

Revista Brasileira de Cartografia (2016), N° 68/7: 1353-1374  
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto  
ISSN: 1808-0936

## **IDENTIFICAÇÃO DAS ALTERAÇÕES NO USO DO SOLO A PARTIR DA ESTIMATIVA DA TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE CONTINENTAL (TSC) E DA ÁREA DE SUPERFÍCIE IMPERMEÁVEL (ISA)**

*Identification of Land Use Changes from the Estimate of Land Surface Temperature (LST) and Impervious Surface Area (ISA)*

**Andrews José de Lucena<sup>1</sup>, Leonardo de Faria Peres<sup>2</sup>,  
José Ricardo de Almeida França<sup>2</sup> & Otto Corrêa Rotunno Filho<sup>3</sup>**

**<sup>1</sup>Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro - UFRRJ**

**Instituto de Agronomia/Departamento de Geociências / Laboratório de Aplicações de Satélites (LASA)**  
BR-465, Km 7 - CEP 23890-000 - Seropédica - RJ – Brasil  
lucenageo@gmail.com

**<sup>2</sup>Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ**

**Instituto de Geociências/Departamento de Meteorologia / Laboratório de Aplicações de Satélites (LASA)**  
Av. Athos da Silveira Ramos, 274, CCMN (Bloco G), Campus Ilha do Fundão—Cidade Universitária, 21949-900  
Rio de Janeiro, RJ, Brasil  
leonardo.peres@igeo.ufrj.br, jricardo@igeo.ufrj.br

**<sup>3</sup>Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ**

Programa de Engenharia Civil, Instituto Alberto Luiz / Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia (COPPE) / Laboratório de Recursos Hídricos e Meio Ambiente (LabH20)  
Caixa Postal 68540, 21945-970 Rio de Janeiro, RJ, Brazil  
otto@coc.ufrj.br; ottorotunno@oi.com.br

***Recebido em 9 de Novembro, 2015/ Aceito em 8 de Abril, 2016***  
***Received on November 9, 2015/ Accepted on April 8, 2016***

### **RESUMO**

Este trabalho visa analisar a evolução do uso do solo na Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ), entre 1980 e 2010, e sua influência sobre o campo térmico por meio do sensoriamento remoto. Foram utilizadas imagens do satélite Landsat 5 e 7 para mapear o uso do solo com quatro classes (urbano, rural ou urbano de baixa densidade, vegetação e corpos hídricos) a cada década (1980, 1990 e 2000) e para estimar a Temperatura da Superfície Continental (TSC) e a Área de Superfície Impermeável (ISA). A obtenção da TSC segue diversas etapas até a sua correção atmosférica, enquanto a ISA é obtida pelo cálculo da fração de cobertura vegetal e da classe de uso do solo “urbano” do pixel. Os resultados indicam que os pixels mais quentes e de classe de uso “urbano” aumentaram ao longo das décadas e espacialmente, concentrando na década de 2000 e nas áreas mais densas da metrópole. Estes resultados sugerem que a RMRJ é um espaço favorável ao fenômeno da ilha de calor urbana e que as técnicas de sensoriamento remoto oferecem as melhores opções para o seu mapeamento, monitoramento e análise.

**Palavras chaves:** Temperatura da Superfície Continental (TSC), Área de Superfície Impermeável (ISA), Imagens Landsat, Ilha de Calor Urbana (ICU).

## ABSTRACT

This work aims to analyze the evolution of land use in the metropolitan area of Rio de Janeiro (MARJ) between 1980 and 2010, and its influence on the thermal field by remote sensing. Landsat-5 and 7 satellite images were used to map land use with four classes (urban, rural or urban low density, vegetation and water bodies) every decade (1980, 1990 and 2000) and to estimate the Land Surface Temperature (LST) and Impervious Surface Area (ISA). Obtaining the LST follows several stages until its atmospheric correction, while ISA is obtained by calculating the fraction of vegetation cover and land use class “urban” pixel. The results indicate that the warmer pixels and that use class “urban” increased over the decades and spatially, concentrating in the 2000s and in the densest areas of the metropolis. These results suggest that MARJ is a favorable space to the phenomenon of urban heat island and remote sensing techniques offer the best options for its mapping, monitoring and analysis.

**Keywords:** Land Surface Temperature (LST), Impervious Surface Area (ISA), Landsat Images, Urban Heat Island (UHI).

## 1. INTRODUÇÃO

Com o advento das cidades e das metrópoles como lócus da vida do homem e como paisagem mais comum do século XXI, a escala regional e local é privilegiada no campo das pesquisas ambientais. Em síntese, as cidades são, atualmente, o principal foco dos estudos ambientais em suas múltiplas abordagens, dentre as quais o estudo do clima urbano.

O campo térmico das cidades sofre impactos diversos por conta de alterações profundas no balanço de radiação e de energia, resultando em anomalias, como as ilhas de calor. As ilhas de calor são um dos principais produtos do clima urbano (OKE, 1987) e um dos principais problemas ambientais do século XXI (RIZWAN *et al.*, 2008). A ilha de calor pode ser considerada uma modalidade de mudanças climáticas, que, causadas por fatores humanos e geradas em escala local, precisam de investigação para sua detecção e compreensão. Essa fenomenologia ambiental urbana, a ilha de calor, está associada à mudança na cobertura da superfície (urbana), que determina padrões bem mais complexos no balanço de energia, e, portanto, seus resultados precisam ser incorporados aos modelos de mudanças climáticas.

Em décadas recentes, o sensoriamento remoto urbano desponta como método e ferramenta essencial para os estudos em clima urbano (VOOGT & OKE, 2003; GRIMOND, 2006). O uso do sensoriamento remoto consiste em uma alternativa objetiva para os estudos de clima urbano permitindo aplicá-lo na avaliação das ilhas de calor urbana (GALLO *et al.*, 1995) a partir do uso das bandas termais. Rao (1972) foi um dos primeiros autores a mostrar a aplicação do sensoriamento remoto ao estudo do clima

urbano: com no uso da banda termal (10,2-12,5 um) do satélite TIROS (ITOS-I), a temperatura da superfície das cidades ao longo da costa do médio Atlântico foi mapeada.

Carlson *et al.*, (1977) examinaram a temperatura da superfície diuturna em Los Angeles a partir das bandas termais entre 10,5-12,5 um do *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR). Foi encontrado um maior gradiente nas zonas industriais e centrais, quando comparadas às regiões vegetadas de Los Angeles. Matson *et al.*, (1978) igualmente utilizaram os dados termais do AVHRR para examinar as diferenças de temperatura da superfície urbana e rural, à noite, para cidades do centro-oeste e nordeste dos EUA.

Até o final da década de 80, grande parte dos trabalhos aborda predominantemente o AVHRR. Com o advento do Landsat-5, a partir de 1984, que disponibiliza uma faixa com a banda termal (banda 6 abrangendo entre 10,4 e 12,5 um), os estudos em clima urbano ganham uma nova ferramenta. Carnahan e Larson (1990) utilizaram a faixa do termal do Landsat-5 para uma data e observaram que a temperatura da superfície em uma área industrializada e urbana de Indianápolis, nos EUA, foi mais baixa do que a superfície rural.

Voogt e Oke (2003) revisam o uso da banda termal para fins de estudo do clima urbano, incidindo principalmente sobre o efeito ilha de calor. Embora ocorram progressos, o avanço é lento e tem se restringido à descrição qualitativa. Os autores salientam o surgimento de novos sensores e do uso cada vez mais difundido dos sensores infravermelhos, o que igualmente explora o monitoramento da ilha de calor e o entendimento do clima urbano.

Weng e Quattrochi (2006) revisam a utilização do sensoriamento remoto para as áreas urbanas com a utilização da banda termal. Os autores discutem a utilização de imagens de satélite de média resolução como o Landsat TM/ETM+ e o Aster e de alta resolução (até 10 metros) do ATLAS. A revisão é agrupada em quatro sub-temas: (1) descrição e análise quantitativa da temperatura da superfície, as ilhas de calor urbana e suas relações com características da superfície e morfologia urbana; (2) validação da radiação térmica e da temperatura da superfície terrestre com medições *in situ* e calibração de imagens termais para uma melhor quantificação e análise dos dados termais sobre áreas urbanas; (3) análise da temperatura da superfície terrestre a partir de correções para efeitos atmosféricos, emissividade da superfície, rugosidade superficial e anisotropia; (4) fluxos de energia em áreas urbanas e as trocas entre a temperatura da superfície da terra, da vegetação, do solo e da água e interações terra-atmosfera.

Simultaneamente, e complementarmente, na literatura internacional e nacional, são utilizados índices a partir dos demais canais do sensor para reforçar as pesquisas em clima urbano, desde os mais clássicos índices de vegetação, *Soil Adjusted Vegetation Index* (SAVI) – ou Índice de Vegetação Ajustado ao Solo - e *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) – ou Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (ZHA *et al.*, 2003; YUAN & BAUER, 2007; XU, 2008; ZHANG *et al.*, 2009; IMHOFF *et al.*, 2010) até índices para áreas construídas, tais como o *Normalized Difference Built-up Index* (NDBI) – ou Índice de Área Construída por Diferença Normalizada -, *Index Based Built-up* (IBI) – ou Índice de Área Construída – e *Impervious Surface Area* (ISA) – ou Área de Superfície Impermeável (ZHA *et al.*, 2003; CHEN *et al.*, 2006; XIAN & CRANE, 2006; YUAN & BAUER, 2007; XU, 2008; ZHANG *et al.*, 2009; IMHOFF *et al.*, 2010).

Imhoff *et al.*, (2010) analisam a ilha de calor urbana, tendo, como índice de análise da área urbana, a área de superfície impermeável (ISA), em diferentes biomas dos Estados Unidos a partir de imagens Landsat e Modis para 2001, 2003, 2004 e 2005. A ISA, como estimativa

da extensão e intensidade de urbanização, é mais expressivo do que métodos baseados na densidade populacional. Para todas as cidades, a ISA foi o principal motor para o aumento da temperatura, explicando 70% da variância total da TSC. Na média anual, as áreas urbanas são mais quente (cerca de 2°C a mais) que a franja não-urbana, exceto para as zonas urbanas em biomas de clima árido e semi-árido. As áreas urbanas em desertos comportam-se de forma diferente mostrando pouca alteração em relação ao seu entorno não urbanizado.

Li *et al.*, (2011) analisam a ilha de calor a partir de duas imagens Landsat ETM + de março e julho de 2001 com base na temperatura da superfície continental (TSC), no NDVI, na Fração de Vegetação (FV) e pela área ISA. Os resultados mostraram que há uma forte relação negativa linear, entre o NDVI e a TSC. Analogamente, ainda mais forte é a relação linear negativa existente entre TSC e FV. A vegetação urbana pode reduzir bem mais a superfície em área da ilha de calor no verão do que no início da primavera. Há uma forte relação positiva entre a TSC e a ISA, sendo o uso do solo residencial o maior contribuinte para a ilha de calor, seguido pelo uso industrial.

No Brasil, são escassos os estudos que discutem a técnica da ISA para relacionar à temperatura urbana. Pode-se destacar o trabalho de Pereira (2006) que investigou, por meio da ISA, o grau de impermeabilização do solo e sua influência sobre o campo térmico no bairro Kobrasol, em São José, Santa Catarina, entre 1985 e 2005. Foi detectado um aumento de 67% na área impermeável entre 1985 e 2005 que pode ter elevado a temperatura do ar em até 7°C.

Outros trabalhos no Brasil, que se utilizam da ISA ou de índices semelhantes, são aplicados para outros fins, e não a relação com a temperatura urbana, como pode ser encontrado em Gutierrez *et al.* (2011), Furtini *et al.* (2007) e Freitas *et al.* (2006).

Neste contexto, o objetivo deste trabalho é mapear e analisar a temperatura da superfície continental (TSC) na Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ) durante as últimas três décadas apoiada na classificação dos tipos de uso do solo e pela Área de Superfície Impermeável (ISA).

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

Nesta seção apresentam-se a coleta, a seleção e o tratamento das imagens e a elaboração dos mapas de uso do solo, indicando critérios e procedimentos na escolha das classes. Segue-se com a estimativa da Temperatura da Superfície Continental, considerando a correção radiométrica e atmosférica e o mascaramento de nuvens. E, finalmente, apresenta-se o cálculo da Área de Superfície Impermeável.

### 2.1 Seleção e pré-processamento das imagens

A base de toda a pesquisa concentrou-se na análise das imagens dos sensores *Thematic Mapper* (TM) e *Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+) a bordo dos satélites Landsat 5 e 7, respectivamente, disponibilizadas gratuitamente pela Divisão de Geração de imagens (DGI) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

O sistema de plataformas Landsat oferece algumas vantagens em relação a outros sistemas de satélites, nomeadamente a sua série temporal relativamente longa, que, no caso da RMRJ, data-se desde 1984, conjugada com sua resolução espacial. Apesar da série de satélites polares da *National Oceanic Atmospheric Administration* (NOAA) possuir, a bordo, o AVHRR também com bandas no infravermelho termal e uma série temporal um pouco mais extensa, desde 1979, sua resolução espacial de 1,1 km é muito aquém, em termos de nível de detalhe, quando comparada com a resolução espacial de 30 metros oferecida pelo Landsat.

Foram escolhidas as imagens dos sensores TM e ETM+, presentes nas imagens da série 5 e 7, com bandas espectrais na faixa do visível, infravermelho próximo, termal e distante, com resolução espectral variando entre 0,45 e 12,5  $\mu\text{m}$ , que varia entre, por conta da presença da banda (termal) 6, não presente nas séries de 1 a 4. A banda 6 está posicionada dentro da janela atmosférica no intervalo espectral entre 10,40  $\mu\text{m}$  - 12,50  $\mu\text{m}$  correspondente à região do infravermelho termal, destinando-se, dessa forma, ao mapeamento da temperatura dos alvos presentes na imagem.

Reuniu-se toda a série temporal, com 99 imagens Landsat-5 e 7, entre 1984 e 2010. Todas as imagens estão situadas na órbita-ponto 217-76, que abrange a RMRJ, e correspondem ao período matutino. Dois critérios foram adotados

para a seleção. O primeiro é a ausência ou a baixa presença de nuvens sobre a área continental da RMRJ. A DGI organiza as cenas por cobertura de nuvens divididas em quatro quadrantes. Foram privilegiadas as imagens com ausência de nuvens nos quadrantes 1 e 2 ou no máximo com 20%. Ainda assim, dentre as imagens com 20%, algumas foram rejeitadas quando as nuvens eram muito espessas e contínuas, tomando uma grande área. A qualidade radiométrica da imagem foi outro critério adotado, isto é, a presença de ruídos em uma das bandas que impedisse o processamento radiométrico da imagem. A verificação da qualidade radiométrica foi realizada tanto visualmente como pela constatação de valores físicos não realísticos.

Um agrupamento por década foi adotado com vistas a analisar a evolução temporal-espacial.

As imagens de 1984 até 1990 correspondem aos anos 80, enquanto, entre 1991 e 2000, aos anos 90, e, de 2001 a 2010, aos anos 2000. Do total das 99 imagens Landsat, 9 compõem os anos 80, 36 compõem os anos 90 e 54 para os anos 2000.

As imagens foram recortadas dentro dos limites de coordenadas geográficas para a RMRJ: canto superior esquerdo ( $-43^{\circ}57'47.33''$ ;  $-22^{\circ}26'12.57''$ ) e canto inferior direito ( $-42^{\circ}36'21.20''$ ;  $-23^{\circ}08'18.95''$ ), conforme Figura 1. Atualmente a RMRJ inclui mais dois municípios (Rio Bonito e Cachoeiras de Macacu, no extremo leste) não demonstrados na Figura 1, pois estão fora da imagem órbita-ponto 217-76, que abrange a configuração da RMRJ até 2013.

As imagens passaram, inicialmente, por um tratamento digital no *SPRING* versão 4.3 (código computacional de sistema de processamento de informações georreferenciadas). Foram georeferenciadas a partir de uma correção geométrica utilizando o modelo polinomial de 1º grau e o interpolador do vizinho mais próximo, segundo o elipsóide de referência WGS84, tendo, como base, as imagens *Geocover\_2003* compostas de dados da série de satélites Landsat (MSS, TM e ETM+). Após o georeferenciamento, foram gerados arquivos denominados “gribs” em formato “geotiff”, que serviram como base para a confecção de mapas de uso do solo e cálculo da temperatura da superfície continental (TSC) e da área de superfície impermeável (impervious surface area - ISA).



Fig. 1 - Imagem Landsat referente à RMRJ.

Além da correção geométrica, realizou-se, como parte do pré-processamento dos dados, a correção radiométrica, que consiste em transformar os dados brutos, inicialmente em números digitais (ND), em dados de radiância para todas as bandas do Landsat. Posteriormente os valores de radiância nas bandas localizadas na região de reflexão solar, i.e., 1-5 e 7, foram convertidas em valores de reflectância ( $\rho$ ) com base na distância Terra-Sol e no ângulo zênite solar. No caso da banda 6, o valor de radiância foi transformado em temperatura de brilho ( $T_b$ ). Essas transformações foram feitas conforme equações e constantes de calibração presentes nos trabalhos de Chander e Markham (2003) e Chander *et al.* (2009).

Em seguida, foram adotadas três técnicas de mascaramento de nuvens para as imagens, com base nos trabalhos de França e Cracknell (1995) e Chen *et al.*, (2003) com base nas reflectâncias nas bandas 3 e 4 e na temperatura de brilho na banda 6: 1) técnica com base em limiar do valor de reflectância na banda 3, o qual foi estabelecido como 0,3 para a RMRJ após vários testes; 2) valor de limiar para a temperatura de

brilho na banda 6 que foi escolhido como 278 K; e 3) técnica da razão Q entre as reflectâncias da banda 4 e 3, a qual é próxima de 1 para a maioria dos pixels com nuvem, menor que 0,8 para os pixels de água e maior que 1,6 para pixels com vegetação. Entretanto, a técnica Q falha sobre a RMRJ na discriminação entre pixels cobertos com nuvem e pixels urbanos. Desta forma, nós adotamos o mesmo procedimento sugerido por Chen *et al.* (2003) para solo exposto no Texas e adicionamos um teste suplementar que leva em consideração a temperatura de brilho na banda 6, onde pixels com valores de Q entre 0,8 e 1,6, e a temperatura de brilho menor que 290 K são classificados como nuvem. Em razão da grande quantidade de nuvens que cobre a superfície terrestre e, principalmente, as regiões tropicais, tanto a estimativa da TSC como o cálculo da ISA tornam-se inadequados com base nos dados do Landsat, visto que as nuvens influenciam tanto a radiação termal emitida como a radiação solar refletida, de forma que a não identificação prévia dos pixels cobertos com nuvem tem como resultado a estimativa errônea dos parâmetros de superfície.

## 2.2 Mapas de uso do solo

Três mapas de uso do solo foram elaborados a partir de três imagens-base, 11/08/87, 25/08/98 e 02/08/07, que representam as décadas de 80, 90 e 2000, respectivamente. Os três dias representam um mês de inverno, agosto, cujas condições do tempo atmosférico são favoráveis a bom tempo, isto é, céu claro e ausência de nuvens, conforme identificado nas datas escolhidas. O método classificador escolhido foi o Bhattacharya presente no código computacional *SPRING*, que utiliza uma distância, denominada de Bhattacharya, para calcular a separabilidade estatística entre cada par de classes espectrais. Este classificador exige a seleção de áreas de treinamento, que sejam representativas das regiões a serem classificadas (OLIVEIRA & MATAVELI, 2013).

A escolha do método ocorreu por uma comparação do desempenho de diversos métodos classificadores, sendo de caráter não supervisionado (K-médias e histograma) e supervisionado (distância Euclidiana, máxima verossimilhança e Bhattacharya). A partir de uma amostra representativa da imagem, denominada como imagem verdade, identificou-se, visualmente, as classes urbano, rural ou urbano de baixa densidade, corpos de água e vegetação. Após o processo de classificação, as imagens foram comparadas à imagem verdade segundo os índices de exatidão global e Kappa (OLIVEIRA, 2009). O método que obteve os melhores resultados foi o Bhattacharya com o índice Kappa de 0,73 (KAZAY *et al.*, 2010).

A escolha das classes de uso do solo também é anterior à classificação, que se dá no procedimento de treinamento do método, onde são fornecidas amostras dos usos com os quais se pretende classificar a imagem. Após esses procedimentos, o método compara os segmentos da imagem pela distância de Mahalanobis, que permite, então, a produção do mapa classificado.

Ao final do processamento, foram extraídas quatro classes, urbano, rural ou urbano de baixa densidade (RUBD), vegetação e corpos de água, consideradas as mais relevantes para análise temporal-espacial do uso do solo.

A classe “urbano” foi definida como as áreas de maior densidade construída, como o adensamento de construções e grandes vias

de circulação. Nessa classe, entram as áreas residenciais e comerciais, horizontais ou verticalizadas da zona norte e zona sul carioca, assim como grandes áreas de favelas, também da zona norte e zona sul, por exemplo. A classe “rural ou urbano de baixa densidade” é definida como áreas de ocupação mais rarefeita, isto é, construções mais espalhadas, com pouco adensamento, um maior alinhamento horizontal, mistura de usos entre o asfalto e solo nu (sem asfalto) e área com vegetação ou mesmo de uso agrícola, presente em extensas áreas da zona oeste carioca e na baixada fluminense. A classe “vegetação” foi estabelecida como toda e qualquer área verde sem distinção de tipo ou espécie vegetal ou de bioma. Desse modo, áreas de “mata nativa”, como em encostas e topos de morros, assim como áreas de parques e praças urbanas com vegetação foram assim classificadas. Finalmente, a classe corpo de água foi definida como todas as áreas hídricas, incluindo água do mar, baías e lagoas até os rios que o algoritmo classificador conseguiu identificar como tal.

A definição das classes partiu da consulta aos dados de população, infraestrutura urbana (ruas e vias com e sem asfalto; casas com laje ou telhas), fotografias aéreas ou imagens do Google Earth e experiência de campo no espaço metropolitano do próprio autor. Os dados e imagens foram consultados junto ao IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), CEPERJ (Fundação Centro Estadual de Estatísticas, Pesquisas e Formação de Servidores Públicos do Rio de Janeiro) e IPP (Instituto Municipal de Urbanismo Pereira Passos da cidade do Rio de Janeiro).

## 2.3 Estimativa da Temperatura da Superfície Continental (TSC)

Grande parte de trabalhos em clima urbano, que fazem uso de dados de sensoriamento remoto no infravermelho termal, utiliza a temperatura de brilho, associada à radiância no topo da atmosfera (SOUZA & SILVA, 2005), como aproximação da TSC. Essa abordagem simplificada deve-se à dificuldade de uma estimativa adequada da TSC a partir de dados de satélite, que requer levar em conta, não só os parâmetros atmosféricos, mas também a emissividade da superfície. Em outras palavras, torna-se necessário corrigir

os efeitos da atmosfera e da emissividade na radiância medida no topo da atmosfera para eliminar quaisquer ruídos que possam interferir na estimativa da TSC real. Nesse contexto, estimou-se a TSC utilizando dados da banda 6 do Landsat.

Os sensores TM e ETM+ a bordo dos satélites Landsat utilizados no presente estudo apresentam somente um canal cobrindo a faixa espectral do infravermelho termal, i.e., canal 6, levando a que se estime a TSC com base em métodos mono-canal. Esses algoritmos utilizam medidas de radiância num único canal dentro da janela atmosférica e assumem a hipótese de que a emissividade é conhecida a priori.

A necessidade de uma descrição precisa do estado da atmosfera no momento da passagem do satélite e de recursos computacionais significativos dificulta a utilização de um único canal para se estimar a TSC. Conseqüentemente, diferentes hipóteses e parametrizações têm sido propostas (e.g., QIN *et al.*, 2001; JIMÉNEZ-MUNÓZ & SOBRINO, 2003; SOUZA & SILVA, 2005) com o intuito de simplificar a correção atmosférica de maneira que seja possível corrigir os seus efeitos com base somente em dados medidos na rede regular de estações meteorológicas, evitando-se, dessa forma, a utilização de radiossondas e de cálculos numéricos de transferência radiativa. Nesse contexto, o presente estudo baseou-se nos trabalhos acima citados para realizar a estimativa da TSC, utilizando dados do Landsat de acordo com a equação (1)

$$T_s = T_b + \Delta T \quad (1)$$

onde:

$T_s$  é a TSC em Kelvin (K);

$T_b$  é a temperatura de brilho na banda 6 obtida de acordo com a equação (2);

$\Delta T$  é o fator de correção que possibilita a estimativa de TSC a partir da temperatura de brilho na banda 6, dado pela equação (3).

$$T_b = \frac{k_2}{\ln\left(\frac{k_1}{L_i} + 1\right)} \quad (2)$$

onde:

$k_1$  e  $k_2$  são as constantes 1 e 2 de calibração do Landsat em  $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$ , que equivale

a 607,76 (Landsat-5) e 666,09 (Landsat-7); e 1260,56 (Landsat-5) e 1282,71 (Landsat-7), respectivamente.

$$\Delta T = \frac{B_i(T_b) \left(\frac{1}{\alpha_i} - 1\right) - \frac{\alpha_1}{\alpha_2} B_i(T_a)}{\frac{\partial B_i(T_b)}{\partial T_b}} \quad (3)$$

onde  $B_i(T_b)$  é a função de Planck que descreve a emissão de um corpo negro para uma dada temperatura, no caso  $T_b$ ,  $\alpha_1$  e  $\alpha_2$  são definidos nas equações (4) e (5):

$$\alpha_1 = \tau_i \varepsilon_i \quad (4)$$

$$\alpha_2 = (1 - \tau_i)[1 + (1 - \varepsilon_i)]\tau_i \quad (5)$$

O fator de correção leva em conta tanto a influência atmosférica como da emissividade no sinal registrado pelo instrumento a bordo do satélite. Dessa forma, é necessário conhecer diferentes parâmetros atmosféricos, nomeadamente a transmitância atmosférica ( $\tau_i$ ) e a temperatura média da camada atmosférica ( $T_a$ ), e também a emissividade da superfície continental ( $\varepsilon_i$ ).

A temperatura média da camada atmosférica foi obtida, de acordo com QIN *et al.* (2001), pela equação (6):

$$T_a = 19,73 + 0,909T_0 \quad (6)$$

onde  $T_0$  é a temperatura do ar a 2m da superfície.

A transmitância atmosférica  $\tau_i$  foi calculada com base numa relação empírica obtida por Souza e Silva (2005) expressa na equação (7):

$$\tau_i = 0,951 - 0,01 \cdot w \cdot \exp\left(\frac{3w}{1+w}\right) \quad (7)$$

onde  $w$  é o conteúdo de vapor de água em  $g \cdot cm^{-2}$ , adquirido de Leckner (IQBAL, 1983), pela equação (2.8):

$$w = 0,493 \cdot UR \cdot \frac{e_s}{T} \quad (8)$$

onde  $UR$  é a umidade relativa e  $e_s$  é a pressão de saturação do vapor de água à temperatura

ambiente em hPa (IQBAL, 1983), calculada pela equação (9):

$$\varepsilon_s = 0,01 \exp\left(26,23 - \frac{5416}{T_0}\right) \quad (9)$$

Valores de  $T_0$  e  $UR$  foram obtidas pela média mensal de todas as estações meteorológicas presentes na RMRJ.

Para a obtenção da TSC, é necessário ainda o conhecimento da emissividade da superfície. Como os sensores TM e ETM+ apresentam somente uma única banda termal, é inviável a aplicação de métodos sofisticados de estimativa de emissividade que, geralmente, utilizam sensores multiespectrais. Em adição ao fato de que os sensores possuem canais localizados na região de 0,6  $\mu\text{m}$  (canal 3) e 0,8  $\mu\text{m}$  (canal 4), optou-se por adotar, como alternativa, a seguinte relação entre a emissividade da superfície e o índice de vegetação NDVI, de acordo com Van de Griend e Owe (1993), a saber na equação (10):

$$\varepsilon_i = 1,009 + 0,047 \ln(\text{NDVI}) \quad (10)$$

onde o NDVI é obtido conforme a equação (11) de Huete *et al.* (2002):

$$\text{NDVI} = \frac{\rho_4 - \rho_3}{\rho_4 + \rho_3} \quad (11)$$

onde  $\rho_3$  e  $\rho_4$  representam as reflectâncias nos canais 4 e 3, respectivamente, do Landsat.

Os valores de TSC, inicialmente em Kelvin (K), foram convertidos posteriormente para graus Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Vale a pena ressaltar que o método adotado para a estimativa da TSC se baseia em diferentes hipóteses e parametrizações com o intuito de simplificar a correção atmosférica. Entretanto, Souza e Silva (2005) mostraram que a TSC é pouco influenciada pelas incertezas em  $T_a$  e  $\tau$ , de modo que uma incerteza de 10% nestes parâmetros resulta num erro inferior a 1,0 K na TSC. Por outro lado a TSC é extremamente sensível às incertezas na  $\varepsilon$ , fazendo com que uma incerteza de 5% neste fator resulte num erro por volta de 2,0 K. Considerando a análise de sensibilidade realizada por Souza e Silva (2005) e os valores típicos associados às incertezas

em  $T_a$ ,  $\tau$  e  $\varepsilon$ , acredita-se que os valores de TSC obtidos neste trabalho apresentem erros inferiores a 2,5 K.

## 2.4 Cálculo da Área de Superfície Impermeável (ISA)

A ISA (do inglês *Imperveous Surface Area*) é um termo que se refere à fração da superfície que é coberta artificialmente, como estradas, prédios, calçadas e estacionamentos, através dos quais a água não pode infiltrar no solo, fazendo com que seu escoamento seja mais rápido e dificultando assim sua evaporação para a atmosfera (HEBBLE *et al.*, 2001). A impermeabilidade é composta por dois componentes: os telhados ou cobertura das residências, prédios e demais habitações e a rede de pavimentação (estradas, calçadas e estacionamentos), geralmente destinada à rede de transportes.

O aspecto mais importante da ISA, como indicador ambiental, é o fato de ser uma das poucas variáveis que podem ser explicitamente quantificadas, geridas e controladas em cada estágio do desenvolvimento (SCHUELER, 1987). Nesse contexto, diferentes estudos têm utilizado a ISA como uma variável fundamental para análises inferenciais ou tomadas de decisões em situações urbanas específicas. Por exemplo, Ridd (1995) demonstrou que a ISA pode ser utilizada como aproximação para a densidade populacional, renda média, valores imobiliários, condições sociais e outros fatores que refletem as condições de vida humana. Luman e Ji (1995) incorporaram a ISA em um esquema de classificação de uso do solo para identificar a distribuição espacial de fontes de emissões antropogênicas que contribuem para os problemas de ozônio troposférico. Além disso, a ISA está intimamente relacionada com a partição da radiação líquida à superfície para aquecer o ar ou evaporar a água e, portanto, é um dos principais determinantes do microclima (CARLSON & ARTHUR, 2000).

Dentre as suas aplicações nos estudos de clima urbano, Yuan e Bauer (2007) investigaram a ISA na estimativa da ilha de calor urbana a partir de quatro imagens Landsat-5 e 7 para períodos sazonais distintos na região metropolitana de Minnesota. Os resultados indicaram uma forte relação linear entre a TSC e a superfície

impermeável para todos os períodos sazonais. Xian e Crane (2006) analisaram o campo térmico de Las Vegas, em Nevada, e Tampa Bay, na Flórida, associado à cobertura do uso do solo a partir de imagens Landsat-5 e 7. Os resultados mostram e comprovam que a densidade urbana, definida segundo classes da ISA, tem efeitos significativos sobre a TSC. Classes de ISA, o NDVI e a TSC juntos conseguem descrever melhor a distribuição espacial e variação temporal nos padrões térmicos da superfície urbana fornecendo informações que favoreçam uma maior qualidade do uso e da cobertura do solo urbano.

Essencialmente, a teoria por trás da estimativa da ISA com base em dados de sensoriamento remoto por satélites é baseada na observação que a ISA é inversamente relacionada com a cobertura vegetal em uma área urbana. Existem duas hipóteses na determinação da ISA por satélites: 1) superfícies não vegetadas em áreas urbanas são quase que inteiramente impermeáveis e 2) não existe superfícies impermeáveis em áreas que não são desenvolvidas. A estimativa da ISA faz uso do cálculo de dois parâmetros de superfície, nomeadamente a fração de cobertura vegetal do pixel e a classificação categórica daquele pixel. Após ter sido feita a classificação, a ISA é calculada somente para os pixels classificados como urbano conforme a equação (12):

$$ISA = (1 - FVC) \quad (12)$$

onde  $FVC$  representa a fração de cobertura vegetal dentro de um pixel classificado como “urbano”, a qual é calculada com base no NDVI, indicada pela equação (13):

$$FVC = \left( \frac{NDVI - NDVI_0}{NDVI_v - NDVI_0} \right)^2 \quad (13)$$

onde  $NDVI$  representa o valor de NDVI atual do pixel,  $NDVI_v$  é o valor de NDVI representativo de um pixel completamente coberto com vegetação (100%) e finalmente  $NDVI_0$  é o valor referente a um pixel com 0% de vegetação, isto é para um pixel de solo nu.

O principal problema quando se aplica a equação (13) é a forma de identificar corretamente

os valores de  $NDVI_v$  e  $NDVI_0$ . Esta é uma tarefa crítica, visto que estes valores variam espacialmente e temporalmente. Uma maneira de definir estes valores é por meio de uso de bibliotecas espectrais que são formadas por medidas de reflectância realizadas em laboratório para diferentes amostras (e.g., solo, vegetação, rochas). Outras técnicas propõem obter estes valores da própria imagem, através de cálculos estatísticos. Uma das técnicas dentro deste grupo faz uma análise do histograma de valores de NDVI presentes na imagem para a escolha adequada de  $NDVI_v$  e  $NDVI_0$ . A técnica utilizada no presente trabalho assume que o valor máximo (mínimo) de NDVI encontrado em toda cena é igual a  $NDVI_v$  ( $NDVI_0$ ). Esta abordagem assume que pixels com valores de  $FVC = 0$  e  $FVC = 1$  existem na imagem analisada.

## 2.5 Composição de máximo valor (CMV)

Finalmente, todas as imagens foram combinadas para gerar mapas de TSC e ISA conforme a divisão estipulada por décadas (1980, 1990 e 2000) utilizando a técnica da composição de máximo valor (CMV).

A técnica diferencia-se do uso comum das médias, pois o pixel com maior valor ao longo da série temporal é selecionado para a composição final, eliminando-se, dessa forma, os pixels contaminados, ainda que aplicado o mascaramento de nuvens e a correção atmosférica. Também se mostra robusta para uma atmosfera relativamente espessa e para várias condições de aerossóis e constituintes atmosféricos (EKLUNDH, 1995). O grau de influência de nuvens, do ângulo de sol, vapor de água, aerossóis e reflectância direcional da superfície são minimizados com a aplicação do CMV (HOLBEN *et al.*, 1986).

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados são assim organizados: o mapeamento do uso do solo e da Temperatura da Superfície Continental e o mapeamento da Área de Superfície Impermeável por década para a Temperatura da Superfície Continental.

### 3.1 O mapeamento do uso do solo

O uso do solo apresenta uma concentração da classe “urbano” no entorno do setor leste e oeste da baía de Guanabara e em direção a oeste

e sul (figuras 2, 3 e 4).

À oeste, a área abrangida é a baixada da Guanabara, que corresponde a toda a zona norte da cidade do Rio de Janeiro, e estende-se como uma grande mancha por toda orla da zona sul ao redor do maciço da Tijuca, incluindo, desde a sua orla inicial, nas proximidades do Centro da cidade, até os bairros da Barra da Tijuca e Recreio dos Bandeirantes.

O “urbano” segue em direção à zona oeste e às primeiras cidades da baixada fluminense que limitam com a cidade do Rio de Janeiro (Duque de Caxias, São João de Meriti, Belford Roxo, Nilópolis, Mesquita e Nova Iguaçu). Na zona oeste, o “urbano” é espreitado entre os maciços da Tijuca e da Pedra Branca, consolidando grande parte da baixada de Jacarepaguá, e entre os maciços da Pedra Branca e do Mendanha, solidificando boa extensão da baixada de Bangu.

Outra grande mancha do “urbano” circunda o setor leste da baía de Guanabara, precisamente as cidades de Niterói e São Gonçalo. Aglomerados ou enclaves “urbanos” são identificados no extremo oeste da zona oeste, nos bairros de Bangu, Campo Grande e Santa Cruz, chegando a atingir as cidades de

Itaguaí, Seropédica e Paracambi. Esses enclaves também são notados no setor leste da baía, nas cidades de Itaboraí e Maricá, e na região serrana fluminense que extrapola os limites da RMRJ. As décadas seguintes a 80 consolidam a classe “urbano” no espaço metropolitano a partir do seu espraiamento e justaposição nas direções leste, oeste e norte da baía de Guanabara e em torno dos maciços da Pedra Branca e Mendanha (figuras 3 e 4).

A classe “rural ou urbano de baixa densidade”, nos anos 80, predomina na periferia da classe “urbano”, isto é, nas áreas ao norte e nos extremos a leste e a oeste da baía (Figura 2). A partir dos anos 90, a classe reduz-se, tornando-se mais rarefeita, porém ainda homogênea no extremo leste da baía (figuras 3 e 4).

Nas áreas planas, constituídas pelas baixadas, há enclaves verdes em um espaço muito heterogêneo, contudo observa-se um aumento visual de uma mancha verde na porção norte da baía de Guanabara no mapa da década de 2000 (Figura 4), que pode estar associado à APA de Guapimirim ou mesmo a campos agrícolas extintos, confundidos e definidos pelo classificador como “vegetação”.

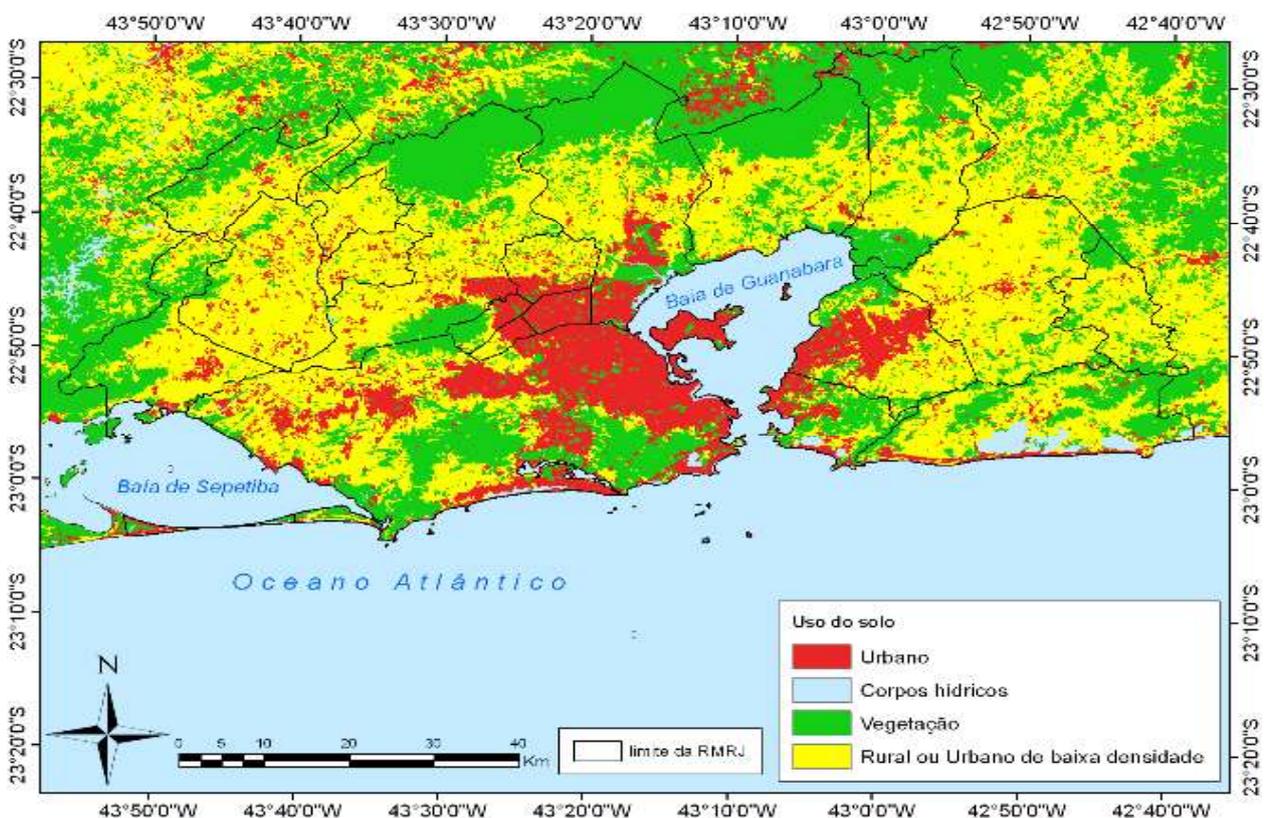


Fig. 2 – Uso do solo na RMRJ na década de 1980.

Identificação das Alterações no Uso do Solo

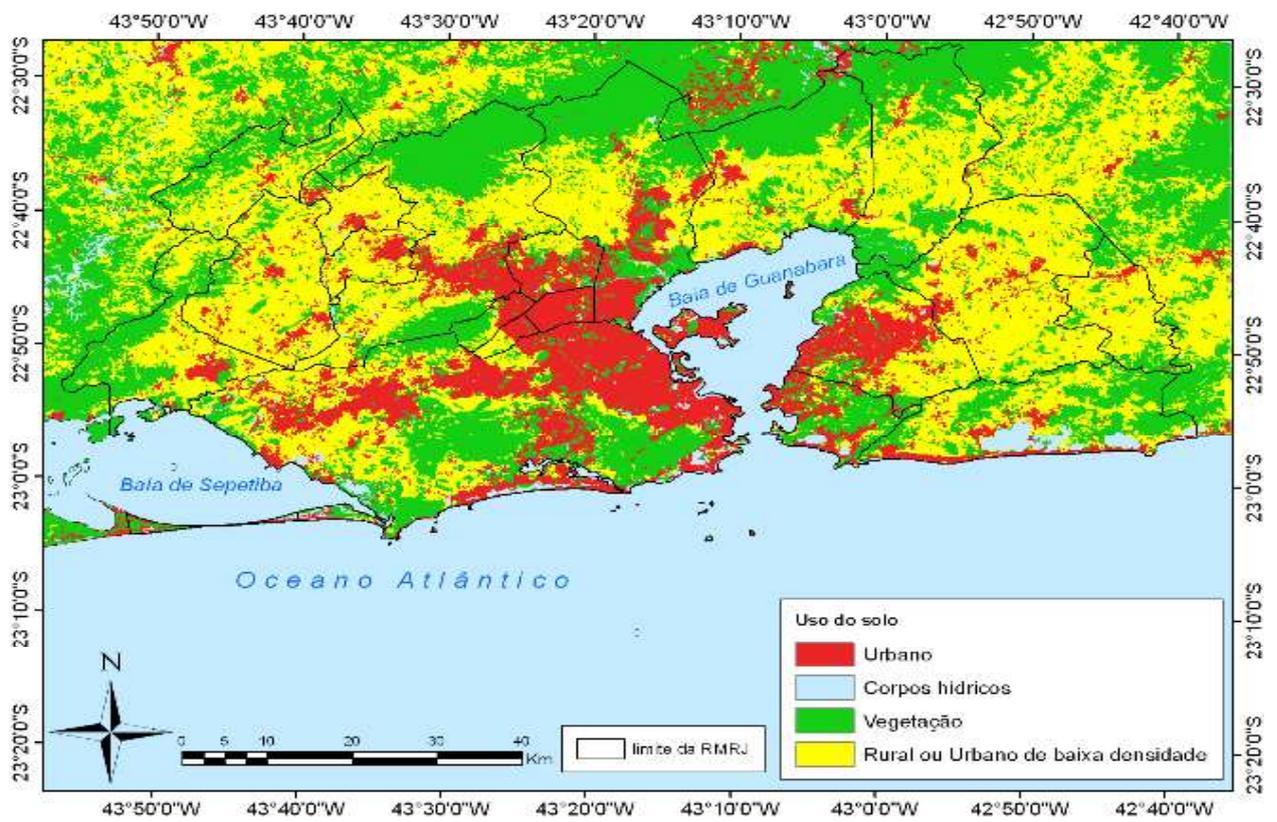


Fig. 3 – Uso do solo na RMRJ na década de 1990.

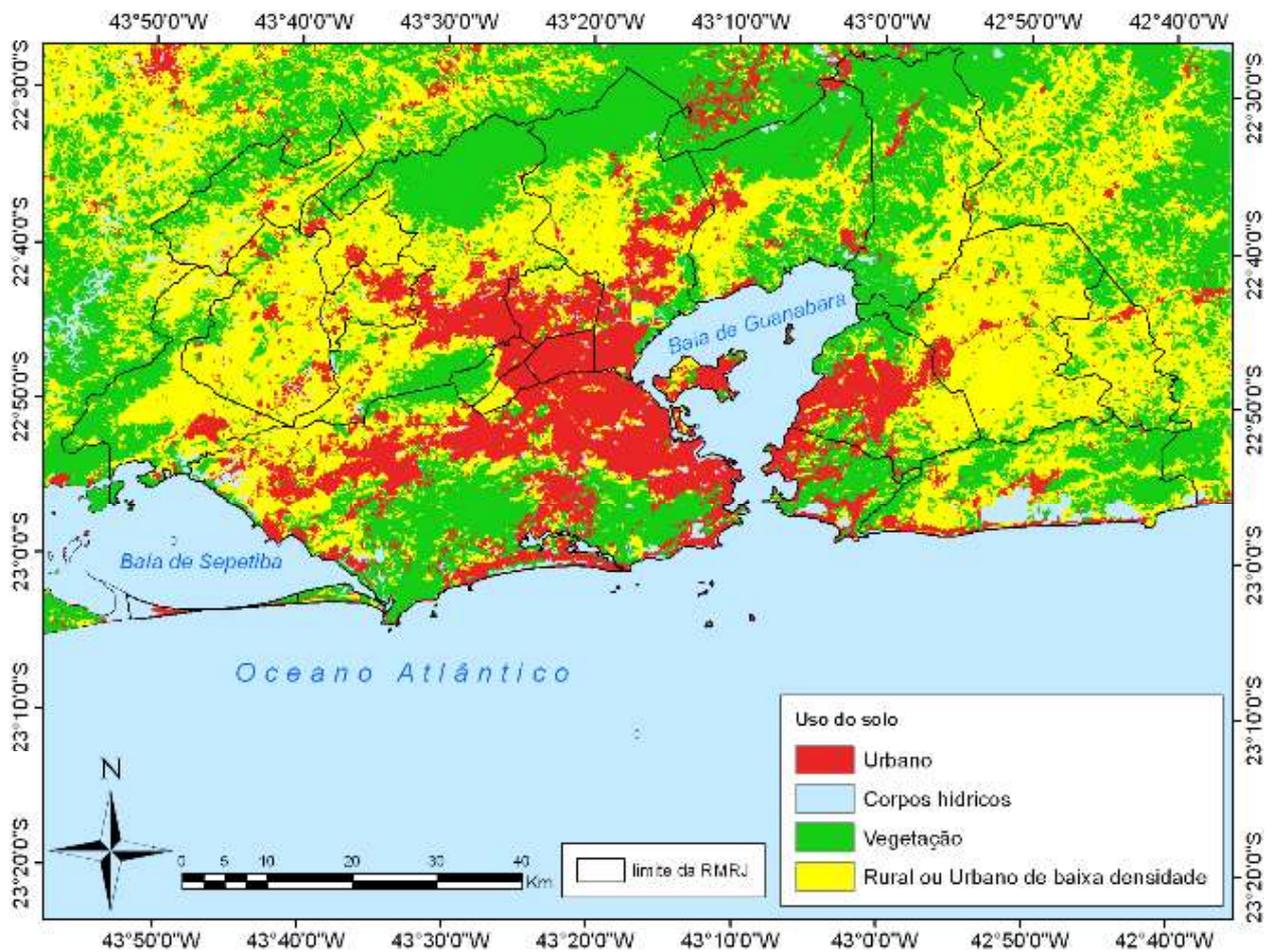


Fig. 4 – Uso do solo na RMRJ na década de 2000.

Ainda que discreta, a variação e evolução das classes de uso do solo denotam um suave aumento do “urbano” e “vegetação”. A classe “rural ou urbano de baixa densidade” é a mais expressiva em termos de involução e variação. Essa classe apresenta uma queda que é mais pronunciada entre as décadas de 80 e 90 e que segue em declínio em 2000 (Figura 5). Trata-se da classe mais complexa para ser definida na segmentação para classificação, à medida que é uma tipologia de classe que enfrenta conflitos em torno de sua ocupação e legalização junto ao poder público das cidades, e, portanto, factível de ser esta a classe que apresentou maiores alterações.

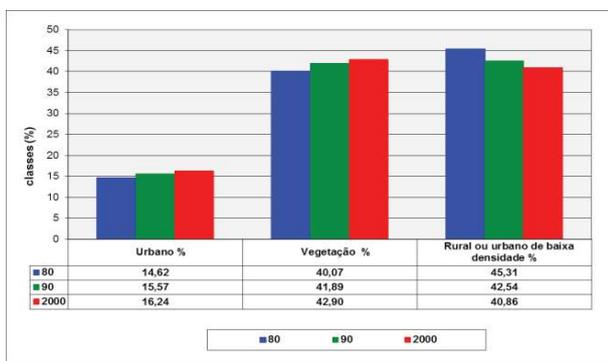


Fig. 5 – Porcentagem das classes de uso do solo por décadas na RMRJ

### 3.2 O mapeamento da Temperatura da Superfície Continental (TSC) pela Composição de Máximo valor (CMV)

O mapa da TSC na década de 80 é mostrado na Figura 6. Uma principal mancha é notada em cor amarela (com valores entre 36°C e 44°C) passando a tons de laranja mais escuros (entre 44,1°C e 48°C). Pontos quentes ultrapassam 48°C e são verdadeiros enclaves contribuintes da ilha de calor urbana.

A extensa mancha cobre a baixada da Guanabara e Fluminense, que inclui os bairros da zona norte da capital e os municípios de Duque de Caxias, São João de Meriti, Nilópolis, Mesquita, Belford Roxo e Nova Iguaçu, respectivamente. A mancha se expande na zona sul carioca, além dos bairros da baixada de Jacarepaguá e Bangu. As baixadas de Santa Cruz e Guaratiba, no extremo oeste, também estão inseridas nesse espaço da mancha, porém de forma mais rarefeita. A mancha é encerrada com os terrenos baixos da margem leste da baía de Guanabara, que inclui os municípios de Niterói, São Gonçalo e Maricá.

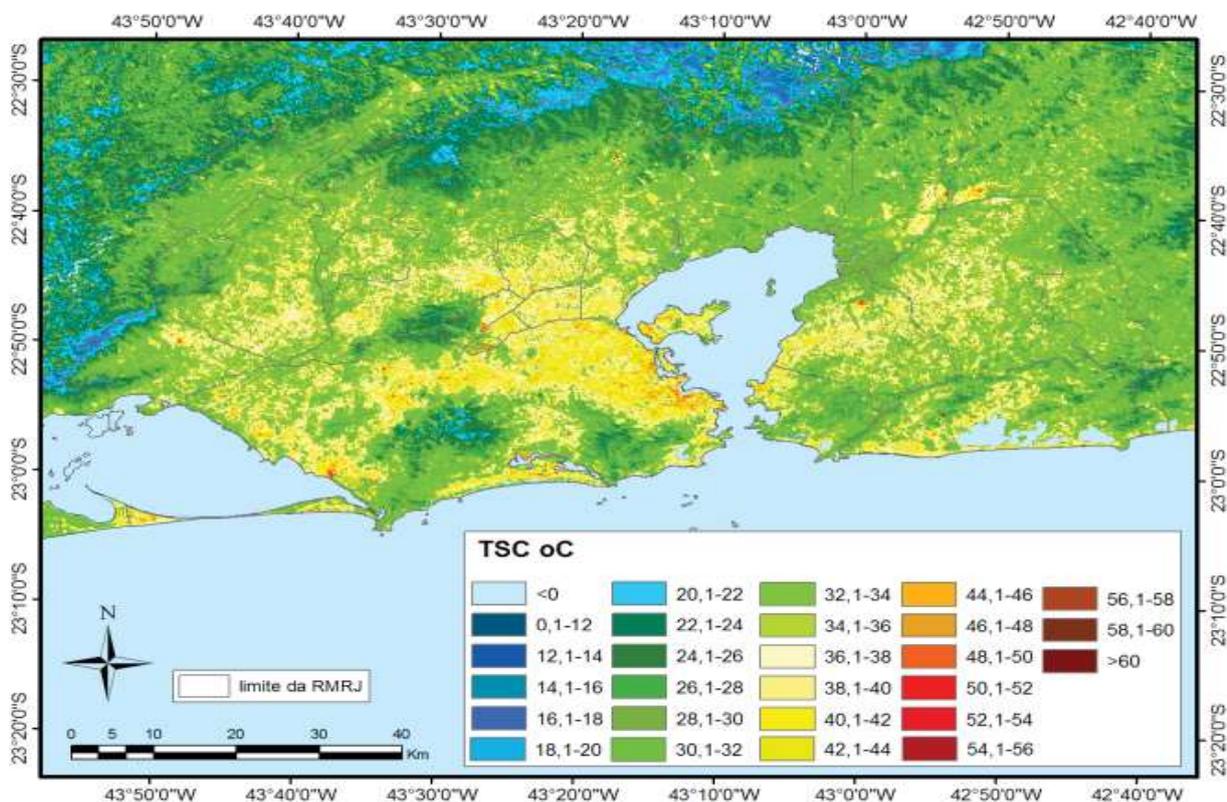


Fig. 6 – Composição de Máximo Valor (CMV) da TSC na RMRJ na década de 1980.

Na década de 90, a mancha amarela (TSC entre 36°C e 44°C) retrai-se, enquanto a mancha em tons laranja (TSC entre 44,1°C e 50°C) expande-se. Surge uma mancha vermelha, com TSC acima de 50°C, que muito se confunde com a mancha laranja, e domina uma grande área da RMRJ. Pontos quentes, desta vez, são definidos acima de 56°C na cor vermelha bem escura (Figura 7).

A mancha laranja e vermelha toma conta de áreas que já concentravam os maiores valores de TSC na década passada. Na atual década, não apenas manteve o padrão espacial, como também expandiu sua área de atuação. Trata-se da zona norte, na baixada da Guanabara e da zona oeste, na baixada de Jacarepaguá e de Bangu, na capital. Na baixada Fluminense, repetem-se os municípios de Duque de Caxias, São João de Meriti, Nilópolis, Mesquita, Belford Roxo e Nova Iguaçu. À leste da baía de Guanabara, o centro e zona norte de Niterói, com extensão gradual a oeste e ao centro de São Gonçalo, são responsáveis pelas altas TSC.

Na década de 2000, a mancha vermelha é reforçada nas áreas aquecidas já pré-definidas em 90 e expande-se por uma área bem maior. As áreas pré-definidas são alentadas por uma coloração mais escura do vermelho (com valores acima dos 50°C), atingindo o marrom e, obviamente, ultrapassando,

em muitos locais, 60°C (Figura 8). A área central da cidade do Rio de Janeiro, contígua a baía de Guanabara, e os bairros e cidades atravessados por grandes avenidas e rodovias são as áreas que concentram os valores elevados de TSC comportando os bairros da zona norte e oeste da cidade do Rio de Janeiro e as cidades da baixada Fluminense e Niterói e São Gonçalo.

A evolução temporal e espacial da TSC favorece a manifestação da ilha de calor urbana na RMRJ. Os núcleos mais quentes, acima de 50°C, ou próximos a 70°C, que sustentam a ilha de calor urbana, concentraram-se nos principais espaços urbanos da metrópole, que abrange toda baixada da Guanabara, de Jacarepaguá e de Bangu, boa parte da baixada Fluminense e de Santa Cruz, além da zona sul da cidade e do setor leste da baía de Guanabara no eixo conurbado Niterói-São Gonçalo. Outras áreas de uso não urbano, o rural ou urbano de baixa densidade, acolheram os núcleos secundários da ilha de calor, precisamente na baixada Fluminense, na zona oeste carioca e no entorno das cidades de Niterói e São Gonçalo. A disseminação de diversos e intensos núcleos de calor define a ilha de calor urbana polinucleada na RMRJ. Contudo, analisar o fenômeno da ilha de calor urbana não foi o intuito deste trabalho, que poderá ser consultado com mais complexidade em Lucena (2012).

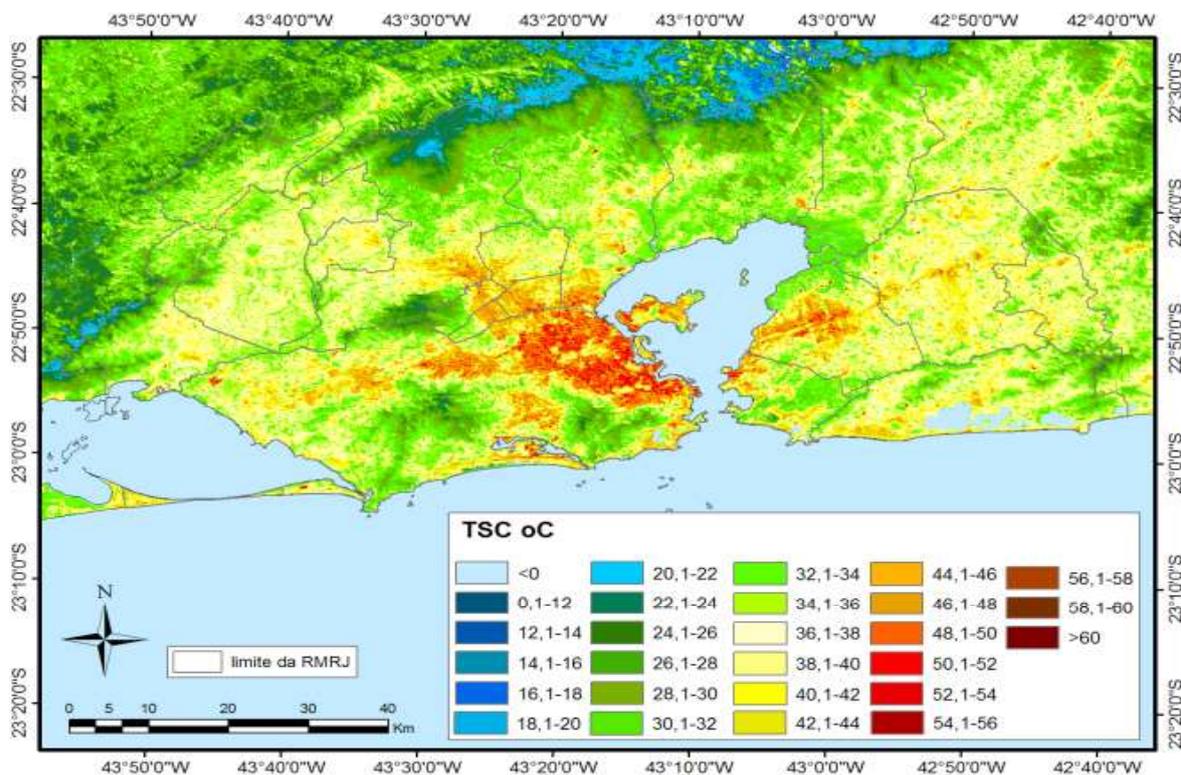


Fig. 7 – Composição de Máximo Valor (CMV) da TSC na RMRJ na década de 1990.

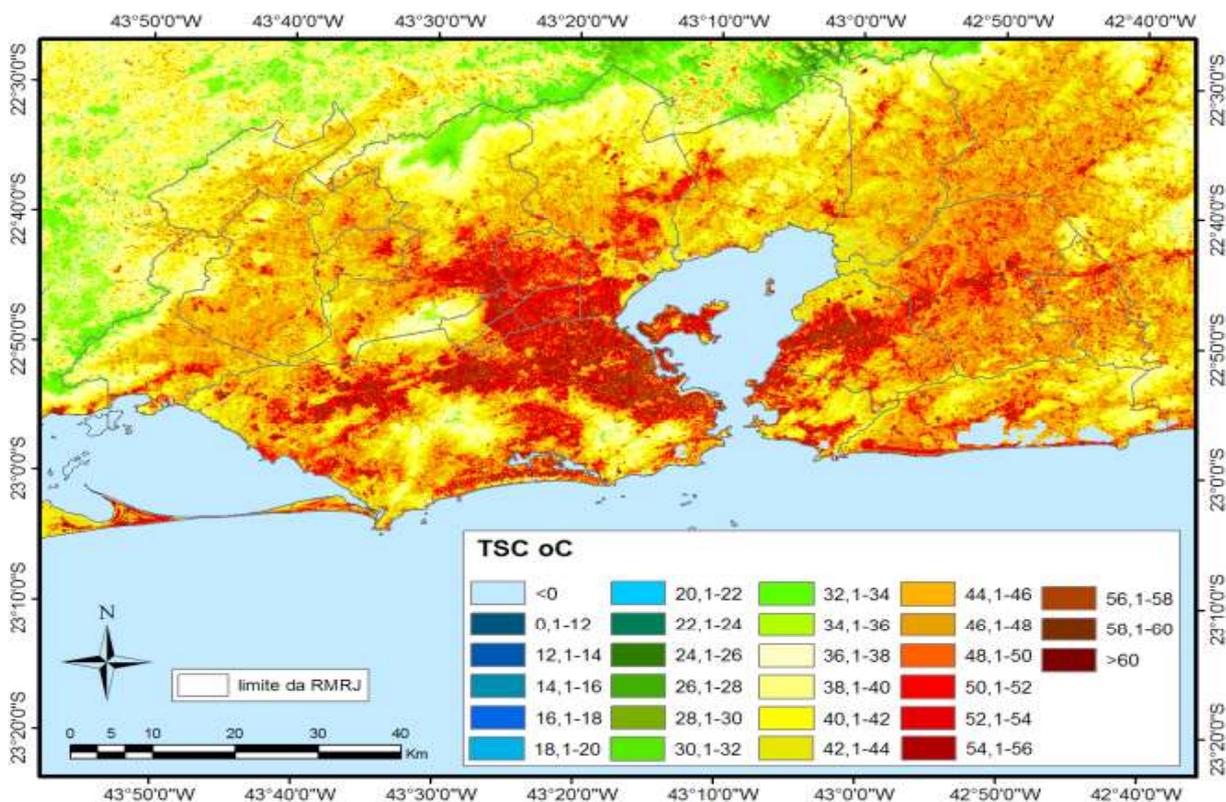


Fig. 8 – Composição de Máximo Valor (CMV) da TSC na RMRJ na década de 2000.

### 3.3 Área de Superfície Impermeável (ISA) por década da Composição de Máximo valor (CMV) para a Temperatura da Superfície Continental (TSC)

A Tabela 1 exibe a TSC para três variações da ISA, de acordo com a década. Constatou-se que a ISA mais densa, isto é, a classe Urbano 1, concentra os maiores valores da TSC e que, ao longo das décadas, esse valor foi aumentando. A diferença da média entre a década de 80 e 2000 ultrapassa os 12°C em todas as classes. Por outro lado, a diferença entre as classes do Urbano tende a diminuir durante as décadas, o que infere um maior adensamento espacial da classe de uso do solo “urbano” na década de 2000, diferentemente da década de 80. Na década de 80, a diferença entre o Urbano 1 e Urbano 2 alcançou 5,6°C, enquanto na década de 2000, a diferença foi um pouco menor, 3,6°C. Entretanto, a diferença inverte-se quando se compara o Urbano 2 e o Urbano 3 (3,6°C e 4,3°C, respectivamente). A década de 90 não se adequa a esse padrão presenciado entre 80 e 2000, observando-se, pelo contrário, as maiores diferenças. Esse comportamento ocorre por conta da sua posição entre os extremos do uso do solo, isto é, em 80, há uma fase de evolução da classe “urbano”, enquanto, em 2000, vivencia-se uma consolidação da mesma classe.

Tabela 1: Composições de Máximo Valor (CMV) da TSC (média e desvio padrão) resultantes da ISA

Década/ ISA/TSC	Década de 1980		Década de 1990		Década de 2000	
	Med	DP	Med	DP	Med	DP
Urbano 1	39,9	3,8	44,8	4,0	52,3	3,7
Urbano 2	34,3	4,9	38,9	4,7	48,7	4,5
Urbano 3	30,7	5,6	34,5	6,1	44,4	5,4

Urbano 1:  $ISA > 75$ ; Urbano 2:  $75 > ISA > 50$ ;  
Urbano 3:  $50 > ISA > 25$ .

Para a análise por década, a classe Urbano 3, com ISA entre 25 e 50, não será analisada por ser considerada irrelevante espacialmente.

#### 3.3.1 Década de 1980

A classe Urbano 1, que concentra os maiores valores de ISA é exposta na Figura 9. Os valores mais elevados, acima de 44°C, estão localizados no centro de Niterói, na área central da cidade do Rio de Janeiro, em diversos pontos da importante avenida Brasil (São Cristóvão, Caju, Bonsucesso, Ramos, Penha); em bairros da zona oeste e zona sul da cidade do Rio de Janeiro; e nos centros de São João de Meriti, Belford Roxo, Mesquita, Nilópolis e Nova Iguaçu na baixada Fluminense. Em muitas localidades a TSC ultrapassa 50°C, como em São Cristóvão (52,9°C) e em Bangu (53,7°C).

TSC entre 40°C e 44°C, em amarelo, domina grande espaços da zona norte e da zona oeste e das cidades da baixada Fluminense, São Gonçalo e Niterói. TSC entre 34°C e 40°C, em tonalidade verde, contornam as áreas mais quentes acima de 40°C em Niterói e São Gonçalo e na zona norte do Rio. Outras áreas em verde são marcantes, como boa parte da zona sul e baixada Fluminense. TSC abaixo de 34°C, em tom azul, é limitado ao extremo oeste e norte da RMRJ e a alguns pontos da baixada de Jacarepaguá e da zona sul,

principalmente nas encostas vegetadas do maciço da Tijuca.

A TSC na classe Urbano 2 da ISA (Figura 10) tem sua distribuição espacial pulverizada e mostra poucos pontos acima de 40°C. Os valores mais baixos, inferiores a 34°C, são mais notados em grande parte da zona sul, na baixada de Jacarepaguá, no extremo oeste da zona oeste e noroeste da baixada Fluminense. TSC intermediária, entre 34°C e 40°C, materializam-se na zona norte, baixada Fluminense, zona oeste, Niterói e São Gonçalo.

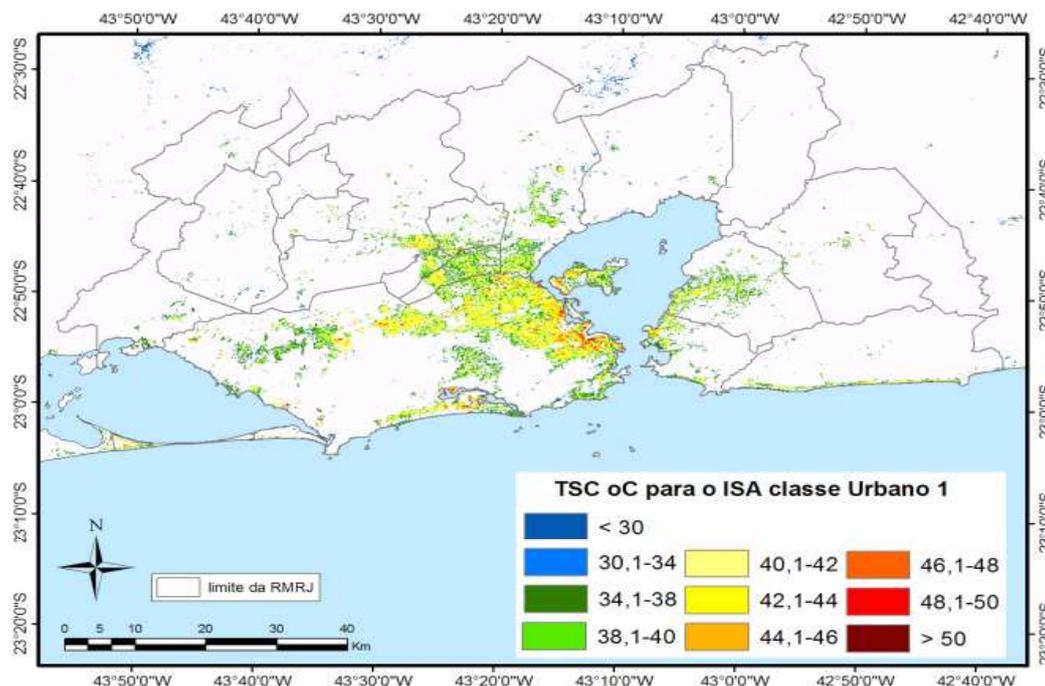


Fig. 9 - ISA da classe Urbano 1 da CMV para a TSC na década de 1980.

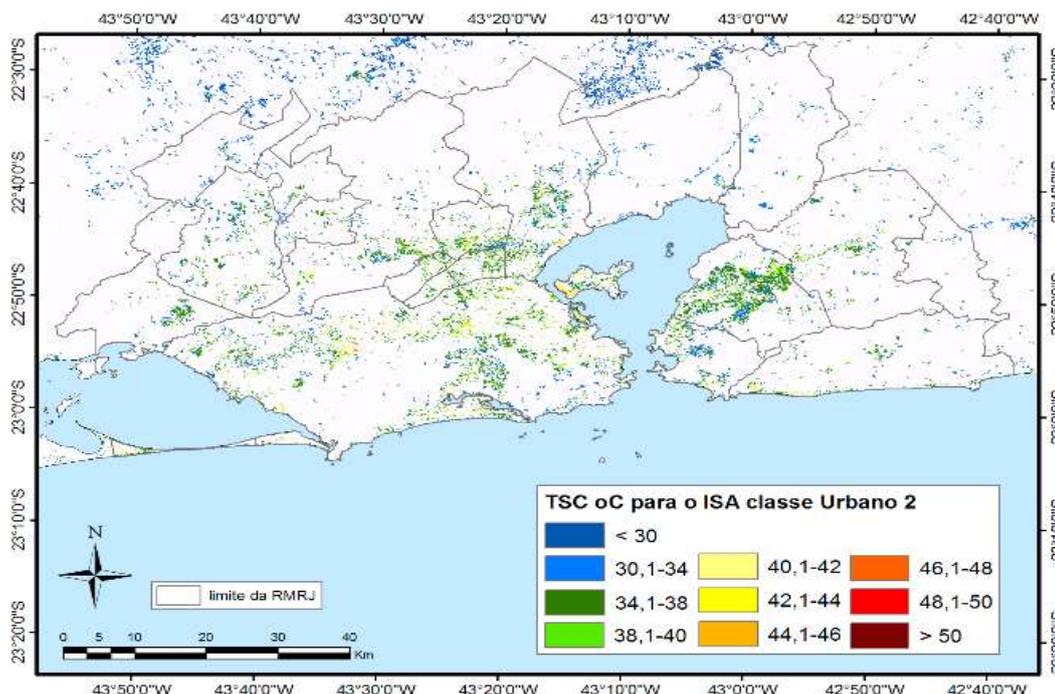


Fig. 10 - ISA da classe Urbano 2 da CMV para a TSC na década de 1980.

### 3.3.2 Década de 1990

Na década de 1990 a classe Urbano 1 tem na área central e na zona norte os valores mais elevados de TSC. Esses valores estão entre 46°C e 56°C mapeados do amarelo ao vermelho (Figura 11). Alguns pontos acima de 56°C são notados pela cor marrom e se espacializam em diferentes pontos, como em Acari, Jardim América, Bonsucesso e no Ceasa de Irajá (57,7°C), zona norte da cidade, ou no complexo de shoppings da Barra da Tijuca (58,7°C), zona oeste da cidade.

Um segundo grupo, entre 42°C e 48°C, do verde ao amarelo, dissemina-se pela baixada de Jacarepaguá, baixada Fluminense, zona oeste, Niterói e São Gonçalo. As áreas também apontam valores um pouco mais elevados,

próximos àqueles encontrados no centro e na zona norte, como em Campo Grande e Bangu, na zona oeste, no centro de Duque de Caxias, São João de Meriti e Nova Iguaçu, na baixada Fluminense, Barra da Tijuca, no centro de Niterói e em São Gonçalo.

Um terceiro grupo, entre 40°C e 44°C, espacializa-se por grande parte da baixada de Jacarepaguá, zona oeste, baixada Fluminense, zona sul e Niterói. Valores abaixo de 40°C, em tom azul mais escuro, são notados nos seguintes pontos dessas áreas: Urca (36,5°C) e Ilha Piraquê, na Lagoa (35°C), zona sul do Rio, Recreio dos Bandeirantes (35,1°C), Itaguaí (36,6°C), Jardim Gramacho (36,7°C) em Duque de Caxias, e Icaraí (30,8°C) em Niterói.

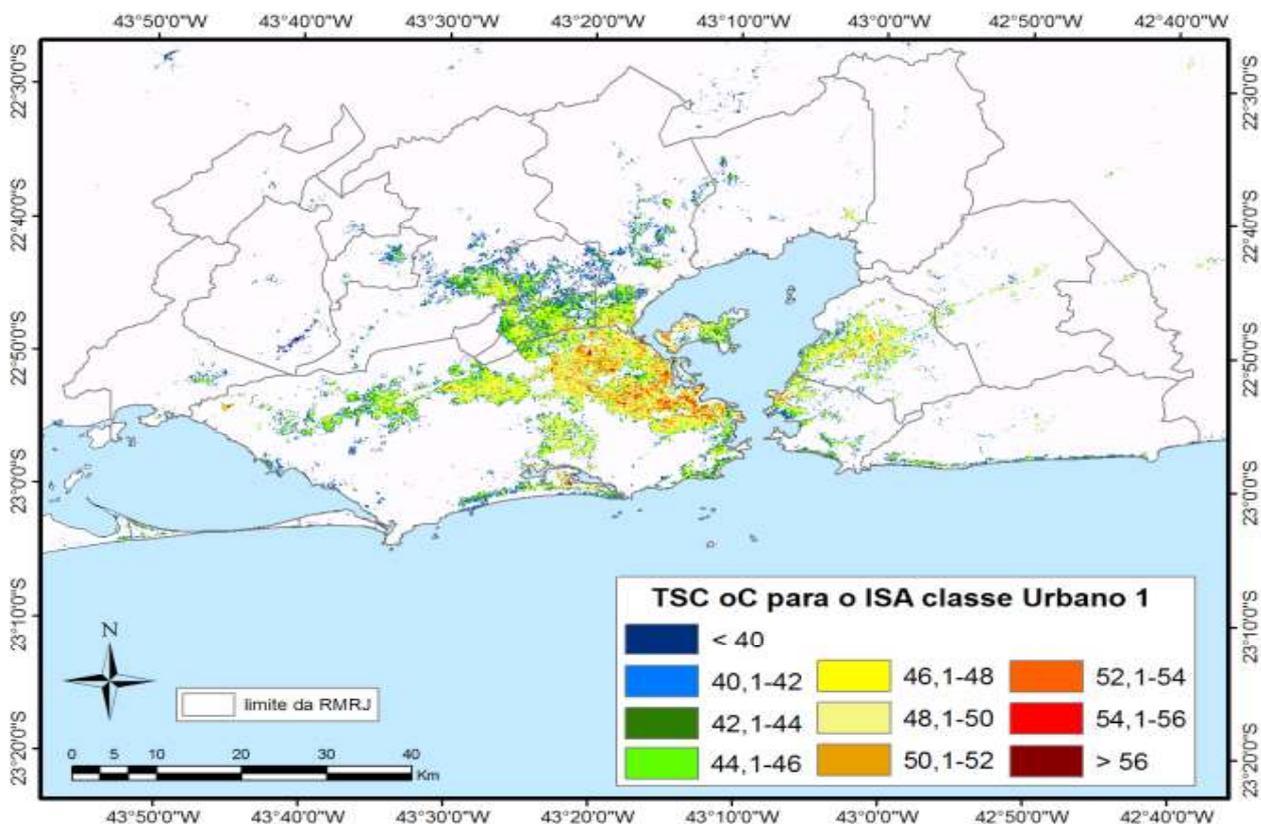


Fig. 11 - ISA da classe Urbano 1 da CMV para a TSC na década de 1990.

A TSC na classe Urbano 2 (Figura 12), que representa toda a década, mostra homogeneidade espacial com uma distribuição em torno de valores entre 40°C e 42°C, tingidos em tons azul. A TSC eleva-se um pouco mais, com máximos entre 42°C e 50°C, em partes da zona norte, zona sul, baixada de Jacarepaguá e em São Gonçalo. Identificam-se muitos pontos superiores a 50°C, como na Barra da Tijuca (57,6°C) e em Del Castilho (54,7°C).

A homogeneidade em azul predomina na zona oeste, baixada de Jacarepaguá, baixada Fluminense, zona sul e Niterói. Teoricamente, trata-se de um uso “urbano” menos denso e, portanto, valores mais inferiores da TSC. Foi comum encontrar valores bem abaixo de 40°C, próximos ou inferiores a 35°C, como no município de Seropédica (35,3°C), no extremo oeste da RMRJ.

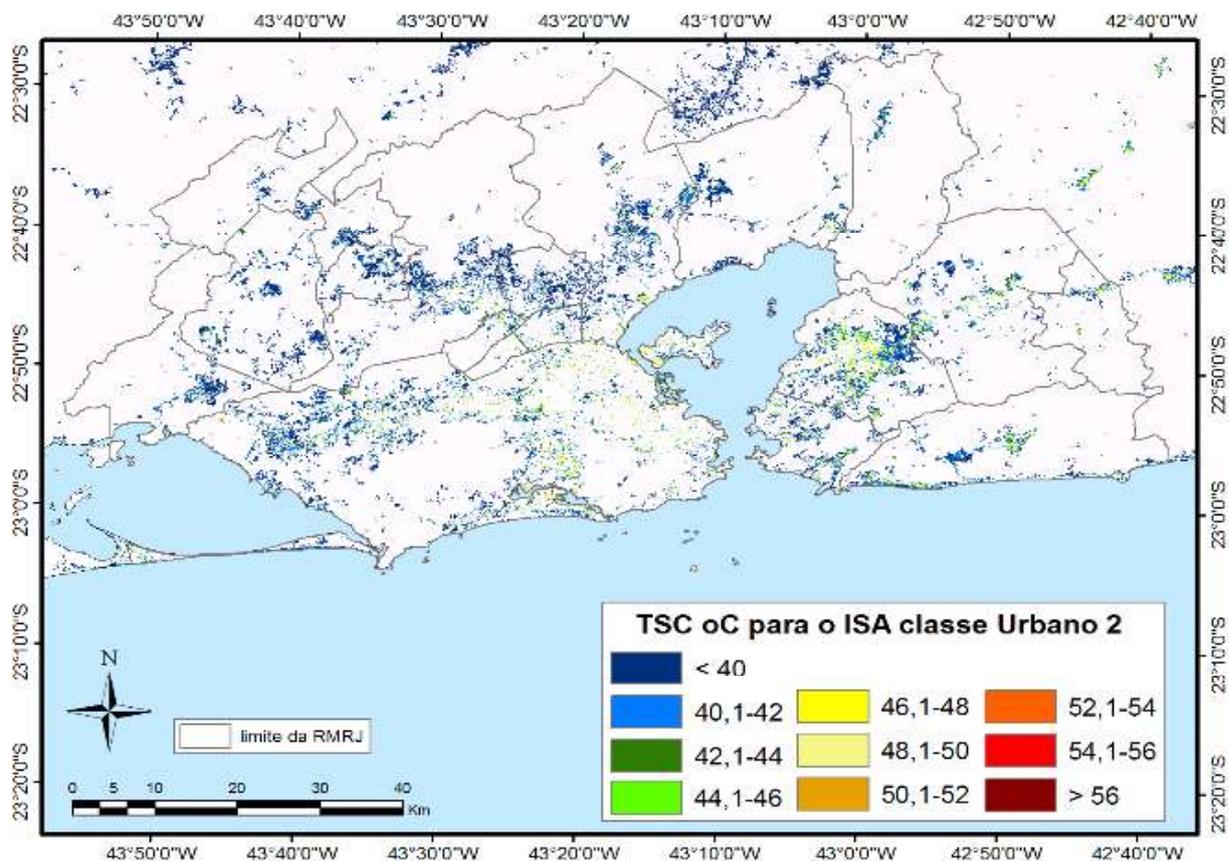


Fig. 12 - ISA da classe Urbano 2 da CMV para a TSC na década de 1990.

### 3.3.3 Década de 2000

Três grupos de TSC são identificados na classe Urbano 1 da ISA (Figura 13). Os dois primeiros pertencem a valores acima de 50°C, variando entre 50°C e 54°C (tons em amarelo) e entre 54°C e 60°C (tons do laranja ao vermelho). Este último espacializa-se no Centro, zona norte, zona oeste, baixada de Jacarepaguá e no eixo conurbado Niterói e São Gonçalo. Valores acima de 60°C são encontrados na avenida Francisco Bicalho (62,5°C) no Centro, em Vicente de Carvalho (69°C), zona norte, e na BR-116 (64,5°C) em Nova Iguaçu.

O segundo grupo de TSC confunde-se espacialmente com o primeiro. Os núcleos circundam a área central, a zona norte em direção à baixada de Jacarepaguá e em direção à baixada Fluminense, fincada a partir dos bairros limítrofes que permeiam a avenida Brasil, como Parada de Lucas, Jardim América, Irajá, Costa Barros, Pavuna e Guadalupe. Desses municípios contíguos ao Rio, suas sedes e alguns bairros imediatos possuem TSC comparáveis ao

primeiro grupo, isto é, entre 54°C e 60°C. São seis os municípios: Duque de Caxias (Vila Ideal), São João de Meriti, Nilópolis, Mesquita (Vila Emil), Belford Roxo e Nova Iguaçu (Califórnia, Parque Ulisses, Metrópole). O último cinturão, entre 50°C e 54°C, encontra-se na área de expansão de Niterói (Piratininga, Itaipu, Camboinhas e em direção a Maricá).

O terceiro grupo, com valores abaixo de 50°C, é dominante em toda a zona sul e em pontos exclusivos da Barra da Tijuca, zona oeste e Niterói. Na zona sul em bairros como o Flamengo, Ipanema, Leblon, Gávea e São Conrado, são encontrados valores bem próximos a 40°C. Enclaves mais aquecidos, entre 56°C e 58°C, são despontados na Glória, Catete, Botafogo e Lagoa. Na Barra da Tijuca, os dois extremos da avenida das Américas e Lúcio Costa, no Joá, Jardim Oceânico e Itanhangá, a leste, e o Recreio dos Bandeirantes, a oeste, resguardam os valores mais baixos. Em Niterói, a situação de maior amenidade é em Icaraí, Campo Lindo e Boa Viagem.

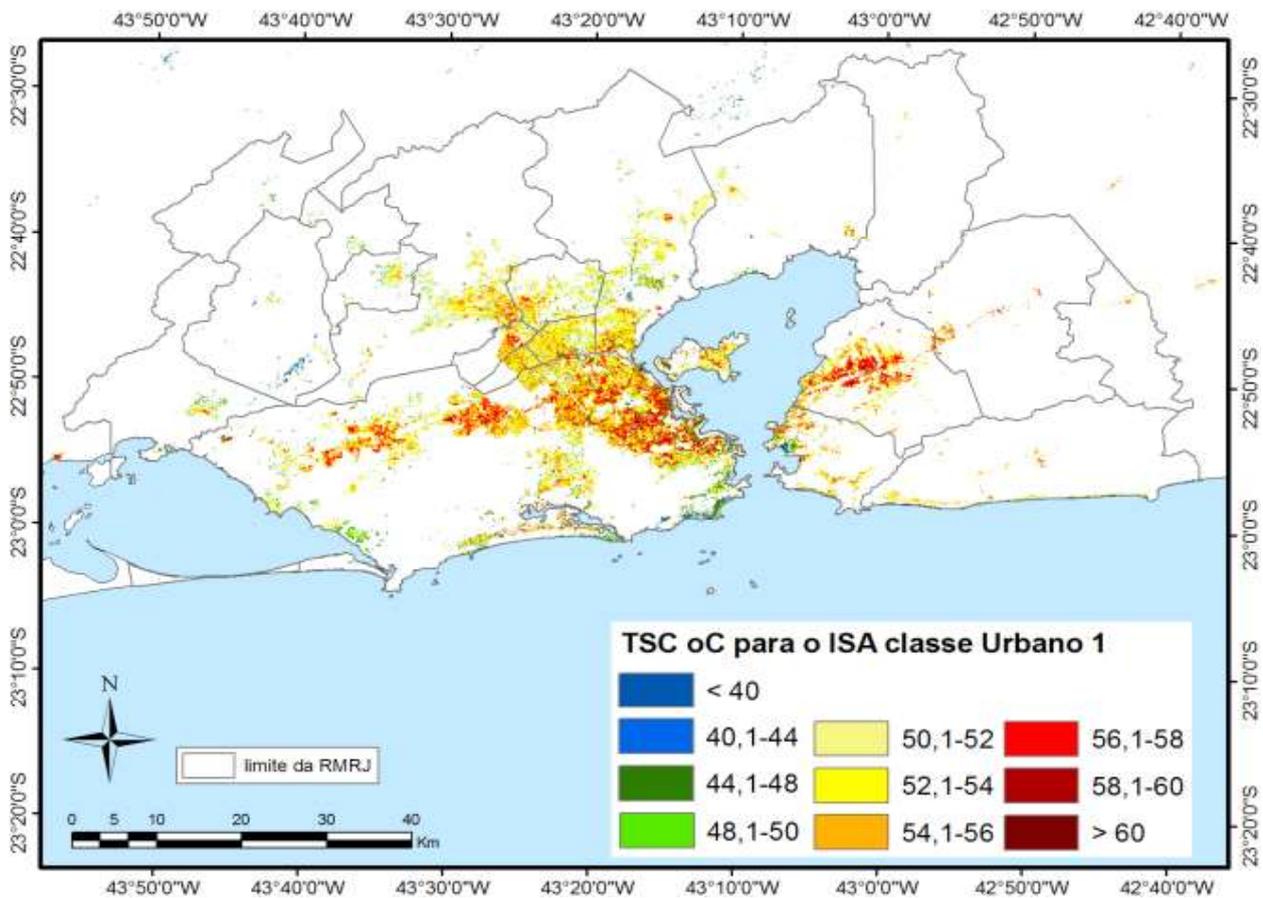


Fig. 13 - ISA da classe Urbano 1 da CMV para a TSC na década de 2000.

Na classe Urbano 2, a distribuição da TSC é bem heterogênea (Figura 14). Apenas a zona sul e o extremo oeste, incluindo a Baixada Fluminense, mostram uma certa homogeneidade espacial com valores entre 44°C e 50°C (em tom verde). Nos demais espaços, além de heterogêneo, a TSC é mais elevada. Os nichos mais quentes pertencem às áreas do centro, zona norte, baixada de Jacarepaguá, zona oeste, Niterói e São Gonçalo, já reveladas nas análises anteriores, com valores comuns acima de 56°C.

Na Baixada Fluminense, o eixo, iniciado na zona norte do Rio pela avenida Brasil e BR-116, costuram os municípios de São João de Meriti, Nilópolis, Mesquita e Nova Iguaçu, formando a zona mais quente da baixada (entre 50°C e 56°C). O centro tem sua TSC reduzida ao se deslocar em direção a zona sul a partir da Lapa e Santa Tereza. Já a zona norte, em suas saídas, tem destinos distintos. Em direção à

baixada de Jacarepaguá, por Cascadura, e para Duque de Caxias, pela BR-040, a TSC segue em declínio. No entanto, quando segue em direção à zona oeste, a partir de Marechal Hermes, a TSC eleva-se.

Na zona oeste, a TSC é compartimentada, abrigando seus maiores valores nos eixos entre Realengo e Bangu e em Campo Grande. Na baixada de Jacarepaguá, a organização espacial também se compartimenta em núcleos mais quentes e mais amenos, já conhecidos, situando-se na Barra da Tijuca na circunferência entre a avenida Ayrton Senna e Américas os valores mais altos, acima de 56°C.

A zona sul do Rio é mais compacta agregando os valores de tom verde entre 44°C e 50°C. Em Niterói e São Gonçalo, repete-se o padrão espacial da zona norte, zona oeste e baixada de Jacarepaguá. A TSC decai consideravelmente na direção de outros municípios, Maricá e Itaboraí, respectivamente.

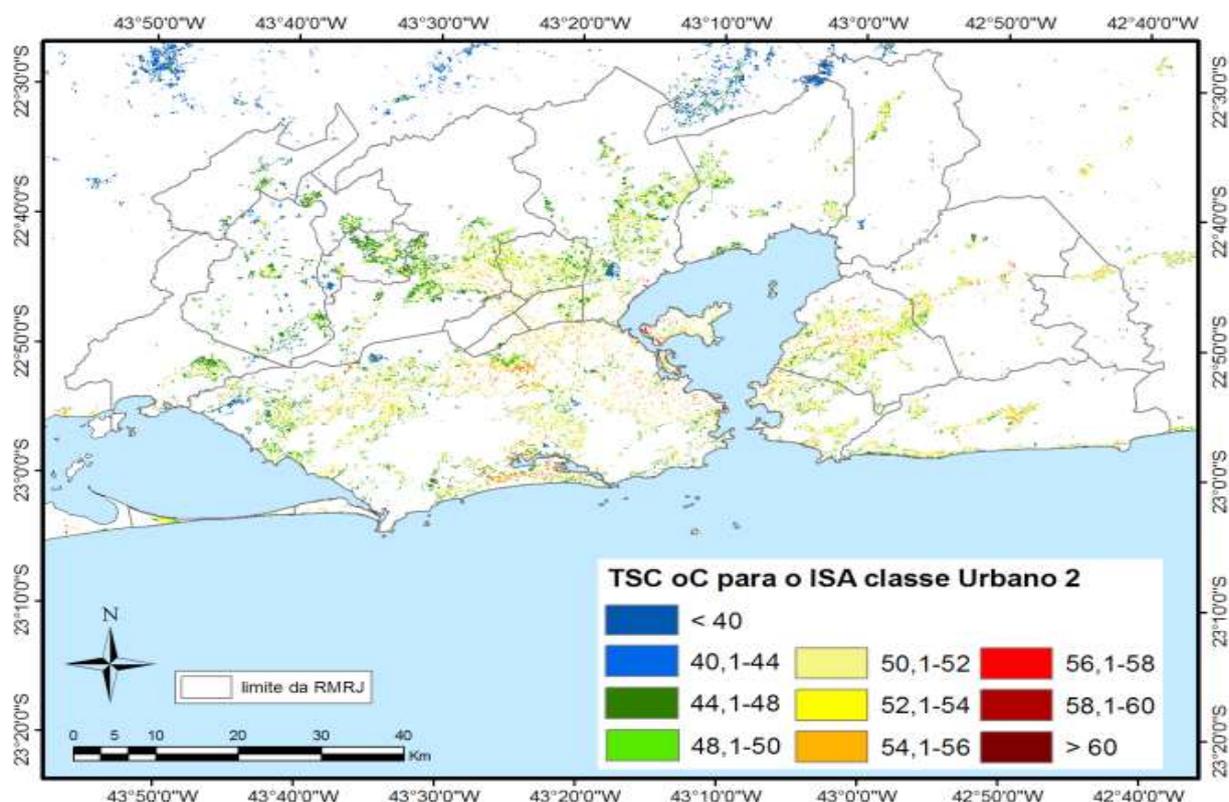


Fig. 14 - ISA da classe Urbano 2 da CMV para a TSC na década de 2000.

#### 4. CONCLUSÕES

As áreas de uso urbano são responsáveis pelos maiores insumos térmicos à atmosfera metropolitana. A maior densidade do uso urbano (Classe Urbano 1) calculado pela Área de Superfície Impermeável (ISA) responde aos maiores valores da Temperatura da Superfície Continental (TSC). As áreas de maior densidade urbana se concentram nos espaços de urbanização consolidada da RMRJ.

Nas três décadas estudadas a partir do mapa de uso do solo, na classe “urbano” localizaram-se os valores mais elevados da TSC em oposição à classe “vegetação”. As áreas da classe “rural ou urbano de baixa densidade” correspondem a espaços de transição entre o antigo rural e o urbano, tendendo a uma elevação temporal da TSC Lucena (2012) e Lucena *et al.*, (2013) ampliam a discussão e mostram uma análise quantitativa entre os valores de TSC e as classes de uso do solo aqui definidas.

A evolução temporal da TSC apresenta uma dilatação dos espaços mais quentes e uma gradação da TSC, saltando seus picos dos 50°C na década de 1980 para 70°C na década de 2000. Este cenário é compreendido nas diferentes

classes do Urbano estipuladas na ISA.

A utilização da ISA como um indicador de análise do clima urbano permitiu uma análise conjunta entre a TSC e os vários padrões do solo urbano, complementando a análise do mapeamento do uso do solo.

A ISA é um importante índice em sensoriamento remoto para os estudos em cidades, porém pouco empregado nas pesquisas de clima urbano. Muitos outros índices estão disponíveis na literatura e podem ser adotados como indicadores complementares na análise integrada entre a temperatura e o uso do solo (a vegetação e a área construída, por exemplo) diversificando as aplicações do sensoriamento remoto no ambiente urbano, em particular quando o interesse é aprofundar o método e as técnicas para o mapeamento do clima urbano e a interpretação dos seus produtos, como a ilha de calor na metrópole.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CARLSON, T.N.; ARTHUR, S.T. The impact of land use-land cover changes due to urbanization on surface microclimate and hydrology: a satellite perspective. **Global and Planetary**

**Change**, vol. 25, pp. 49-65, 2000.

CARLSON, T.N.; AUGUSTINE, J. N.; BOLAND, F.E. Potential application of satellite temperature measurements in the analysis of land use over urban areas. **Bulletin of the American Meteorological Society**, vol. 58, pp. 1301-1303, 1997.

CARNAHAN, W.H.; LARSON, R.C. An analysis of an urban heat sink. **Remote Sensing of Environment**, vol. 33, pp. 65-71, 1990.

CHANDER, G.; MARKHAM, B. L. Revised Landsat-5 TM radiometric calibration procedures, and post-calibration dynamic ranges. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, vol. 41, pp. 2674-2677, 2003.

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 Environment**, vol. 113, pp. 893-903, 2009.

CHEN, P.Y.; SRINIVASAN, R.; FEDOSEJEVS, G.; KINIRY, J. R. Evaluating different NDVI composite techniques using NOAA-14 AVHRR data. **International Journal of Remote Sensing**, vol. 24, n. 17, pp. 3403-3412, 2003.

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**, vol. 104 pp. 133-146, 2006.

EKLUNDH, L.R. Noise estimation in NOAA AVHRR maximum-value composite NDVI images. **International Journal of Remote Sensing**, vol. 16, n. 15, pp. 2955-2962, 1995.

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

FREITAS, V.A.L.; RIBEIRO, M.G.; CENTENO, J.A.S. Análise temporal e quantitativa da impermeabilização dos solos através de imagens LANDSAT e CBERS na cidade de Curitiba/PR. In: Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário, 2006, Florianópolis. **Anais...** Curitiba: UFPR, 2006.

FURTINI, M.B.; FERREIRA, E.; SAMPAIO, F. M. T.. Análise temporal da permeabilidade da superfície urbana da sub-bacia do córrego Centenário em Lavras, MG. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 31, n. 4, p. 1145-1154, 2007.

GUTIERREZ, L.A.R.; SOUZA, G.F.; PEREIRA, G.; FILHO, A.C.P.; ARIMA, G.A.; BARBASSA, A. P. Mapeamento temporal dos índices: área de superfície impermeável e escoamento superficial da área urbanizada de Campo Grande - MS. **Caminhos de Geografia (UFU)**, v. 12, p. 269-288, 2011.

GALLO, K.P.; TARPLEY, J.D.; MCNAB, A.L.; KARL, T.R. Assessment of urban heat islands: a satellite perspective. **Atmospheric Research**, vol. 37, pp. 37-43, 1995.

GRIMMOND, C.S.B. Progress in measuring and observing the urban atmosphere. **Theoretical and Applied Climatology**, vol. 84, pp. 3-22, 2006.

HEBBLE, E.E.; CARLSON, T.N.; DANIEL, K. Impervious surface area and residential housing density: a satellite perspective. **Geocarto International**, vol. 16, pp.13-18, 2001.

HOLBEN, B.N.; KIMES, D. & FRASER, R.S. Directional reflectance response in AVHRR red and near-infrared bands for three cover types and varying atmospheric conditions. **Remote Sensing Environment**, vol. 19, pp. 2-13, 1986.

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**, vol. 83, pp. 195-213, 2002.

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**, vol. 114, pp. 504-513, 2010.

IQBAL, M. An introduction to solar radiation. **Library of Congress Cataloging in Publication data**. Canadá. Academic Press Canadian, 1983.

JIMÉNEZ-MUNOZ, J.C.; SOBRINO, J.A. A generalized single channel method for retrieving

- land surface temperature from remote sensing data. **Journal of Geophysical Research**, vol. 108. n. 22, pp. 2-9, 2003.
- KAZAY, D.F.; LUCENA, A.J.; ROTUNNO FILHO, O.C.; PERES, L.F.; FRANÇA, J.R.A. Mudança no uso e cobertura do solo e sua influência na temperatura de superfície: um estudo na Região Metropolitana do Rio de Janeiro. In: XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Curitiba, 2011. **Anais...** P.752-759, 2011.
- LI, J.; SONG, C.; CAO, L.; ZHU, F.; MENG, X.; WU, J. Impacts of landscape structure on surface urban heat islands: a case study of Shanghai, China. **Remote Sensing of Environment**, vol. 115, pp. 3249–3263, 2011.
- LUCENA, A.J. (2012). A ilha de calor na região metropolitana do Rio de Janeiro. **Tese** (Doutorado em Ciências Atmosféricas em Engenharia). Universidade Federal do Rio de Janeiro/COPPE, Rio de Janeiro. 340p.
- 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 Applied Climatology**, vol. 111, p. 497-511, 2013.
- LUMAN, D. E.; JI, M. The Lake Michigan ozone study: an application of satellite-based land use and land cover mapping to large-area emissions inventory analysis. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, vol. 61, n. 8, pp. 1021-1032, 1995.
- MATSON, M.; MCCLAIN, E. P.; MCGINNIS, D. F. JR.; PRITCHARD, J.A. Satellite detection of urban heat islands. **Monthly Weather Review**, vol. 106, pp. 1725-1734, 1978.
- OKE, T.R. **Boundary Layer climate**. London, Methuen, 2a ed. 435p. 1987.
- OLIVEIRA, G. Integração de dados HRG-SPOT5 e SRTM para espacialização de bananais em área do bioma mata atlântica no município de Três Cachoeiras, RS. **Monografia de graduação**, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Departamento de Geografia, Porto Alegre, Rio Grande do Sul. 2009.
- OLIVEIRA, B.S.; MATAVELI, G.A.V. Avaliação do desempenho dos classificadores Isoseg e Bhattacharya para o mapeamento de áreas de cana-de-açúcar no município de Barretos-SP. In: XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – INPE, 2013. **Anais...** pp. 89-96.
- PEREIRA, G. Ilhas de Calor em Ambientes Urbanos: o caso do Bairro Kobrasol, São José, Santa Catarina, Brasil (1973-2003). In: I Encontro Sul-Brasileiro de Meteorologia e III Jornada de Palestras dos Estudantes de Meteorologia - UFPEL Meteorologia e o Meio Ambiente, 2006. **Anais...** 10p.
- 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**, vol. 22, n. 18, pp. 3719–3746, 2001.
- RAO, P.K. Remote sensing of urban heat islands from an environmental satellite. **Bulletin American Meteorology Society**, vol. 53, pp. 647-648, 1972.
- RIDD, M.K. Exploring a V-I-S (vegetation-Impervious Surface-Soil) model for urban ecosystem analysis through remote sensing: comparative anatomy for cities. **International Journal of Remote Sensing**, vol. 16. n. 12, pp. 2165-2185, 1995.
- RIZWAN, A. M.; DENNIS, L.Y.C.; LIU, C. A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island. **Journal of Environmental Sciences**, vol. 20 pp. 120–128, 2008.
- SOUZA, J.D.; SILVA, B.B. Correção atmosférica para temperatura da superfície obtida com imagem TM: Landsat 5. **Revista Brasileira de Geofísica**, vol. 23, n. 4, pp. 349-358, 2005.
- 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**, vol. 14, pp. 1119–1131, 1993.
- VOOGT, J.A.; OKE, T.R. Thermal remote sensing of urban climates. **Remote Sensing of Environment**, vol. 86, pp. 370–384, 2003.

- WENG, Q.E.; QUATTROCHI, D.A. Editorial - Thermal remote sensing of urban areas: an introduction to the special issue. **Remote Sensing of Environment**, vol. 104, pp. 119–122, 2006.
- 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**, vol. 104, pp. 147–156, 2006.
- XU, H. A new index for delineating built-up land features in satellite imagery. **International Journal of Remote Sensing**, vol. 29, n. 14, pp. 4269- 4276, 2008.
- YUAN, F.; BAUER, M.E. Comparison of impervious surface area and normalized difference vegetation index as indicators of surface urban heat island effects in Landsat imagery. **Remote Sensing Environment**, vol. 106, pp. 375-386, 2007.
- ZHA, Y.; GAO, J; NI, S. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. **International Journal of Remote Sensing**, vol. 24, pp. 583–594, 2003.
- 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 of Applied Earth Observation and Geoinformation**, vol. 11, n4, pp. 256-264, 2009.