



**Mudança Espaço Temporal do Uso e Cobertura do Solo e  
Estimativa da Temperatura da Superfície no Município de Teresina – Piauí, Brasil**  
Spatial Temporal Change of Land Use and Cover and Estimation of  
Soil Surface Temperature in the Municipality of Teresina – Piauí, Brazil

Antônio Celso de Sousa Leite<sup>1</sup>; Leidjane Maria Maciel de Oliveira<sup>1</sup>;  
Bernardo Barbosa da Silva<sup>2</sup>; Suzana Maria Gico Lima Montenegro<sup>1</sup> & Ulisses Alencar Bezerra<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal Pernambuco (UFPE). Centro de Tecnologia e Geociências (CTG). Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação. Av. Acadêmico Hélio Ramos, S/N Cidade Universitária 50.740-530 Recife-PE, Brasil

<sup>2</sup>Universidade Federal de Campina Grande-UFPG, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais,  
Rua Aprígio Veloso, n.882 - 58429-900 Campina Grande, Paraíba, Brasil

E-mails: antonio.celso@ifpi.edu.br; leidjaneoliveira@hotmail.com;  
bernardo.silva@ufcg.edu.br; suzanam@ufpe.br; ulisses.alencar17@gmail.com

Recebido em: 29/04/2019 Aprovado em: 10/05/2019

DOI: [http://dx.doi.org/10.11137/2019\\_3\\_42\\_51](http://dx.doi.org/10.11137/2019_3_42_51)

## Resumo

A expansão urbana promove a supressão vegetal bem como a alteração no balanço de energia, acarretando mudanças climáticas, como por exemplo, a elevação do campo térmico urbano. Nesse sentido, esta pesquisa teve por objetivo investigar, com base em imagens multiespectrais, as variações espaço-temporais da temperatura da superfície relacionadas ao crescimento da urbanização no município de Teresina – PI - Brasil. Para tanto, foram empregados o Índice de Construção da Diferença Normalizada (NDBI) e o parâmetro biofísico temperatura da superfície (Tsup), gerados com imagens dos sensores TM - Landsat 5 e OLI/TIRS - Landsat 8. Verificou-se, com base nas cartas temáticas do NDBI e Tsup, que de 1995 a 2015, se observou substancial elevação da temperatura superficial concomitante ao incremento de superfícies construídas e impermeáveis, principalmente nos extremos da zona urbana municipal. Além disso, a média dos indicadores empregados, obtidas por zona do município, evidenciou as alterações na temperatura e na urbanização no período analisado. O coeficiente de correlação linear entre as variáveis Tsup e NDBI apresentou forte correlação positiva entre a expansão urbana e o crescimento do campo térmico da superfície. Assim, Tsup e NDBI se mostraram indicadores consistentes das alterações da superfície terrestre no perímetro urbano de Teresina - PI - Brasil.

**Palavras-chave:** Campo térmico superficial; NDBI; Superfícies Construídas; Landsat

## Abstract

The urban expansion promotes the suppression of vegetation as well as the alteration in the energy balance, leading to climatic changes, such as the elevation of the urban thermal field. In this sense, this research aimed to investigate, based on multispectral images, the spatial-temporal variations of soil surface temperature related to the urban growth of the Teresina – PI - Brazil city. For this, the Standard Difference Construction Index (NDBI) and the biophysical surface temperature parameter (Tsup), generated with images of the TM - Landsat 5 and OLI / TIRS - Landsat 8 sensors, were used. thematic letters of the NDBI and Tsup, that from 1995 to 2015. Relevant elevation of the soil surface temperature was observed concomitant to the increase of constructed and impermeable surfaces, mainly in the edges of the municipal urban zone. In addition, the average of the employed indicators, obtained by zone of the municipality, evidenced the changes in soil temperature and urbanization in the analyzed period. The linear correlation coefficient between the Tsup and NDBI variables showed a strong positive correlation between the urban expansion and the surface thermal field growth. Thus, Tsup and NDBI proved to be consistent indicators of land surface changes in the urban perimeter of Teresina - PI - Brazil.

**Keywords:** Surface thermal field; NDBI; Constructed Surfaces; Landsat

## 1 Introdução

As modificações causadas por meio de atividades antrópicas no ambiente físico-natural ocasionam alterações térmicas do clima urbano, resultado da urbanização e da industrialização, indicando que toda cidade que experimenta uma rápida expansão e crescimento populacional, pode registrar mudanças drásticas no ambiente térmico urbano (Xiong *et al.*, 2012).

Estoque *et al.* (2017) comentaram que a urbanização traz impactos positivos a população e negativos ao meio ambiente, que ao ser atingido pelos efeitos da urbanização sofre com vários problemas ambientais, tais como a diminuição da cobertura vegetal em regiões urbanas, a expansão de superfícies impermeáveis que impede a recarga do lençol freático, alterações térmicas e climáticas, quebra dos ciclos ecológicos, entre outros.

Os efeitos da urbanização tornaram-se uma preocupação comum em todo o mundo devido ao surgimento dos impactos das mudanças das propriedades térmicas da terra, a exemplo da manifestação e variações de ilha de calor urbana, que é o fenômeno que promove o aumento das temperaturas atmosféricas e superficiais das áreas urbanas em comparação com as suburbanas próximas (Voogt *et al.*, 2003; Ye *et al.*, 2010).

Sousa & Ferreira (2012) ressaltaram que a heterogeneidade da paisagem urbana apresenta distintos comportamentos termais, que são consequência das propriedades físicas dos materiais usados e da intensidade das mudanças da cobertura e uso da terra, refletindo dessa forma nas condições ambientais e na relação de balanço e troca de energia entre a superfície e a atmosfera. Nesse sentido, o Sensoriamento Remoto (SR) orbital se apresenta como uma importante ferramenta de investigação que possibilita a geração de informações que dão grande suporte na tomada de decisões no contexto dos estudos ambientais e urbanos.

Muitos métodos de SR têm sido desenvolvidos para identificar os efeitos das mudanças do uso e cobertura da terra através do cálculo de parâmetros biofísicos e índices urbanos. Entre os inúmeros parâmetros biofísicos empregando dados de SR, cita-se como exemplo a Temperatura da Superfície (Tsup), envolvida do balanço de energia, evapotranspiração

da vegetação e processos de desertificação, se constituindo em indicador fundamental de avaliação da degradação ambiental e mudanças climáticas (Oliveira *et al.*, 2012).

O Índice de Construção por Diferença Normalizada (NDBI) é um índice usado mundialmente para se identificar áreas construídas, utilizando as respostas de energia eletromagnética das bandas do infravermelho próximo (forte absorção em áreas de solo exposto) e infravermelho médio (forte reflexão nas áreas urbanas construídas), favorecendo o monitoramento do desenvolvimento urbano da cidade (Liu & Weng, 2012).

A utilização conjunta da Tsup e NDBI, possibilita a constatação e magnitude das mudanças no uso e cobertura da terra promovida por atividades antrópicas, como registrado nos estudos realizados por Xiong *et al.* (2012), que usaram a Tsup e o NDBI para quantificar a expansão de área construída e análise da temperatura superficial entre os anos de 1990 a 2009, na cidade de Guangzhou, na China. Concluíram com a pesquisa que a urbanização acelerada se expandiu rapidamente, aumentando em 51,1% a área urbana da cidade, alterando o padrão de uso e cobertura da terra, além da modificação do ambiente térmico urbano, sendo diagnosticada a formação e intensificação da ilha de calor urbana.

Assim, pode-se ressaltar que não obstante as diferenças entre as faixas espectrais entre as bandas termiais do TM – Landsat 5 e IRTS – Landsat 8, a Tsup obtida por esses importantes instrumentos tem sido amplamente empregada na investigação de ilhas de calor urbana, bem como nos balanços de radiação e energia com diferentes propósitos, dentre os quais na determinação da evapotranspiração real.

Pesquisas de temperatura da superfície utilizando imagens dos sensores TM-Landsat 5 e OLI/TIRS-Landsat 8 são aplicadas amplamente, como as análises de Ranagalage *et al.* (2017), que utilizaram imagens dos sensores TM-Landsat 5 e OLI/TIRS-Landsat 8 para examinar as variações espaço-temporais na ilha de calor da Região Metropolitana de Colombo, Sri Lanka. Para tanto, analisaram a relação da Tsup com outros índices, entre eles o NDBI. Concluíram que havia uma forte e positiva correlação entre tais variáveis, além de constatarem ter havido intensificação dos efeitos da ilha de calor, confirmando a grande influência do aceleração da urbanização na formação da

ilha de calor urbana. Assim, pode-se ressaltar que as características peculiares de sensores da família Landsat, tais como tecnologias termais, faixas espectrais e resoluções espaciais permitem comparações seguras da configuração terrestre com a utilização da técnica de sensoriamento remoto.

Segundo Fialho (2009), existem três diferentes ilhas de calor, denominadas de ilha de calor atmosférica, vertical e de superfície, nas quais as mesmas se distinguem pelo fato de serem empregados na análise do fenômeno os métodos de observação e estrutura espacial distintas, permitindo assim, analisar as ilhas de calor de diferentes formas, a exemplo da ilha de calor urbana, objeto de análise nesse estudo, em que essas estão em contato com a atmosfera urbana inferior, possibilitando na análise como ferramenta principal o uso de sensoriamento remoto por meio de imagens termais. Nesse contexto, Guha *et al.* (2018), em pesquisa realizada, ao aplicarem a Tsup e NDBI, analisaram a dependência da temperatura superficial com as áreas construídas para as cidades de Florença e Nápoles, usando dados do Landsat 8, nas quais foram identificadas ilhas de calor superficial distribuídas ao longo das cidades formadas pela urbanização.

O município de Teresina localiza-se na região de baixas latitudes, favorecendo o volume da forte incidência da radiação solar, principalmente

nos meses de julho a outubro, registrando intensa radiação solar e aumento do campo térmico superficial. Feitosa *et al.* (2011) mencionaram que além dessa característica natural, o aumento da temperatura superficial da cidade vem crescendo gradativamente, e que a cobertura vegetal, condição importante e favorável ao conforto térmico, vem sendo suprimida devido a expansão das superfícies construídas impermeáveis.

Nesse contexto, esse estudo objetivou examinar as variações espaciais e temporais da intensificação da urbanização e identificar o aumento do gradiente térmico urbano na cidade de Teresina entre os anos de 1995 e 2015, utilizando dados de Tsup e NDBI oriundos do sensoriamento remoto orbital.

## 2 Materiais e Métodos

### 2.1 Área do Estudo

A área de estudo compreende a zona urbana do município de Teresina (Figura 1), capital do estado do Piauí - Brasil, sendo 17% de sua área territorial correspondente a zona urbana (PMT, 2015).

### 2.2 Imagens e Software Utilizado

Neste trabalho foram adquiridas imagens dos satélites Landsat 5 e Landsat 8, disponibilizada

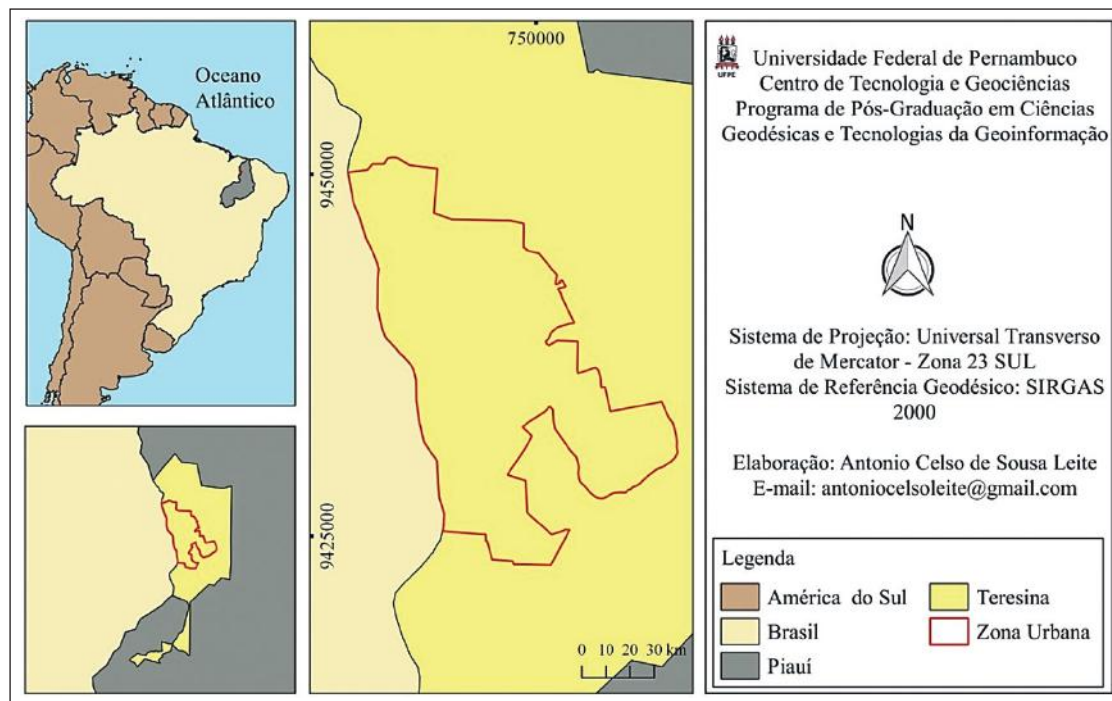


Figura 1  
Localização da área de estudo.

no site da USGS (<http://earthexplorer.usgs.gov/>), selecionando as cenas com nenhuma cobertura de nuvem e que correspondem ao mesmo período dos anos investigados.

Para as imagens do satélite Landsat 5, órbita/ponto 229/064, de 19/10/1995, e Landsat 8 órbita/ponto 229/064, de 25/10/2015, foram utilizadas as bandas do infravermelho próximo e médio de ambos os sensores, com resolução espacial de 30 metros. Também foi utilizada a imagem do infravermelho termal que corresponde a banda 6 (resolução espacial de 120 metros) para o sensor TM – Landsat 5 e a banda 10 (resolução espacial de 100 metros) para o sensor TIRS do satélite Landsat 8. Vale destacar que apesar da diferença de resolução espacial nessas bandas de acordo com os sensores, as mesmas são disponibilizadas reamostradas na resolução espacial de 30 metros (USGS, 2017).

Os procedimentos de preparo, processamento digital e elaboração das cartas temáticas, foram realizados com o software de código aberto QGIS versão 2.14.18, com o qual efetuou-se a reprojeção das imagens para o Sistema Geodésico de Referência SIRGAS 2000 (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas), o recorte espacial da área do estudo e demais etapas de processamento das imagens. A conversão do número digital (ND) de cada pixel e banda espectral em radiância espectral ( $W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$ ), determinação da reflectância de cada banda, e geração dos mapas temáticos da temperatura da superfície (Tsup) e do índice de construção (NDBI), foram todos obtidos com o referido software.

## 2.3 Etapas de Processamento das Imagens

### 2.3.1 Radiância

Ponzoni *et al.* (2012) comentaram que a conversão dos números digitais (ND) das imagens para valores de radiância e reflectância, são parâmetros físicos que permitem a caracterização espectral dos alvos na superfície terrestre. Assim, na imagem do TM - Landsat 5 a conversão para radiância (Equação 1) se adquire de acordo com a equação proposta por Markham & Baker (1987):

$$L_{\lambda i} = a_i + \frac{(b_i - a_i)}{255} \times ND \quad (1)$$

sendo:  $L_{\lambda i}$  o valor da radiância espectral das bandas utilizadas no estudo;  $i$  refere-se ao número da banda;  $ND$  é o número digital que varia de 0 a 255 correspondentes a banda utilizada;  $a$  e  $b$  são os coeficientes de calibração (radiâncias mínima e máxima) de cada banda em  $W m^{-2} \mu m^{-1}$ .

Na conversão do ND para valores de radiância nas imagens do sensor OLI/TIRS-Landsat-8 (Equação 2), utiliza-se os fatores de redimensionamento aditivo ( $Add_{rad,i}$ ) e multiplicativo ( $Mult_{rad,i}$ ) da radiância de cada banda, extraídos dos metadados da imagem (USGS, 2014; Silva *et al.*, 2016).

$$L_{\lambda i} = Add_{rad,i} + Mult_{rad,i} \times ND \quad (2)$$

sendo:  $L_{\lambda i}$  ( $W m^{-2} sr^{-1} \mu m^{-1}$ ) - radiância espectral detectada pelo sensor no seu nível orbital, qual seja, no topo da atmosfera (TOA);  $i$  refere-se ao número da banda;  $ND$  intensidade do pixel em número inteiro.

### 2.3.2 Reflectância

Após a obtenção da radiância, processou-se os valores da reflectância das bandas 4 e 5, sendo a reflectância definida como a razão entre o fluxo de radiação solar refletida pela superfície e o fluxo de radiação solar global incidente, na qual para o sensor TM-Landsat 5, o cálculo da reflectância ( $\rho_{\lambda i}$ ) é obtida de acordo com a equação de Allen *et al.* (2007):

$$\rho_{\lambda i} = \frac{(\pi \times L_{\lambda i})}{k_{\lambda i} \times \cos Z \times dr} \quad (3)$$

sendo:  $L_{\lambda i}$  é a radiância espectral de cada banda;  $\rho_{\lambda i}$  é a irradiância solar espectral de cada banda no topo da atmosfera ( $K_{\lambda i}$ );  $Z$  é o ângulo zenital solar, e  $dr$  é a correção da excentricidade da órbita terrestre (em unidade astronômica – UA), dada por Iqbal, (1983).

$$dr = 1 + 0,033 \cos\left(\frac{DSA \times 2\pi}{365}\right) \quad (4)$$

O ângulo zenital ( $Z$ ) foi obtido com a seguinte fórmula:

$$Z = 90 - E \quad (5)$$

sendo:  $E$  é o ângulo de elevação do Sol (*SUN ELEVATION*) encontrado no arquivo de metadados da imagem.



Para o cômputo da refletância nas imagens do OLI nas bandas 5 e 6, deve-se extrair os termos aditivo – Add e multiplicativo – Mult do grupo da refletância disponíveis nos metadados, conforme a seguinte equação (Silva *et al.*, 2016):

$$r_b = \left( \frac{Add_b + Mult_b \times ND}{\cos Z d_r} \right) \quad (6)$$

em que:  $ND$  é a intensidade de cada pixel,  $Z$  é o ângulo zenital do Sol,  $d_r$  é a correção da excentricidade da órbita terrestre,  $b$  é índice representado cada uma das bandas do OLI.

### 2.3.3 Temperatura da Superfície (Tsup)

A quantificação da  $T_{sup}$  envolve a correção dos efeitos atmosféricos e também da emissividade da superfície no domínio da banda termal. Nesse sentido, a determinação da  $T_{sup}$  foi obtida por meio da seguinte expressão (Allen *et al.*, 2007):

$$T_{sup} = \frac{K_2}{\ln[(\epsilon_{NB} K_1 / R_c) + 1]} \quad (7)$$

em que:  $K_1$  e  $K_2$  são as constantes de radiação específicas da banda termal do TM (banda 6), com  $K_1 = 607,8 \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$  e  $K_2 = 1261,0 \text{ K}$  e da banda termal do IRTS (banda 10, com  $K_1 = 774,9 \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$  e  $K_2 = 1321,1 \text{ K}$ );  $\epsilon_{NB}$  é a emissividade de cada pixel no domínio da banda termal, obtida em função do IAF - índice de área foliar, conforme proposto por Tasumi (2003); e  $R_c$  representa a radiância que atinge o TM ou IRTS, corrigidos os efeitos atmosféricos, que de acordo com Wukelic *et al.* (1989) pode ser determinada segundo expressão:

$$R_c = \left( \frac{L_{\lambda, tb} - R_p}{\tau_{NB}} \right) - (1 - \epsilon_{NB}) R_{sky} \quad (8)$$

em que  $L_{\lambda, tb}$  ( $\text{W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ ) representa a radiância da banda termal (banda 6) do TM, ou banda 10 do IRTS),  $R_p$  ( $\text{W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ ) é a radiância de trajetória (path radiance),  $\tau_{NB}$  é a transmissividade atmosférica no domínio da banda termal e  $R_{sky}$  ( $\text{W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ ) é a radiância da atmosfera na direção do sensor. A determinação de  $R_p$ ,  $\tau_{NB}$  e  $R_{sky}$  requer o uso de códigos de transferência radiativa; no entanto, para condições atmosféricas médias do estado americano de Idaho Allen *et al.* (2007) recomendam os seguintes

valores:  $R_p = 0,91 \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ ,  $\tau_{NB} = 0,886$  e  $R_{sky} = 1,32 \text{ W m}^{-2} \text{ sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ , que foram adotados na presente pesquisa. Conforme Allen *et al.* (2007) a correção atmosférica pode ser dispensada para valores de  $T_{sup}$  na faixa de 260 K a 285 K, que não é o caso da cidade estudada, e que os erros decorrentes da não correção atmosférica são da ordem de 3-4 K para  $T_{sup}$  em torno de 315 K (ou 35 °C).

### 2.3.5 Índice de Construção (NDBI)

O Índice de Construção por Diferença Normalizada (NDBI) foi desenvolvido por Zha *et al.* (2003), sendo calculado através da razão entre a diferença dos valores de refletância das bandas do Infravermelho médio ( $\rho_{MIR}$ ) e Infravermelho próximo ( $\rho_{NIR}$ ), pela soma das mesmas (Equação 10), correspondendo às bandas 5 e 4 do sensor TM Landsat-5, e as bandas 6 e 5 no sensor OLI Landsat-8, em que as imagens desses sensores são disponibilizados com 30 metros de resolução espacial, e fornecendo produtos de qualidade Landsat Collection 1 Nível-1, obtida pela USGS Earth Explorer (USGS, 2017).

$$NDBI = \frac{(\rho_{MIR} - \rho_{NIR})}{(\rho_{MIR} + \rho_{NIR})} \quad (9)$$

Li *et al.* (2017) comentaram que esse índice varia entre -1 e 1, no qual os valores positivos e mais próximos de 1 indicam superfícies construídas ou impermeáveis, enquanto que valores negativos e próximos a zero, mostram corpos d'água e vegetação.

## 3 Resultados e Discussão

Nas cartas temáticas da  $T_{sup}$  (Figura 2), em geral, os valores mais elevados de  $T_{sup}$  foram encontrados nas áreas mais urbanizadas da cidade nos anos de 1995 e 2015, e a variação da  $T_{sup}$  foi notória para os anos estudados, onde se percebe o aumento da temperatura superficial na imagem do ano de 2015 se comparada com a imagem de 1995.

Observando visualmente nas cartas o intervalo da  $T_{sup}$  no ano de 1995 (Figura 3A), a prevalência dos valores foram entre  $< 27^\circ\text{C}$  a  $38^\circ\text{C}$ , enquanto que em 2015 (Figura 3B), os valores oscilaram entre  $29^\circ\text{C}$  a  $> 41^\circ\text{C}$ , o que já registra-se uma variação ascendente entre 1995 a 2015. Também, notou-se que os altos valores da  $T_{sup}$  concentra-se no meio

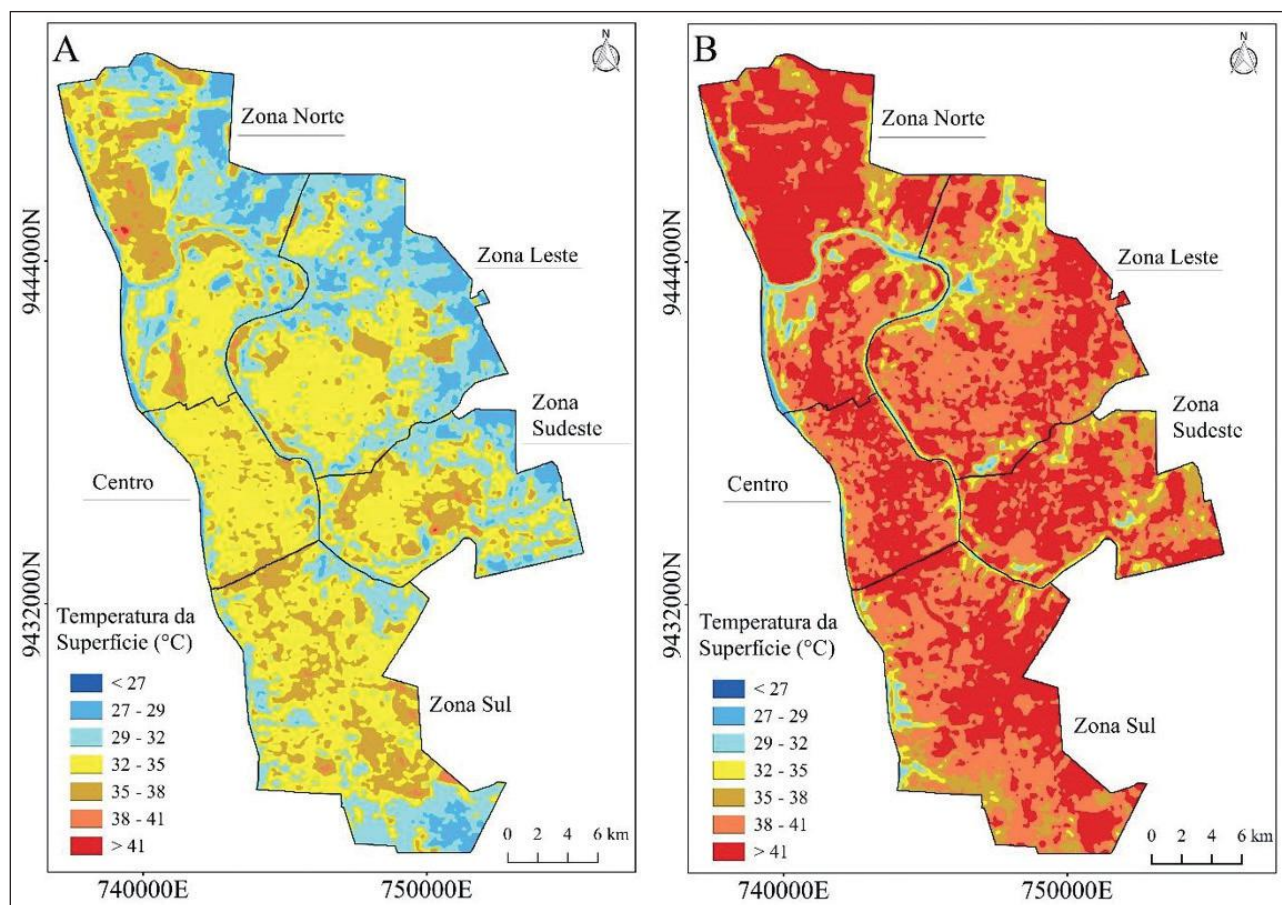


Figura 2 Cartas temáticas Tsup ano de 1995 (A) e Tsup ano de 2015 (B).

de cada zona, expandindo-se espacialmente para as extremidades dessas regiões, conforme é visto no ano de 2015, havendo uma distribuição considerável das medidas entre 38°C a > 41°C nos limites de todas as regiões mostradas no mapa, derivado do incremento de superfícies construídas e impermeáveis nessas áreas. Gusmão *et al.* (2013), em estudo realizado em uma Bacia Hidrográfica, diagnosticaram os maiores valores da Tsup na malha urbana dos municípios que se encontravam dentro dos limites da Bacia, por efeito das mudanças no uso e ocupação do solo, afetando o clima local urbano, fato esse que corroboram com os resultados da pesquisa.

Moreira & Galvêncio (2007), também comentaram que as áreas construídas com maior adensamento urbano (construções verticais e horizontais) associada à baixa presença arbórea, contribuem para o aumento da temperatura local.

Na Tabela 1 foram representados os dados das estatísticas descritivas para a Tsup das Zonas Norte, Leste, Centro, Sudeste e Sul nos anos de 1995 e 2015 (Figura 2), onde, comparando os valores das médias entre os anos, observou-se que em 2015 a média prevaleceu maior em todas as zonas, significando dizer que houve uma elevação do gradiente térmico superficial urbano para aquele ano, em virtude da intensificação do uso e ocupação do solo, interferindo localmente no clima.

Além disso, a partir dos valores mínimos e máximos obteve-se amplitude térmica de cada zona, logo após, foi realizado o somatório das amplitudes e calculado a média total para os anos analisados, registrou-se 12,82°C para o ano de 1995, e 23,45°C em 2015, comprovando o aumento da temperatura superficial na área, impulsionado pelo crescimento da ocupação urbana. Essas análises condizem com Coelho & Corrêa (2013), ao discorrerem que a elevada amplitude térmica está relacionada

Temperatura da Superfície (Tsup °C)				
Zona Norte				
Ano	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão
1995	23,98	39,29	30,43	2,56
2015	28,70	47,97	38,08	3,02
Zona Leste				
Ano	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão
1995	24,47	37,50	29,79	2,05
2015	29,54	44,97	37,14	1,85
Zona Centro				
Ano	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão
1995	24,47	36,57	31,49	1,39
2015	29,31	42,54	37,58	1,62
Zona Sudeste				
Ano	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão
1995	25,92	39,27	30,59	2,12
2015	30,77	46,73	37,56	1,94
Zona Sul				
Ano	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão
1995	24,47	38,36	31,04	2,02
2015	29,32	43,94	37,55	1,83

Tabela 1 Estatísticas descritiva dos valores de Tsup por zona.

diretamente a resposta da radiação dos materiais/ cobertura do solo e dos diversos usos e ocupação da superfície na expansão território.

Ao calcular o NDBI para zona urbana de Teresina nos anos de 1995 e 2015 (Figura 3), os valores do índice variaram entre menores que -0,35 até maiores que 0,50.

As áreas representadas em tons laranja e vermelho mostram a densidade das classes de valores positivos do NDBI (0,05 a  $\geq 0,50$ ) associadas a superfícies construídas, concentradas em todas as zonas da cidade. Entretanto, notou-se uma expansão gradativa dessa classe para as extremidades dessas zonas na imagem de 2015, caracterizando a intensificação da urbanização para outras áreas, confirmando com os estudos de Oliveira *et al.* (2015), ao utilizarem o NDBI na análise da evolução espaço-temporal do processo de impermeabilização no bairro de Santo Amaro, Recife-PE, obtiveram valores positivos do índice superiores a 0,30 indicando o aumento espacial das áreas impermeabilizadas e construídas em todo o bairro.

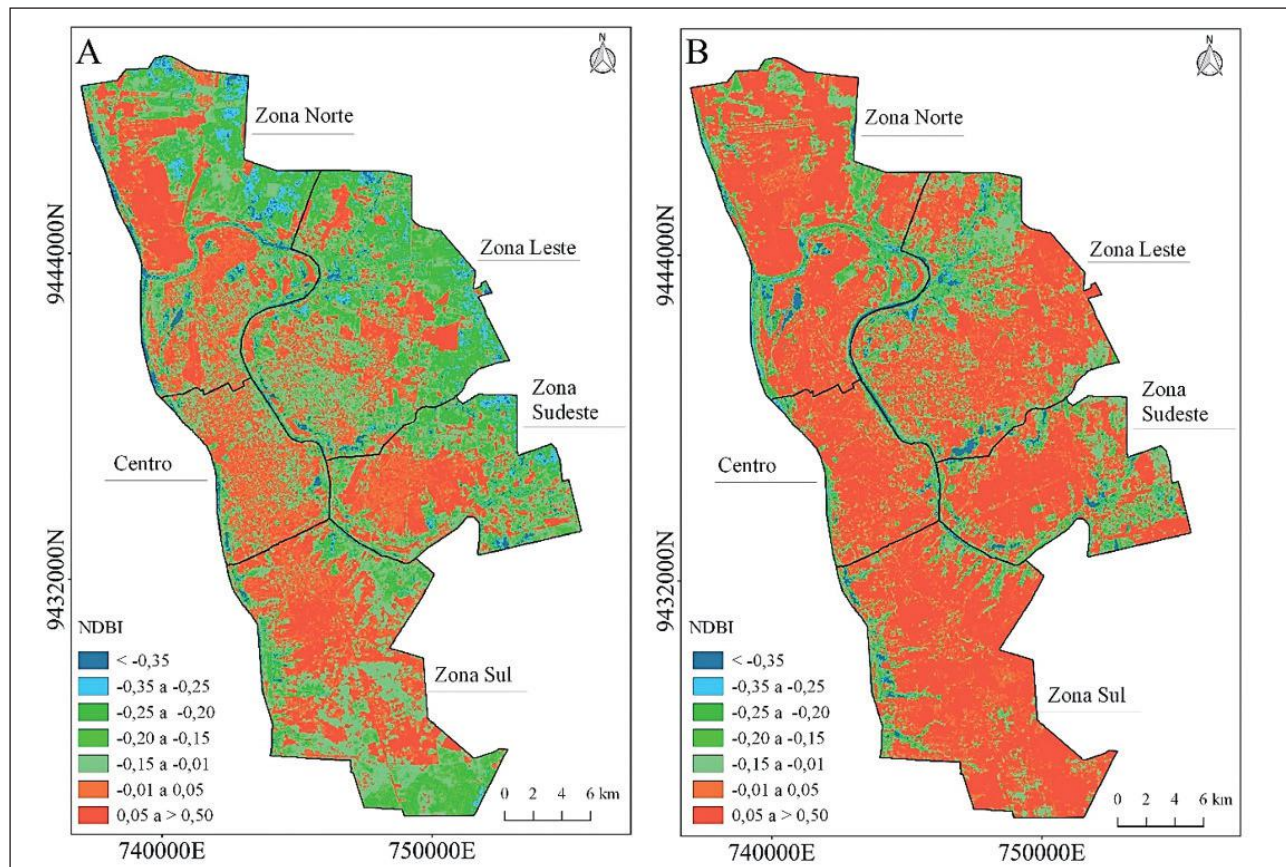


Figura 3 Cartas temáticas NDBI ano de 1995 (A) e NDBI ano de 2015 (B).



Além disso, Abreu (2016), verificou em seu estudo que o fenômeno da urbanização em Teresina está ocorrendo em direção às fronteiras, ocasionada pelo surgimento dos empreendimentos habitacionais, validando as análises realizada nessa pesquisa.

A Tabela 2 mostrou os dados estatísticos do cálculo do NDBI para as zonas urbanas da cidade, no qual, ao comparar os valores da média nos anos analisados, notou-se a superioridade desses valores para o ano de 2015 em todas as zonas investigadas individualmente, constatando a alteração do uso e ocupação do solo influenciada pelos efeitos da urbanização nessas áreas.

Na Figura 4 apresentaram-se os diagramas de dispersão entre NDBI e Tsup, revelando que as variáveis estão correlacionadas positivamente para os anos observados.

O coeficiente de correlação linear (r) entre as variáveis NDBI e Tsup foi de 0,84 e 0,72, para os anos de 1995 e 2015, respectivamente, caracterizando uma correlação forte de dependência espacial de causa e efeito entre o crescimento da urbanização e o aumento do gradiente térmico superficial. Esses resultados corroboram com pesquisas de Guha *et al.* (2018), ao interpretarem quantitativamente a relação da Tsup com NDBI, obtidos com imagens Landsat 8 das cidades de Florença e Nápoles, Itália. Com a pesquisa obtiveram respectivamente, valores de 0,71 e 0,61 entre as variáveis investigadas, revelando uma forte correlação positiva entre Tsup e NDBI.

Ranagalage *et al.* (2017), por sua vez, ao realizarem a análise espaço-temporal entre os anos de 1997, 2007 e 2017 usando imagens dos

Índice de Construção por Diferença Normalizada (NDBI)				
Zona Norte				
Ano	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão
1995	-0,67	0,26	-0,08	0,15
2015	-0,60	0,33	0,01	0,14
Zona Leste				
Ano	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão
1995	-0,54	0,27	-0,11	0,13
2015	-0,57	0,32	-0,01	0,13
Zona Centro				
Ano	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão
1995	-0,66	0,22	-0,02	0,10
2015	-0,74	0,46	0,03	0,12
Zona Sudeste				
Ano	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão
1995	-0,64	0,45	-0,07	0,14
2015	-0,60	0,33	0,005	0,13
Zona Sul				
Ano	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão
1995	-0,80	0,27	-0,03	0,11
2015	-0,77	0,45	0,05	0,11

Tabela 2 Estatísticas descritiva dos valores do NDBI por zona.

Satélites Landsat 5 e 8, verificaram a relação linear positiva entre os valores de NDBI e Tsup na Área Metropolitana de Colombo, Siri Lanka, principalmente durante o período de 2007 a 2017, quando a urbanização foi mais rápida, favorecendo no aumento considerável da correlação.

#### 4 Conclusões

O cômputo do NDBI e Tsup revelaram o crescimento da urbanização e o aumento da temperatura superficial em Teresina de acordo com a análise espaço temporal, evidenciando a intensificação da urbanização no ano de 2015

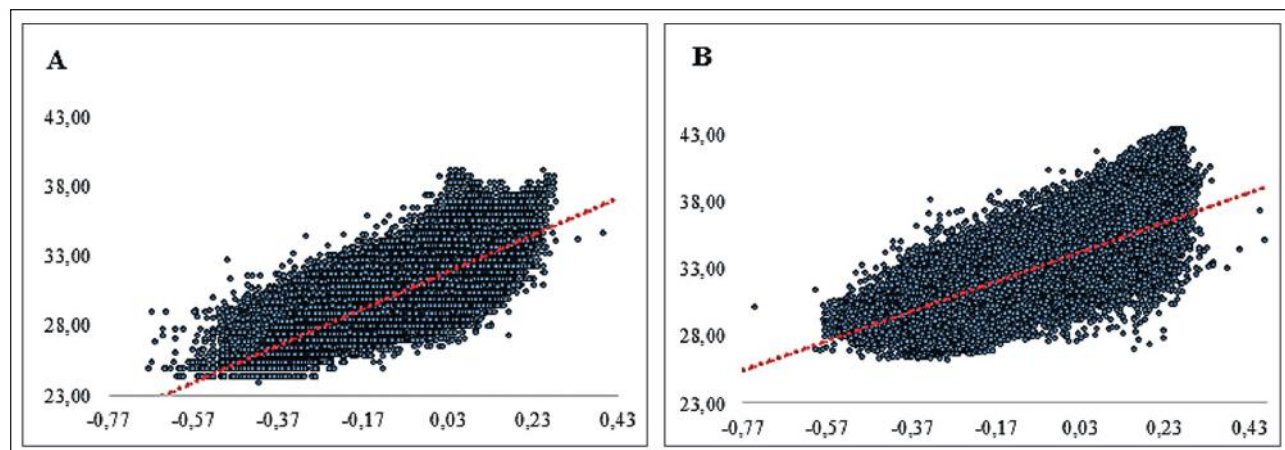


Figura 4 Diagrama de dispersão entre NDBI e Tsup em 1995 (A) e 2015 (B).



em todas as zonas da cidade, estendendo-se para os limites das zonas do Centro, Norte, Leste, Sul e Sudeste, impulsionada pela instalação de empreendimentos urbanos residenciais.

Além disso, as fortes correlações positivas entre Tsup e NDBI (0,84 e 0,72) dos anos de 1995 e 2015, respectivamente, demonstraram a relação do crescimento da urbanização na formação de ambientes com temperaturas mais altas, favorecendo o aumento da radiação, devido a gradativa ocupação e uso do solo através do incremento de superfícies construídas.

Ao aplicar as imagens de sensoriamento remoto, foi notado as mudanças ocorridas na área por meio do crescimento espacial da urbanização e o aumento do campo térmico superficial, o que mostra o sensoriamento como uma ferramenta importante nos estudos de desenvolvimento urbano e da qualidade ambiental.

## 5 Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo incentivo a pesquisa e concessão de bolsas Pós-Graduação e Pesquisa; ao United States Geological Survey (USGS) e a Prefeitura Municipal de Teresina (PMT) pelas informações prestadas acerca da área do estudo.

## 6 Referências

- Abreu, G.S.A. 2016. *Análise têmporo-espacial da relação entre a cobertura do solo e a temperatura de superfície na cidade de Teresina (PI) mediante o uso de geoprocessamento*. Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Piauí, Dissertação de Mestrado 152p.
- Allen, R.G.; Tasumi, M. & Trezza, R. 2007. Satellite-based energy balance for mapping evapotranspiration with internalized calibration (METRIC) – Model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133: 380-394.
- Andrade, C.S.P. 2016. Teresina e Clima: indissociabilidades no estudo da cidade. *Revista Equador*, 5 (3): 398-420.
- Arizza, A. 2013. Descripción y Corrección de Productos Landsat 8 LDCM (LandSat Data Continuity Mission), versión 1.0. Centro de Investigación y Desarrollo en Información Geográfica (CIAF): Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), Colombia. Disponível em: <<http://www.un-spider.org/sites/default/files/LDCM-L8.R1.pdf>>. Acesso: outubro 2017.
- Barbosa, A.H.; Carvalho, R. & Camacho, R. 2017. Aplicação do NDVI para a análise da distribuição espacial da cobertura vegetal na Região Serrana de Martins e Portalegre – Estado do Rio Grande do Norte. *Revista do Departamento de Geografia USP (Online)*, 33: 128-143.
- Barsi, J.A.; Barker, J.L. & Schott, J.R. 2003. An Atmospheric Correction Parameter Calculator for a Single Thermal Band Earth-Sensing Instrument. IGARSS03, 21-25 July, Centre de Congres Pierre Baudis, Toulouse, France.
- Coelho, A.L.N. & Correa, W.S.C. 2013. Temperatura de superfície celsius do sensor TIRS/Landsat-8: metodologia e aplicações, *Revista Geográfica Acadêmica*, 7: 31-45.
- Estoque, R.C.; Murayama, Y. & Myint, S.W. 2017. Effects of landscape composition and pattern on land surface temperature: An urban heat island study in the megacities of Southeast Asia. *Science of The Total Environment*, 577: 349–359.
- Feitosa, S.M.R.; Gomes, J.M.A.; Neto, J.M. & Andrade, C.S.P. 2011. Consequências da Urbanização na Vegetação e na Temperatura da Superfícies de Teresina-Piauí. *REVISTA BAU*, 6(2): 58-75.
- Fialho, E.S. 2009. Ilha de Calor em cidade de pequeno porte: Um caso de Viçosa, Zona da Mata Mineira. Programa de Pós-Graduação em Geografia Física, Universidade de São Paulo (USP), Tese de Doutorado.
- Guha, S.; Govil, H.; Dey, A. & Gill, N. 2018. Analytical study of land surface temperature with NDVI and NDBI using Landsat 8 OLI and TIRS data in Florence and Naples city, Italy. *European Journal of Remote Sensing*, 51(1): 667–678.
- Gusmão, A.C.V.L.; Montenegro, S.M.G.L.; Silva, B.B.; Oliveira, L.M.M. & Moura, A.E.S.S. 2013. Obtenção do albedo e da temperatura da superfície através de imagens de satélite em bacia hidrográfica. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRICOS, 20, Bento Gonçalves - RS, 2013. *Trabalhos completos*, Bento Gonçalves, ABRH, p. 1-9.
- Iqbal, M. 1983. *An introduction to solar radiation*. New York, Academic Press. 212 p.
- Instituto Nacional de Meteorologia – INMET. BDMPEP - Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/projetos/rede/pesquisa/>>. Acesso: julho de 2018.
- Liu, H. & Weng, Q. 2012. Enhancing temporal resolution of satellite imagery for public health studies: A case study of West Nile Virus outbreak in Los Angeles in 2007. *Remote Sensing Environ*, 117: 57–71.
- Li, H.; Wang, C.Z.; Zhong, C.; Su, A.J.; Xiong, C.R.; Wang, J.E. & Liu, J.Q. 2017. Mapping Urban Bare Land Automatically from Landsat Imagery with a Simple Index. *Remote Sensing*, 9: 249.
- Markham, B.L. & Barker, L.L. 1987. Thematic mapper bandpass solar exoatmospherical irradiances. *International Journal of Remote Sensing*, 8(3): 517- 523.
- Medeiros, R.M. 2014. Caracterização de mudanças climáticas por meio de séries meteorológicas para o município de Teresina/Piauí. *Revista Pernambucana de Tecnologia*, 2(2): 6-17.
- Moreira, E.B.M. & Galvêncio, J.D. 2007. Distribuição Espacial das Temperaturas à Superfície na cidade do Recife, utilizando imagens TM Landsat – 7. *Revista de Geografia*, 24(3): 122-135.

- Morse, A.; Tasumi, M.; Allen, R.G. & Kramber, W.J. 2000. Application of the SEBAL methodology for estimating consumptive use of water and streamflow depletion in the Bear River Basin of Idaho through Remote Sensing. *Idaho, Department of Water Resources, University of Idaho*.
- Oliveira, L.M.M.; Montenegro, S.M.G.L.; Antonino, A.C.D.; Silva, B.B.; Machado, C.C.C. & Galvêncio, J.D. 2012. Análise quantitativa de parâmetros biofísicos de bacia hidrográfica obtidos por Sensoriamento Remoto. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 47(9): 1209-1217.
- Oliveira, T.H.; Silva, J.E.; Santos, M.O.; Oliveira, J.S.E.S. & Galvêncio, J.D. 2015. Evolução espaço-temporal da drenagem superficial e do processo de impermeabilização em Santo Amaro, Recife-PE. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 8: 1571-1587.
- Ponzoni, F.J.; Shimabukuro, Y.E. & Kuplich, T.M. 2012. *Sensoriamento Remoto da vegetação*. São Paulo, Oficina de Textos. 164 p.
- Prefeitura Municipal de Teresina - PMT. Teresina Agenda 2015: a cidade que queremos. Diagnósticos e cenários: meio ambiente. Disponível em: <<http://semplan.teresina.pi.gov.br/agenda-2015/>>. Acesso: julho de 2018.
- Ranagalage, M.; Estoque, R.C. & Murayama, Y. 2017. An Urban Heat Island Study of the Colombo Metropolitan Area, Sri Lanka, Based on Landsat Data (1997–2017). *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(5): 1367.
- Sousa, S.B. & Ferreira, J.L.G. 2012. Relação entre temperatura de superfície terrestre, índices espectrais e classes de cobertura da terra no município de Goiânia (GO). *RA'E GA - O Espaço Geográfico em Análise*, 26: 75-99.
- Silva, B.B.; Braga, A.C.; Oliveira, L.M.M.; Montenegro, S.M.G.L. & Barbosa, B.J. 2016. Procedures for calculation of the albedo with OLI-Landsat 8 images: Application to the Brazilian semi-arid. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 20(1): 3- 8.
- Souza, J.D. 2008. Modelo Físico-Matemático de correção atmosférica para imagens TM-Landsat 5 MODIS-TERRA/AQUA. Programa de Pós-graduação em Meteorologia, Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Tese de Doutorado, 177p.
- United States Geologic Survey – USGS. 2014. Using the USGS Landsat 8 Product. Disponível em: <[https://landsat.usgs.gov/Landsat8\\_Using\\_Product.php](https://landsat.usgs.gov/Landsat8_Using_Product.php)>. Acesso: outubro de 2017.
- United States Geologic Survey – USGS. 2017. Catálogo USGS. Disponível em: <<https://earthexplorer.usgs.gov>>. Acesso: setembro de 2017.
- Weng, Q.; Lu, D. & Schubring, J. 2004. Estimation of land surface temperature – vegetation abundance relationship for urban heat island studies. *Remote Sensing of Environment*. Oxford, v.89, p.467-483.
- Voogt, J.A. & Oke, T.R. 2003. Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment*, 86: 370–384.
- Xiong, Y.; Huang, S.; Chen, F.; Ye, H.; Wang, C. & Zhu, C. 2012. The Impacts of Rapid Urbanization on the Thermal Environment: A Remote Sensing Study of Guangzhou, South China. *Remote Sensing*, 4(7): 2033-2056.
- Ye, H.; Wang, K.; Huang, S.; Chen, F.; Xiong, Y. & Zhao, X. 2010. Urbanisation effects on summer habitat comfort: A case study of three coastal cities in southeast China. *International Journal of Sustainable Development e World Ecology*, 17: 317–323.
- Zha, Y.; Gao, Y. & Ni, S. 2003. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 24: 583-594.