# UTILIZAÇÃO DO ÍNDICE DE ÁREA CONSTRUÍDA (IBI) PARA ANÁLISE DA EVOLUÇÃO ESPAÇO-TEMPORAL DA TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE CONTINENTAL (TSC) NA REGIÃO METROPOLITANA DO RIO DE JANEIRO (RMRJ)

# USE OF THE INDEX-BASED BUILTUP (IBI) INDEX TO ANALYZE THE SPATIO-TEMPORAL EVOLUTION OF THE LAND SURFACE TEMPERATURE (LST) AT THE RIO DE JANEIRO METROPOLITAN AREA (MARJ)

# USO DEL ÍNDICE DE ÁREA CONSTRUIDA (IBI) PARA ANALIZAR LA EVOLUCIÓN ESPACIO-TIEMPORAL DE LA TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE CONTINENTAL (TSC) EN LA REGIÓN METROPOLITANA DE RIO DE JANEIRO (RMRJ)

**Andrews Lucena**
Doutor em Ciências Atmosféricas. Professor Associado do Departamento de Geografia e do Programa de pós-graduação em Geografia da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ)
lucenageo@gmail.com

**Isabela Herbst**
Graduanda em Engenharia de Agrimensura e Cartográfica. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ).
isadealmeidah@gmail.com

**Vanessa Bastos**
PhD in Geography. Teaching and Research Fellow at the University of St Andrews (UK NAWA ULAM). Research Fellow at the Wroclaw University of Environmental and Life Sciences – Poland.
vdsbb@st-andrews.ac.uk

**Vitor Miranda**
Bacharel em Ciências Matemáticas e da Terra - Especialização em Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento; Mestre em Meteorologia – Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).
vitormiranda91@yahoo.com.br

## RESUMO

A região metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ) é um espaço de grandes transformações que resultam em problemas e impactos ambientais, dentre os quais aqueles relacionados ao clima das cidades. O sensoriamento remoto tem se mostrado útil para mensurar, estimar e avaliar as mudanças e impactos na atmosfera urbana e contribuído para a ciência do clima urbano. As imagens de satélite da plataforma *Landsat* são bastante utilizadas para este fim, especialmente quanto à utilização de índices temáticos e estimativa da

Temperatura da Superfície Continental (TSC). O objetivo deste trabalho é analisar a evolução do campo térmico e da área urbana na RMRJ, entre 2001 e 2020, por meio da TSC e do Índice de Área Construída (IBI) extraídos das imagens do satélite *Landsat*. Foram selecionadas as três cidades mais contrastantes no espaço metropolitano e explorados o campo térmico e a sua área urbana. Os resultados mostram que as áreas urbanas evoluíram e coincidem com os mais elevados valores da TSC, dando espaço à manifestação da Ilha de Calor Urbana (ICU), ao passo que aqueles espaços de área natural sem uso urbano expõe a Ilha de Frescor Urbana (IFU). Muitos espaços na RMRJ continuam seu processo de expansão urbana e, portanto, devem integrar o conhecimento do clima urbano ao seu planejamento.

**Palavras–chave:** Região Metropolitana do Rio de Janeiro; Imagens *Landsat*; Temperatura da Superfície Continental; Índice de Área Construída; Sensoriamento Remoto.

## ABSTRACT

The Rio de Janeiro Metropolitan Area (MARJ) is a geographic space of intense transformations. These transformations lead to environmental problems and changes in the climate of the cities within the MARJ. Remote sensing has been shown useful to the science of urban climate, especially for assessing changes in the urban atmosphere. Satellite images from Landsat have been used to assess changes in the urban atmosphere, often through radiometric indices and land surface temperature retrieved from thermal bands. This research analyses the evolution of the thermal field in the MARJ from 2001 to 2020. For that Land Surface Temperature (LST) and the Index-Based Builtup (IBI) index extracted from Landsat images are used. The three most contrasting cities in the MARJ were selected for further analysis of the thermal field. The results show that urban areas have expanded and that this expansion coincides with highest LST values and the occurrence ofUrban Heat Island (UHI). On the other hand, green spaces coincide with the Urban Freshness Island (UFI). Many municipalities in the MARJ continue their urban expansion and need further information to t integrate the knowledge of the urban climate into their planning.

**Keywords:** Metropolitan Area of Rio de Janeiro; Landsat Images; Land Surface Temperature; Index-Based Builtup; Remote sensing.

## RESUMEN

La región metropolitana de Río de Janeiro (RMRJ) es un espacio de grandes transformaciones que generan impactos ambientales, incluso los que se encuentran relacionados con el clima de las ciudades. La teledetección es una herramienta muy utilizada para medir, estimar y evaluar cambios e impactos en la atmósfera urbana y ha contribuido a la ciencia del clima urbano. Las imágenes de satélite de la plataforma

*Landsat* son las más utilizadas para esta finalidad, especialmente al uso de índices temáticos y estimación de la temperatura superficial. El objetivo de este trabajo es analizar los cambios del campo térmico en el área urbana de la RMRJ, entre los años de 2001 y 2020, por medio de la Temperatura de Superficie Continental (TSC) y el Índice de Área Construida (IBI), extraídos de imágenes del satélite *Landsat*. Se seleccionaron las tres ciudades más contrastantes del espacio metropolitano y se exploró el campo termal y su área urbana. Los resultados muestran que las áreas urbanas han evolucionado y coinciden con los valores más altos de TSC, dando espacio a la manifestación de la Isla de Calor Urbano (ICU), mientras que aquellos espacios de área natural sin uso urbano exponen la Isla de Frescura Urbana (IFU). Muchos espacios de la RMRJ siguen en proceso de expansión urbana y, por lo tanto, deben integrar el conocimiento del clima urbano en su planificación.

**Palabras clave:** Región Metropolitana de Río de Janeiro; Imágenes Landsat; Temperatura de Superficie Continental; Índice de Área Construida; Teledetección.

## INTRODUÇÃO

A Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ) é o segundo polo de concentração demográfica e de atividades econômicas do país, com grande volume de atividades e fluxos, oferta de bens e serviços mais especializados e uma alta taxa de urbanização, condições adquiridas por conta da sua posição geográfica e em razão dos processos históricos, econômicos, jurídicos e políticos. No estado de mesmo nome, Rio de Janeiro, a RMRJ concentra, em média, 90,0% 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; BRITO, 2006).

As transformações ocorridas ao longo da história da RMRJ resultaram em uma série de modificações no sistema ambiental, atingindo os recursos hídricos, os sistemas geomorfológicos, biogeográficos e atmosféricos. Uma dessas mudanças, a Ilha de Calor Urbana (ICU), é o principal produto do clima urbano, que na RMRJ é objeto de estudo permanente dos últimos 30 anos com diferentes repercussões metodológicas (MORAES, 2008; MARQUES FILHO et. al., 2009; KARAM et. al., 2010; LUCENA et

al, 2013; PERES et al, 2018) e sua complexidade se dá pelas características de cada espaço geográfico.

A RMRJ é um laboratório dos estudos em clima urbano, que se consolidou na década de 1990 com os trabalhos de BRANDÃO (1992; 1996). Na primeira referência a autora analisa a série temporal da temperatura do ar de estações meteorológicas e indica uma provável influência antrópica sobre os dados ao longo da série (BRANDÃO, 1992). Na segunda referência, a autora se utiliza da técnica de medidas móveis e fixas para mensurar a temperatura do ar e mensurar a ilha de calor urbana (BRANDÃO,1996), que neste caso define a Ilha de Calor Urbana Atmosférica. Este termo ainda não é utilizado na época daquelas publicações, mas que atualmente seria apropriado para distinguir da Ilha de Calor Urbana de Superfície, oriunda da mensuração por sensoriamento remoto. A respeito dos métodos e técnicas em clima urbano, no campo térmico, operados para a RMRJ, consultar a publicação de Lucena e Peres (2017).

O sensoriamento remoto permite pesquisas no campo do clima urbano (GALLO et al., 1995). A partir das bandas termais é possível estimar a temperatura da superfície das cidades RAO (1972). Simultaneamente e complementarmente, são utilizados índices a partir dos demais canais de sensores remotos para reforçar as pesquisas em clima urbano, desde os mais clássicos índices de vegetação, FR, SAVI e NDVI (ZHA et al., 2003; YUAN e BAUER, 2007; XU, 2008; ZHANG et al., 2009. IMHOFF et al., 2010) até índices para áreas construídas, tais como o NDBI, IBI e ISA (ZHA et al., 2003; CHEN et al., 2006; XIAN e CRANE, 2006; YUAN e BAUER, 2007; XU, 2008; ZHANG et al., 2009; IMHOFF et al., 2010).

Herold et al (2003) analisaram temporalmente o crescimento urbano na região de Santa Bárbara (Califórnia) por um período de 72 anos, através de imagens do satélite IKONOS, usando um modelo matemático que permite prever os avanços urbanos com base nos dados de 1930 a 2001, provando o quão importante e acuradas são as análises urbanas com sensoriamento remoto. Lucena et al (2012) analisaram os impactos dos empreendimentos na região metropolitana do Rio de Janeiro por meio da análise de índices temáticos de vegetação, área urbana e temperatura da superfície entre os anos de 2004 a 2011, descrevendo as alterações desses parâmetros com imagens *Landsat*.

A série temporal do *Land Remote Sensing Satellite* (*Landsat*) está acessível gratuitamente e virtualmente aos usuários nacionais através do serviço geológico dos Estados Unidos (USGS). Foram lançados até o momento oito satélites, com os sensores ERTS-1 (*Earth Resources Technology Satellite*), RBV (*Return Beam Vidicon*), MSS (*Multispectral Scanner System*), TM (*Thematic Mapper*), ETM (*Enhanced Thematic Mapper*), ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper Plus*), OLI (*Operational Land Imager*) e TIRS (*Thermal Infrared Sensor*). O nono lançamento da série Landsat está previsto para setembro de 2021. A plataforma *Landsat* representa a maior série temporal se comparada com outros sistemas-sensores em órbita. Desse modo, seu uso traz maior vantagem nas análises que tratam de uma evolução espaço-temporal da temperatura da superfície continental desde 1984, por exemplo.

A Temperatura da Superfície Continental (TSC) é um importante produto da base *Landsat*. Medidas adequadas de TSC são úteis aos estudos de clima urbano devido ao mapeamento e estimativa da Ilha de Calor Urbana, condição limitada à mensuração em estações meteorológicas convencionais. O mapeamento da cidade e das áreas metropolitanas pela TSC favorece o conhecimento e a delimitação dos espaços de calor e frescor, fornecendo orientações às políticas públicas urbano-ambientais.

Complementares ao uso da TSC, os índices derivados do Landsat ampliam a análise espacial do clima urbano e da sua Ilha de Calor Urbana (ICU) associada. O Índice de Área Construída (IBI) é efetivo na identificação de áreas urbanizadas e supressão dos ruídos das imagens, além de possuir uma correlação positiva com a temperatura da superfície terrestre e negativa com índices de vegetação e de água (XU, 2008).

Neste contexto, este artigo propõe uma análise espaço-temporal da evolução do campo térmico e da área urbana na Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ) entre 2001 e 2020 através da Temperatura da Superfície Continental (TSC) e do Índice de Área Construída (IBI) extraídos das imagens de satélite Landsat. Considerando a estatística descritiva (por diagramas de caixa) pretende-se selecionar as três cidades mais contrastantes no espaço metropolitano e explorar seus espaços classificando-as internamente a partir de um ranking de calor e mais urbanos dos seus bairros.

A seção seguinte, que trata de material e métodos, traz uma breve apresentação da Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ) e descreve a técnica estatística de construção dos diagramas de caixa e a estimativa da Temperatura da Superfície Continental (TSC) e do Índice Área Construída (IBI). Nos resultados e discussões, discute-se a composição dos diagramas de caixa para as cidades selecionadas e são analisados os mapas de TSC e IBI da RMRJ, com destaque aquelas cidades selecionadas e seus bairros mais quentes e mais urbanizados; finalmente, nas considerações finais, são mostradas as conclusões, abordando o papel do método adotado, assim como a sua limitação, as contribuições e a proposição de trabalhos futuros no contexto deste tema.

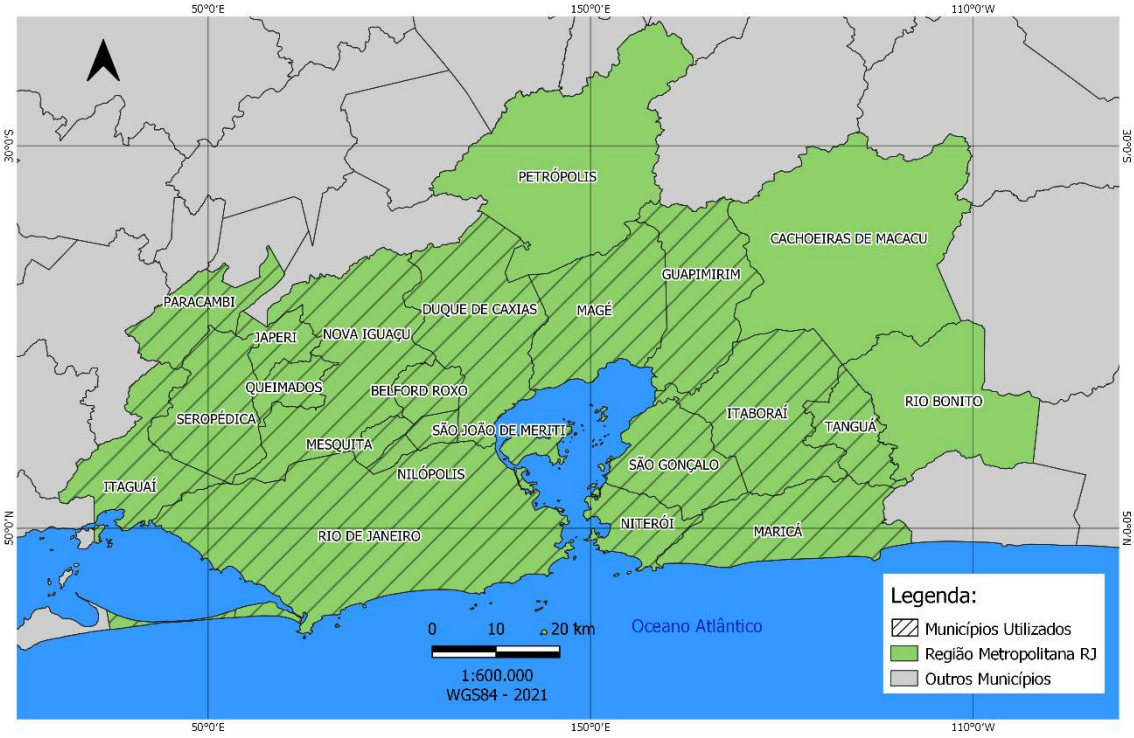
## MATERIAIS E MÉTODOS

### Área de Estudo

A região metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ), situada na região sudeste do Brasil, no estado do Rio de Janeiro, foi definida em 2018 pela Lei Complementar Estadual nº 184, que descreve sua composição, organização e gestão, e define funções públicas e de interesse comum. A RMRJ é composta por Rio de Janeiro, Belford Roxo, Cachoeiras de Macacu, Duque de Caxias, Guapimirim, Itaboraí, Itaguaí, Japeri, Magé, Maricá, Mesquita, Nilópolis, Niterói, Nova Iguaçu, Paracambi, Petrópolis, Queimados, Rio Bonito, São Gonçalo, São João de Meriti, Seropédica e Tanguá (Figura 1).

Neste estudo, foram utilizadas 19 das 22 cidades da RMRJ (Figura 1), as exceções foram Petrópolis, Cachoeiras de Macacu e Rio Bonito. Isto se deve ao fato destas cidades ultrapassarem o limite da cena Landsat. Incluí-las em um possível mosaico não é viável, visto que a resolução temporal do *Landsat* é de 16 dias, o que poderia excluir as informações reais do espaço por conta da temporalidade diferente.

**Figura 1 -** Delimitação da região metropolitana do Rio de Janeiro.




## Tratamento das imagens Landsat

A Temperatura da Superfície Continental (TSC) e o Índice de Área Construída (IBI) foram calculados usando dados de sensoriamento remoto do TM, ETM +, OLI e TIRS a bordo dos satélites *Landsat* 5, 7 e 8, obtidos por meio do *United States Geological Survey* (USGS). Foram consideradas imagens a partir do ano 2001 até o ano de 2020. Apesar de as imagens já serem georreferenciadas, os dados brutos foram corrigidos geometricamente usando o método *Nearest Neighbour* presente em softwares de código livre (e.g. *SPRING*). Tal procedimento foi realizado porque algumas imagens ainda possuíam erros residuais, quando comparados com bases geográficas in-situ.

Conforme o próprio USGS, desde 31 de maio de 2003, o *Scan Line Corrector* (SLC), que compensa o movimento de avanço do Landsat 7, apresentou falhas permanentes, o que gerou linhas de lacunas nas imagens. Vários estudos desenvolveram métodos e algoritmos (SCARAMUZZA et al., 2004) para preencher as devidas linhas nos dados, porém as lacunas sobre o RMRJ cobrem quase todas as cenas e apresentam grande variabilidade. Além disso, boa parte dos métodos utilizam interpolações, o que para a

TSC (que possui alta variabilidade), não é o mais adequado. Assim, apesar dos nossos resultados apresentarem a data de 2012, não serão considerados nas análises textuais. Após esse período, com o término do programa Landsat-5 TM em novembro de 2011, o lançamento do Landsat 8 em março de 2013 garantiu a continuidade do conjunto de dados, sendo a partir desta data o único sistema sensor-satélite considerado.

Em seguida, foi realizada a correção radiométrica para cada banda do Landsat, com base nas equações e constantes de calibração USGS (CHANDER et al., 2009). Com suporte no trabalho de França e Cracknell (1995), foram adotadas três técnicas de mascaramento de nuvens: a) técnica com base em limiar do valor da reflectância na banda 3; b) técnica com base em limiar do valor de temperatura de brilho na banda 6; c) técnica da razão entre as bandas 4 e 3. As três técnicas identificam se o pixel está coberto por nuvens ou não.

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

Após as correções geométricas, radiométricas e o mascaramento de nuvens, é feito o cálculo da Temperatura da Superfície Continental (TSC), que é estimada utilizando as bandas termais (e.g. 6 do Landsat 5 e 7, e 10 do Landsat 8), com base em diferentes parametrizações (QIN et al., 2001; JIMÉNEZ-MUÑOZ e SOBRINO, 2003; SOUZA e SILVA, 2005), nas quais a correção atmosférica é realizada utilizando dados de estações meteorológicas na RMRJ. A TSC estimada é resultado da combinação entre a temperatura de brilho nas bandas termais e um fator de correção que considera a influência atmosférica e a emissividade da superfície no sinal registrado pelo instrumento a bordo do satélite. A emissividade foi obtida a partir do NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index)* de acordo com Van de Griend e Owe (1993). A demonstração com as equações e algoritmos de correção geométrica e correção atmosférica podem ser encontradas em Lucena et al. (2013).

**Cálculo dos Índice de Área Construída**

O IBI, do inglês *index-based built up index* (XU, 2008), é usado para identificar áreas construídas. É calculado com base em três índices temáticos: o SAVI

índice ajustado de solos para a vegetação, MNDWI índice de água por diferença normalizada modificado e o NDBI índice de área construída por diferença normalizada. Esses índices radiométricos representam os três mais significativos componentes urbanos (água, vegetação e área construída). O IBI é um índice normalizado, com valores entre -1 e 1, com os valores próximos a um indicando altas taxas de área urbanizada. É calculado com base nos valores de reflectância das bandas do verde (*Green)* e vermelho (*Red*), infravermelho próximo (NIR) e infravermelho médio (MIR).

$$IBI = \frac{\frac{2MIR}{MIR+NIR} - \left[\frac{NIR}{NIR+Red} + \frac{Green}{Green+MIR}\right]}{\frac{2MIR}{MIR+NIR} + \frac{NIR}{NIR+Red} + \frac{Green}{Green+MIR}}$$

**Seleção dos municípios e bairros para análise da TSC e do IBI**

Para selecionar os municípios a serem analisados, geramos uma série temporal de gráficos de caixa dos valores de TSC para cada município da RMRJ no período entre 2001 e 2020. Os gráficos foram gerados com base em todos os pixels de TSC que intersectam o polígono representando o limite político-administrativo de cada município. A partir da análise visual exploratória dos gráficos, selecionamos os municípios, que quando comparados com os demais, apresentaram padrões diferenciados e únicos na distribuição e evolução da TSC. Em seguida, a média, o desvio padrão, o mínimo e o máximo zonal foram calculados para os bairros dos municípios selecionados. As estatísticas zonais foram utilizadas para ranquear os bairros e identificar as três localidades mais quentes nos anos de 2001, 2010 e 2020 para cada município selecionado.

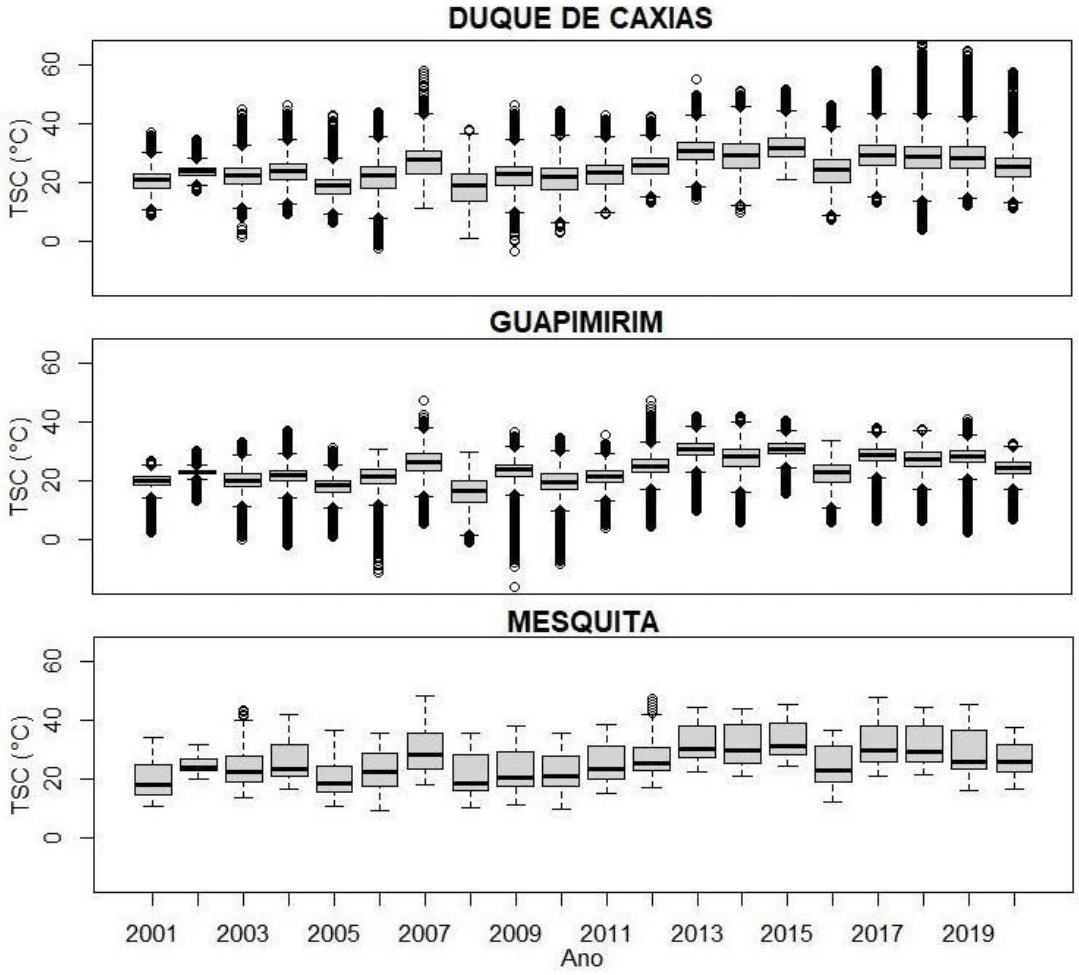
## RESULTADOS E DISCUSSÃO

**Estatística dos gráficos de caixa**

Com base em nossa análise visual exploratória, selecionamos os municípios de Duque de Caxias, Guapimirim e Mesquita (Figura 2). Os municípios de Duque de

Caxias e Guapimirim apresentaram forte presença de *outliers* na série temporal de TSC anual média.

**Figura 2 -** Gráficos de caixa dos municípios Duque de Caxias, Guapimirim e Mesquita.




No caso de Duque de Caxias, até o ano de 2006 os *outliers* são compostos predominantemente por temperaturas acima de 30°,0ºC, mas esse limite aumenta para cerca de 35,0°C entre 2007 e 2012 e para mais de 40,0°C entre 2013 e 2020. O aumento do limite que determina *outliers* indica haver uma tendência de aumento da TSC entre 2001 e 2020. Além disso, em Duque de Caxias também se observa acréscimo no número de *outliers* com o passar dos anos. Essas mudanças nos valores e distribuição da TSC podem ser resultado de modificações nos padrões de cobertura do solo, os quais exploraremos através da análise espacial do IBI no começo, meio e fim da série temporal.

No caso de Guapimirim, até 2006 há predominância de *outliers* compostos predominantemente por temperaturas abaixo de 10,0°C, mas esse limite aumenta para cerca de 18,0°C entre 2007 e 2012 e para cerca de 20,0°C entre 2013 e 2020. O aumento do limite que determina *outliers* indica haver uma tendência de aumento da TSC entre 2001 e 2020. Entretanto, diferente de Duque de Caxias, observa-se relativa estabilidade no número de *outliers* ao decorrer da série temporal. Enquanto as mudanças nos valores da TSC podem ser resultado de modificações nos padrões de cobertura do solo, a relativa estabilidade no número de *outliers* representando temperaturas mais baixas pode estar relacionado às áreas de preservação no município; hipótese que verificaremos na análise do IBI.

Contrastando com os anteriores, o município de Mesquita apresenta certa homogeneidade na série temporal da TSC média anual. *Outliers* são ínfimos e ocorrem apenas no ano de 2003 e no ano de 2012. No entanto, como já explicado anteriormente, evitaremos conclusões baseadas no ano de 2012 devido à falha do SLC do *Landsat* e a necessidade de interpolação dos dados para correção. Apesar da quase inexistência de *outliers*, observa-se também em Mesquita a tendência de elevação da TSC entre 2001 e 2020, registrada pelo aumento da mediana. Na Figura 2 estão representados os diagramas de caixa da distribuição da média anual da temperatura de superfície (TSC) entre 2001 e 2020 para os municípios selecionados. O traço preto nos diagramas de caixa representa a mediana e os círculos indicam os *outliers.*

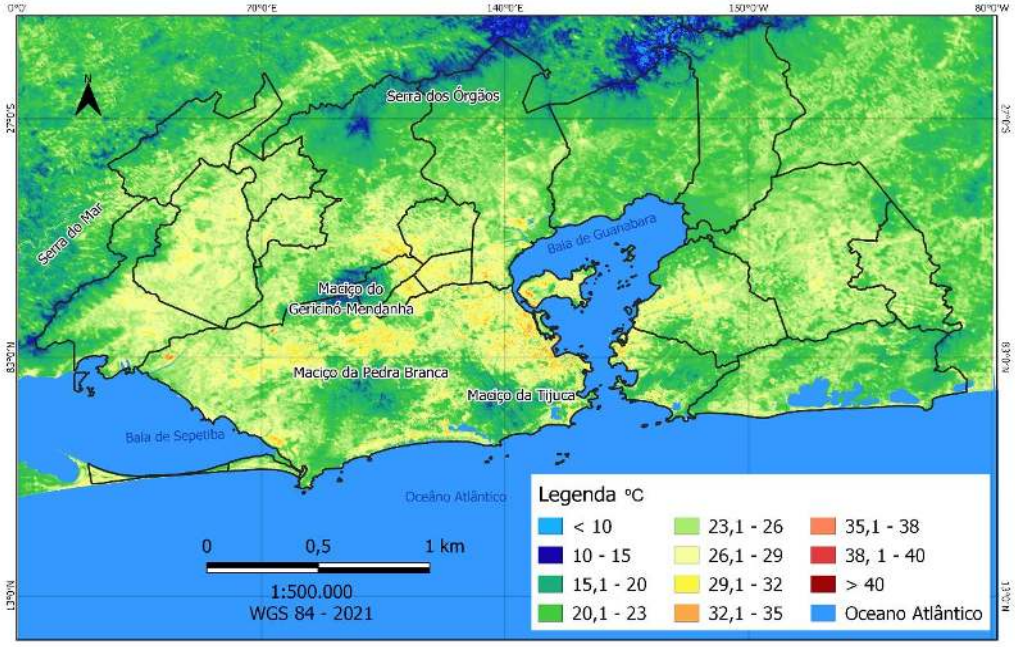
## O mapeamento da Temperatura da Superfície Continental (TSC) na Região Metropolitana do Rio de Janeiro nos anos de 2001, 2010 e 2020

Considerando o mapa da TSC para o ano de 2001 na RMRJ, os espaços mais quentes, iguais ou superiores a 26,0ºC (em tom amarelo), concentraram-se nos principais núcleos urbanos da metrópole, a saber: a baixada da Guanabara, de Jacarepaguá, Bangu e Santa Cruz e a Zona Sul da cidade do Rio de Janeiro, boa parte da Baixada Fluminense, e o setor leste da baía de Guanabara no eixo conurbado Niterói-São Gonçalo (Figura 3). O espaço em tom amarelo, com faixa da TSC entre 26,1 e 32,0ºC é um espaço heterogêneo com diferentes formas e funções de uso urbano, ocupado pelas baixadas que deram início à urbanização carioca e metropolitana, como a Baixada da Guanabara e a

faixa litorânea na Zona Sul da cidade do Rio de Janeiro, enquanto as demais, mais recentes, como Jacarepaguá, Bangu e a Baixada Fluminense, ainda estão em processo de ocupação.

Observam-se naqueles espaços valores acima dos 32,0ºC, que indicam a heterogeneidade espacial da metrópole. São exemplos os locais conectados a avenida Ayrton Senna e Américas na Barra da Tijuca, Zona Oeste da cidade do Rio de Janeiro, a avenida Brasil na Zona Norte da cidade do Rio de Janeiro, e a Rodovia Presidente Dutra entre o bairro de Irajá, na cidade do Rio de Janeiro, e os municípios da Baixada Fluminense, como Belford Roxo, Mesquita, Queimados e São João de Meriti. Acrescenta-se também a rodovia Niterói-Manilha, da BR-101, no setor leste da RMRJ, que conecta Niterói e São Gonçalo, importantes municípios deste setor metropolitano.

**Figura 3 -** Média da TSC na RMRJ em 2001.

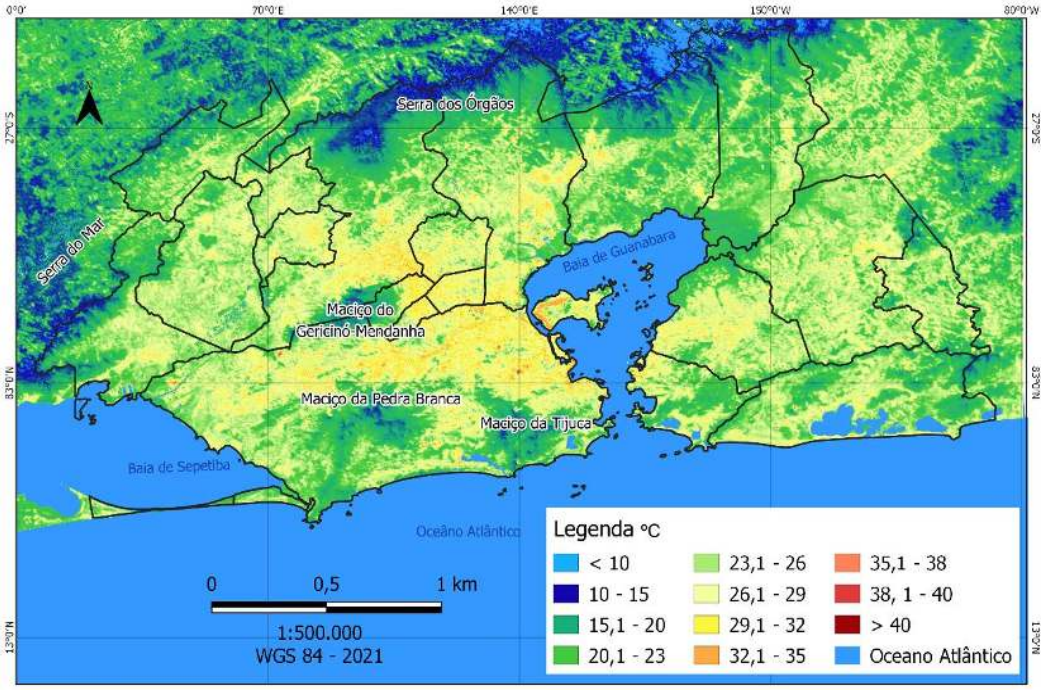



Por outro lado, os espaços mais amenos, com TSC abaixo de 26,0ºC, em coloração verde e azul, estão situados no extremo norte e a nordeste da RMRJ. Tratam-se de cidades com baixa urbanização e extensa área verde, como é o caso das cidades de Duque de Caxias, Guapimirim e Magé, todas na Baixada Fluminense. Os espaços verdes são de grande relevância no arrefecimento da TSC e estão representados pelos conjuntos biogeográficos da Floresta Atlântica na metrópole. Em muitos destes conjuntos a TSC

não ultrapassa 15,0ºC (representado pela cor azul), como no domínio da Serra do Mar, no extremo norte e oeste da RMRJ, que contempla as cidades de Duque de Caxias, Nova Iguaçu e Itaguaí, ou mesmo no seio da cidade do Rio de Janeiro, que conta com três importantes maciços costeiros, representados por Unidades de Conservação, a saber, Tijuca, Pedra Branca e Gericinó-Mendanha (este que divide limite administrativo com os municípios de Nova Iguaçu, Mesquita e Nilópolis, na Baixada Fluminense) .

A Figura 4 reproduz os mesmos espaços mais quentes de 2001, mas com os tons de amarelo e laranja mais destacados, que representam valores da TSC entre 29,0 e 35,0ºC. Valores acima de 35,0ºC, em tom rosado, também são identificados, e mais evidentes, diferentemente do mapa de 2001.

**Figura 4 -** Média da TSC na RMRJ em 2010.




A mancha mais amarela na cidade do Rio de Janeiro conecta a baixada da Guanabara (Zona Norte) à baixada de Jacarepaguá (Zona Oeste) e de Bangu (Zona Oeste). Neste mapa de 2010, é mais evidente a conexão entre a baixada da Guanabara, na cidade do Rio de Janeiro, e os vários municípios da Baixada Fluminense (Duque de Caxias, Nova Iguaçu, São João de Meriti, Mesquita e Belford Roxo). Esta conexão entre a Zona Norte

do Rio de Janeiro e a Baixada Fluminense deixa evidente a conurbação, fenômeno típico de grandes áreas metropolitanas, como é o caso da RMRJ. Apesar da presença de um extenso corpo hídrico, a baía de Guanabara, entre a cidade do Rio de Janeiro e o setor leste da área metropolitana, representada pelas cidades de Niterói, São Gonçalo e Itaboraí, o fenômeno da conurbação também é confirmado, uma vez que os espaços apresentam o mesmo grau de urbanização, de similar história de ocupação urbana na RMRJ.

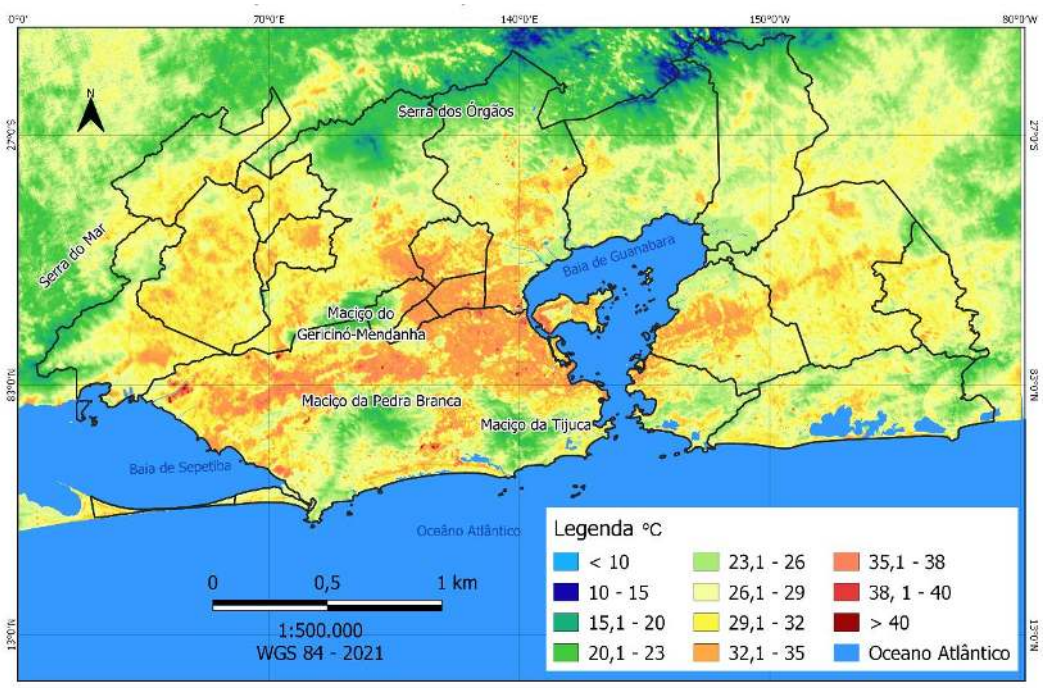
Em 2010 outros espaços também se destacam, antes escondidos no mapa de 2001, como em Duque de Caxias e Nova Iguaçu, as principais cidades da Baixada Fluminense, Itaboraí, no leste metropolitano, e o extremo oeste da cidade do Rio de Janeiro, como os bairros de Santa Cruz e Guaratiba, importantes eixos de expansão urbana atual.

Os espaços mais amenos, em tom verde (entre 15,1 e 23,0ºC), azul escuro (entre 10,1 e 15,0ºC) e azul claro (abaixo de 10,0ºC), estão situados a norte, nordeste, leste e extremo oeste da RMRJ. A norte e nordeste os municípios englobados são Nova Iguaçu, Duque de Caxias, Magé e Guapimirim, todos na Baixada Fluminense, com destaque a Serra do Mar no extremo norte. A leste se destacam Itaboraí, Tanguá e Maricá, enquanto no extremo oeste Itaguaí é o município de destaque. É importante ressaltar a extensão da Serra do Mar, em Itaguaí, que, na direção sul tende a se integrar com os municípios da Costa Verde fluminense, e que em direção norte segue para os municípios da região Serrana. E, finalmente, mas não menos importante, deve-se considerar os espaços dos maciços costeiros na cidade do Rio de Janeiro (em tom azul e verde escuro) que empurram a TSC para valores bem abaixo do complexo urbano carioca, em torno 10,0ºC, o que marca o papel desses espaços de vegetação na cidade.

O mapa de 2020 (Figura 5) reporta os espaços de calor e frescor dos anos anteriores, mas com contrastes mais marcantes. Os espaços contínuos mais quentes vão do tom laranja (32,1 a 35,0ºC) ao rosado (35,1 a 38,0ºC), enquanto os mais amenos estão em tom de verde (entre 15,1 e 26,0ºC). Deste modo, a conexão entre as baixadas da cidade do Rio de Janeiro, permeadas pelos maciços costeiros, são evidentes, assim como a conurbação Baixada da Guanabara, na cidade do Rio de Janeiro, com a Baixada Fluminense.

Deve-se destacar as cidades do Oeste metropolitano (Queimados, Japeri, Seropédica e Itaguaí) e do extremo leste, Itaboraí, com valores de TSC expressivos. Seropédica e Itaguaí têm importantes áreas de exploração de areais que elevam a temperatura do solo, enquanto Itaboraí comportou uma grande parcela territorial para a construção do COMPERJ (Complexo Petroquímico do estado do Rio de Janeiro), iniciado em 2008, e se estendeu e consolidou ao longo da década passada (2011-2020). Queimados e Japeri se integram, aos poucos, à franja urbana metropolitana pelo setor noroeste, e tendem a consolidar suas contribuições à mancha da TSC na RMRJ daqui em diante.

**Figura 5 -** Média da TSC na RMRJ em 2020.

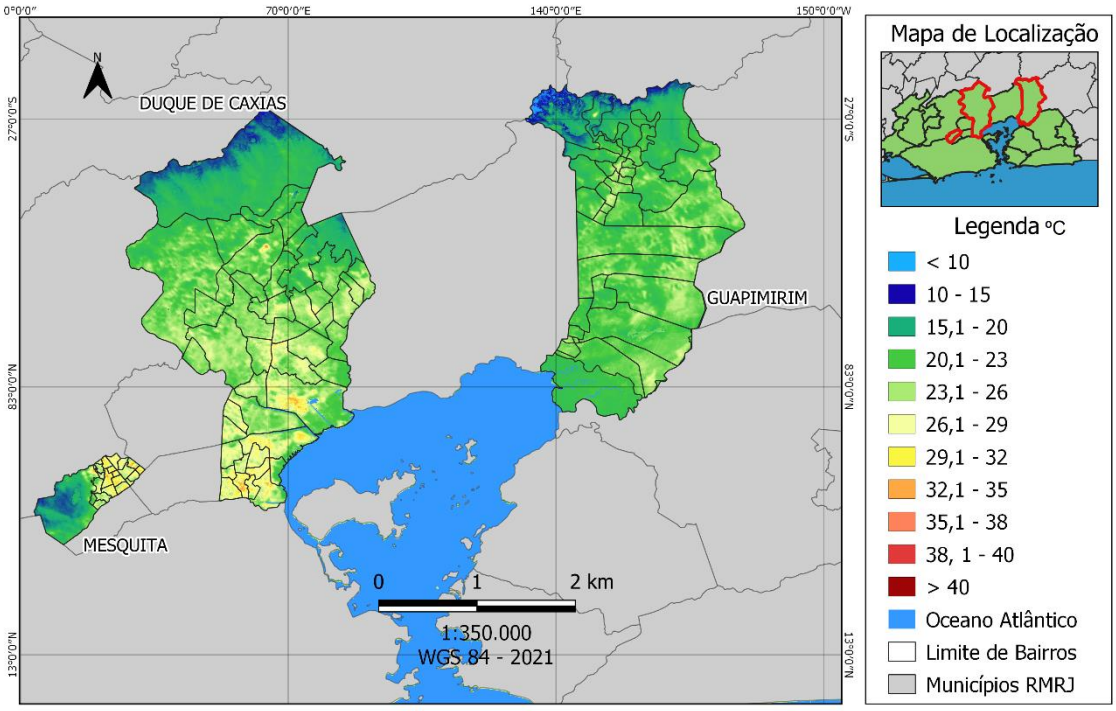



## Mapeamento e estatística da TSC para as cidades de Mesquita, Duque de Caxias e Guapimirim

Para o recorte de 2001 (Figura 6) Guapimirim apresenta o padrão espacial da TSC mais homogêneo com suas médias entre 15,1 e 26,0ºC em tons mais fortes na cor verde. A cidade de Duque de Caxias, de dimensões e forma territorial semelhantes a Guapimirim, apresenta um padrão espacial mais heterogêneo, oscilando entre 10,0 e 23,0ºC (em tons azul e verde escuro) na sua porção norte e central, e entre 23,1 e 32,0ºC (em tons verde claro e amarelo) na porção sul. Na cidade de Mesquita, o padrão espacial

da TSC é semelhante ao de Duque de Caxias, ainda que a dimensão territorial da primeira seja muito menor (cerca de 7 vezes menos) que a segunda. Em Mesquita, a TSC varia entre 23,1 e 32,0ºC (em tons verde claro e amarelo) na porção nordeste e entre 10 e 23ºC (em tons azul e verde escuro) na sua porção central e sul/sudoeste.

**Figura 6 -** Média da TSC nos municípios selecionados em 2001




Esta configuração espacial das três cidades revela a conexão delas com a rede espacial da RMRJ. No caso de Mesquita e Duque de Caxias, seus espaços mais quentes coincidem com a malha conurbada à cidade do Rio de Janeiro e às cidades da Baixada Fluminense, a saber: São João de Meriti, Belford Roxo, Nilópolis e Nova Iguaçu. O setor norte de Duque de Caxias, que registra TSC mais baixa, situa-se na área de vegetação preservada da Serra do Mar, limítrofes de cidades da Região Serrana. Em Mesquita, a TSC mais baixa está situada em sua porção central e sul/sudoeste, uma área também de vegetação, neste caso o Maciço Gericinó-Mendanha, que tem limite administrativo com a cidade do Rio de Janeiro e de Nilópolis, e ocupa quase a metade do território municipal. Finalmente, Guapimirim está situada no extremo leste da Baixada Fluminense, cidade desconectada da malha urbana e conurbada da RMRJ, possui espaços verdes e não

ocupados mais preservados que garantem taxas de urbanização mais baixas e, consequentemente, TSC mais baixas que as demais cidades.

A Tabela 1 mostra os três bairros mais quentes de cada cidade em análise. Considerando a TSC média, Mesquita lidera os valores mais altos, seguida por Duque de Caxias e Guapimirim.

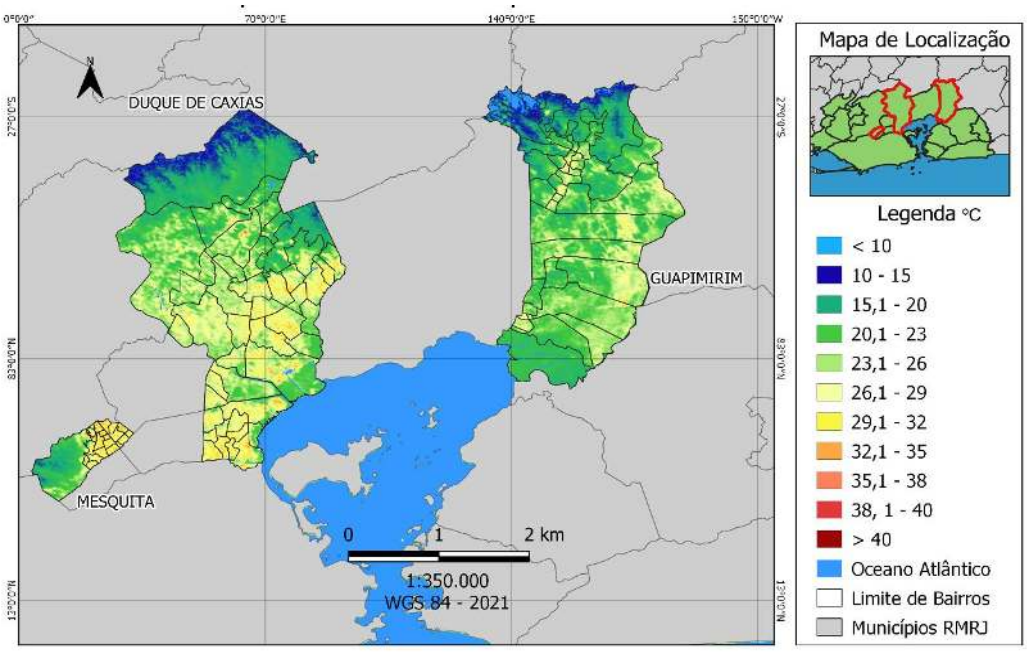
**Tabela 1 -** Bairros com maiores médias de TSC nos municípios selecionados em 2001.

| Bairro | Mín | Máx | Média | Desvio | Município |
|---|---|---|---|---|---|
| BNH | 24,2 | 32,8 | 28,4 | 1,5 | Mesquita |
| Vila Emil | 22,9 | 32,5 | 27,8 | 1,8 | Mesquita |
| Juscelino | 24,1 | 32,5 | 27,8 | 1,5 | Mesquita |
| Vila São Luiz | 23,2 | 33,5 | 26,9 | 1,2 | Duque de Caxias |
| Jardim 25 de Agosto | 21,2 | 32,4 | 26,3 | 2,0 | Duque de Caxias |
| Bar dos Cavaleiros | 20,9 | 32,3 | 26,2 | 1,7 | Duque de Caxias |
| Parque Fleixal | 19,6 | 25,6 | 23,0 | 1,0 | Guapimirim |
| Vila Olímpia | 20,6 | 24,8 | 22,6 | 0,8 | Guapimirim |
| Parque Santo Antônio | 20,6 | 25,5 | 22,2 | 1,0 | Guapimirim |

A TSC mínima em Mesquita também é a mais elevada que as demais cidades, enquanto apenas para a TSC máxima, Mesquita e Duque de Caxias dividem as primeiras colocações. Os bairros com os maiores valores de TSC em Mesquita e Duque de Caxias, estão situados justamente nas porções mais quentes do mapa, isto é, o setor nordeste da primeira, e o setor sul da segunda. Finalmente, em Guapimirim, a Tabela 1 destaca os bairros mais quentes, que visualmente no mapeamento não é evidente por conta da homogeneidade espacial. Os bairros Parque Fleixal e Parque Santo Antônio estão localizados na porção mais central da cidade, enquanto Vila Olímpia está a sudoeste quase na divisa com a cidade de Magé.

Em 2010, a configuração espacial da TSC sofreu pouca alteração, com destaque maior para a cidade de Guapimirim (Figura 7).

**Figura 7 -** Média da TSC nos municípios selecionados em 2010.




Em Guapimirim, a homogeneidade espacial em tons de verde (entre 15,1 e 23,0ºC), do ano de 2001, dá lugar a espaços mesclados em tons de verde e amarelo (entre 26,1 e 29,0ºC) mais localizados na porção norte e leste, quando se destacam os bairros Parque Fleixal e Parque Santo Antônio, respectivamente, conforme Tabela 2. Destaque também ao bairro Vila Olímpia, que se destaca, assim como em 2001, a sul, em amarelo, registrando a mais elevada TSC média do bairro (26,4ºC).

**Tabela 2 -** Média da TSC na RMRJ em 2010

| Bairro | Mín | Máx | Média | Desvio | Município |
|---|---|---|---|---|---|
| Santo Elias | 26,2 | 33,0 | 29,1 | 1,3 | Mesquita |
| Juscelino | 24,2 | 35,7 | 29,1 | 1,5 | Mesquita |
| Cosmorama | 23,5 | 33,8 | 29,0 | 1,3 | Mesquita |
| Bar dos Cavaleiros | 21,9 | 34,1 | 27,8 | 1,6 | Duque de Caxias |
| Vila São Luiz | 23,8 | 35,8 | 27,7 | 1,4 | Duque de Caxias |
| Jardim 25 de Agosto | 19,8 | 32,7 | 27,3 | 2,1 | Duque de Caxias |
| Vila Olímpia | 22,3 | 29,2 | 26,4 | 1,3 | Guapimirim |
| Parque Fleixal | 20,1 | 30,3 | 25,4 | 2,0 | Guapimirim |
| Parque Santo Antônio | 20,8 | 28,7 | 24,2 | 1,4 | Guapimirim |

Em Duque de Caxias sua porção central se destaca um pouco mais que em 2001, com tons mais fortes de amarelo (entre 26,1 e 32,0ºC). Contudo, os bairros mais quentes mantêm-se a sul (Bar dos Cavaleiros, Vila São Luiz e Jardim 25 de Agosto),

alterando, apenas, o ranking de classificação, ou seja, a área mais quente da cidade é aquela conectada à malha urbana da RMRJ. No extremo norte, no distrito de Xerém, na subida da Serra do Mar, em direção à Região Serrana Fluminense, registram os valores mais baixos, com valores, em média, entre 10,0 e 15,0ºC, representados em cor azul escura.

Em Mesquita, a divisão espacial da TSC é mais evidente, quando comparada a 2001, mas preserva a divisão espacial anterior: os valores mais altos a centro-nordeste, em tons de amarelo e laranja (entre 29,1 e 35,0ºC); os valores mais baixos a centro-sul-sudoeste, em verde escuro (entre 15,1 e 23,0ºC). Assim como em Duque de Caxias, os espaços mais quentes são aqueles conectados à malha urbana conurbada da RMRJ, enquanto os mais amenos estão a sudoeste, definidos, especialmente, pelo Maciço Gericinó-Mendanha. Entre os bairros mais quentes deste ano de 2010, quando comparado ao ano de 2001, manteve-se apenas Juscelino, enquanto outros dois, Santo Elias e Cosmorama, tomaram o lugar dos bairros BNH e Vila Emil. Entretanto, aqueles novos bairros estão localizados na mesma área destes, isto é, a centro-nordeste, e com valores da TSC média e máxima, acima do registrado em Duque de Caxias.

Em 2020 a TSC é mais alta, o que determinou maior heterogeneidade espacial nas cidades (Figura 8). Em Guapimirim, a TSC varia do azul ao verde escuros, no setor norte (entre 10 e 23ºC), tons de verde e amarelo no centro sul (entre 23,1 e 32,0ºC) e verde claro no extremo sul (entre 23,1 e 26,0ºC). Destaque para alguns enclaves em tom laranja (entre 32,1 e 35,0ºC), antes não identificados em 2001 e 2010, que são os bairros Quinta Mariana e Vale do Jequitibá, presentes na Tabela 3, como dois dos três bairros mais quentes, com 28,6º e 28,3ºC, respectivamente de TSC média.

**Figura 8 -** Média da TSC nos municípios selecionados em 2020.

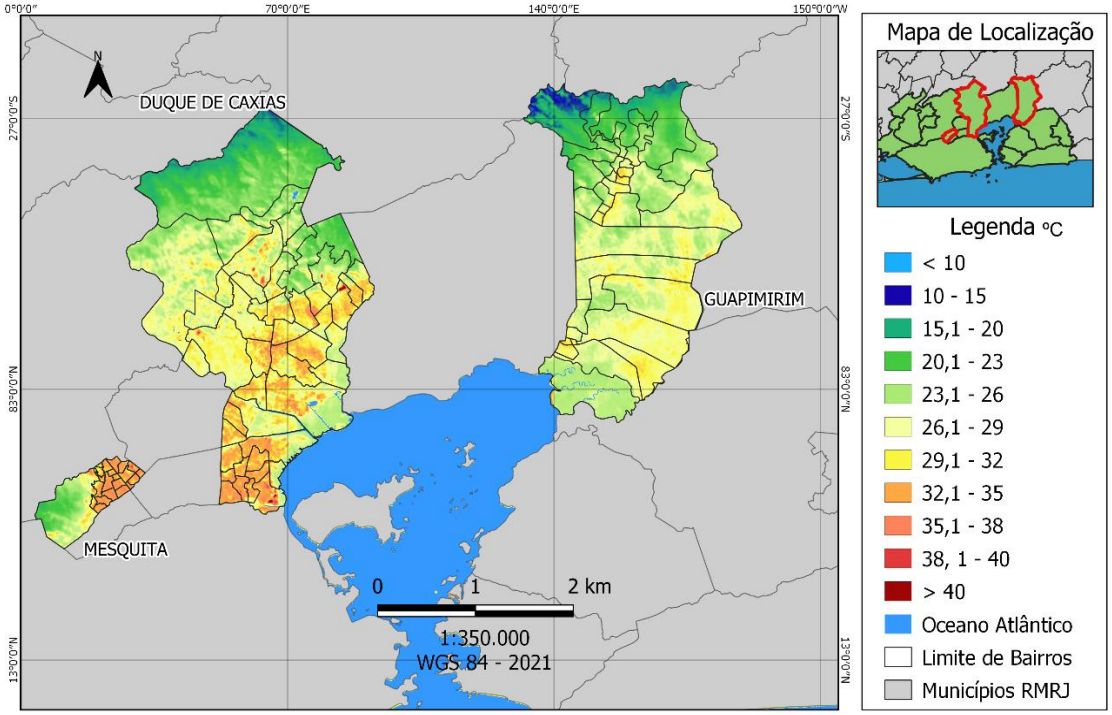



**Tabela 3 -** Média da TSC na RMRJ em 2020

| Bairro | Mín. | Máx. | Média | Desvio | Município |
|---|---|---|---|---|---|
| Édson Passos | 31,1 | 35,0 | 33,3 | 0,7 | Mesquita |
| Industrial | 26,1 | 37,2 | 33,1 | 2,2 | Mesquita |
| Vila Emil | 30,1 | 34,5 | 33,0 | 1,1 | Mesquita |
| Bar dos Cavaleiros | 26,9 | 35,3 | 32,4 | 1,4 | Duque de Caxias |
| Vila São Luiz | 28,5 | 39,0 | 32,1 | 1,2 | Duque de Caxias |
| Periquito | 26,0 | 35,1 | 31,8 | 1,7 | Duque de Caxias |
| Vila Olímpia | 26,8 | 31,0 | 29,2 | 0,9 | Guapimirim |
| Quinta Mariana | 25,7 | 31,1 | 28,6 | 1,1 | Guapimirim |
| Vale do Jequitibá | 25,0 | 31,2 | 28,3 | 1,6 | Guapimirim |

Igualmente, como em 2010 e 2001, o bairro de Vila Olímpia, que também se configura como um enclave no mapeamento atual, mantém-se como um dos bairros mais quentes da cidade, estando no topo do ranking em 2020 e 2010. A porção norte da cidade é uma extensa área de espaço verde, ainda preservado, e que desbrava a Serra do Mar na subida para a região Serrana. Inclusive, trata-se da extensão horizontal da escarpa geomorfológica também situada no setor norte de Duque de Caxias, onde se registram os valores mais baixos da TSC naquela cidade. Ainda em Guapimirim, o seu extremo sul

aponta baixos valores da TSC, e neste caso não se deve à escarpa da Serra do Mar, mas ao remanescente de manguezal do fundo da baía da Guanabara, que resiste ao intenso processo de degradação e poluição.

Em Duque de Caxias, os espaços mais quentes se sobressaltam, localizados no setor sul, em tom laranja e vermelho (TSC entre 32,1 e 40,0ºC). Neste setor estão os bairros mais quentes da cidade, Bar dos Cavaleiros, Vila São Luiz e Periquito, que com exceção do último, que substitui Jardim 25 de Agosto, repete a lista dos dois anos anteriores, 2001 e 2010. A área central mescla TSC com tons de amarelo e laranja (entre 26,1 e 35,0ºC), enquanto o setor norte mantém os valores mais baixos da cidade, representado em tons de verde (entre 15,1 e 26,0ºC).

Finalmente, em Mesquita, sua porção nordeste registra os valores mais altos da TSC (entre 32,1 e 40,0ºC), em tons laranja e vermelho, onde se concentram os bairros mais quentes da cidade, que são Industrial, BNH e Rocha Sobrinho. Diferentemente dos anos anteriores, estes três bairros mais quentes são vizinhos e dividem um amplo espaço urbano, com TSC bem elevada. A sul-sudoeste, onde está situado o Maciço Gericinó-Mendanha, estão os valores mais baixos, com TSC entre 15,1 e 26,0ºC, representado pela cor verde.

## O mapeamento do Índice de Ambiente Construído (IBI) na Região Metropolitana do Rio de Janeiro nos anos de 2001, 2010 e 2020

Os mapas de IBI reproduzem o padrão espacial da TSC exibindo uma relação diretamente proporcional (ainda que técnicas e testes estatísticos não tenham sido empregados neste artigo), ou seja, as áreas de maior estresse vegetal ou com maior indicador de área construída são acopladas às áreas mais quentes (Figuras 9, 10 e 11). Estes espaços contornam a avenida Brasil, na cidade do Rio de Janeiro, desde as imediações da rodoviária, na Área Central, até a Zona Oeste, e persiste pela Zona Sul, Baixada de Jacarepaguá, Baixada Fluminense, Niterói e São Gonçalo, estas duas últimas no leste metropolitano, que formam o principal cinturão urbano da RMRJ.

As Figuras seguintes, que representam o IBI (Figuras 9, 10 e 11), o padrão espacial é bem semelhante. O ano de 2010 apresenta menor contraste, consequência do período das imagens tomadas, e numericamente é observada a diminuição da média de

IBI para as cidades selecionadas (Tabela 4), em que todos os dados estão em valores negativos e mais próximos de zero.

A mancha urbana é destacada pela cor vermelha (anos de 2001 e 2020) e laranja (em 2010), enquanto os espaços mais preservados de vegetação estão em tons de verde e/ou azul, dependendo do ano. Vale destacar alguns espaços da RMRJ, como Seropédica, no extremo oeste, e a cidade de Itaboraí, no extremo leste. Em Seropédica, naqueles três anos, sua área territorial é tomada por tons escuros (laranja ou vermelho), mas que não necessariamente representa área urbana, bastante rarefeita na cidade. Trata-se das condições geológicas do seu solo, onde há muitas atividades de extração de areia, com resposta espectral semelhante ao solo urbano. No caso de Itaboraí, a partir de 2010, é identificado uma mancha em formato retangular, que diz respeito às atividades do complexo petroquímico do Rio de Janeiro, o COMPERJ, que alterou o uso do solo classificando-o como urbano (CARVALHO et. al., 2018), porém este não pode ser confundido com área urbana, ainda que haja especulação urbana proveniente das atividades do COMPERJ.

**Tabela 4 -** Média da IBI nas cidades selecionadas.

| Município /Ano | 2001 | 2010 | 2020 |
|---|---|---|---|
| Mesquita | -0,173 | -0,186 | -0,194 |
| Duque de Caxias | -0,200 | -0,192 | -0,222 |
| Guapimirim | -0,235 | -0,230 | -0,275 |

**Figura 9 -** Índice de Área Construída na RMRJ em 2001

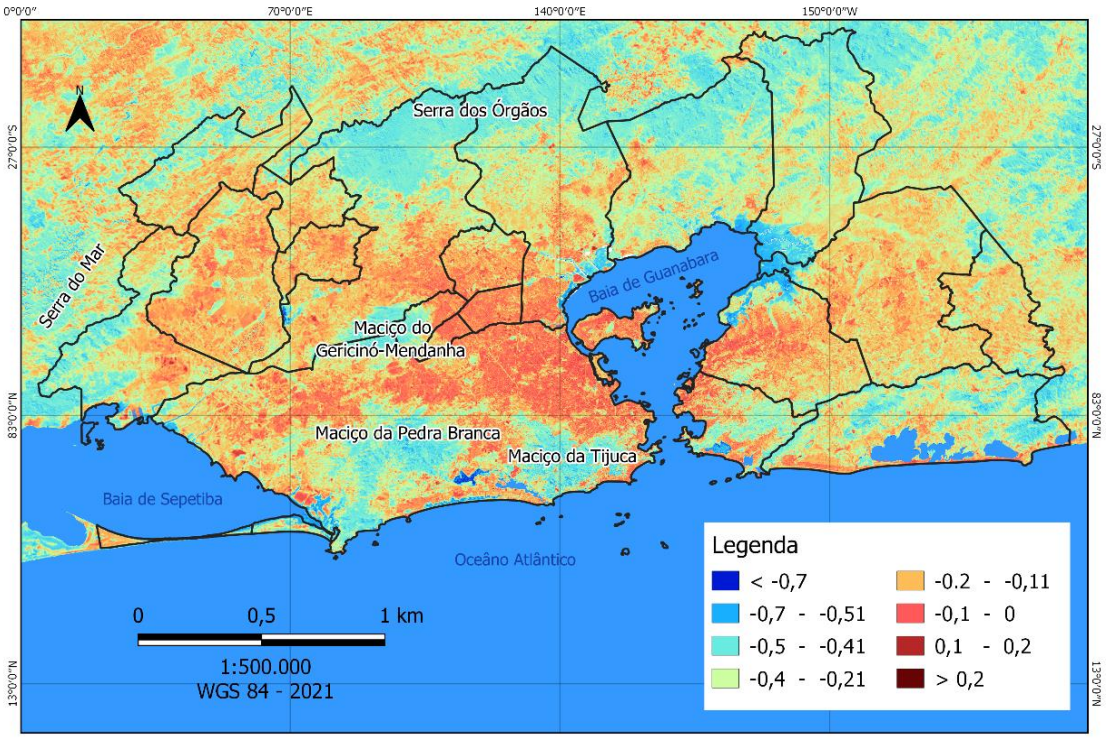
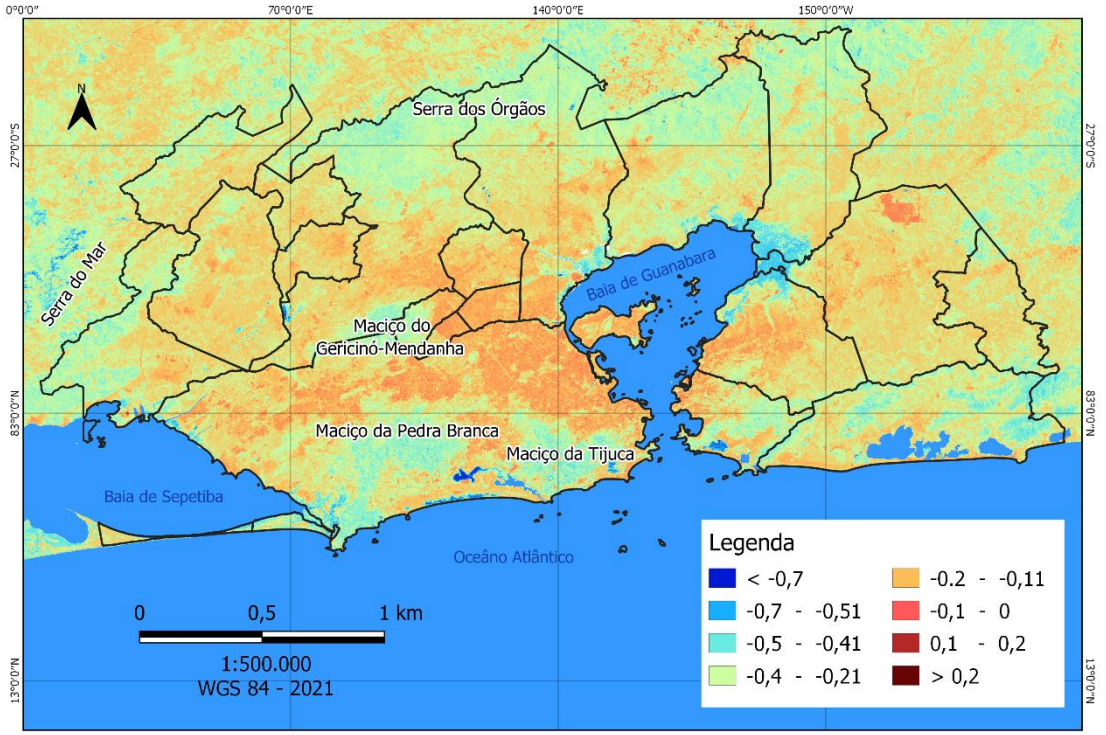
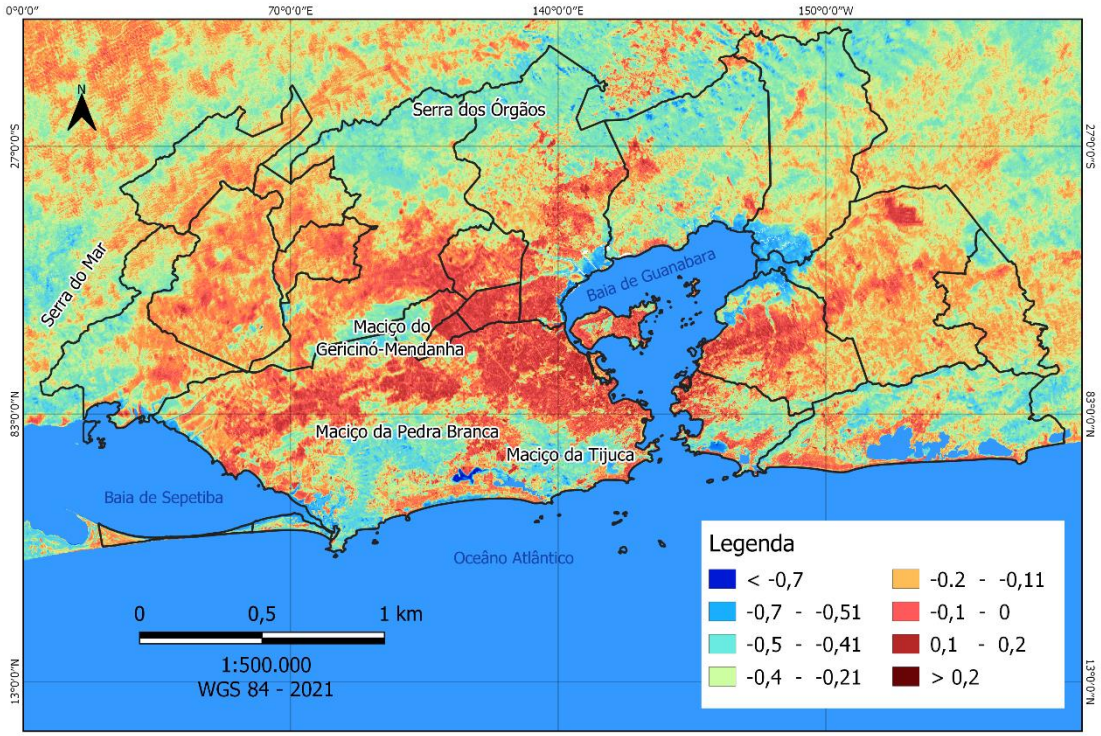



**Figura 10 -** Índice de Área Construída na RMRJ em 2010




.

**Figura 11 -** Índice de Área Construída na RMRJ em 2020.




## Mapeamento e estatística do IBI para as cidades de Mesquita, Duque de Caxias e Guapimirim

A análise espaço-temporal das cidades selecionadas reproduz o padrão já observado na análise anterior para toda a RMRJ, porém numa escala geográfica reduzida, isto é, os espaços com elevado IBI correspondem as maiores médias da TSC, definindo uma relação diretamente proporcional entre o IBI e a TSC (Figuras 12 a 14).

Em 2001, a configuração territorial de Guapimirim e Duque de Caxias são semelhantes, inclusive na espacialização do IBI: os valores mais altos na área central e sul (obviamente que em proporções de adensamento distintos, uma vez que Guapimirim possui uma área urbana inferior e mais rarefeita), enquanto o setor Norte apresenta os valores mais baixos, justamente por conta da presença da Serra do Mar em seus domínios. O extremo sul em Guapimirim e o sudeste de Duque de Caxias correspondem aos espaços semi preservados de manguezal na Baía de Guanabara, que declinam os índices de IBI.

É importante destacar alguns enclaves de elevado IBI em espaços mais preservados, como observado a noroeste em Guapimirim. Certamente se trata de rocha exposta da Serra do Mar. O município de Mesquita apresenta um padrão espacial bem definido, como também observado para a análise da TSC: a norte e nordeste estão os valores mais elevados de IBI (em tom vermelho), e na porção centro-sul os valores mais baixos de IBI (em tom de verde e azul).

A cidade de Mesquita apresenta os valores mais elevados do IBI (Tabela 5), quando comparados a Duque de Caxias, ainda que os bairros BNH (Mesquita) e Vila São Luiz (Duque de Caxias) possuam valores iguais, Mesquita apresenta apenas IBI positivos nos bairros selecionados em 2001.

**Figura 12 -** IBI dos municípios selecionados em 2001.

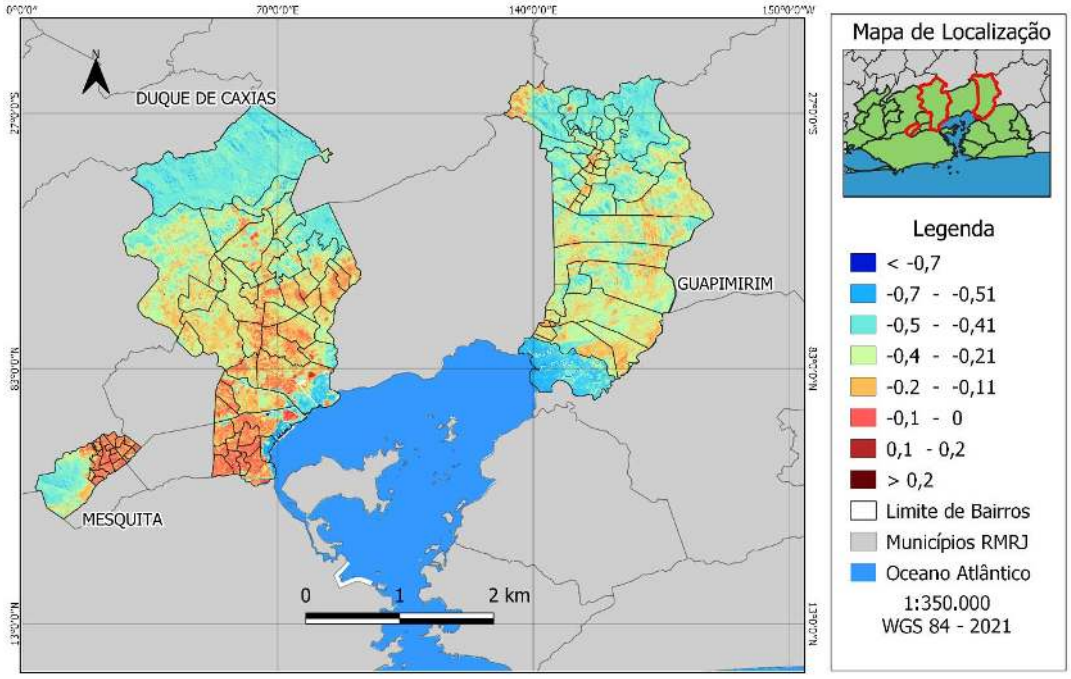



**Tabela 5**: Bairros com maior média de IBI nos municípios selecionados no ano de 2001.

| Bairro | Média | Desvio | Município |
|---|---|---|---|
| BNH | 0,015 | 0,042 | Mesquita |
| Vila Emil | 0,007 | 0,042 | Mesquita |
| Fábrica de Pólvora | 0,004 | 0,022 | Mesquita |
| Vila São Luiz | 0,015 | 0,040 | Duque de Caxias |
| Bar dos Cavaleiros | -0,006 | 0,053 | Duque de Caxias |
| Dr. Laureano | -0,016 | 0,043 | Duque de Caxias |
| Jardim Sto Amaro | -0,060 | 0,051 | Guapimirim |
| Vila Olímpia | -0,076 | 0,045 | Guapimirim |
| Parque Fleixal | -0,116 | 0,063 | Guapimirim |

Em 2010 e 2020, a configuração espacial permanece como em 2001, alterando apenas o rubor da mancha mais escura para os valores mais altos de IBI, sobretudo em 2020 (Figuras 13 e 14), ou seja, os mesmos espaços são destacados. Nas Tabelas dos indicadores de IBI (Tabelas 6 e 7), Duque de Caxias apresenta todos os valores positivos, o que não ocorria em 2001, o que demonstra a expansão da malha urbana. Guapimirim continua com os valores mais altos dos seus bairros negativos, porém em 2010 alguns valores estão mais próximos a zero.

**Figura 13 -** IBI dos municípios selecionados em 2010.

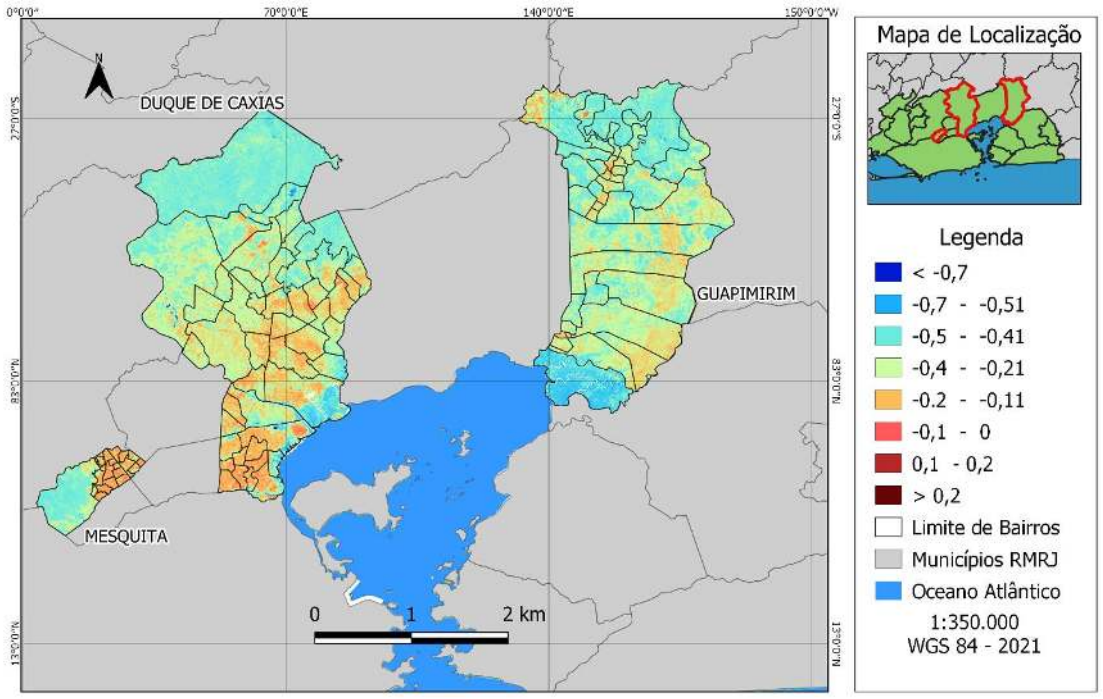



**Tabela 6 -** Bairros com maior média de IBI nos municípios selecionados no ano de 2010.

| Bairro | Média | Desvio | Município |
|---|---|---|---|
| Fábrica de Pólvora | 0,040 | 0,031 | Mesquita |
| BNH | 0,039 | 0,044 | Mesquita |
| Édson Passos | 0,036 | 0,034 | Mesquita |
| Vila São Luiz | 0,037 | 0,047 | Duque de Caxias |
| Bar dos Cavaleiros | 0,012 | 0,074 | Duque de Caxias |
| Dr. Laureano | 0,008 | 0,047 | Duque de Caxias |
| Vila Olímpia | -0,050 | 0,060 | Guapimirim |
| Jardim Santo Amaro | -0,064 | 0,070 | Guapimirim |
| Parque Fleixal | -0,083 | 0,089 | Guapimirim |

**Figura 14 -** IBI dos municípios selecionados em 2020.

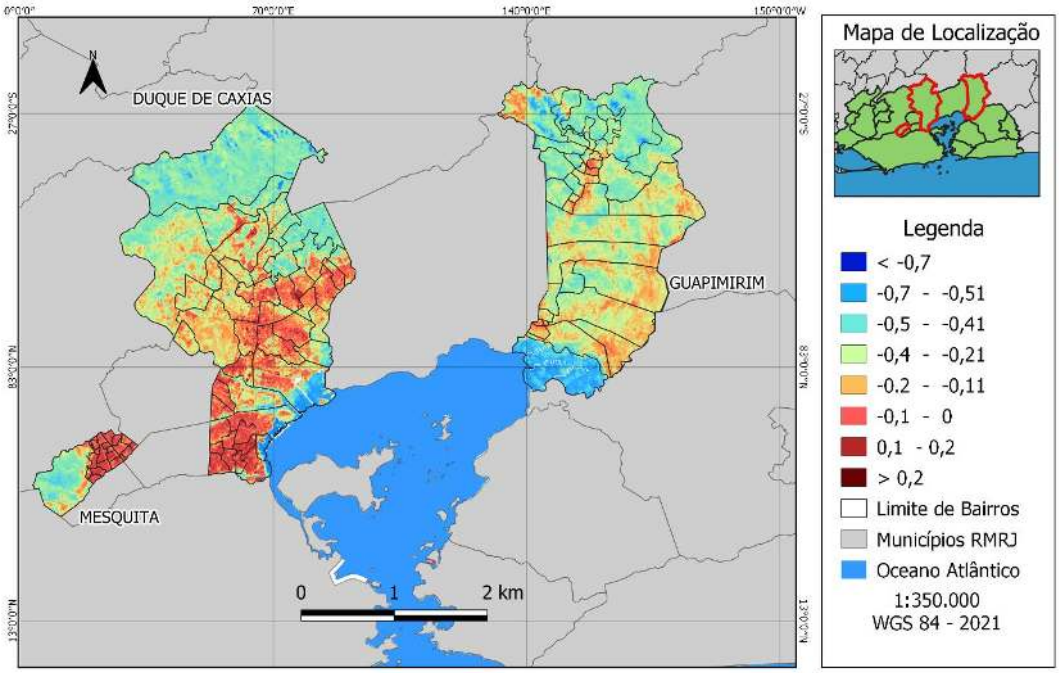



**Tabela 7 -** Bairros com maior média de IBI nos municípios selecionados no ano de 2020

| Bairro | Média | Desvio | Município |
|---|---|---|---|
| Chatuba | 0,039 | 0,030 | Mesquita |
| Fábrica de Pólvora | 0,036 | 0,024 | Mesquita |
| Édson Passos | 0,028 | 0,039 | Mesquita |
| Vila São Luiz | 0,050 | 0,045 | Duque de Caxias |
| Dr. Laureano | 0,019 | 0,039 | Duque de Caxias |
| Periquito | 0,007 | 0,068 | Duque de Caxias |
| Vila Olímpia | -0,075 | 0,046 | Guapimirim |
| Quinta Mariana | -0,084 | 0,059 | Guapimirim |
| Vale do Jequitibá | -0,101 | 0,091 | Guapimirim |

Finalmente, em última análise mostra que os bairros classificados no ranking com os mais elevados valores de IBI repetem alguns bairros com os maiores valores de TSC. Assim, em 2001: BNH e Vila Emil, em Mesquita; Vila São Luiz e Bar dos Cavaleiros, em Duque de Caxias; Parque Fleixal e Vila Olímpia, em Guapimirim. Em 2010: Vila São Luiz e Bar dos Cavaleiros, em Duque de Caxias; Vila Olímpia e Parque Fleixal, em Guapimirim. Em 2010: Edson Passos, em Mesquita; Vila São Luiz e

Periquito, em Duque de Caxias; Vila Olímpia, Quinta Mariana e Vale do Jequitibá, em Guapimirim.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O padrão espacial da Temperatura da Superfície Continental (TSC) mostra que as cidades da Baixada Fluminense conectadas pela malha urbana à cidade do Rio de Janeiro, pela Baixada da Guanabara, são os espaços mais quentes (cerca de 5,0ºC acima) da Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ). São espaços urbanos consolidados conurbados à cidade do Rio de Janeiro conectados pelas rodovias, avenidas e ruas principais dessas cidades. Pode-se concluir que estes são os redutos da Ilha de Calor Urbana (ICU), de diferentes núcleos de intensidade, ainda que não calculados no contexto e proposta deste trabalho. Conclui-se que a RMRJ é um espaço favorável à ocorrência da ICU e sujeita às suas reações adversas.

O Índice de Área Construída (IBI) reproduziu o papel daquelas áreas mais constrangidas pela espacialização de altas TSCs, a saber, as áreas de maior estresse vegetal ou com maior indicador de área construída são acopladas às áreas mais quentes. A inserção de áreas do extremo leste e oeste e de noroeste no circuito das áreas mais aquecidas se equipara à ampliação do IBI, áreas relativamente distantes do núcleo metropolitano, mas que se destacam com núcleos expressivos de TSC, influente na ICU.

Outra característica marcante é o papel dos conjuntos morfológicos que circundam a RMRJ e que operam como um cinturão de isolamento térmico. Nesse conjunto formado pela Serra do Mar, a partir do município de Itaguaí, no extremo oeste metropolitano, até o município de Guapimirim, no contato a nordeste com a região serrana do estado, variando altitudes entre 300 e 2000 metros, até as terras baixas e pequenos morros da baixada litorânea, no extremo leste, os índices de IBI (os mais baixos) combinam-se com os valores mais baixos de TSC. Além do domínio geomorfológico da Serra do Mar e dos maciços costeiros da cidade do Rio de Janeiro, evidentemente que outras pequenas unidades geomorfológicas atuam na amenização da TSC, espalhadas em diferentes espaços da RMRJ.

No contexto das mudanças ambientais do século XXI, a RMRJ é uma caixa de ressonância dos problemas ambientais, com destaque ao clima urbano e o seu campo térmico. A RMRJ reflete e reproduz os problemas e mazelas socioambientais da periferia de uma metrópole deste porte, que também pode representar uma região na periferia/semiperiferia global.

Sugestões de mais e diversos modelos de pesquisas em climatologia urbana são importantes. É possível executar um trabalho envolvendo dados de imagens na faixa do visível como as do *Google Earth*, análise de índices de vegetação e área urbana, como o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) e o Índice de Área Impermeável (ISA), junto dos dados do atual trabalho a fim de determinar quais fatores específicos são responsáveis por elevar a TSC de certos locais. Somam-se outras possibilidades de plataforma de satélite, além do *Landsat*, como o ASTER, *Sentinel*, VIIRS, que operam a banda da faixa termal. Também é viável a comparação dos dados de estimativa da TSC com índices do banco de dados do IBGE com intuito de definir quais áreas possuem maior influência da densidade demográfica na formação da ICU.

As possibilidades de uso dos dados obtidos em sensoriamento remoto, em conjunto com outras ferramentas e metodologias, presentes na literatura científica, são inúmeras e precisam ser exploradas para ampliar e aperfeiçoar a análise e a discussão do clima urbano nas regiões metropolitanas.

## REFERÊNCIAS

BRANDÃO, A. M. de P. M. As Alterações Climáticas na Área Metropolitana do Rio de Janeiro: Uma provável influência do crescimento urbano. In: ABREU, Maurício de Almeida (org.). **Natureza e Sociedade no Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro: Biblioteca Carioca, 1992. p. 143-200.

BRANDÃO, A. M. de P. M. **O Clima Urbano da Cidade do Rio de Janeiro**. 1996. 362f. Tese (Doutorado em Geografia) – Departamento de Geografia, USP/FFLCH, São Paulo, 1996.

BRITO, J.P., O processo de ocupação do território fluminense: uma abordagem inicial sobre a estruturação político-administrativa e regional do estado do Rio de Janeiro. In: **II**

**Simpósio Internacional sobre Cidades Médias**, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil, 6 a 9 de Novembro, 2006.

CARVALHO, R. G. C.; BELÉM, L. B. C.; PERES, L. F.; LUCENA, A. J.; MIRANDA, V. F. V. V. Spatial Transformations and Impacts on the Land-Surface Temperature in the Rio de Janeiro Petrochemical Complex (COMPERJ) Area. **ANUÁRIO DO INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS (UFRJ. IMPRESSO**), Rio de Janeiro, v. 41, p. 438-447, 2018.

CHANDER, G.; MARKHAM, B. L.; HELDER, D. L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. **Remote Sensing of the Environment**, v. 113, p. 893-903, 2009. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.01.007. Acesso em: 15 ago. 2021.

CHEN, X. L.; ZHAO, H. M.; LI, P. X.; YIN, Z. Y. Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes. **Remote Sensing of Environment**, v. 104, n.1, p. 133–146, 2006. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.11.016. Acesso em: 08 ago. 2021.

FRANÇA, G. B.; CRACKNELL, A. P. A simple cloud masking approach using NOAA AVHRR daytime data for tropical areas. **International Journal of Remote Sensing**. Reino Unido, v. 16, p. 1697-1705, 1995.

GALLO, K. P., TARPLEY, J. D., MCNAB, A. L. et al., Assessment of urban heat islands: a satellite perspective. **Atmospheric Research**, Amsterdam, Holanda, v. 37, p. 37-43, 1995.

HEROLD, M.; GOLDSTEIN, N. C.; CLARKE, K. C. The spatiotemporal form of urban growth: measurement, analysis and modeling. **Remote Sensing of Environment**. v. 86, p. 286 -302, 2003. Disponível em: https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00075-0. Acesso em: 10 ago.2021.

IMHOFF, M.L, ZHANG, P., WOLFE, R.E., BOUNOUA, L., Remote sensing of the urban heat island effect across biomes in the continental USA. **Remote Sensing of Environment,** v.114, p.504–513, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.10.008. Acesso em: 17 jul. 2021.

JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C.; SOBRINO, J. A. A generalized single-channel method for retrieving land surface temperature from remote sensing data. **Journal of Geophysical Research**, v. 108, n. D22, 2003. Disponível em: https://doi.org/10.1029/2003JD003480. Acesso em: 02 jul. 2021.

KARAM, H. A.; PEREIRA FILHO, A. J.; MASSON, V.; NOILHAN, J.; MARQUES FILHO, E. P. Formulation of a tropical town energy budget (t-TEB) scheme. **Theoretical and Applied Climatology**, Wien, v. 101, n. 1/2, p. 109-120, 2010. DOI: 10.1007/s00704-009-0206-x.

LUCENA, A. J.; FILHO, O. C.; FRANÇA, J. R.; PERES, L.; XAVIER, L. 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. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s00704-012-0668-0. Acesso em 13 jul. 2021.

LUCENA, A. J.; PERES, L. F.; BARROS, L. R. L.; MARTINS, R. N. 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,** Edição Especial 2, v. 2, n. 5, p. 541 – 554, 2012.

LUCENA, Andrews José de; PERES, Leonardo de Farias. Métodos em clima urbano aplicados à cidade do Rio de Janeiro (Brasil) e sua região metropolitana, The Overarching Issues of the European Space: Society, Economy and Heritage in a Scenario. **FLUP**. Porto, Portugal. p. 312-326, 2017.

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

MARQUES FILHO, E. P.; KARAM, H. A.; MIRANDA, A. G.; FRANÇA, J. R. A. Rio de Janeiro's urban climate. **Urban Climate News - Quarterly Newsletter of the International Association of Urban Climate (IAUC)**, v. 32, p. 5-9, 2009.

MORAES, Nilton Oliveira. Modelagem do mecanismo de formação e desintensificação de ilha de calor na região metropolitana do Rio de Janeiro. Mestrado. **Dissertação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE**, Programa de Engenharia Mecânica, Rio de Janeiro, Brasil, 2008.

PERES, L. F.; LUCENA, A. J.; FILHO, O. C.; FRANÇA, J. R. 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.

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(18), p. 3719–3746, 2001. Disponível em: https://doi.org/10.1080/01431160010006971. Acesso em 20 jul. 2021.

RAO, P. Krishna. Remote sensing of urban heat islands from an environmental satellite, **Bulletin American Meteorology Society**, v. 53, n.7, p. 647-648, 1972.

RIO DE JANEIRO. **Lei Complementar nº 184 de 27 de dezembro de 2018**. Disposições sobre a região metropolitana do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2018.

SCARAMUZZA, P.; MICIJEVIC, E.; CHANDER, G. **SLG Gap-Filled Products. Phase One Metodology.** USGS - United States Geological Survey. Reston, Virginia, p. 5, 2004.

SOUZA, J. D.; SILVA, B. B. Correção atmosférica para temperatura da superfície obtida com imagem TM - Landsat 5. **Revista Brasileira de Geofísica,** Rio de Janeiro, v. 23, n. 4, p. 349-358, 2005.

USGS. **Landsat Missions**. Página inicial. Disponível em: https://www.usgs.gov/landsat/landsat-satellite-missions. Acesso em 30 jul. 2021.

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.** Bethesda, v. 14, p. 1.119-1.131, 1993.

XIAN, G.; CRANE, M., An analysis of urban thermal characteristics and associated land cover in Tampa Bay and Las Vegas using Landsat satellite data. **Remote Sensing of Environment**, v. 104, p. 147–156, 2006. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.09.023. Acesso em 20 jul. 2021.

XU, Hanqiu. A new index for delineating built-up land features in satellite imagery. **International Journal of Remote Sensing,** v. 29, n. 14, p. 4269–4276, 2008. Disponível em: https://doi.org/10.1080/01431160802039957. Acesso em: 29 jul. 2021.

YUAN, Fey; BAUER, Marvin E. Comparison of impervious surface area and normalized difference vegetation index as indicators of surface urban heat island effects in Landsat imagery. **Remote Sensing of Environment**, v. 106, p. 375-386, 2007. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.09.003. Acesso em: 20 jul. 2021.

ZHA, Y.; GAO, J. N. I. S. Use of normalized difference built-up index inautomatically mapping urban areas from TM imagery. **International Journal of Remote Sensing**, v. 24, p. 583–594, 2003. Disponível em: https://doi.org/10.1080/01431160304987. Acesso em: 28 jul. 2021.

ZHANG, Y.; ODEH, I. O. A.; HAN. C. Bi-temporal characterization of land surface temperature in relation to impervious surface area, NDVI and NDBI, using a sub-pixel image analysis. **International Journal Applied Earth Observed and Geoinformation**, v. 11, p. 256–264, 2009. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jag.2009.03.001. Acesso em: 04 ago. 2021.

Recebido em setembro de 2021.

Revisão realizada em outubro de 2021.

Aceito para publicação em novembro de 2021.