



**Influência da Mudança do Uso e Cobertura do Solo sobre a
Temperatura da Superfície Continental na Área Urbana de Belém-PA**
Influence of Land Use and Coverage Change on
Continental Surface Temperature in the Urban Area of Belem-PA

Eduardo da Silva Margalho¹; Madson Tavares Silva¹;
Letícia Karyne da Silva Cardoso¹; Ricardo Alves de Olinda² & José Felipe Gazel Menezes³

¹Universidade Federal de Campina Grande, Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas-Centro de Tecnologia e Recursos Naturais.
Av. Aprígio Veloso 882, 58429-140, Bairro Universitário, Campina Grande, Paraíba, Brasil

²Universidade Estadual da Paraíba, Departamento de Estatística-Centro de Ciência e Tecnologia,
R. Baraúnas 351, 58429-500 – Bairro Universitário, Campina Grande, Paraíba, Brasil

³Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Programa de pós-Graduação de Ciências Ambientais.
R. Augusto Corrêa 01, 66075-110, Bairro Guamá, Belém, Pará, Brasil

E-mails: eduardomargalho@gmail.com; madson.tavares@ufcg.edu.br;

leticiauskardoso@gmail.com; ricardo.estat@yahoo.com.br; jfgmenezes@gmail.com

Recebido em: 10/10/2019 Aprovado em: 10/01/2020

DOI: http://doi.org/10.11137/2020_2_07_19

Resumo

Este trabalho teve como intuito analisar a distribuição espacial da temperatura da superfície continental (TSC) da área urbana de Belém/PA e a influência da alteração do uso e cobertura do solo a partir de técnicas de sensoriamento remoto. Foram utilizados produtos dos sensores *Thematic Mapper* (TM) e *Thermal Infrared Sensor* (TIRS) acoplados, respectivamente, nos satélites Landsat 5 e 8. As imagens adquiridas dos anos de 1994, 2008 e 2017 foram processadas, reamostradas (resolução espacial de 120 metros) e, por fim, foram extraídos centroides com um total de 1252 pontos, através da utilização do software *Quantum GIS*. Posteriormente, foram calculados os índices espectrais, NDVI, NDBI e albedo que representam, respectivamente, presença de vegetação, solo exposto ou área construída e taxa de refletividade. Os resultados mostraram que a TSC apresentou aumento em todos os setores da área de estudo, principalmente entre os anos de 2008 e 2017. O setor com maior elevação da TSC foi o centro urbano, pois apresentou valores abaixo de 25,0 °C na imagem de 1994 e acima de 35,0 °C na imagem de 2017. Em contrapartida, o setor do parque ecológico apresentou o menor aumento da TSC, de 20,0 °C (1994) para 25,0 °C (2017). De acordo com a análise dos índices espectrais, a intensificação da TSC está diretamente associada com a forte expansão territorial, pois a partir dos valores do NDVI notou-se a degradação da cobertura vegetal. Essa degradação é observada nas comparações das imagens, em que é possível verificar o decréscimo nos valores de NDVI em toda área de estudo, cujos valores representam a diminuição da cobertura vegetal. O setor com maior retirada de áreas verdes foi a zona norte, pois apresentou uma queda nos valores de NDVI, passando de 0,7 em 1994 para 0,3 na imagem em 2017. Observou-se também que a densidade de área construída aumentou, apresentando valores crescentes de NDBI. Agregado a esses valores de NDVI e NDBI, notou-se o incremento na taxa de refletividade, cujos valores no centro urbano de Belém no ano de 1994 eram de 0,1% e que ultrapassaram 0,5% na imagem referente ao ano de 2017, ratificando o impacto da alteração da cobertura do solo e a direta associação entre a mudança do ambiente e a TSC. De forma geral, os resultados apontam que a expansão desenfreada do processo urbano e a mudança da cobertura do solo provocam a intensificação da TSC.

Palavras-Chave: geoprocessamento; clima urbano; meio ambiente.

Abstract

The objective of this work is to examine the spatial distribution of Continental Surface Temperature (CST) of the urban area of Belem / PA and the influence of the change of use and soil cover from remote sensing techniques. Products from Thematic Mapper (TM) and Thermal Infrared Sensor (TIRS) sensors coupled, respectively, to Landsat 5 and 8 satellites were used. The images acquired from the years 1994, 2008 and 2017 were processed, resampled (spatial resolution of 120 meters) and, finally, centroids were extracted with a total of 1252 points, using the Quantum GIS software. Subsequently, spectral indices, NDVI, NDBI and albedo were calculated, which represent, respectively, the presence of vegetation, exposed soil or built area and reflectivity rate. The results showed that CST showed an increase in all sectors of the study area, mainly between the years 2008 and 2017. The sector with the highest elevation of the CST was the urban center, as it presented values below 25.0 °C in the image of 1994 and above 35.0 °C in the 2017 image. In contrast, the ecological park sector showed the lowest increase in CST, from 20.0 °C (1994) to 25.0 °C (2017). According to the analysis of the spectral indices, the intensification of CST is directly associated with the strong territorial expansion, since from the NDVI values the degradation of the vegetation cover was noted. This degradation is observed in the comparisons of the images, in which it is possible to verify the decrease in the NDVI values in the entire study area, whose values represent the decrease in the vegetation cover. The sector with the greatest withdrawal of green areas was the northern zone, as it showed a drop in NDVI values, from 0.7 in 1994 to 0.3 in the 2017 image. It was also observed that the density of the constructed area was intensified, presenting increasing values of NDBI. Added to these NDVI and NDBI values, higher reflectivity rate values were noted, whose values in the urban center of Belem in 1994 were 0.1% and which exceeded 0.5% in the image for the year 2017, ratifying the impact of changes in land cover and the direct association between changes in the environment and CST. In general, the results indicate that the uncontrolled expansion of the urban process and the change in land cover cause the intensification of CST

Keywords: geoprocessing; urban climate; environment

1 Introdução

No Brasil, segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), no último censo (2010) a população do país era de 190.755.799 habitantes, sendo que 84% da população já reside nas áreas urbanas e 16% nas áreas rurais, demonstrando que o país tem se estabelecido como um espaço definitivamente urbano. Esse processo também ocorre no município de Belém, que possui um total de habitantes de 1.393.399, sendo que desse total apenas 13.934 pessoas não residem na área urbana.

A cidade de Belém é conhecida como a cidade das mangueiras, pelo fato de ter, em vários pontos da cidade, grande densidade de áreas verdes. Entretanto, nas últimas décadas, a região de Belém vem apresentando um rápido crescimento de seu ambiente construído, alterando sua paisagem arborizada para uma paisagem artificial.

Neste contexto da alteração do meio ambiente, Costa *et al.* (2013) afirmam que o avanço do processo de urbanização traz consigo a deterioração do ambiente físico natural e assim tornando as condições de vida da população urbana, em muitos casos, difíceis e instáveis com influência nos aspectos térmicos, hidrológicos, entre outros.

Diversos autores têm estudado essas alterações da cobertura e uso do solo, principalmente nas regiões que apresentam crescimento urbano. Luchiarri (2011), por exemplo, destacou que o espaço urbano consiste em uma área carregada de artificialidade no qual apresenta fortes características urbanas, como: edificações, asfalto, concreto, e que essas modificações da cobertura do solo, geradas pelo homem, causam inúmeros problemas, em especial a absorção de calor. Por este prisma, Oke (1987) afirma que as superfícies urbanizadas alteram os processos do balanço de energia, demonstrando que através da mudança da cobertura do solo o fluxo de calor sensível é intensificado, isto é, quanto maior a absorção do calor, característico dos materiais urbanos, maior será o aquecimento da superfície, afetando diretamente sua temperatura.

Visto que as superfícies dos ambientes urbanos apresentam elevadas temperaturas, Gartland

(2010) elencou os principais motivos das superfícies urbanas serem mais quente em relação às superfícies rurais ou naturais, são eles: a) materiais utilizados nas construções urbanas, tais materiais por serem mais escuros, armazenam maior quantidade de calor; b) através da impermeabilização do solo e pela maioria dos materiais de construção serem resistente a água, o calor não consegue ser dissipado, pois os processos de evaporação não são ativados, justamente pelo fato da água da chuva ao entrar em contato com uma superfície impermeável não conseguir penetrar. Desse modo, é possível afirmar que a substituição de áreas de vegetação para áreas de solo exposto e/ou construções urbanas alteram drasticamente o meio ambiente e causam diversos problemas para os habitantes.

Neste contexto, Oliveira (2013) afirma que o principal gerador das grandes mudanças nas áreas urbanas é a atividade antropogênica. Concernente, Cordeiro (2016) e Amorim & Dubreuil (2017) relatam que na substituição de um ambiente natural por um ambiente urbano, ou seja, a substituição da vegetação por construções urbanas associadas às atividades humanas interfere no clima do ambiente, denominado clima urbano. Sendo assim, o homem interferindo no ambiente onde vive pode ocasionar alterações no microclima que por consequência afeta drasticamente a vida do homem. Portanto, é necessário investigar como a expansão urbana e as alterações da cobertura do solo intensificam a degradação do ambiente.

A ferramenta mais utilizada nos últimos anos para o estudo da cobertura terrestre é o sensoriamento remoto, que através da obtenção de imagens permite estimar diversos parâmetros e variáveis. Essa obtenção de dados é feita a partir dos sensores que são capazes de responder para cada faixa do espectro eletromagnético, e assim resultando em algo interpretativo, ou seja, um produto que possa ser entendido e compreendido.

Os sensores acoplados nos satélites Landsat-5 (*Thematic Mapper*) e Landsat-8 (*Operational Terra Imager/Thermal Infrared Sensor*) contêm uma série de resoluções que auxiliam em diversos estudos. Segundo a USGS (2019), a resolução espacial das

bandas termais dos satélites Landsat-5 e Landsat-8 são, respectivamente, de 120 e 100 metros. Já em relação à resolução temporal, tanto no satélite Landsat-5 quanto no satélite Landsat-8, ela é de 16 dias.

Dentre os variados estudos feitos a partir do sensoriamento remoto, temos, por exemplo, o de Pontes *et al.* (2017), que utilizam os sensores a bordo dos satélites Landsat-5 e Landsat-8 para analisar as características térmicas da superfície urbana da cidade de Belém. Nesse trabalho os autores verificaram o aumento da temperatura da superfície como consequência do processo de urbanização, densidade de edificações, concreto, entre outros materiais que auxiliam no aumento da retenção de calor.

Além da temperatura da superfície continental (TSC), existem índices espectrais que indicam características do solo e que podem estar diretamente relacionados com a TSC (Espinoza, 2017), que são eles: NDVI (Normalized Difference Vegetation Index / Índice de Vegetação por diferença Normalizada), NDBI (Normalized Difference Built-up Index/Índice de Área Construída por Diferença Normalizada). Cada um destes índices está associado com uma característica de cobertura do solo, como: vegetação (NDVI) e área com construções (NDBI). Vários pesquisadores já utilizam esses índices espectrais para variados estudos, um desses é o estudo realizado por Almeida *et al.* (2018) que teve como intuito verificar a cobertura vegetal nas áreas urbanas do estado de Pernambuco, a partir da determinação do NDVI utilizando imagens do sistema Landsat. Os autores observaram que as áreas urbanizadas possuem menor cobertura vegetal em relação às regiões circundantes (floresta, reflorestamento, uso agropecuário).

Em relação à análise do NDBI, Melos (2018) utilizou o índice para verificar e compreender a distribuição da malha urbana da cidade de Uruguaiana/RS. A autora observou em seus resultados, que o índice de área construída apresentou valores elevados (positivos) na região central da malha urbana da cidade com valores de 0,078. Segundo Melos (2018), valores positivos representam solo com área construída, solo exposto e áreas sem cobertura vegetal. A pesquisa da autora, através dos resultados obtidos, mostra que a aplicação do índice sensível à área

construída, auxilia e concede uma melhor análise da expansão urbana para estudos da distribuição espacial da alteração da cobertura do solo.

Não obstante, o trabalho realizado por Polydoros *et al.* (2018) para as cidades de Atenas/Grécia, Barcelona/Espanha, Cairo/Egito, Marselha/França e Roma/Itália, visando analisar e quantificar a TSC de cada cidade mediterrânea, indica tendências positivas, isto é, o aumento da TSC nas cinco cidades estudadas nos anos de 2000 a 2017. O estudo mostra que as cidades de Marselha e do Cairo apresentaram maiores valores de TSC, em comparação as demais cidades. Visto isso, a análise da distribuição da TSC e dos índices pode indicar a possível influência das atividades antropogênicas no espaço urbano e no meio ambiente.

Sendo assim, o presente estudo tem como objetivo analisar o padrão da TSC a partir da distribuição espacial da cobertura do solo, com o uso de índices espectrais (NDVI, NDBI) e da taxa de refletividade (albedo) por meio de técnicas de sensoriamento remoto.

2 Material e Métodos

2.1. Área de Estudo

O objeto de estudo desta pesquisa é a área urbana do município de Belém (Figura 1), localizada no estado do Pará, região Norte do território brasileiro, situada na latitude 01° 23' S e longitude 048° 29' O. De acordo com o IBGE, sua extensão tem aproximadamente 1.060 Km², com uma população estimada no ano de 2017 de 1.452.275 pessoas e densidade demográfica de 1.315,26 hab./Km². No estudo em questão, o enfoque é a mancha urbana de Belém que possui uma área de 184 Km². Foram excluídas da presente pesquisa as ilhas e áreas rurais que fazem parte da demarcação territorial do município de Belém.

Neste estudo, a malha urbana da cidade de Belém está dividida em 4 setores: Zona norte, área militar, centro urbano e parque ecológico Utinga. Essa divisão foi feita para um melhor entendimento dos resultados.

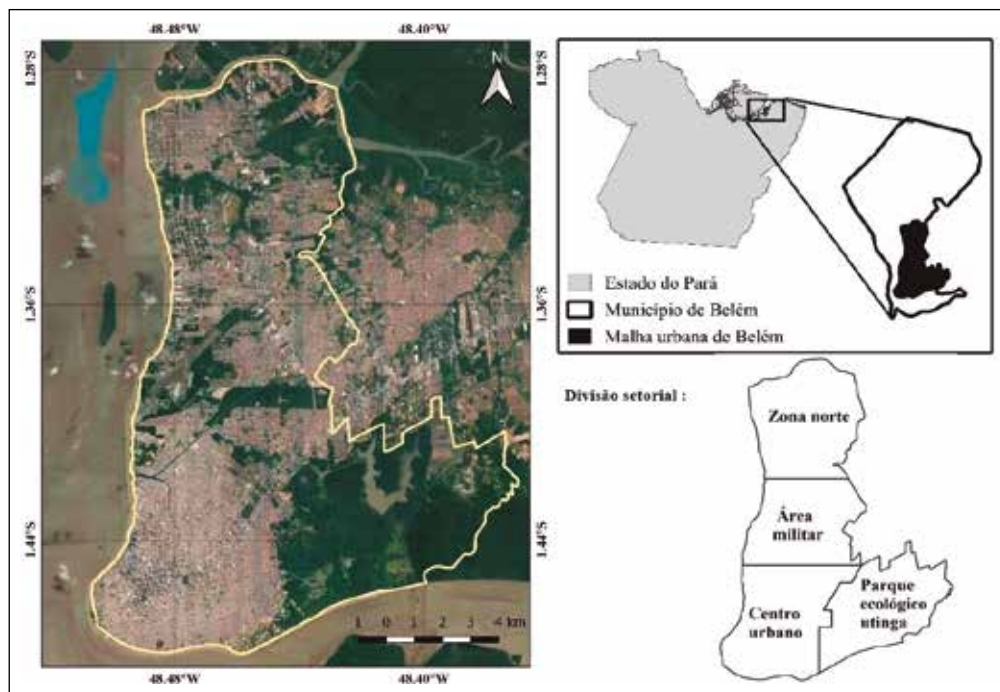


Figura 1 Localização geográfica da área de estudo. (Fonte: Autor, 2019)

2.2 Processamento dos Dados

No presente estudo foram utilizadas imagens dos satélites Landsat-5 (sensor TM) e Landsat-8 (sensores OLI/TIRS) adquiridas no sítio do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) para os anos de 1994, 2008 e 2017. As imagens obtidas foram relativas aos meses de junho e julho, devido às condições serem favoráveis em termos de nebulosidade, isto é, nessa época do ano é mais frequente a ocorrência de céu claro. As informações e especificações de cada imagem estão dispostas na Tabela 1:

Datas	Órbita	Ponto	Horário Central (UTC)	Hora Local (Brasília)	Ângulo de Elevação do Sol
21/06/1994	223	61	12:41	09:41	46,2
13/07/2008	223	61	13:09	10:09	51,8
06/07/2017	223	61	13:22	10:22	53,3

Tabela 1 Informações fornecidas pelo metadados das imagens.

As análises foram feitas a partir da reamostragem de todas as bandas para a resolução espacial de 120 metros. Posteriormente, foi realizada a extração dos centroides representativos dos setores censitários, resultando em 1.252 pontos distribuídos sob a malha urbana do município de Belém-PA, em que cada amostra representa o valor do pixel referente

à camada (*raster*) da imagem. Todo o processamento foi realizado no ambiente SIG do software QGIS 3.0.0.

Para análise estatística foram utilizados scripts em ambiente R (Development Core Team, 2018) e módulos do mesmo com funções específicas para análises. Tanto o software estatístico R, quanto o QGIS são livres e disponibilizados gratuitamente.

Landsat-5

No processamento das imagens a calibração radiométrica é feita calculando a radiância espectral de cada banda ($L_{\lambda i}$) proposta por Markham & Baker (1987), pela Equação 1.

$$L_{\lambda i} = a + \left(\frac{b-a}{255} \right) \times ND \quad (1)$$

em que: $L_{\lambda i}$ é a radiância espectral das bandas; a e b são as radiâncias espectrais mínima e máxima; ND é a intensidade do pixel que tem um intervalo de 0 a 255 e i corresponde às bandas do Landsat 5.

A reflectância ou refletividade de cada banda ($\rho_{\lambda i}$) é definida pela razão entre o fluxo de radiação solar refletido e o fluxo de radiação solar incidente,

sendo obtida para o Sistema Landsat-5 pela Equação 2, de acordo com Allen *et al.* (2002):

$$\rho = \frac{L_\lambda \times \pi}{K_\lambda \times \cos Z \times d_r} \quad (2)$$

em que: L_λ é a radiância espectral de cada banda, K_λ é a irradiância solar espectral de cada banda no topo da atmosfera ($Wm^{-2}\mu m^{-1}$), Z é o ângulo zenital solar e d_r é a distância relativa Terra-Sol que equivale a 1.

Para a determinação do albedo de superfície, é necessário obter o albedo sem ajuste atmosférico, ou seja, o albedo planetário (α_{toa}), que é obtido a partir das reflectâncias monocromáticas das bandas de acordo com a Equação 3:

$$\alpha_{toa} = (0,293 \times \rho_1) + (0,274 \times \rho_2) + (0,233 \times \rho_3) + (0,157 \times \rho_4) + (0,033 \times \rho_5) + (0,011 \times \rho_7) \quad (3)$$

em que: os valores de cada constante (pesos) são determinados pela razão da irradiância de cada banda pela somatória das irradiâncias.

Em seguida, calcula-se o albedo da superfície, assim como em Tasumi *et al.* (2008), de acordo com a Equação 4:

$$\alpha_{sup} = \frac{\alpha_{toa} - \alpha_{atm}}{\tau_{sw}^2} \quad (4)$$

em que: α_{atm} é a porção da radiação solar refletida pela atmosfera, e de acordo com Bastiaanssen *et al.* (2000) emprega-se o valor de 0,03. τ_{sw}^2 é a transmitividade atmosférica para céu claro, que de acordo com Allen *et al.* (2002) pode ser dada pela Equação 5:

$$\tau_{sw} = 0,75 + 2 \times 10^{-5} \times z \quad (5)$$

em que: z representa a topografia ou altitude, em metros, de cada pixel.

Landsat-8

Para a obtenção da reflectância para as imagens do sistema Landsat-8, a partir dos sensores OLI/TIRS, é necessário apenas converter o número digital (ND) em reflectância expressa pela Equação 6:

$$\rho_{\lambda,b} = \frac{H_\rho \times Q_{CAL} + A_\rho}{\cos(\theta_{SE})} \quad (6)$$

em que: $\rho_{(\lambda,b)}$ é a reflectância, é o redimensionamento multiplicativo específico de cada banda (2^{-5} , constante), A_ρ é o fator aditivo (-0,1), Q_{CAL} é o valor digital ou número digital (ND) e θ_{SE} é o ângulo azimutal, de acordo com Equação 7:

$$\theta_{SE} = 90 - \theta_{SZ} \quad (7)$$

em que: θ_{SZ} é o ângulo de elevação do sol, disponibilizado nos metadados.

Para a determinação do Albedo da superfície é necessário antes calcular o Albedo planetário (α_{toa}) através da combinação entre as reflectâncias de cada banda ($\rho_{\lambda,b}$) com seus respectivos pesos ($\varpi_{\lambda,b}$), apresentado pela Equação 8:

$$\alpha_{toa} = \sum ((\varpi_b \times \rho_{\lambda,b})) \quad (8)$$

em que: cada peso (ϖ_b) é calculado a partir da razão entre a constante solar específica de cada banda ($ESUN_{\lambda,b}$) e a somatória de todas as constantes de radiação ($\sum ESUN_{\lambda,b}$).

Logo, calcula-se o albedo da superfície ou albedo corrigido (α_{sup}) utilizando as mesmas expressões já citadas para o Landsat-5 (Equação 4).

2.3. A Atmosfera dos Dias das Imagens

As condições atmosféricas para cada dia das imagens estão diretamente relacionadas com o horário que cada imagem foi captada, todas no período da manhã. Tais condições, para todas as imagens, foram de céu claro ou com pouca nebulosidade, e de acordo com o Instituto Nacional de Meteorologia sem ocorrência de precipitação nos horários anteriores e posteriores a captação das imagens.

2.4 Estimativa da Temperatura da Superfície Continental (TSC)

Para a obtenção da TSC foram utilizadas as imagens da banda termal do sensor TM do satélite Landsat-5 (banda 6) e TIRS do Landsat-8 (banda 10). Os processos e equações para se obter a temperatura da superfície são semelhantes e os mesmos serão descritos abaixo.

Tanto no Landsat-5, quanto no Landsat-8, o primeiro passo para se estimar a TSC é determinar a radiância espectral da banda termal. Porém, para o Landsat-5 a equação utilizada para se determinar a radiância já foi descrita na Equação 1, e para o Landsat-8 a expressão utilizada para se obter a radiância da banda termal é dada pela Equação 9:

$$L_{\lambda 10} = M_L \times Q_{cal} + A_L \quad (9)$$

em que: $L_{\lambda 10}$ é a radiância da banda termal; M_L é o fator de reescalonamento multiplicativo específico igual $3,342 \times 10^{-4} \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$; Q_{cal} é o valor do pixel; e A_L é o fator de reescalonamento aditivo específico igual 0,1.

O segundo passo é calcular a emissividade (ϵ_{NB}). Então, com a obtenção desses dois processos pode-se estimar a temperatura da superfície. Entretanto, para estimar a emissividade é necessário obter o índice de área foliar (IAF) e para calcular o IAF é necessário obter o índice de vegetação ajustado ao solo (IVAS) que tem como finalidade amenizar os efeitos do solo, através da Equação 10:

$$IVAS = \frac{(1 + L) \times (\rho_{IV} - \rho_V)}{(L + \rho_{IV} + \rho_V)} \quad (10)$$

em que: L é um fator de ajuste do solo, que varia de 0,25 para presença de vegetação densa, 0,5 com densidade de vegetação intermediária e 1 para baixa densidade de vegetação (Huete, 1988). Sendo o valor empregado para este estudo igual a 0,5.

O IAF é definido pela razão da área total de folhas contidas na vegetação ou em dado pixel pela área utilizada por essa vegetação ou pela área do pixel. A razão de se calcular esse índice é devido ao mesmo estar presente na expressão da emissividade. O IAF é representado pela Equação 11:

$$IAF = - \frac{\ln\left(\frac{0,69 - SAVI}{0,59}\right)}{0,91} \quad (11)$$

A emissividade (ϵ_{NB}) é introduzida no espectro da banda termal em função de cada pixel não emitir radiação eletromagnética como um corpo negro. De acordo com Allen *et al.* (2002), a emissividade pode ser obtida, caso NDVI < 0 e IAF < 3, pela Equação 12:

$$\epsilon_{NB} = 0,97 + 0,0033 \times IAF \quad (12)$$

em que: ϵ_{NB} é a emissividade; IAF é o índice de área foliar. Para os pixels que apresentam $IAF \geq 3$, $\epsilon_{NB} = 0,98$; e para áreas urbanas $NDVI < 0,2$, $\epsilon_{NB} = 0,92$ (Nichol, 2009).

A TSC, é obtida a partir da Equação 13:

$$T_{SC} = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{\epsilon_{NB} K_1}{L_{\lambda termal}} + 1\right)} \quad (13)$$

sendo: K_1 ($607,76 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$) e K_2 (1260,56 K) constantes da banda termal do Landsat-5 e para o Landsat-8, $774,89 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}$ e 1321,08 K, respectivamente.

2.5 Determinação dos Índices Espectrais

No estudo foram utilizados alguns índices para verificar a possível relação deles com a temperatura da superfície. Para obtenção desses índices utiliza-se uma metodologia validada em vários estudos. O NDVI (Rouse *et al.*, 1973) e NDBI (Zha *et al.*, 2003) são índices que são utilizados para caracterizar o uso do solo e estudar as relações entre uso do solo e a temperatura da superfície. O NDVI estimado a partir da Equação 14 é um índice de vegetação da diferença normalizada, isto é, esse índice é utilizado para expressar a densidade da vegetação (Purevdorj *et al.*, 1998). Os valores desse índice variam de -1 a +1; no qual para solo com vegetação os valores variam de 0 a 1 e para corpos hídricos (lagos, leito de rios etc) apresentam valores negativos (< 0).

$$NDVI = \frac{(\rho_{IVP} - \rho_{VRM})}{(\rho_{IVP} + \rho_{VRM})} \quad (14)$$

em que: ρ representa a radiância em unidades de reflectância de cada banda, IVP (infravermelho próximo), VRM (vermelho) e IVM (infravermelho médio).

Outro índice introduzido no presente estudo foi o NDBI, esse é sensível à área construída, e expresso pela Equação 15 (Zha *et al.*, 2003). Para esse índice o intervalo varia de -1 a +1, em que valores positivos representam áreas construídas e/ou impermeabilizadas e valores negativos representam áreas com cobertura vegetal.

$$NDBI = \frac{(d_{IVM} - d_{IVP})}{(d_{IVM} + d_{IVP})} \quad (15)$$

De acordo com Chen *et al.* (2006) esses índices podem ser usados para classificar diferentes classes de cobertura do solo (vegetação, área construída, entre outros). Os valores dos índices variam para diferentes tipos de cobertura do solo, e os mesmos não são constantes.

3 Resultados e Discussão

Os resultados a seguir apresentam a distribuição espacial da TSC, do albedo, do NDBI e do NDVI. Como ressaltado anteriormente, pelo fato da reamostragem de 120 metros, ou seja, a piora da resolução espacial, os dados de análise possuem ruídos devido ao tamanho do pixel ter sido aumentado.

Na Figura 2 apresenta-se a distribuição espacial da TSC dos anos de 1994, 2008 e 2017, onde se observa o aumento da TSC no espaço e tempo da área de estudo. É possível notar, que na imagem do ano de 1994, existem na zona norte e no parque ecológico pontos com valores de aproximadamente 25,0 °C. Tais valores podem ser ruídos gerados pela piora da resolução ou algum aspecto físico do local (ex: solo exposto, solo desmatado). Analisando os intervalos dos valores da TSC no setor centro urbano verifica-se que na imagem de 1994 os valores estão entre 16,0 e 25,0 °C; na imagem de 2008 o intervalo é entre 22,0 e 30,0 °C e na imagem de 2017 os valores estão entre 24,5 e 36,5 °C, demonstrando que a área do centro urbano obteve uma elevação na TSC proveniente da modificação gerada pelo processo de urbanização.

Na zona norte, nota-se uma uniformidade entre as imagens de 1994 e de 2008, com valores entre 19,0 °C e 24,0 °C. Entretanto, observa-se nessa região uma intensa expansão urbana no período de 2008 a 2017 e conseqüentemente o aumento da TSC. Isso indica que a expansão urbana e o crescimento populacional urbano são um dos principais indicadores para a elevação da TSC da zona norte.

Não muito diferente da zona norte, a área militar não apresentou grande diferença de TSC entre os anos de 1994 e 2008. Porém, nesse setor apontou

o aumento nos valores de TSC, principalmente devido à ampliação e reforma do aeroporto internacional da cidade (1,38°S/ 48,48°O) no final dos anos 1990 e meados dos anos 2000. Essa reforma gerou alterações da cobertura do solo e também intensificou o desenvolvimento das áreas vizinhas do aeroporto e, conseqüentemente o crescimento habitacional. Portanto, a intensificação das implementações de residências e condomínios, acarretou o aumento da TSC do setor, indicando que além da substituição de uma paisagem natural para uma paisagem artificial, existe também o efeito das atividades antropogênicas na variação dos valores da TSC.

Outra área analisada é a do parque ecológico Utinga, na qual se observa que nos anos de 1994 e 2008, os valores de TSC variaram entre 18,0 °C e 20,0 °C, mostrando a baixa interferência humana na área em questão. Entretanto, na imagem de 2017 os valores de TSC são de aproximadamente 25,0 °C, demonstrando que o crescimento populacional urbano se intensificou.

De forma geral, analisando a distribuição espacial da TSC (Figura 2), é viável afirmar que a alteração da cobertura do solo, a intensificação do processo urbano e o crescimento populacional urbano, influenciam diretamente no aumento da TSC. Portanto, os próximos resultados abordam o impacto e a influência do processo/expansão urbana e da deterioração do ambiente natural na elevação da TSC.

De acordo com a distribuição espacial do albedo (Figura 3), pode-se observar que no ano de 1994 a média dos valores é de 0,1, principalmente nas áreas que apresentam maior cobertura vegetal, como é o caso dos setores do parque ecológico, da área militar e da zona norte, demonstrando que na década de 90 a cidade de Belém, em termos de edificações e de áreas construídas, ainda apresentava um fraco processo de urbanização.

Na imagem referente ao ano de 2008, houve o aumento da taxa de refletividade, principalmente no setor do centro urbano. Isso indica que houve a intensificação do processo urbano e, conseqüentemente, o aumento dos valores de albedo em decorrência dos materiais empregados nas construções urbanas. Nos outros setores, os valores do albedo apresenta-

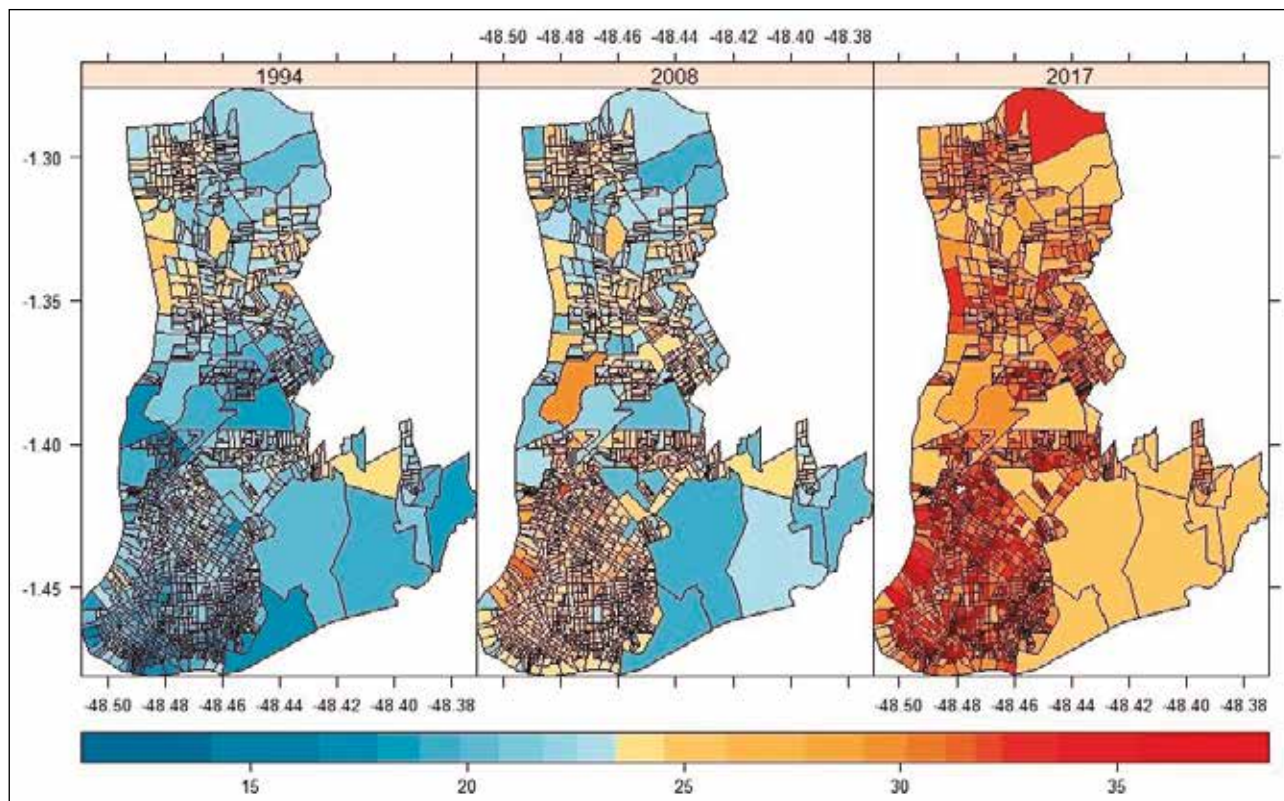


Figura 2 Mapa da temperatura da superfície continental nos anos de 1994, 2008 e 2017. (Fonte: Autor, 2019)

ram pouca variação em comparação com os valores da imagem de 1994, pois nestas áreas o processo urbano ainda se encontra em crescimento e expansão territorial.

Na imagem de 2017 verifica-se a intensificação generalizada da expansão urbana por toda a malha urbana de Belém, registrando valores de albedo acima de 0,5 no centro urbano e a diminuição da densidade de vegetação na área militar. É importante ressaltar que valores elevados de albedo em regiões urbanas caracterizam a diminuição da cobertura vegetal. Assim como visto no ano de 2008, houve uma intensa expansão urbana da zona norte, restando apenas o parque ecológico Utinga como área de densa vegetação.

As cidades mais urbanizadas apresentam maiores valores de albedo, devido aos materiais empregados na construção dessa paisagem artificial apresentarem forte grau de refletividade. Este resultado está de acordo com Llopart *et al.* (2018), que verificaram o uso e cobertura do solo na região

amazônica e o impacto dessa alteração no clima local da região. Os autores observaram que a retirada de áreas vegetadas é a principal causa do aumento do albedo. Além do aumento do albedo o estudo de Llopart *et al.* (2018) mostrou que o saldo de radiação é afetado, pois com a retirada da cobertura vegetal diminui o fluxo de calor latente e aumenta significativamente o fluxo de calor sensível.

A expansão urbana (em termos de área construída) foi bastante intensa a partir dos anos 2000, e apesar dos ruídos gerados pela piora da resolução espacial, os valores de NDBI (Figura 4) mostram o intenso crescimento de área construída. Esse crescimento é verificado ao se analisar as imagens dos anos de 1994 e 2008, em que é possível observar a intensificação das construções urbanas no intervalo de 14 anos. Já para o ano de 2017 o índice de área construída, não apresenta um bom desempenho com a utilização dos sensores do Landsat-8, como será visto adiante.

Na imagem de 1994, observa-se que a malha urbana da cidade de Belém já está em processo de

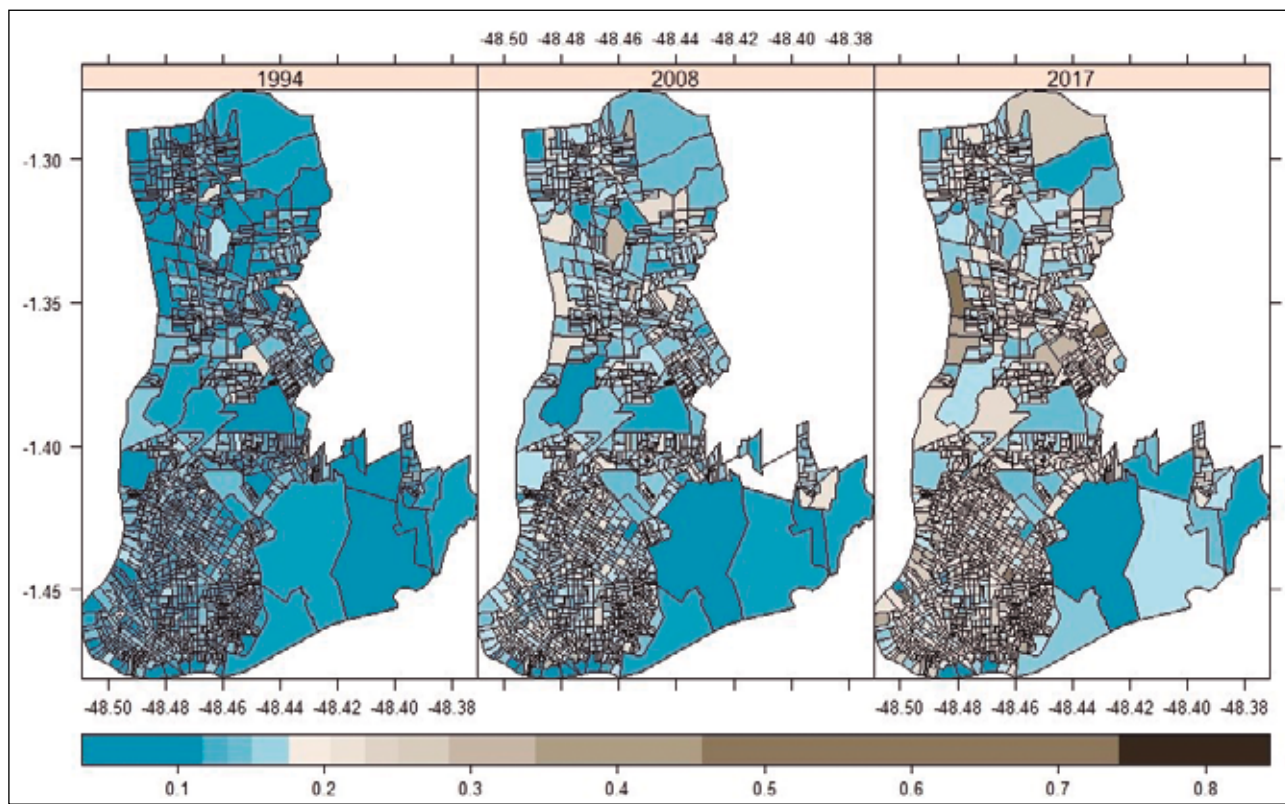


Figura 3 Mapa da distribuição espacial do albedo. (Fonte: Autor, 2019)

expansão urbana, pois a área em que se caracteriza o centro urbano apresenta maior densidade de edificações e maior densidade demográfica, com valores acima de 0,3, cujos valores positivos denotam presença de área construída. Visto isso, é possível afirmar que as áreas construídas acarretam um desequilíbrio no balanço de energia local, ou seja, os materiais empregados nas áreas urbanas provocam maior aquecimento tanto da superfície continental, quanto da camada da atmosfera mais próxima da superfície.

Em relação à área militar, a região apresenta menor expansão urbana com valores inferiores a zero de NDBI (<0), devido a essa área ser uma reserva militar e por isso apresentar forte presença de cobertura vegetativa. Entretanto, nessa mesma área, existem valores positivos de NDBI, tais valores estão diretamente ligados com o início do surgimento de residenciais e condomínios privativos característicos dessa região. No tocante à zona norte verifica-se a ausência, em grande parte, de áreas construídas, demonstrando que nessa região no ano de 1994 ainda se iniciava o processo de ocupação e de expansão

urbana. Outro setor analisado é o parque ecológico, em que se observa a manutenção e a preservação do mesmo, apresentando valores menores que zero (<0), resultando na ausência de área construída.

Na imagem de 2008 verifica-se a intensificação da expansão urbana, principalmente no setor centro urbano, onde houve a expansão das áreas construídas com valores, aproximadamente, de 0,4, indicando a substituição da paisagem natural para uma paisagem artificial e consequentemente, o crescimento da malha urbana. No setor da área militar, observa-se o aumento nos valores de NDBI diretamente associado com a ampliação do aeroporto internacional de Belém que impulsionou o desenvolvimento, gerando o crescimento populacional da área em questão. Não obstante, a zona norte também apresentou relativo aumento nos valores de NDBI, demonstrando que a expansão territorial está diretamente associada com o número de habitantes. Por consequência, devido a atividade antropogênica nessa área, observam-se impactos severos, principalmente na TSC.

O setor que apresentou menores valores de NDBI (< 0) foi a área do parque ecológico, pois neste setor apresenta, em sua maioria, grande cobertura vegetal. Entretanto, em certos pontos mostram valores positivos de NDBI, alertando que esta área já apresentava uma expansão urbana e alteração da cobertura do solo. Neste sentido, é possível afirmar que a cidade de Belém apresentou um intenso crescimento urbano no intervalo de 14 anos (1994 – 2008).

Como ressaltado anteriormente, a imagem gerada para o ano de 2017 não apresentou um bom desempenho, devido a piora da resolução espacial para 120 metros, e consequentemente apresentando ruídos no resultado. Além disso, de acordo com o estudo realizado por Costa *et al.* (2017), os valores de NDBI oriundos do Landsat-8, apresentam baixo desempenho em áreas urbanas que apresentam uma diversificação da cobertura do solo, isto é, diversidade na vegetação, forte presença de corpos d'água impedem uma boa eficiência do índice sensível à área construída utilizando imagens do Landsat-8. Portanto, a imagem de 2017 apresenta uma homogeneização nos valores, em todas as áreas.

Como supracitado, nota-se que a malha urbana de Belém apresentou intenso processo urbano, através dos valores do índice sensível à área construída (NDBI). Logo, houve a substituição de áreas verdes (cobertura vegetal) por áreas construídas (cobertura urbana). Dessa forma, na Figura 5 é apresentada a distribuição espacial do índice de vegetação (NDVI) que tem como intuito analisar o desenvolvimento urbano de Belém, através da cobertura do solo.

Dentre as imagens, é possível verificar que o ano de 1994 é o que apresenta maiores valores de NDVI, isto é, presença de vegetação em todas as áreas da malha urbana de Belém. Na zona norte, os valores variam de 0,2 a 0,9, ratificando que em 1994, na zona norte, ainda se iniciava a expansão urbana, apresentando baixa degradação do ambiente natural. Sendo assim, a fraca intensidade da expansão urbana na zona norte de Belém e a permanência da cobertura vegetal, contribuem para os baixos valores da TSC.

Nos setores da área militar e parque ecológico Utinga, nota-se valores de NDVI acima de 0,0, de-

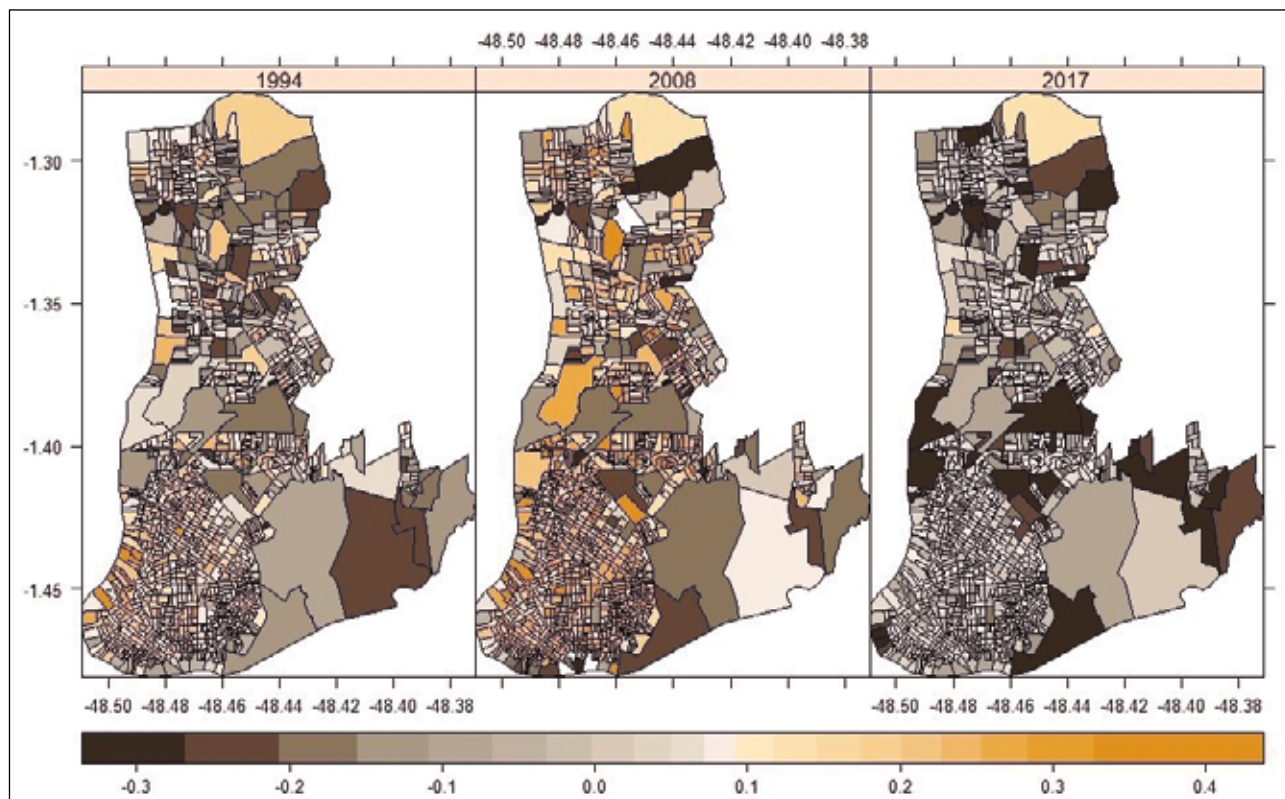


Figura 4 Mapa da distribuição espacial do NDBI. (Fonte: Autor, 2019)

monstrando que a cobertura do solo mais vegetado ainda era uma forte característica espacial da cidade de Belém em 1994. Em contraponto, o setor centro urbano já apresenta uma cobertura com características urbanas, visto que os valores negativos de NDVI representam ausência de vegetação, indicando que esse setor foi a primeira área da cidade de Belém a sofrer a substituição da cobertura do solo, ou seja, o processo de urbanização iniciou-se no setor centro urbano.

Na imagem de 2008, observa-se a evolução do espaço urbano a partir da diminuição da cobertura vegetal, principalmente nos setores com intensa vegetação, como: zona norte e área militar. É notável que a degradação ou retirada de áreas verdes são características do processo de urbanização, que trazem consequências como é o caso do aumento de temperatura do ar e da TSC. A zona norte e a área militar já apresentam valores de NDVI inferiores aos da imagem de 1994, demonstrando uma forte variação espacial e temporal do índice, indicando que na

imagem de 2008 houve o crescimento urbano e suas características de habitações e edificações.

No setor do centro urbano, nota-se que houve a intensificação da retirada de áreas de vegetação, com valores superiores a 0,0, denotando que o centro urbano é o que apresenta forte influência no aumento da TSC. Em contrapartida, a região do parque ecológico é a área que ainda mantém maior cobertura vegetal, auxiliando no conforto térmico nas áreas circundantes a mesma. Neste viés, o balanço de energia é afetado, principalmente o fluxo de calor latente (mudança de estado físico), pois a diminuição do processo de evapotranspiração, através da retirada de áreas de vegetação, intensifica o fluxo de calor sensível (aquecimento).

Na imagem do ano de 2017 é possível notar que a diminuição da cobertura vegetal ainda está ocorrendo, sendo diretamente associada com a expansão urbana e crescimento populacional, principalmente na zona norte, área militar e nas extremidades da área do parque ecológico, justamente locais que ainda apresentam espaço para expansão e de habitação.

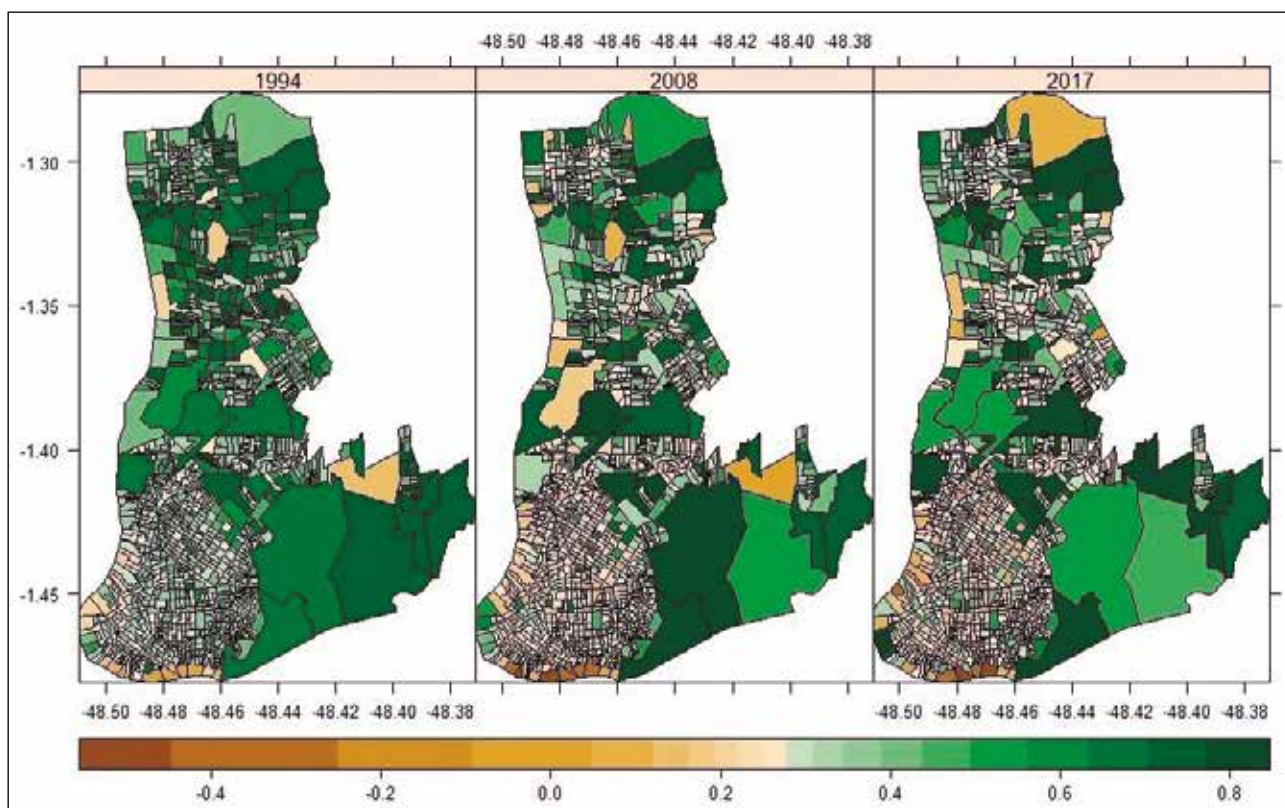


Figura 5 Mapa da distribuição espacial do NDVI. (Fonte: Autor, 2019)

4 Conclusões

A partir dos resultados obtidos no presente trabalho, pôde-se concluir que a TSC apresentou intensificação na distribuição espacial e temporal, cujos valores aumentaram de acordo com o desenvolvimento urbano da região. Logo, é possível relacionar os materiais empregados no ambiente urbano com o aumento da TSC. Nesse contexto, as áreas de construções urbanas (NDBI) apresentaram elevados valores, demonstrando que houve a intensificação da expansão urbana e sendo assim, ratifica a relação direta do processo de urbanização da cidade de Belém com o aumento da TSC.

Em contrapartida, nas áreas em que há maior presença de vegetação (NDVI > 0) se encontram os menores valores de TSC da malha urbana de Belém, como são os casos da área militar e, principalmente, a região do parque ecológico do Utinga, comprovando que a permanência e preservação de áreas verdes minimizam os efeitos da expansão urbana na TSC. Portanto, as maiores diferenças nos valores de TSC ocorrem quando se comparam áreas de grandes fragmentos de vegetação com áreas de pouco fragmentos de vegetação.

Os resultados são proveitosos e satisfatórios, mas apresentam limitações, uma delas é na obtenção das imagens para a localidade de Belém/PA, devido a região norte apresentar forte processo de convecção, isto é, grande presença de nuvens praticamente todo o ano, requerendo uma maior atenção e dificultando uma melhor análise temporal. Outra limitação do estudo é a sazonalidade, ou seja, o presente estudo foi realizado através de imagens capturadas apenas nos meses de inverno.

Visto isso, o estudo tem também suas vantagens e contribuições, uma delas é que os órgãos competentes precisam urgentemente de um planejamento de desenvolvimento urbano mais sustentável. O estudo também mostra que há uma possível alteração no clima local do município de Belém provocada pela ação antropogênica.

Para sugestões de pesquisas futuras a serem realizadas a partir deste trabalho, aconselha-se a aplicar a metodologia do estudo em outras cidades,

preferencialmente nas cidades brasileiras localizadas na região norte do Brasil. Além disso, buscar o aprofundamento da pesquisa para criar mecanismos socioambientais, com intuito de melhorar o planejamento urbano da cidade de Belém/PA.

5 Agradecimentos

Os autores agradecem à Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) pela estrutura cedida e também a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro ao programa de Pós-Graduação em Meteorologia (PPGMET), bem como ao Grupo de Pesquisa em Geotecnologias e Modelagem de Risco Ambiental da UFCG.

6 Referências

- Allen R.G.; Tasumi, M.; Trezza, R. & Bastiaanssen, W. 2002. SEBAL (Surface Energy Balance Algorithms for Land), Idaho Implementation: *Advanced Training and User's Manual*. NASA EOSDIS/Raytheon Company/Idaho Department of Water Resources, 97p.
- Almeida, D.N.O.; Oliveira, L.M.M.; Candeias, A.L.B.; Bezerra, U.A. & Souza Leite, A.C. 2018. Uso e cobertura do solo utilizando geoprocessamento em municípios do Agreste de Pernambuco. *Revista Brasileira de Meio Ambiente*, 4(1): 58-68.
- Amorim, M. C. C. T.; Dubreuil, V. 2017. A interferência da precipitação na intensidade e na distribuição espacial das ilhas de calor de superfície nas estações do ano em ambiente tropical. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, XVIII, 1314-1320.
- Bastiaanssen, W.G.M. 2000. SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. *Journal of Hydrology*, 229:87-100.
- Chen, X.L.; Zhao, H.M.; Li, P.X. & Yin, Z.Y. 2006. Remote sensing image-based analysis of the relationship between urban heat island and land use/cover changes. *Remote Sensing of Environment*, 104 (2):133-146.
- Cordeiro, M. C. 2016. *Ilhas de calor urbanas no nordeste brasileiro: Uma avaliação com base em imagens de satélite*. Programa de Pós-graduação em Meteorologia, Universidade Federal de Campina Grande, Dissertação de Mestrado, 70p.
- Costa, E. C. P.; Augusto, R. C.; Seabra, V. S. 2017. Análise da eficiência dos índices Built-up e NDBI para classificação de áreas urbanas em imagens Landsat 8 OLI. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, XVIII, 6632-6639.
- Costa, A.C.L.; Cunha, A.C.; Uchoa, P.W.; Silva Junior, J.A. & Feitosa, J.R.P. 2013. Variações termo-higrométricas e influências de processo de expansão urbana em cida-

- de equatorial de médio porte. *Brazilian Geographical Journal: geosciences and humanities research medium*, 4:615-632.
- Espinoza, N.S. 2017. *Avaliação da ilha de calor urbana em Manaus com dados observados IN SITU e sensoriamento remoto*. Programa de Pós-graduação em Meteorologia, Universidade Federal de Campina Grande, Dissertação de Mestrado, 54p.
- Gartland, L. 2010. *Ilhas de calor: como mitigar zonas de calor em áreas urbanas*. São Paulo: Oficina de textos. 248p.
- Huete, A.R.A. 1988. Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25(3):205-309.
- Llopart, M.; Reboita, M.; Coppola, E.; Giorgi, F.; Rocha, R. & Souza, D. 2018. Land use change over the Amazon Forest and its impact on the local climate. *Water*, 10 (2):149p.
- Luchiari, A. 2011. Identificação da cobertura vegetal em áreas urbanas por meio de produtos de sensoriamento remoto e de um sistema de informação geográfica. *Revista do Departamento de Geografia (USP)*, 14:47-58.
- Markham, B.L. & Barker, J.L. 1987. Thematic mapper band pass solar exoatmospherical irradiances. *International Journal of Remote Sensing*, 8 (3):517-523.
- Melos, N.D. 2018. *Índice de qualidade urbana do município de Uruguaiana-RS por análises de geoprocessamento*. Especialização em Geomática, Universidade de Santa Maria. Trabalho de conclusão de curso, 50p.
- Nichol, J. 2009. An emissivity modulation method for spatial enhancement of thermal satellite images in urban heat island analysis. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 75(5):547-556.
- Oke, T.R. 1987. *Boundary layer climates*. 2. ed. [s.l.] Routledge. 464p.
- Oliveira, M.; Alves, W. S. 2013. A influência da vegetação no clima urbano de cidades pequenas: um estudo sobre as praças públicas de Iporá-GO. *Revista Territorial*, 2(2): 61-77.
- Polydoros, A.; Mavrakou, T.; Cartalis, C. 2018. Quantifying the trends in land surface temperature and surface urban heat island intensity in mediterranean cities in view of smart urbanization. *Urban Science*, 2(1): 16p.
- Pontes, A.K.S.; Silva, P.V.C.; Santos, J.T.S. & Sousa, A.M.L. 2017. Temperatura em superfície urbanas usando sensor TIRS-Landsat 5 e 8: estudo de caso em Belém-PA. *Revista Brasileira de Iniciação Científica*, 4:118-132.
- Purevdorj, T.S.; Tateishi, R.; Ishiyama, T. & Honda, Y. 1998. Relationships between percent vegetation cover and vegetation indices. *International Journal of Remote Sensing*, 19:3519-3535.
- Rouse, J.W.; Haas, R.H.; Schell, J.A. & Deering, D.W. 1973. *Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS*, In: 3RD EARTH RESOURCES TECHNOLOGY SATELLITE SYMPOSIUM, 1:309-317.
- Tasumi, M.; Allen, R.G.; Trezza, R. & Wright, J.L. 2008. Satellite-Based Energy Balance to Assess Within-population Variance of Crop Coefficient Curve. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 131(1):95-108.
- United States Geological Survey – USGS, 2019. Landsat 8 (L8) Data Users Handbook. Disponível em: <https://landsat.usgs.gov/>. Acesso 20 maio de 2019.
- Zha, Y. & Gao, J.N.I.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.