

ARTIGO ORIGINAL

Análise temporal de ilhas de calor utilizando processamento de imagens de satélite: estudo de caso Rio Branco, Acre

Temporal analysis of heat islands using satellite image processing: case study Rio Branco, Acre

Emili Silva Bezerra^{id},¹, Salomão Mafalda^{id},¹, Ana Beatriz Alvarez^{id},¹, Roger Fredy Larico Chavez^{id},¹

¹Universidade Federal do Acre

*emilisilva23@gmail.com; salomaomachadon@gmail.com; ana.alvarez@ufac.br; roger.chavez@ufac.br

Recebido: 21/11/2022. Revisado: 04/04/2023. Aceito: 25/04/2023.

Resumo

Ilha de calor é um fenômeno que ocorre em cidades, ocasionando um aumento considerável da temperatura da região em relação a suas regiões vizinhas. Este artigo apresenta a análise temporal da temperatura de superfície do solo, conhecida como LST (*Land Surface Temperature*), e do índice de vegetação normalizada diferenciada NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) no intuito de aferir o surgimento de ilhas de calor a partir do processamento digital de imagens na cidade de Rio Branco, capital do estado do Acre, no período de 2000 a 2020. Para a análise, foram utilizadas imagens digitais geradas pelo do satélite Landsat-5 e Landsat-8. As etapas presentes no modelo SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithms for Land*) estão sendo aplicadas para cálculo da temperatura e do índice de vegetação a partir das bandas obtidas com as imagens dos satélites. Os resultados encontrados para o NDVI indicam um decréscimo de 1,08% na vegetação média/densa quando comparados índices dos anos de 2000 e 2020, os resultados também evidenciam um aumento da temperatura média da superfície de cerca de 14,97%, principalmente devido a diminuição de áreas verdes, crescimento urbano desordenado e impermeabilização do solo devido ao revestimento asfáltico. Portanto, estes fatores contribuíram para o aparecimento de Ilhas de Calor, especificamente na área analisada é possível notar o surgimento de uma Ilha de Calor localizada no centro da cidade de Rio Branco.

Palavras-Chave: Ilhas de Calor; Landsat; índice de vegetação; sensoriamento remoto; temperatura da superfície.

Abstract

Heat island is a phenomenon that occurs in cities, causing a considerable increase in the temperature of the region in relation to neighboring areas. The objective of this article is the temporal analysis of the soil surface temperature, known as LST (*Land Surface Temperature*), and the NDVI Normalized Difference Vegetation Index (*Normalized Difference Vegetation Index*), in order to assess the emergence of heat islands from digital image processing in the city of Rio Branco, capital of Acre state, from 2000 to 2020. For this purpose, digital images generated by the Landsat-5 and Landsat-8 satellite were used. The steps present in the SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithms for Land*) model were applied to calculate the temperature and the vegetation index from the bands obtained with the satellite images. The results found for the NDVI indicate a decrease of 1.08% in medium/dense vegetation when comparing the years 2000 and 2020, the results also show an increase of 14.97% on the average temperature surface, mainly due to the reduction of green areas, disorderly urban growth and soil impermeability due to the asphalt coating. Therefore, these factors contributed to the appearance of Heat Islands, specifically in the analyzed area it is possible to notice the emergence of a Heat Island located in the center of the city of Rio Branco.

Keywords: Heat islands; Landsat; vegetation index; remote sensing; surface temperature.

1 Introdução

A urbanização tem se tornado uma das questões mais críticas no século 21. Diversos problemas como o aumento de consumo de energia (Franco et al., 2017), o desmatamento (Michishita et al., 2012), a baixa qualidade da água (Krause et al., 2004) e a perda significativa da qualidade de vida são alguns dos problemas causados pela urbanização (Fujimoto e Ross, 2001).

Uma região que está em processo de urbanização tende a ser significativamente afetada pelas mudanças climáticas. Mudanças climáticas causadas, principalmente, pela perda das regiões verdes e o aumento de regiões permeáveis cobertas por cimento, asfalto e concreto, por exemplo, este fenômeno é conhecido como Ilhas de Calor Urbana (ICU) (Marcotullio et al., 2021; Athukorala e Murayama, 2021).

Segundo Nóbrega e de Bakker Vital (2010), as ICU ocorrem a medida que há aumento da temperatura no ar nas cidades quando comparadas às zonas menos urbanizadas em sua vizinhança. Normalmente, acontece no centro das cidades, onde as construções formam um conjunto denso e compacto, por vezes chamados de Cânions Urbanos.

São fatores que favorecem a formação das ICU: a poluição do ar; fontes antrópicas de calor, como a queima de combustíveis fósseis e uso intenso de equipamentos elétricos; a alteração na cobertura vegetal; o tipo de cobertura da superfície (presença de asfalto, construções que utilizam materiais com demasiada absorção de radiação solar); e a distribuição da verticalização urbana (formato geométrico irregular dos edifícios nas cidades afeta os padrões de radiação solar e ventos) (Nóbrega e de Bakker Vital, 2010; Jensen e Epiphany, 2009).

Os estudos para identificação das ICU estão se tornando cada vez mais comuns e, o sensoriamento remoto tem sido umas das técnicas mais disseminadas no meio científico na detecção de temperatura e investigação de padrões na superfície do solo (Marcotullio et al., 2021; Najafzadeh et al., 2021; Zhou et al., 2018; Voogt e Oke, 2003).

A captação de dados através do infravermelho termal de um satélite permite a realização de estudos do comportamento térmico das diferentes tipologias de cobertura do solo pelo fornecimento de informações relativas à LST (Barbosa e Vecchia, 2009).

Assim, nota-se que, as imagens de satélite são amplamente utilizadas para a identificação das ICU. O satélite utiliza a relação entre a radiação eletromagnética emitida e a refletida dos alvos, onde é possível extrair e identificar parâmetros que influenciam diretamente na temperatura da área observada (Chen et al., 2006; Gallo et al., 1995; Peng et al., 2012). A relação que envolve a reflectância e a radiação provém do fato da radiação ser um valor obtido de sensores que captam a densidade de fluxo por meio da propagação entre o elemento da área da superfície terrestre analisada e o sensor, enquanto que a reflectância é a relação entre a energia proveniente da irradiância e a radiação, onde ambas grandezas são determinadas na mesma faixa do espectro eletromagnético (Barbosa et al., 2019).

As imagens obtidas pelos satélites são compostas por pixels. Estes pixels dispõem de atributos numéricos conhecidos como DN (*Digital Number*), que representam a intensidade da radiação eletromagnética refletida ou emitida na

superfície terrestre, e estão associados ao nível de cinza da célula, podendo variar entre as cores preto e branco, onde, esta variação decorre em detrimento dos objetos presentes na região examinada, por exemplo, a presença de água, construções, solo, vegetação, entre outros (Quartaroli et al., 2014; Zhou et al., 2018).

Todos estes processos foram criados em virtude do sensoriamento remoto, ferramenta esta revolucionária no campo da cartografia. dos Santos Martins e Becker (2014) afirmam que a Cartografia Digital proporciona novas perspectivas de trabalho no meio computacional, pois, os dados georreferenciados coletados de superfícies terrestres utilizam-se dos conhecimentos cartográficos já conhecidos.

Neste artigo serão utilizados, o NDVI e LST para analisar o surgimento de ilhas de calor na cidade de Rio Branco estado do Acre. As imagens satelitais utilizadas foram captadas pelo satélite Landsat-5, para os anos de 2000 e 2010, e Landsat-8, para o ano de 2020. O processamento das imagens, foi realizado utilizando o Software MatLab®2022, onde são processadas e analisadas imagens de uma área do centro da cidade afim de estipular a presença de ilhas de calor.

2 Trabalhos Relacionados

Nesta seção são descritas as pesquisas mais relevantes, atuais, e que relatam a utilização de métodos semelhantes para o cálculo do NDVI e LST no intuito de analisar os fenômenos que ocorreram na superfície terrestre de suas respectivas áreas de estudo.

Nova et al. (2021) realizaram uma análise temporal de ilhas de calor através da temperatura de superfície e do índice de vegetação na cidade de Recife do estado de Pernambuco, no período de 1989 a 2019. Os materiais utilizados foram os satélites Landsat 5 e 8, bandas multiespectrais e o modelo SEBAL. Verificou-se que a cidade do Recife sofreu um crescimento de 34% nas temperaturas acima de 33,01°C, enquanto que os índices de vegetação pertencentes a classe de solo exposto sofreu variação em torno de 21%.

Por outro lado, Souto e Cohen (2021) utilizaram dados de satélite MODIS e Landsat, e avaliaram técnicas estatísticas para estimar a variação da temperatura da superfície terrestre durante as estações chuvosas e menos chuvosas. Os resultados revelaram que as regiões de intensa urbanização resultaram em uma diminuição do índice de vegetação por diferença normalizada e aumento da temperatura da superfície terrestre.

No trabalho de Cavalcante et al. (2020), foi realizada uma análise entre os anos de 1992 e 2005, para a Temperatura de superfície de solo, o índice de vegetação e o relevo de áreas industriais presentes no município de São Paulo/SP, a partir das imagens do Landsat-5, diferente do visto nos trabalhos de Nova et al. (2021); Souto e Cohen (2021) que utilizaram dois satélites. Percebeu-se que a temperatura mínima para o ano de 1992, foi de 16,8 °C, tendo uma máxima de 37,0 °C e média de 26,58 °C e no ano de 2006, a temperatura mínima alcançou 10,8 °C e máxima de 42,9 °C, com média de 28,8 °C. Os autores concluíram que, as zonas mais baixas, com pouca ou quase nenhuma vegetação, apresentam valores de temperaturas

mais elevadas.

Já [Athukorala e Murayama \(2021\)](#) utilizaram métodos semelhantes aos de [Nova et al. \(2021\)](#); [Cavalcante et al. \(2020\)](#); [Souto e Cohen \(2021\)](#), porém eles levaram em consideração as temperaturas de superfície terrestre diurna e noturna para a formação de ilhas de calor do Grande Cairo nos anos de 2000, 2010 e 2019. No estudo foi utilizado imagens adquiridas pelo satélite Landsat-5 e 8. Foi observada a importância do aumento da cobertura vegetal e a redução das superfícies impermeáveis para mitigar o fenômeno de ilhas de calor no Grande Cairo. Este estudo se difere dos demais pois utiliza o *Google Earth Engine (GEE)* e técnicas de aprendizado de máquina para conduzir a análise espaço-temporal.

As limitações presentes nos artigos mencionados acima consistem na captura dos dados pelos satélites, a escolha das estações para análise é de extrema importância, pois elas determinam o nível de ruído ocasionado pelas nuvens e sombra de nuvens presentes nas imagens satelitais. As técnicas e métodos utilizadas nos artigos, foram a base para a execução da análise realizada e apresentada neste artigo.

3 Materiais e Métodos

3.1 Área de Estudo

A área de estudo escolhida faz parte de uma das capitais de estado da região norte do Brasil, Rio Branco é a capital do estado do Acre e, fica localizada a $9^{\circ} 58' 26''$ Sul de latitude e $67^{\circ} 48' 27''$ Oeste de longitude, como mostra a [Fig. 1](#). Segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE¹), Rio Branco possui 419.452 habitantes, com crescimento populacional de 24,8 % nos últimos 10 anos, em uma área territorial de 8.835,154 km² gerando uma densidade demográfica de 38,03 hab/km².

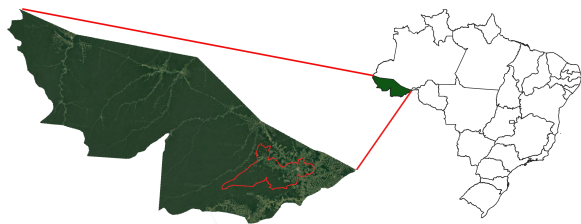


Figura 1: Localização da região de estudo, em destaque imagens de satélite da cidade de Rio Branco do estado de Acre

De acordo com [Amaral et al. \(2021\)](#), em Rio Branco, o período seco, geralmente, ocorre entre os meses de junho a agosto, com as menores médias mensais em agosto atingindo valores de 52,6 mm de precipitação pluvial. As temperaturas médias variam de 24,2 °C a 27,3 °C, sendo mais amenas no período de seca e mais altas no período de chuvas. Em virtude dessa característica climática da

região, nesta pesquisa, as imagens adquiridas tem preferência aos meses do período de seca, afim de captar o mínimo de interferência de massas de ar nas imagens.

A área escolhida pertence à cidade de Rio Branco, e considera parte do centro da cidade onde há pouca vegetação devido à expansão urbana e o crescimento populacional. A área possui tamanho de 330km². O centro da cidade é o núcleo urbano baseado em significado geográfico e socioeconômico. A [Fig. 2](#) mostra a área de estudo destacada pelo polígono vermelho.



Figura 2: Localização da área de estudo

3.2 Aquisição dos Dados

Uma vez definida a área de estudo, é necessária a coleta de imagens. Para isso foram utilizadas imagens capturadas pelos satélites, esta seção esclarece os processos realizados para a aquisição dos dados presentes na pesquisa.

As imagens utilizadas, foram capturadas pelos satélites Landsat-5 e Landsat-8 que são parte do Programa Landsat, lançados através da cooperação entre a USGS (United States Geological Survey) e a NASA (National Aeronautics and Space Administration).

Os dados temporais dos anos 2000, 2010 e 2020 foram utilizados para a análise de ilhas de calor e índice de vegetação ao longo dos anos. As imagens foram obtidas através do servidor online do Serviço Geológico Americano – *EarthExplorer*² no formato “geotiff”. Foram utilizadas as bandas multi-espectrais do espectro vermelho, infravermelho próximo e a do infravermelho termal.

Por fim, foram obtidas imagens das bandas 3, 4 e 6 do Landsat-5, com cobertura de nuvens inferior à 50%, para os anos de 2000 e 2010. Adicionalmente, foram utilizadas as bandas 4, 5 e 10 do Landsat-8, com cobertura de nuvens inferior à 50%, para o ano de 2020. A [Tabela 1](#) apresenta uma breve especificação das imagens utilizadas.

3.3 Métodos

Conforme apresentado por [Allen et al. \(2002\)](#) e por [Nova et al. \(2021\)](#), foi utilizado o modelo SEBAL (*Surface Energy Balance Algorithms for Land*) para mensurar de forma instantânea as componentes do balanço de energia através

¹<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/ac/rio-branco.html>

²<https://earthexplorer.usgs.gov/.html>

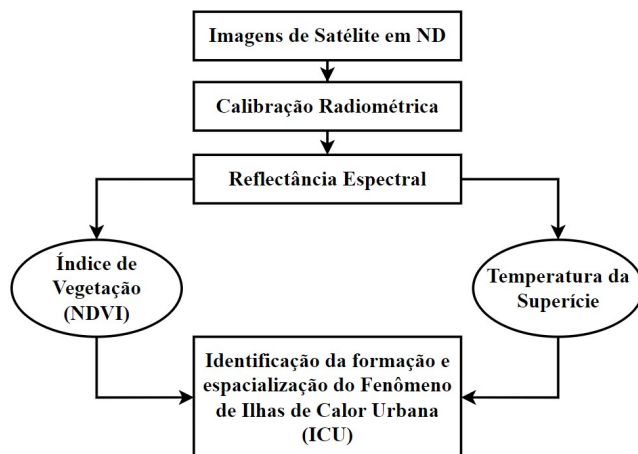
Tabela 1: Breve especificação das imagens de satélite usadas para análise da área de estudo.

Fonte	Bandas	Número de Imagens	Imagem ID	Data
Landsat 5 TM	3, 4 e 6	4	LT05_L1TP_002067_20000727_20200907_02_T1	27/07/2000
			LT05_L1TP_002067_20100723_20200823_02_T1	23/07/2010
Landsat 8 OLI	4, 5 e 10	2	LC08_L1TP_002067_20200718_20200911_02_T1	21/07/2020

do sensoriamento remoto, buscando medir o fluxo da evapotranspiração, para cada *pixel*.

Para gerar informações como emissividade, temperatura de superfície, NDVI, SAVI, IAF, por exemplo, no modelo SEBAL são implementadas trinta e quatro etapas em seu processamento. Todavia, para a análise temporal das ICU, são implementadas apenas algumas etapas, de modo a utilizar o modelo SEBAL não somente para o cálculo da energia superficial, mas também para obtenção e extração de resultados oriundos de etapas intermediárias (Bastiaanssen, 1995; Moreira, 2014; Nova et al., 2021).

A Fig. 3 mostra as etapas adotadas nesta análise. Onde, a partir das imagens de satélite em número digitais (ND) é realizado a calibração radiométrica para gerar a reflectância para cada banda da imagem, assim, o índice de vegetação e a temperatura de superfície são calculados a partir dessa reflectância. Por fim, foi analisado a correlação entre o índice de vegetação e a temperatura de superfície, que são úteis na identificação da formação e espacialização do fenômeno de Ilhas de Calor.

**Figura 3:** Etapas do modelo SEBAL utilizadas no processamento das imagens

3.3.1 Calibração Radiométrica e Reflectância Espectral

A determinação da radiância é um passo fundamental para a transformação nos dados de imagens de vários sensores e plataformas em uma escala radiométrica. Esse processo inicia-se com a geração dos produtos de Nível 1 (L1), no qual, o cálculo dos *pixels* com valor de produto do Nível 0 (L0), valor bruto, tem seus dados convertidos em unidade de radiância absoluta usando pontos flutuantes de 32 (trinta e dois) bits. Por fim, os valores absolutos de radiância são dimensionados para dados em 8 (oito) bits e, dessa maneira, tornam-se números digitais calibrados antes da

saída para a distribuição da mídia (Chander e Markham, 2003).

Dessa forma, para o cálculo da radiância espectral de cada banda, o número digital de cada *pixel* da imagem é convertido em radiância espectral monocromática. A radiância representa a energia solar refletida por cada *pixel*, por unidade de área, tempo, ângulo sólido e comprimento de onda, medida a nível do satélite Landsat, para as bandas 1, 2, 3, 4, 5 e 7, enquanto a banda 6 para referida radiância representa a energia emitida por cada *pixel*. Markham e Barker (1987) propuseram a fórmula para o cálculo da radiância do satélite Landsat-5, conforme a Eq. (1).

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

Onde:

$L_{\lambda i}$ = Radiância espectral de cada banda em $Watts/(m^2 \times sr \times \mu m)$

a = Radiâncias espectrais mínimas

b = Radiâncias espectrais máximas

ND = Valor quantizado calibrado pelo *pixel* em ND

i = Corresponde às bandas do satélite Landsat 5 – TM.

A Tabela 2 apresenta os fatores de redimensionamento para o cálculo de radiância das imagens do satélite Landsat-5 para as bandas 3, 4 e 6.

Nas imagens do satélite Landsat-8 só se faz necessário a calibração radiométrica da banda 10 (infravermelho termal). Para isto, Silva et al. (2016) propuseram a Eq. (2).

$$L_{\lambda} = M_L \times ND + A_L \quad (2)$$

Onde:

L_{λ} = Radiância Espectral $Watts/(m^2 \times sr \times \mu m)$

M_L = Fator multiplicativo de redimensionamento espectral por banda

ND = Valor quantizado calibrado pelo *pixel* em ND

A_L = Fator de redimensionamento aditivo específico por banda

Tabela 2: Descrição das bandas do Mapeador Temático (TM) do Landsat-5 com os coeficientes de calibração (radiância mínima – a e máxima – b).

Bandas	Coeficientes de Calibração		$k_{\lambda i}$
	a	b	
1 (azul)	-1.52	193	1957
2 (verde)	-2.84	365	1829
3 (vermelho)	-1.17	264	1557
4 (IV-próximo)	-1.51	221	1047
5 (IV-médio)	-0.37	30.2	219.3
6 (IV-termal)	1.2378	15.303	219.3
7 (IV-médio)	-0.15	16.5	74.52

As variáveis dos fatores de redimensionamento para o cálculo de radiância das imagens do Landsat-5 e Landsat-8, são disponibilizadas nos metadados das imagens.

A reflectância monocromática de cada banda representa a razão entre o fluxo de radiação refletida por cada banda e o fluxo de radiação incidente, sendo determinada pela Eq. (3) para o Landsat 5 e pela Eq. (4) para o Landsat 8 (Allen et al., 2002; Bastiaanssen, 1995; Silva et al., 2016).

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

$$\rho_{\lambda i} = \frac{M_p \times ND + A_L}{\cos(Z) \times \frac{1}{d^2}} \quad (4)$$

Onde:

$\rho_{\lambda i}$ = Reflectância monocromática de cada banda

$L_{\lambda i}$ = Radiância espectral de cada banda em Watts / ($m^2 \times sr \times \mu m$)

$k_{\lambda i}$ = Irradiação solar espectral, de cada banda, no topo da atmosfera Watts/($m^2 \times \mu m$)

Z = Ângulo de elevação do sol (graus)

ND = Valor quantizado calibrado pelo pixel em ND

d = Inverso do quadrado da distância relativa Terra-Sol e a distância Terra-Sol, em dado dia do ano (unidades astronômicas)

M_p = Fator de escala multiplicativo da reflectância para cada banda

A partir da aplicação dos valores da reflectância é possível obter, o Índice de Vegetação de Diferença Normalizada (NDVI) e a temperatura de superfície.

3.3.2 Índice de Vegetação por Diferença Normalizada

O NDVI é um indicador que destaca a vegetação, pois a partir dele é determinado a relação entre a absorção da radiação espectral na banda do vermelho pela clorofila presente nas células vegetais e a reflectância das folhas na região do infravermelho próximo. A Eq. (5) apresenta o cálculo do NDVI (Purevdorj et al., 1998; Tucker et al., 1986).

$$NDVI = \frac{\rho_{IV} - \rho_V}{\rho_{IV} + \rho_V} \quad (5)$$

Onde:

ρ_{IV} = Reflectância da banda do infravermelho próximo

ρ_V = Reflectância da banda do vermelho

Para o Landsat-5, foi utilizado reflectância da banda 4 do infravermelho próximo e reflectância da banda 3 do vermelho, enquanto que, para o Landsat-8 utilizou-se a reflectância da banda 5 do infravermelho próximo e a reflectância da banda 4 do vermelho. Foram adotadas 5 classes temáticas que estipulam diferentes tipos de situação do solo com os intervalos de NDVI identificados, como é indicado na tabela Tabela 3 (Bezerra et al., 2018).

3.3.3 Temperatura de Superfície

Bastiaanssen e Bakker (2000) definiram o cálculo da tem-

Tabela 3: Classes do NDVI para o uso e ocupação de solo

Classes Temáticas	Intervalo NDVI
Água	<0
Solo Exposto	0 a 0.2
Vegetação Baixa	0.2 a 0.4
Vegetação Média	0.4 a 0.6
Vegetação Densa	0.6 a 0.8

peratura de superfície como a relação entre a radiância espectral da banda termal do satélite operado e a emissividade, dada pela Eq. (6)

$$T_S = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{\varepsilon_{NB} \times K_1}{L_{\lambda}} + 1\right)} \quad (6)$$

Onde:

T_S = Temperatura de superfície

K_1, K_2 = Constantes de calibração da banda termal

ε_{NB} = Emissividade

L_{λ} = Radiância espectral em Watts/($m^2 \times sr \times \mu m$)

Os valores das constantes de calibração das bandas termal utilizadas estão disponíveis nos metadados das imagens utilizadas, os mesmos seguem na Tabela 4.

Tabela 4: Constantes de calibração para a banda termal do Landsat-5 e Landsat-8

Constante	K1 Watts/($m^2 \times sr \times \mu m$)	K2 (K)
Landsat 5	607.76	1260.56
Landsat 8	774.89	0.1

Para Allen et al. (2002), a emissividade é obtida através da razão entre a energia emitida pela superfície de uma determinada matéria e a energia emitida pelo corpo negro na mesma temperatura. Logo, a determinação da emissividade de cada pixel no domínio espectral da banda termal é dada pela Eq. (7).

$$\varepsilon_{NB} = 0,97 + 0,0033 \times IAF \quad (7)$$

Onde:

ε_{NB} = Emissividade

IAF = Índice de área foliar

O Índice de Área Foliar (*Leaf Area Index*) é um indicador da biomassa em cada pixel da imagem que é definido pela razão entre a área foliar de toda a vegetação por unidade de área utilizado por essa vegetação. O IAF é obtido pela Eq. (8) (Allen et al., 2002).

$$IAF = \frac{\ln\left(\frac{0,69 - SAVI}{0,59}\right)}{0,91} \quad (8)$$

Onde:

IAF = Índice de área foliar

$SAVI$ = Índice de Vegetação Ajustado para os Efeitos do Solo

O SAVI (*Soil Adjusted Vegetation Index*) é um índice utilizado para suavizar os efeitos de “background” do solo,

este é calculado em função do tipo de solo de acordo com a Eq. (9) Huete (1988).

$$SAVI = \frac{(1 + L) \times (\rho_{IV} - \rho_V)}{(L + \rho_{IV} + \rho_V)} \quad (9)$$

Onde:

SAVI = Índice de vegetação ajustado para os efeitos do solo

L = Fator de ajuste em função do tipo do solo

Segundo Tasumi (2003), o valor da constante para o tipo de solo da região compreendida pela América Latina é 0,5.

4 Resultados e Discussão

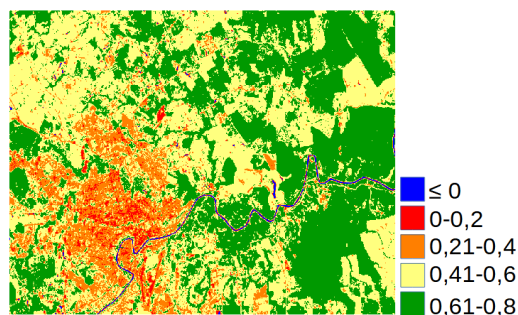
A Fig. 4 mostra as cartas temáticas geradas para o NDVI nos anos de 2000, 2010, 2020. Afim de proporcionar uma melhor visualização dos dados obtidos, foi realizada uma separação por cores, na qual os valores do NDVI inferiores a zero são assinalados em azul, valores entre 0 a 0,2 em vermelho, de 0,21 a 0,4 em laranja, 0,41 a 0,6 em amarelo e 0,61 a 0,8 em verde, todos estes valores e cores são dispostos na legenda da figura.

Percebe-se visualmente que ao longo dos anos o NDVI entre 0 e 0,2 caracterizado em vermelho, se torna mais evidente, este comportamento também se repete para valores entre 0,21 a 0,4 em laranja. Porém, os índices no intervalo entre 0,61 e 0,8, em verde, tornam-se maiores, o que pode indicar um possível aumento deste tipo de cobertura vegetal.

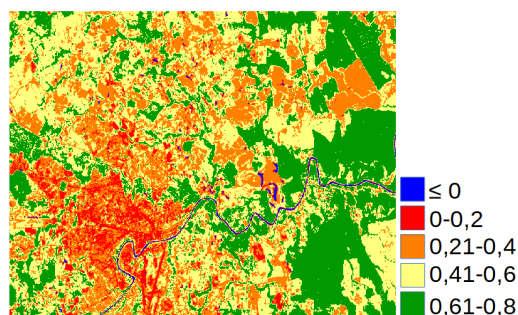
A Tabela 5 apresenta, de forma completa, os dados relacionados às classes temáticas do NDVI, e suas respectivas proporcionalidades em relação a área estudada. Pode-se destacar, que para o ano de 2020 houve um decréscimo de 1,08% na vegetação média/densa, quando comparadas aos anos anteriores analisados. Enquanto que, a área de solo exposto aumentou de 7 km² em 2000 para 11,64 km² em 2020.

Dessa forma, é possível observar que o NDVI mudou significativamente conforme o avanço da urbanização durante o período de tempo estudado. Vale ressaltar que as imagens dos anos de 2020 foram obtidas pelo Landsat-8, um satélite superior ao Landsat-5, que capturou as imagens dos anos de 2000 e 2010, e talvez haja algum tipo de interferência nos dados adquiridos para o NDVI durante a troca dos satélites.

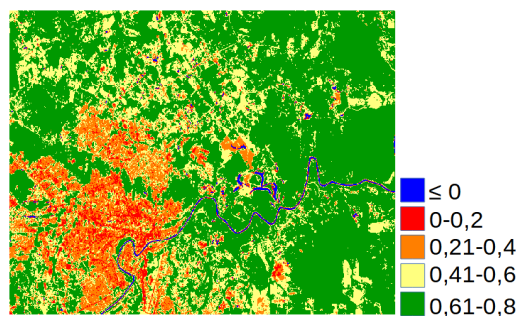
A Fig. 5 apresenta informações a respeito da temperatura de superfície de solo na área de estudo nos anos de 2000, 2010 e 2020. Nela os dados foram dispostos através de cores como é ilustrado na legenda da figura, onde va-



(a) NDVI - 2000



(b) NDVI - 2010



(c) NDVI - 2020

Figura 4: Classificação temática do Índice de Vegetação Normalizada Diferenciada para a área de estudo nos anos de 2000, 2010 e 2020

lores inferiores a 23,00 °C são assinalados em amarelo, os valores entre 23,01 a 27,00 °C em salmão, de 27,01 a 29,00 °C em laranja, de 29,01 a 32,00 °C em vermelho e valores superiores a 32,00 °C em bordô. Percebe-se que, como os dados em amarelo não são vistos para o ano de 2020, e as cores mais quentes vão aumentando e se concentrando no centro da cidade.

Ainda na Fig. 5 nota-se que houve uma grande varia-

Tabela 5: Mudança do solo da área de estudo.

Classe Temáticas	2000		2010		2020	
	Área (m ²)	Porcentagem (%)	Área (m ²)	Porcentagem (%)	Área (m ²)	Porcentagem (%)
Água	1.82	0.55	2.20	0.66	2.97	0.90
Solo exposto	7.00	2.12	19.40	5.88	11.64	3.53
Vegetação baixa	41.87	12.70	87.34	26.46	39.70	12.03
Vegetação média	141.23	42.80	121.66	36.90	75.23	22.80
Vegetação densa	138.08	41.83	99.40	30.10	200.48	60.75

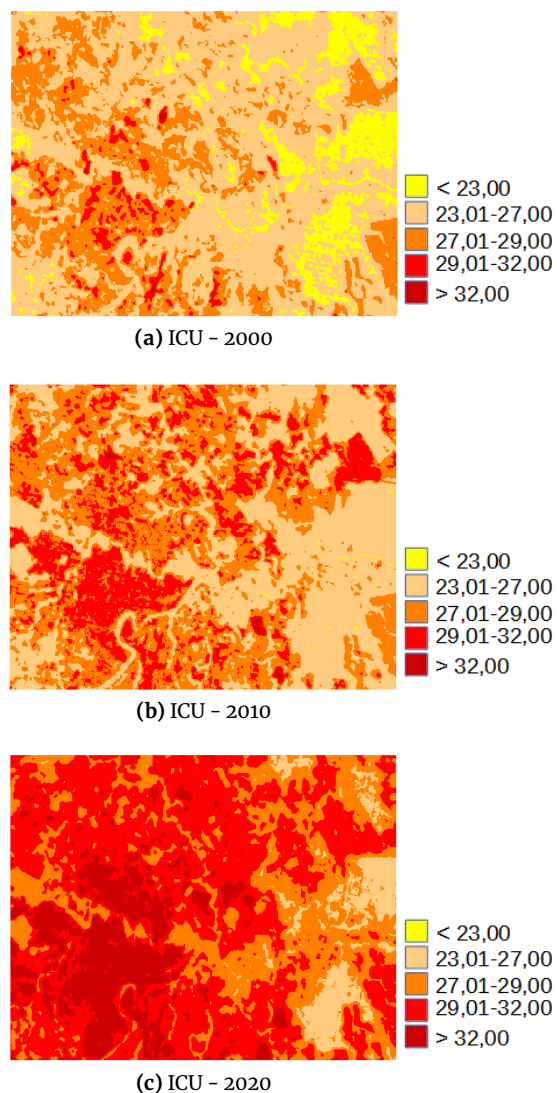


Figura 5: Temperatura de superfície de solo para a área de estudo nos anos de 2000, 2010 e 2020

ção da temperatura durante as duas últimas décadas. Visualmente percebe-se que as regiões onde ocorreram o aumento da temperatura, estão demarcadas por locais afetados pela expansão urbana, principalmente no centro da cidade.

Ao realizar uma comparação entre Fig. 5a, Fig. 5b e Fig. 5c, observa-se que há uma concentração de temperatura no centro da cidade em relação a regiões vizinhas no ano de 2010 caracterizando o fenômeno de Ilhas de Calor, vale ressaltar que esse comportamento se agrava no ano de 2020.

A Tabela 6 contem as informações da análise da carta de temperatura. É possível identificar a predominância da classe de temperaturas de 23,01 a 27,00 (°C), no ano de 2000. Para o ano de 2010 a temperatura predominante estava no intervalo de 27,01 a 29,00 (°C) indicando um aumento de aproximadamente de 14% em relação ao ano de 2000. No ano de 2020 a classe de temperatura predomi-

nante foi a de 29,01 a 32,00 (°C), apontando um aumento de 44,99% e 29,14% em relação aos anos de 2000 e 2010, respectivamente.

Tabela 6: Mudança da temperatura na área de estudo

Temperatura (°C)	2000	2010	2020
<23	11.80%	0.11%	0.00%
23,01 a 27,00	58.03%	39.70%	6.84%
27,01 a 29,00	27.00%	41.00%	28.95%
29,01 a 32,00	3.07%	18.92%	48.06%
>32,00	0.10%	0.27%	16.15%
Media (°C)	25.97	27.43	29.86

A temperatura média para os anos de 2000, 2010 e 2020 foi de 25,97 °C, 27,43 °C e 29,86 °C, respectivamente. Indicando um aumento de 7% da temperatura a cada década.

Por outro lado, ao analisar as temperaturas entre os anos de 2000 e 2020, percebe-se a extinção das temperaturas inferiores a 23 °C, o decréscimo nas temperaturas entre 23,01 a 25,00 °C de 51,19%, o aumento das temperaturas entre 27,01 a 29,00 de 1,95%, o intenso crescimento das temperaturas entre 29,01 a 32,00 °C de 44,99% e nas temperaturas superiores a 32 °C houve um acréscimo de 16,05%.

5 Conclusão

Foi realizada uma análise temporal das Ilhas de Calor para o município de Rio Branco no período de 2000, 2010 e 2020, utilizando imagens dos satélites Landsat-5 e 8. O processamento dos dados da pesquisa foi realizado através do software MatLab, no qual foi calculado o NDVI e a temperatura de superfície do solo.

Durante as duas décadas analisadas foi possível notar um aumento crescente nos valores de temperatura de superfície. Ao compararmos o ano inicial e final da pesquisa, a temperatura média aumentou em 14,97%, esta mudança se dá em virtude da expansão urbana e a alteração da vegetação na região.

No que diz respeito aos valores obtidos para o NDVI, temos um comportamento inverso ao visto na temperatura, pois os resultados obtidos neste parâmetro apontam um decréscimo de 1,08% na vegetação média/densa quando comparamos os valores do ano de 2020 e seus predecessores, assim dizendo houve uma gradual perda na vegetação da cidade de Rio Branco. Deve se levar em consideração que não houve uma mudança considerável entre o ano inicial e final como ocorreu na temperatura em relação ao NDVI, uma das possíveis explicações seja devido a troca de satélites.

Com base na análise realizada é possível notar o surgimento de uma Ilha de Calor localizada no centro da cidade de Rio Branco, área conhecida regionalmente como “Gamelreira” lugar onde se iniciou a urbanização da cidade. Ocorreu um aumento significativo da temperatura conforme a vegetação diminuiu. Como a população de Rio Branco ainda é considerada pequena, quando comparamos com a cidade de São Paulo por exemplo, a região ainda possui muita vegetação e em virtude disso ainda é viável fazer um planejamento urbano para que a população cresça

coexistindo com a vegetação.

Agradecimentos

Agradeço meus familiares e amigos por estarem presentes durante toda minha jornada acadêmica, quero agradecer a mim mesma por acreditar em mim, por fazer este trabalho, por nunca desistir, por sempre contribuir, por tentar fazer mais o certo do que o errado, e por sempre ser eu.

Meu muito obrigada a Prof. Dr. Ana Beatriz Alvarez Mamani, o Prof. Dr. Roger Fredy Larico Chavez e o Mrs. Salomão Mafalda por todos os conselhos, pela ajuda e paciência com a qual guiaram o meu aprendizado. Ao Projeto P & D PAVIC-LAB, por fornecer a infraestrutura necessária para o desenvolvimento desta pesquisa. Às pessoas com quem convivi ao longo dos anos da minha formação, que me incentivaram e que certamente tiveram impacto na minha formação acadêmica.

Referências

- Allen, R. G., Bastiaansen, W. G. M., Wasters, R., Tasumi, M. e Trezza, R. (2002). Surface energy balance algorithms for land (sebal), *Idaho implementation – Advanced training and user's manual*. v. 1.0.
- Amaral, E. F. d., Martorano, L. G. e Bardales, N. G. (2021). Clima do acre e cultivo da seringueira., *Embrapa Acre- Capítulo em livro científico (ALICE)*. Available at https://www.researchgate.net/publication/353995485_Clima_do_Acre_e_Cultivo_da_Seringueira.
- Athukorala, D. e Murayama, Y. (2021). Urban heat island formation in greater Cairo: spatio-temporal analysis of daytime and nighttime land surface temperatures along the urban–rural gradient, *Remote Sensing* 13(7): 1396. <https://doi.org/10.3390/rs13071396>.
- Barbosa, C. C. F., de Moraes Novo, E. M. L. e Martins, V. S. (2019). *Introdução ao sensoriamento remoto de sistemas aquáticos: princípios e aplicações*, Vol. 1, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
- Barbosa, R. V. R. e Vecchia, F. A. d. S. (2009). Estudos de ilha de calor urbana por meio de imagens do Landsat 7 ETM+: estudo de caso em São Carlos (SP), *Revista Minerva*. <https://repositorio.usp.br/item/002144142>.
- Bastiaansen, W. e Bakker, M. (2000). Use of satellite data in agricultural water management, *Embrapa Semiárido. Petrolina*.
- Bastiaansen, W. G. M. (1995). *Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain: A remote sensing approach under clear skies in Mediterranean climates*, Wageningen University and Research.
- Bezerra, P. E. S., Moraes, E. d. e Soares, I. d. C. (2018). Análise da temperatura de superfície e do índice de vegetação no município de Belém na identificação das ilhas de calor, *Revista Brasileira de Cartografia* 70(3): 803–818. <https://doi.org/10.14393/rbcv70n3-45701>.
- Cavalcante, L. B., Gomes, H. B., Cavalcante, A. d. S. I., Costa, B. C. A. d., Costa, M. C. A. d., Silva, C. M. d., Costa, R. L., Rocha, R. L. d., Santos, F. S. d., Silva, F. D. d. S. et al. (2020). Análise de ilhas de calor e frescor utilizando-se de processamento digital de imagens–estudo de caso município de São Paulo/SP, *Revista Brasileira de Meteorologia* 35: 835–846. <https://doi.org/10.1590/0102-7786355000010>.
- Chander, G. e Markham, B. (2003). Revised Landsat-5 TM radiometric calibration procedures and postcalibration dynamic ranges, *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing* 41(11): 2674–2677. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2003.818464>.
- Chen, X.-L., Zhao, H.-M., Li, P.-X. e 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. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.11.016>.
- dos Santos Martins, G. e Becker, E. L. S. (2014). Cartografia e sensoriamento remoto para o ensino da geografia do lugar – Santa Maria, RS, Brasil, *Disciplinarum Scientia| Ciências Humanas* 15(2): 143–160. <https://periodicos.ufn.edu.br/index.php/disciplinarumCH/article/view/1776>.
- Franco, S., Mandla, V. R. e Ram Mohan Rao, K. (2017). Urbanization, energy consumption and emissions in the Indian context a review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 71: 898–907. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.117>.
- Fujimoto, N. S. V. M. e Ross, J. L. S. (2001). Análise ambiental urbana na área metropolitana de Porto Alegre-RS: sub-bacia hidrográfica do arroio Dilúvio. Available at <http://hdl.handle.net/10183/72157>.
- Gallo, K. P., Tarpley, J. D., McNab, A. L. e Karl, T. R. (1995). Assessment of urban heat islands: a satellite perspective, *Atmospheric research* 37(1-3): 37–43. [https://doi.org/10.1016/0169-8095\(94\)00066-M](https://doi.org/10.1016/0169-8095(94)00066-M).
- Huete, A. R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI), *Remote sensing of environment* 25(3): 295–309. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X).
- Jensen, J. R. e Epiphany, J. C. N. (2009). *Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres*, Parêntese Editora São José dos Campos.
- Krause, C. W., Lockard, B., Newcomb, T. J., Kibler, D., Lohani, V. e Orth, D. J. (2004). Predicting influences of urban development on thermal habitat in a warm water stream, *Journal of the American Water Resources Association* 40(6): 1645–1658. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2004.tb01612.x>.
- Marcotullio, P. J., Keßler, C. e Fekete, B. M. (2021). The future urban heat-wave challenge in Africa: Exploratory analysis, *Global Environmental Change* 66: 102190. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2020.102190>.
- Markham, B. L. e Barker, J. L. (1987). Thematic mapper bandpass solar exoatmospheric irradiances, *International Journal of Remote Sensing* 8(3): 517–523. <https://doi.org/10.1080/01431168708948658>.

- Michishita, R., Jiang, Z. e Xu, B. (2012). Monitoring two decades of urbanization in the Poyang lake area, China through spectral unmixing, *Remote Sensing of Environment* **117**: 3–18. <http://dx.doi.org/10.1007/s40858-017-0164-2>.
- Moreira, E. B. M. (2014). Balanço de energia e evapotranspiração na cidade do Recife-PE por sensoriamento remoto. <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/11100>.
- Najafzadeh, F., Mohammadzadeh, A., Ghorbanian, A. e Jamali, S. (2021). Spatial and temporal analysis of surface urban heat island and thermal comfort using land-sat satellite images between 1989 and 2019: A case study in Tehran, *Remote Sensing* **13**(21): 4469. <https://doi.org/10.3390/rs13214469>.
- Nóbrega, R. S. e de Bakker Vital, L. A. (2010). Influência da urbanização sobre o microclima de Recife e formação de ilha de calor (influence of urbanization on the climate of Recife and development of heat island), *Revista Brasileira de Geografia Física* **3**(3): 151–156. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v3i3.232670>.
- Nova, R., Gonçalves, R. e Lima, F. (2021). Análise temporal de ilhas de calor através da temperatura de superfície e do índice de vegetação em Recife-PE, Brasil, *Revista Brasileira de Cartografia* **73**(2): 598–614. <http://dx.doi.org/10.14393/rbcv73n2-54522>.
- Peng, S., Piao, S., Ciais, P., Friedlingstein, P., Ottle, C., Bréon, F.-M., Nan, H., Zhou, L. e Myneni, R. B. (2012). Surface urban heat island across 419 global big cities, *Environmental science & technology* **46**(2): 696–703. <https://doi.org/10.1021/es2030438>.
- Purevdorj, T., Tateishi, R., Ishiyama, T. e Honda, Y. (1998). Relationships between percent vegetation cover and vegetation indices, *International journal of remote sensing* **19**(18): 3519–3535. <https://doi.org/10.1080/014311698213795>.
- Quartaroli, C. F., Vicente, L. E. e de Araújo, L. S. (2014). Sensoriamento remoto., *Embrapa Monitoramento por Satélite-Capítulo em livro técnico-científico (ALICE)*.
- Silva, B. B. d., Braga, A. C., Braga, C. C., de Oliveira, L. M., Montenegro, S. M. e Barbosa Junior, B. (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**: 3–8. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v20n1p3-8>.
- Souto, J. I. d. O. e Cohen, J. C. P. (2021). Spatiotemporal variability of urban heat island: Influence of urbanization on seasonal pattern of land surface temperature in the metropolitan region of Belém, Brazil, *Revista Brasileira de Gestão Urbana* **13**. <https://doi.org/10.1590/2175-3369.013.e20200260>.
- Tasumi, M. (2003). *Progress in operational estimation of regional evapotranspiration using satellite imagery*, University of Idaho.
- Tucker, C., Fung, I. Y., Keeling, C. e Gammon, R. (1986). Relationship between atmospheric CO₂ variations and a satellite-derived vegetation index, *Nature* **319**(6050): 195–199. <https://doi.org/10.1038/319195a0>.
- Voogt, J. e Oke, T. (2003). Thermal remote sensing of urban climates, *Remote Sensing of Environment* **86**(3): 370–384. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00079-8](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00079-8).
- Zhou, D., Xiao, J., Bonafoni, S., Berger, C., Deilami, K., Zhou, Y., Frolking, S., Yao, R., Qiao, Z. e Sobrino, J. A. (2018). Satellite remote sensing of surface urban heat islands: Progress, challenges, and perspectives, *Remote Sensing* **11**(1): 48. <https://doi.org/10.3390/rs11010048>.