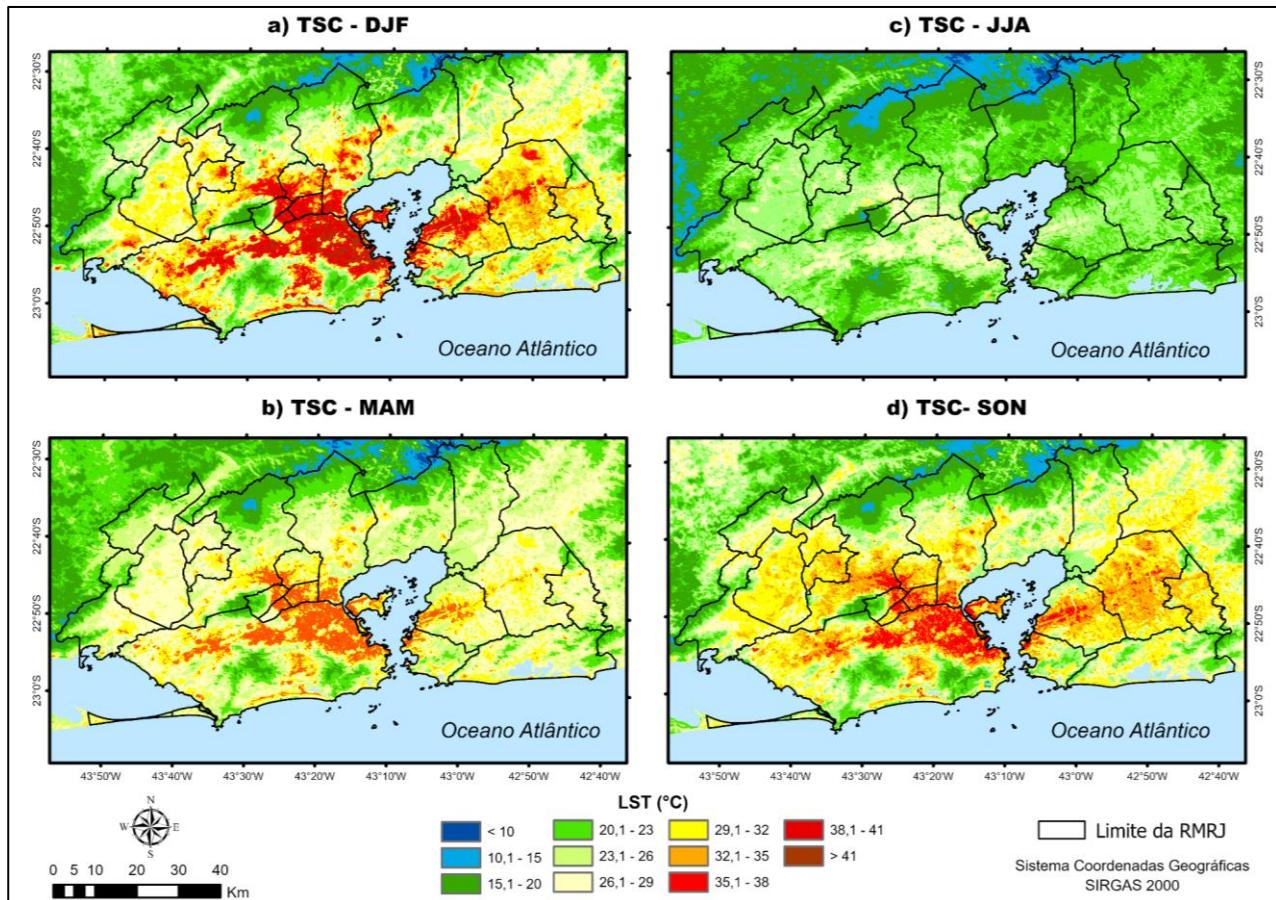


Figura 4 – Média sazonal da TSC no período de 1984 a 2014 para a RMRJ. Fonte: os autores.

Estes espaços coincidem com as principais vias e artérias de calor na metrópole fluminense, responsáveis pela criação e consolidação de bairros e cidades, a saber: as rodovias federais BR-040 (que atravessa boa parte da Baixada Fluminense) e BR-101 (que corresponde a avenida Brasil,

na cidade do Rio de Janeiro, e a principal via da cidade, e a Niterói-Manilha, que abrange as cidades Niterói-Tanguá no extremo leste da baía de Guanabara); a RJ-071 (oficialmente Via Expressa Presidente João Goulart – ou popularmente “Linha Vermelha”), a avenida Carlos Lacerda (popularmente “Linha Amarela”) e os BRTs (Transporte rápido de ônibus) que na cidade do Rio de Janeiro são quatro (Transcarioca, Transolímpica, Transoeste e Transbrasil - esta última paralela à avenida Brasil). Obviamente que outras vias, ruas e avenidas de importante ligação e conexão na metrópole se destacam na criação e consolidação do organismo metropolitano e, consequentemente, na ICUS, mas omitidas para este artigo.

A sazonalidade da TSC produz pouco impacto na sua espacialização, i.e., os espaços mais quentes ou mais amenos são quase sempre os mesmos, variando apenas o valor quantitativo na escala da TSC. Ao comparar o verão (DJF) e o inverno (JJA), no primeiro, os espaços mais quentes já supracitados, alcançam os valores mais elevados da legenda, i.e., da mancha laranja (entre 32,1 e 35), passando pelos tons de vermelho (35,1-41) até a cor marrom (acima de 41). No inverno, os espaços mais quentes coincidem àqueles do verão, porém os valores mais altos da TSC se concentram em duas tonalidades da cor verde (entre 23,1 e 29), obedecendo as condições astronômicas do período em questão. No outono (MAM) e primavera (SON) a sazonalidade oscila entre a escala de temperatura para o verão e o inverno, porém com uma espacialização mais próxima da paisagem do verão que do inverno.

Importante consideração se refere aos diferentes núcleos de calor da TSC na paisagem da RMRJ. Esta condição assume ou sugere que a ilha de calor urbana tem uma fisionomia polinucleada, i.e., são vários núcleos de calor no espaço da metrópole. Isto significa que a ilha de calor urbana não é restrita a um único espaço ou núcleo da mancha urbana, mas corresponde a vários. Esta condição já foi comentada em trabalhos anteriores (Lucena, 2012; Lucena et al; 2013), que nomeou de “Ilha de Calor Metropolitana (ICM)” e revela a aptidão da metrópole em gerar diferentes espaços de calor por conta da sua diversidade e complexidade urbana e, consequentemente, térmica. A natureza geourbana da RMRJ expõe núcleos da ilha de calor urbana na cidade do Rio de Janeiro, estimulados pela avenida Brasil, Linha Amarela, Linha Vermelha e BRTs; núcleos na Baixada Fluminense, promovidos pela BR-116 e Linha Vermelha; e outros núcleos a leste da Baía de Guanabara sob impacto da rodovia Niterói-Manilha. Em suma, a dimensão espacial polinucleada da TSC na RMRJ configura um conceito mais próximo da complexa realidade metropolitana, a saber, a Ilha de Calor Metropolitana.

O NDVI mostra uma relação inversa com a TSC, a saber, nas áreas de origem, consolidação e expansão urbana da RMRJ estão os valores mais baixos (entre 0,48 e 0) de NDVI – nas tonalidades amarela, laranja, vermelha e marrom (e os mais elevados de TSC), enquanto nas áreas de vegetação, sobretudo dos maciços costeiros e escarpa da Serra do Mar, estão os valores mais altos (entre 0,49 e 0,80) do NDVI - em tons verde (e os mais baixos de TSC) – Figura 5.

Destacamos, ao menos, duas situações contrastantes no mapa do NDVI. Uma delas refere-se ao papel dos três maciços costeiros da cidade do Rio de Janeiro, a saber, Tijuca, Pedra Branca e Gericinó-Mendanha, que nas quatro composições sazonais, mantêm altos e constantes valores. São, portanto, importantes sumidouros de carbono e fonte de refrigério ao ecossistema urbano da cidade do Rio de Janeiro, o município mais importante da metrópole. Em contraste aos três maciços costeiros, áreas do extremo leste e oeste mostraram baixos índices de NDVI, que não são os mais inferiores de toda a RMRJ, variando do amarelo ao laranja, mas se aproximam dos índices urbanos,

concentrados na tonalidade do vermelho. Trata-se de áreas de extração de areia em Seropédica (no extremo oeste) e de implantação do Complexo petroquímico da Petrobrás (COMPERJ) ao norte de Itaboraí (extremo leste), o que revela a fragilidade da cobertura pedológica dessas áreas e a sensibilidade aos impactos ambientais.

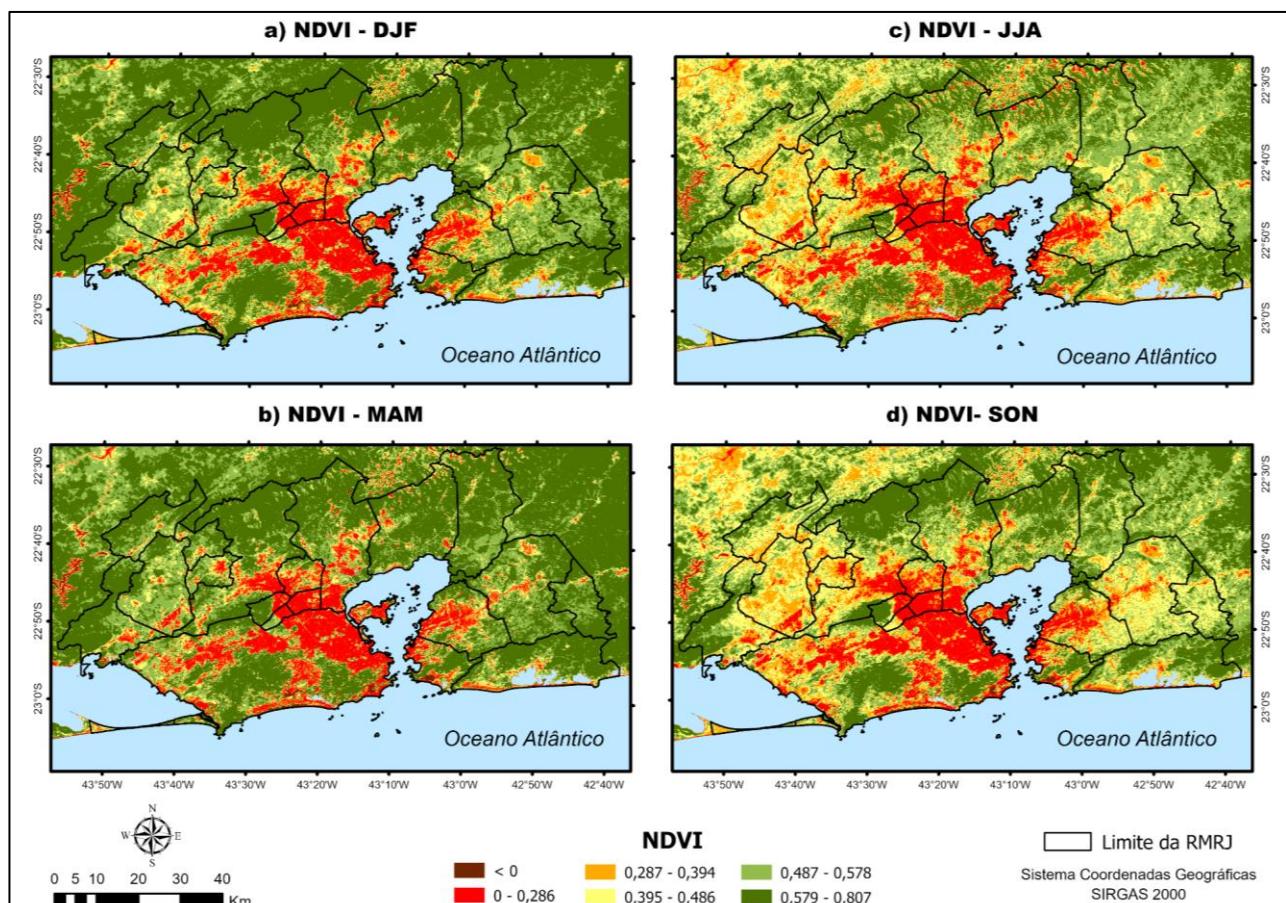


Figura 5 – Média sazonal do NDVI no período de 1984 a 2014 para a RMRJ. Fonte: os autores.

Sazonalmente, tal como a TSC, há pouca mudança na configuração espacial do NDVI, quanto a distribuição dos valores mais altos e mais baixos, o que revela o papel das condições atmosféricas conforme as estações do ano. No verão (DJF) se consolidam os valores mais elevados do NDVI, com tonalidade verde mais escura, o que reflete uma atmosfera mais úmida e chuvosa, recorrente neste período do ano. Esta condição persiste, parcialmente, em alguns espaços na estação sazonal seguinte, o outono (MAM), quando a umidade permanece relativamente alta e, especialmente, no mês de março e ainda em abril. No inverno (JJA), a tonalidade do verde mais escuro é diluída, configurando um tom mais claro nos espaços mais vegetados. Possivelmente, este cenário é associado à mudança no aporte de umidade e da precipitação, mais baixa ou nula (no caso da segunda), quando se perpetuam os meses mais secos do ano. Os meses que desenham a primavera (SON) mantém certa similaridade espacial na tonalidade do verde da estação sazonal anterior, contudo, tons mais escuros começam a sobressair, que pode indicar o recomeço do período mais chuvoso, principalmente em novembro.

## Rankeamento sazonal da TSC e do NDVI na RMRJ

As cidades de São João de Meriti e Nilópolis se destacam em primeiro e segundo lugar, respectivamente, como as mais quentes, conforme a TSC, e com a vegetação mais estressada ou escassa (NDVI) nas quatro estações sazonais. São João de Meriti registra quase 38°C no verão, e 35°C na primavera. Na sequência, seguem Belford Roxo e Queimados, especialmente a primeira, que se destaca na terceira colocação em todas as estações do ano com o NDVI mais baixo, e no verão e outono a TSC mais alta. A cidade de Queimados assume a terceira colocação da TSC no inverno e na primavera. Neste primeiro cenário, trata-se de quatro cidades muito importantes na Baixada Fluminense, de população elevada, especialmente Belford Roxo (sexto) e São João de Meriti (oitavo) na lista das mais populosas do estado do Rio de Janeiro, alta densidade demográfica com espaços periféricos muito alterados (Figuras 6, 7, 8 e 9).

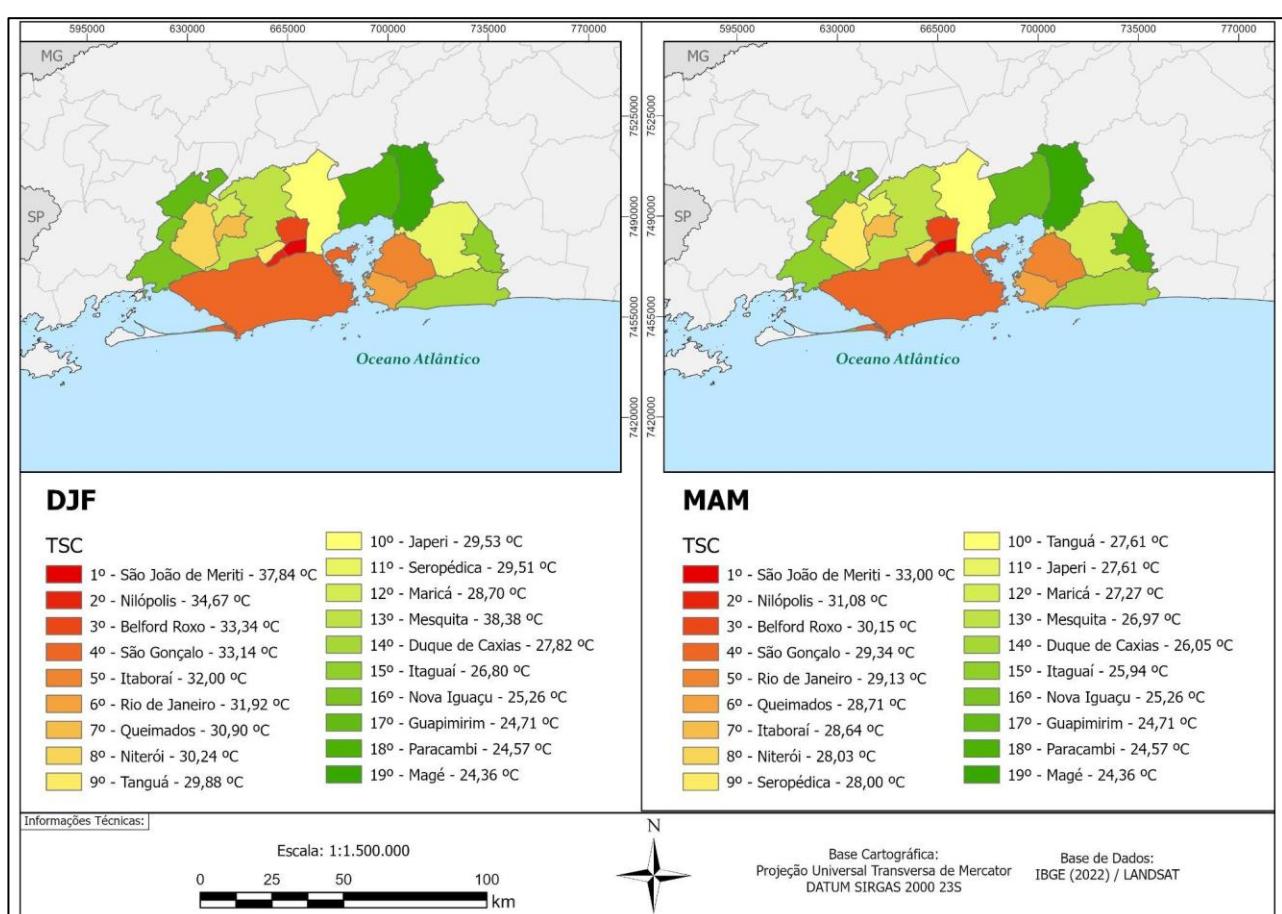


Figura 6 – Ranqueamento sazonal (DJF e MAM) da TSC em 1984-2024 para a RMRJ. Fonte: os autores.

A cidade do Rio de Janeiro se destaca, em todas as estações sazonais, com a quarta cobertura vegetal mais incipiente, e oscila entre a quinta e a nona colocação no ranking da TSC. São João de Meriti e Nilópolis estão conurbadas à cidade do Rio de Janeiro pela sua Zona Norte, justamente a área mais quente da cidade, conforme notificado em trabalho anterior (Lucena *et al.*, 2018).

Certamente, por conta da complexidade e centralidade metropolitana e estadual da capital fluminense, estudos e análises robustas devem ocorrer e persistir.

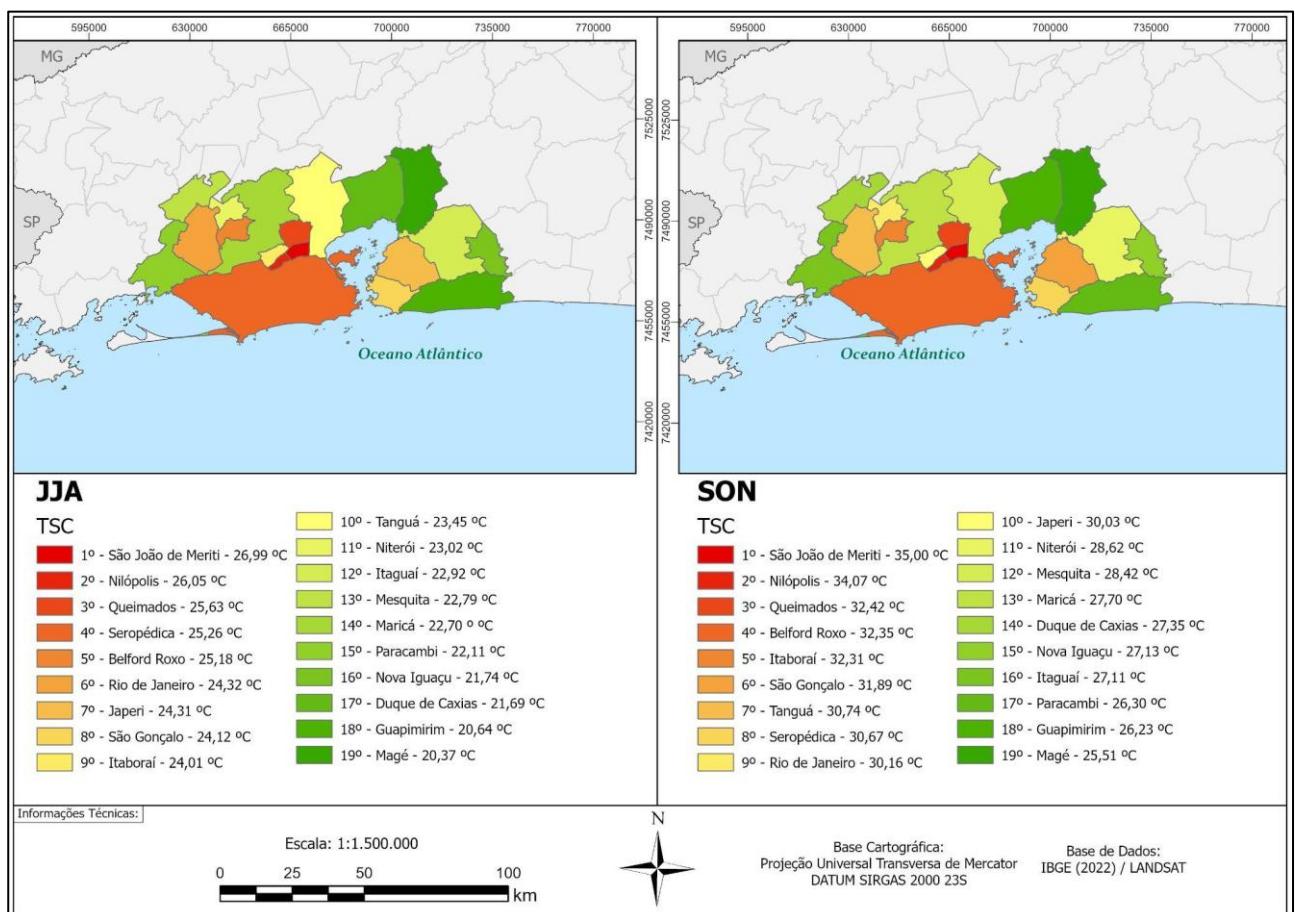


Figura 7 – Ranqueamento sazonal (JJA e SON) da TSC em 1984-2024 para a RMRJ. Fonte: os autores.

Nova Iguaçu e Duque de Caxias, as duas cidades mais importantes da Baixada Fluminense, não se configuram no topo do ranking da TSC ou do NDVI. Nova Iguaçu ocupa as últimas posições do ranking da TSC, com a décima sexta colocação em três estações (verão, outono e inverno), e a décima terceira colocação, também em três estações do ano (verão, outono e primavera) quanto ao NDVI. Em Duque de Caxias, no ranking da TSC, ocupa a décima quarta colocação no verão, outono e primavera, e a décima sétima no inverno, enquanto o NDVI se situa em posições intermediárias. Estes resultados mostram que, apesar do histórico de alterações ambientais nas duas cidades, de onde se originaram boa parte das demais cidades da Baixada Fluminense pelo processo de emancipação municipal, Nova Iguaçu e Duque de Caxias ainda possuem a maior área territorial da Baixada Fluminense que mesclam diversos tipos e usos do solo, desde os mais urbanizados sem a primeira cobertura natural originária, aos espaços não tão alterados, o que favorece valores mais baixos da TSC e mais altos de NDVI.

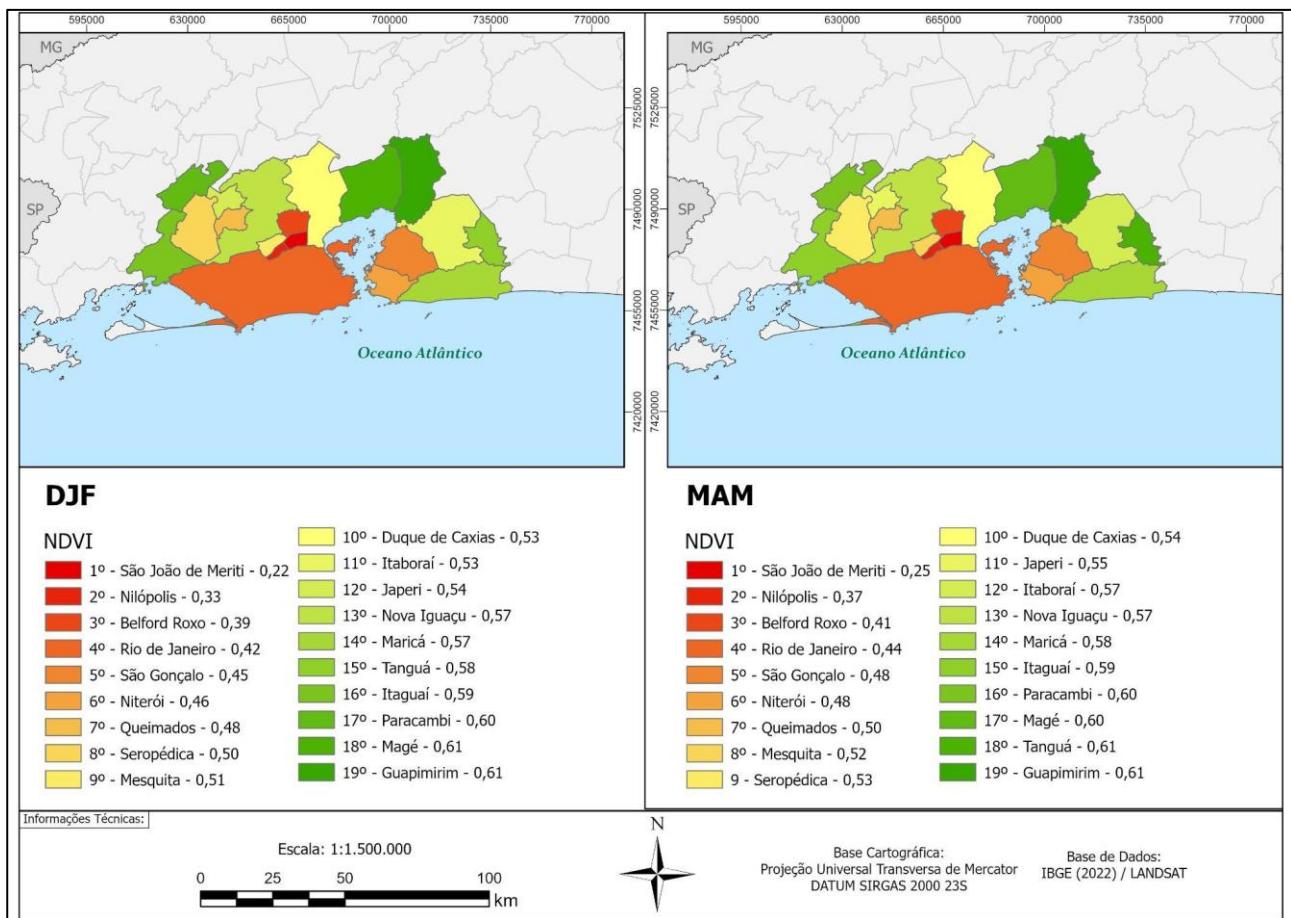


Figura 8 – Ranqueamento sazonal (DJF e MAM) do NDVI em 1984-2024 para a RMRJ. Fonte: os autores.

Quatro cidades a leste da baía de Guanabara, o “leste metropolitano”, oscilam no ranking da TSC entre a quinta e a décima primeira colocação, na sequência: Niterói, São Gonçalo, Itaboraí e Tanguá. Destaque para São Gonçalo, que no verão e outono assegura a quarta colocação, a oitava no inverno e a sexta na primavera. É uma importante cidade da periferia metropolitana, a segunda mais populosa do estado e entre as 20 do Brasil, de grande centralidade para o leste fluminense. Itaboraí e Tanguá também merecem destaque, uma vez que a partir do COMPERJ no início dos anos 2000, aceleraram o processo de urbanização e alterações ambientais, com a retirada da vegetação e ampliação do ambiente construído. Quanto ao NDVI, Itaboraí e Tanguá não acompanham valores tão baixos quanto Niterói e São Gonçalo. Tanguá, por exemplo, ocupa a penúltima colocação no outono, e a décima sexta no inverno, o que corrobora um espaço ainda em processo de urbanização e alterações no uso do solo em curso. Itaboraí, apesar do COMPERJ, mas por conta do seu território, ainda há muitas áreas naturais e não urbanizadas, porém em condições bem mais alteradas que Tanguá, a ponto de se destacar com valores de TSC mais elevados.

A seção final do ranking da TSC e do NDVI define as cidades de Guapimirim, Magé e Paracambi como as mais frescas e de maior área vegetal preservadas. As cidades de Duque de Caxias, para a TSC, e Maricá, para o NDVI, alternam a sequência daquelas três cidades ao menos uma vez. São as cidades da borda metropolitana cujos núcleos urbanos são esparsos e pequenos, enquanto os espaços naturais ou com vegetação densa predominam. Este cenário oferece a essas

cidades os valores mais baixos da TSC (no verão a diferença com as cidades mais quentes pode ultrapassar os dez graus) e os mais altos de NDVI (um indicativo não apenas de maior área vegetal, mas sobretudo de vegetação menos estressada ou mais sadi).

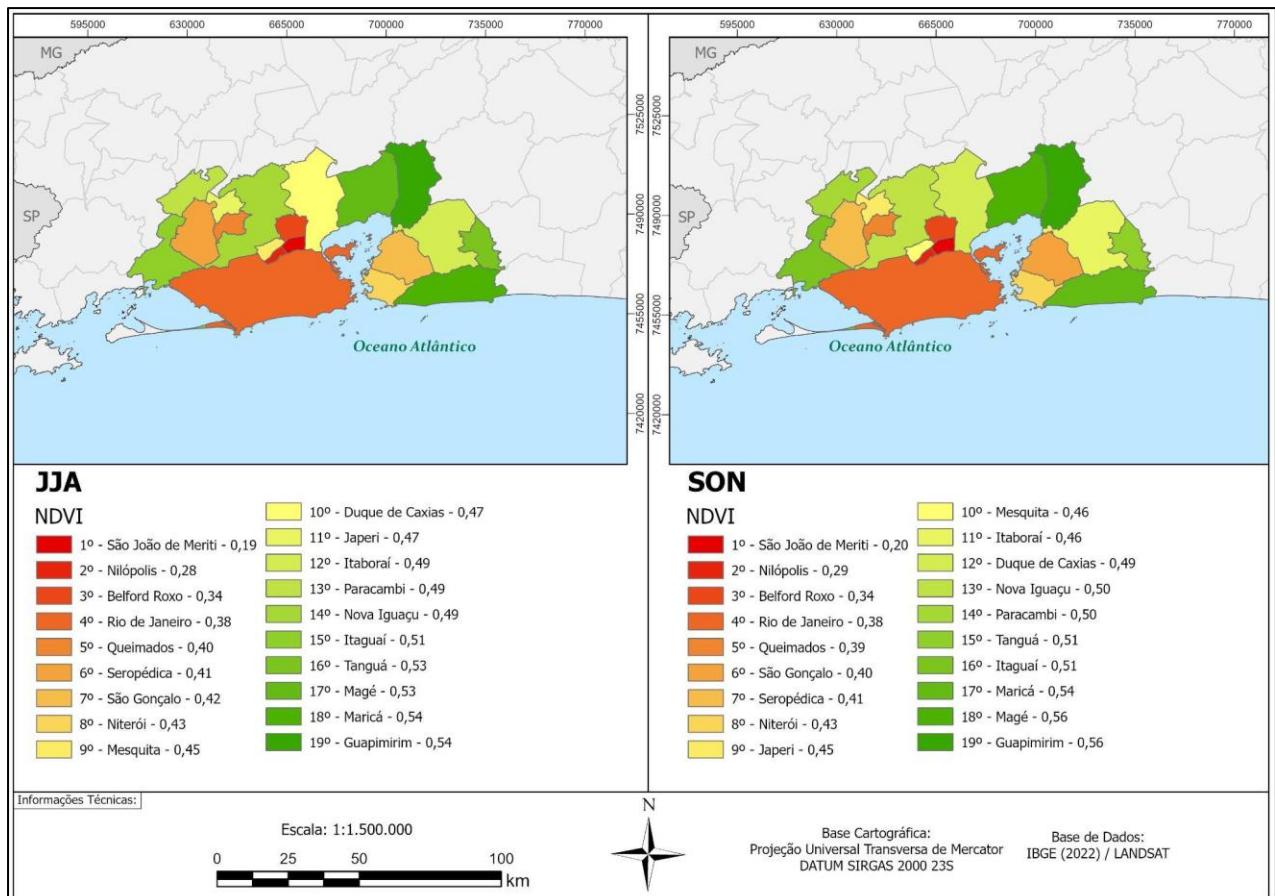


Figura 9 – Ranqueamento sazonal (JJA e SON) do NDVI em 1984-2024 para a RMRJ. Fonte: os autores.

### Tendência temporal sazonal das ICUS nas duas cidades mais quentes da RMRJ

As Figuras 10 e 11 apresentam séries temporais referentes à tendência, para a TSC e o NDVI, obtidas através do teste Mann-Kendall e do estimador Theil-Sen (veja a seção 3.7). Os gráficos foram gerados a partir de médias espaciais de TSC e NDVI para todos as cidades, dos quais estão exibidos aqui as duas cidades mais quentes do ranqueamento, i.e., São João de Meriti e Nilópolis.

A tendência de elevação da TSC em São João de Meriti ocorre de forma positiva e significativa nas estações DJF e JJA, cuja magnitude (aqui referida como *slope*, devido à inclinação da reta ajustada) apresenta valores no entorno de 0,28 e 0,06 respectivamente. O mesmo não ocorre para as estações de primavera e outono, em que os valores da tendência são apresentados de forma mais estável (*slope* próximo à zero) e não são significativos ( $p>0.05$ ). É possível observar

que a partir dos anos 2010, são apresentados os valores mais altos das séries temporais em todas as estações do ano – Figura 10.

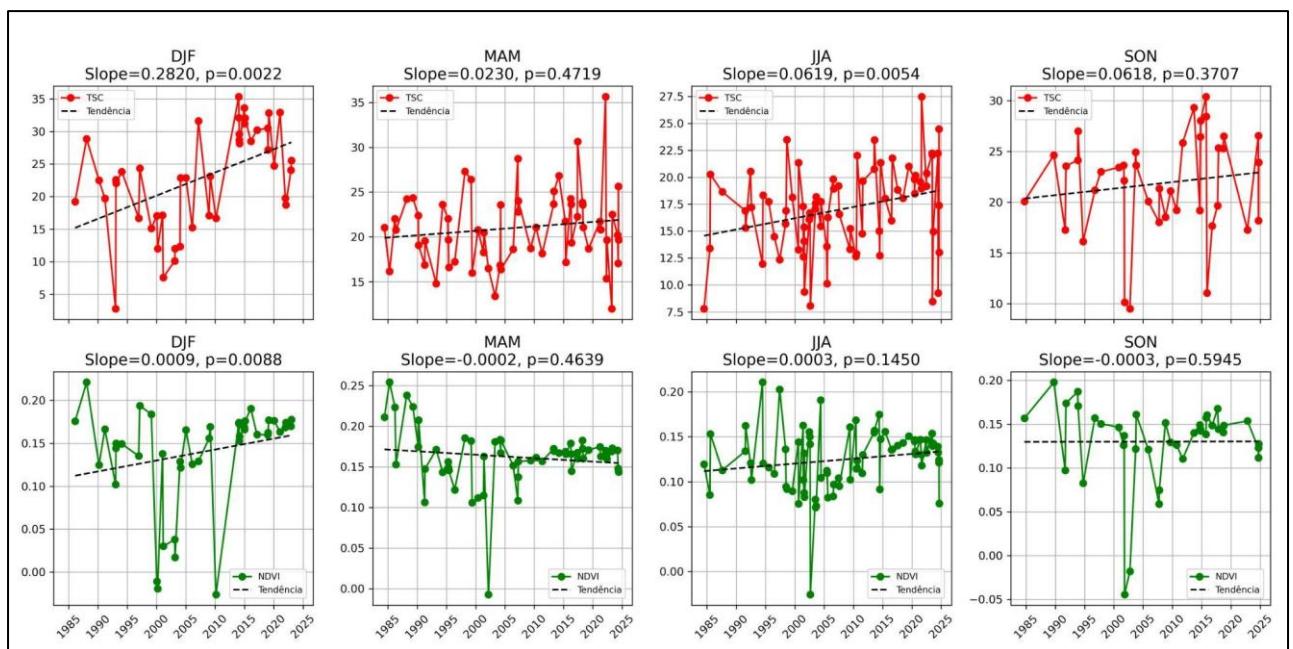


Figura 10 – Tendência e significância temporal sazonal da cidade de São João de Meriti (primeira cidade mais quente) para a TSC (primeira linha) e o NDVI (segunda linha). Fonte: os autores.

Quanto ao NDVI, há tendências de elevação da reta no verão (~0,28) e no inverno (~0,06), sendo apenas a primeira significativa, enquanto pode-se observar tendências de queda nas estações intermediárias, outono (-0,0002) e primavera (-0,0003), ambas sem significância estatística (0,4719 e 0,5945, respectivamente). As duas tendências de elevação do NDVI, principalmente no verão, contrastam com a tendência de elevação da TSC, também no verão, uma vez que o stress térmico poderia ser indicativo de tendência negativa para o NDVI. Contudo, a tendência de aumento do NDVI no verão é bem suave, enquanto no inverno, de tendência também suave e bem próximo a neutralidade, não tem significância estatística. Há um padrão evidente que pode ser observado para o NDVI, onde após os anos 2010 há uma menor variação dele. (Figura 10).

Em Nilópolis há tendência de aumento da TSC em todas as estações, com destaque ao verão (magnitude de aproximadamente 0,13), seguido pelo inverno (~0,02), primavera (~0,03) e outono (0,0020), respectivamente (Figura 11). Contudo há significância estatística apenas no verão e inverno. A tendência de aumento no verão é sustentada pelos anos da década de 2010, enquanto no inverno, sustenta-se, também, pela década de 2010, o início da década de 2020 e boa parte da década de 1990.

Quanto ao NDVI, a tendência de aumento da reta é unânime em todas as estações do ano, quando apenas na primavera (SON) não há significância estatística (0,1535). Tal como em São João de Meriti, esperava-se um padrão inverso da reta do NDVI em Nilópolis, uma vez que as duas cidades concentraram os valores totais médios mais altos da TSC na RMRJ. Provavelmente, e merece investigação, a espacialização da TSC e do NDVI apresenta mais detalhes naquelas duas

cidades, não captadas pelos valores estatísticos médios. A análise por bairro, por exemplo, poderá revelar o papel e o protagonismo na concentração da TSC de determinado(s) bairro(s), que extravasa para toda a cidade, definindo-a como a mais quente no ranking geral, situação omitida pelo valor médio que abrange todo território municipal. Igualmente para o NDVI, porém mais complexo, a análise por bairro poderá revelar qual ou quais se destacam (Figura 11).

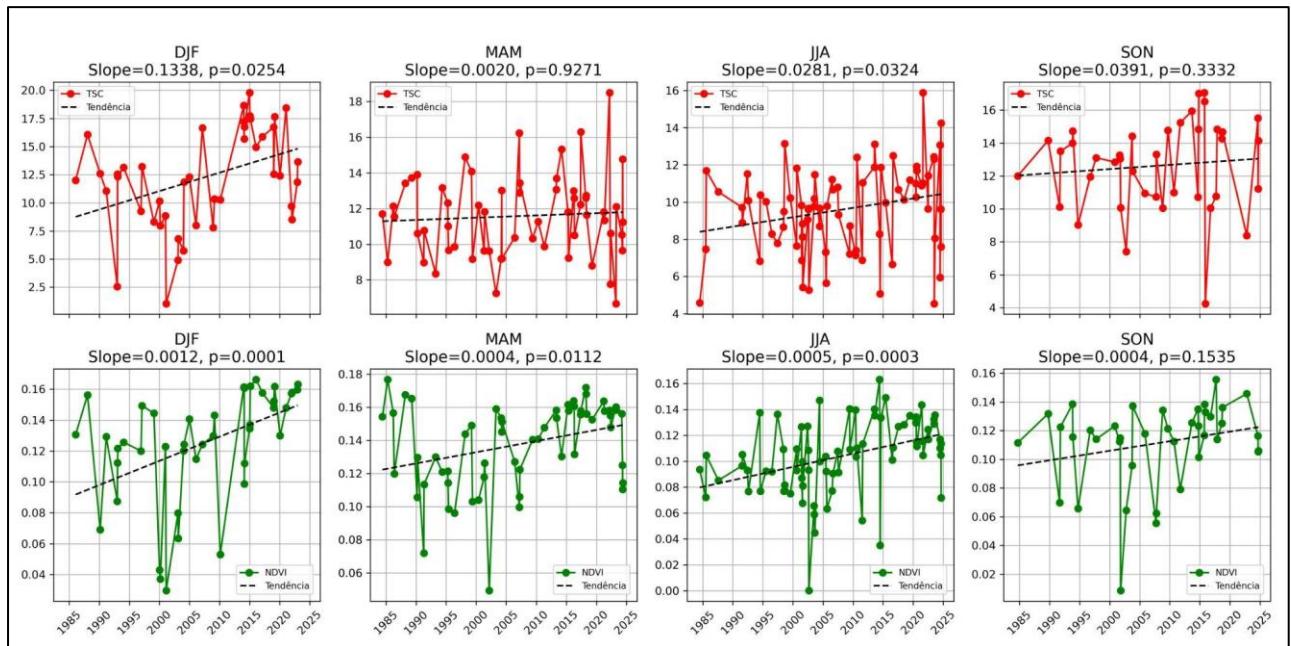


Figura 11 – Tendência e significância temporal sazonal da cidade de Nilópolis (segunda cidade mais quente) para a TSC (primeira linha) e o NDVI (segunda linha). Fonte: os autores.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A região metropolitana do Rio de Janeiro é um espaço favorável à ocorrência da ilha de calor urbana, porém, espacialmente polinucleada, uma vez que a complexidade de espaços e usos da terra/solo na metrópole oferece uma diversidade de núcleos, com diferentes magnitudes de temperatura. Trata-se da Ilha de Calor Metropolitana (de superfície), conceito ou terminologia mais adequada para regiões do porte da metrópole fluminense, que sob suporte do sensoriamento remoto tem na sua abrangência espacial uma visão ampliada e detalhada da temperatura da superfície continental e, consequentemente, da Ilha de Calor Urbana de superfície.

Os espaços de calor, ou a Ilha de Calor Urbana de Superfície, abrange tanto a área central, os bairros consolidados da Zona Norte da cidade do Rio de Janeiro e o núcleo central de cidades da Baixada Fluminense, Niterói e São Gonçalo, até as franjas da Zona Oeste da capital e do leste e oeste metropolitano. Contudo, mediante o ranqueamento adotado no trabalho, são as cidades de São João de Meriti e Nilópolis, respectivamente, na Baixada Fluminense, o reduto da Ilha de Calor Urbana de Superfície, materializada em todas as estações do ano.

Em contrapartida, a Ilha de Frescor Urbana de Superfície se configura nos interstícios urbanos da metrópole, isto é, nos parques e fragmentos florestais da Zona Sul, Norte e Oeste da capital, da Baixada Fluminense, Niterói e São Gonçalo, e nos municípios da franja metropolitana, a saber: Paracambi, no extremo oeste, Maricá, a leste e, principalmente, Magé e Guapimirim, respectivamente, a norte da baía de Guanabara, materializada em todas as estações do ano.

Neste contexto, entende-se que uma atenção deverá ser dada à Zona Oeste da cidade do Rio de Janeiro, à Baixada Fluminense, aos extremos leste e oeste metropolitanos e as áreas de expansão urbana atual. Urge-se um acompanhamento das novas frentes de intervenções espaciais, seja industriais, logísticas e imobiliárias, com vistas a remediar possíveis impactos no aumento ou estrangulamento da Ilha de Calor Urbana de Superfície na RMRJ.

Este trabalho qualifica o papel do sensoriamento remoto e da longa série temporal provida pelo satélite Landsat, como uma plataforma de monitoramento e estudo do clima urbano por meio da obtenção/extracção da Temperatura da Superfície Continental e do Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI). A extensa, e mais longa série temporal entre os sensores espaciais em órbita, o Landsat, favoreceu a análise espacial diacrônica de quatro décadas da TSC e do NDVI, demarcando e destacando a conjuntura espacial sazonal na RMRJ.

O cálculo e obtenção da TSC inovou ao obter, além da correção radiométrica e do cálculo da temperatura de brilho, a correção atmosférica, que leva em conta o mascaramento de nuvens, a transmitância atmosférica e a emissividade. Trata-se de um método que busca eliminar os contaminantes atmosféricos, que podem restringir ou impedir o registro da temperatura da superfície continental “real”. Em muitas pesquisas no Brasil, e em partes do mundo, limitam-se a analisar a temperatura de brilho, aquela obtida no topo da atmosfera, sem as demais e necessárias etapas de correção atmosférica, e que erroneamente nomeiam como “temperatura da superfície continental”. Obviamente, aprimoramentos são recomendados para o cálculo da TSC, como, por exemplo, o efeito do vapor de água na transmitância atmosférica, melhores estimativas de emissividade ou da precipitação, que pode superestimar a TSC.

Quando se trata de estudos em clima urbano, o uso de dados *in situ* é importante, tanto para a validação, como para a comparação. Igualmente, as campanhas de campo, seja em transectos fixos ou móveis, para monitoramento da temperatura da superfície, temperatura e umidade relativa do ar, são igualmente necessárias e favoráveis para a complementação na validação do dado remoto.

De fato, as imagens oriundas da plataforma Landsat são de grande representatividade no mapeamento da TSC, por conta da sua extensa série temporal disponível, sendo esta, sem dúvida, a grande vantagem de sua utilização, e tem seu horário regular de passagem entre 9h e 11h para a região metropolitana do Rio de Janeiro, período de início, e em curso, do aquecimento diurno. Entretanto, outros sensores de maior resolução espacial, tais como o ASTER e o MODIS, devem ser incorporados na análise da ilha de calor urbana de superfície na RMRJ. O ASTER faz sua varredura alternada, a cada 16 dias, às 10 e às 22h no estado do Rio de Janeiro, e oferta mais de um produto termal; o MODIS tem uma periodicidade diurna, i.e., pela manhã e à noite, com passagem a cada dois dias.

Futuras missões no infravermelho térmico, tais como o *Thermal infraRed Imaging Satellite for High-resolution Natural resource Assessment* (TRISHNA) da Agência Espacial Francesa (CNES)

e da Organização Indiana de Pesquisa Espacial (ISRO); o *Surface Biology and Geology* (SBG) da cooperação da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) com a Agência Espacial Italiana (ASI); e o Monitoramento da Temperatura da Superfície Terrestre pela Copernicus Sentinel (LSTM); permitirão, através de um sistema A-Train, melhores informações espaciais (<100 m) e temporais (1 dia) sobre a TSC ao longo do tempo, o que pode fornecer uma avaliação mais precisa em toda a RMRJ. Ainda assim, deve-se dar continuidade ao uso dos dados do Landsat, o que já é esperado com as futuras missões do Landsat *Next Generation* (Landsat NEXT), previsto para o lançamento entre 2030 e 2031, algo que promete junto com as outras plataformas complementares a informação, uma vez que a resolução temporal será de 6 dias e a resolução espacial no campo termal em torno de 60m.

Sugere-se a adoção de modelos atmosféricos de mesoescala, e robustos, como o *Weather Research and Forecasting Model* (WRF), *Icosahedral Nonhydrostatic Model* (ICON), *Applications of Research to Operations at Mesoscale* (AROME), entre outros, que não somente estaria integrado ao sensoriamento remoto para avaliar a temperatura simulada, mas também poderia cooperar no avanço de melhor compreender a gênese e a formação das chuvas urbanas, uma categoria de interesse para observação de possíveis relações com o fenômeno da ilha de calor metropolitana. Sugere-se, ainda, e não menos importante, a adoção de modelos para escalas espaciais mais detalhadas, restritos a camada limite urbana, que podem alcançar os vales (*canyons*) urbanos e simular de maneira mais eficiente os fluxos de energia, calor latente e calor sensível, bem como o papel do vento no contato quase que direto com a rugosidade do solo.

Sugere-se algumas abordagens metodológicas complementares, ou em conjunto, com o sensoriamento remoto a partir do Landsat para o estudo da ilha de calor urbana de superfície na RMRJ, a saber: gerar mapas de classes de uso da terra e cruzá-las com a TSC; elaborar e comparar algoritmos de correção atmosférica; adotar outros sensores para o mapeamento da TSC e da ilha de calor na RMRJ; integrar as imagens de satélite do Landsat com modelos meteorológicos de mesoescala; adotar modelos de escala espacial mais restrita à camada limite urbana (CLU) ou à camada do dossel urbano (CDU).

Outra sugestão relevante refere-se ao estudo detalhado das cidades que se destacaram como o reduto da Ilha de Calor Urbana de Superfície, São João de Meriti e Nilópolis, e da Ilha de Frescor Urbana de Superfície, Magé e Guapimirim. Explorar essas cidades na escala dos seus bairros mostrará o perfil minucioso da TSC, do NDVI, e outro índice complementar a considerar, com vistas ao maior entendimento analítico e da repercussão espacial dos dados.

E a cidade do Rio de Janeiro, protagonista na região metropolitana, permanece no centro dos estudos em clima urbano quanto ao monitoramento da Ilha de Calor e de Frescor Urbanas, com a devida análise setorial por áreas de planejamento e bairros. Nesta perspectiva, busca-se aprofundar o entendimento da configuração espacial dos fenômenos do clima urbano e ampliar mais espaços quanto ao nível de detalhamento e complexidade, como as favelas, que são estruturas espaciais marcantes na paisagem e funcionalidade da cidade.

---

Submetido em 15 de abril de 2025.

Aceito para publicação em 5 de setembro de 2025

## REFERÊNCIAS

- ABOULNAGA, M., TROMBADORE, A., MOSTAFA, M., ABOUAIANA, A. Assessment of Urban Heat Island in Conjunction with Green Coverage in Large Cities: Cairo, Egypt, and Rome, Italy. In: **Livable Cities**. Springer, Cham. 2024, p. 495–617. DOI: <[doi.org/10.1007/978-3-031-51220-9\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-031-51220-9_5)>
- ALMEIDA, P.L.B; RIBEIRO, F.N.D. Multivariate Analysis of the Urban Heat Island of the Metropolitan Area of São Paulo, Brazil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 39, p.1-11; 2024. DOI:<<http://dx.doi.org/10.1590/0102-77863910045>>
- BARROS, H.R. & LOMBARDO, M.A. A ilha de calor urbana e o uso e cobertura do solo em São Paulo-SP. **GEOUSP Espaço e Tempo** (Online), São Paulo, Brasil, v. 20, n. 1, p. 160–177, 2016. DOI: <<https://doi.org/10.11606/issn.2179-0892.geousp.2016.97783>>
- BASSETT, R., P. J. YOUNG, G. S. BLAIR, F. SAMREEN, AND W. SIMM The Megacity Lagos and Three Decades of Urban Heat Island Growth. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 59, p. 2041–2055, 2020. DOI:<<https://doi.org/10.1175/JAMC-D-20-0059.1>>
- BUDHIRAJA, B.; AGRAWAL, G.; PATHAK, P. Urban heat island effect of a polynuclear megacity Delhi – Compactness and thermal evaluation of four sub-cities. **Urban Climate**, v. 32, 2020. DOI:<<https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100634>>
- CARVALHO, R.G.C.; BELÉM, L. B.C., PERES, L.F.; LUCENA, A.J., & MIRANDA, V. F.V.V. Transformações Espaciais e Impactos na Temperatura da Superfície Continental na Área do Complexo Petroquímico do Rio de Janeiro (COMPET). **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 41, n. 2, 2018. DOI:<[https://doi.org/10.11137/2018\\_2\\_438\\_447](https://doi.org/10.11137/2018_2_438_447)>
- CHANDER, G., MARKHAN, B. Revised Landsat-5 TM radiometric calibration procedures and post-calibration dynamic ranges. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, vol. 41, p. 2674 – 2677, 2003. DOI:<<https://doi.org/10.1109/TGRS.2003.818464>>
- CHANDER, G., MARKHAN, B., L., HELDER, D. L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. **Remote Sensing of Environment**, v. 113, p. 893–903, 2009. DOI:<<https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.01.007>>
- CHEN, P. Y., SRINIVASAN, R., FEDOSEJEVS, G., NARASIMHAN, B. An automated cloud detection method for daily NOAA-14 AVHRR data for Texas, USA. **International Journal of Remote Sensing**, v. 23(15), p. 2939-2950, 2002. DOI:<<https://doi.org/10.1080/01431160110075631>>
- CHEN, M., ZHOU, Y., HU, M., ZHOU, Y. Influence of Urban Scale and Urban Expansion on the Urban Heat Island Effect in Metropolitan Areas: Case Study of Beijing–Tianjin–Hebei Urban Agglomeration. **Remote Sensing**. 12(21):3491, 2020. DOI:<<https://doi.org/10.3390/rs12213491>>
- CORRÊA, P. B., CANDIDO, L. A., SOUZA, R. A. F., ANDREOLI, R. V. e KAYANO, M. T. Estudo do fenômeno da Ilha de Calor na cidade de Manaus/AM: um estudo a partir de dados de sensoriamento remoto, modelagem e estações meteorológicas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 2, p. 167–176, 2016. DOI:<<https://doi.org/10.1590/0102-778631220150012>>
- CORREA, W. DE S. C.; AYLAS, G. Y. R.; SANTIAGO, A. M.; SILVA, M. E. S.; VALE, C. C.; SILVA, C. B. DA; PATUCCI, N. N. A Ilha de Calor Urbana em ambiente tropical: a Região Metropolitana da

Grande Vitória no Brasil. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 42, 2022. DOI: <<https://doi.org/10.11606/eISSN.2236-2878.rdg.2022.186970>>

DÍAZ-CHÁVEZ, L., MELENDEZ-SURMAY, R., & ARREGOCÉS, H. A. Urban heat island intensity in coastal cities of northern Colombia using Landsat data and WRF/UCM model. **Case Studies in Chemical and Environmental Engineering**, 9, 100617, 2024. DOI: <<https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.100617>>

DIXON, P. G., T. L. MOTE. Patterns and Causes of Atlanta's Urban Heat Island–Initiated Precipitation. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 42, p. 1273–1284, 2003. DOI: <[https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2003\)042%3C1273:PACOAU%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2003)042%3C1273:PACOAU%3E2.0.CO;2)>

FERREIRA, B.C., OLIVEIRA, L.S. E ESTEVAM, A.L.D. Ilhas de calor e conforto térmico na cidade de Salvador-BA. **Textura**, v. 14, n. 2, p. 74-94, 2021. DOI: <[https://doi.org/10.22479/texturav14n2p74\\_94](https://doi.org/10.22479/texturav14n2p74_94)>

FRANÇA, G. B., ALMEIDA, V. A. D., LUCENA, A. J. D., FARIA PERES, L. D., CAMPOS VELHO, H. F. D., ALMEIDA, M. V. D. & ARCHETTI DOS SANTOS, F. Urban heat island and electrical load estimation using machine learning in metropolitan area of Rio de Janeiro. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 155, p. 5973–5987, 2024. DOI:<<https://doi.org/10.1007/s00704-024-04944-4>>

FRANCA, G. B., CRACKNELL, A. P. A simple cloud masking approach using NOAA AVHRR daytime data for tropical areas. **International Journal of Remote Sensing**, v. 16, p. 1697–1705, 1995. DOI:<<https://doi.org/10.1080/01431169508954506>>

GONZALEZ-TREVIZO, M. E., MARTINEZ-TORRES, K. E., ARMENDARIZ-LOPEZ, J. F., SANTAMOURIS, M., BOJORQUEZ-MORALES, G., & LUNA-LEON, A. Research trends on environmental, energy and vulnerability impacts of Urban Heat Islands: an overview. **Energy and Buildings**, v. 246, 2021. DOI:<<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111051>>

HUETE, A., DIDAN, K., MIURA, T., RODRIGUEZ, E.P., GAO, X., FERREIRA, L.G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, p. 195-213, 2002. DOI:<[https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2)>

HUSSAIN, M. e MAHMUD, I. pyMannKendall: a python package for non parametric Mann Kendall family of trend tests. **Journal of Open Source Software**, vol. 4, n. 39, p.1-3, 2019. DOI: <<http://dx.doi.org/10.21105/joss.01556>>

IAMTRAKUL, P., PADON, A., & CHAYPHONG, S. Quantifying the Impact of Urban Growth on Urban Surface Heat Islands in the Bangkok Metropolitan Region, Thailand. **Atmosphere**, v. 15, n. 1, 2024. DOI:<<https://doi.org/10.3390/atmos15010100>>

JOHANNSEN, F., SOARES, P. M., LANGENDIJK, G. S. On the Deep learning approach for improving the representation of urban climate: the Paris urban heat island and temperature extremes. **Urban Climate**, v. 56, 2024. DOI:<<https://doi.org/10.1016/j.uclim.2024.102039>>

KENDALL, M. **Rank correlation measures**. London: Charles Griffin, 1975.

KRÜGER, E., & ROSSI, F. Quantificação da ilha de calor de Curitiba considerando aspectos de estabilidade atmosférica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 30, n. 4, p. 394–404, 2015. DOI: <<https://doi.org/10.1590/0102-778620130093>>

LUCENA, A.J. **A ilha de calor na região metropolitana do Rio de Janeiro.** Tese (Doutorado). Rio de Janeiro. Programa de Engenharia Civil. Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia (COPPE). Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2012.

LUCENA, A. J. & PERES, L.F. Os grandes empreendimentos do oeste e leste da região metropolitana do Rio de Janeiro e seus impactos na temperatura da superfície e nos índices de vegetação e de área construída. **REVISTA GEONORTE**, v. 3, n. 9, p. 541-554, 2012;

LUCENA, A. J.; PERES, L.F. & MIRANDA, V.V.V. Os espaços de calor da Região Metropolitana e cidade do Rio de Janeiro. In: OSCAR JUNIOR, A.C.; ARMOND, N.B. (org). **A climatologia geográfica no Rio de Janeiro: reflexões, metodologias, e técnicas para uma agenda de pesquisa.** 1<sup>a</sup> ed. Curitiba: Apris, p. 45-67, 2018.

LUCENA, A.J., ROTUNNO FILHO, O.C., FRANÇA, J.R.A.; PERES, L.F.; XAVIER, L.N.R. Urban climate and clues of heat island events in the metropolitan area of Rio de Janeiro. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 111, p. 497–511, 2013. DOI:<<https://doi.org/10.1007/s00704-012-0668-0>>

LUCENA, A.J; PERES, L.F.; ROTUNNO FILHO, O.C. AND FRANCA, J.R.A. Algorithms implementation for land surface temperature estimation based on Landsat data as an indicator of urban heat island. **Joint Urban Remote Sensing Event 2013**, p. 262-266, 2013. DOI:<<https://doi.org/10.1109/JURSE.2013.6550715>>

MANN, H. B. Nonparametric Tests Against Trend. **Econometrica**, v. 13, n. 3, p. 245–59, 1945. DOI:<<https://doi.org/10.2307/1907187>>

MARAFON, G. J., RIBEIRO, M.A., CÔRREA, R.S., VASCONSELOS, V.N. **Geografia do estado do Rio de Janeiro: da compreensão do passado aos desafios do presente.** Rio de Janeiro: Gramma Editora, 2011.

MATHIVANAN, M., & DURAISEKARAN, E. Identification and quantification of localized urban heat island intensity and footprint for Chennai Metropolitan Area during 1988–2023. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 197, n. 91, 2025. DOI:<<https://doi.org/10.1007/s10661-024-13472-7>>

MENDEZ-ASTUDILLO, J., CAETANO, E., PEREYRA-CASTRO, K. Synergy between the Urban Heat Island and the Urban Pollution Island in Mexico City during the dry season. **Aerosol Air Quality Research** v. 22, n. 8, 2022. DOI:<<https://dx.doi.org/10.4209/aaqr.210278>>

MIRANDA, V. F. V. V., PERES, L.F, LUCENA, A. J., FRANÇA, J. R.A. & LIBONATI, R. Urbanization-induced impacts on heat-energy fluxes in tropical South America from 1984 to 2020: The Metropolitan Area of Rio de Janeiro/Brazil. **Building and Environment**, v. 216, 2022. DOI:<<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109008>>

MONTEIRO, C. A. F. **Teoria e clima urbano.** São Paulo: IGEOG/USP, 1976 (Série Teses e Monografias, n. 25).

NÓBREGA, A.M.N.; DUBREUIL, V. Variações temporais e espaciais na intensidade da ilha de calor urbana na cidade do Recife – PE (Brasil). **Revista de Geografia - PPGeo - UFJF**, v. 12, n. 2, p .84-111, 2022.

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

- PALME, M. Urban Heat Island studies in hot and humid climates: a review of the state of art in Latin-America. In: ENTERIA, N., SANTAMOURIS, M., EICKER, U. (eds.). **Urban Heat Island (UHI) Mitigation. Advances in 21st Century Human Settlements**. Springer, Singapore, p.123-141, 2021.
- PATRIOTA, E. G., BERTRAND, G. F., ALMEIDA, C. D. N., CLAUDINO, C. M. D. A., & COELHO, V. H. R. Heat the road again! Twenty years of surface urban heat island intensity (SUHII) evolution and forcings in 21 tropical metropolitan regions in Brazil from remote sensing analyses. **Sustainable Cities and Society**, v. 113, 2024. DOI:<<https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105629>>
- PERES, L.F., LUCENA, A. J., ROTUNNO FILHO, O. C., & FRANÇA, J. R. A. The urban heat island in Rio de Janeiro, Brazil, in the last 30 years using remote sensing data. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 64, p.104-116, 2018. DOI:<<https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.08.012>>
- PEREIRA FILHO, A.J; KARAM, H.A. Estimation of long term low resolution surface urban heat island intensities for tropical cities using MODIS remote sensing data. **Urban Climate**, v. 17, p. 32-66, 2016. DOI:<<https://doi.org/10.1016/j.uclim.2016.04.002>>
- QIN, Z., KARNIELI, A., BERLINER, P. A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application to the Israel-Egypt border region. **International Journal of Remote Sensing**, v. 22, n. 18, p. 3719–3746, 2001. DOI:<<https://doi.org/10.1080/01431160010006971>>
- RAMÍREZ-AGUILAR, E. A., & SOUZA, L. C. L. Urban form and population density: Influences on Urban Heat Island intensities in Bogotá, Colombia. **Urban Climate**, v. 29, 2019. DOI:<<https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100497>>
- REINERS, P., HOLZWARTH, S., DIETZ, A., BACHMANN, M., SOBRINO, J.A., KUENZER, C. Fusing AVHRR LST With Geostationary SEVIRI LST to Create a Long-Term Daily Maximum LST Time Series Over Europe. In **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, vol. 18, pp. 2168-2189, 2025. DOI:<<https://doi.org/10.1109/JSTARS.2024.3514734>>
- RIO DE JANEIRO, **Lei nº 8.674**, de 20 de dezembro de 2019. Ratifica a divisão do estado nas regiões de que trata a Lei nº 2.664, de 27 de dezembro de 1996, para efeitos de distribuição dos 25% da receita de ICMS aos municípios.
- ROCCIO, L., BARSI, J. The intervening atmosphere: Tracing the provenance of a favorite Landsat infographic. **Landsat Science**, 2020. Disponível em: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/article/the-intervening-atmosphere-tracing-the-provenance-of-a-favorite-landsat-infographic/> Acessado em: Setembro de 2025.
- ROCHA, G. S., DEBREUIL, V., & MENDONÇA, F. A. A estabilidade atmosférica e a ilha de calor urbana na área conurbada de Florianópolis-SC. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 27, p. 900–918, 2021. DOI:<<http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v27i0.76237>>
- ROUSE, J.W.JR., HAAS, R.H., DEERING, D.W., SCHELL, J.A., HARLAN, J.C. **Monitoring the Vernal Advancement and retrogradation (Green Wave Effect) of natural vegetation**. NASA/GSFC. Type III Final Report, Greenbelt, MD, 1974, 371p.

- SÁNCHEZ-SÁNCHEZ, F. A., VEGA-DE-LILLE, M., CASTILLO-ATOCHÉ, A. A., LÓPEZ-MALDONADO, J. T., CRUZ-FERNANDEZ, M., CAMACHO-PÉREZ, E., & RODRÍGUEZ-RESÉNDIZ, J. Geo-Sensing-Based Analysis of Urban Heat Island in the Metropolitan Area of Merida, Mexico. **Sensors**, v. 24, n. 19, 2024. DOI:<<https://doi.org/10.3390/s24196289>>
- SARRICOLEA, P., MESEGUR-RUIZ, O. Urban Climates of Large Cities: Comparison of the Urban Heat Island Effect in Latin America. In: HENRÍQUEZ, C., ROMERO, H. (eds.). **Urban Climates in Latin America**. Springer: Cham, p.17-32, 2019. DOI:<[https://doi.org/10.1007/978-3-319-97013-4\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-319-97013-4_2)>
- SEN, P. K. Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. **Journal of the American Statistical Association**, v. 63, n. 324, p. 1379–1389, 1968. DOI:<<https://doi.org/10.2307/2285891>>
- SILVA, M.M., AMORIM, R.F. CASTELHANO, F.J. Panorama nacional das pesquisas em clima urbano da década de 2012-2022. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 17, n. 6, p. 4015–4028, 2024. DOI:<<https://doi.org/10.26848/rbgf.v17.6.p4015-4028>>
- SOUZA, V. e GALVANI, E. Comparação entre temperatura de superfície estimada por geotecnologias e registrada em geotermômetros na região metropolitana de São Paulo. **Geo UERJ**, n. 41, 2022. DOI:<<https://doi.org/10.12957/geouerj.2022.55409>>
- SOUZA, J.D., SILVA, B.B. Correção atmosférica para temperatura da superfície obtida com imagem TM: Landsat 5. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 23, n. 4, p. 349-358, 2005. DOI:<<http://dx.doi.org/10.1590/S0102-261X2005000400002>>
- THEIL, H. A Rank-Invariant Method of Linear and Polynomial Regression Analysis. In: RAJ, B., KOERTS, J. (eds.). **Henri Theil's Contributions to Economics and Econometrics**. Advanced Studies in Theoretical and Applied Econometrics. Vol. 23. Dordrecht: Springer, p. 345–381, 1992. DOI:<[https://doi.org/10.1007/978-94-011-2546-8\\_20](https://doi.org/10.1007/978-94-011-2546-8_20)>
- ÜNAL, Y.S., SONUÇ, C.Y., INCECIK, S.; TOPCU, H. S.; DIREN-ÜSTÜN, D. H. & TEMİZÖZ, H. P. Investigating urban heat island intensity in Istanbul. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 139, p. 175–190, 2020. DOI:<<https://doi.org/10.1007/s00704-019-02953-2>>
- USGS – UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. 2024. Disponível em: <http://earthexplorer.usgs.gov/>. Acessado em Janeiro de 2024.
- VAN DE GRIEND, A.A., OWE, M. On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surfaces. **International Journal of Remote Sensing**, v. 14, p. 1119–1131, 1993. DOI:<<https://doi.org/10.1080/01431169308904400>>
- WAI, C. Y., MUTTIL, N., TARIQ, M. A. U. R., PARESI, P., NNACHI, R. C., & NG, A. W. M. Investigating the Relationship between Human Activity and the Urban Heat Island Effect in Melbourne and Four Other International Cities Impacted by COVID-19. **Sustainability**, v. 14, n. 1(378), 2022. DOI:<<https://doi.org/10.3390/su14010378>>
- XU, J., YU, Y., ZHOU, W., YU, W., & WU, T. Effects of the spatial pattern of forest vegetation on urban cooling in large metropolitan areas of China: a multi-scale perspective. **Forests**, v. 15 (10), n. 1778, 2024. DOI:<<https://doi.org/10.3390/f15101778>>

YIN, Z., LIU, Z., LIU, X., ZHENG, W., & YIN, L. Urban heat islands and their effects on thermal comfort in the US: New York and New Jersey. **Ecological Indicators**, v. 154, 2023. DOI: <<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110765>>

ZHENG, T, QU, KE, DARKWA, JO, KAISER, J. C. Evaluating urban heat island mitigation strategies for a subtropical city centre (a case study in Osaka, Japan). **Energy**, v. 250, 2022. DOI: <<https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123721>>

ZHONG, S., Y. QIAN, C. ZHAO, R. LEUNG, AND X.-Q. YANG. A case study of urbanization impact on summer precipitation in the Greater Beijing Metropolitan Area: Urban heat island versus aerosol effects. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 120, 2015. DOI: <<https://doi.org/10.1002/2015JD023753>>