

ANÁLISE MULTITEMPORAL DA TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE ATRAVÉS DE IMAGENS DO TM LANDSAT 5, NA CIDADE DE PALMAS-TO

Juliana da Costa Santos¹; Roberta Araújo e Silva²; Gírlene Figueiredo Maciel³; José Luiz Cabral da Silva Júnior⁴; Eduardo Baptistella Emiliano⁵

1 - Graduada do curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Tocantins – UFT, Palmas-TO, Brasil. juliana.scd@gmail.com

2 - Mestre em Meteorologia, Universidade Federal do Tocantins – UFT, Palmas-TO, Brasil. beta_araj@yahoo.com.br

3 - Prof. Dr. em Meteorologia, Universidade Federal do Tocantins – UFT, Palmas-TO, Brasil. maciel@uft.edu.br

4 - Prof. Dr. em Meteorologia, Fundação Universidade do Tocantins – UNITINS, Palmas-TO, Brasil. jlcabral_jr@yahoo.com.br

5 - Graduando do Curso de Agronomia da Universidade Católica do Tocantins – FACTO, Palmas-TO, Brasil.

Artigo recebido em 18/10/2015 e aceito em 11/09/2016

RESUMO

modificações no clima das cidades, afetando o desenvolvimento do meio e a qualidade de vida da população. A temperatura da superfície é um importante parâmetro biofísico relacionado, dentre outros fatores, com o tipo de cobertura do solo e que influencia indiretamente a temperatura do ar. Palmas, capital do Tocantins, teve sua implantação no ano de 1989, passando por processos acelerados de crescimento populacional e expansão do seu Plano Diretor, sendo necessário o monitoramento das condições climáticas da região. Esse estudo propõe a obtenção e análise da temperatura de superfície em Palmas, a partir de imagens de satélites do TM Landsat 5 para os anos de 1991, 2003 e 2010 e da utilização do algoritmo *Surface Energy Balance Algorithm for Land* - SEBAL visando identificar a variação multitemporal da temperatura da superfície, as mudanças ocorridas na cobertura da superfície e a ocorrência de Ilhas de Calor. Os resultados obtidos permitiram verificar que, no decorrer dos anos de estudo, houve uma intensificação na temperatura da superfície da região e que há a ocorrência de ilhas de calor com amplitude térmica de 11°C.

Palavras-chave: Clima Urbano; Temperatura da Superfície; Ilhas de Calor; Sensoriamento Remoto.

MULTITEMPORAL ANALYSIS OF SURFACE TEMPERATURE THROUGH IMAGES OF LANDSAT 5 TM, IN THE CITY OF PALMAS-TO

ABSTRACT

The evolutionary changes in land use and occupation, arising from the process of urbanization, result in changes in the climate of the cities, affecting the development of the environment and the quality of life of the population. The temperature of the surface is an important biophysical parameter related, among other factors, with the type of soil cover and that indirectly influence the temperature of the air. Palmas, the capital of Tocantins, had its deployment in the year 1989, passing by rapid processes of population growth and expansion of their Plan Master, which required the monitoring of the climate conditions of the region. This study proposes the retrieval and analysis of surface temperature in Palmas, from satellite images of TM Landsat 5 for the years 1991, 2003 and 2010, and the use of the algorithm *Surface Energy Balance Algorithm for Land* - SEBAL aiming to identify the multitemporal variation of surface temperature, changes in coverage of the surface and the occurrence of heat island. The results obtained allowed us to verify that, over the course of the years of study, there was an increase in surface temperature of the region and that there is the occurrence of islands of heat with temperature range of 11 °C.

Keywords: Urban Climate; Surface Temperature, Heat Island; Remote Sensing.

INTRODUÇÃO

O clima constitui-se numas das dimensões do ambiente urbano e seu estudo tem oferecido importantes contribuições ao equacionamento da questão ambiental das cidades. As condições climáticas destas áreas, compreendidas como clima urbano, são provenientes da substituição e modificação da paisagem natural por um ambiente construído (MENDONÇA, 2003).

Dentre os variados efeitos perceptíveis pela população devido às alterações no clima em escala local podem ser citados: as manifestações ligadas ao conforto térmico e a qualidade do ar, os impactos provocados pelas chuvas e outras perturbações capazes de desorganizar o dia-a-dia das cidades e deteriorar a qualidade de vida de seus habitantes. Sendo, portanto, causas de relevante importância na formação de um ambiente propício para o desenvolvimento da população (MONTEIRO, 1976). Estima-se que até 2025, 60% da população humana viverá e trabalhará sob a influência do clima urbano (BARRY & CHORLEY, 2013).

Diversos trabalhos científicos que abordam o clima urbano tem verificado que o processo de urbanização desordenada juntamente com as alterações da cobertura da superfície do solo modifica o balanço de energia e contribui para o crescimento e intensificação do fenômeno das Ilhas de Calor (IC), caracterizadas pelo aumento da temperatura em regiões centrais em relação às áreas periféricas nas cidades de pequeno, médio e grande porte (MENDONÇA, 2003; ARAUJO, 2006; COLTRI, 2006; MACIEL, 2011).

Esses estudos destacam os benefícios das áreas verdes nos microclimas urbanos visto que, dentre as inúmeras vantagens, pode-se destacar a função de amenizarem a temperatura local. A vegetação armazena menos energia que os materiais de construção, como asfalto, concreto, dentre outros, além de utilizar parte desta energia na evapotranspiração, tendo assim, pouca energia para ser liberada no ambiente, daí o fato das temperaturas serem mais baixas nas áreas vegetadas (EPA, 2005).

O conhecimento da temperatura da superfície é extremamente útil na detecção e monitoramento do estresse hídrico de culturas, na detecção de queimadas, no monitoramento de secas e em estudos de mudanças climáticas. Esse parâmetro pode ser obtido através de imagens de satélite que, além de serem acessíveis nos institutos de pesquisa e suprirem a carência de dados provenientes de estações meteorológicas, possuem grande cobertura espacial (SILVA, 2004).

O sensoriamento remoto é uma notória e valiosa ferramenta utilizada nos estudos de clima urbano e ilhas de calor, pois além de oferecer visões de diferentes escalas, permite a transformação de dados do infravermelho termal em temperatura da superfície, fornecendo dados de manipulação e compreensão atingíveis. A temperatura obtida pelas imagens de satélite é a temperatura radiante da superfície que é um valor superior à temperatura do ar (WENG, 2003).

Palmas, a capital do Tocantins, é uma cidade planejada que teve a implantação do seu projeto urbanístico iniciada no ano de 1989, projeto esse que consistiu na substituição da vegetação nativa do bioma Cerrado por ruas e avenidas. Essa foi uma das primeiras ações dos administradores da época, ocorrendo o desmatamento de forma indiscriminada (PAZ, 2009). Nos últimos anos, os órgãos de censo demográfico identificaram um alto índice de crescimento populacional associado a um crescente processo de urbanização, ações que vem demandando evolutivas alterações no uso e ocupação do solo e a contínua remoção das áreas de cobertura vegetal nativa para implantação de construções.

Considerada a mais nova cidade do Brasil, a região é caracterizada por um contingente populacional proveniente de diversas partes do país devido à expectativa em encontrar oportunidades de negócios e emprego, já que diversos segmentos econômicos ainda podem ser explorados na região.

Dessa forma, a realização de estudos referentes aos possíveis efeitos que a mudança na cobertura da superfície pode ocasionar no microclima é imprescindível, pois esse conhecimento permite que se tenha informações a cerca das necessidades de implementação de medidas de controle no desenvolvimento desordenado e acelerado da cidade, bem como de incrementar o planejamento e gerenciamento da preservação dos recursos naturais da região.

Diante do pressuposto, o presente trabalho tem por objetivo principal estimar a temperatura da superfície para a cidade de Palmas-TO, nos anos de 1991, 2003 e 2010, através da utilização das imagens do *Thematic Mapper* abordo do satélite Landsat 5 e aplicação do algoritmo *Surface Energy Balance Algorithm for Land - SEBAL*, visando identificar a variação multitemporal da temperatura da superfície, as mudanças ocorridas na cobertura da superfície e a ocorrência de Ilhas de Calor.

REVISÃO DE LITERATURA

Clima Urbano

O clima é considerado um fator importante no estudo do ambiente urbano. A cidade constitui a forma mais evidente de transformação da paisagem natural, promovendo a modificação nos elementos do clima, que por sua vez afeta de maneira imediata os habitantes através do desconforto térmico e da concentração de poluentes, alterando a qualidade ambiental do espaço geográfico (AMORIM, 2005).

As modificações provocadas pelo processo de urbanização, principalmente nas propriedades da superfície terrestre, podem alterar o balanço energético, devido à utilização, na construção dos espaços urbanos, de materiais com maior capacidade de absorver calor (BRANDÃO, 1996), além de alterar a taxa de umidade e o sistema de circulação do vento (BEZERRA & BRANDÃO, 1997).

A rápida expansão das cidades, por meio do aumento demográfico e da concentração das atividades comercial, financeira, institucional e industrial, tem contribuído para uma valorização do espaço urbano e para o crescimento e adensamento das áreas edificadas (CASTRO, 2000).

Assim, o clima urbano é um sistema que abrange o clima de um dado espaço terrestre e sua urbanização, que é o resultado de ações antrópicas conjugadas com os aspectos geoambientais do sítio urbano. Sendo, portanto, um mesoclima que está incluído no macroclima e que sofre, na proximidade do solo, influências microclimáticas derivadas dos espaços urbano (LOMBARDO, 1985).

O estudo do clima urbano se baseia numa linha de pesquisa da climatologia responsável pela compreensão do clima da cidade, enfocando inicialmente uma análise espacial local (clima local) que se estende a níveis regionais (clima regional) e globais (clima zonal), destacando-se, em cada escala, a influência da urbanização, sendo, portanto, um sistema aberto, dinâmico e complexo (COLTRI, 2006).

Costa (2004) ressalta que a urbanização pode ser medida através de fatores como tamanho da população (urbana e rural), aumento do número de bairros de uma determinada cidade e cobertura vegetal por habitante. As alterações climáticas oriundas do processo de urbanização caracterizam o clima do ecossistema urbano.

Ilhas de Calor

O fenômeno Ilha de Calor (IC) pode ser definido como uma anomalia térmica onde a temperatura da superfície do ar urbano é mais elevada que nas áreas circunvizinhas. A IC pode

ocorrer em escalas distintas, tanto em escala local, dentro da própria cidade, quanto em escala regional, com diferenças de temperatura entre a área urbana e a área rural (WENG et al., 2004).

Ilhas de Calor podem ser identificadas medindo as temperaturas da superfície ou do ar. A temperaturas de superfície têm uma influência indireta, mas significativa com a temperatura do ar. Como por exemplo, parques e áreas de vegetação, que normalmente possuem temperaturas de superfície mais frias, contribuem para temperaturas mais frias do ar. Enquanto que, em zonas de intensa urbanização geralmente verificam-se as temperaturas do ar mais quentes (EPA, 2012).

A IC resulta do processo de crescimento urbano, a partir da alteração da superfície e da atmosfera local por conta da modificação da cobertura do solo, que ocorre com: a construção de casas e edifícios, a impermeabilização da superfície com asfalto e concreto, a remoção da cobertura vegetal e o desenvolvimento das atividades humanas, que favorecem a absorção do fluxo radiante solar (CAMARGO et al., 2007).

Temperatura de Superfície

A forma substancial de aquecimento da superfície ocorre pela absorção da energia do Sol. As trocas de calor entre a atmosfera e a superfície podem acontecer tanto por condução quanto por radiação. A condução é restrita ao ar diretamente em contato com o solo, enquanto a emissão de calor através da radiação acontece constantemente por meio de ondas longas. A troca de calor também ocorre pela condensação da água, pela transpiração das plantas e pela evapotranspiração, sendo esta última, altamente sensível às mudanças de temperatura da superfície (SILVA, 2006).

Segundo Vianello & Alves (1991), nem toda a energia solar interceptada pelo nosso Planeta é absorvida, sendo grande parte refletida de volta para o espaço. Essa fração refletida, que é cerca de 31% da radiação solar incidente, caracteriza o Albedo Planetário. O sistema Terra-atmosfera, portanto, absorve cerca de 69% da energia solar interceptada. O sistema, por sua vez, reirradia esta mesma quantidade de energia para o espaço, na forma de radiação de ondas longas, garantindo assim o equilíbrio térmico do Planeta.

A temperatura da superfície (TS) é um parâmetro biofísico que atua como um importante fator na estimativa do balanço de energia da superfície, e é também altamente susceptível ao padrão de ocupação da terra (HASHIMOTO *et al.*, 2003).

Sensoriamento Remoto

O sensoriamento remoto é uma ciência que visa à obtenção de imagens da superfície terrestre por meio da detecção e medição quantitativa das respostas das interações da radiação

eletromagnética com os materiais terrestres, sendo uma tecnologia de coleta automática de dados que permite o mapeamento e monitoramento dos recursos terrestres em escala global (MENESES & ALMEIDA, 2012).

Um elemento da superfície terrestre recebe radiação eletromagnética proveniente do Sol e, dependendo de suas propriedades, parte dessa energia será refletida e parte absorvida. As atividades do sensoriamento remoto envolvem a detecção, aquisição e análise da energia eletromagnética emitida ou refletida pelos objetos terrestres e registradas por sensores remotos (FIGUEIREDO, 1995).

Dentre os vários satélites de sensoriamento remoto dos recursos terrestres, destacam-se os americanos da série Landsat. A órbita dos satélites Landsat é circular, quase polar e síncrona com o Sol. O Brasil recebe imagens Landsat desde 1973 através de uma antena da estação de recepção do Inpe (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), localizada em Cuiabá-MT, local estratégico por encontrar-se no Centro Geodésico da América do Sul (FLORENZANO, 2007).

O Landsat 5 foi lançado em 1984 e ainda está em operação, superando em muitos anos a sua vida útil prevista, possui como sistema sensor o *Thematic Mapper* (TM), que registra dados em sete bandas espectrais (três no visível, um no infravermelho próximo, dois no infravermelho médio e um no infravermelho termal) com uma resolução espacial de 30 metros (exceto para o canal termal, que é de 120 metros). Esse satélite passa sobre a mesma área da superfície terrestre a cada 16 dias e cada imagem obtida cobre uma área de 185 por 185 km (FLORENZANO, 2007).

Os satélites com sensor infravermelho termal mensuram a radiação do topo da atmosfera, e esses dados podem ser convertidos em temperatura aparente da superfície. Essa temperatura é estimada de acordo com a Lei de Planck que estabelece que quanto maior a temperatura de um dado comprimento de onda, maior a quantidade de energia emitida por um corpo negro (BAPTISTA, 2003; DASH *et al.*, 2002; WENG e YANG, 2004; PRATA *et al.*, 1995; BIAS *et al.*, 2003).

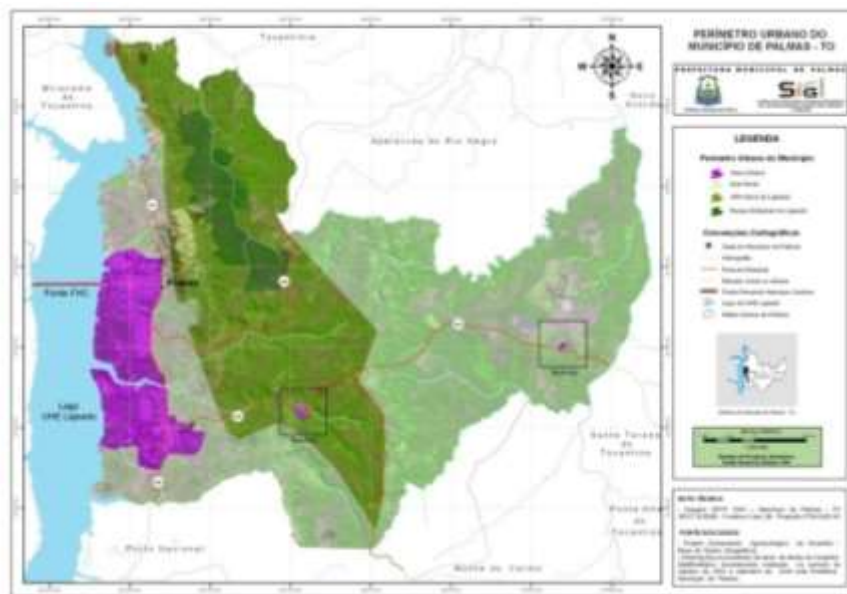
METODOLOGIA

Área de Estudo

O município de Palmas, capital do Estado do Tocantins, na região Norte do Brasil, localiza-se na Mesorregião Oriental do Estado, entre a Serra do Carmo e Lajeado e o Lago da Usina Hidrelétrica Luís Eduardo Magalhães, possuindo 2.218,937 km² de extensão territorial e

altitude média de 260 metros. A cidade está situada na latitude 10° 12' 46" Sul e na longitude 48° 21' 37" Oeste. É o maior município do Estado em termos populacionais, com 228.332 habitantes, sendo 221.742 residentes na área urbana e 6.590 na área rural, e tem a densidade demográfica de 102,90 hab/km² (IBGE, 2010; SEPLAN, 2012).

No que diz respeito ao processo implantação da cidade de Palmas-TO, inicialmente, no ano de 1991, a ocupação ocorreu de maneira desordenada, ocasionando problemas de infraestrutura e no meio ambiente (PAZ, 2009). Em 1991, o município contava com uma população de 24.334 habitantes, enquanto em 2000 já haviam 137.355 e em 2010 contava com 228.332 habitantes, sofrendo um acelerado processo de crescimento e, conseqüentemente, urbanização (IBGE, 2010).



Fonte: SEPLAN, 2012.

O clima de Palmas – TO, de acordo com o Laboratório de Meteorologia da Universidade Federal do Tocantins– LABMET, na classificação de THORNTHWAITE é C2wA'a' Subúmido, com duas estações bem definidas (uma chuvosa e a outra seca), apresentando durante a estação seca (inverno) moderada deficiência hídrica, megatérmico com evapotranspiração potencial anual de 1688,2 mm. (dos quais 61,03% se concentra no verão). As temperaturas oscilam entre mínimo de 15,4°C (julho) e máximo de 35,2°C (setembro).

O regime pluviométrico apresenta características tipicamente tropicais, com precipitação acumulada de 1519,4 mm, com mais de 91% desse volume concentrado entre os meses de outubro e abril (estação chuvosa). Por outro lado o período entre os meses de abril e setembro (estação seca), se caracteriza pelos baixos índices pluviométricos, quando se observa

por vezes ausência total de chuvas em pelo menos trinta dias consecutivos, esse período também é caracterizado pela elevada ocorrência de queimadas.

Imagens de Satélite

Neste estudo foram utilizadas três imagens do *Thematic Mapper* do satélite Landsat 5, referentes aos anos de 1991, 2003 e 2010, obtidas gratuitamente no site do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE (Fonte: <http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>) e compostas por sete bandas espectrais, conforme descrito na Tabela 1.

O período correspondente à passagem do satélite para a captação das imagens que foram utilizadas no estudo encontra-se especificado na Tabela 2, tendo como critério de seleção das imagens a ausência de nebulosidade, que contribui para o aumento da radiação difusa alterando o índice de reflectância.

Tabela 1 - Características das bandas espectrais do satélite Landsat 5.

Descrição dos canais	Comprimento de onda (µm)	Resolução Espacial (m)
Banda 1 – azul	0,45 – 0,52	30
Banda 2 – verde	0,53 – 0,61	30
Banda 3 – vermelho	0,62 – 0,69	30
Banda 4 - infravermelho próximo	0,78 – 0,90	30
Banda 5 - infravermelho médio	1,57 – 1,78	30
Banda 6 - infravermelho termal	10,4 – 12,5	120
Banda 7 – infravermelho médio	2,10 – 2,35	30

Fonte: INPE, 2012

Tabela 2 - Especificação do período das imagens utilizadas.

Ponto	Órbita	Data	Tempo Central (GMT)	Hora Local
67	222	10/09/1991	12:43:09	09:43:09
67	222	11/09/2003	12:56:44	09:56:44
67	222	14/09/2010	13:09:30	10:09:30

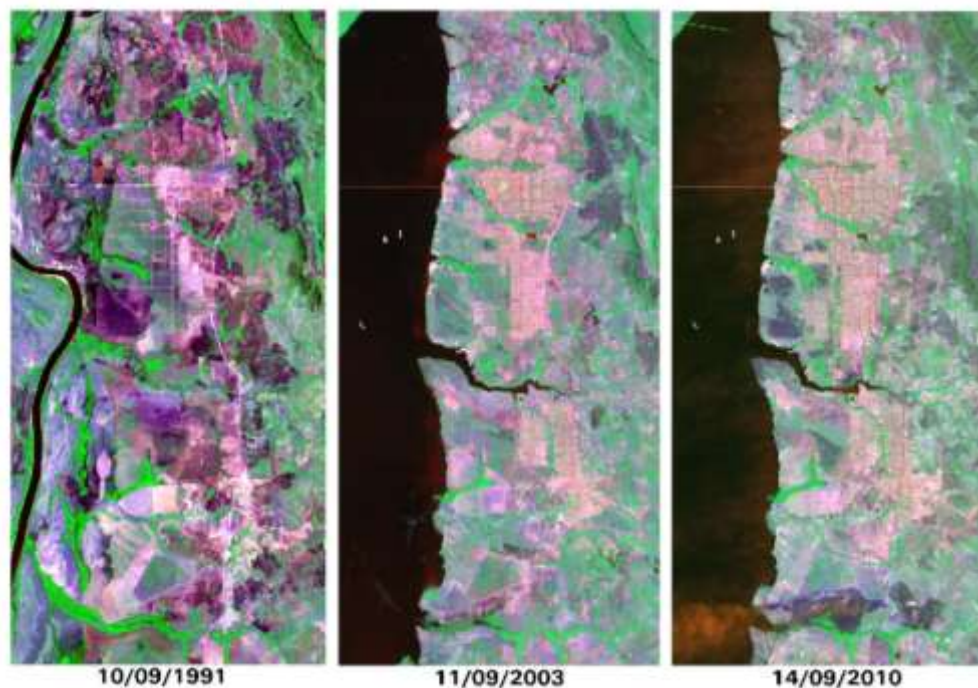
Fonte: INPE, 2012

Foram utilizadas as sete bandas espectrais de cada uma das três imagens, que passaram pelo processo de empilhamento e posteriormente pelo recorte através do software ERDAS Imagine 9.2, resultando em um retângulo com as seguintes coordenadas: canto superior esquerdo (longitude 48° 24' 56'' Oeste e latitude 10° 04' 59'' Sul), canto inferior direito (longitude 48° 14' 58'' Oeste e latitude 10° 25' 01'' Sul) referente à cidade de Palmas-TO, área de interesse do estudo, assim como demonstra a Figura 2.

As imagens selecionadas foram processadas por meio do programa *ERDAS Imagine* 9.2, e para transformação dos níveis de cinza das bandas termais em temperatura aparente da superfície, bem como aplicação dos índices escolhidos, empregou-se o Algoritmo *Surface Energy Balance Algorithm for Land* – SEBAL desenvolvido por Win Bastiaanssen (1995). A utilização do algoritmo ocorreu por meio da ferramenta *Model Maker* do programa *ERDAS Imagine* 8.5.

Assim para a determinação da temperatura aparente da superfície na área de estudo

Figura 2 - Recortes da área de estudo das imagens do satélite TM Landsat 5, composição colorida (5R4G3B).



empregou-se a mesma metodologia proposta por Silva *et al.* (2005) e Bastiaanssen *et al.* (1998a; 1998b), conforme as etapas:

Etapa 1 - Calibração Radiométrica

Consiste no cômputo da radiação espectral em cada banda (L_{λ_i}), em que o número digital (ND) de cada pixel da imagem foi convertido em radiância espectral monocromática. A equação utilizada é a proposta por Markham e Baker (1987):

$$L_{\gamma_i} = a_i + \frac{b_i - a_i}{255} ND$$

Em que a e b correspondem as radiâncias espectrais mínima e máxima ($Wm^{-2} \mu m^{-1}$), ND é a intensidade do pixel (número inteiro compreendido entre 0 e 255) e i corresponde as bandas (1, 2, 3, 4, 5, 6, e 7) do satélite Landsat 5. Os coeficientes de calibração utilizados estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Descrição das bandas do Mapeador Temático (TM) do satélite Landsat 5 com os coeficientes de calibração (radiância mínima – a e máxima – b) e irradiâncias espectrais no topo da atmosfera (TOA).

Bandas	Coeficiente de Calibração ($W.m^{-2}.sr^{-1}.\mu m^{-1}$)		Irradiância Espectral no Topo da Atmosfera ($W.m^{-2}.\mu m^{-1}$)
	a	b	
Banda 1 (azul)	-1.500	152.100	1957
Banda 2 (verde)	-2.800	296.800	1829
Banda 3 (vermelho)	-1.200	204.300	1557
Banda 4 (IV- próximo)	-1.500	206.200	1047
Banda 5 (IV – médio)	-0.370	27.190	219,3
Banda 6 (IV – termal)	1.238	15.600	-
Banda 7 (IV – médio)	-0,150	14.380	74,52

Fonte: SILVA, 2005.

Etapa 2 - Reflectância

É definida como a razão entre o fluxo de radiação refletida e o fluxo de radiação incidente (Allen *et al.*, 2002), foi obtida por:

$$\rho_{\gamma i} = \frac{\pi \cdot L_{\gamma i}}{K_{\gamma i} \cdot \cos z \cdot d_r}$$

Onde: $L_{\lambda i}$ corresponde à radiância espectral de cada banda, $K_{\lambda i}$ é a irradiância solar espectral de cada banda no topo da atmosfera ($Wm^{-2} \mu m^{-1}$, ver Tabela 3), Z é o ângulo zenital solar e d_r é o quadrado da razão entre a distância média Terra-Sol e a distância Terra-Sol em dado dia do ano para cada imagem analisada.

Etapa 3 - Albedo planetário

O albedo não corrigido foi obtido através da combinação linear das reflectâncias monocromáticas, dado pela seguinte equação:

$$\alpha_{toa} = 0,293_{\rho 1} + 0,274_{\rho 2} + 0,233_{\rho 3} + 0,157_{\rho 4} + 0,033_{\rho 5} + 0,011_{\rho 7}$$

Etapa 4 - Transmissividade Atmosférica

Segundo Allen *et al.* (2002) em condições de céu claro a transmissividade pode ser obtida por:

$$\tau_{sw} = 0,75 + 2 \cdot 10^{-5} \cdot z$$

Onde Z corresponde à altitude de cada pixel (m).

Etapa 5 - Albedo da superfície (α)

O albedo à superfície corresponde ao albedo corrigido dos efeitos atmosféricos:

$$\alpha = \frac{\alpha_{toa} - \alpha_p}{\tau_{sw}^2}$$

Onde α_p é a radiação solar refletida pela atmosfera, variando entre 0,025 e 0,04, mas segundo Bastiaanssen (2000) o valor mais recomendado para o SEBAL é o de 0,03. A τ_{sw} é a transmissividade atmosférica, obtida para condições de céu claro em função da altitude de cada pixel (Allen *et al.*, 2002).

Etapa 6 - NDVI

O Índice de Vegetação da Diferença Normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index* - NDVI) foi obtido através da razão entre a diferença das refletividades do infravermelho próximo (ρ_{IV}) e do vermelho (ρ_V), e a soma das mesmas:

$$NDVI = \frac{\rho_{IV} - \rho_V}{\rho_{IV} + \rho_V}$$

Onde ρ_{IV} e ρ_V correspondem, respectivamente, às bandas 4 e 3 do Landsat 5 – TM. O NDVI atua como um indicador sensível da quantidade e da condição da vegetação verde. Seus valores variam de -1 a +1. Para superfícies com alguma vegetação o NDVI varia de 0 e 1; já para a água e nuvens o NDVI geralmente é menor que zero.

Etapa 7 - SAVI

É o Índice de Vegetação Ajustado por Solo (Soil Adjusted Vegetation Index – SAVI) introduzindo um fator no NDVI para incorporar o efeito da presença do solo, mantendo-se o valor do NDVI dentro de -1 a +1, segundo Heute (1988). Esse índice foi calculado pela equação:

$$SAVI = \frac{(1 + L)(\rho_{IV} - \rho_V)}{L + \rho_{IV} + \rho_V}$$

Onde ρ_{IV} corresponde à banda do infravermelho próximo e ρ_V corresponde à banda do vermelho e L é constante, que de acordo com Silva *et al.*, (2005) é 0,5.

Etapa 8 - IAF

O Índice de Área Foliar será definido pela razão entre a área foliar de toda a vegetação por unidade de área a ser utilizada por essa vegetação. Este índice é um indicador de biomassa de cada pixel da imagem sendo calculado pela equação empírica proposta por Allen *et al.* (2002):

$$IAF = - \frac{\ln\left(\frac{0,69 - SAVI}{0,59}\right)}{0,91}$$

Etapa 9 - Emissividade

Para a obtenção da temperatura da superfície será utilizada a equação de Planck invertida, válida para um corpo negro. Como cada pixel não emite radiação eletromagnética como um corpo negro, será necessário introduzir a emissividade de cada pixel no domínio espectral da banda termal ε_{NB} , qual seja: 10,4 – 12,5 μm . Por sua vez, quando do cômputo da radiação de onda longa emitida por cada pixel, deverá ser considerada a emissividade no domínio da banda larga ε_0 (5 – 100 μm). Segundo Allen *et al.* (2002), as emissividades ε_{NB} e ε_0 podem ser obtidas, para $NDVI > 0$ e $IAF < 3$, através das seguintes equações:

$$\varepsilon_{NB} = 0,97 + 0,00331IAF$$

$$\varepsilon_0 = 0,95 + 0,01IAF$$

Para pixels com $IAF \geq 3$, $\varepsilon_{NB} = \varepsilon_0 = 0,98$. Para corpos de água ($NDVI < 0$), no caso do lago de Sobradinho e do leito do Rio São Francisco, Silva & Cândido (2004) utilizaram os valores de $\varepsilon_{NB} = 0,99$ e $\varepsilon_0 = 0,985$, conforme Allen *et al.* (2002).

Etapa 10 - Temperatura da Superfície

Para a obtenção da temperatura da superfície (T_s) foram utilizadas a radiância espectral da banda termal $L_{\lambda,6}$ e a emissividade ε_{NB} obtida na etapa anterior. Logo, a temperatura da superfície (K) foi calculada através da seguinte expressão:

$$T_s = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{\varepsilon_{NB} \cdot K_1}{L_{\lambda,6}} + 1\right)}$$

Etapa 11 – Identificação das Ilhas de Calor

A identificação ocorreu mediante a análise comparativa entre as temperaturas da superfície das áreas dentro do perímetro urbano, relacionando a área urbana e a área rural da cidade de Palmas-TO.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 5 representa a imagem termal da Temperatura de Superfície (TS) na área do Plano Diretor de Palmas – TO, para os dias 10, 11 e 14 de setembro, dos anos de 1991, 2003 e 2010, respectivamente. Os valores de TS foram divididos em seis escalas de cores limitados entre 25 e 40°C, a saber: azul escuro ($\leq 25^\circ\text{C}$), azul ciano (25-27°C), verde (28-30°C), amarelo (31-33°C), laranja (34-36°C), vermelho (37-39°C) e preto ($\geq 40^\circ\text{C}$).

Na cena de 1991 verifica-se a predominância das tonalidades laranja e amarela (Figura 5A), que representam 39,75% (264,85 km²) e 34,30% (228,52 km²) da área total de estudo, respectivamente. Já as áreas com tonalidade vermelha, representam pouco mais de 11,50% da área (\approx 76,60 km²) e se distribuíram de forma quase linear na direção norte-sul. Já as áreas com tonalidades verde representam pouco mais de 10% da área total de estudo (\approx 70 km²), e se apresentaram de forma quase marginal em torno das áreas vermelhas e no perímetro rural. Essa elevada concentração de TS acima de 37,0°C pode estar relacionada à grande concentração de áreas com solo exposto, pois nesse período ainda se dava o processo de implantação do Plano Diretor de Palmas, que consistiu na substituição de vegetação típica de Cerrado por ruas e avenidas.

Em 2003 predominaram áreas nas tonalidades amarela, que equivalente a 28,8% da área total de estudo (\approx 192,46 km²,) e laranja, com 19,6% (\approx 130,77 km²), seguido pelas áreas em tonalidade vermelha que representaram 4,98% da área total de estudo (\approx 33,21 km²). Já as áreas em tonalidade verde, representam 11,78% (\approx 78,50 km²). Nota-se que, as maiores temperaturas (laranja e vermelho) foram observadas mais a norte do Plano Diretor. Por outro lado, as de tonalidade verde se apresentam com mais frequência nas regiões periféricas do perímetro urbano, bem como no perímetro rural. A diminuição das áreas com temperaturas acima de 37°C, identificada nessa cena, pode ter sido ocasionada pela redução de áreas com solo exposto e implantação de áreas verdes, com praças e jardins, que enriqueceram a arborização da cidade.

No ano de 2010 prevaleceram áreas em tonalidade laranja, que correspondem 28,64% da área total de estudo (\approx 190,84 km²) e a amarela com 22,85% (\approx 152,27 km). As áreas em tonalidade vermelha correspondem a 8,71% da área total de estudo (\approx 58,00 km²). Já as áreas em tonalidade verde apresentaram um percentual de 5,03% (\approx 33,51 km²), e se concentraram mais a norte do Plano Diretor. Nesse ano as temperaturas laranja e vermelho se predominaram por todos os perímetros do Plano Diretor. Também se identificou que, as menores temperaturas (verde) foram menos frequentes e se concentraram a nordeste do Plano Diretor. As temperaturas mais intensas, observadas nesse ano, podem estar relacionadas a um período de estiagem mais longo, já que o mês de setembro, nessa região, caracteriza-se como um período de transição entre a estação chuvosa e a estação seca, acarretando no aumento da ocorrência de queimadas, temperaturas elevadas e baixa umidade de ar, pode observa-se também a ocorrência da expansão do Plano Diretor e a maior modificação na cobertura do solo no entorno do lago.

As áreas com menores temperaturas, no intervalo que varia entre 28 e 30°C, são observadas apenas nas regiões mais afastadas da parte Central do Plano Diretor de Palmas, o que pode ser ocasionado pelo fato dessas áreas apresentarem grande concentração de vegetação,

fator biótico que tem propriedades que interceptam a radiação solar, bloqueando totalmente os raios solares ou filtrando-os.

De acordo Robinette apud Mascaró (1996) verifica-se uma diferença de 3°C a 4°C na temperatura da superfície, entre uma área arborizada e uma área sem vegetação, totalmente exposta à radiação solar. Os corpos hídricos também funcionam como ilhas de frescor, levando em consideração que não refletem a energia recebida na faixa do infravermelho e apresenta baixa reflectância (no máximo 5% na faixa do azul) na região do visível. Além disso, os ventos que circulam nestas áreas hídricas resfriam e transmitem para as áreas circunvizinhas.

Verificou-se a ocorrência de IC sobre a cidade de Palmas-TO, com amplitude térmica das TS entre a área urbana e a área rural de aproximadamente 11,0°C, e dentro da própria área urbana, identificou-se diferença de 5,0°C entre alguns bairros. Valores próximos foram encontrados por; Coltrin et al. (2007), que ao analisar a TS de Piracicaba-SP encontrou uma diferença de 9,2°C entre a temperatura rural e a urbana, e Nascimento & Barros (2009) que verificaram uma diferença de aproximadamente 10°C no município de Goiânia-GO.

Segundo Teza & Baptista (2005) essas características da superfície, como: solo exposto, poucas vegetação, adensamento construtivo, telhado de cimento e asfalto, é o que favorece a formação nas IC das cidades, pois estas características tem alta refletância o que contribui para um aumento significativo da irradiação de calor para a atmosfera. Além de influenciar o balanço de energia da área, tendo como resposta o aumento da temperatura da superfície (Serrato et al., 2002).

O perfil da IC identificado em Palmas segue um padrão, onde conforme se distancia da área central da cidade, a temperatura diminui gradativamente e volta a aumentar à medida que se aproxima do centro. Essa condição observada se deve ao fato das áreas mais afastada da região central apresentarem maior quantidade de área verde, que por sua vez em seu processo de evapotranspiração, liberam vapor d'água em seus arredores, aumentando a umidade relativa e diminuindo a temperatura do ar. Por outro lado, nas áreas centrais, verifica-se grande quantidade de materiais de construção civil e pouca ou nenhuma área verde, o que aumenta a temperatura local, intensificando as ilhas de calor.

Figura 3 – Temperatura da superfície para o Plano Diretor de Palmas

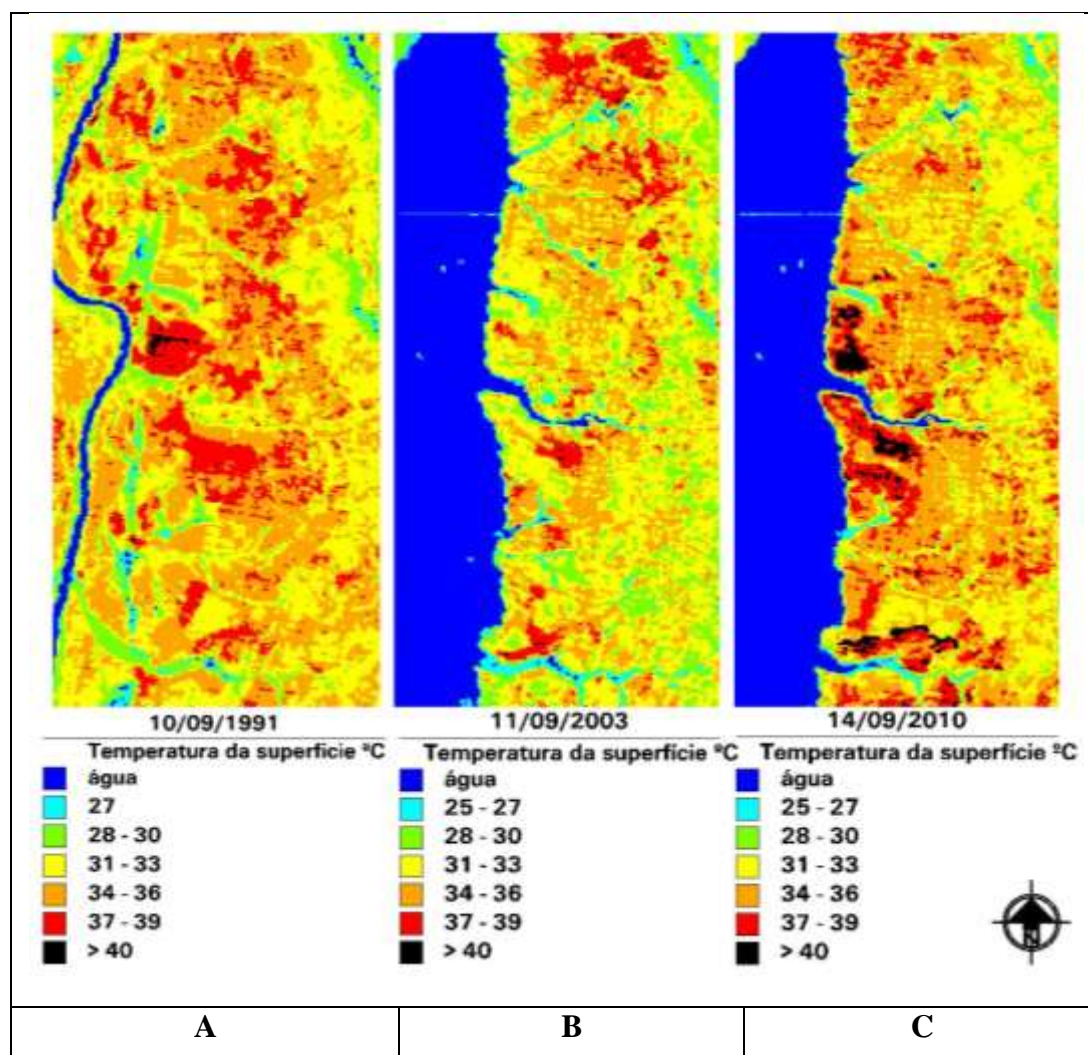


Tabela 4 – Tamanho (km²) e porcentagem da área de acordo com os intervalos da temperatura da superfície (TS)

TS (°C)	ÁREA					
	km ²	%	km ²	%	km ²	%
< 28	25,33	3,80	230,69	34,62	221,58	33,26
28 – 30	69,71	10,46	78,50	11,78	33,51	5,03
31 – 33	228,52	34,30	192,46	28,88	152,27	22,85
34 – 36	264,85	39,75	130,77	19,63	190,84	28,64
37 – 39	76,60	11,50	33,21	4,98	58,00	8,71
> 40	1,28	0,19	0,67	0,10	10,09	1,52

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da análise da imagem termal da temperatura de superfície para a cidade de Palmas-TO, pode-se concluir que:

1. O estudo é um indicativo de que, ao longo desses anos, ocorreu o aumento da temperatura da superfície na região, sendo 2010 o ano de temperaturas mais intensas, concentrando-se na faixa de 31-36°C e apresentando maior significância em valores acima de 40°C.

2. Identificou-se a ocorrência de ilhas de calor em todos os anos estudados, caracterizada pelo aumento da temperatura entre uma área central e periférica, e entre a zona urbana e a zona rural da cidade de Palmas-TO.

3. A tendência para a região é de que o crescimento populacional e a urbanização continuem evoluindo, o que pode influenciar na intensificação da temperatura de superfície devido as constantes alterações no uso e ocupação do solo, sendo necessária a realização de estudos climáticos que realizem o monitoramento das condições do meio e ofereça suporte à constituição de políticas públicas que permitam o planejamento e a implantação das medidas cabíveis.

Convém salientar que os resultados obtidos são passíveis de acurácia mediante a necessidade de validação com dados observados, entretanto considera-se que a utilização de outras metodologias pode suprir a carência existente de informações e dados observados.

BIBLIOGRAFIA

- ALLEN, R.G.; TASUMI, M.; TREZZA, R. SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land). Advance Training and Users Manual – Idaho Implementation, version 1.0, 2002. 97 p.
- AMORIM, M. C. C. T. Ilhas de calor em Birigui/SP. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 01, p. 121-130, 2005.
- ARAÚJO, T. L. Estimativa da temperatura e do saldo de radiação à superfície terrestre em Maceió-AL utilizando imagens TM/LANDSAT. 2006, 88 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Alagoas. Maceió.
- BAPTISTA, G. Ilhas urbanas de calor. *Revista Scientific American (Brasil)*, Rio de Janeiro, ano 1, n. 8, p. 54-59, 2003.
- BARRY, G. R.; CHORLEY, R.G. *Atmosfera, tempo e clima*. Porto Alegre: Bookman, 2013, 9 ed, 512p.
- BASTIAANSEN, W. G. M. Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain. 1995. 273 p. Tese (Ph.D.) - Wageningen Agricultural University, Wageningen, The Netherlands .

- BASTIAANSSEN, W.G.M. SEBAL - Based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. *Journal of Hydrology*, v. 229, p. 87-100, 2000.
- BASTIAANSSEN, W.G.M.; MENENTI, M.; FEDDES, R.A.; HOLTSLAG, A.A.M.A. Remote Sensing Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) 1. Formulation. *Journal of Hydrology*, v. 212-213, p. 198-212, 1998a.
- BASTIAANSSEN, W.G.M.; PELGRUM, H.; WANG, J.; MORENO, Y.M.J.; ROERINK, G.J.; VAN DER WAL, T. The Surface Energy Balance Algorithm for Land (SEBAL) 2. Validation. *Journal of Hydrology*, v. 212-213: p. 213-229, 1998b.
- BEZERRA, T. S.; BRANDÃO, A. M. P. M. Análise gerencial do espaço urbano sob a ótica climática: um estudo de caso aplicado ao bairro Maracanã. In: *Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada*. Anais. Curitiba: UFPR, 1997. v.1, p. 283-283.
- BIAS, E.S.; BAPTISTA, G. M. M.; LOMBARDO, M. A. Análise do fenômeno de Ilhas de Calor urbana por meio de combinação de dados Landsat e Ikonos. In: *XI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO*, Belo Horizonte, 2003. Anais do XI SBSR p. 1741-1748.
- BRANDÃO, A. M. P. M. O clima urbano da cidade do Rio de Janeiro. 1996, 362 p. Tese (Doutorado em Geografia Física) - Departamento de Geografia, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- CAMARGO, F. F. et al. Análise multitemporal da evolução urbana e sua influência na modificação do campo térmico na Região Metropolitana de São Paulo para os anos de 1985, 1993 e 200. *XIII SIMPOSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO*, Florianópolis, 21-26 abril 2007. Anais do XIII SBSR. p. 5127-5134.
- CASTRO, A. W. S. Clima urbano e saúde: as patologias do aparelho respiratório associadas aos tipos de tempo no inverno, em Rio Claro – SP. 2000, 202p. Tese (Doutorado em Geografia) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, Rio Claro.
- COLTRI, P. P. Influência do uso e cobertura do solo no clima de Piracicaba, São Paulo: análise se séries históricas, ilhas de calor e técnicas de sensoriamento remoto. 2006, 166f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz/USP, Piracicaba.
- COSTA, F. P. S. Evolução da cobertura vegetal de Piracicaba – São Paulo (1940-200). 2004, 82p. Dissertação (Mestrado em Ecologia de Agroecossistemas) Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz/USP, Piracicaba.
- DASH, P.; GOTTSCHKE, F. M.; OLESEN, F. S.; 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. 2563-2594, 2002.
- EPA - ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Disponível em: <<http://www.epa.gov/heatland>> Acesso em: 23 de Abril 2012.
- FIGUEIREDO, D. Conceitos básicos de sensoriamento remoto. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/conabweb/download/SIGABRASIL/manuais/conceitos_sm.pdf> Acesso em: Dezembro, 2012.
- FLORENZANO, T. G. Iniciação em sensoriamento remoto. São Paulo: Oficina de Textos, 2007, 2º ed, 90 p.
- HASHIMOTO, H; NEMANI, R.; YANG, F; GRANGER, R.; RUNING, S. Estimation from land surface temperature (MOD11) for global map of evapotranspiration and NPP. *American Geophysical Union, Fall Meeting*, 2003.
- HUETE, A.R. Adjusting vegetation indices for soil influences. *International Agrophysics*, v.4, n.4, p.367-376, 1988.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <<http://ibge.gov.br/cidadesat/topwindow.htm?1>> Acesso em: 28 de abril de 2012.

- INMET. Instituto Nacional de Meteorologia – Normais Climatológicas do Brasil 1961-1990. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/normaisClimatologicas>>. Acesso em: 20 de Outubro de 2012.
- INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br>>. Acesso em 20 de Março de 2012.
- LOMBARDO, M. A. Ilhas de calor nas metrópoles: o exemplo de São Paulo. São Paulo: Hucitec. 1985, 224p.
- MACIEL, C. R. Análise da relação entre características do ambiente urbano e o comportamento de variáveis microclimáticas: estudo de caso em Cuiabá-MT. 2011, 127 p. Dissertação (Mestrado em Física Ambiental) - Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá.
- MARKHAM, B.L.; BARKER, L.L. Thematic mapper bandpass solar exoatmospherical irradiances. *International Journal of Remote Sensing*, v.8, n.3, p.517-523, 1987.
- MASCARÓ, L. *Ambiência Urbana*. Porto Alegre: Sagra - D. C. Luzzatto, 1996, 199p.
- MENDONÇA, F. A. O clima e o planejamento urbano de cidades de porte médio e pequeno: Proposição metodológica para estudo e sua aplicação à cidade de Londrina/PR. In: MONTEIRO, C. A. F. e MENDONÇA, F. et al.. *Clima Urbano*. São Paulo: Contexto, 2003. Cap 03, pp.93 – 120.
- MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto. Brasília: UnB/CNPq, 2012.
- MONTEIRO, F. A. Teoria e clima urbano. São Paulo: IGEO/USP, 1976. 186 p.
- NASCIMENTO, D. T. F.; BARROS, J. R. Identificação de ilhas de calor por meio do sensoriamento remoto: estudo de caso no município de Goiânia-GO/2011. *Boletim Goiano de Geografia*, v. 29, n. 1, p. 119 – 134, 2009.
- PAZ, L. H. F. A influência da vegetação sobre o clima urbano de Palmas-TO. 2009, 169 p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Departamento de Pós-Graduação de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, Brasília.
- PRATA, A. J.; CASELLES, V.; COLL, C; SOBRINO, J. OTTLE, C. Thermal remote sensing of land surface temperature from satellites: current status and future prospects. *Remote sensing reviews*, Londres, v. 12, n. 8, p. 175-224, 1995.
- REBELLO, E. R. G.; SALES, N. D.; Características agroclimáticas de Palmas (TO). In: XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia, Florianópolis, 2006. Anais do XIV CBMET.
- ROBINETTE, G. O. *Plants and their environmental functions*. Washington, DC: Department of the Interior, National Park Service, 1972. 141 p.
- SEPLAN. Secretaria do Planejamento e da Modernização da Gestão Pública. Disponível em: <<http://www.seplan.to.gov.br/seplan/br/download/14%20-%20Palmas.pdf>>. Acesso em: Setembro, 2012.
- 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: studio preliminar. *Papeles de Geografia*, v.35, p.17-25, 2002.
- SILVA, B. B., CÂNDIDO, M. V., Determinação da evapotranspiração em escala regional através do Sebal e imagens Landsat 5 – TM, *XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia*, Fortaleza, 2004.
- SILVA, B. B.; FERREIRA N. J. Balanço de radiação com dados AVHRR/NOAA – 14. Aplicações ambientais brasileiras dos satélites NOAA e Tiros-N. São Paulo: Oficina de textos, 2004, Cap. ___ p. 143-164.
- SILVA, B.B.; LOPES, G.M.; AZEVEDO, P.V. de. Balanço de radiação em áreas irrigadas utilizando imagens Landsat 5 – TM. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 20, n. 2, p. 243-252, 2005.

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. XII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, Goiânia, 2005. Anais... Goiânia; INPE, 2005. p.3911-3918.

VAREJÃO-SILVA, M. A. Meteorologia e Climatologia. Versão Digital 2, Recife, 2006. Disponível em: <http://www.agritempo.gov.br/publish/publicacoes/livros/METEOROLOGIA_E_CLIMATOLOGIA_VD2_Mar_2006.pdf>.

VIANELLO, R. L.; ALVES, A. R. Meteorologia básica e aplicações. Viçosa: UFV, 1991. 449 p.

WENG, Q. Fractal analysis of satellite-detected urban heat island effect. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Bethesda, v. 69, n. 5, p. 555-566, May. 2003.

WENG, Q.; DENGSHENG, L.; SCHUBRING, J. Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban heat island studies. *Remote Sensing of Environment*, 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.