

GEOTECNOLOGIAS APLICADAS À CARACTERIZAÇÃO DA TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE NA CIDADE DE TERESINA (PI)

Geotechnologies applied to surface temperature characterization in Teresina city (PI)

Geotecnologías aplicadas a la caracterización de la temperatura de superficie en la ciudad de Teresina (PI)

Geovane da Silva Abreu

Instituto Federal do Pará – IFPA

geoabreu26@hotmail.com

Carlos Sait Pereira de Andrade

Universidade Federal do Piauí – UFPI

calossait@hotmail.com

Resumo

Em relação as características tropicais do Brasil, muitos trabalhos têm sido desenvolvidos centrando-se no elemento climático temperatura, que é o primeiro a receber alterações decorrentes da urbanização. Nessa perspectiva, a presente pesquisa teve como objetivo geral analisar a relação entre a cobertura do solo e a temperatura de superfície em Teresina (PI). Os procedimentos metodológicos incluíram o uso de imagens geradas por sensores remotos e técnicas de geoprocessamento, com a intenção de caracterizar a superfície da cidade, e relacioná-la à expressão espaço-temporal de seu campo térmico. Para isso, foi contemplado um intervalo de 30 anos, outubro de 1985 e outubro de 2015, com comparação das imagens referentes a esses dois anos. Por meio do processamento das mesmas foram produzidos mapas de uso e cobertura do solo e mapas de temperatura da superfície, para os anos considerados. Ao final, foi possível verificar a relação entre os valores mais altos de temperatura de superfície com as áreas mais intensamente transformadas pela ação humana, mediante o processo de urbanização.

Palavras-chave: Temperatura de superfície. Sensores remotos. Satélite *Landsat*.

Abstract

Regarding the tropical characteristics of Brazil, many works have been developed focusing on the temperature climate element, which is the first to receive changes resulting from urbanization. In this perspective, the present research had as general objective to analyze the relationship between the soil cover and the surface temperature in Teresina (PI). The methodological procedures included the use of images generated by remote sensors and geoprocessing techniques, with the intention of characterizing the city surface, and relating it to the space-time expression of its thermal field. For this, an interval of 30 years was contemplated, october of 1985 and october of 2015, with comparison of images referring to these two years. Through their processing, land use and cover maps and surface temperature maps were produced for the years considered. At the end, it was possible to verify the relation between the highest values of surface temperature and the areas most intensely transformed by human action, through the urbanization process.

Keywords: Surface temperature. Remote sensors. Landsat satellite.

Resumen

En cuanto a las características tropicales de Brasil, se han desarrollado muchos trabajos centrados en el elemento climático temperatura, que es el primero en recibir los cambios resultantes de la urbanización. En esta perspectiva, la presente investigación tuvo como objetivo general analizar la relación entre la cobertura del suelo y la temperatura superficial en Teresina (PI). Los procedimientos metodológicos incluyeron el uso de imágenes de sensores remotos y técnicas de geoprocésamiento, con la intención de caracterizar la

superfície de la ciudad y relacionarla con la expresión espacio-temporal de su campo térmico. Para esto, se contempló un intervalo de 30 años, octubre de 1985 y octubre de 2015, con una comparación de las imágenes que se refieren a estos dos años. Por medio de su procesamiento, se produjeron mapas de uso y cobertura de la tierra y mapas de temperatura de la superficie para los años considerados. Al final, fue posible verificar la relación entre los valores más altos de temperatura superficial con las áreas más intensamente transformadas por la acción humana, mediante el proceso de urbanización.

Palabras clave: Temperatura de la superficie. Sensores remotos. Satélite *Landsat*.

INTRODUÇÃO

A cidade apresenta-se como a grande expressão geográfica da atualidade sendo crescente sua importância espacial, demográfica, socioeconômica e cultural, fato que revela um mundo cada vez mais urbano. Nesse sentido, são nos espaços urbanos que se encontram de modo mais expressivo os problemas de ordem ambiental, dentre os quais, aqueles relacionados ao clima (ZANELLA e MOURA, 2013).

Assim, considerando as características tropicais do Brasil, muitos trabalhos têm sido desenvolvidos centrando-se na variável temperatura, que é a primeira a receber alterações decorrentes da urbanização. Como exemplos podem ser citados os trabalhos de Lombardo (1985), Amorim (2000), Coltri (2006), Assis (2010), Araújo (2014), entre outros. E nesta temática, muitas dessas pesquisas têm utilizado as contribuições de Monteiro (1976) como metodologia e/ou referencial teórico (MENDONÇA et al., 2012).

Com o aumento da malha urbana em direção às fronteiras do espaço rural, tem-se, ao mesmo tempo, a diminuição das áreas com vegetação e aumento da área construída, resultando em alterações locais no clima (ANDRADE, 2009). Nesse sentido, as constantes modificações feitas no espaço urbano têm sido alvo de inúmeras pesquisas com a intenção de analisar as consequências destas interferências. Uma dessas consequências investigadas diz respeito à produção do clima específico da cidade, o clima urbano.

Conforme Monteiro (1976, p. 95), o clima urbano é “um sistema que abrange o clima de um dado espaço terrestre e sua urbanização”. Assim, a cidade produz seu próprio clima, com especificidades relacionadas ao tamanho do sítio urbano, às suas características geoecológicas e ao grau de derivações desencadeadas ao substrato natural pelas atividades humanas, tendo em vista uma abordagem eminentemente dinâmica e complexa, respaldada no conceito de sistema.

Monteiro (2008), nos lembra que as cidades cresceram em tamanho e complexidade, em detrimento da retração dos espaços naturais, mas que agora estes últimos são valorizados como alívio às agruras da vida urbana. Desse modo, a vida que flui atualmente na urbe, guardadas as proporções, reflete o desequilíbrio presente na relação homem-natureza, pois a cidade é a expressão do apogeu da técnica humana sobre o meio natural.

Roth (2007), observa que entre as mais variadas alterações antrópicas, destaca-se a transformação da superfície da Terra para usos urbanos, sendo a mais rápida e a mais visível. Nas regiões tropicais, muitas cidades surgiram das rápidas transformações do meio rural, sem muito planejamento e restrições do uso da terra. Como consequência, tem-se a emergência de inúmeros problemas, dentre os quais, os relacionados ao aumento de temperatura nas cidades, impactando sobre o conforto da população.

Mendonça (2015), ressalta a importância do planejamento e da gestão urbana no contexto da expressão espacial das cidades, e alerta sobre a ausência ou insuficiência de medidas de controle ambiental, como reflexo do crescimento desordenado, o que traz como consequência, condições ambientais de forte impacto sobre a vida humana.

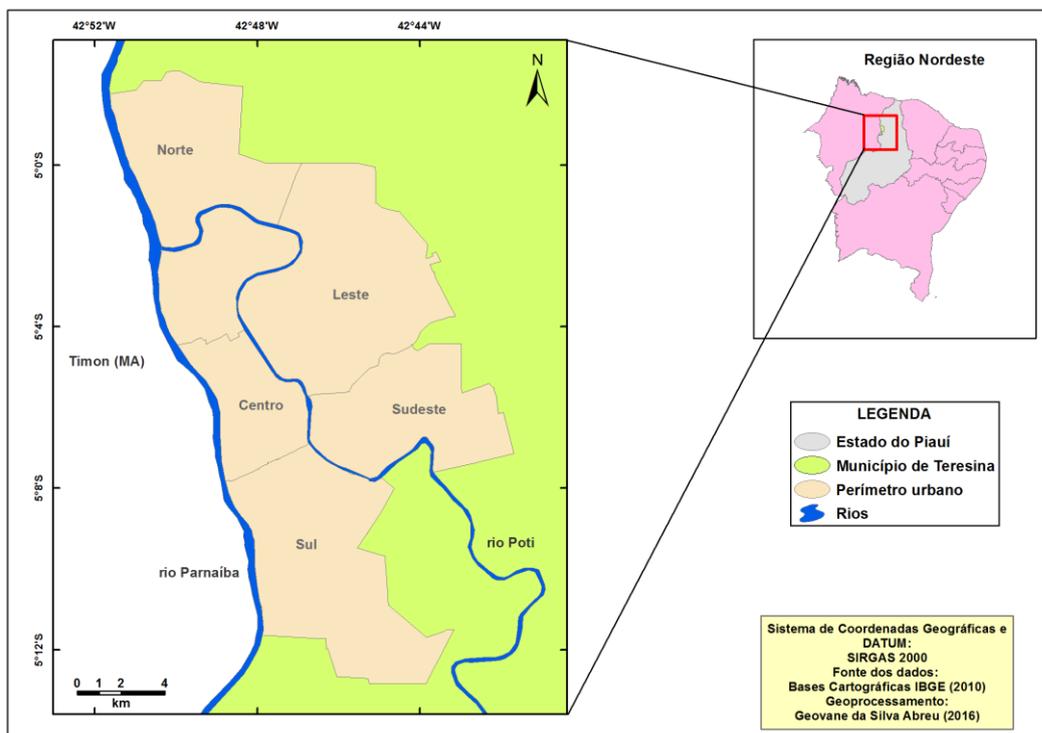
Conforme Masson et al. (2014), a cidade e seu clima podem ser considerados como um sistema complexo, uma vez que compreende aspectos sociais, econômicos e ambientais, e cada um destes com suas próprias regras de comportamento e evolução, mas que estão intimamente ligados uns com os outros. Esses autores discutem ainda que o estudo do clima da cidade passa, necessariamente por uma abordagem sistêmica, que é interdisciplinar por natureza, envolvendo urbanistas, arquitetos, meteorologistas, engenheiros civis, cientistas sociais, geógrafos e economistas.

Assim, a cidade representa o *locus* da produção e reprodução da vida social, e configura a mais complexa relação entre o homem e seu meio. Esse grau de complexidade se reflete no clima que é produzido sobre a cidade.

Com efeito, muitas cidades brasileiras, mesmo aquelas ditas planejadas, carregam no seu processo de crescimento as marcas da desorganização e a não observância dos parâmetros de qualidade ambiental. As consequências desse processo afetam a vida dos cidadãos sob diferentes aspectos, como deslizamentos de terra, enchentes, formação de ilhas de calor, etc.

A cidade de Teresina está localizada (Figura 1) na porção centro-norte do estado do Piauí, que por sua vez localiza-se na direção setentrional da região Nordeste. Com área total de 1.392 Km², dos quais 17% correspondem a zona urbana, configurando este município piauiense como o que possui maior área territorial rural (PMT, 2015).

Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo



Nas últimas décadas a dinâmica urbana evidenciada em Teresina tem se caracterizado pela expansão horizontal dos conjuntos habitacionais, sobretudo aqueles destinados às classes populares. Esse processo produz a necessidade de se conhecer o impacto que a expansão urbana traz para o clima da cidade, uma vez que se tem, ao mesmo tempo, a retirada da cobertura vegetal e sua substituição pela massa de edificações. A condição climática de Teresina, caracterizada pelas altas temperaturas em praticamente todo o ano, altera consideravelmente a qualidade ambiental na cidade, uma vez que se tem a diminuição do albedo e da emissividade destas superfícies transformadas, resultando assim, no incremento da temperatura de superfície.

Mello et al. (2009), nos esclarecem que as superfícies que possuem elevado albedo e emissividade tendem a permanecerem mais frias ao serem expostas à radiação, uma vez que absorvem menos radiação e emitem mais radiação térmica para o espaço, transmitindo menos calor para o entorno. Enquanto que para as superfícies com menor albedo e emissividade, maior será a absorção de calor e, conseqüentemente, sua permanência no ambiente de entorno.

Nessa perspectiva, a presente pesquisa teve como objetivo geral analisar a relação entre a cobertura do solo e a temperatura de superfície em Teresina (PI), utilizando-se de técnicas de geoprocessamento. A abordagem foi feita considerando um intervalo de tempo de 30 anos, outubro de 1985 e outubro de 2015.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento do trabalho foram utilizadas imagens de sensores remotos (*Landsat 5 e 8*), disponibilizadas gratuitamente no sítio do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), disponível em: http://www.dgi.inpe.br/siteDgi/index_pt.php e no sítio do *United States Geological Survey* – USGS (Serviço Geológico dos Estados Unidos), disponível em: <http://earthexplorer.usgs.gov/>. As respectivas imagens foram georreferenciadas e processadas, procedimentos necessários para a obtenção de produtos cartográficos mais fidedignos.

Por meio do processamento das imagens foram produzidos, principalmente, dois produtos cartográficos, os quais são: i) mapa de uso e cobertura do solo e ii) mapa da temperatura de superfície, direcionados a cada ano em questão, que nesse caso, foi 1985 e 2015. Os parâmetros das imagens e dos sensores remotos utilizadas na pesquisa estão descritos no Quadro 1, a seguir.

Quadro 1 - Características das imagens e sensores remotos utilizadas na pesquisa

Data	Sensor/Satélite	Bandas	Resolução Espacial
22/10/1985	TM/ <i>Landsat 5</i>	3, 4, 5 e 6 (termal)	30 m (bandas 3, 4 e 5); 120 m (banda 6)
25/10/2015	OLI/TIRS/ <i>Landsat 8</i>	4, 5, 6, e 10 (termal)	30 m (bandas 4, 5 e 6); 100 m (banda 10)

Fonte: elaborado pelos autores com base em Fitz (2008); Barbosa e Dorigon (2014); USGS (2015)

Assim, para a geração do mapa de uso e cobertura do solo, foram consideradas cinco classes, estabelecidas com base no Manual Técnico de Uso da Terra do IBGE (2006) e adaptadas para a realidade teresinense, as quais são apresentadas a seguir:

Vegetação preservada: representa a vegetação de porte arbóreo e de maior densidade, com ocorrência contínua ou em manchas isoladas, conforme a interpretação das imagens de satélite;

Vegetação alterada: compreende a vegetação que já sofreu algum tipo de transformação no que diz respeito a sua densidade e/ou ocorrência. Aparecem como pequenas manchas isoladas ou contínuas, que se apresentam com tonalidades mais claras (no caso da imagem de satélite em tons de cinza), indicando maior reflexão de energia;

Solo exposto/Banco de areia: que abrange distintas superfícies, mas que se enquadram em pelo menos uma das seguintes características: superfícies sem vegetação e/ou uma vegetação rasteira e seca, e superfícies desmatadas e que sofreram queimadas. Essa última característica se deve ao fato de ser muito comuns as queimadas na cidade no segundo semestre, facilitada pelo tempo quente e seco e também por ser uma prática utilizada pela população para limpar os terrenos. Com isso, tem-se a piora da qualidade ambiental nesse período. O solo exposto já é uma superfície que tende a apresentar valores mais baixos de albedo e emissividade. Quando se trata de uma superfície após um evento de queimada, esses valores se tornam menores ainda, possuindo, portanto, alta temperatura superficial;

Corpos de água: as superfícies líquidas que ocorrem na cidade, a exemplo dos rios e lagoas; **Área urbanizada:** correspondem a todas as superfícies que apresentam empreendimentos urbanos resultantes da dinâmica da cidade, como ruas e avenidas, conjuntos habitacionais, comércio e indústrias, hospitais, etc.

O mapa de uso e cobertura do solo foi produzido como base na *classificação supervisionada*, por meio do método da máxima verossimilhança, com a utilização da composição falsa-cor das bandas 3, 4 e 5 (*Landsat 5*) e 4, 5 e 6 (*Landsat 8*), todas elas devidamente georreferenciadas.

Fitz (2008), afirma que a classificação de imagens obtidas por sensores remotos está relacionada à identificação de determinados elementos nela presentes, baseando-se na associação de cada um de seus

pixels a uma determinada classe preestabelecida. Em outras palavras, a classificação visa nomear, com base em critérios predeterminados, os elementos constituintes da superfície e que aparecem nas imagens. Luchiani et al. (2005), ressaltam uma das vantagens da classificação supervisionada ao afirmarem que nesta há um maior controle do operador sobre o processo, permitindo uma classificação mais efetiva.

Nos procedimentos para a produção do mapa de temperatura da superfície a banda utilizada foi a do infravermelho distante ou termal (banda 6 no *Landsat 5* e a banda 10 no *Landsat 8*), com variação de comprimento de onda (intervalo espectral) entre 10,4 µm a 12,5 µm, para o *Landsat 5* e 10,6 a 12,51 µm, para o *Landsat 8*. O processamento da banda termal do satélite *Landsat 5* e 8 permitiu trabalhar com a análise da distribuição espacial e temporal dos dados de temperatura da superfície de Teresina com base no cálculo da radiância¹ diferenciada dos materiais constituintes da superfície. Conforme Meneses (2012), a radiância está relacionada a densidade de fluxo radiante que deixa um elemento de área da superfície do terreno, cuja direção é definida por um cone elementar de um ângulo sólido contendo aquela direção.

Para a transformação das informações constantes na banda termal da imagem de satélite em temperatura de superfície foram adotados basicamente os procedimentos descritos em Chander et al. (2009), Holz et al. (2012), Coelho et al. (2013), Coelho e Correa (2013), Correa et al. (2015), que trabalham com algoritmos para a extração da temperatura de superfície. As etapas são as apresentadas a seguir:

Etapa 1: Cálculo da radiância: que consiste na conversão do Número Digital (ND) de cada *pixel* da imagem em radiância espectral monocromática. A radiância L_λ foi calculada conforme Equação 1 para o *Landsat 5*, e Equação 2 para o *Landsat 8*:

$$L_\lambda = ((LMAX_\lambda - LMIN_\lambda) / (QCALMAX - QCALMIN)) * (QCAL - QCALMIN) + LMIN_\lambda \quad (1)$$

$$L_\lambda = M_L * QCAL + A_L \quad (2)$$

Onde,

Quadro 2 – Elementos e valores constituintes da fórmula de cálculo da radiância

L_λ	Radiância espectral do sensor de abertura em Watts ($W m^2 sr^{-1}$)
$LMAX_\lambda$	Radiância espectral, que é dimensionada para $QCALMAX$ em Watts ($W m^2 sr^{-1}$) = 15.303
$LMIN_\lambda$	Radiância espectral, que é dimensionada para $QCALMIN$ em Watts = 1.2378
$QCALMAX$	Valor de <i>pixel</i> máximo quantificado calibrado (correspondente a $LMAX_\lambda$), em DN= 255
$QCALMIN$	Valor de <i>pixel</i> mínimo quantificado calibrado (correspondente a $LMIN_\lambda$), em DN= 1

¹ Jensen (2011, p. 56) define a radiância como “a intensidade radiante por unidade de área-fonte projetada numa direção específica”. A unidade da radiância é o $W m^2 sr^{-1}$ (watts por metro quadrado, por esterradiano).

QCAL	Valor do <i>pixel</i> calibrado quantificado em DN= banda 6 (<i>Landsat 5</i>) e banda 10 (<i>Landsat 8</i>)
M _L	Fator multiplicativo de redimensionamento específico da banda 10= 3.3420E-04
A _L	Fator aditivo de redimensionamento específico da banda 10= 0.10000

Fonte:

Chander et al. (2009); Coelho e Correa (2013); Correa et al. (2015).

Etapa 2: Cálculo da temperatura de brilho do satélite em Kelvin: este procedimento permite extrair a temperatura de superfície estimada no momento da passagem do satélite. A Equação 3 usada nesta etapa é apresentada adiante:

$$T_b = K_2 / \ln(K_1 / L_\lambda + 1) \quad (3)$$

Onde,

Quadro 3 – Constantes de calibração da banda termal dos sensores remotos *Landsat 5* (banda 6) e *Landsat 8* (banda 10)

T_b	Temperatura efetiva no satélite em Kelvin (K)
K_2	Constantes de calibração 2 em Kelvin: 1260.56 (<i>Landsat 5</i>) 1321.08 (<i>Landsat 8</i>)
ln	Logaritmo natural
K_1	Constantes de calibração 1 em Watts ($W m^2 sr^{-1}$): 607.76 (<i>Landsat 5</i>) 774.89 (<i>Landsat 8</i>)
L_λ	Radiância espectral em Watts ($W m^2 sr^{-1}$)

Fonte: Chander et al. (2009); Coelho e Correa (2013); Correa et al. (2015).

Etapa 3: Conversão da temperatura em Kelvin para Celsius: Após o procedimento de cálculo da temperatura em Kelvin, esta precisa ser convertida para Celsius, conforme Equação 4 a seguir:

$$T_C = T_K - 273,15 \quad (4)$$

Onde T_C é a temperatura em Celsius e T_K é a temperatura em Kelvin

A correção da temperatura de brilho do satélite é feita mediante a inserção da emissividade da superfície, que considera as propriedades de emissão de energia dos materiais que compõem a superfície urbana, que é descrito na etapa 4. A título de exemplo, a Tabela 1 apresenta o albedo e a emissividade de alguns materiais.

Tabela 1 – Propriedades de emissão de alguns materiais

Superfície	Albedo	Emissividade ϵ
Solos	0,05-0,40	0,9-0,94
Gramma	0,16-0,26	0,90-0,95
Floresta	0,13-0,23	0,97-0,99
Água	0,08-0,10	0,85-0,98
Concreto	0,10-0,35	0,90-0,96
Asfalto	0,05-0,20	0,95
Tijolo	0,20-0,40	0,90-0,92
Rocha	0,20-0,35	0,85-0,95
Cascalho	0,08-0,18	0,92
Cerâmica	0,10-0,35	0,90

Fonte: Jensen (2009); Alves e Vecchia (2012)

Etapa 4: Cálculo da temperatura de superfície: corresponde a etapa final para a extração do campo térmico da cidade, mediante a correção da temperatura de brilho estimada no momento da passagem do satélite, adicionando-se a emissividade da superfície. O procedimento é descrito na Equação 5.

$$T_s = T_b / 1 + (\lambda_{6,10} T_b / \rho) \ln \epsilon \quad (05)$$

Onde,

Quadro 4 - Símbolos e valores constituintes da formula de cálculo da temperatura de superfície

T_s	Temperatura de superfície
T_b	Temperatura de brilho do sensor termal
$\lambda_{6,10}$	Comprimento de onda médio da radiação da banda termal (11,45 μ m, para a banda 6 do <i>Landsat 5</i> e 10,89 μ m, para a banda 10 do <i>Landsat 8</i>)
ρ	$\rho = hc/\sigma$ (1,438x10 ⁻² mk), σ = Constante de Boltzmann (1,38x10 ⁻²³ J/k), h =Constante de Planck (6,626x10 ⁻³⁴ J.s), e c =velocidade da luz (2,998x10 ⁸ m/s).
Ln	Logaritmo natural
ϵ	Emissividade, aqui considerado o valor 0,92 como a média da emissividade dos materiais constantes na Tabela 1.

Fonte: Weng et al. (2004).

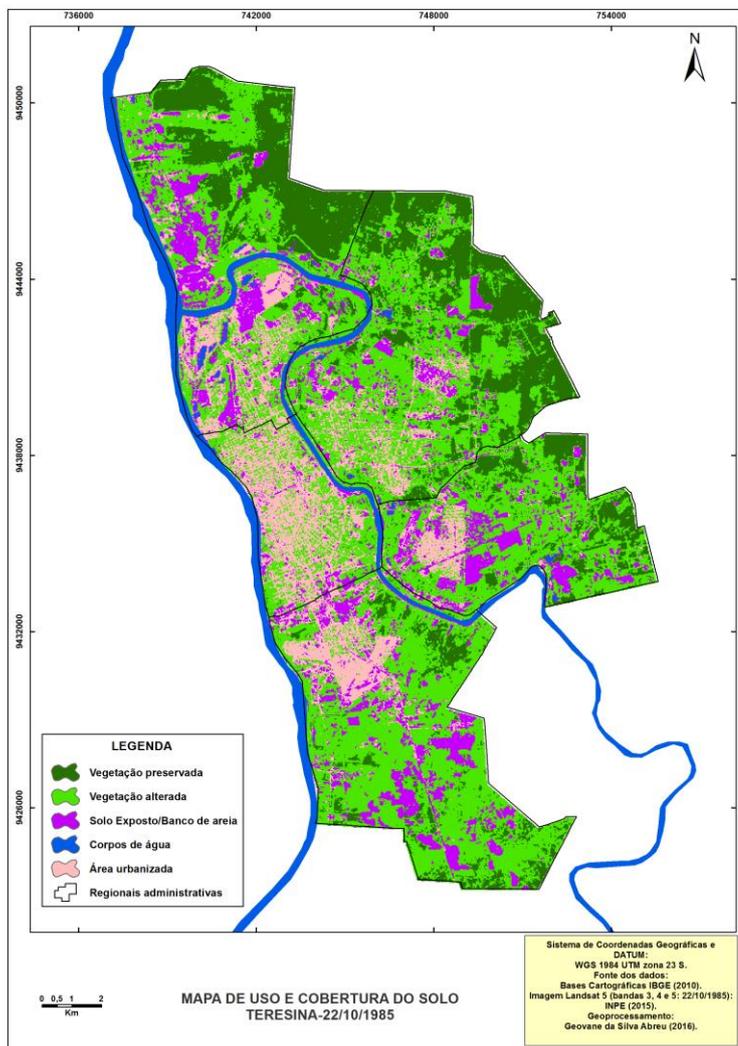
RESULTADOS E DISCUSSÕES

O primeiro produto cartográfico obtido com o processamento das imagens foi o mapa de uso e cobertura do solo para o ano de 1985. Em seguida, foi produzido o mapa termal, relativo à temperatura de superfície, com o intuito de relacioná-lo à variação espaço-temporal das distintas classes de uso e cobertura

do solo. Conforme aponta Correa et al. (2015), os diferentes usos e coberturas da terra proporcionam diferentes temperaturas superficiais. Na Figura 2 tem-se, então, o mapa de uso e cobertura do solo para Teresina, referente ao dia 22 de outubro de 1985.

Figura 2 –
para

Mapa de uso e cobertura do solo
Teresina, outubro de 1985



Organização: Elaboração dos autores

Pelo aspecto visual da Figura 2 percebe-se que a superfície urbana de Teresina já apresentava uma redução considerável de sua cobertura vegetal, sobretudo a região Centro. Na periferia da cidade, no entanto, a classe de vegetação sobressai sobre as demais. Esse aspecto vai impactar positivamente sobre a temperatura de superfície, que apresenta menores valores sobre áreas com maior densidade de vegetação, fato também evidenciado no trabalho de Dorigon e Amorim (2013).

Assim, para esse ano, as respectivas classes apresentaram os seguintes valores e percentual de cobertura:

Tabela 2 – Valores de cobertura do solo para Teresina relativos a outubro de 1985

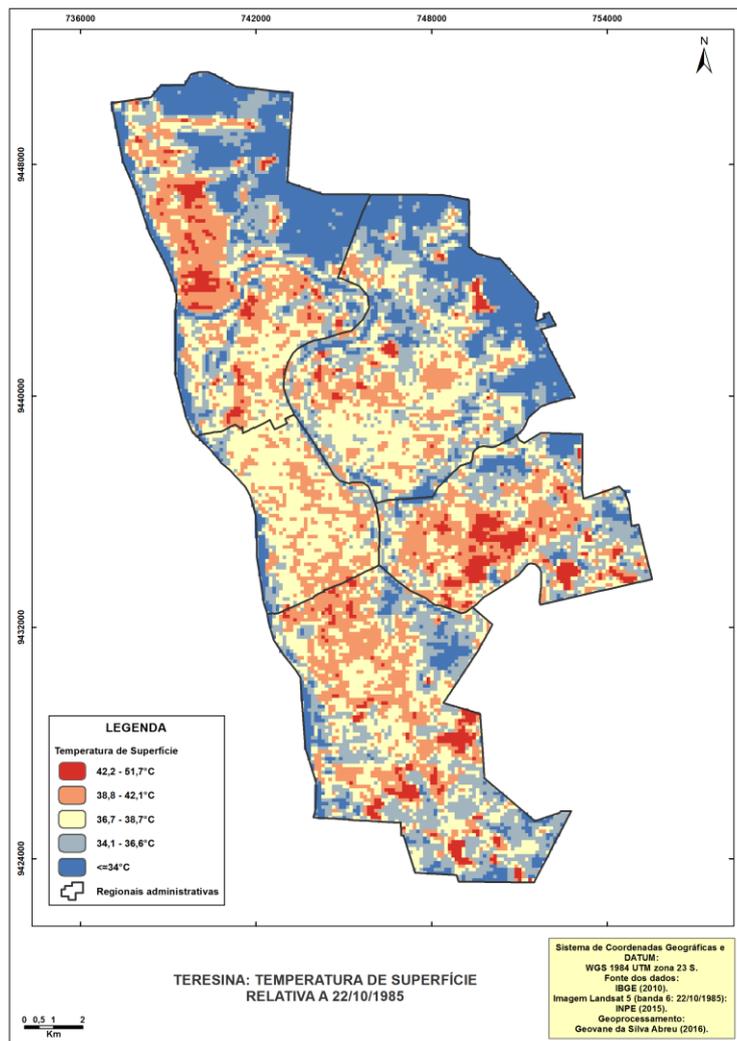
Classe	Área² (Km²)	Percentual de cobertura (%)
Vegetação preservada	49,9	19,9
Vegetação alterada	123,3	49,2
Solo exposto	36,5	14,6
Área urbanizada	36,8	14,7
Corpos de água	4,1	1,6
Total	250,6	100

Elaboração dos autores

Analisando os dados da Tabela 2, e relacionando-os à Figura 2, comprova-se que às classes de vegetação, (vegetação preservada + vegetação alterada) correspondia a cerca de 70% do total da superfície urbana, evidenciando que naquela época a cidade ainda dispunha de uma quantidade significativa de áreas verdes, predominantes na área de expansão da malha urbana. Há praticamente uma equivalência entre os percentuais de cobertura do solo exposto e área urbanizada, indicando que as áreas com solos expostos refletiam a dinâmica da expansão horizontal da cidade, que mais tarde iriam compor a classe de área urbanizada. A expressão dessa dinâmica sobre a temperatura de superfície naquele ano pode ser evidenciada na Figura 3.

² A área total da superfície urbana de Teresina levada em consideração nesta tabela é 250,6 km², que corresponde ao recorte feito conforme a base cartográfica do IBGE relativa à área urbana.

Figura 3 – Mapa da temperatura de superfície da banda termal do satélite *Landsat 5* para Teresina, outubro de 1985



Organização: Elaboração dos autores

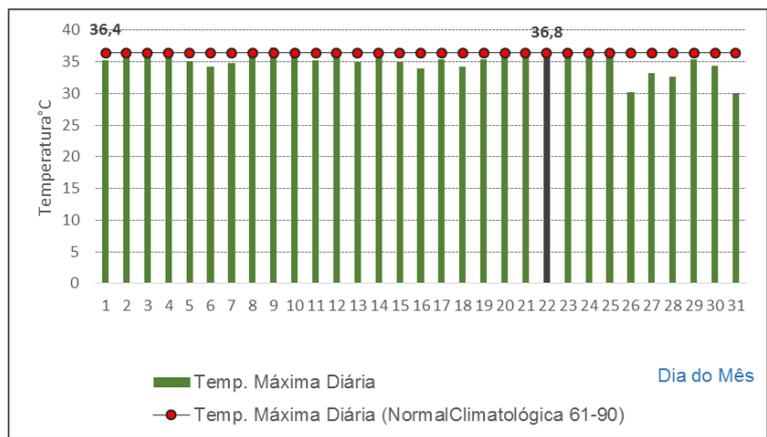
Observando-se a Figura 3, percebe-se que a concentração dos *pixels* de maior temperatura acompanha as regiões da cidade com maior densidade de solo exposto e área edificada, caso das regiões Norte, Sul, Sudeste e Centro. A região Leste, na época ainda com poucas alterações em sua superfície, apresentava uma proporção maior de cobertura vegetal em relação às outras classes, resultando em *pixels* de temperatura menos elevados.

Há ainda uma grande concentração de *pixels* nas classes $\leq 34^{\circ}\text{C}$ e 34,1 a 36,6 $^{\circ}\text{C}$, que corresponde as classes de vegetação e água, conforme observado anteriormente na Figura 2, correspondendo a uma superfície de mais de 173 km², demonstrando a importância da vegetação e dos corpos d'água no contexto da cidade. A relevância da vegetação e das superfícies líquidas no espaço urbano é destacada também nos trabalhos de Dorigon e Amorim (2013) e Correa et al. (2015), entre outros.

A predominância dos *pixels* de maior temperatura nas classes de solo exposto e área urbanizada está relacionada exatamente ao menor albedo e emissividade dessas áreas, o que segundo Sant'Anna Neto (2011) significa mais energia para o espaço de entorno e, conseqüentemente, maior temperatura do ar.

No dia da passagem do satélite a temperatura máxima do ar verificada (Figura 4) foi de 36,8°C, muito próximo da média da Normal Climatológica 1961-1990 do mês, que é de 36,4°C, indicando um mês habitual em relação à temperatura do ar, e indicando também a relação com os valores máximos dos *pixels* de temperatura máxima de superfície, verificados no mapa termal, pois conforme Coelho e Correa (2013) as temperaturas médias de superfície apresentam normalmente valores mais elevados que a temperatura média do ar.

Figura 4 – Gráfico de comparação da temp. máxima diária (10/1985) em relação à temp. máxima diária (normal climatológica 1961-1990), para Teresina

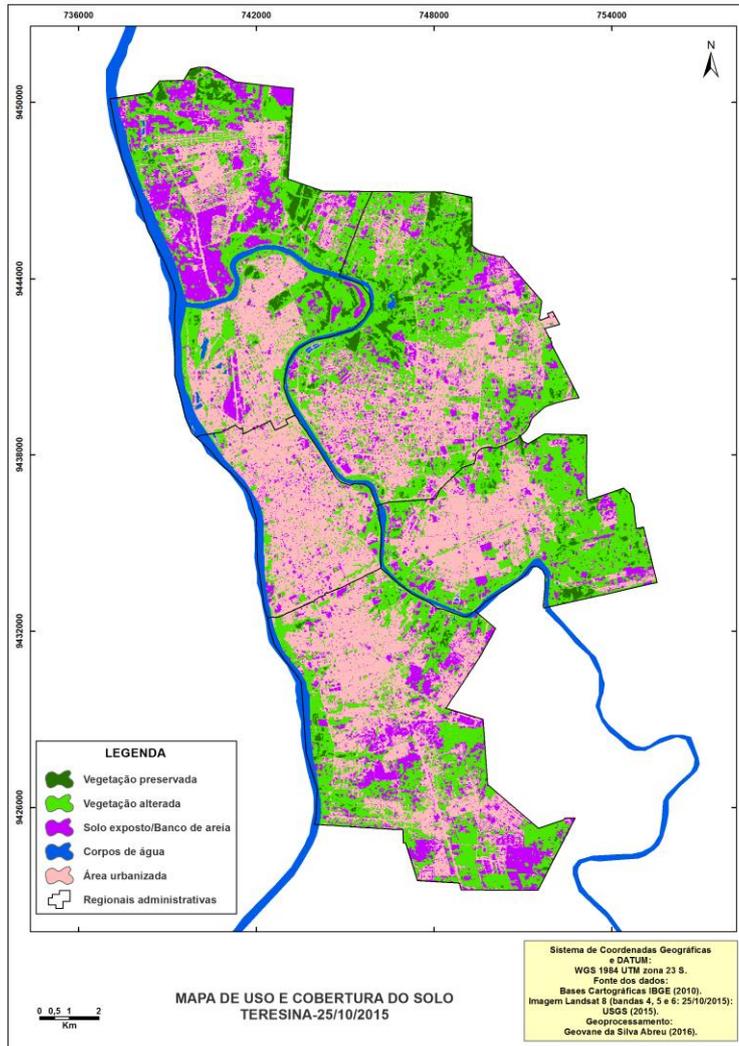


Organização: Elaboração dos autores

Na cidade de Teresina no segundo semestre, sobretudo entre os meses de setembro a dezembro, todas as temperaturas se elevam. Segundo Andrade (2009), as mínimas alcançam os 25°C, as médias ultrapassam os 30°C, valores bem acima das médias anuais. Já as máximas atingem os valores de 40°C. Durante esta época do ano, encontram-se os registros de temperaturas máximas absolutas acima dos 40°C, com o aumento do desconforto térmico humano, favorecido pelas condições atmosféricas.

Em 2015, segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), a população do município de Teresina já alcançava 844.245 habitantes, dos quais pouco mais de 94% corresponde à população urbana. Esse valor representa um aumento relativo de mais de 120% em relação à população no início da década de 1980, cujo valor absoluto ultrapassava os 377.000 habitantes. Essa realidade imprime novas demandas no espaço, sobretudo ligadas à questão da habitação. O perímetro urbano se estende cada vez mais em direção aos limites da zona rural. E, em desacordo às características geográficas da cidade, a cobertura vegetal de Teresina continua perdendo espaço para as áreas edificadas, contribuindo para aumentar o desconforto térmico da população. O mapa de uso e cobertura do solo para 2015 é apresentado na Figura 5.

Figura 5 – Mapa de cobertura do solo para Teresina, outubro de 2015



Organização: Elaboração dos autores

Conforme os dados da Figura 5, percebem-se grandes alterações na superfície urbana de Teresina em todas as regiões da cidade, resultantes do crescimento urbano desordenado, trazendo como consequências, o aumento da massa de edificações e solos expostos em detrimento da cobertura vegetal. Os valores de cada classe podem ser vistos na Tabela 3.

Tabela 3 – Valores de cobertura do solo para Teresina relativos a outubro de 2015

Classe	Área (Km ²)	Percentual de cobertura (%)
Vegetação preservada	8,8	3,5
Vegetação alterada	92,1	36,8
Solo exposto	41,9	16,7
Área urbanizada	102,3	40,8
Corpos de água	5,5	2,2
Total	250,6	100

Organização: Elaboração dos autores

Tomando-se por base a Figura 5 e os dados discriminados na Tabela 3 percebe-se o grau de transformação da superfície urbana de Teresina em relação ao observado em 1985. Quanto à área urbanizada, o aumento de 1985 a 2015 foi de 65,5 km², correspondendo a um incremento de 178%. Já a classe solo exposto passou de 36,5 km² em 1985 para 41,9 km² em 2015, representando aumento de 14,8%.

Por outro lado, se considerarmos as duas classes de cobertura que mais impactam sobre a temperatura de superfície tem-se que para o ano de 2015 144,2 km² da superfície urbana de Teresina cobertos com área urbanizada e solo exposto, ou seja, 57,5% do total. Em contrapartida, somando-se as duas classes de vegetação, estas perfazem a 40,3% da zona urbana total. Seguramente essa característica traz impacto sobre a temperatura de superfície, pois essas duas classes, área urbanizada e solo exposto, são as que apresentam no cômputo geral, menores valores de albedo e emissividade. Superfícies como a verificada na Figura 6 apresentam-se mais aquecidas em virtude da ausência da cobertura vegetal. Nesse quesito, também se destaca a região Norte, onde nos últimos anos as transformações no solo urbano têm sido intensas, trazendo influências sobre a temperatura.



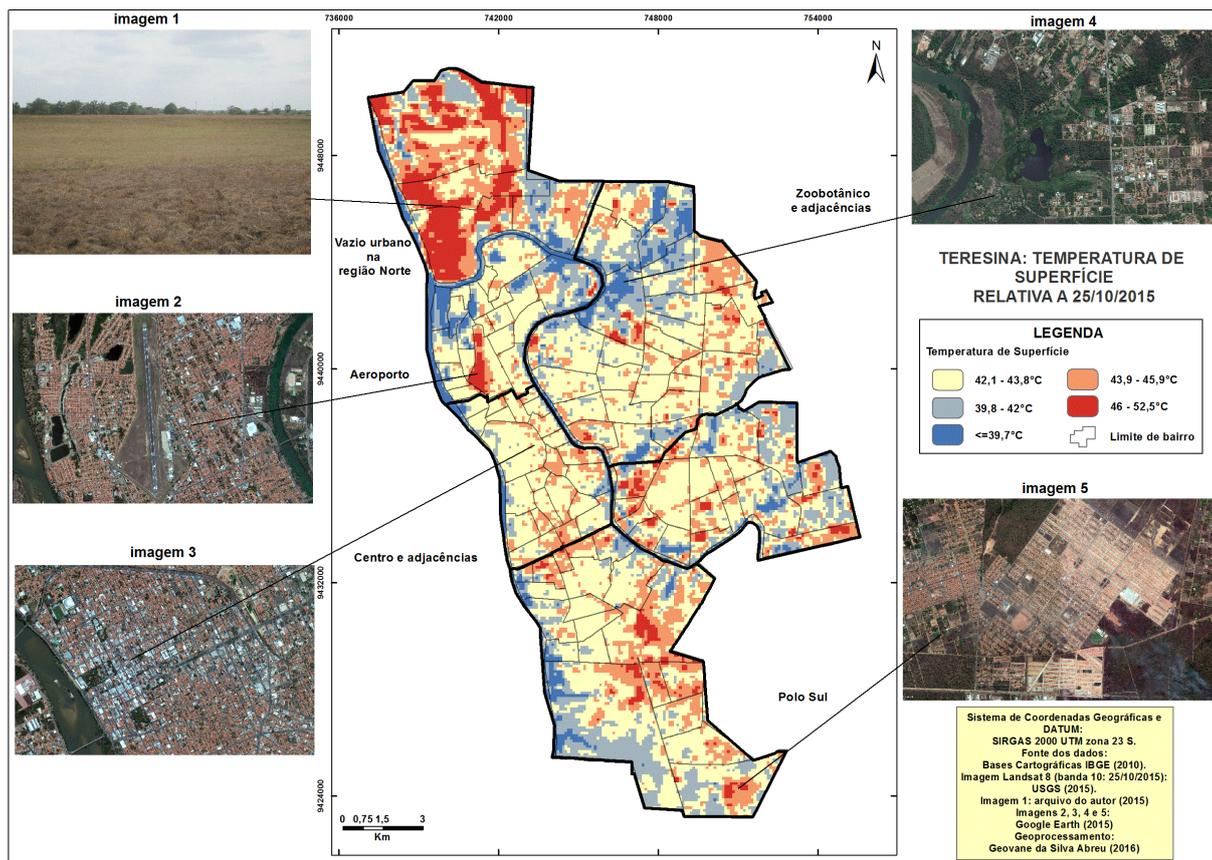
Figura 6 – Terreno em terraplanagem no bairro Angelim, região Sul

A Figura 6 evidencia que a expansão horizontal de Teresina provoca grandes transformações na superfície da cidade, sobretudo, com a substituição da cobertura vegetal por áreas edificadas e com maior ocorrência de solos expostos, aumentando a exposição à radiação direta. Nas áreas edificadas o tipo de cobertura das construções, como as metálicas e as de fibrocimento, contribui bastante para o incremento das temperaturas nas áreas urbanas, considerando suas características de emissão. Mello et al. (2009) destacam que os diferentes materiais construtivos presentes têm um papel determinante na permanência da energia próximo à superfície.

Para o ano de 2015, a expressão espacial das classes de temperatura de superfície, como reflexo dos distintos tipos de cobertura do solo, é mostrada na Figura 7.

Nessa Figura verifica-se o papel desempenhado pelas áreas intensamente transformadas pela ação humana para a concentração dos *pixels* de temperatura nas classes superiores a 42,1°C, compreendendo grandes áreas urbanizadas, alternadas com manchas de solos expostos, uma vez que estas, quanto as suas características de emissão, apresentam menores valores de albedo e emissividade, elevando assim, a temperatura de superfície e impactando sobre a temperatura do ar.

Figura 7 – Mapa da temperatura de superfície da banda termal do satélite *Landsat 8* para Teresina, outubro de 2015



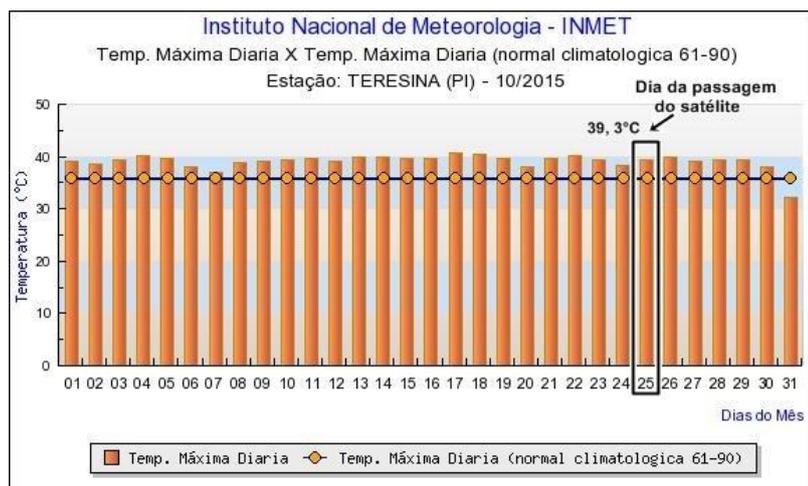
Organização: Elaboração dos autores

A imagem 1 da Figura 7 mostra uma grande área de vazio urbano pertencente ao grupo João Santos³, que apresenta uma vegetação rasteira e que, no período seco, apresenta baixo albedo e emissividade contribuindo para as altas temperaturas verificadas nesse local. O contrário pode ser observado na imagem 4 (Figura 7), uma superfície com maior presença de água e com maior densidade de vegetação. Esse tipo de cobertura funciona como regulador térmico ao absorver grande quantidade de energia, mas sem devolvê-la ao espaço de entorno (MELLO et al., 2009).

No dia da passagem do satélite em 2015 (25/10) a temperatura do ar mostrou uma elevação cerca de 3,0°C acima da média da Normal Climatológica para o mês, que é de 36,4°C, como se verifica na Figura 8.

³ João Pereira Santos é o fundador do Grupo Industrial João Santos, produtor do cimento Nassau e falecido em 2009.

Figura 8 – Gráfico de comparação da temp. máxima diária (10/2015) em relação à temp. máxima diária (normal climatológica 1961-1990), para Teresina



Fonte: adaptado a partir dos dados do INMET.
Disponível em: <http://www.inmet.gov.br>. Acesso em abril de 2016.

Os dados da Figura 8 mostram que em praticamente todos os dias do mês de outubro de 2015, a temperatura máxima diária esteve acima da temperatura máxima diária da Normal Climatológica 1961-1990. No mapa termal do referido ano, a classe superior que representa os *pixels* de maior temperatura superficial ficou entre 46 a 52,5°C, mostrando sua influência sobre a temperatura do ar. Assim, quanto mais transformada a superfície, com alta densidade de áreas edificadas e solos expostos, maior será a temperatura superficial e, conseqüentemente, a temperatura do ar sobre essa área.

As informações apresentadas neste trabalho evidenciam a necessidade da preservação ou criação das áreas verdes e livres na cidade, sobretudo quando estes espaços se apresentam alternados com corpos d'água. No contexto urbano, tais áreas funcionam como reguladores térmicos, produzindo amenidades e, considerando a realidade climática teresinense, sua presença não é só importante, ela torna-se imprescindível.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos procedimentos adotados e nos resultados obtidos pôde-se chegar às seguintes conclusões. Em Teresina, o perímetro urbano avança cada vez mais sobre os espaços rurais, consequência inerente ao processo de urbanização. No entanto, a maneira como se materializa esse processo na capital piauiense coloca em risco a qualidade ambiental nesta cidade. A zona rural é incorporada ao espaço urbano com ampla transformação de sua superfície, onde naturalmente predominava uma densidade maior de vegetação nativa, mas que no decorrer dos anos vem sendo substituída pelas áreas edificadas e grandes parcelas de solos são expostas à radiação direta. Essas superfícies contribuem para um maior armazenamento de calor e trazem impacto sobre a temperatura do ar.

O uso das geotecnologias, centradas na interpretação de imagens obtidas por sensores remotos e produção de mapas, mostraram-se satisfatórias, considerando-se os objetivos pretendidos e os resultados obtidos. Com os mapas de cobertura do solo foi possível observar o processo de expansão urbana nas distintas regiões da cidade no período considerado. As imagens termais permitiram perceber a distribuição espacial e temporal da temperatura de superfície e correlaciona-la à dinâmica da paisagem urbana. Assim, pôde-se verificar os impactos que os diferentes tipos de cobertura trazem sobre a temperatura de superfície.

A dinâmica do clima de Teresina, caracterizada, sobretudo, pelas altas temperaturas em praticamente todo o ano, com destaque para os meses de setembro, outubro, novembro e dezembro, expõe a necessidade de se pensar a expansão urbana levando em conta essas características. Tomando-se como base a área urbana do município, que representa cerca de 17% do total, e a atual dinâmica da cidade, projeta-se que há uma tendência de piora do conforto ambiental, caso não seja repensado, de forma urgente, o modelo de crescimento urbano engendrado na capital piauiense.

REFERÊNCIAS

- ALVES, E. D.L.; VECCHIA, F. A. S. Influência de diferentes superfícies na temperatura e no fluxo de energia: um ensaio experimental. **Revista Ambiência**, v.8, n.1, Guarapuava-SP, p. 101-111, 2012.
- AMORIM, M. C. C. T. **O clima urbano de Presidente Prudente/SP**. Tese Doutorado em Geografia). São Paulo: USP/FFLCH, 2000, 322p.
- ANDRADE, C. S. P. **A climatologia da cidade de Teresina-PI**: as variantes topoclimáticas dos espaços livres. Tese (Doutorado em Geografia). Recife: Programa de Pós-Graduação em Geografia-UFPE, 2009, 229p.
- ARAÚJO, K. C. **Espaço urbano e climatologia**: ilhas de calor em evidência na cidade de Teresina-PI. Dissertação (Mestrado em Geografia) Teresina: PPGGEO-UFPI, 2014, 198p.
- ASSIS, W. L. **O sistema clima urbano no município de Belo Horizonte na perspectiva têmoro-espacial**. Tese (Doutorado em Geografia). UFMG: Instituto de Geociências, 2010, 299p.
- BARBOSA, L. G.; DORIGON, L. P. Análise temporal da cobertura vegetal no município de Teresina/PI a partir da aplicação de NDVI. In: **Anais do XXVI Congresso Brasileiro de Cartografia – CBC**, Gramado, RS, 03 a 07 de agosto 2014. Disponível em: http://www.cartografia.org.br/cbc/anais_listagem_4_fotogrametria-e-sensoriamento-remoto.html. Acesso em fevereiro/2015.
- CHANDER, G.; MARKHAM, B. L.; HELDER, D. L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. **Remote Sensing of Environment**, n.113, p. 893-903, 2009.
- COELHO, A. L. N.; CORREA, W. S. C.; NASCIMENTO, F. H. Uso de produtos de sensoriamento remoto para a classificação e análise de temperaturas de superfície no município de Vila Velha/ES (Brasil). **GeoFocus**, n. 13, p. 61-76, 2013.

COELHO, A. L. N.; CORREA, W. S. C. Temperatura de superfície Celsius do sensor TIRS/Landsat 8: metodologia e aplicações. **Rev. Geogr. Acadêmica**, v. 7, n. 1, p. 31-45, 2013.

COLTRI, P. P. **Influência do uso e cobertura do solo no clima de Piracicaba, São Paulo**: análises de séries históricas, ilhas de calor e técnicas de sensoriamento remoto. Dissertação (Mestrado em Agronomia). Piracicaba, SP: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ), USP, 2006, 166p.

CORREA, W. S. C.; COELHO, A. L. N.; VALE, C. C. Influência de distintos sistemas atmosféricos na temperatura de superfície do município de Vitória (ES). **Caminhos de geografia**, Uberlândia, v. 16, n. 53, p. 37-54, 2015.

DORIGON, L. P.; AMORIM, M. C. C. T. Estrutura térmica da superfície de Paranavaí/PR através do *Landsat 7*. **Caderno Prudentino de Geografia**, n.35, v.2, 2013, p.110-129.

FITZ, P. R. **Geoprocessamento sem complicação**. São Paulo: Oficina de Textos: 2008, 160p.

HOLZ, S.; LORENA, R. B.; MARCHIORO, E. O uso de sensoriamento remoto para análise do campo térmico da superfície urbana completa do município de Vitória (ES). **Revista Geonorte**, Edição Especial, v. 2, n. 4, p. 1674-1682, 2012.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Manual técnico de uso da terra**. 2 ed. Diretoria de geociências. IBGE: 2006, 91p.

_____. **Estimativa da população**. Coordenação de População e Indicadores sociais – COPIS. IBGE: 2015.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente**: uma perspectiva em recursos terrestres. Tradução de José Carlos Neves Epiphânio (coord.). 2 ed. São José dos Campos, SP: Parêntese, 2011, 598p.

LOMBARDO, M. A. **Ilha de calor nas metrópoles**: exemplo de São Paulo. São Paulo: Hucitec, 1985, 244p.

LUCHIARI, A.; KAWAKUBO, F. S.; MORATO, R. G. Aplicações do sensoriamento remoto na geografia. In: VENTURI, L. A. B. (org.). **Praticando geografia**: técnicas de campo e laboratório em geografia e análise ambiental. São Paulo: Oficinas de Textos, 2005, p. 33-54.

MASSON, V. et al. Adapting cities to climate change: a systemic modelling approach. **Urban climate**, v. 10, p. 407-429, 2014.

MELLO, M. A. R.; MARTINS, N. SANT'ANNA NETO, J. L. A influência dos materiais construtivos na produção do clima urbano. **Revista brasileira de climatologia**, 2009, p. 27-40.

MENDONÇA, F.; PINHEIRO, G. M.; LIMA, N. R. Clima urbano no Brasil: análise e contribuição da metodologia de Carlos Augusto de Figueiredo Monteiro. **Revista Geonorte**, Edição Especial 2, v.2, n. 5, p. 626-638, 2012.

MENDONÇA, F. O estudo do SCU – Sistema Clima Urbano – no Brasil: aplicações e avanços. In: MONTEIRO, C. A. F (org.); SANT'ANNA NETO, J. L.; MENDONÇA, F. A.; ZAVATTINI, J. A. **A construção da climatologia geográfica no Brasil**. Campinas, SP: Alínea, 2015, p. 155-166.

MENESES, P. R.; ALMEIDA, T. (org.) **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. UNB: Brasília, 2012, 266p.

MONTEIRO, C. A. F. **Teoria e clima urbano**. Série Teses e Monografias, n°25. São Paulo: IGEOG-USP, 1976, 181p.

_____. O homem, a natureza e a cidade: planejamento do meio físico. **Revista Geografar**. Curitiba, v. 3, n. 1, p. 73-102, jan./jun., 2008.

Prefeitura municipal de Teresina – PMT. **Caracterização do município de Teresina**. Teresina: SEMPLAN, 2015.

ROTH, M. Review of urban climate research in (sub) tropical regions. **Int. J. Climatology**, n. 27, p. 1859-1873, 2007.

SANT'ANNA NETO, J. L. O clima como risco, as cidades como sistemas vulneráveis, a saúde como promoção da vida. **Cadernos de geografia**, Coimbra, n. 30/31, p. 215-227, 2011.

WENG, Q.; LU, D.; 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.

ZANELLA, M. E.; MOURA, M. O. O clima das cidades do Nordeste brasileiro: contribuições no planejamento e gestão urbana. **Revista da ANPEGE**, v. 9, n. 11, p. 75-89, jan./jun., 2013.

Sítios consultados:

<http://earthexplorer.usgs.gov/> Acesso em dezembro de 2015.

http://www.dgi.inpe.br/siteDgi/index_pt.php Acesso em dezembro de 2015.

<http://www.inmet.gov.br> Acesso em abril de 2016.