

XI SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE

USO DO SENSORIAMENTO REMOTO NA AVALIAÇÃO DA FORMAÇÃO DE ILHAS DE CALOR EM CIDADES NORDESTINAS

*Cristiano Seabra de Lima*¹; *Rosângela Sampaio Reis*²

RESUMO - O presente trabalho tem a finalidade de analisar a intensidade da relação do percentual de superfícies impermeabilizadas na formação de ilhas de calor em áreas urbanas através da análise de imagens de satélites. As mudanças que ocorrem na paisagem decorrentes da urbanização alteram o balanço de energia e o balanço hídrico urbano. Essas transformações são causadas pela retirada da vegetação original, pelo aumento da circulação de veículos e pessoas, pela impermeabilização do solo, pelas mudanças no relevo, por meio de aterros, canalizações de rios e córregos, concentração de edificações, verticalização urbana, além do lançamento de partículas e gases poluentes na atmosfera. Nesse sentido, a variabilidade do subsistema termodinâmico em uma região urbana pode ser determinada, em uma primeira análise, a partir da comparação da temperatura urbana com a do campo circundante. Nesta pesquisa foram utilizadas imagens do satélite Landsat Thematic Mapper 5 para estimar as ilhas de calor nas capitais: Maceió e João Pessoa. Os métodos de Chander e Markham (2003) e de Malaret et al. (1985) foram utilizados para o cálculo da temperatura superficial. Os resultados obtidos apresentaram variações consideráveis de temperatura entre áreas urbanas e áreas arborizadas chegando até 8 °C de diferença.

ABSTRACT - This work aims to analyze the influence of waterproofed surfaces percentage in the formation of heat islands in urban areas through the analysis of satellite images. The changes that occur in the landscape resulting from urbanization alter the balance of energy and water balance urban. These changes are caused by the withdrawal of the original vegetation, by increasing the movement of vehicles and people, the sealing of the soil, by changes in topography, by means of landfills, conduits of rivers and streams, concentration of buildings, urban verticalisation, in addition to the launch of particulate and pollutants gaseous in the atmosphere. Wherefor, the variability of thermodynamic subsystem in an urban area can be determined, in a first analysis, from the comparison of urban temperature with the surrounding field. In this research were used images of satellite Landsat Thematic Mapper 5 to estimate the heat islands in the capitals: Maceió and João Pessoa. The methods of Chander and Markham (2003) and Malaret et al. (1985) were used to calculate the surface temperature. The results showed considerable variations of surface temperature between urban and wooded areas reaching up to 8 °C difference.

Palavras-Chave - Ilha de calor, sensoriamento.

¹Universidade Federal de Alagoas: (82)8862-0396, cslcristiano@hotmail.com

²Universidade Federal de Alagoas: (82)3214-1273, rosangelareis_al@hotmail.com

1. INTRODUÇÃO

As “ilhas de calor urbano” - que segundo Voogt e Oke (2003), consistem em altos valores de temperatura superficial e atmosférica local em comparação com áreas rurais vizinhas - são fenômenos climáticos cada vez mais presentes, especialmente nas grandes cidades, afetando diretamente a qualidade de vida da população que reside ou que circula nessa região, devido ao desconforto térmico causado pelo aumento da temperatura local.

Segundo Yuan e Bauer (2007), a ação antropogênica é determinante na ocorrência do fenômeno das ilhas de calor, pois o alto índice de crescimento populacional tem exigido uma demanda maior de áreas urbanizadas, e em consequência disso, tem causado a impermeabilização dessas áreas com materiais de grande capacidade de retenção de calor. Essa impermeabilização do solo afeta diretamente o ciclo hidrológico local, aumentando a velocidade do escoamento superficial e causando com isto, a diminuição na quantidade de água retida e evapotranspirada, a qual é responsável pelo resfriamento do ambiente. Além disso, fatores como a poluição do ar por gases do efeito estufa, industrialização, redução de áreas verdes, emissões antrópicas de calor associadas à queima de combustíveis, entre outros, acumulam-se, afetando negativamente o clima e a precipitação locais através de alterações do balanço de energia térmica e do ciclo hidrológico nessas regiões.

A mudança dos materiais constituintes da superfície terrestre urbana resulta também em mudanças na forma da reflexão de radiação eletromagnética e emissividade, já que os parâmetros físicos dos materiais utilizados em construções são diferentes dos parâmetros físicos próprios da vegetação; a condutividade térmica, a densidade e a capacidade térmica, são alguns dos parâmetros responsáveis por essa mudança na resposta espectral de uma região.

Diante dos fatos citados, este trabalho pretende analisar o comportamento das mudanças climáticas locais decorrentes da formação de ilhas de calor urbano em cidades nordestinas, através do sensoriamento remoto, e com isto, avaliar a influência da urbanização na formação das ilhas de calor, de modo a contribuir na reflexão sobre a gestão do uso do espaço urbano, em prol da melhoria da qualidade de vida da população.

Essas mudanças de reflexão e emissão locais serão estimadas em duas cidades com diferentes estágios de urbanização, através de imagens de sensores da banda do infravermelho termal, do satélite Landsat-5 Thematic Mapper (TM).

2. Revisão Bibliográfica

2.1 As imagens de satélite na análise ambiental

Segundo Florenzano (2011), o sensoriamento remoto é a tecnologia que permite obter imagens - e outros tipos de dados - da superfície terrestre, por meio da captação e do registro da energia refletida ou emitida pela superfície.

O desenvolvimento dessa tecnologia traz benefícios para várias áreas de conhecimento como: telecomunicações, previsão do tempo e clima, meio ambiente, medicina, indústria, entre

outras.

No que toca ao meio ambiente, a possibilidade de enxergar detalhes das mudanças de cobertura do solo de uma posição privilegiada proporciona uma visão de conjunto e de diferentes datas em áreas de grande extensão.

Em relação ao meio ambiente, as imagens de satélites proporcionam uma visão de conjunto e de diferentes datas em áreas de grande extensão. Isso, por sua vez, implica no conhecimento mais detalhados das mudanças de cobertura e de uso solo, níveis de erosão do solo, poluição da água e do ar, disposição irregular de resíduos, mudanças de temperaturas superficiais em determinadas áreas, entre outros, ao longo do tempo.

Essas informações, quando identificadas adequadamente, tem significativa relevância no momento da elaboração de um planejamento mais eficaz (por parte do governo ou empresas) para a diminuição de impactos negativos, o que resulta diretamente numa tomada de decisão mais coerente para o sucesso das metas propostas.

2.1.1 Satélites Disponíveis

Atualmente, segundo a EMBRAPA (2011b), 25 satélites estão em operação, são eles: Landsat; NOAA; SPOT; CBERS; QUICKBIRD; RADARSAT; RapidEye; DMSP; ENVISAT; EROS; ERS; GALILEO; GeoEye; GPS; GOES; IKONOS; IRS; KOMPSAT; ORBVUE; METEOSAT; TERRA; TerraSAR-X; WorldView; ALOS; AQUA.

A série de satélites Landsat (Land Remote Sensing Satellite) foi desenvolvida pela Agência Espacial Americana no fim da década de 60 para a observação dos recursos naturais terrestres. Até hoje foram lançados 7 satélites do Programa Landsat desde 1972 sendo o primeiro, Landsat 1, lançado em 23 de julho de 1972 (desativado em 06 de janeiro de 1978); o segundo, Landsat 2, lançado em 22 de janeiro 1975 (desativado em fevereiro de 1982); o terceiro, Landsat 3, lançado em 05 de março de 1978 (desativado em 31 de março de 1983); o quarto, Landsat 4, lançado em 16 de julho 1982 (não disponibiliza imagens, apesar de estar ativo); o quinto, Landsat 5, lançado em 01 de março de 1984 (ativo até o momento); o sexto, Landsat 6, lançado em 05 de outubro de 1993 (perdido após o lançamento); e o sétimo, Landsat 7, lançado em 15 de abril de 1999 (ativo normalmente até 31 de maio de 2003, e em modo SLC-OFF depois desta data, com a qualidade das imagens muito prejudicadas). (ENGESAT, 2011) O satélite Landsat 5, lançado em 01 de março de 1984 com o sensor TM (Thematic Mapper) possui 7 bandas espectrais, das quais a banda pancromática possui resolução de 30m², enquanto que a banda termal possui uma resolução espacial de 120m² e faixa espectral entre 10.42μm e 12.50μm. (ENGESAT, 2011)

Segundo a EMBRAPA (2011a), O satélite Landsat 7, lançado em 15 abril de 1999 com novo sensor a bordo denominado ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus), possui oito bandas espectrais compreendidas entre a região do visível e do infravermelho, das quais, a banda pancromática possui resolução de 15m² e a banda termal resolução de 60m².

Segundo o INPE (2011a), o programa de satélites CBERS (China-Brazil Earth Resources Satellite) faz parte do Sistema Brasileiro de Coleta de Dados Ambientais e tem o objetivo de fornecer dados ambientais diários coletados em diferentes regiões do território brasileiro,

sendo utilizados em campos importantes como no controle do desmatamento e queimadas na Amazônia Legal, no monitoramento de recursos hídricos, de áreas agrícolas, de crescimento urbano, da ocupação do solo entre outros.

Os satélites NOAA, GOES, METEOSAT e EOS, são utilizados pelo INPE, através do Sistema de Monitoramento, Prevenção e Controle de Incêndios Florestais na Amazônia (PRO-ARCO), no monitoramento de queimadas. (INPE, 2011b)

A série de satélites NOAA, controlada pela National Oceanic and Atmospheric Administration foi desenvolvido com o objetivo de coletar informações meteorológicas da superfície terrestre. Possui sensor AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) com resolução espacial de 1,1 por 1,1 km, composto por 5 canais espectrais nas bandas do vermelho, infravermelho próximo, infravermelho médio e dois canais no infravermelho termal.

O satélite GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite) é operado pela National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) e controlada pela National Aeronautics and Space Administration (NASA) e suas imagens são utilizadas na previsão do tempo dos países localizados no continente americano, completando com o METEOSAT e o GOES a rede internacional de observação meteorológica da Terra.

O METEOSAT é uma série de satélites europeus, cujos dados e serviços são principalmente voltados para a meteorologia, com ênfase no apoio à previsão do tempo. (EMBRAPA, 2011c)

O satélite Terra (EOS) faz parte do programa da NASA denominado Earth Observing System (EOS) e tem como missão contribuir para pesquisas sobre dinâmica atmosférica global e suas interações com a superfície terrestre e oceano. O sensor ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection) é parte desse sistema de observação. Tendo sido lançado em dezembro de 1999, o ASTER está sendo usado com o objetivo de obter mapas detalhados da reflectância da superfície, temperatura e altitude, operando nas regiões do visível, infravermelho próximo, infravermelho de ondas curtas e infravermelho termal, onde é composto por três bandas do infravermelho próximo com resolução de 15m, 6 bandas no infravermelho médio com resolução de 30m, e cinco bandas no infravermelho termal com resolução de 90m. (California Institute of Technology, 2012)

2.2 O crescimento urbano no Brasil

Atualmente o Brasil possui 190.755.799 habitantes, segundo a Sinopse do Censo Demográfico 2010, realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. A migração foi responsável pelo aumento populacional entre 1800 e 1950, chegando, nesse ano, a um número de 51.944.397 habitantes. Houve, por tanto, um aumento de quase 140 milhões de pessoas entre a população de 1950 e a de 2010, devido ao crescimento vegetativo, que consiste na relação entre a taxa de natalidade e mortalidade. (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2011)

Segundo Andrade e Serra (2001), a intensificação da industrialização é um dos fatores responsáveis pelo rápido crescimento do número de trabalhadores nas cidades, aumentando, com isso, a demanda por habitações populares. Paralelamente a esse fenômeno, ocorreu a

valorização dos terrenos fabris e residenciais, e por isso, a diminuição da construção de vilas operárias próximas às fábricas, prática essa comum até a década de 1930.

O aumento populacional nas cidades, segundo Lodder (2001), é um conjunto de fatores devidos ao modo de produção agrícola e a estrutura fundiária rural, que favoreciam um fluxo positivo da migração campo-cidade, além de fatores de natureza político-social como, por exemplo, a Lei Áurea de 1888, a Proclamação da República em 1889 e o sistema federativo adotado. Porém, Lodder afirma ainda que a Revolução Industrial e suas seqüelas vieram a transformar a orientação desse processo de crescimento mediante nova configuração ou arranjo do espaço urbano.

2.3 Problemas ambientais nas cidades

O aumento populacional trás consigo a necessidade de desenvolvimento, e com isso, os impactos ambientais negativos são praticamente inevitáveis. A demanda crescente por áreas destinadas a fins habitacionais e industriais tem feito crescer o número de áreas urbanizadas, ou seja, áreas impermeabilizadas, modificando o balanço local de energia térmica, ciclo hidrológico, aumentando a produção de resíduos sólidos, a poluição hídrica e lançamento de gases nocivos a saúde humana. Lucas et al. (2007), afirma que os problemas ambientais têm sido agravados pelo aumento da população e o conseqüente incremento das atividades industriais nas últimas décadas.

Sobre o balanço de energia térmica, Molion (2007) explica que a radiação eletromagnética emitida pelo sol, especialmente a de comprimento de onda entre $0,1\mu\text{m}$ e $4,0\mu\text{m}$, caracterizam a chamada radiação de ondas curtas (ROC) e, atualmente, cerca de 30% dessa radiação é refletida pelo albedo planetário para o espaço exterior. Uma parcela da parte restante é absorvida pela superfície provocando o seu aquecimento, de modo que, essa superfície passa a emitir radiação de onda longa (ROL), entre $4,0\mu\text{m}$ e $50\mu\text{m}$, o que é típico da temperatura emitida por corpos situados na superfície e na atmosfera terrestre; essa faixa de radiação possibilita que os gases do efeito estufa - vapor da água (H_2O), gás carbônicos (CO_2), metano (CH_4), ozônio (O_3), óxido nitroso (N_2O), compostos de clorofluorcarbono (CFC) - absorvam o calor emitido, e por sua vez, emitem ROL em todas as direções. Com isso, pode-se refletir sobre como a mudança da cobertura de solo, que vem sendo intensificada pelo aumento da demanda por áreas urbanizadas, pode implicar na estabilidade do clima em escala regional.

Essa instabilidade pode ser notada em alterações no regime de chuvas da bacia, aumentando significativamente a intensidade das precipitações. Essas alterações podem ser originadas pela formação de ilhas de calor, as quais ocorrem devido à poluição do ar, queima de combustíveis fósseis, redução das áreas verdes, uso de materiais com alta absorção de calor, fatores topográficos, configuração e densidade urbanas, entre outros. (YUAN e BAUER, 2007)

Segundo Tucci e Clarke (1997), alterações na infiltração e escoamento superficial, também decorrentes da impermeabilização do solo, através de telhados de casas, ruas asfaltadas, calçadas, construção de edifícios e aplicação de cimento em jardins e quintais, provoca o aumento do escoamento superficial, visto que a parcela de água infiltrada anteriormente reduz-se considera-

velmente. Sendo assim, a capacidade exigida pelos canais aumenta, pois o escoamento passa a se projetar com maior velocidade (em um menor intervalo de tempo), evidenciando uma vazão com pico mais acentuado. É possível notar que, neste caso, as infiltrações antes existentes ajudavam a atenuar (amortizar) o volume escoado, fator que pode ser determinante para o surgimento de inundações.

O desmatamento e a substituição de áreas verdes por obras de edificações, concreto, cimento e asfalto, provocam também a redução considerável da interceptação das águas da chuva pela plantas e vegetais. A vegetação é capaz de realizar o processo de evapotranspiração, uma das etapas do ciclo hidrológico afetada pelo crescimento urbano.

O aumento da impermeabilização do solo tem reduzido às áreas de solo exposto responsáveis pela drenagem de parte da água precipitada, aumentando, assim, o volume final de águas precipitadas. Além disso, a impermeabilização implica numa mudança de rugosidade do solo; superfícies antes mais rugosas devido à vegetação, estão agora, mais 'lisas' que antes, favorecendo o aumento da velocidade do escoamento das águas até seu ponto de convergência. A amortização natural dos picos de vazão devido à vegetação existente tem sido alterada pela existência de áreas urbanizadas, aumentando, com isso, a frequência de alagamentos.

Segundo Heitzmann Jr. (1999), a grande maioria das cidades e dos municípios brasileiros possui uma coleta regular de lixo doméstico, mas não necessariamente uma correta disposição final de seus resíduos.

Bitton e Dutka (1986) afirmam que a cada ano têm sido comercializadas significativo número de substâncias químicas sem avaliação do seu potencial tóxico, resultando muitas vezes na poluição de corpos d'água, estuários e marés colocando em risco a saúde e vida humana. Nesse contexto, Duruibe et al. (2007), diz que o lançamento de águas residuárias industriais contaminadas com metais pesados afeta diretamente ambientes aquáticos de corpos receptores, tornando-se uma ameaça para os seres vivos.

Na Ásia, segundo Shah et al. (2000), os combustíveis fósseis representam cerca de 80% do consumo de energia, o que representa motivo de preocupação no tocante ao aumento das emissões de dióxido de enxofre (SO_2) e óxidos de nitrogênio (NO_x), tendo como possível consequência a deposição de chuva ácida, altamente danosa às superfícies naturais e artificiais com as quais entra em contato, alterando a estrutura natural e funções do ecossistema.

2.4 Estudos sobre ilhas de calor no mundo

Devido ao crescimento populacional e o aumento de ocorrência do fenômeno das ilhas de calor, vários estudos a cerca desse tema têm sido desenvolvidos para conhecer mais esse fenômeno.

Segundo Voogt (2002) as ilhas de calor têm uma importante influência no conforto e saúde humana, na poluição do ar urbano, no gerenciamento de energia e no planejamento urbano, sendo que elas não são responsáveis pelo aquecimento global, pois as cidades ocupam apenas uma pequena fração da superfície terrestre. Em cidades de clima quente, as ilhas de calor causam efeitos negativos, pois elevam o consumo de energia através da refrigeração, além de

aumentam o desconforto humano e a concentração de poluição do ar. Já em climas frios e temperados, as ilhas de calor podem fornecer alguns benefícios, especialmente na estação fria, pois a energia consumida pelo aquecimento é reduzida.

Segundo Oke (1982), a condição da superfície e os controladores atmosféricos são os fatores responsáveis pela ocorrência de ilhas de calor, sendo que o primeiro, corresponde à cobertura do solo, à topografia, à estrutura urbana e atividades antrópicas, enquanto que o segundo tem relação com a influência das nuvens e dos ventos na estrutura térmica da superfície.

A utilização do sensoriamento remoto nos estudos de ilhas de calor tem base na Lei de Plank, que, diz que, “quanto maior a temperatura de um dado comportamento de onda, maior será a quantidade de energia emitida por um corpo negro”; dessa forma é possível detectar a radiação termal emitida pela superfície terrestre através dos sensores dos satélites, avaliando essa capacidade de detecção, e com isso, fazer uma estimativa da temperatura “aparente” do local estudado.

O estudo “Urban Heat Island Dynamics in Montreal and Vancouver”, Oke e Maxweel (1975), envolve uma análise na medição da taxa de resfriamento de ilhas de calor em duas grandes cidades canadenses com a finalidade de estudar a origem da ilha de calor dinâmica e fazer inferências sobre a natureza dos processos de troca de calor urbano-rural.

O fenômeno das ilhas de calor também é estudado em “Satellite-derived urban heat islands from three coastal cities and the utilization of such data in urban climatology”, por Roth et al. (1989), consiste também, em demonstrar a natureza das ilhas de calor de três cidades costeiras do ocidente da América do Norte através de “satellite-derived” e compará-las com outras observações pelo método convencional com a finalidade de fornecer uma base para discussão sobre a eficiência de interpretação e a utilidade entre os dois métodos.

Alguns exemplos de estudo no Brasil, como “Identificação do fenômeno de ilhas de calor para a região metropolitana de São Paulo através de dados provenientes do satélite Landsat 7 ETM +”, por Pereira et al. (2006), para detectar a modificação do balanço energético, e conseqüentemente, a formação de ilhas de calor na região metropolitana de São Paulo com a finalidade de analisar o campo térmico da região.

Estudos do clima urbano realizados na cidade de São Paulo têm comparado valores aparentes de temperatura a partir de dados do satélite Landsat 7 e valores de temperaturas do solo obtidos pelas estações, para o mesmo horário. Um exemplo disso foi demonstrado para o dia 3 de setembro de 1999, por volta das 10:00h, em que a temperatura da estação meteorológica do Aeroporto Internacional de Cumbica registrava para essa data e horário 29,30°C de temperatura contra 30,5°C - 31°C obtidos com a aplicação do modelo de Malaret et al.. (Prefeitura Municipal de São Paulo, 2011)

Estudos sobre ilhas de calor com o Landsat 5 TM, também foram realizados em Maceió como, “Determinação da temperatura instantânea da superfície terrestre da cidade de Maceió-AL, com base em imagens TM - Landsat 5”, por Araujo e Pace (2007), com o objetivo de estimar a temperatura da superfície relacionando-a com a malha urbana de Maceió.

Estudos sobre diferentes padrões de clima na cidade de Maceió em “Comparações entre

escalas climáticas de análise urbana”, por Barbirato et al. (2001) sugere que haja um provável desenvolvimento de ilha de calor no centro da cidade devido ao aumento das diferenças de temperaturas em relação ao entorno, no período do fim da tarde.

2.5 Limitações do uso do sensoriamento remoto em estimativas de temperaturas relativas às ilhas de calor

Segundo Steinke et al. (2004) as temperaturas derivadas do sensor não são idênticas à temperatura do ar medida na camada próxima à superfície, de modo que, as imagens termais detectam a temperatura estimada da superfície terrestre na forma de energia irradiada por ela, a qual é diferente da temperatura do ar; ou seja, uma temperatura aparente é detectada servindo como estimativa para um valor real da temperatura do ar; que segundo Coltri et al. (2007) pode ter seu uso justificado, por meio de parametrizações, devido a relação próxima existente entre a temperatura do ar e a temperatura da superfície.

A ocorrência de erros na estimativa das temperaturas é algo esperado, mas a intensidade desses erros pode ser reduzida; isso se dá através de correções atmosféricas e de emissividade, as quais são muito importantes, pois a radiação emitida pela superfície atravessa a atmosfera podendo sofrer algumas modificações, enquanto que a emissividade de um material varia com seu uso e com a quantidade de energia termal. Segundo Voogt e Oke (1998), a falta de correção atmosférica pode introduzir um erro de 4°C a 7°C na temperatura obtida por um sensor.

Ainda segundo Voogt e Oke (1998), pode haver uma diferença de até 6°C ou mais na temperatura da superfície por causa da anisotropia da superfície e posição do sensor.

Segundo Nascimento e Barros (2009), é importante frisar a capacidade do pré-tratamento digital em alterar os valores digitais. Isso se dá através de operações matemáticas que alteram os valores da imagem pela aplicação do interpolador. O interpolador Convolução Cúbica gera imagens com melhor qualidade visual, mas ocorre uma degradação da qualidade radioelétrica dos dados, pois os valores de nível de cinza são definidos como a combinação linear dos níveis dos 16 pixels envolvidos; enquanto que o interpolador de Alocação de Vizinho Mais Próximo preserva os valores de nível de cinza, pois todo o pixel na imagem registrada recebe o valor de nível de cinza do pixel mais próximo na imagem original, o que torna esse último o processo mais indicado para utilização de imagens termais.

3. Áreas Estudadas

3.1 Maceió - Alagoas

Segundo dados de 2010 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Maceió possui população de 932.748 habitantes, densidade demográfica de 1.854,12 hab/km² e área aproximada de 503,069km². Está localizada entre a latitude 9°39'57" Sul e longitude 35°44'07" Oeste, como pode ser visto na Figura 1, junto às margens do Oceano Atlântico e do complexo lagunas Mundaú - Manguaba. Possui clima quente e úmido com temperatura média anual de 25,4°C, variação anual de 3,4°C entre os valores médios mensais das temperaturas médias de

26,7°C em fevereiro e 23,7°C em julho (máximas médias de 30,2°C e mínima média 21,1°C), e uma alta umidade relativa média (78%). Está sob influência alternada dos ventos alísios de Sudeste, mais frequente (de velocidade fraca a moderada) e os ventos de retorno do Nordeste nos meses mais quentes (janeiro, fevereiro e março). O valor médio mensal da velocidade de vento é de 2,8m/s, podendo chegar a valores absolutos mais intensos de 10m/s na direção Nordeste. A pluviosidade média anual é de 1.654mm, com meses mais chuvosos de abril a julho. (BARBIRATO et al., 2001)

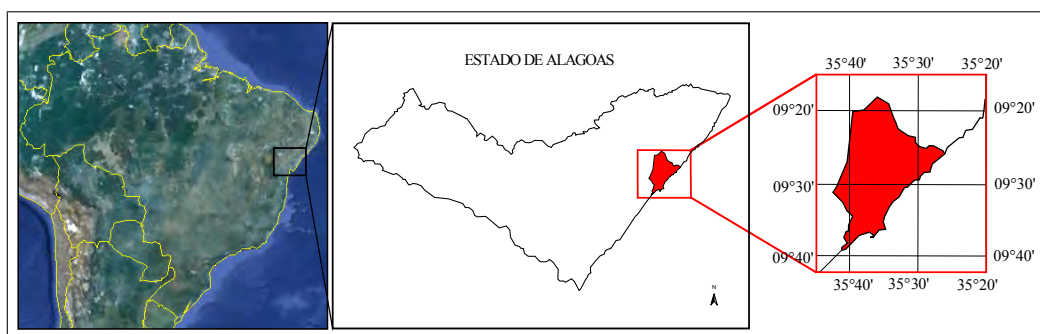


Figura 1: Localização de Maceió - Alagoas

3.2 João Pessoa - Paraíba

Localizado à longitude Oeste de 34°47'30" e à latitude Sul de 7°09'28", conforme a Figura 2, também banhado pelo Oceano Atlântico, a capital de Paraíba possui, segundo dados de 2010 do IBGE, uma população total de 723.515 habitantes, densidade demográfica de 3.421,30 hab/km² e área territorial de aproximadamente 211,474km². Assim como Maceió, possui clima quente e úmido com temperatura média anual de 26,1°C, sendo 15°C e 38°C, a menor e a maior temperatura, respectivamente, já registrada. Sua umidade média anual é de 80% entre os meses de maio e julho, podendo atingir até 87% nos meses chuvosos e 68% em período mais seco.



Figura 2: Localização de João Pessoa - Paraíba

4. METODOLOGIA

Através do catálogo de imagens disponibilizado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), foi adquirida a cena de órbita 214 e linha 67, com data de origem em 17 de março de 2011 e registro às 12h19, do Landsat 5 TM, contendo a cidade de Maceió e cidades

vizinhas; sendo esta a cena de melhor qualidade no que se refere ao menor percentual de área coberta por nuvens. Da mesma forma, foi adquirida uma imagem da cidade de João Pessoa com órbita 214 e linha 65 datada de 08 de outubro de 2010 e registro às 12h18, do mesmo satélite utilizado.

As imagens da parte mais urbanizada da cidade de Maceió e de João Pessoa foram obtidas, respectivamente, das bandas 1, 2 e 3 do visível do Landsat 5 (comprimento de onda entre $0,45\mu\text{m}$ e $0,69\mu\text{m}$) através da conversão do formato “TIF” (Tagged Image File) para o formato “GeoTIF for Idrisi”, e de uma composição colorida, utilizando a função “COMPOSITE” do software Idrisi; e imagem termal, da banda 6, (comprimento de onda entre $10,4\mu\text{m}$ e $12,5\mu\text{m}$) do mesmo satélite a fim de demonstrar as similaridades das duas imagens.

Foram utilizados dois métodos para a estimativa da temperatura superficial aparente, são eles: Malaret et al. (1985) e Chander e Markham (2003); que serão detalhados logo adiante.

O método proposto por Malaret et al. (1985) para o cálculo da temperatura aparente da superfície (graus celsius), através de regressão quadrática, é dado pela expressão a seguir em função do nível digital (DN) de cada pixel da imagem termal:

$$T = 209,831 + 0,834 \cdot DN - 0,00133 \cdot DN^2 - 273,15 \quad (1)$$

Chander e Marckham (2003), para representar a temperatura aparente superficial, utiliza a seguinte expressão:

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_6} + 1\right)} \quad (2)$$

de modo que $K_2 = 1260,56$ (Kelvin) e $K_1 = 607,76$ ($W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$), são constantes de calibração; e a radiância é dada por:

$$L_6 = a_6 + \left(\frac{b_6 - a_6}{255}\right) \cdot DN \quad (3)$$

em que ‘ $a_6 = 1,2378$ ’ e ‘ $b_6 = 15,303$ ’, ambos em ($W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$), são os coeficientes de calibração espectral do sensor da banda termal (banda 6), segundo Chander e Markham (2003); e ND, o número digital, nesse caso, a banda termal.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Imagens da temperatura aparente da superfície

A partir das metodologias adotadas e utilizando-se a ferramenta “Image Calculator” do software Idrisi, obteve-se a imagem que se refere à temperatura aparente da superfície terrestre de Maceió, de João Pessoa e de seus entornos, com a devida representação de temperatura, em graus Celsius, relacionada à escala de cores do lado direito de cada imagem, como pode ser visto nas Figuras 3 e 4, a seguir:

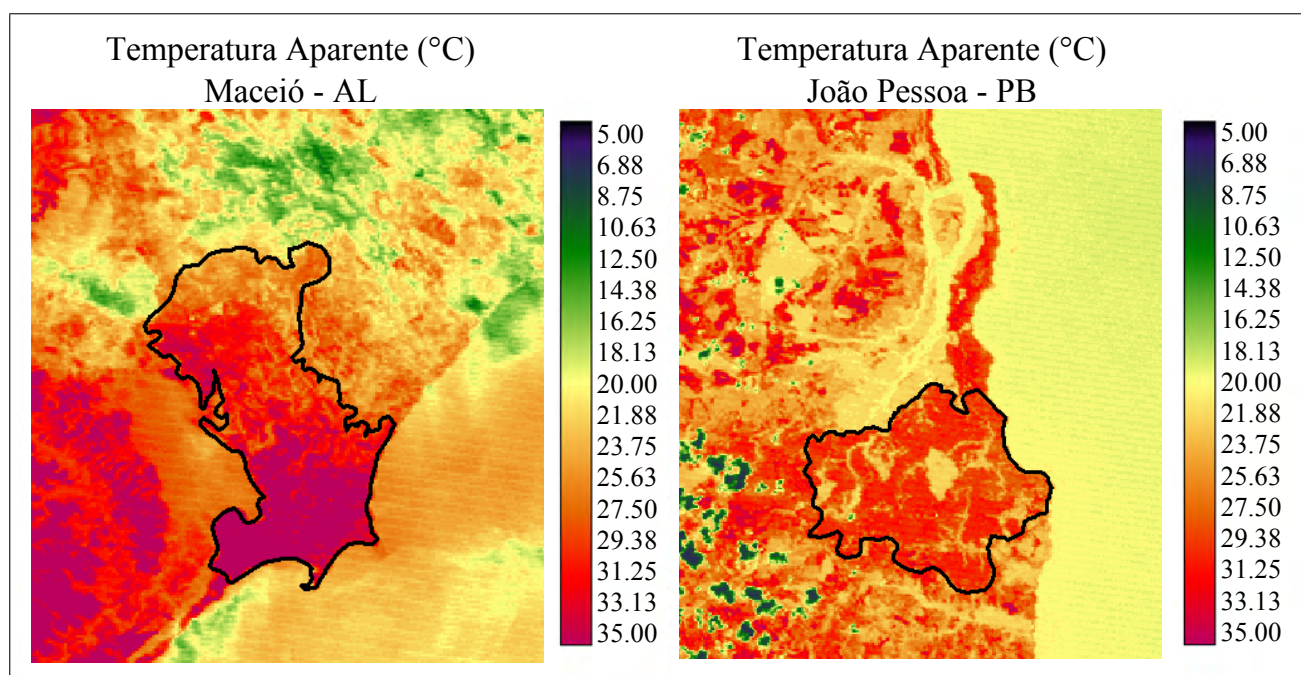


Figura 3: Temperatura aparente de Maceió e de João Pessoa pelo método de Malaret et al.(1985)

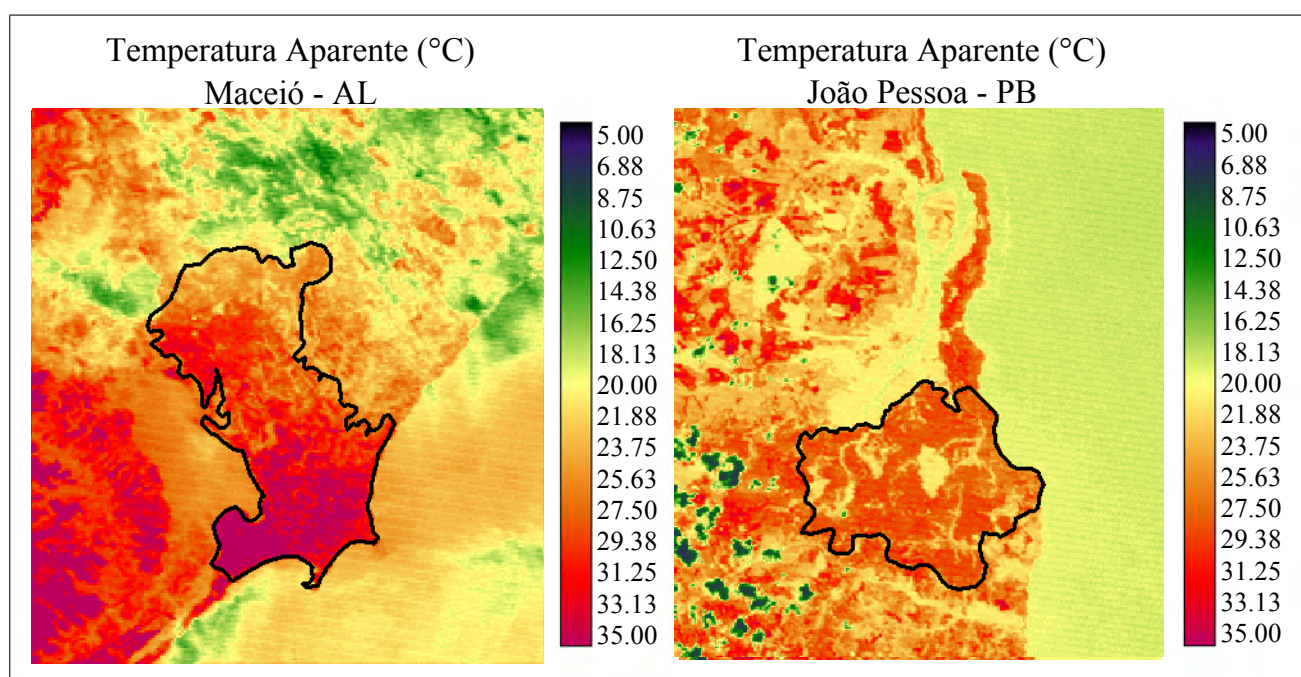


Figura 4: Temperatura aparente de Maceió e de João Pessoa pelo método de Chander e Markham (2003)

De acordo com as imagens anteriormente visualizadas, o método de Malaret et al. (1985) apresenta valores de temperatura notadamente maiores que o método de Chander e Markham (2003). Essa diferença pode ser visto mais claramente nas imagens referentes à Maceió onde são percebidas temperaturas maiores que 35°C na região mais urbanizada e temperaturas em torno de 31°C na região mais afastada do centro. Já em João Pessoa, essa diferença não é tão evidente, indicando que são menores as diferenças de temperatura entre a região mais urbanizada e a região mais afastada.

5.2 Classificação das faixas de temperatura

A partir das imagens de temperatura aparente da superfície, utilizando os métodos adotados, foram geradas imagens classificadas de acordo com os intervalos de temperatura menores que 25°C, entre 25°C e 31°C, entre 31°C e 36°C, e maiores que 36°C, como podem ser observados na Figura 5, pelo método de Chander e Markham (2003), e na Figura 6, pelo método de Malaret et al. (1985), a seguir:

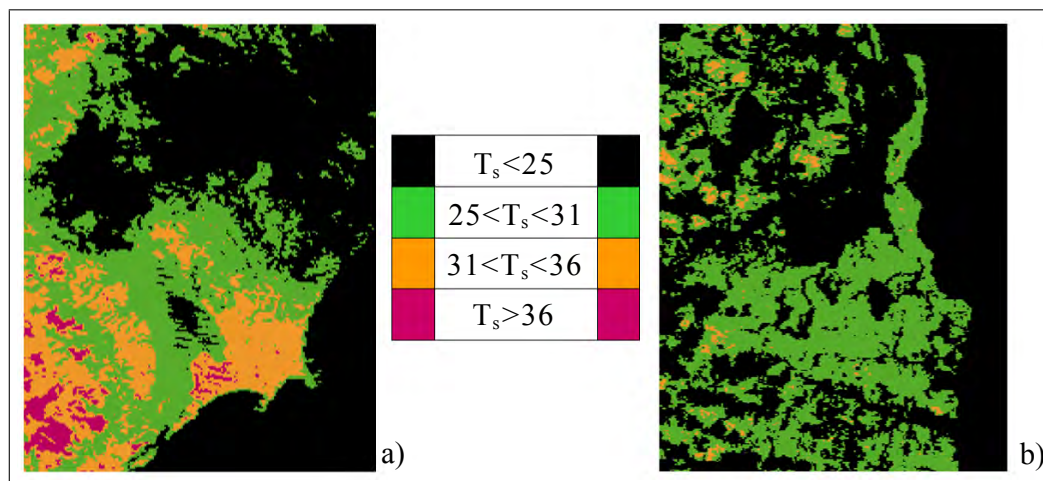


Figura 5: Classes de temperatura aparente pelo método de Chander e Markham (2003) para: a) João Pessoa e b) Maceió

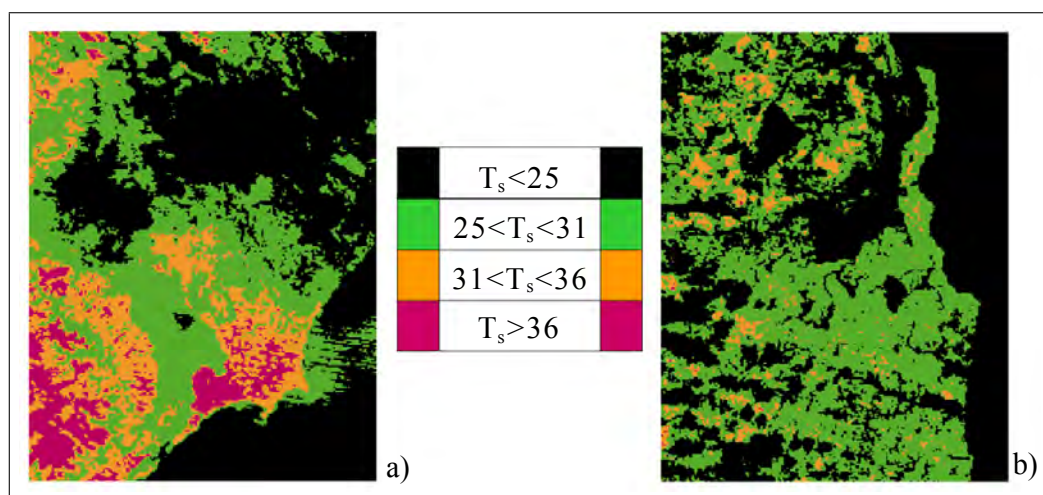


Figura 6: Classes de temperatura aparente pelo método de Malaret et al. (1985) para: a) João Pessoa e b) Maceió

De acordo com a classificação adotada nesta etapa, a Figura 5 a), referente a João Pessoa, tem predominância de temperaturas menores que 25°C, sendo possível identificar essa particularidade pelos dois métodos. Já em Maceió - Figura 5 b) - a metodologia de Chander e Markham (2003) apresentou predominância de temperaturas entre 31°C e 36°C, enquanto que, por Malaret et al. (1985) - Figura 6 b) -, houve maior ocorrência de temperaturas maiores que

36°C que no método anterior.

5.3 Seleção de subáreas

Foram selecionadas três pequenas áreas nas capitais, Maceió e João Pessoa, e em regiões vizinhas para analisar a frequência de temperaturas localizadas nessas áreas através de histogramas e verificar o comportamento da variação de temperatura em cada uma delas, a partir da imagem de temperatura. Essas subáreas são regiões com maior densidade de área construída ou com predominância de cobertura vegetal. Elas foram denominadas em M1, M2 e M3, para Maceió, e J1, J2 e J3 para João Pessoa, como podem ser vistas na Figura 7, a seguir:

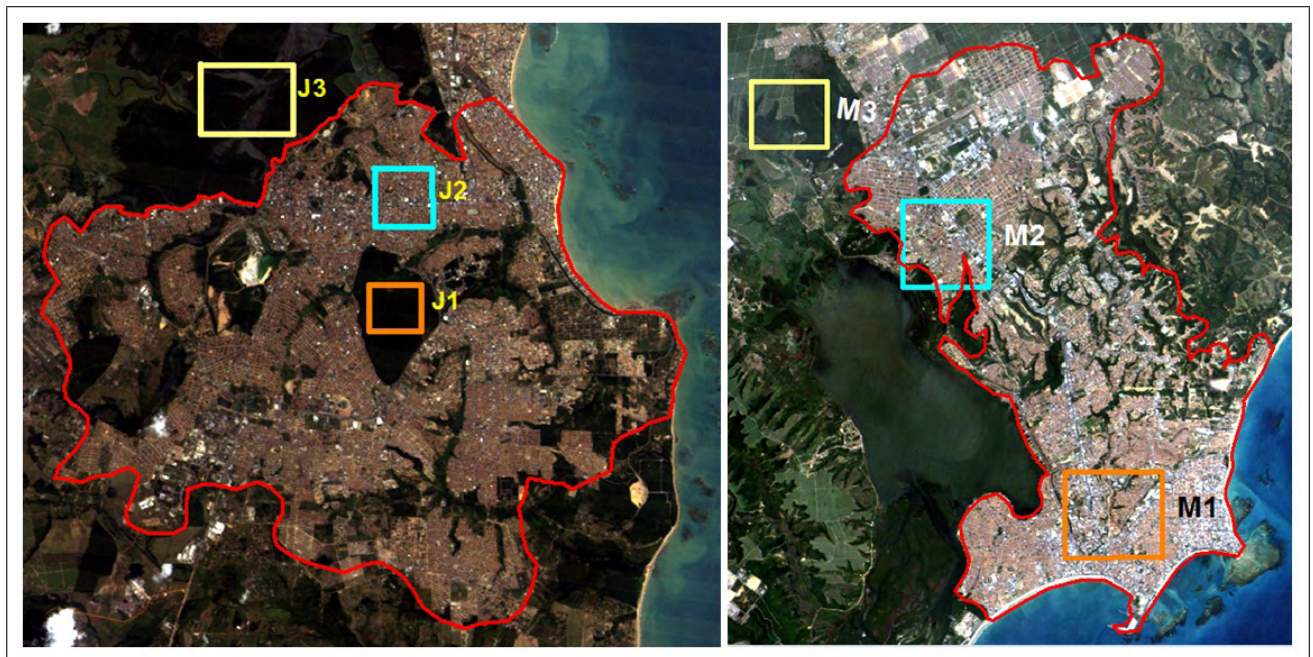


Figura 7: Localização das subáreas utilizadas para a construção do histograma

5.4 Resultados do Histograma

A partir dos dados gerados pelo histograma foi possível verificar a temperatura predominante em cada subárea, de modo que as temperaturas mais altas correspondem às áreas mais urbanizadas, enquanto que as temperaturas mais baixas correspondem às áreas com predominância de vegetação, como pode ser visto nas tabelas 1 e 2, a seguir:

Tabela 1: Temperaturas predominantes de cada subárea a partir do método de Chander e Markham (2003)

Subáreas	Descrição da área	Temperatura
J1	Parque arborizado próximo ao centro da cidade	21,1°C
J2	Região próxima do centro da cidade	28,1°C
J3	Região arborizada próxima ao estuário	20,6°C
M1	Região próxima do centro da cidade	34,3°C
M2	Região mais distante do centro da cidade	29,7°C
M3	Região com predominância de cobertura vegetal	20,7°C

Tabela 2: Temperaturas predominantes de cada subárea a partir do método de Malaret et al. (1985)

Subáreas	Descrição da área	Temperatura
J1	Parque arborizado próximo ao centro da cidade	22,1°C
J2	Região próxima do centro da cidade	29,6°C
J3	Região arborizada próxima ao estuário	21,6°C
M1	Região próxima do centro da cidade	36,0°C
M2	Região mais distante do centro da cidade	31,3°C
M3	Região com predominância de cobertura vegetal	21,5°C

A partir dos dados do histograma foi possível observar que o método proposto por Malaret et al. proporcionou maiores valores de temperatura em relação ao método de Chander e Markham. A diferença de temperatura entre os dois métodos variou de 0,8°C a 1,7°C, de modo que o primeiro método apresenta uma temperatura média de 1,3°C acima dos valores apresentados no segundo método. A variação de 0,8°C entre os dois métodos corresponde à subárea M3, de Maceió, onde há a predominância de cobertura vegetal. Dessa forma, a menor variação indica que a utilização dos dois métodos apresenta pouca diferença se utilizados em solos com essas características de cobertura. Já a maior variação entre os métodos (1,7°C) ocorreu na subárea M1, em Maceió, na região próxima ao centro da cidade, indicando assim, uma maior divergência entre as metodologias adotadas para o caso cuja cobertura do solo é predominantemente urbana.

Tomando-se uma média das temperaturas observadas nas subáreas de João Pessoa, obteve-se 24,4°C pelo método de Malaret et al. e 23,3°C pelo método de Chander e Markham. Com isso a temperatura média obtida pelo primeiro método é a mais próxima da temperatura média anual de João Pessoa, 26,1°C. Já a média das temperaturas observadas nas subáreas de Maceió, foi de 29,6°C pelo método de Malaret et al. e de 28,2°C pelo método de Chander e Markham. Sendo assim, a temperatura média obtida pelo segundo método é a mais próxima da temperatura média anual de Maceió que é 25,4°C. A diferença de temperatura aparente detectada entre as subáreas de João Pessoa foi de 8°C aproximadamente, enquanto que para as subáreas de Maceió essa diferença foi em torno de 14°C, como pode ser visto, a seguir, na Figura 8:

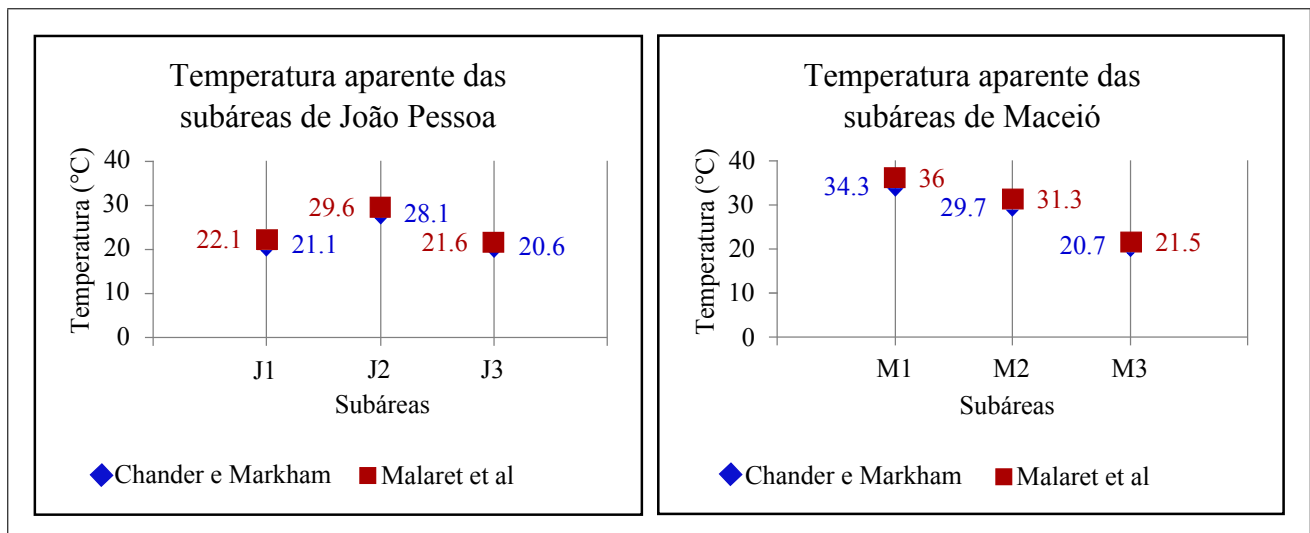


Figura 8: Temperatura aparente de cada subárea de João Pessoa e de Maceió pelos dois métodos

A partir do gráfico da temperatura aparente foi possível montar um perfil das temperaturas das subáreas analisadas para facilitar o entendimento a cerca do comportamento da temperatura como pode ser visto na Figura 9, a seguir:

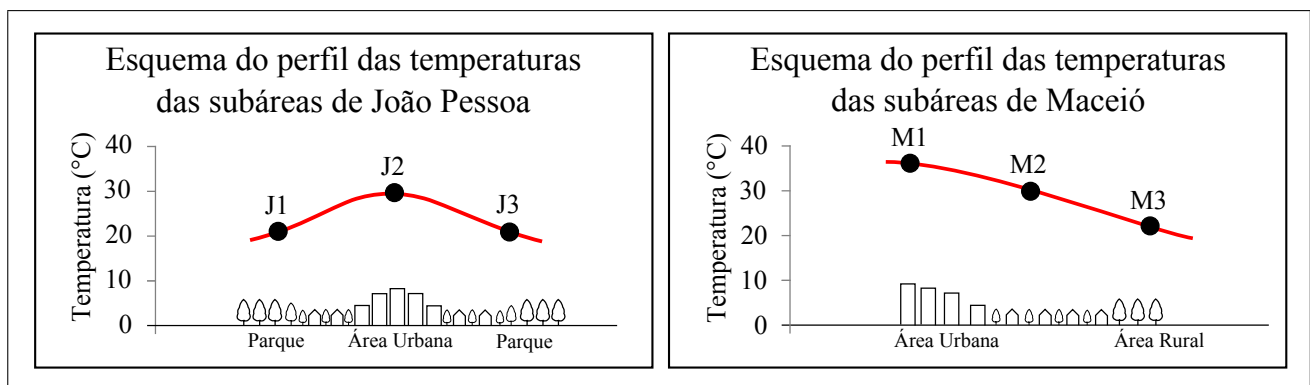


Figura 9: Esquema do perfil das temperaturas das subáreas

De acordo com as ilustrações vistas na Figura 9 é possível notar que o comportamento da temperatura aparente é semelhante ao comportamento típico da temperatura em locais com formação de ilhas de calor. Esse fato pode ser relevante na formação de ilhas de calor nestas cidades devido à influência da temperatura superficial na temperatura do ar.

6 CONCLUSÕES

A partir dos dados obtidos foi possível constatar a ocorrência de altas temperaturas aparentes em áreas mais urbanizadas. Esse comportamento é típico em locais com formação de ilhas de calor. Porém, fatores como a configuração, densidade e rugosidade urbana, direção e velocidade dos ventos e topografia local podem interferir na temperatura do ar variando a intensidade do calor sensível. Em Maceió são maiores as variações de temperatura superficial, o que pode tornar mais evidente a diferença de calor sensível entre as subáreas, e também reforçar a formação de ilhas de calor.

Barbirato et al. (2001) afirma em seu estudo que as temperaturas (do ar) mais altas da cidade de Maceió foram apresentadas onde há maior exposição ao sol durante todo o dia, maior massa edificada e maior verticalização, ocorrendo o contrário em áreas com solo não-pavimentado e com exposição favorável à ventilação. Em João Pessoa as variações de temperatura são menores, embora ocorram diferenças de temperatura entre a área urbana e a área arborizada. A diferença de temperatura aparente detectada entre as subáreas de João Pessoa foi de 8°C aproximadamente, enquanto que para as subáreas de Maceió essa diferença foi em torno de 14°C. Apesar de a temperatura aparente ter relação direta com o tipo de material constituinte das edificações e com a radiação solar, a arborização mais intensificada em João Pessoa pode ser um dos fatores responsáveis pela menor variação da temperatura aparente.

Com os dados dispostos no histograma foi possível observar que o método proposto por Malaret et al. proporcionou maiores valores de temperatura em relação ao método de Chander e Markham. A variação entre os dois métodos foi de 0,8°C a 1,7°C, de modo que o de Malaret et al. apresenta uma temperatura média de 1,3°C acima dos valores apresentados no outro método. A variação de 0,8°C entre os dois métodos corresponde à subárea M3, de Maceió, onde há a predominância de cobertura vegetal. Dessa forma, a menor variação indica que a utilização dos dois métodos apresenta pouca diferença se utilizados em solos com essas características de cobertura. Já a maior variação entre os métodos (1,7°C) ocorreu na subárea M1, em Maceió, na região próxima ao centro da cidade, indicando assim, uma maior divergência entre as metodologias adotadas, para o caso cuja cobertura do solo é predominantemente urbana.

BIBLIOGRAFIA

a) Capítulo de livro

ANDRADE, Thompsom, Almeida; SERRA, Rodrigo Valente. (2001). *“Crescimento Urbano no Brasil”* in Cidades Médias Brasileiras, IPEA, Rio de Janeiro - RJ, pp. 171 - 211.

FLORENZANO, Teresa Galloti. (2011). *Iniciação em Sensoriamento Remoto*. Oficina de Textos, São Paulo - SP, pp. 9.

b) Artigo em revista

BITTON, G.; DUTKA, B.J. (1986). *“Introduction and Review of microbial and biochemical toxicity acreeing procedures”*. In: Toxicity testing using microorganisms. Flórida, C.R.C, pp. 18.

CHANDER, G.; MARKHAM, B. (2003). *“Revised Landsat-5 TM radiometric calibration producers and postcalibration dynamic rangers”*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, v.41, n.11, pp.2674-2677.

DURUIBE, J. O.; OGWUEGBU, M. O. C.; EGWURUGWU, J. N. (2007). *“Heavy metal pollution and human biotoxic effects”*. Internacional Journal of Physical Science, v.2, n.5, pp. 112-118.

HEITZMANN JR., J.F. (1999). *“Alteração na composição do solo nas proximidades de depósitos de*

resíduos domésticos na bacia do Rio Piracicaba". São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE), pp. 66.

LUCAS, A.; RODRÍGUEZ, L.; VILLASEÑOR, J.; FERNÁNDEZ, F.J. (2007). "*Fermentation of agro-food wastewaters by activated sludge*". Water Research: A Journal of the International Water Association (IWA), v. 41, pp. 1635-16644.

MALARET, E.; BARTOLUCCI, L. A., LOZANO, D. F.; ANUTA, P. E. e MCGILLEN, C. D. (1985). "*LANDSAT 4 and LANDSAT 5 thematic mapper data quality analysis*". Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, v. 51, n. 9:, pp. 1407-1416.

MOLION, Luiz C. Baldicero. (2007). "*Desmistificando o Aquecimento Global*". Intergeo, v. 5, pp. 13-20.

OKE, T.R.; MAXWELL, G.B. (1975). "*Urban heat island dynamics in Montreal and Vancouver*". Atmospheric Environment, v. 9, pp. 191 - 200.

OKE, T.R. (1982). "*The energetic basis of the urban heat island*". Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, v. 108, n. 455, pp. 1-24.

ROTH, M.; OKE, T.R.; EMERY, W.J. (1989). "*Satellite-derived urban heat islands from three coastal cities and the utilization of such data in urban climatology*". International Journal of Remote Sensing, v. 10, pp. 1699 - 1720.

SHAH, Jitendra et al. (2000). "*Integrated Analysis for Acid Rain in Asia: Policy Implications and Results of RAINS-ASIA Model*". Annual Revist Energy Environmental, pp. 341.

STEINKE, E. T.; STEINKE, V. A.; SAITO, C. H. (2004). "*Avaliação da estimativa da temperatura de superfície a partir de imagens de satélite Landsat TM 5 voltada para a gestão de bacias hidrográficas*". SAITO, C. H. (org.). Desenvolvimento tecnológico e metodológico para mediação entre usuários e comitês de bacia hidrográfica. Brasília: Departamento de Ecologia da Universidade de Brasília, pp.41-64.

TUCCI, Carlos E. M.; CLARKE, Robin T. (1997). "*Impacto das mudanças da cobertura vegetal no escoamento*". Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 2, n. 1, pp. 135 - 152.

VOOGT, J. A.; OKE, T. R. (2003). "*Thermal remote sensing of urban areas*". Remote Sensing of Environment, 86, pp. 370 - 384.

VOOGT, J.A.; OKE, T.R. (1998). "*Effects of urban surface geometry on remotely-sensed surface temperature*". International Journal of Remote Sensing, v. 19, n. 5, pp. 895-920.

VOOGT, James A. (2002). "*Urban Heat Island: Causes and consequences of global environmental change*". Encyclopedia of Global Environmental Change, v. 3, pp. 660-666.

YUAN, Fei; BAUER, Marvin E. (2007). "*Comparison of impervious surface area and normalized difference vegetation index as indicators of surface urban heat island effects in Landsat imagery*". Remote Sensing of Environment, v. 106, pp. 375-386.

c) Artigos em anais de congresso ou simpósio

ARAUJO, Taciana Lima; Pace, Frederico Tejo Di. (2007). "*Determinação da temperatura instantânea*

da superfície terrestre da cidade de Maceió-Al, com base em imagens TM - Landsat 5” in Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Florianópolis, Abr. 2007, INPE, pp. 3717-3724.

BARBIRATO, Gianna; BARBOSA, Ricardo V. R.; FENANDES, Emanuel F.; MORAIS, C. S. de; OLIVEIRA, Thaíse C. F. S. de; TELES, Valéria R. (2001). “*Comparação entre escalas climáticas de análise urbana*” in Anais do VI Encontro Nacional e III Encontro Latino-Americano sobre Conforto no Ambiente Construído, São Pedro-SP, Nov. 2001.

NASCIMENTO, Diego Tarley Ferreira; BARROS, Juliana Ramalho. (2009) “Utilização da banda termal para levantamento de valores de temperatura: uma discussão inicial do emprego de dados orbitais na identificação de ilhas de calor” in Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, Viçosa-MG, Jul. 2009.

PEREIRA, G.; CAMARGO, F.F.; OLIVEIRA, L.G. de; GERRA, J.B. (2006). “*Identificação do fenômeno de ilhas de calor para a região metropolitana de São Paulo através de dados provenientes do satélite Landsat 7 ETM +*” in Anais do III Simpósio Regional de Geoprocessamento e Sensoriamento Remoto, Aracaju-SE, Out. 2006.

d) Consultas pela internet

CALIFORNIA INSTITUTE OF TECHNOLOGY. “*ASTER: Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*”. Disponível em: <<http://asterweb.jpl.nasa.gov>>. Acesso em: 01 de janeiro de 2012.

EMBRAPA. “*Monitoramento por satélite*”. Disponível em: <<http://www.qmdmt.cnpm.embrapa.br/72.htm>>. Acesso em: 30 de setembro de 2011a.

EMBRAPA. “*Sistemas Orbitais de Monitoramento e Gestão Territorial*”. Disponível em: <<http://www.sat.cnpm.embrapa.br/conteudo/meteosat.htm>>. Acesso em: 01 de outubro de 2011b.

EMBRAPA. “*METEOSAT - Meteorological Satellite*”. Disponível em: <<http://www.sat.cnpm.embrapa.br/>>. Acesso em 10 de outubro de 2011c.

ENGESAT. “*Satélites*”. Disponível em: <<http://www.engesat.com.br/?system=news&eid=303>>. Acesso em: 30 de setembro de 2011.

IBGE. “*Sinopse do Censo Demográfico 2010*”. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/sinopse.pdf>>. Acesso em: 13 de outubro de 2011.

INPE. “*Satélites CBERS*”. Disponível em: <<http://www.cbbers.inpe.br>>. Acesso em: 29 de setembro de 2011a.

INPE. “*Queimada: Monitoramento de Focos*”. Disponível em: <<http://sigma.cptec.inpe.br/queimadas/#>>. Acesso em: 01 de outubro de 2011b.

PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO PAULO. “*Atlas Ambiental do Município de São Paulo - Clima Urbano: Temperatura Aparente*”. Disponível em: <<http://atlasambiental.prefeitura.sp.gov.br/pagina.php?B=30&id=21>>. Acesso em: 25 de setembro de 2011.