

IDENTIFICAÇÃO DE ILHAS DE CALOR NA ÁREA URBANA DE ILHA SOLTEIRA - SP ATRAVÉS DA UTILIZAÇÃO DE GEOTECNOLOGIAS

DOUGLAS F. DA COSTA¹, HÉLIO R. SILVA², LEONARDO DE F. PERES³

RESUMO: Com a mudança climática prevista para as próximas décadas, os cientistas indicam que uma das consequências será o aumento das temperaturas médias e também o número de dias quentes, o que intensificará o desconforto térmico na população. Assim, esta pesquisa teve por objetivo principal identificar as variações térmicas localizadas na área urbana do município de Ilha Solteira - SP. A metodologia consistiu na aplicação de um algoritmo, utilizando o módulo LEGAL do sistema de informação geográfica SPRING 4.3, que realizou a transformação dos níveis de cinza gerados pelo TM/Landsat-5 em valores de temperatura de superfície. Os resultados mostraram temperaturas de superfície entre 21 °C e 23 °C nas áreas que apresentaram maior quantidade de vegetação, como, por exemplo, a área do zoológico e a área de lazer. As áreas que apresentaram os maiores valores de temperatura (41 °C até 44 °C) estão localizadas nas regiões onde ocorrem as maiores porcentagens das classes “edificações” e “pavimentada-edificação”, caracterizando assim o fenômeno de ilhas de calor. Estes resultados poderão servir de subsídios na elaboração de estratégias para minimizar o desconforto térmico das áreas onde ocorrem as ilhas de calor.

PALAVRAS-CHAVE: sensoriamento remoto, Landsat-5, infravermelho termal, correção atmosférica, desconforto térmico.

IDENTIFICATION OF URBAN HEAT ISLANDS IN ILHA SOLTEIRA-SP MUNICIPALITY USING GEOTECNOLOGIES

ABSTRACT: With climate change expected in the coming decades, scientists suggest that one of the consequences is the increase in average temperatures and also the increasing number of hot days, which will enhance the thermal discomfort in the population. Therefore, this study aimed to identify the main thermal variations in the urban area of Ilha Solteira-SP, Brazil. The methodology involved the transformation of Landsat TM data into values of surface temperature and their comparison to distinct urban land use. The results showed the presence of variations in surface temperatures in the different regions of the municipality. The areas that have higher amount of vegetation, such as the forest area of the zoo and the recreation area, showed surface temperatures between 21 °C and 23 °C. The areas that showed higher temperatures (41 °C to 44 °C) were located in the regions in which occur the largest percentages of classes “buildings” and “paved-building”, thus characterizing the phenomenon of heat islands. These results could be used to support urban planning strategies to minimize the effects of thermal discomfort of the areas identified as heat islands.

KEYWORDS: remote sensing, Landsat-5, thermal infrared, atmospheric correction, thermal discomfort.

INTRODUÇÃO

Atividades humanas, como o desenvolvimento de indústrias e a ampla utilização de veículos automotores, vêm causando mudanças na composição da atmosfera por meio de um contínuo aumento nas concentrações dos poluidores do ar, nomeadamente gases de efeito estufa, como o dióxido de carbono. Adicionalmente, mudanças na superfície terrestre, como a urbanização, que

¹ Universitário, UNESP, Ilha Solteira - SP, Fone: (0XX14) 3227.3600.

² Eng^o Agrônomo, Prof. Assistente. Doutor, Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos, UNESP, Ilha Solteira - SP.

³ Meteorologista, Prof. Adjunto, Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos, INPE, Departamento de Meteorologia, UFRJ.

Recebido pelo Conselho Editorial em: 29-4-2009

Aprovado pelo Conselho Editorial em: 31-8-2010

tem como efeito a substituição de superfícies naturais por edificações, ruas e avenidas, têm aumentado significativamente a impermeabilização dos solos e a irradiação de calor para a atmosfera. Como decorrência, o aquecimento global tem recebido cada vez mais atenção devido ao observado aumento da temperatura média global desde os finais do século 19 (CHEN et al., 2006). Uma das formas mais bem conhecidas de modificação antropogênica do clima é o fenômeno de aquecimento urbano. Atualmente, mais de 50% da população mundial vivem em cidades e espera-se que a população urbana chegue a 81% em 2030. Como o processo de urbanização global acelerou tanto em intensidade como em área física, existe um interesse crescente no entendimento de suas implicações na saúde humana, no funcionamento de ecossistemas, no tempo e, possivelmente, no clima como um contribuinte para o aquecimento global (IMHOFF et al., 2010).

SOUZA (2004) afirma que as cidades mal planejadas sofrem graves problemas com o fenômeno denominado ilha de calor, que ocorre em locais com excessiva quantidade de construções e baixa concentração de áreas verdes onde a temperatura é mais elevada que áreas vizinhas não urbanizadas. Este aumento da temperatura em algumas áreas urbanas vem prejudicando a saúde dos seus habitantes. As áreas urbanas apresentam características estruturais que tornam complexa a identificação dos seus problemas, pois não apresentam continuidade ou homogeneidade. São áreas formadas por diversos materiais que refletem ou irradiam a energia eletromagnética de maneiras diversas, apresentando grande amplitude espectral e altas frequências espaciais dificilmente separáveis. A heterogeneidade espectral é decorrente da diversidade da paisagem urbana, que é formada por diversos materiais: concreto e asfalto nas construções e vias, telhados de diferentes materiais, solo exposto, áreas verdes, praças, árvores, etc. (IWAI, 2003). Deste modo, é necessária a utilização de instrumentos e metodologias que permitam analisar o quanto cada elemento constituinte das diferentes regiões urbanas contribui na geração das ilhas de calor.

Diferentes estudos observacionais estimaram a magnitude do efeito ilha de calor pela comparação da temperatura do ar observada em estações meteorológicas localizadas em regiões urbanas e rurais (e.g., OKE, 1973). Dados *in situ* possuem a vantagem de alta resolução temporal, mas por outro lado têm pobre resolução espacial. Nas últimas décadas, o sensoriamento remoto aplicado em estudos de clima urbano vem destacando-se, pois além de possuir alta resolução espacial e oferecer visões de diferentes escalas, permite a utilização de dados espectrais localizados na região do infravermelho termal dentro da janela atmosférica. Isto faz como que os sensores que operem nesta região possam ter seus dados convertidos, após sofrerem correção dos efeitos atmosféricos e da superfície (emissividade), em temperatura da superfície continental (DASH et al., 2002; WENG & YANG, 2004), a qual é um parâmetro de importância fundamental para o estudo da climatologia urbana (VOOGT & OKE, 2003).

A temperatura da superfície continental, além de ser uma componente importante no balanço de energia à superfície, modula a temperatura do ar nas camadas mais baixas da atmosfera urbana, ajuda na determinação do clima interno de edificações e exerce influência nas trocas de energia que afetam o conforto dos moradores de cidades. Mudanças na temperatura da superfície continental urbana podem ocasionar efeitos significantes sobre o tempo e o clima local (KALNAY & CAI, 2003). Diferentes pesquisas têm sido conduzidas com base no uso de dados de sensoriamento remoto para detectar as características térmicas das superfícies urbanas. RAO (1972) foi o primeiro a demonstrar que áreas urbanas poderiam ser identificadas por meio de análises de dados na faixa do infravermelho termal adquiridos por um satélite.

Estudos acerca do fenômeno ilha de calor, utilizando estimativas de temperatura da superfície continental, com base em dados de satélites, foram conduzidos originalmente empregando-se dados do sensor AVHRR a bordo dos satélites polares da série NOAA (GALLO et al., 1993; ROTH et al., 1989; STREUTKER, 2002). A resolução espacial de 1,1 km destes dados é adequada somente para o mapeamento da temperatura urbana em escala regional (CHEN et al., 2002). Recentemente, foram utilizados dados térmicos dos satélites da série LANDSAT, tendo-se destacado por muitos anos o LANDSAT 5, com resolução espacial de 120 m, para estudos de ilha de calor de escala local (WENG, 2003). Como a temperatura da superfície continental é mais facilmente relacionada com as

condições da própria superfície, uma das principais aplicações do sensoriamento remoto térmico no estudo de climas urbanos consiste em examinar relações entre a estrutura espacial dos padrões térmicos urbanos e as características da superfície urbana, o que pode ajudar posteriormente no planejamento do uso da terra (CHEN et al., 2006).

As populações das cidades de pequeno e médio portes, localizadas na região noroeste do Estado de São Paulo, vêm sofrendo as consequências negativas do excessivo aquecimento dos seus espaços. De acordo, o presente trabalho tem como objetivos principais: estimar a temperatura da superfície continental, e posteriormente; identificar as ilhas de calor na mancha urbana de Ilha Solteira - SP, utilizando dados da banda térmica do LANDSAT-5 sensor TM e técnicas de geoprocessamento, e investigar a relação entre a temperatura da superfície continental e a cobertura do solo na cidade de Ilha Solteira - SP.

MATERIAL E MÉTODOS

O município de Ilha Solteira está localizado a noroeste do Estado de São Paulo, na posição mais estratégica da Hidrovia Tietê-Paraná, apresentando área total de 661,3 km². Desse total, 5,82 km² compõem a área urbana (MIRANDA et al., 2005; SILVA et al., 2006). De acordo com o Sistema Internacional de Köppen, o clima desta região é o tropical úmido, com estação chuvosa no verão e seca no inverno (Aw). As temperaturas médias mensais variam entre 21,5 °C (julho) e 26,4 °C (dezembro), e as precipitações médias mensais variam de 20 mm (julho) a 225 mm (janeiro). O período de excedente hídrico estende-se de janeiro a fevereiro, e o de deficiência hídrica, de março a dezembro. A velocidade média do vento é classificada como fraca, e a sua direção predominante é E-SE (HERNANDEZ, 2007). O relevo da área de estudo é o colinoso, com predomínio de colinas amplas e médias (SÃO PAULO, 1981). Mais de 80% da área urbana apresenta declividades que variam de 0 a 5%, e as classes de orientações de vertentes que predominam são as sul-oeste (SW) e oeste (W) (SANTOS, 2005). O solo presente na área de estudo é do tipo Latossolo Vermelho distrófico A moderado de textura argilosa, de relevo plano e suave ondulado (LV39) (EMBRAPA, 1999). Em Ilha Solteira, existem as áreas verdes denominadas Área de Lazer, localizada na posição norte do perímetro urbano, com 11,35 ha, ocupada com a espécie *Pinus elliottii* e Zoológico, localizada na posição oeste do perímetro urbano, com 18 ha, ocupada com vegetação predominante do bioma Mata Atlântica (Mata Seca Semi-Decídua).

Para a extração das informações espaciais sobre a temperatura da superfície e do uso e ocupação do solo urbano no perímetro urbano de Ilha Solteira (SP), foram adquiridos dados da imagem digital TM/Landsat 5, órbita 222, ponto 74, data de 16 de dezembro de 2003, com nível de correção 1G (geocorrigido sistematicamente). Os dados vetoriais georreferenciados e em formato digital da malha urbana de Ilha Solteira, e a Carta Uso e Ocupação do solo urbano de Ilha Solteira (SP) foram elaborados por Santos (2005). Para o desenvolvimento do trabalho, foi utilizado o software Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas (SPRING versão 4.3). O método utilizado consistiu em duas etapas, sendo a primeira a estimativa da temperatura da superfície continental, e a segunda parte, a análise dos dados e comparação com o uso e ocupação do solo da área urbana.

Estimativa da temperatura da superfície continental

A transformação dos dados brutos, inicialmente em números digitais (ND), para radiância (L_i), foi feita com base nos valores de radiância mínima (L_{MIN_i}), máxima (L_{MAX_i}) e o valor máximo de ND ($Q_{cal_{max}}$) para as bandas 3; 4 e 6, os quais foram obtidos a partir da calibração absoluta de pós-lançamento do sensor TM, de acordo com Chander e Markham (2003). Para as bandas reflectivas 3 e 4, a radiância foi posteriormente transformada em reflectância:

$$\rho_i = \frac{\pi L_i d^2}{ESUN_i \cos \theta_s} \quad (1)$$

em que,

- ρ_i - reflectância no canal i ;
 L_i - radiância espectral no canal i , $W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$;
 d - distância Terra-Sol, unidades astronômicas;
 $ESUN_i$ - valor médio da irradiância solar no canal i , $W m^{-2} \mu m^{-1}$, fornecido pela Tabela 1, e
 θ_s - ângulo zenital solar.

TABELA 1. Valor médio da irradiância solar no canal i em $W m^{-2} \mu m^{-1}$ ($ESUN_i$). **Average value of solar irradiance in the i channel in $W m^{-2} \mu m^{-1}$ ($ESUN_i$).**

Banda	$ESUN_i$
3	1.554
4	1.036

No caso da banda térmica 6, a radiância foi transformada em temperatura de brilho por meio da inversão da função de Planck:

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

em que,

- T_b - temperatura de brilho em kelvin, K;
 L_i - radiância espectral no canal i em $W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$, e
 K_1 e K_2 - respectivamente, as constantes 1 e 2 de calibração em $W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$ em kelvin (K), as quais são fornecidas na Tabela 2.

TABELA 2. Constantes de calibração da banda térmica 6. **Calibration constants of the 6 thermal band.**

K_1 ($W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$)	K_2 (kelvin)
607,76	1.260,56

O sensor TM a bordo do satélite Landsat 5 apresenta somente um canal cobrindo a faixa espectral do infravermelho térmico, i.e., canal 6, e, portanto, a única forma possível de estimar a temperatura da superfície é com base em métodos monocanal. Estes algoritmos utilizam medidas de radiância num único canal dentro da janela atmosférica e assumem a hipótese de que a emissividade é conhecida *a priori*. Esta hipótese é geralmente válida para alguns tipos de superfície como oceanos e florestas, onde a emissividade praticamente não varia espacial e temporalmente. Neste caso, a resolução do problema de estimativa de temperatura da superfície por sensoriamento remoto reduz-se basicamente em realizar uma correção atmosférica para uma emissividade conhecida. A correção atmosférica geralmente requer perfis atmosféricos de temperatura e umidade que são utilizados como entrada em modelos de transferência radiativa. A necessidade de uma descrição precisa do estado da atmosfera no momento da passagem do satélite e de recursos computacionais significativos dificulta a utilização de um único canal para se estimar a temperatura da superfície. Consequentemente, diferentes hipóteses e parametrizações têm sido propostas (e.g., QIN et al., 2001; SOUZA & SILVA, 2005) com o intuito de simplificar a correção atmosférica de maneira que seja possível corrigir os efeitos atmosféricos com base somente em dados medidos na rede de estações meteorológicas convencionais, evitando desta forma a utilização de radiossondas e de cálculos numéricos de transferência radiativa. Neste contexto, utilizou-se, no presente trabalho, o algoritmo monocanal proposto por QIN et al. (2001), que se baseia nas simplificações acima citadas para realizar a correção atmosférica. Com base na equação proposta por QIN et al. (2001), observa-se, que para a obtenção da temperatura da superfície, é necessário conhecer a transmitância

atmosférica, τ_i , e a temperatura média do ar, T_a (ambos referentes à correção atmosférica), e ainda a emissividade da superfície, ξ_i .

Os dados necessários para o cálculo da transmitância atmosférica e da temperatura média do ar foram obtidos a partir da estação agrometeorológica automática instalada na Área Experimental de Agricultura Irrigada da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP, município de Ilha Solteira - SP, cujas coordenadas são 20°25'23" latitude sul, 51°21'13" longitude oeste, e 335 m de altitude. A T_a foi obtida por meio da equação determinada por QIN et al. (2001), em função da temperatura do ar a 2 m. A equação fornece resultados com erros menores que 1,0 K para perfis de temperatura com gradiente semelhante aos das atmosferas-padrão utilizadas, conforme segue:

$$T_a = 19,73 + 0,909 T_0 \quad (3)$$

em que,

T_0 - temperatura do ar a 2 m da superfície.

Com o intuito de estimar a transmitância atmosférica, utilizou-se, no presente trabalho, uma curva ajustada por SOUZA & SILVA (2005), que relaciona a transmitância com o conteúdo de vapor d'água:

$$\tau = 0,951 - 0,01 w \exp\left(\frac{3w}{1+w}\right) \quad (4)$$

em que,

w - conteúdo de vapor d'água em g cm^{-2} , obtido por meio da equação de Leckner (IQBAL, 1983):

$$w = 0,493 \text{ UR} \frac{e_s}{T_0} \quad (5)$$

em que,

UR - umidade relativa;

e_s - pressão de saturação do vapor d'água à temperatura ambiente em hPa, a qual foi calculada utilizando-se da eq.(6), proposta por (IQBAL, 1983):

$$e_s = 0,01 \exp\left(26,23 - \frac{5416}{T_0}\right) \quad (6)$$

Como o sensor TM apresenta somente uma banda termal, torna-se inviável a aplicação de métodos sofisticados de estimativa de emissividade que geralmente utilizam sensores multiespectrais nesta região espectral. Neste contexto, e como o sensor TM possui canais localizados na região de 0,63-0,69 μm (canal 3) e 0,76-0,90 μm (canal 4), optou-se por adotar como alternativa a seguinte relação entre a emissividade da superfície e o índice de vegetação NDVI (VAN DE GRIEND; OWE, 1993):

$$\varepsilon_i = 1,009 + 0,047 \ln \text{NDVI} \quad (7)$$

em que, valores de NDVI são obtidos através de reflectâncias nos canais 3 e 4.

A precisão das estimativas de temperatura da superfície continental depende essencialmente de três principais fontes de erro, nomeadamente: o erro resultante da correção atmosférica, devido às diferentes parametrizações e simplificações adotadas; o erro decorrente do desempenho do sensor, o qual é quantificado pelo ruído radiométrico, e o erro devido à incerteza no valor de emissividade, o qual é assumido ser conhecido *a priori*. A validação de estimativas de temperatura de superfície com base em campanhas de campo apresenta diferentes questões desafiadoras. A principal dificuldade consiste na comparação entre medidas referentes à área de um pixel (e.g., 120 m^2 no caso do sensor TM/Landsat 5) e medidas pontuais realizadas *in situ*. Entretanto, resultados obtidos por QIN et al. (2001), com base em análises de sensibilidade e simulações

realizadas com modelos de transferência radiativa, mostram que o erro total esperado é de 1,5 K para o algoritmo utilizado no presente trabalho.

Análise dos dados

Posteriormente, geraram-se tabelas contendo o resultado da tabulação cruzada entre as variáveis classes de declividade e os intervalos de níveis de cinza, e os mapas das classes de declividade e orientação de vertentes da área urbana de Ilha Solteira, e das estimativas de temperatura da superfície foram comparados com os dados de uso e ocupação do solo urbano de Ilha Solteira - SP, obtidos por SANTOS (2005). As classes de uso e ocupação do solo foram obtidas a partir da segmentação e classificação das imagens-fração, vegetação, área construída e asfalto derivadas da técnica Modelo Linear de Mistura Espectral aplicada na imagem Landsat-5 TM (SHIMABUKURO & SMITH, 1991).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como mencionado na seção anterior, a temperatura da superfície estimada com base nos dados do sensor TM a bordo do satélite Landsat-5 foi comparada com as diferentes classes de uso e ocupação do solo urbano de Ilha Solteira. Na Tabela 3, mostra-se a relação entre as classes de cobertura de solo no perímetro urbano de Ilha Solteira e suas respectivas áreas com oito diferentes grupos de temperatura que foram criados, dividindo-se o intervalo observado de temperatura em subintervalos de 4°C cada, a fim de caracterizar o comportamento térmico de cada tipo de cobertura.

TABELA 3. Intervalos da temperatura de superfície versus classes de uso e ocupação do solo urbano (SANTOS, 2005) em km² / % . **Ranges of surface temperature versus Classes of Use and Occupation of the Urban Land (Santos, 2005) in km² / % .**

Intervalos da Temperatura de Superfície (°C)	Classes de Uso e Ocupação do Solo Urbano no Perímetro Urbano de Ilha Solteira - SP (km ² /%)					Total (km ² /%)
	Edificações	Vegetação	Pavimentada-Vegetação	Edificada-Vegetação	Pavimentada-Edificação	
20 - 23	0,00/0,0	0,14/19,7	0,01/0,7	0,00/0,0	0,00/0,0	0,15/2,7%
23 - 26	0,00/0,0	0,16/22,5	0,05/3,6	0,00/0,0	0,00/0,0	0,21/3,8%
26 - 29	0,01/0,6	0,23/32,4	0,24/17,5	0,03/4,5	0,00/0,0	0,51/9,0%
29 - 32	0,07/4,1	0,07/9,9	0,33/24,2	0,09/13,6	0,03/2,5	0,59/10,5%
32 - 35	0,44/26,2	0,1/14,1	0,47/34,3	0,34/50,1	0,36/29,8	1,70/30,1%
35 - 38	0,70/41,7	0,01/1,4	0,25/18,2	0,18/27,4	0,60/49,6	1,74/30,8%
38 - 41	0,42/25,0	0,00/0,0	0,02/1,5	0,03/4,5	0,21/17,3	0,69/12,2%
41 - 44	0,04/2,4	0,00/0,0	0,00/0,0	0,00/0,0	0,01/0,8	0,05/0,9%
Total (km ²)	1,68/29,8%	0,71/12,6%	1,37/24,3%	0,67/11,9%	1,21/21,4%	5,64/100%

Por meio do cálculo da área de cada classe, pode-se verificar, na Tabela 3, que a classe predominante no perímetro urbano foi a “edificações”, seguida pelas classes “pavimentada-vegetação”, “pavimentada-edificação”, “vegetação” e “edificada-vegetação”. A distribuição das diferentes classes pode ser explicada pela maneira como Ilha Solteira foi projetada e desenvolveu-se. O surgimento da cidade deu-se em razão do enorme contingente de mão de obra necessária à construção da Usina Hidrelétrica de Ilha Solteira, sendo imprescindível o desenvolvimento de uma infraestrutura mínima para a construção de alojamentos e vilas operárias para os trabalhadores. Nota-se, também, que a área urbana de Ilha Solteira apresenta uma considerável variação espacial da temperatura da superfície, com diferenças que podem ser superiores a 20° C e com valores absolutos entre 20 °C e 44 °C. A distribuição espacial dos oito grupos de valores de temperatura da superfície na área urbana de Ilha Solteira é mostrada na Figura 1.

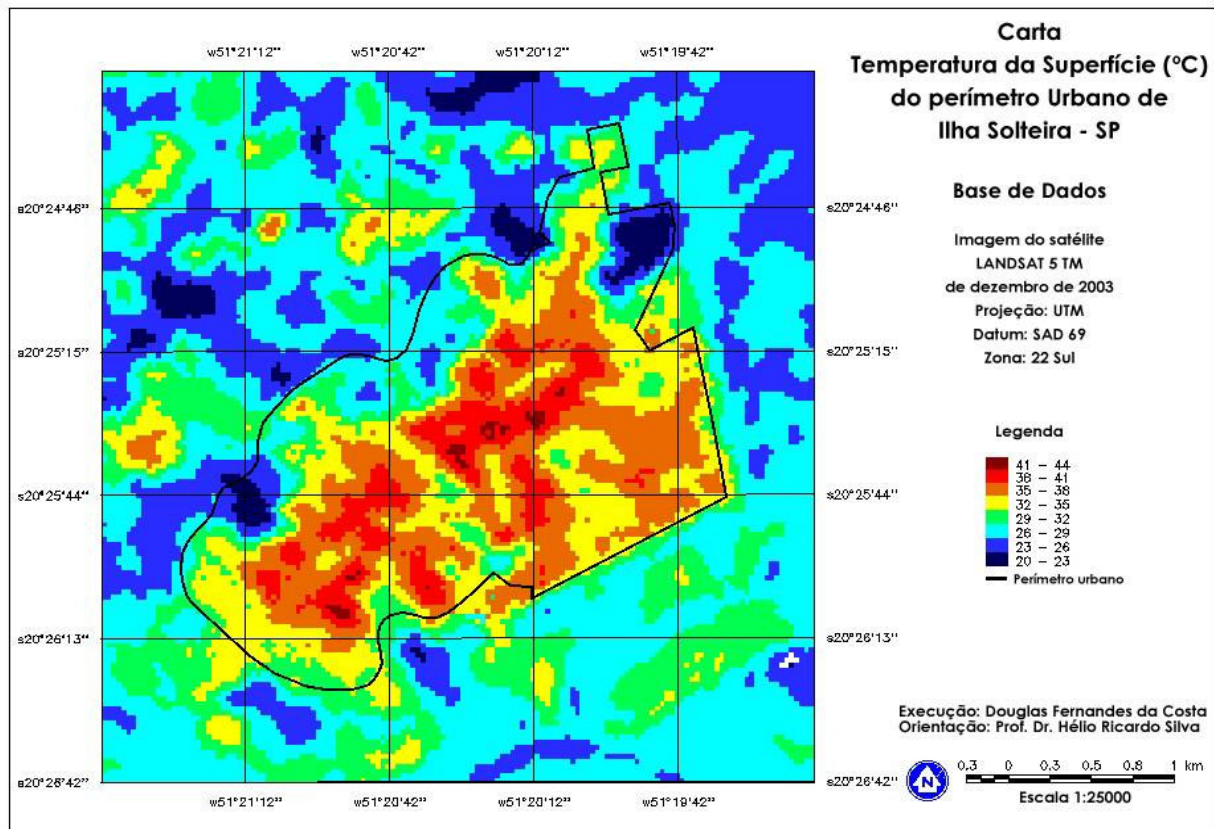


FIGURA 1. Carta da temperatura da superfície, da área urbana de Ilha Solteira - SP. **Letter of surface temperature in the urban area of Ilha Solteira / SP.**

A Tabela 3 indica que 92,9% da classe “edificações” compreende três grupos de temperatura, nomeadamente: 32-35 °C, 35-38 °C e 38-41 °C, sendo que o grupo 35-38 °C é o que apresenta maior área. Em relação à classe “pavimentada-edificação”, constatou-se que 96,7% da área apresenta temperaturas compreendidas entre os mesmos três grupos, com maior concentração de valores também no grupo 35-38 °C. Entretanto, quando as classes “pavimentada-edificação” e “edificações” são comparadas, a primeira pode ser considerada como uma classe mais fria, uma vez que, neste caso, o grupo 32-35 °C apresenta uma área maior, e o grupo 38-41 °C, uma área menor. Na classe “edificada-vegetação”, predominaram três grupos de temperatura: 29-32 °C, 32-35 °C e 35-38 °C. Neste caso, observa-se que o grupo 32-35 °C é aquele com maior área física, evidenciando uma diminuição da temperatura em relação às duas classes de uso de solo anteriormente descritas. Os resultados obtidos mostram que a diminuição nos valores de temperatura da superfície foi ainda maior para a classe “pavimentada-vegetação”, que apresentou 94,2% da sua área distribuída entre os grupos: 26-29 °C, 29-32 °C, 32-35 °C e 35-38 °C. Apesar de o grupo 32-35°C ser novamente aquele com maior área, similar ao que acontece na classe “edificada-vegetação”, uma região considerável da classe “pavimentada-vegetação” enquadra-se no grupo 26-29 °C. Por último, a classe vegetação apresentou aproximadamente 75% de sua área entre os três grupos com menores valores de temperatura: 20-23 °C, 23-26 °C e 26-29 °C.

Em termos gerais, o grupo 41-44 °C, que representa os valores mais elevados de temperatura, foi detectado numa área do perímetro urbano de 0,05 km², da qual 0,04 km² corresponde à classe “edificações”. Observa-se também que as classes “edificações” e “pavimentada-edificação” apresentam os grupos com maiores valores de temperatura. Por exemplo, o grupo de temperatura 38-41 °C ocupou uma área de 0,69 km², correspondendo a 12,2% da área total e esteve presente de forma predominante nas classes “edificações” e “pavimentada-edificação”. Embora este grupo de temperatura esteja também presente nas demais classes, com exceção da classe vegetação, a área correspondente, da ordem de 0,05 km², é 10 vezes menor. Em relação à classe vegetação, os

resultados são opostos aos encontrados para as classes compostas de materiais artificiais. Nesta classe de uso de solo, não se verificam os grupos mais elevados de temperatura, nomeadamente, 38-41 °C e 41-44 °C. Os dados na Tabela 3 permitem a constatação de que, entre as classes de uso e ocupação do solo, existe uma variação térmica característica e que, portanto, é possível classificar cada tipo de cobertura de acordo com o comportamento térmico. Verifica-se, em geral, que a classe mais quente no perímetro urbano é a formada por “edificações”, seguida pelas classes “pavimentada-edificação”, “edificada-vegetação”, “pavimentada-vegetação” e “vegetação”.

O fato de as classes “edificações” e “pavimentada-edificação” apresentarem temperaturas mais elevadas resulta da substituição de superfícies naturais, como vegetação e solo nu, por materiais, como asfalto e concreto, que reduzem a cobertura vegetal e alteram radicalmente as propriedades de impermeabilidade, radiativas, térmicas e aerodinâmicas da área urbana (OKE & MAXWELL, 1975).

Na área classificada como “vegetação”, a presença de árvores e de outros tipos de plantas de menor porte ajuda a diminuir a temperatura da superfície e do ar através do efeito direto de sombreamento e da evapotranspiração. Para esta classe, os valores de NDVI obtidos variam em torno de 0,7 a 0,8 indicando uma alta fração de cobertura vegetal dentro do pixel, enquanto as classes “edificações” e “pavimentada-edificação” apresentam valores de NDVI por volta de somente 0,2. As folhas e ramos presentes na classe “vegetação” reduzem a quantidade de radiação solar que chega à superfície abaixo da copa, uma vez que parte da radiação solar incidente é absorvida pelas folhas e utilizada para fotossíntese, e outra fração é refletida de volta para a atmosfera. Como consequência, o sombreamento diminui a temperatura da superfície e, por outro lado, superfícies mais frias acabam também por reduzir o calor transmitido para as edificações e a atmosfera. Diferentes estudos mostram que a redução na temperatura de paredes e telhados pode chegar a 20 °C pelo efeito de sombreamento da vegetação (AKBARI et al., 1997; SCOTT et al., 1999). No perímetro urbano de Ilha Solteira, as áreas com temperaturas mais amenas, 20-23 °C, foram observadas na Área de Lazer e no Zoológico, e ocupam 11 e 18 ha, respectivamente (Figura 1). O efeito do sombreamento da vegetação na redução da temperatura das áreas construídas foi observado nas bordas das áreas verdes ocupadas predominantemente pelas classes edificação-vegetação e pavimentada-vegetação.

Adicionalmente, como resultado da substituição de superfícies naturais, como vegetação e solo nu, por materiais não evaporativos e impermeáveis como asfalto e concreto, há um escoamento mais acelerado das águas das chuvas e parte é coletada pelos sistemas urbanos de saneamento básico nas galerias de águas pluviais, ocasionando uma diminuição de água disponível e do tempo para evaporação. Portanto, em áreas urbanas, a radiação líquida à superfície é majoritariamente convertida em fluxo de calor sensível, resultando num aumento da temperatura. Ao contrário, a classe “vegetação” apresenta as menores temperaturas, o que é explicado em parte pelo efeito direto de sombreamento das superfícies e ainda pelos altos níveis de fluxo de calor latente devido à uma maior quantidade de água disponível para os processos de evaporação e evapotranspiração (OKE, 1982).

As propriedades radiativas e térmicas dos materiais urbanos, em particular, albedo, emissividade e capacidade, e condutividade térmica, também apresentam forte influência no desenvolvimento do fenômeno ilha de calor, visto que elas determinam como a radiação de ondas curta e longa é refletida, absorvida, emitida e armazenada. Áreas urbanas são formadas tipicamente por materiais, como concreto, telhados e asfalto, que possuem um valor baixo de albedo. Como resultado, regiões urbanizadas geralmente refletem menos e absorvem mais radiação solar, acarretando aumento na temperatura da superfície. A capacidade e a condutividade térmica dos materiais são propriedades importantes que influenciam no desenvolvimento de ilha de calor. Diferentes materiais de construção, como aço e pedra, possuem maior capacidade térmica do que materiais naturais presentes em áreas rurais, como solo nu e areia. Portanto, regiões urbanizadas são tipicamente mais eficientes em armazenar energia solar, como calor, na parte interna de suas infraestruturas, podendo absorver e armazenar duas vezes mais calor que áreas rurais vizinhas

(CHRISTEN & VOGT, 2004). Estes mesmos materiais artificiais também possuem geralmente alta condutividade térmica, transferindo o calor de forma mais rápida e eficiente para outras camadas de construção (KATO & YAMAGUCHI, 2005).

Um fator adicional que influencia no desenvolvimento de ilha de calor é a geometria urbana, que se refere às dimensões e ao espaçamento das edificações dentro da cidade. A geometria urbana afeta o escoamento do vento, a absorção de energia e a habilidade da superfície em emitir radiação de onda longa para o espaço. Na área urbana de Ilha Solteira, a baixa velocidade do vento, conforme consta em HERNANDEZ (2007), contribuiu para a formação das ilhas de calor. Além disso, estas ilhas de calor também são favorecidas pelo relevo que se apresenta plano ou com as orientações de vertentes oeste e sul-oeste, que recebem alta incidência solar. É interessante verificar, nos resultados obtidos (Tabela 3), que todas as classes formadas por edificações são mais quentes do que as formadas por pavimentos. Este comportamento deve-se à maneira como área edificada foi projetada para abrigar os trabalhadores da Usina Hidrelétrica de Ilha Solteira, com a construção em sua grande maioria, de casas geminadas, que impedem a circulação dos ventos, o que não ocorre nas áreas pavimentadas.

Utilizou-se o grupo de temperatura mais elevado, 41-44 °C, para a identificação das áreas mais afetadas pelo processo de urbanização dentro da mancha urbana de Ilha Solteira. Com base no procedimento adotado, podemos verificar, na Figura 1, a existência de sete ilhas de calor dentro do perímetro urbano, as quais ocorrem, como mencionado anteriormente, apenas nas classes “edificações” e “pavimentada-edificação”, e correspondem a 0,9% da mancha urbana de Ilha Solteira. Na Figura 1, também mostra-se a sobreposição do mapa de temperatura da superfície (°C) do perímetro urbano de Ilha Solteira - SP, ao mapa da malha urbana, permitindo a constatação de que as ilhas de calor mais intensas, referentes ao grupo de temperatura mais quente, estão localizadas nos bairros denominados Tijucas, Recanto, Limeira, Salvador (Juazeiro), Ilhéus (Recife), Caruaru. Estas regiões compreendem justamente os locais onde há grande concentração de residências por área física, separadas por vielas muito estreitas. Portanto, a população residente nessas ilhas de calor está bastante sujeita ao desconforto térmico, o que pode ocasionar também maior incidência de enfermidades.

Os resultados obtidos estão de acordo com diferentes estudos (e.g., STREUTKER, 2003; VOGT & OKE, 2003; WENG et al., 2004; XIAN & CRANE, 2006), que mostram que uma consequência ambiental da urbanização é o efeito de ilha de calor urbano, onde áreas urbanas são mais quentes que áreas vizinhas não urbanizadas. Estes resultados também demonstram a importância da análise de características, como cobertura vegetal, para o direcionamento do uso racional e adequado de um determinado espaço geográfico (CAMPOS et al., 2004). O presente trabalho confirma que as ilhas de calor se concentram em lugares com menor índice de vegetação e maior densidade de construções. Nas áreas, onde predomina a ampla ocupação dos espaços com moradias e obras viárias, em prejuízo da vegetação, as temperaturas são mais elevadas e, em grande parte, variam entre 35 °C e 38 °C, podendo chegar a 44 °C em algumas regiões. Já em regiões com maior volume de vegetação, predominam temperaturas mais amenas, com valores entre 20 °C e 29 °C. As diferenças de temperatura encontradas para a região de Ilha Solteira são da mesma ordem de grandeza que as encontradas por PRICE (1979), que mostrou também que, para muitas cidades na região de Nova Iorque, as temperaturas foram de 10 °C a 15 °C mais quentes que as áreas rurais no entorno. Resultados obtidos por KARL et al. (1988) mostram que áreas com população de 10.000 habitantes ou mais são mais quentes que as áreas rurais com população menor que 2.000 habitantes. Os resultados mostrados na Tabela 3 e na Figura 1 mostram também que o padrão de temperatura é fortemente correlacionado ao tipo de cobertura de solo, o que foi verificado também por ROTH et al. (1989) ao analisar dados obtidos por sensores a bordo de satélites.

Sugere-se, dessa forma, a elaboração de um plano de rearborização dos bairros onde foram detectadas as ilhas de calor, de forma a melhorar as condições de temperatura, muito embora a arquitetura desses locais possa dificultar o plantio de árvores. Outra medida mais complexa e que depende do poder público, é estabelecer uma legislação que defina uma relação adequada entre

espaço construído e área verde. No caso de Ilha Solteira, as duas medidas sugeridas acima são de grande valia e de crucial importância para amenizar os efeitos de ilha de calor, visto que os dados apresentados na Tabela 3 mostram que “edificação-vegetação” é a classe de uso e ocupação do solo com menor área, evidenciando que, nos locais onde a população se concentra, há pouca vegetação.

CONCLUSÕES

Os resultados mostraram que, no perímetro urbano de Ilha Solteira, encontram-se áreas com a temperatura de superfície bastante elevada. Tal fato é de grande interesse para o planejamento urbanístico, que, com manipulação da paisagem urbana, pode amenizar esse efeito.

O algoritmo de estimativa de temperatura da superfície utilizado no presente trabalho precisa ainda ser validado para a área de estudo, ou seja, precisa ser comparado com medições de campo, de radiossondas e de cálculos numéricos de transferência radiativa, uma vez que o algoritmo é baseado em simplificações e parametrizações.

AGRADECIMENTOS

Ao Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC/INPE), pelo apoio na concretização deste projeto, e à FAPESP (Processo 2001/14574-1) e FUNDUNESP (Processo 00152/02-DFP), pelo suporte financeiro da pesquisa.

REFERÊNCIAS

- AKBARI, H.; KURN, D.; BRETZ, S.; HANFORD, J. Peak power and cooling energy savings of shade trees. *Energy and Buildings*, Lausanne, v.25, p.139-148, 1997.
- CAMPOS, S.; ARAÚJO JÚNIOR, A.A.; BARROS, Z.X.; CARDOSO, L.G.; PIROLI, E.L. Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao uso da terra em microbacias hidrográficas. Botucatu - SP. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.24, n.2, p.431-435, 2004.
- CHANDER, G.; MARKHAM, B. *Revised Landsat 5 TM radiometric calibration procedures and post-calibration dynamic ranges*. 2003. Disponível em: <<http://landsat7.usgs.gov/documents/L5TMCAL2003.pdf>>. Acesso em: 20 mar. 2007.
- CHEN, X.L.; ZHAO, H.M.; LI, P.X.; YIN, Z.Y. Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes. *Remote Sensing of Environment*, New York, v.104, p.133-146, 2006.
- CHEN, Y.; WANG, J.; LI, X. A study on urban thermal field in summer based on satellite remote sensing. *Remote Sensing for Land and Resources*, New York, v.4, n.1, p.55-59, 2002.
- CHRISTEN, A.; VOGT, R. Energy and radiation balance of a Central European city. *International Journal of Climatology*, Chichester, v.24, p.1.395-1.421, 2004.
- DASH, P.; GOTTSCHKE, F.S.; OLESEM, F.S.H.; FISCHER, H. Land surface temperature and emissivity estimation from passive sensor data: theory and practice-current trends. *International Journal of Remote Sensing*, Bethesda, v.23, n.13, p.2.563-2.594, 2002.
- EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. *Mapa pedológico do Estado de São Paulo*. Campinas: Engemap, 1999. Mapa 13 – Urubupungá, color, 100 cm x 70 cm. Escala 1:500.000 (legenda expandida).
- GALLO, K.P.; McNAB, A.L.; KARL, T.R.; BROWN, J.F.; HOOD, J.J.; TARPLEY, J.D. The use of NOAA AVHRR data for assessment of the urban heat island effect. *Journal of Applied Meteorology*, Boston, v.32, n.5, p.899-908, 1993.
- HERNANDEZ, F.B.T. *Análise agroclimática da área de influência do Reservatório da Usina Hidrelétrica de Ilha Solteira, região noroeste do Estado de São Paulo*. Ilha Solteira: UNESP, FEPISA e SEAP/PR (Convênio 80/2005), 2007. 27 p. Disponível em:

- <http://www.agr.feis.unesp.br/pdf/parque_aquicola_agroclimatologia_noroeste_sp.pdf>. Acesso em: 20 mar 2008.
- IMHOFF, M.L.; ZHANG, P.; WOLFE, R.E.; BOUNOUA, L. Remote sensing of the urban heat island effect across biomes in the continental USA. *Remote Sensing of Environment*, New York, v.114, p.504-513, 2010.
- IQBAL, M. *An introduction to solar radiation*. New York: Academic Press Canadian, 1983. 390 p.
- IWAI, O.K. *Mapeamento do uso do solo urbano do município de São Bernardo do Campo, através de imagens de satélites*. 2003. 140 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da USP, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.
- KALNAY, E.; CAI, M. Impact of urbanization and land-use change on climate. *Nature*, London, v.423, n.29, p.528-531, 2003.
- KARL, T.R.; DIAZ, H.F.; KUKLA, G. Urbanization: its detection and effect in the United States climate record. *Journal of Climate*, Boston, v.1, p.1099-1123, 1988.
- KATO, S.; YAMAGUCHI, Y. Analysis of urban heat-island effect using ASTER and ETM+ Data: Separation of anthropogenic heat discharge and natural heat radiation from sensible heat flux. *Remote Sensing of Environment*, Oxford, v.99, p.44-54, 2005.
- MIRANDA, E.E.; GOMES, E.G.; GUIMARÃES, M. *Mapeamento e estimativa da área urbanizada do Brasil com base em imagens orbitais e modelos estatísticos*. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em: <<http://www.urbanizacao.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 20 maio 2008.
- OKE, T. R. *Boundary layer climates*. 2nd ed. London: Methuen, 1987. 435 p.
- OKE, T.R. City size and the urban heat island. *Atmospheric Environment*, Oxford, v.7, p.769-779, 1973.
- OKE, T.R. The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Berks, v.108, p.1-4, 1982.
- OKE, T.R.; MAXWELL, G.B. Urban heat island dynamics in Montreal and Vancouver. *Atmospheric Environment*, Oxford, v.9, p.191-200, 1975.
- PRICE, J. Assessment of the urban heat island effect through the use of a satellite data. *Monthly Weather Review*, Boston, v.107, p.1.554-1.557. 1979.
- QIN, Z.; KARNIELI, A.; BERLINER, P. A mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM data and its application to the Israel-Egypt border region. *International Journal of Remote Sensing*, Bethesda, v.22, n.18, p.3.719-3.746, 2001.
- RAO, P.K. Remote sensing of urban "heat islands" from an environmental satellite. *Bulletin of the American Meteorological Society*, Boston, v.53, p.647-648, 1972.
- ROTH, M.; OKE, T.R.; EMERY, W.J. Satellite-derived urban heat islands from three coastal cities and the utilization of such data in urban climatology. *International Journal of Remote Sensing*, Bethesda, v.10, p.1.699-1.720, 1989.
- SANTOS, G. R. *Identificação de ilhas de calor na área urbana de Ilha Solteira - SP, através de dados orbitais do satélite LANDSAT 5 – TM*. 2005. 112 f. Monografia (Trabalho de Graduação em Agronomia) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2005.
- SÃO PAULO. *Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo*. São Paulo: IPT, 1981. (Boletim Técnico Científico, 1).
- SCOTT, K.; SIMPSON, J.R.; MCPHERSON, E.G. Effects of tree cover on parking lot microclimate and vehicle emissions. *Journal of Arboriculture*. Savoy, v.25, n.3, p.129-142, 1999.

- SHIMABUKURO, Y.E.; SMITH, J.A. The least-squares mixing models to generate fraction images derived from remote sensing multispectral data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, New York, v.29, n.1, p.16-20, 1991.
- SILVA, H.R.; ALTIMARE, A.L.; LIMA, E.A.C. de F. Sensoriamento remoto na identificação do uso e ocupação da terra na área do projeto “Conquista da Água”, Ilha Solteira - SP, Brasil. *Engenharia Agrícola*, Jaboticabal, v.26, n.1, p.328-334, 2006 .
- SOUZA, J.D.; SILVA, B.B. Correção atmosférica para temperatura da superfície obtida com imagem TM: Landsat 5. *Revista Brasileira Geofísica*, São Paulo, v.23, n.4, p.349-358, 2005.
- SOUZA, L. C. L. Ilhas de calor. *Jornal Unesp*, São Paulo, v.18, n.186, p.11, 2004.
- STREUTKER, D. R. A remote sensing study of the urban heat island of Houston, Texas. *International Journal of Remote Sensing*, Basingstoke, v.23, n.13, p.2.595-2.608, 2002.
- STREUTKER, D. R. Satellite-measured growth of the urban heat island of Houston, Texas. *Remote Sensing of Environment*, Oxford, v.85, p.282-289, 2003.
- VAN DE GRIEND, A. A.; OWE, M. On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surfaces. *International Journal of Remote Sensing*, Bethesda, v.14, p.1.119-1.131, 1993.
- VOOGT, J.A.; OKE, T.R. Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment*, Oxford, v.86, p.370-384, 2003.
- WENG, Q. Fractal analysis of satellite-detected urban heat island effect. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Bethesda, v.69, n.5, p.555-566, 2003.
- WENG, Q.; LU, D.; SCHUBRING, J. Estimation of land surface temperature - vegetation abundance relationship for urban heat island studies. *Remote Sensing of Environment*, Oxford, v.89, p.467-483. 2004.
- WENG, Q.; YANG, S. Managing the adverse thermal effects of urban development in a densely populated Chinese city. *Journal of Environmental Management*, Oxford, v.70, n.2, p.145-156, 2004.
- XIAN, G.; CRANE, M. An analysis of urban thermal characteristics and associated land cover in Tampa Bay and Las Vegas using Landsat satellite data. *Remote Sensing of Environment*, Oxford, v.104, p.147-156. 2006.