

Influência do Uso e Cobertura do Solo nas Ilhas de Calor Local e Regional no Município de Piracicaba, São Paulo

Priscila Pereira Coltri¹,
Celso Macedo Junior¹
Giuliana Del Nero Velasco²
Nelson Jesus Ferreira³
Saulo Freitas³

¹ Universidade Estadual de Campinas, CEPAGRI/UNICAMP e FEAGRI/UNICAMP
13083-970 - Campinas - SP, Brasil
{pcoltri, celso}@cpa.unicamp.br

² Universidade de São Paulo - USP/ESALQ
13418-900 - Piracicaba - SP, Brasil
giulivelasco@hotmail.com

³ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – CPTEC/INPE
12630-000, Cachoeira Paulista, SP, Brasil
{nelson, sfreitas}@cptec.inpe.br

Abstract. Land use and land cover changes are important factors in the meteorological variables changes. Cities normally have higher temperature than the rural surroundings, an anomaly called Urban Heat Island (UHI). The aim of the present work is to analyze how the land cover and land use changes affect the local and the regional temperature in Piracicaba, SP. Landsat 7 infrared thermal data and the Brazilian Regional Atmospheric Modeling System (BRAMS) were used. The thermal images were subsequently transformed into apparent temperature of surface. In local scale, the heat islands from each neighborhood were then located and analyzed, and we found the structures (morphology) of each island. The difference between the rural and urban temperatures was around 10°C. The main structures that form heat islands are materials such as tiles, cement and asphalt. After that, in order to analyze the regional temperature we used the model simulating BRAMS for two scenarios: the first was just the original land cover (mixed woodland) and the second was the original land cover and the present urban area. The results suggest a temperature and Bowen ratio increase in the urban area.

Palavras-chave: atmospheric modeling BRAMS, urban heat island, thermal infrared data, urban areas, temperature.

1. Introdução

A rápida expansão das cidades tem modificado o espaço geográfico, sobretudo quando se trata de qualidade ambiental. Diversos estudos sugerem que a modificação do uso e cobertura do solo tem acelerado importantes modificações em variáveis meteorológicas como temperatura, por exemplo. Um dos mecanismos do sistema cidade-atmosfera mais afetados pela urbanização é o balanço de energia. O fluxo de calor latente é o que apresenta a mudança mais abrupta uma vez que as áreas úmidas e produtoras de umidade são reduzidas em locais altamente urbanizados (Perez et al., 2001). Assim, ao se diminuir o fluxo de calor latente se incrementa o fluxo de calor sensível, que gera um maior aquecimento do ar superficial (Voogt e Oke, 1997) e, com ele, a temperatura do sistema se eleva, culminando, assim em um fenômeno chamado ilhas de calor (IC) (Grimmond e Soich, 1994). IC são anomalias térmicas onde a temperatura da área urbana tende a ser superior à da área rural, e tem sido observada desde início do século XX, sendo um dos fenômenos climatológicos urbanos mais estudados.

Considerando a magnitude das IC, muitos são os mecanismos que contribuem para a sua formação e muitos são os fatores e sistemas que agravam sua intensidade. Fatores relacionados aos materiais utilizados nas construções, densidade de urbanização, quantidade

de área verde, utilização do solo rural (Pereira-Coltri et. al. 2007) podem intensificar e agravar o efeito. As IC podem acontecer em diversas escalas (Perez et al., 2001) desde pequenos locais mais quentes dentro de um bairro (ou dentro da cidade), até a própria cidade em relação ao entorno rural. Além disso, as modificações climáticas que o uso do solo urbanizado produz acontece tanto em níveis microclimáticos quanto em escala climática regional.

O objetivo principal do presente trabalho foi verificar como o uso e cobertura do solo influenciam na temperatura local e regional do Município de Piracicaba, São Paulo. Para isso, o trabalho foi dividido em dois objetivos específicos: i) identificar, através de sensoriamento remoto, a morfologia das Ilhas de calor do município de Piracicaba, SP e, ii) através de modelagem climática – BRAMS, analisar o efeito da substituição do uso e cobertura do solo natural por solos urbanizados nos fluxos de calor latente e sensível, verificando as conseqüências na temperatura da área em estudo.

2. Metodologia de Trabalho

O trabalho foi realizado no Município de Piracicaba, SP, sudeste do Brasil. Situa-se entre as coordenadas geográficas 22°42'30"S e 47°38'01" W e à 554 metros de altitude. A área total do município é de 1.370 km², sendo que somente 6% dessa área é ocupada com solo urbano.

Para a análise em diferentes escalas, o trabalho foi dividido basicamente em duas etapas: a) Análise da Morfologia das IC do município, a fim de verificar quais materiais compõe e ou intensificam as IC, e b) Modelagem Regional (BRAMS) com finalidade de demonstrar como o solo urbano influencia variáveis climáticas (calor latente, sensível e temperatura) em escala regional.

a.) Morfologia das Ilhas de Calor

Para análise morfológica utilizou-se imagens do satélite Landsat 7 (bandas 2,3,4,6) órbita/ponto 220/76, do dia 08 de janeiro de 2003. A imagem foi escolhida pela época do ano (verão) e de acordo com as condições meteorológicas (dias sem nuvens). As imagens foram retificadas no software ERDAS IMAGINE 8.5. Para transformação dos níveis de cinza da banda termal em temperatura aparente da superfície (°C) utilizou-se o algoritmo termal do software IDRISI 3.2. Em seguida os pontos mais quentes de cada um dos bairros da cidade foram localizados.

Para identificar quais as estruturas urbanas que compunham as IC do verão, foram utilizadas as informações das fotografias aéreas da cidade (cedidas pela prefeitura de Piracicaba) e, para a localização exata das IC, as fotografias aéreas foram retificadas geometricamente no software ERDAS, com a mesma projeção e “datum” das imagens.

Para essa análise e discussão, foram escolhidos os dez bairros com ilhas de calor mais intensas (temperatura maior) e os dez bairros com ilhas de calor menos intensas (temperatura menor).

b.) Modelagem BRAMS

Para a realização desta etapa foi utilizado o Brazilian Regional Atmospheric Modeling System (BRAMS) versão 3.2 disponível no Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC). Para a obtenção dos campos meteorológicos, o modelo foi configurado com três grades aninhadas e, para esse estudo, as análises foram feitas com a terceira grade (com resolução de 1km). Os dados de entrada do modelo foram: as reanálises do modelo de previsão numérica de tempo do NCEP (*National Centers for Environmental Prediction*) - disponibilizadas pelo *Climate Diagnostics Center* (CDC), com resolução de 2,5° de latitude e longitude -; *namelist* RAMSIN (com a configuração dos parâmetros do modelo); arquivos de topografia, uso/cobertura da terra e porcentagem de terra e água (fornecidos com o código fonte do modelo, com resolução de 1 km); e as imagens classificadas.

As seguintes variáveis foram utilizadas como reanálises do NCEP: temperatura do ar (K), altura geopotencial (m), umidade relativa (%), vento zonal (m/s) e vento meridional (m/s), todas em 15 níveis de pressão (1000, 925, 850, 700, 600, 500, 400, 300, 250, 200, 150, 100, 70, 50 e 30 hPa). A exceção foi a umidade relativa, que o nível mais alto era de 300 hPa. Estas reanálises, provenientes de uma área situada entre as coordenadas 45S a 0N e 70W a 25W, correspondem a um período de duas semanas (de 1/8/2004 a 15/8/2004). Optou-se pelo uso de dados que foram analisados de 6 em 6 horas (00Z, 06Z, 12Z e 18Z), numa situação sinótica mais estável, visando evitar o predomínio da forçante sinótica.

As imagens de entrada no modelo foram do satélite Landsat 7, classificadas no software ENVI 4.0. A partir da classificação inicial (contendo as classes de uso e cobertura atual do solo: área de cidade – 6%-, cana-de-açúcar – 32%-, pastagem – 22%-, solo exposto – 20%, remanescentes florestais -18% -, água -2% -), foram feitos dois cenários diferentes: o primeiro cenário é o uso e cobertura do solo original da região (cerrado e rios – água); e no segundo cenário adicionou-se a área de cidade atual (6%) (criando, portanto, três classes: cerrado, cidade e água) (**Figura 1**). Após as simulações, subtraiu-se um cenário do outro para verificar qual a influência da área de cidade nas seguintes variáveis meteorológicas: temperatura, calor latente, calor sensível e temperatura a 2 metros do solo (que é executada com um algoritmo do BRAMS).

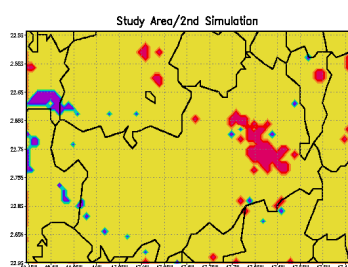


Figura 1 – Área de Estudo: Limites do Município de Piracicaba, São Paulo. Figura utilizada para o segundo cenário de simulação: em rosa: área de cidade; em amarelo: cerrado, em azul: água

A partir das simulações do BRAMS e suas repostas em termos do calor sensível (H) e calor latente (LE), foram calculados as razões de Bowen para a diferença entre os cenários. Sendo que a razão de Bowen é dada por:

$$\beta = \frac{H}{LE}$$

Trabalhou-se com a média atmosférica das variáveis em três períodos: período diurno (média das 12p.m as 18p.m – hora local); período noturno (das 0 a.m as 6 a.m – hora local) e todo período (período diurno e noturno juntos).

3. Resultados e Discussão

a.) Análise morfológica das IC

Verificou-se que a amplitude térmica das IC da cidade (ilha de calor mais intensa – ilha de calor menos intensa) ficou em torno de 10°C, apresentando valores semelhantes aos de cidades de grande porte, como São Paulo, Porto Alegre (Mendonça, 2003), Rio de Janeiro e Belo Horizonte (Teza e Baptista 2005). Estes valores são muito superiores aos observados em Salvador (4.6°C) por Sampaio (1981) e em São José dos Campos (3.4°C) por Tarifa (1981). A

figura 2 apresenta o desenho da temperatura aparente da superfície na cidade e nela é possível observar que as localidades mais quentes são, também, as mais urbanizadas.

Dos bairros analisados, os dez com IC mais intensas foram (por ordem de intensidade da ilha): Unileste, Jardim Primavera, Morumbi, Morato, Paulicéia, Centro, Pompéia, Monte Alegre, Vila Rezende e Santa Terezinha. Todas as IC são caracterizadas pelo excesso de material de construção civil e por locais com pouca ou nenhuma área verde. Dos bairros com IC mais intensas, sete deles (Unileste, Jardim Primavera, Morumbi, Morato, Pompéia, Monte Alegre e Vila Rezende) apresentaram estruturas com telhas de cimento, amianto e asfalto (**Figura 3**). Monteiro (1976), Lombardo (1985), Lima (2005), Paiva (2005) destacam que esses materiais são responsáveis pela formação da maioria das IC das cidades.

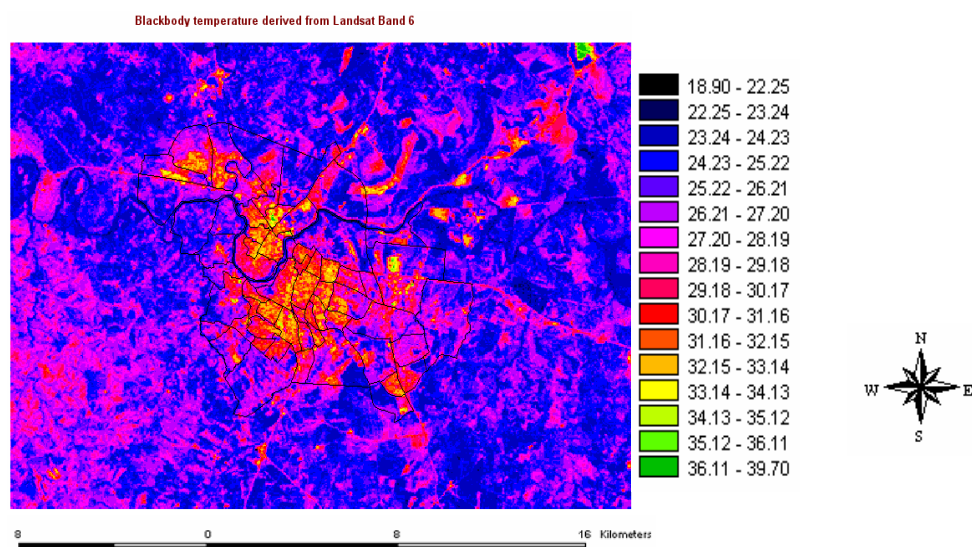


Figura 2– Banda termal de baixo ganho da imagem Landsat 7 do dia 08/01/2003 (verão) transformada em temperatura aparente de superfície.

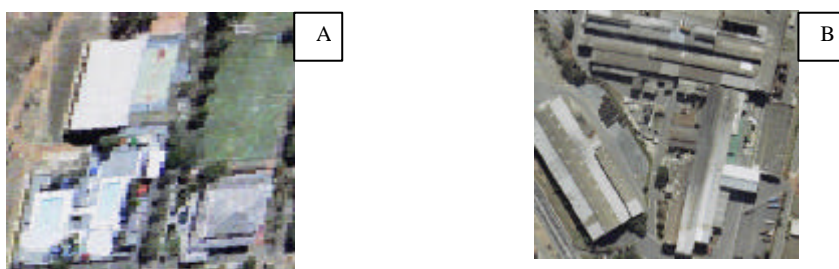


Figura 3: Materiais localizados nas duas ilhas de calor mais intensas. Em A: Materiais que compõem a IC do bairro Unileste e, em B, Materiais que compõem a IC do bairro Jardim Primavera.

Lima (2005) encontrou correlação positiva entre o número de pavimentos e o aumento das temperaturas mínimas, médias e máximas em Curitiba. Segundo Lombardo (1985) o asfalto aprisiona grande quantidade de energia, motivo pelo qual áreas com excesso de asfalto se caracterizam por uma temperatura de superfície mais elevada.

As telhas de cimento e amianto são materiais que têm alta refletância o que aumenta significativamente a irradiação de calor para a atmosfera (Teza e Baptista, 2005). Essa alta irradiação emitida para atmosfera interfere de forma drástica no balanço de energia local causando um reflexo imediato na temperatura (Serrato et al., 2002). Assim, locais com excesso de materiais como telhas de cimento amianto interferem significativamente na

intensidade das IC. Essa interferência é tão drástica que nem mesmo as áreas verdes localizadas nos arredores destas construções (conforme figura 3A) podem amenizar a temperatura no ponto exato em que as telhas de cimento amianto se encontram.

Na área de estudo também foi possível observar que locais com alta quantidade de vegetação apresentaram temperaturas menores, concordando com os resultados de Lombardo (1985), Tarifa e Azevedo (2001), Monteiro e Mendonça (2003), e Lu e Weng (2005). Este fato pode ser mais facilmente visualizado no bairro Centro, onde está localizado o Parque da Rua do Porto. O bcal do parque se destaca por apresentar temperatura menor ($\sim 24^{\circ}\text{C}$) em relação ao resto do bairro ($\sim 27^{\circ}\text{C}$). As áreas verdes são capazes de amenizar a temperatura, pois as plantas, em seu processo de evapotranspiração, liberam vapor d'água em seus arredores, aumentando a umidade relativa e diminuindo a temperatura do ar (Tarifa e Azevedo, 2001). Assim, locais mais arborizados tendem a apresentar temperaturas menores em relação ao menos arborizados e com maior quantidade de materiais de construção civil.

Os bairros que apresentaram IC menos intensas foram (por ordem do mais frio para o mais quente): Ondinhas, Clube de Campo, Parque da Rua do Porto, Campestre, São Jorge, Jardim Itapuã, Santa Rita, Jardim Abaeté, São Judas e Guamium. Em geral, as IC menos intensas localizam-se em regiões periféricas da cidade, em bairros que apresentam grande quantidade de área verde (neste caso entende-se por área verde não somente parques urbanos, mas também locais com vegetação, seja com cana de açúcar, pasto, áreas em regeneração). Os bairros Parque da Rua do Porto, São Judas e Clube de Campo, embora não sejam bairros de periferia, localizam-se em regiões bem arborizadas e com presença de água (Rio). Embora as IC desses bairros sejam menos intensas, sua morfologia ainda é composta por excesso de materiais de construção civil, como asfalto e telhas. O que as diferencia das IC mais intensas é a composição do bairro como um todo. Resultados semelhantes foram encontrados por Lombardo (1985), Mendonça (2003) e Brandão (1996).

Diante do exposto percebe-se que são muitos os fatores que contribuem para a formação e a intensificação de IC dos bairros, e dentre eles destacam-se o uso e cobertura do solo, ou seja, a quantidade de área verde do bairro e o tipo e quantidade de material de construção civil.

b.) Modelagem:

Os resultados da análise climática regional também sugerem que o uso e a cobertura do solo influenciam de maneira significativa as variáveis do fluxo de calor (calor latente e sensível) e a temperatura.

A figura 4A mostra a diferença de calor sensível (H) entre os dois cenários. Nesta observa-se que a área de cidade teve um acréscimo de H em relação à área de cerrado em todo o período. Esses valores ficaram entre 35 e 45 w.m^{-2} . Interessante foi notar que a área ao redor da cidade também sofreu um acréscimo de H, da ordem de 15 w.m^{-2} . Durante o dia houve o acréscimo de H na área urbana variando de 90 a 120 W.m^{-2} , e durante o período noturno, houve um pequeno decréscimo de -1 W.m^{-2} . Isso ocorre porque durante a noite o período de radiação é menor, diminuindo o calor sensível e a turbulência na camada limite planetária (CLP).

A figura 4B mostra a diferença no calor latente (LE) entre os dois cenários no período todo. Durante os períodos estudados (diurno, noturno e todo período) o LE decresceu, ou seja, nas áreas urbanas o fluxo de calor latente é menor quando comparado ao cerrado. Em termos quantitativos, a distribuição espacial de LE na área urbana variou de -60 a -90 W.m^{-2} e nas áreas de cerrado de 0 a -10 W.m^{-2} . Conforme visto na análise morfológica, as ilhas de calor do sítio urbano (concreto, metais, pouca arborização) produzem baixa evaporação da superfície e dificultam a adição de energia para a atmosfera, o que reflete nos valores mais baixos quando comparados aos do cerrado.

O incremento no fluxo de calor sensível e o decréscimo no fluxo de calor latente desequilibra a razão de Bowen (β). Nas simulações, a razão de Bowen urbana para a diferença entre os dois cenários nos períodos diurno, noturno e total foi respectivamente de 0,5; 0,21 e 0,47. Estes valores mostram a anomalia positiva da razão de Bowen para os três períodos analisados, pois o calor latente (LE) decresce com aceleração maior em comparação ao aumento do calor sensível (H), tornando β um número maior que antes da presença do sítio urbano.

Esse desequilíbrio reflete diretamente na temperatura, conforme observado na figura 4C. A temperatura a 48 metros (primeira coluna de análise do modelo), após adicionar o uso do solo urbano no cenário natural, teve um acréscimo de 0,5°C no período diurno no centro da cidade e entre 0,1°C e 0,2°C na periferia urbana, concordando com resultados da análise da morfologia das IC. Bairros periféricos têm maior quantidade de área verde, resultando numa menor temperatura. Já no período noturno, as temperaturas tiveram um pequeno decréscimo (aproximadamente -0,01°C; 0,012°C) por conta da perda radiativa dos materiais que compõem a superfície urbana. Em todo período, o acréscimo da temperatura na área do centro da cidade variou entre 0,1 e 0,12°C.

As análises da temperatura a 2 metros seguem o mesmo padrão da temperatura a 48 metros, porém com valores mais altos, devido à perda radiativa com a altura. Para este nível, o centro da cidade chega a ter um incremento entre 0,5 e 0,9°C. As demais áreas da cidade variam positivamente entre 0,3°C e 0,7°C (figura 4D).

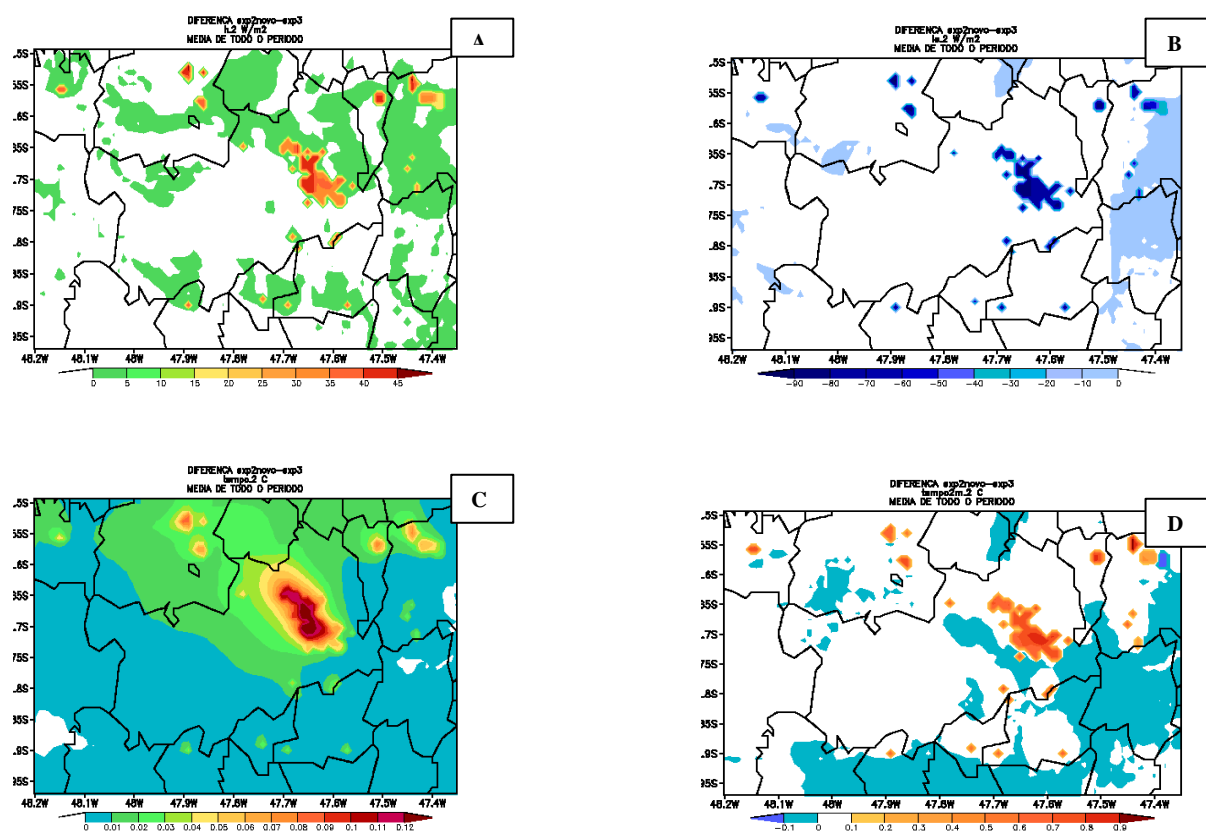


Figura 4: Diferença entre a primeira e a segunda simulação. Em A: Diferença no calor sensível (H); em B: diferença no calor latente (LE); em C: Diferença temperatura (48m) e, em D: Diferença temperatura a 2 metros

Nesse sentido, os resultados sugerem que, de fato, a substituição do solo natural (normalmente vegetado) por materiais de construção civil aumenta a temperatura local e regional, assim como interfere no balanço de energia regional, culminando nas IC. Estas, por

sua vez, são mais intensas em escala local em lugares com alta quantidade de telhas e asfalto. Lugares arborizados têm IC menos intensas. Além disso, as IC também podem produzir impactos na circulação atmosférica e alterar o clima na escala local.

4. Conclusão

A partir dos resultados do presente trabalho é possível concluir que:

- As IC mais intensas da cidade de Piracicaba, SP, são caracterizadas pelo excesso de material de construção civil e por locais com pouca ou nenhuma área verde. Já as menos intensas tiveram influência da vegetação do bairro;
- todas as ilhas de calor (tanto as mais intensas quanto as menos) são compostas por materiais como asfalto, cimento e telhas. Esses materiais interferem no balanço de energia local;
- a diferença de temperatura entre a área rural e urbana de Piracicaba, é comparável à de grandes centros urbanos como São Paulo e Porto Alegre;
- em escala regional, simulado pelo modelo BRAMS, a presença da área de cidade determinou alterações nos padrões e magnitudes de variáveis como o fluxo de calor sensível (H), fluxo de calor latente (LE) e temperatura do ar (T);
- os resultados da modelagem sugerem que um incremento no fluxo de calor sensível e um decréscimo no fluxo de calor latente desequilibra a razão de Bowen (β). Para este trabalho, o valores da razão de Bowen da média do período diurno, noturno e de todo o período para a diferença entre os dois cenários na área da cidade foram respectivamente de 0,5; 0,21 e 0,47.
- houve acréscimo de temperatura com a inclusão da área urbana tanto para as análises de temperatura a 2 metros quanto a 48 metros, como já era esperado em decorrência das ilhas de calor;
- de fato, a mudança do uso e cobertura do solo (natural/vegetado por urbanizado/materiais de construção civil) afeta a temperatura local e regional.

Agradecimentos: Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (Cnpq) pelo apoio financeiro.

5. Referências Bibliográfica

- Brandão, A.M.P.M. **O clima urbano na cidade do Rio de Janeiro**. 1996. 362p. Tese (Doutorado) Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas – Departamento de Geografia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996
- Kalnay, E.; Cai, M. Impact of urbanization and land-use change on climate. **Nature**, v.423,n.4 p.528-531, 2003.
- Lima, L.P. de. **Clima e forma urbana: métodos de avaliação do efeito das condições climáticas locais nos graus de conforto térmico e no consumo de energia elétrica em edificações**. 2005.154 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia) - Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, Curitiba, Paraná, 2005
- Lombardo, M.A. **Ilha de Calor nas metrópoles: o exemplo de São Paulo**. São Paulo: Editora Hucitec, 1985. 244p
- Lu, D.; Weng, Q. Urban Classification Using Full Spectral Information of Landsat ETM⁺ Imagery in Marion County, Indiana. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v.71, n.11, p.1275-1284. 2005.
- Mendonça, C.A. Clima e planejamento urbano em Londrina. In: MONTEIRO, C. A de F.; MENDONÇA, F.(Org.). **Clima Urbano**. São Paulo: Editora Contexto, 2003. 192p. p.93-120
- Monteiro, C.A. de F. Teoria e Clima Urbano. In: **Série Teses e Monografias**, n.25 – Instituto de Geografia, Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1976.181p.

Monteiro, C. A de F.; Mendonça, F.(Org.). **Clima Urbano**. São Paulo: Editora Contexto, 2003. 192p.

Paiva, H.N. Seleção de espécies para arborização urbana. **Revista Ação Ambiental**, Viçosa, v.2, n.9, p-14-16, 1999/2000

Pereira Coltri, P.; Velasco, G.D.N., Polizel, J.F.; Demetrio, V.A., Ferreira, N.J. Ilhas de Calor da estação de inverno do Município de Piraicaba, SP. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 13, 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. Artigos, p. 5151-5157. CD-ROM, On-line. ISBN 85-17-00018-8. Disponível em: <http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.15.22.00/doc/5151-5157.pdf>>. Acesso em: 16 out. 2008.

Perez, J.C.; Sanchez, M.de los.A.V.; Barradas, V.L. Clima, urbanización y uso del suelo en ciudades tropicales de Mexico. **RNIU**, Puebla, México, Ciudades 51. 2001.

Sampaio, A.H.L. **Correlações entre o uso do solo e ilhas de calor no ambiente urbano**: o caso de Salvador. 1981. 103p. Dissertação (Mestrado em Geografia Física) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1981.

Serrato, F.B.; Castillo, F.J.G.; Garcia, R.G.;Valcarcel, E.C. Radiación y temperatura em el período 1990-1999 en el campo experimental de “Elardal” Murcia: estudio preliminar. **Papeles de Geografía**, v.35, p.17-25, 2002

Tarifa, J.R.; Azevedo, T.R. (Org.). **Os climas na cidade de São Paulo**: teoria e prática. São Paulo: Pró-Reitoria de Cultura e Extensão. Universidade de São Paulo: Laboratório de Climatologia. Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001, 199p.

Teza, C.T.V.; Baptista, G.M.de M. Identificação do fenômeno ilhas urbanas de calor por meio de dados ASTER *on demand 08-Kinetic Temperature* (III): metrópoles brasileiras. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, XII., 16-21 abril, Goiânia, 2005. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. CD-ROM, Goiânia; INPE, 2005. p.3911-3918.

Voogt, J.A.; Oke, T.R. Complete urban surface temperatures. **Journal of Applied Meteorology**, v.36, p.1117-1132.1997.