

## MÉTODOS EM CLIMA URBANO APLICADOS À CIDADE DO RIO DE JANEIRO (BRASIL) E SUA REGIÃO METROPOLITANA

**Andrews José de LUCENA**

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
lucenageo@yahoo.com.br

**Leonardo de Faria PERES**

Universidade Federal do Rio de Janeiro  
leonardo.peres@igeo.ufrj.br

### Resumo

A metodologia em clima urbano reúne métodos para o mapeamento, análise e mitigação da ilha de calor. O primeiro deles, e mais antigo, reúne as análises de séries temporais oriundas de estações meteorológicas, como importantes indicadores ao estudo do clima urbano apontando padrões e tendências. O segundo deles é o sensoriamento remoto urbano que se apoia no imageamento à distância e sua ampla cobertura espacial, que permite a quantificação da mudança no ambiente ao longo do tempo, impossíveis apenas com os registros das estações meteorológicas. A terceira delas é a modelagem numérica, que com as simulações contribuem para o entendimento da atmosfera em seus níveis mais inferiores, nas camadas mais próximas à superfície, apresentando como resultado os fluxos de calor intra-urbano. Este trabalho apresenta os três métodos de análise do clima urbano adotados para a cidade do Rio de Janeiro e analisa seus resultados. A análise de séries temporais evidenciou a ascensão da curva da temperatura a partir da década de 1950 definindo, nas últimas três décadas, um cenário mais quente. O sensoriamento remoto apontou os espaços mais quentes da cidade, determinando e quantificando o núcleo da ilha de calor. A modelagem meteorológica reforçou e comparou o mapeamento da temperatura realizado com o sensoriamento remoto. Os métodos em conjunto complementam e aprimoram o estudo do clima urbano e da ilha de calor na cidade do Rio de Janeiro.

**Palavras chave:** Clima Urbano; Ilhas de Calor; Série Temporal; Sensoriamento Remoto; Modelagem Atmosférica.

### Abstract

The methodology in urban climate gathers methods for the mapping, analysis and mitigation of the heat island. The first and oldest one brings together the analyzes of time series from meteorological stations as important indicators to the study of the urban climate, pointing out patterns and trends. The second one is urban remote sensing based on distance imaging and its wide spatial coverage, which allows the quantification of the change in the environment over time, impossible only with the records of the meteorological stations. The third one is numerical modeling, which with simulations contributes to the understanding of the atmosphere at its lower levels in the layers closer to the surface, resulting in intra-urban heat flows. This paper presents the three methods of urban climate analysis adopted for the city of Rio de Janeiro and analyzes its results. The analysis of time series evidenced the rise of the temperature curve from the 1950s onwards, defining in the last three decades a warmer scenario. Remote sensing pointed to the hottest spaces in the city, determining and quantifying the core of the heat island. The meteorological modeling reinforced and compared the temperature mapping performed with remote sensing. The methods together complement and enhance the study of the urban climate and the heat island in the city of Rio de Janeiro.

**Keywords:** Urban Climate; Heat Island; Time Series; Remote Sensing; Atmospheric Modeling.

## 1. Introdução

O clima urbano é um sistema complexo, singular à cidade e às grandes áreas metropolitanas. Lugar de profundas alterações nos parâmetros atmosféricos, abrangendo circulação, turbulência e dispersão do ar, albedo e estocagem de calor, evapotranspiração e balanço de energia na superfície (Taha, 1997; Arnfield, 2003; Kanda, 2006). A literatura é vasta, em especial dedicada à análise da ilha de calor urbana, conduzida em várias cidades e metrópoles do mundo.

A ilha de calor é a principal manifestação do clima urbano e um dos principais problemas ambientais do século XXI (Rizwan et al., 2008). As ilhas de calor podem ser consideradas como uma modalidade de mudanças climáticas, que, causadas por fatores humanos e geradas em escala local, precisam de investigação para sua detecção e compreensão. É um fenômeno anômalo ambiental urbano associado à mudança na cobertura da superfície, que determina padrões bem mais complexos no balanço de energia, e, portanto, seus resultados precisam ser incorporados aos modelos de mudanças climáticas.

A metodologia em clima urbano reúne muitos métodos para o mapeamento, análise e mitigação da ilha de calor. O primeiro deles, e mais antigo, as análises de séries temporais oriundas de estações meteorológicas, são importantes indicadores preliminares ao estudo do clima urbano indicando padrões e tendências podendo ser influenciadas pelo efeito da ilha de calor (Gaffin et al., 2008). O sensoriamento remoto urbano (Voogt e Oke, 2003; Grimmond, 2006), ferramenta e método mais recente, que se apoia no imageamento à distância e sua ampla cobertura espacial. Cada imageamento cobre uma área espacial, permitindo a quantificação da mudança no ambiente ao longo do tempo, ou ainda, a descrição, a classificação e a detecção das propriedades físicas desse ambiente, impossíveis apenas com os registros das estações meteorológicas. A modelagem numérica, em sintonia com o sensoriamento remoto, é fundamental para os estudos em clima urbano (Freitas e Silva Dias, 2005). As simulações contribuem para o entendimento da atmosfera em seus níveis mais inferiores, nas camadas mais próximas à superfície, apresentando, como resultado, por exemplo, os fluxos de calor intra-urbano.

A cidade do Rio de Janeiro e a sua região metropolitana é um sistema altamente complexo em virtude do sítio, morfologia e ocupação urbana e de sua circulação atmosférica que merecem ser mais bem conhecidos. Há a necessidade de mapeamento do seu clima sob a ótica da climatologia urbana e investigação sobre a origem de formação de ilhas de calor no seu domínio.

O objetivo deste trabalho é apresentar a variedade de métodos de investigação do clima urbano na cidade do Rio de Janeiro, com uma análise em conjunto da série temporal de estação meteorológica, o sensoriamento remoto e a modelagem atmosférica. É uma proposta inovadora que visa discutir o campo

de análise em clima urbano sob a diversidade de métodos para uma cidade de grande porte e complexidade urbana da América do Sul.

## 2. Metodologia

A metodologia se divide no estudo dos três métodos discriminados: a série temporal, o sensoriamento remoto e a modelagem atmosférica. Para a série temporal foi selecionada a estação meteorológica mais antiga, situada na Praça XV, área central da cidade; em sensoriamento remoto foram selecionadas imagens do sensor Landsat; para a modelagem numérica-atmosférica utilizou-se o produto campo da temperatura do Modelo MM5.

### 2.1- Análise de série temporal

Os dados mensais de temperatura máxima, média e mínima da Praça XV iniciam a série temporal em 1917 e finda em 2009 e estão organizados por mês e agrupados em regimes sazonais: verão (dezembro, janeiro, fevereiro), outono (março, abril, maio), inverno (junho, julho, agosto) e primavera (setembro, outubro, novembro). Para compreender a evolução e tendência da temperatura foram aplicadas as técnicas de análise de regressão linear simples e a análise de variância.

Para a aplicação do modelo de regressão linear simples considerou-se o tempo como variável explicativa, medido em meses, e como possíveis variáveis respostas à temperatura. Assim, tem-se o gráfico de regressão com a variável dependente Y (temperatura do regime sazonal) versus a variável independente X (série temporal). Em todos os regimes e série temporal é apontada a equação da regressão linear, a variação anual, a variação ao longo da série temporal, o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), o coeficiente de determinação ajustado ( $R^2$ ) e a probabilidade de erro ou área de rejeição do teste de hipótese (p-valor). O nível de significância (p-valor) estipulado foi de 0,05%, isto é, um intervalo de confiança de 95%, para testar a hipótese de tendência crescente ou decrescente em comparação com a hipótese dita nula de que não houve mudança estatisticamente significativa. A tendência baseia-se na equação da reta dada pela regressão. O tratamento e análise estatística dos dados foram operados no pacote estatístico R versão 2.8.0, disponível gratuitamente em <http://www.R-project.org>.

A análise por variância clássica de estatística paramétrica (ANOVA), se destina à detecção da diferença entre médias de classes ou grupos, além da determinação dos seus intervalos de confiança (Xavier, 2007; Xavier e Pereira Filho, 2010). Os dados mensais médios sazonais foram agrupados em classes dentro de um intervalo de 10 anos. Cada década foi numerada iniciando em 1 e, então, organizadas: 1(1921-1930); 2(1931-1940); 3(1941-1950); 4(1951-1960); 5(1961-1970); 6(1971-1980); 7(1981-1990); 8(1991-2000); 9(2001-2009). A última década, referente aos anos 2000, agrupa um ano a menos, por não possuir o ano de 2010. Foram elaborados gráficos de intervalos de confiança das

médias, cujo eixo das abscissas (x) representa o fator, que corresponde à classe, e com o eixo das ordenadas (y) correspondente à resposta (temperatura). Junto aos gráficos, foram estipulados a média, o desvio padrão, o limite superior, o limite inferior e o p-valor de 5% para um intervalo de confiança de 95%. Todos os gráficos e operações estatísticas foram gerados no código computacional Action 1.1, disponível gratuitamente em <http://portalaction.com.br>.

## 2.2- Sensoriamento Remoto

A série temporal do Land Remote Sensing Satellite (Landsat) é, possivelmente, o principal banco de dados de imagens de satélite do Brasil (e do mundo) e está acessível gratuitamente e virtualmente aos usuários nacionais através do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e pela National Aeronautics and Space Administration (NASA). A base de dados concentrou-se na análise dos dados dos sensores Thematic Mapper (TM) e Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) a bordo dos satélites Landsat 5 e 7, respectivamente, que possuem a faixa do infravermelho termal (banda 6), posicionada dentro da janela atmosférica de intervalo espectral entre 10,40  $\mu\text{m}$  - 12,50  $\mu\text{m}$  destinando-se, dessa forma, ao mapeamento da temperatura dos alvos presentes na imagem.

Reuniu-se uma série temporal com 112 imagens Landsat-5 e 7 entre 1984 e 2010. Todas as imagens estão situadas na órbita-ponto 217-76, que abrange a cidade do Rio de Janeiro e a sua região metropolitana, e correspondem ao período matutino. Oscila entre as 12h e 12h50m (GMT), isto é, entre 9h e 9h50m no horário local (hora de Brasília) para as imagens de outono-inverno, e entre 10h e 10h50m no horário local (horário brasileiro de verão) para grande parte das imagens de primavera-verão. Dois critérios foram adotados para a seleção. O primeiro é a ausência ou a baixa presença de nuvens sobre a área continental da Região Metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ). 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. Com base nos dois critérios adotados, 13 imagens da série temporal de 112 foram excluídas, restando 99 para processamento e análise.

As imagens passaram 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 e depois gerados arquivos denominados "gribs" em formato "geotiff", que serviram como base para a confecção do cálculo da temperatura da superfície continental (TSC). 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 e depois convertidos em valores de reflectância. 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: 1) técnica com base em limiar do valor da reflectância na banda do vermelho; 2) técnica do limiar bruto (gross threshold)

e 3) técnica Q. A escolha desse conjunto de técnicas deve-se, principalmente, por esse algoritmo ser adaptado para o Landsat e também por ter sido empregado e testado no nordeste do Brasil, região de clima equatorial-tropical, conforme os trabalhos de França e Cracknell (1995) e Chen et al. (2003).

Estimou-se a (TSC) utilizando a banda 6 do Landsat com base em diferentes parametrizações (Qin et al., 2001; Souza e Silva, 2005), onde a correção atmosférica é realizada utilizando-se dados de estações meteorológicas espalhadas na cidade. A TSC estimada é resultado da combinação entre a temperatura de brilho na banda 6 e um fator de correção que leva em conta 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 de acordo com Van de Griend e Owe (1993). A demonstração com as equações e algoritmos de correção geométrica e correção atmosférica podem ser apreciadas em Lucena (2012) ou em Lucena et al. (2013). Por fim, as 99 imagens foram combinadas gerando uma única imagem de TSC final, a partir do cálculo de uma média, para todo o período de 1984 a 2010.

### **2.3- Modelagem atmosférica**

Foram realizadas simulações com o Modelo de Mesoescala MM5 (Mesoscale Model Version 5). A escolha do Modelo se deve pela sua aplicação em trabalhos anteriores para a RMRJ com inúmeras simulações (Moraes et. al., 2005). Onze simulações foram realizadas com o MM5 desde 2007, ano com disponibilidade de dados meteorológicos do modelo global GFS (Global Forecast System Model) do National Centers for Environment Prediction (NCEP), que são entrada para a inicialização do modelo, até 2010, simulações utilizadas em tese de doutorado de um dos autores deste trabalho (Lucena, 2012). Das simulações selecionou-se uma data de verão, 23/02/2007, que coincide com a passagem de uma imagem Landsat.

A configuração do modelo MM5 (Grell et al., 1995), o domínio das grades, a resolução espacial, o aninhamento de grade e as parametrizações físicas basearam-se em Corrêa (2004). As simulações com o MM5 utilizaram três domínios aninhados, centralizados sobre a cidade do Rio de Janeiro, com resoluções horizontais de 27, 9 e 3 km, respectivamente. Todos os domínios utilizaram topografia e categorias de uso do solo originados do United State Geological Survey (USGS) com resoluções espaciais de 19, 9 e 1 km, respectivamente.

As simulações tentaram abranger os mesmos recortes espaciais da imagem Landsat. Assim, os campos simulados, temperatura da superfície, calor latente, calor sensível, umidade relativa do ar, umidade do solo, direção e intensidade do vento e altura da camada limite, foram extraídos do aninhamento de maior resolução, ou seja, 3 km. A temperatura da superfície corresponde à definida pelo modelo, denominada *skin temperature*, que representa a temperatura da superfície do solo, único produto simulado que será considerado na análise dos resultados.

Dados horários de temperatura do ar de estações meteorológicas foram utilizados para comparar com a temperatura do MM5, buscando a sua validação e o comportamento da temperatura, resultado que não será explorado neste trabalho. As mesmas coordenadas geográficas da estação meteorológica foram utilizadas como pontos de comparação entre a temperatura da superfície do MM-5 com a TSC do Landsat. Foram elaborados gráficos comparativos da série temporal de 48 horas entre os dados das estações meteorológicas e do MM5, que não serão explorados na análise, e gráficos comparativos para às 11h, horário mais próximo da passagem do satélite, entre os dados do MM5 e do Landsat.

Com vistas a descrever o tempo atmosférico e integrar a análise das condições atmosféricas dominantes aos resultados gerados, recorreu-se à consulta de imagens GOES de vapor de água, ao CPTEC/INPE, e a carta sinótica de superfície a 1000 mb, recorrida a Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha do Brasil (DHN). Procurou-se o horário (horário de Brasília) mais próximo da passagem do sensor Landsat (10h40m) e das simulações do MM5 (11h), a saber, 9h30m (10h30m) ou 9h45m (10h45m) para as imagens GOES e 9h (10h) para as cartas sinóticas de superfície.

### 3. Resultados e Discussão

A análise da série temporal na Praça XV da temperatura média mostra uma tendência das curvas de regressão linear crescente em todos os regimes sazonais, mais pronunciado na primavera-verão com um incremento médio anual de 0,021°C e 0,023°C, respectivamente. Para o período de 90 anos, utilizando-se os coeficientes das equações da reta ajustadas, o incremento médio estimado é de 1,9°C e 2,1°C, respectivamente. Embora o  $R^2$  e o  $R^2$  ajustado se mostrem abaixo de 50%, o p-valor para o intervalo de confiança de 95% é altamente significativo (Figura 1; Tabela 1).

As médias da temperatura por década para o verão e a primavera e os respectivos intervalos de confiança são mostradas nas Figuras 2 e 3 e revelam uma elevada significância estatística com p-valor igual a zero. No verão, a década de 1930 é a mais fria (média de 24,9°C), com intervalo de confiança entre 24,5°C e 25,3°C, enquanto a década de 1990 é a mais quente (média de 26,9°C), com intervalo de confiança entre 26,5°C e 27,3°C, ou seja, seus intervalos não se cruzam. A diferença entre as duas décadas aproxima-se da média total do aumento para todo o período (2,1°C). A evolução da temperatura média no verão mostra uma ascensão abrupta entre a década de 1930 e 1950. Entre os anos 1950 e 1980 há uma leve estabilidade com tendência ao aumento que culmina na década de 1990, a mais quente. Em 2000, ocorre uma queda com relação à década de 1990 (de 26,9°C para 26,5°C), a segunda década mais quente, confirmando as duas últimas décadas como as mais quentes de toda a série.

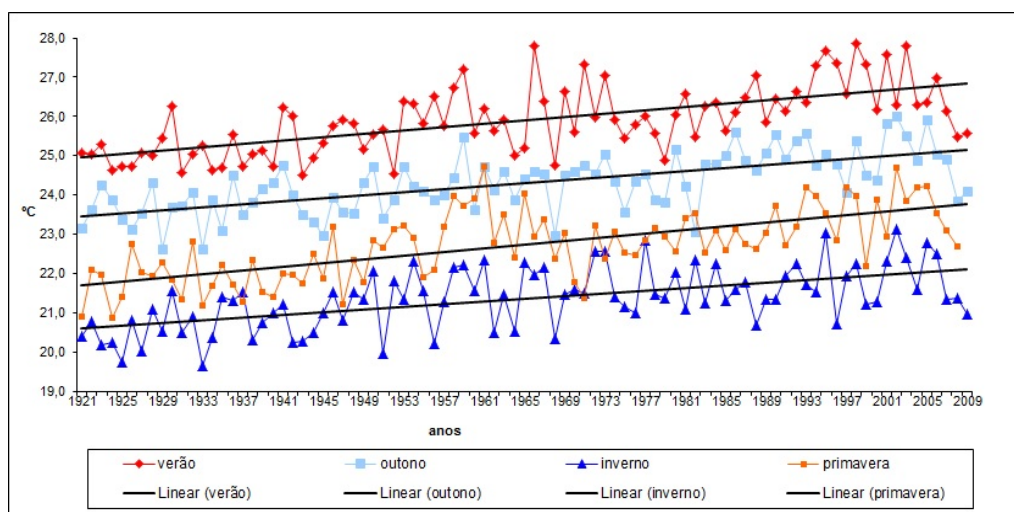


Figura 1: Variação sazonal da temperatura máxima na Praça XV/RJ entre 1921 e 2009

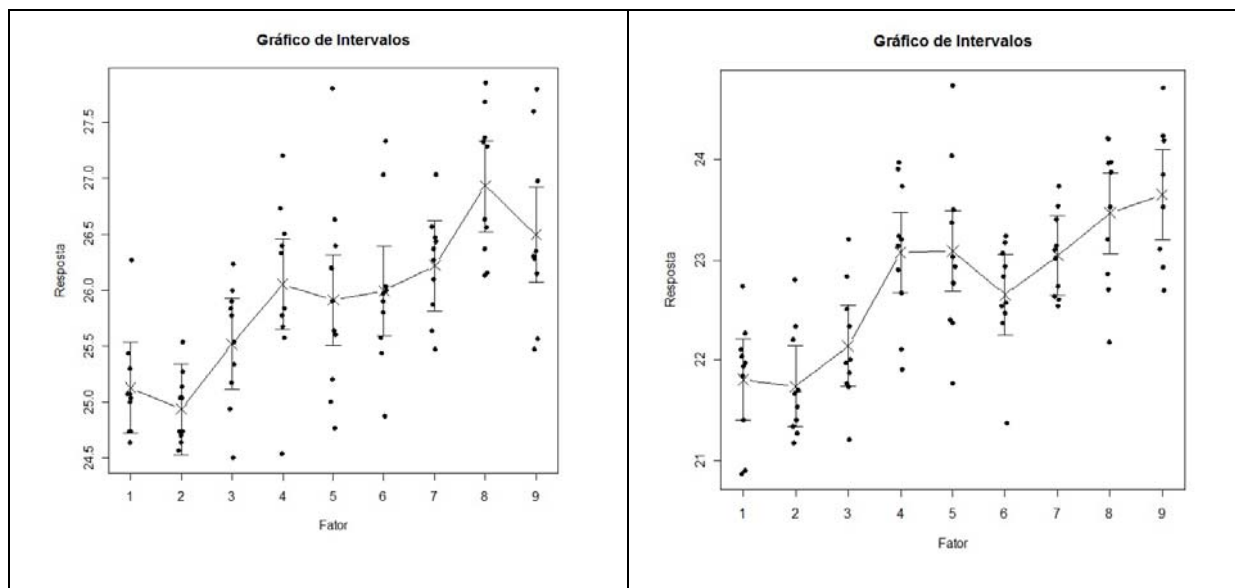
Tabela 1: Estatística da variação sazonal da temperatura média na Praça XV/RJ entre 1921 e 2009

Estações	Equação	Variação anual (°C)	Variação ao longo de 1921-2009 (°C)	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> ajustado	p-valor (95% IC)
Verão	0,0214x + 24,943	0,0214	1,9	0,411	0,404	0,00
Outono	0,019x + 23,445	0,019	1,7	0,424	0,418	0,00
Inverno	0,0171x + 20,593	0,0171	1,5	0,320	0,312	0,00
Primavera	0,0232x + 21,686	0,0232	2,1	0,439	0,433	0,00

Fonte: Organizada pelos autores com dados da estatística de regressão linear.

O resultado em sensoriamento remoto é observado na imagem termal, na Figura 4, que representa toda a região metropolitana do Rio de Janeiro (RMRJ), incluindo a cidade do Rio de Janeiro dentro de seu contexto metropolitano.

A Temperatura da Superfície Continental (TSC) registra seus maiores valores, em tons de vermelho, acima dos 30°C, na área mais urbanizada da cidade, na margem leste da baía de Guanabara e nas áreas planas entre os três maciços costeiros (Tijuca, Pedra Branca e Gericinó-Mendanha). Esses espaços definem os núcleos mais intensos da ilha de calor urbana na cidade do Rio de Janeiro. Em direção ao extremo oeste e à faixa litorânea sul, a mancha em tons vermelho se expande, mas se mistura com tons em laranja e amarelo (TSC entre 24 e 30°C), definindo núcleos secundários da ilha de calor. Essas duas áreas são espaços urbanizados de padrão mais recente de urbanização que mesclam usos mais mistos, entre o urbano, o periurbano, o solo exposto e o uso agrícola. Finalmente, nas áreas em



Figuras 2 e 3: Intervalo de confiança (95%) por década para a temperatura média na Praça XV/RJ no verão (à esquerda) e primavera (à direita) entre 1921-2009

tons verde (TSC entre 15 e 24°C), que engloba boa parte dos maciços costeiros, estão registrados os valores mais baixos de TSC na cidade, constituindo zonas de refrigério no denso espaço urbano.

Além dos limites administrativos da cidade do Rio de Janeiro, as outras cidades da RMRJ reproduzem um padrão espacial térmico semelhante, que obedece a seguinte lógica: os espaços mais quentes se encontram nos ambientes mais urbanizados decrescendo em direção às zonas de uso “natural”, áreas de vegetação ou floresta. Por outro lado, é possível observar valores altos de TSC em espaços não urbanizados, de uso “solo exposto”, identificados no setor nordeste e noroeste da Figura, em tons amarelo-laranja, ao passo que em áreas densamente urbanizadas há pixels com TSC abaixo de 20°C, que se assemelha aos ambientes de floresta, que se deve aos redutos de área verde permanentes ou artificiais, configurando espaços de “ilhas de frescor”.

Na análise da modelagem atmosférica no MM-5 também considerou toda a RMRJ, incluindo a cidade do Rio de Janeiro dentro de seu contexto. Para o dia da amostra da simulação e a sua comparação com a imagem termal, 15/02/2007, o tempo sinótico foi de estabilidade, sem nuvens e com ventos fracos de norte e leste.



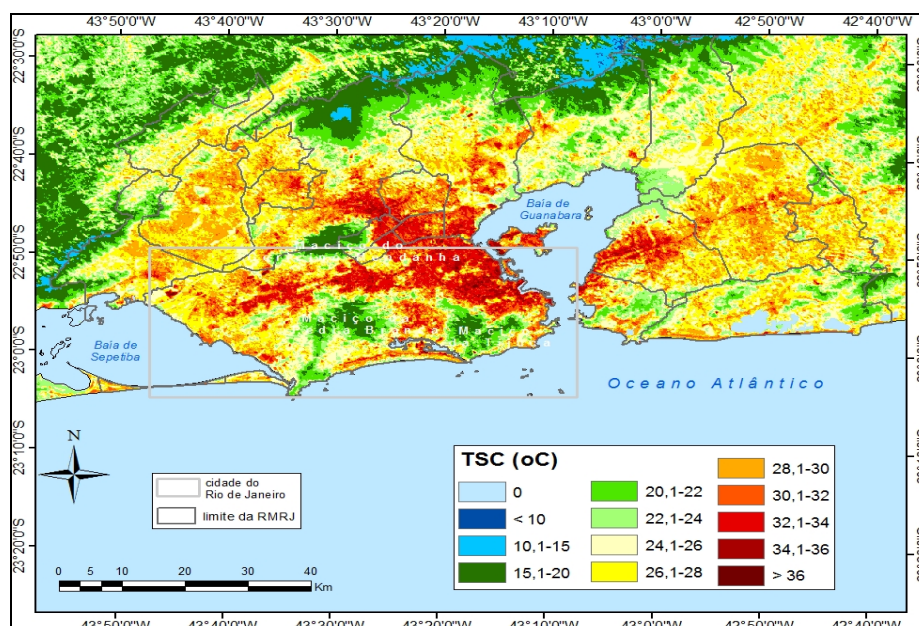


Figura 4: Temperatura da Superfície Continental (TSC) na cidade do Rio de Janeiro e sua região metropolitana no período 1984-2010

O gráfico da Figura 5 mostra o comportamento pontual da temperatura da estação meteorológica, do modelo numérico e do satélite em 10 pontos da RMRJ (Niterói e Nova Iguaçu são os pontos externos à cidade do Rio de Janeiro). A temperatura estimada pelo satélite é a mais alta, seguida pelo modelo e pela estação meteorológica. A única exceção ocorre na Marambaia, quando a temperatura da estação é levemente superior à do modelo. A temperatura estimada pelo satélite revela gradiente muito alto quando comparada à das outras fontes, principalmente com a estação meteorológica. A média da temperatura de todas as localidades entre a observada pelo satélite e da estação meteorológica é de 16,3°C (27°C em Jacarepaguá-Metar) e cai para 11,4°C com o modelo MM5 (o valor máximo absoluto é de 22,8°C, também em Jacarepaguá-Metar). Por outro lado, quando se compara a média do gradiente entre o MM5 e a estação meteorológica, o valor é mais baixo, 5,9°C (atinge 9,1°C em Niterói).

O gradiente térmico discrepante entre a temperatura estimada pelo Landsat-5 com a estação meteorológica deve-se exatamente pela natureza da superfície fonte. Enquanto a primeira corresponde à TSC, a segunda registra a temperatura do ar, livre do atrito, por isso situada a 1,5 metros da superfície segundo normas da Organização Meteorológica Mundial (OMM). Levam-se igualmente em conta as sucessivas técnicas para a correção atmosférica da temperatura estimada pelo Landsat-5 visando a descontaminação do píxel. No entanto, a temperatura do modelo, que se baseia na temperatura da superfície (*skin temperature*, isto é, a temperatura da superfície). Possui um gradiente mais distante ao satélite e um pouco mais próximo da estação. Essa resposta pode estar relacionada aos componentes da

simulação desenvolvida pelo MM5 ou ainda, segundo AHRENS (2001), a temperatura a 1,5 metros da superfície pode alcançar um gradiente de 15°C inferior à superfície em um dia ensolarado e calmo.

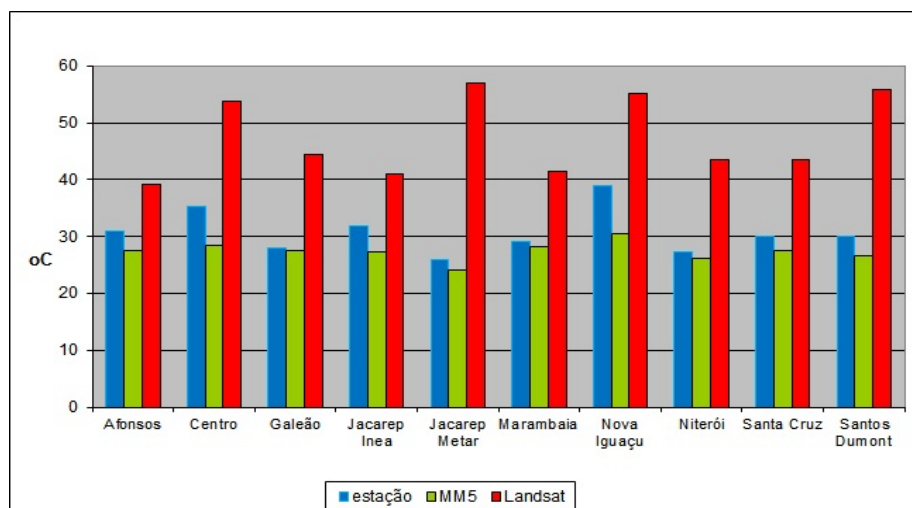


Figura 5: Temperatura observada pela estação meteorológica (a 1,5m da superfície), Temperatura simulada pelo modelo MM5 (*skin temperature*) e Temperatura estimada (Temperatura da Superfície Continental - TSC) pelo satélite Landsat-5 em 23/02/2007 às 10h em 10 pontos da Região Metropolitana do Rio de Janeiro

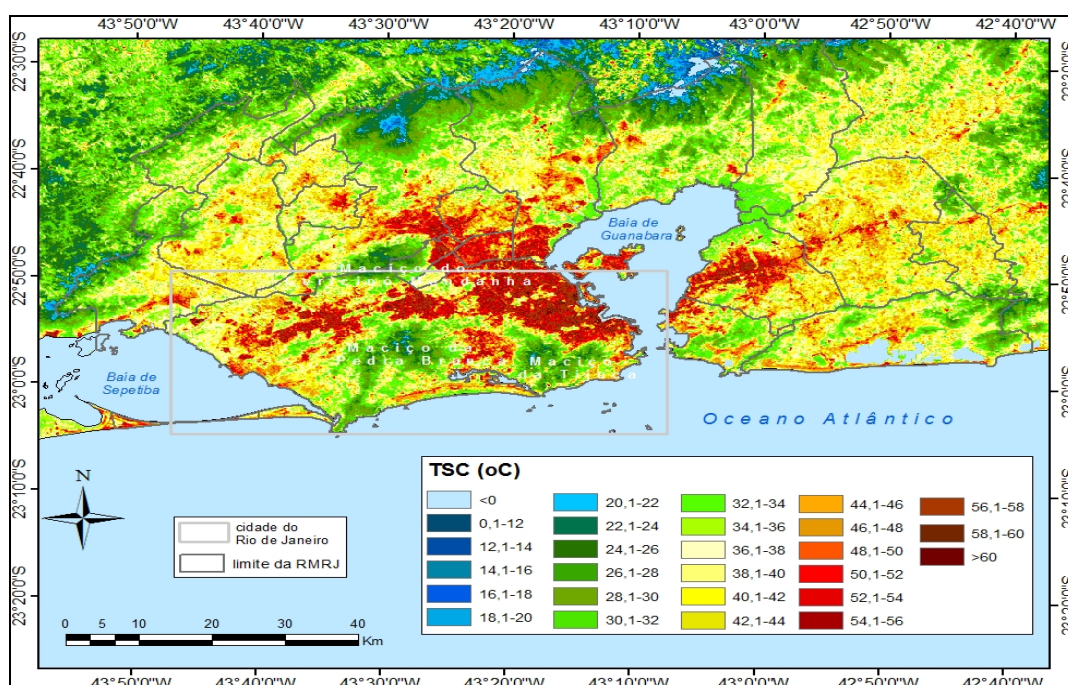


Figura 6: Temperatura da Superfície Continental (TSC) na cidade do Rio de Janeiro e sua região metropolitana no dia 23/02/2007 às 12h46 (GMT) pelo Landsat-5

Na comparação entre a TSC estimada pelo Landsat-5 e a temperatura simulada pelo MM5, a primeira concentra seu núcleo mais quente na borda leste da baía de Guanabara e nas áreas planas entre os três maciços costeiros, em direção ao extremo oeste e ao setor centro-norte (Figura 6), os espaços mais urbanizados. Esse núcleo engloba temperaturas acima de 46°C, ou mesmo acima de 60°C, podendo atingir 70°C. Essas áreas são lócus da formação da ilha de calor urbana. As áreas mais amenas, com TSC abaixo de 30°C, estão reservadas aos maciços costeiros e ao extremo norte e noroeste da RMRJ (Figura 6), além dos limites administrativos da cidade do Rio de Janeiro.

A temperatura da superfície simulada pelo MM5, em suas devidas proporções, concorda com a espacialização da temperatura estimada pelo Landsat e ratifica as áreas sujeitas à geração da ilha de calor urbana. Uma mancha contínua e homogênea, em tom vermelho mais escuro, abriga o núcleo mais quente, acima de 34°C, e conforma-se nas bordas leste e oeste da baía de Guanabara com extensão a oeste (Figura 7). As áreas mais amenas, salvo exceções, aderem àquelas mostradas pelo Landsat, mais evidente na porção norte da Figura 7 com valores que podem estar abaixo de 28°C e bem próximo a 20°C. O modelo identifica os três maciços costeiros em tons de amarelo e laranja (*skin temperature* entre 25 e 30°C) revelando a função da vegetação no rebaixamento da temperatura.

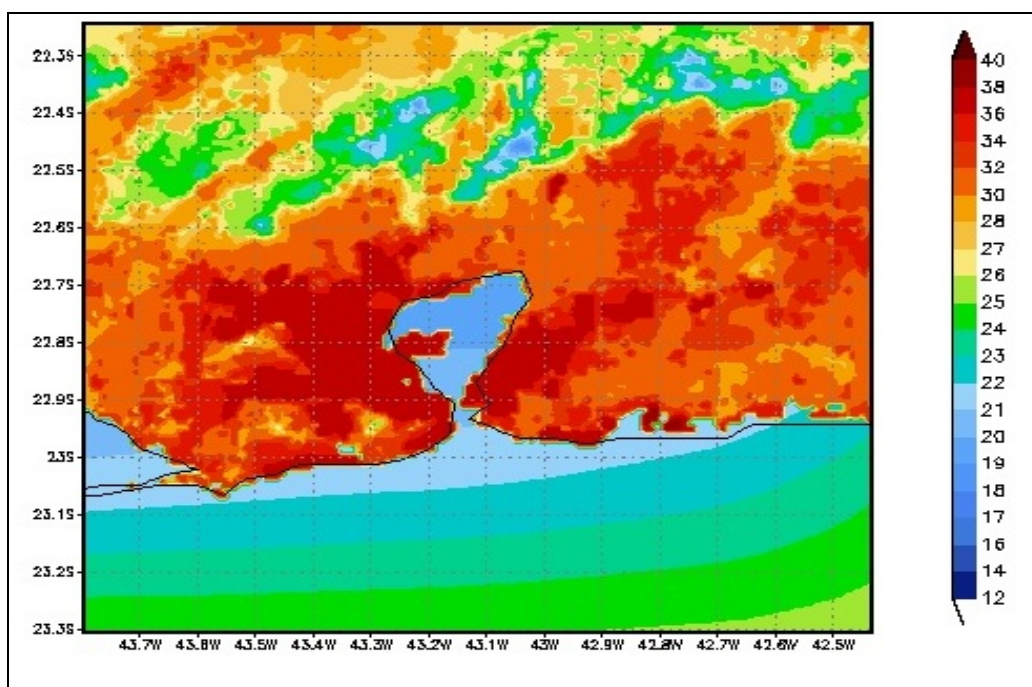


Figura 7: Temperatura da superfície (*skin temperature*) simulada pelo Modelo MM5 na cidade do Rio de Janeiro e sua região metropolitana no dia 23/02/2007 às 12h (GMT)

#### 4. Considerações Finais

Os três métodos adotados dão mostras da complexidade do estudo do clima urbano. A análise de séries temporais teve por objetivo descrever o campo da temperatura e apontar a distribuição temporal e espacial da população. O sensoriamento remoto foi aplicado no intuito de mapear o campo da temperatura apontando os espaços mais quentes da cidade e região metropolitana e identificando os núcleos mais intensos da ilha de calor. A modelagem meteorológica reforçou e comparou o mapeamento da temperatura realizado com o sensoriamento remoto, permitindo ampliar a compreensão do padrão espacial da temperatura e da configuração da ilha de calor.

A conjugação de três métodos simultâneos é uma proposta inovadora para o estudo do clima urbano e da sua ilha de calor em uma combinação de resultados pontuais, espaciais e temporais. É um trabalho preliminar que buscou ampliar e diversificar a metodologia da pesquisa de Lucena (2012), que com resultados mais robustos e complexos, não cabíveis para o formato deste artigo, reforçam e traduzem a inovação aqui proposta.

Uma rede de estações meteorológicas mais abrangentes é o esperado para uma cidade do porte da cidade do Rio de Janeiro, bem como a inclusão da temperatura máxima e mínima, principalmente. A ampliação da rede e das variáveis da temperatura aprimora o entendimento da evolução e tendência da temperatura definindo padrões térmicos em diferentes espaços da cidade que poderão assessorar o mapeamento térmico por sensoriamento. Soma-se a importância da inserção de outras técnicas estatísticas para as séries temporais com fins da análise de tendências, como a análise de Fourier e a análise espectral (Morettin e Tolo, 2006), e outros testes para a significância estatística da análise linear, como os testes não-paramétricos de Mann-Kendall e Kruskal-Wallis (Marengo e Alves, 2005; Xavier et al., 2007).

No campo do sensoriamento remoto termal a série de quase 30 anos de imagens Landsat pode ser seccionada em décadas ou em grupos menores de anos para o acompanhamento da evolução temporal e espacial da Temperatura da Superfície Continental (TSC) mediante a adoção de testes estatísticos paramétricos e não paramétricos para qualificar a variação termal por pixel entre um período e outro. Em conjunto com a TSC sugere-se o uso de outras ferramentas do sensoriamento remoto para explorar a área vegetada e urbanizada, desde o mais tradicional, como o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), até outros pouco conhecidos ou aplicados na literatura, como o Índice de Área Construída (IBI), a Área Impermeável da Superfície (ISA), o Índice de Área Construída por Diferença Normalizada (NDBI), o Índice de Condição de Temperatura (TCI) e o Índice de Condição de Vegetação (VCI). Sem esgotar essa discussão, a elaboração do mapa de uso do solo é de suma importância, pois nele está a base para a análise conjugada com a TSC e dos demais índices que poderão ser adotados. E, finalmente, outros sensores, como o ASTER e o MODIS, precisam ser incorporados em novas análises. O ASTER tem diversos dias e horários alternativos de passagem, além

de possuir inúmeras bandas termais, não apenas uma como o Landsat 5 e 7. O MODIS tem uma periodicidade diuturna, pela manhã e à noite, o que sugere uma análise do ciclo diurno da ilha de calor. Ainda assim, deve-se dar continuidade ao uso dos dados Landsat, ainda mais com a disposição das imagens da série 8 desde 2011, e procurar comparar suas respostas espectrais com os outros sensores.

A modelagem da temperatura com o MM5 reforçou o mapeamento da TSC pelo Landsat, mostrando-se uma ferramenta complementar. As áreas mais quentes obtiveram respostas similares entre a temperatura da superfície simulada pelo MM5 e a TSC estimada pelo Landsat. Certamente com a adição dos demais episódios sazonais, não contemplados neste artigo, observaria a variabilidade sazonal dos episódios analisados que poderia mostrar diferenças na espacialidade da temperatura e/ou em seus gradientes. Outros campos da modelagem devem incorporar a análise conjunta da temperatura, como é o caso do calor latente e sensível, o campo de vento, a altura da camada limite e a umidade do solo. Outras pesquisas precisam ser impulsionadas com vistas à integração com as imagens Landsat, a partir da inserção do mapa termal e do mapa de uso do solo como entradas do modelo, além do mapa fisiográfico, que, provavelmente, trarão novos cenários com maior detalhamento dos resultados e novas configurações, talvez antes não percebidas. Sugere-se a incorporação de outros sensores, como o MODIS, de resolução temporal diária, com passagens pela manhã e pela noite, conjuntamente com os campos de calor latente, sensível, altura da camada limite e o campo do vento. Esse novo cenário pode trazer uma possibilidade de acompanhamento do ciclo diurno da temperatura para diferentes momentos, sejam semanais ou sazonais, com ação de diferentes sistemas atmosféricos. Não se exclui a adoção de outros modelos atmosféricos de mesoescala, e mais robustos, como o ARPS, que não somente estaria integrado ao sensoriamento remoto para avaliar a temperatura simulada e estimada, mas também poderia cooperar no avanço de melhor compreender a gênese e a formação das chuvas urbanas, uma categoria de interesse para observação de possíveis relações com o fenômeno da ilha de calor metropolitana. Sugere-se, ainda, e não menos importante, a adoção de modelos para escalas espaciais mais detalhadas, restritos a camada limite urbana, que podem alcançar os vales (canyons) urbanos e simular de maneira mais eficiente os fluxos de energia, calor latente e calor sensível, bem como o papel do vento no contato quase que direto com a rugosidade do solo.

Incluir aqui série temporal... Todas as sugestões e aprimoramentos entre a modelagem e o sensoriamento remoto vêm ao encontro do tratamento mais sofisticado que requer a complexidade da cidade do Rio de Janeiro e a sua metrópole, de uma paisagem heterogeneidade marcante, devida a sua situação geográfica, à configuração topográfica e à elevada urbanização, que, em conjunto, atuam como diferentes forçantes no funcionamento do seu geossistema. É um estímulo à pesquisa em clima urbano para melhor monitorar, compreender e mitigar a ilha de calor metropolitana, definição dada por Lucena (2012) para a complexa rede espacial urbana do clima em dimensões metropolitanas no Rio de Janeiro, ou mesmo outras fenomenologias ambientais derivadas.



#### 4. Bibliografia

- Arnfield, A.J. (2003). Two decades of urban climate research: A review of turbulence, exchanges of energy and water and the urban heat island. *International Journal Climatology*, 23, 1–26.
- Chander, G., Markham, B. L. (2003). Revised Landsat-5 TM radiometric calibration procedures, and post-calibration dynamic ranges. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41, 2674–2677.
- Chander, G., Markham, B.L., Helder, D.L. (2009). Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment*, 113, 893–903.
- Chen, P. Y., Srinivasan, R., Fedosejevs, G. Kiniry, J. R. (2003). Evaluating different NDVI composite techniques using NOAA-14 AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 24(17), 3403-3412.
- Corrêa E. (2004). Análise da sensibilidade do modelo MM5 aos refinamentos e aninhamentos de grades – um estudo de caso sobre a cidade do Rio de Janeiro. In *XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia*. Anais. Fortaleza, Ceará, Brasil.
- França, G. B., Cracknell, A. P. (1995). A simple cloud masking approach using NOAA AVHRR daytime data for tropical areas. *International Journal of Remote Sensing*, 16, 1697–1705.
- Freitas, E. D., Silva Dias, P. L. (2005). Alguns efeitos de áreas urbanas na geração de uma ilha de calor. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 20(3), 355-366.
- Gaffin, S. R., Rosenzweig, C., Khanbilvardi, R., Parshall, L., Mahani, S., Glickman, H., Goldberg, R., Blake, R., Slosberg, R.B., Hillel, D. (2008). Variations in New York city's urban heat island strength over time and space. *Theoretical and Applied Climatology*, 94 (1-2), 1-11.
- Grell, G. A., Dudhia, J., Stauffer, D. R. (1995). A description of the fifth generation Penn State/ NCAR Mesoscale Model (MM5). NCAR Technical NOTE, NCAR/TN-398+STR.
- Grimmond, C. S. B. (2006). Progress in measuring and observing the urban atmosphere. *Theoretical and Applied Climatology*, 84, 3–22.
- Kanda, M. (2006). Progress in the scale modeling of urban climate: Review. *Theoretical Applied Climatology*, 84, 23–33.
- Lucena, A.J. (2012). *A ilha de calor na região metropolitana do Rio de Janeiro*. Dissertação de Doutorado. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro;
- Lucena, A.J.; Rotunno Filho, O.C.; França, J.R.A.; Peres, L.F.; Xavier, L.N.R. (2013). Urban climate and clues of heat island events in the metropolitan area of Rio de Janeiro. *Theoretical Applied Climatology*, 111, 497-511;
- Moraes, N. O., Marton, E., Pimentel, L. C. G., 2005, “Simulações numéricas da formação de ilha de calor na região metropolitana do Rio de Janeiro”, Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ, vol. 28, n.2, pp. 116-138.
- Qin, Z., Karnieli, A., Berliner, P. (2001). 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*, 22(18), 3719–3746.
- Rizwan, A. M., Dennis, Y.C., LIU, C. (2008). A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island. *Journal of Environmental Sciences*, 20, 120–128.
- Souza, J.D., Silva, B.B. (2005). Correção atmosférica para temperatura da superfície obtida com imagem TM: Landsat 5. *Revista Brasileira de Geofísica*, 23(4), 349-358.
- Taha, H. (1997). Urban climates and heat islands: albedo, evapotranspiration, and anthropogenic heat. *Energy and Buildings*, 25, 99-103.

Van de Griend, A.A., OWE, M. (1993). On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surfaces. *International Journal of Remote Sensing*, 14, 1119–1131.

Voogt, J. A., OKE, T. R. (2003). Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment*, 86, 370–384;

Xavier, T.M.B.S. (2010). Estatística aplicada à Climatologia. mini-curso. IX Simpósio Brasileiro de Climatologia Geográfica, Fortaleza, Ceará, Brasil;

Xavier, T.M.B.S., Pereira Filho, A.J. (2007). Análise das medições e observações meteorológico-climáticas de superfície. In Pereira Filho, A.J., Santos, P.M., Xavier, T.M.B.S. (eds), *Evolução do tempo e do clima na região metropolitana de São Paulo* (pp. 123-231), Linear B: IAG/USP.