O IMPACTO DA URBANIZAÇÃO NO CLIMA LOCAL DA CIDADE DE PALMAS-TO

Eduardo Krüger (1); João Gobo (2); Caio Lasmar (3); Graziela Tejas (4), Reginaldo Souza (5)
(1) Prof. Dr., Engenheiro Civil, ekruger@utfpr.edu.br, UTFPR, Campus Curitiba, (41) 3279-6821
(2) Prof. Dr., Geógrafo, joao.gobo@unir.br, UNIR
(3) Prof. MSc., Arquiteto e Urbanista, lasmar.cij@gmail.com, UNIR
(4) Profa. Dra., Geógrafa, graziela.tejas@ifro.edu.br, IFRO
(5) Prof. Dr., Geógrafo, reginaldo.martins@ifro.edu.br, IFRO

RESUMO
O presente estudo utiliza dados de sensoriamento remoto de modo a analisar o crescimento urbano em uma das cidades mais novas do Brasil, Palmas, Tocantins, fundada em 1989. O objetivo foi investigar se um conjunto de dados climáticos históricos é capaz de apontar relações entre esquemas de urbanização, índices de vegetação e mudanças no clima local. A análise das alterações no clima local partiu de dados meteorológicos de estações fixas da rede INMET representados como anos típicos, enquanto os níveis de urbanização foram obtidos a partir da identificação de classes vegetadas e construídas por imagens de satélite. Os resultados sugerem que as mudanças no clima local nem sempre estiveram relacionadas ao desenvolvimento urbano de Palmas. Apesar de mudanças positivas dos padrões de distribuição da vegetação em determinadas áreas da cidade, mostrando aumento nos níveis mais altos do Índice Vegetado por Diferença Normalizada (NDVI) em 2021, as quais potencialmente melhorariam o clima local, a mitigação do calor não foi observada na estação meteorológica de referência.

Palavras-chave: clima urbano, urbanização, sensoriamento remoto, dados meteorológicos históricos.

ABSTRACT
The present study uses remote sensing data in order to analyze urban growth in one of the youngest cities in Brazil, Palmas, Tocantins, founded in 1989. The objective was to investigate whether a set of historical climate data is capable of pointing out relationships between schemes of urbanization, vegetation indices and changes in local climate. The analysis of changes in local climate departed from meteorological data obtained at fixed stations of the INMET network represented as typical years, while the levels of urbanization were obtained from the identification of vegetated and built-up classes in satellite imagery. Results suggest that changes in local climate were not always related to urban development in Palmas. Despite positive changes in vegetation distribution patterns in certain areas of the city, showing increases in higher levels of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) in 2021, which would potentially improve the local climate, heat mitigation was not observed at the reference weather station.

Key words: urban climate, urbanization, remote sensing, historical weather data

1. INTRODUÇÃO

Alterações microclimáticas são frequentemente associadas a padrões de urbanização, conforme demonstrado em vários estudos de clima urbano (Ward et al., 2016). Apesar de serem menos representativas em termos de área de superfície, com menos de 0,5% da área terrestre total da Terra (SCHNEIDER et al., 2009), as áreas urbanas têm sido também apontadas como responsáveis pelas mudanças climáticas. Huang e Lu (2015) analisaram os impactos térmicos do Delta do Rio Yangtze, a terceira maior aglomeração urbana da China, e concluíram que a urbanização tem um efeito mensurável no aquecimento observado naquela região, potencialmente agravando o aquecimento global.

As mudanças no uso e cobertura da terra podem agravar os problemas de saúde humana (ZALDO-AUBANELL et al., 2021) e alterar o clima nas escalas local, regional e global (HUANG; LU, 2015). Neste sentido, a correta delimitação das escalas de análise é fundamental para se compreender a contribuição de áreas urbanas nas mudanças climáticas, desde a microescala até o clima regional (GOBO et al., 2018). Assim, o clima regional pode ser impactado pelo balanço energético que ocorre no nível urbano, devido às atividades humanas (calor antropogênico), conformação urbana com alteração no albedo e propriedades termofísicas do tecido urbano (balanço radiativo), remoção de vegetação e retirada ou incorporação de corpos d'água, como ocorre no caso de Palmas (balanço hídrico), dentre outros impactos.

A cidade de Palmas, capital do mais jovem estado brasileiro de Tocantins, foi fundada recentemente, em 1989. Palmas se localiza no centro geográfico do território de Tocantins, visando ao desenvolvimento socioeconômico da região. Antes da implantação da capital do estado, a área era ocupada por fazendas esparsas. A fundação de Palmas foi inspirada na de Brasília, igualmente seguindo um plano diretor com características modernistas. Entre o final de 2001 e meados de 2002, foi construída uma usina hidrelétrica (Usina Hidrelétrica de Energia Luís Eduardo Magalhães, com 900 MW), alagando 630 km² da área de seu entorno (PIRES, 2017).

O alagamento da área, dentre outros impactos, implicou na realocação da população rural e urbana, alterações na fauna, principalmente na ictiofauna, no desmatamento de inúmeras áreas, além da perda das margens naturais dos rios junto ao Rio Tocantins (embora tenha havido a criação de algumas praias artificiais como medidas compensatórias). Esses danos foram notados principalmente nos municípios de Palmas e Porto Nacional, tradicionais centros turísticos antes da implantação da usina.

A proposta urbanística de Palmas já contemplava a implantação da hidrelétrica, bem como uma expansão gradual da cidade. No entanto, seguindo a tendência de outras cidades brasileiras planejadas, a forma como se deu a expansão territorial divergiu do plano urbanístico original, levando a um crescimento vertical paralelamente ao espraiamento urbano. Resultantes tanto da urbanização desordenada quanto da construção da usina, os efeitos da antropização em Palmas têm sido cada vez mais investigados. Utilizando dados de estações meteorológicas e índices de conforto térmico, Silva (2018) verificou uma tendência de elevação das temperaturas de Palmas não apenas após a construção da usina, mas principalmente após a intensificação dos processos de urbanização e verticalização na cidade na década de 2010, que consequentemente levaram a um aumento do desconforto térmico, verificado também na percepção térmica da população local.

Pires (2017) analisou imagens de satélite juntamente a medições móveis em Palmas e dados de estações meteorológicas oficiais antes (2000 e 2001) e depois (2005, 2010 e 2014) do alagamento a partir da criação da hidrelétrica em termos de parâmetros biofísicos, incluindo dados de temperatura de superfície (LST). Índices relevantes para vegetação existente, evapotranspiração e albedo também foram obtidos a partir de imagens de satélite permitindo análises de correlação com dados de LST. Os resultados mostraram que o aumento da área urbana em Palmas entre 2000 e 2014 foi de 66%. Para o mesmo período, houve um aumento em determinados pontos críticos em Palmas com LST variando de 34 °C a 38 °C, embora áreas a oeste da cidade, nas proximidades da represa, tenham mostrado uma queda de temperatura de até 3 °C. Uma análise detalhada do raio de influência de *buffers* a partir da represa mostrou que, quanto maior a distância, maior o aumento da LST.

Na área avaliada por Pires (2017), a qual corresponde a um raio de aproximadamente 30 km para ambos os lados da represa cujo eixo é aproximadamente norte-sul, houve um houve um aumento da temperatura máxima de cerca de 4 °C em abril (estação chuvosa) e 3 °C em agosto (estação seca). O aumento correspondente na LST média na área urbana foi de 1,2 °C em abril e de 1,5 °C em agosto.

2. OBJETIVO

O objetivo do presente estudo é investigar se um conjunto de dados climáticos históricos é capaz de apontar relações entre esquemas de urbanização, índices de vegetação e mudanças no clima local.

3. MÉTODO

3.1. Local de estudo

Palmas surgiu de um assentamento rural existente sendo transformada, via plano diretor, em capital do estado. O crescimento da população local foi significativo na década de 1990, caindo ligeiramente na década de 2000 e se estabilizando a partir daí. Em 2021, a cidade tinha aproximadamente 313.349 habitantes (IBGE, 2023a), enquanto que, em 1991, a população possuía apenas 24.334 habitantes (IBGE, 2023b).

Palmas foi considerada, portanto, um estudo de caso emblemático para uma comparação entre mudanças climáticas locais e crescimento urbano. Palmas se localiza a 10,17° S e 48,33° W (Figura 1) e possui a classificação climática Aw de Köppen-Geiger, correspondente ao clima de savana tropical ou clima tropical úmido e seco. O bioma dominante na região é a savana tropical brasileira (denominado Cerrado), sendo este o segundo mais rico do Brasil em termos de biodiversidade, com abrangência de 204,7 milhões de hectares na parte central do país, ou cerca de 23% do território brasileiro (SANO et al., 2010; SOUZA JÚNIOR et al., 2020). A vegetação natural do Cerrado consiste de uma mescla de pastagens, geralmente esparsas, matagais e bosques. Em um estudo de mapeamento do Cerrado brasileiro, Sano et al. (2010) verificaram que os cerrados são a cobertura vegetal remanescente dominante, com aproximadamente 75 milhões de hectares, mais representados no estado do Tocantins, onde lavouras e pastagens praticamente não eram visíveis em imagens de satélite em 2002. Infelizmente, o bioma Cerrado localiza-se em uma das regiões brasileiras com maior pressão sobre a cobertura vegetal original, apresentando a mais rápida a taxa anual de redução de floresta nativa entre 1985 e 2017 (SOUZA JÚNIOR et al., 2020).

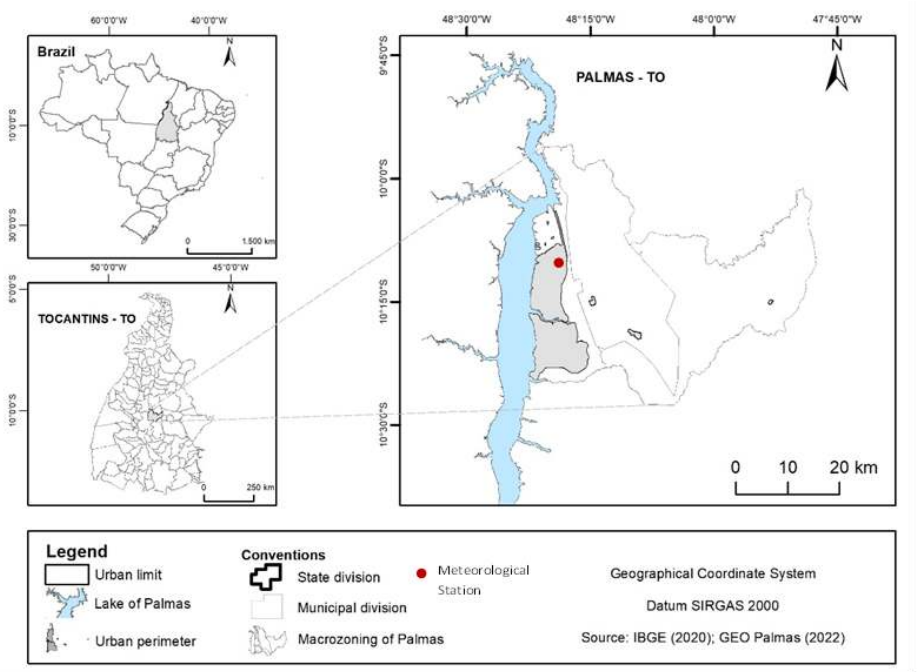


Figura 1 - Localização de Palmas no Brasil

As condições térmicas predominantes são de estresse térmico por calor. Os dados climáticos de Palmas (estação meteorológica "Palmas TO" a 10,17°S, 48,33°W) do repositório climático Climate.OneBuilding.org foram analisados pela ferramenta "*Clima Tool*" do CBE (https://clima.cbe.berkeley.edu/, BETTI et al., 2022), com base em dados coletados entre 2000 e 2010. Sua temperatura média anual é de 26,8 °C, com médias mensais variando de 25–29 °C. As faixas das máximas e mínimas diárias, durante todo o ano, são 33–38 °C e 17–22 °C, respectivamente. A temperatura máxima diária e sua flutuação aumentam nos meses mais secos de julho a setembro, durante os quais as mínimas diárias tendem a diminuir. As condições de estresse térmico, expressas como valores do índice UTCI (*Universal Thermal Climate Index*, FIALA et al., 2012) e de acordo com a escala de avaliação térmica desse índice, mostram uma faixa entre 'sem estresse térmico' durante a noite até 'estresse térmico extremo' durante o dia, nos meses mais secos.

A densidade populacional é bastante baixa quando comparada às das principais capitais do país. Em 2010, Palmas tinha cerca de 100 habitantes por km², enquanto no mesmo ano São Paulo exibia 7.398 habitantes por km², e o Rio de Janeiro 5.266 habitantes por km² (IBGE 2023b).

3.2. Dados climáticos

Devido à indisponibilidade de dados meteorológicos horários ininterruptos para Palmas, foram utilizados registros de uma estação meteorológica convencional, entre 1993 e 2021, com três coletas de dados por dia, ou seja, às 12, 18 e 24 UTC. A estação meteorológica pertence à rede do Instituto Nacional de Meteorologia (rede INMET), código WMO 83003, e está localizada a 10,15° S, 48,31° W, próxima ao limite norte da área urbana, e aproximadamente 5 km a oeste da represa. Os dados de temperatura e umidade do ar foram extraídos da série temporal para análise. A temperatura média diária (T_{med}) foi calculada de acordo com o procedimento de cálculo sugerido pelo INMET (2022), conforme a Equação 1:

$$T_{med} = \frac{(\mathrm{T_{min}} + \mathrm{T_{max}} + \mathrm{T_{12}} + 2 \times \mathrm{T_{24}})}{5} \qquad \text{Equação 1}$$

Onde:
T_{min} e T_{max}correspondem às temperaturas mínimas e máximas diárias [°C];
T_{12} e T_{24} correspondem à temperatura do ar medida [°C] às 12 e às 24 UTC, respectivamente.

A umidade relativa média diária (UR_{med}) foi obtida a partir da Equação 2:

$$UR_{med} = \frac{(\mathrm{UR_{12}} + \mathrm{UR_{18}} + 2 \times \mathrm{UR_{24}})}{4} \qquad \text{Equação 2}$$

Onde:
UR_{12} UR_{18} e UR_{24}correspondem à umidade relativa [%] às 12, às 18 e às 24 UTC, respectivamente.

Linhas vazias ou incompletas na série de dados foram insignificantes. Para cada média diária calculada, foram anotados os dados ausentes para qualquer uma das variáveis utilizadas no cálculo. Para o total de 10.288 dias, de novembro de 1993 a dezembro de 2021, faltaram 133 pontos de dados, para T_{med} ou UR_{med}, ou cerca de 1% do total de pontos. Essas lacunas foram resolvidas atribuindo-se como estimativa a média dos três dias anteriores, considerada razoável levando-se em conta as condições de temperatura e umidade quase invariáveis de Palmas, em base diária.

Para avaliar o impacto do processo de urbanização de Palmas, a série temporal foi subdividida em três períodos, os primeiros 10 anos do conjunto de dados (de 1994 a 2003), os últimos dez anos do conjunto de dados (de 2012 a 2021), e um período intermediário, com dois anos sobrepostos ao primeiro período (de 2002 a 2011). Ao invés de se calcular um ano médio para cada um desses três períodos, adotou-se o procedimento de geração de ano típico sem condições extremas ou anômalas de temperatura. Foi empregado o procedimento *Test Reference Year* (TRY), segundo o qual são descartados anos que contenham meses com temperaturas médias mensais extremamente altas ou baixas, e anos com condições anômalas (por exemplo, meses de inverno excepcionalmente quentes), de modo a se obter um ano típico para análise para cada período de 10 anos.

3.3. Dados de urbanização

Os dados cartográficos vetoriais foram extraídos do *shapefile* dos limites urbanos de Palmas, disponibilizados pelo GEO PALMAS (https://geopalmasweb.wixsite.com/geopalmas) e pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2021), com a delimitação da área urbana. O projeto utilizou o Sistema de Coordenadas Geográficas - GCS e o datum SiRGAS 2000. O sensoriamento remoto foi adotado para o processamento digital de imagens. Foram utilizadas imagens dos satélites LANDSAT-5 (Thematic Mapper - TM sensor) e LANDSAT 8 (*Operational Land Imager* – OLI e Thermal Infrared Sensor – TIRS) da Coleção 1 Nível-1, adquiridas do *United States Geological Survey* (USGS), disponíveis online (https://earthexplorer.usgs.gov/). Observe-se que, neste trabalho, não foram utilizados dados LST, mas apenas dados de campo da estação meteorológica oficial. A Tabela 1 apresenta os dados LANDSAT-5 (TM) e LANDSAT-8 (OLI) por órbita/ponto e séries temporais correspondentes a incrementos de 10 anos desde 1984 (primeiro ano da série).

Tabela 1: Metadados das imagens de satélite para Palmas

Ano	Data	Satélite / Sensor	Órbita / Ponto
1984	18/06	Landsat 05 - TM	222/67
1991	06/06		
2001	17/06		
2011	29/06		
2021	08/06	Landsat 08 – OLI	

O ArcGIS® 10.5 foi utilizado para o processamento digital das imagens LANDSAT 5 e 8, restringindo a análise aos limites da área urbana do município. As imagens foram então corrigidas para radiância e refletância, de forma que se obtivessem o Índice Vegetado por Diferença Normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index* - NDVI) e o Índice Construído por Diferença Normalizada (*Normalized Difference Built-up Index* - NDBI). Tais procedimentos foram realizados com base em Zha et al. (2003), He et al. (2010) e Xu (2007).

4. RESULTADOS

4.1. Alterações no clima local

As comparações entre os três diferentes anos típicos, os quais *grosso modo* representam três estágios de urbanização da cidade são representadas em gráficos de colunas e *boxplots*, com médias e distribuição de temperatura e umidade relativa do ar. O estresse térmico é expresso pelo índice de temperatura efetiva (*effective temperature* - ET) e pela soma dos graus-dia de resfriamento, assumindo uma temperatura base de 25 °C como referência para a temperatura média diária. A ET foi calculada com base em Missenard (1933):

$$ET = T_{med} - 0{,}4 \times (1 - 0{,}01 \times UR_{med}) \times (T_{med} - 10) \qquad \text{Equação 3}$$

Onde:
T_{med} corresponde à temperatura média diária do ar [°C];
UR_{med} corresponde à umidade relativa média diária [%].

A escala de avaliação utilizada para a sensação térmica é dada pela Tabela 2 (BLAZEJCZYK et al., 2012).

Tabela 2: Escala de avaliação térmica para o índice de temperatura efetiva (tradução livre)

ET (° C)	sensação térmica
>27	Muito Quente (*Hot*)
23 - 27	Quente (*Warm*)
21 - 23	Confortável (*Comfortable*)
17 - 21	Fresco (*Fresh*)
9 - 17	Frio (*Cool*)
1 - 9	Muito frio (*Cold*)
<1	Extremamente frio (*Very Cold*)

A tendência de aquecimento com umidade decrescente (supostamente devido à supressão da vegetação local) é perceptível em Palmas. Tal aquecimento torna-se mais acentuado na estação seca, entre junho e setembro, e é mais evidente nas mínimas diárias. O efeito é percebido também nos conjuntos de dados de ET. Significativo é o fato de a demanda por resfriamento para uma Tb de 25 °C mostrar um aumento entre 1999 e 2020, principalmente durante os meses secos. Em 1999, as médias diárias em julho estiveram ligeiramente abaixo de 25 °C (média mensal de 24 °C), enquanto, em 2020, a média mensal foi de 27,5 °C no mesmo mês. A Figura 2 mostra as alterações na sensação térmica estimada (ver amplitudes da Tabela 2) para os três anos em Palmas.

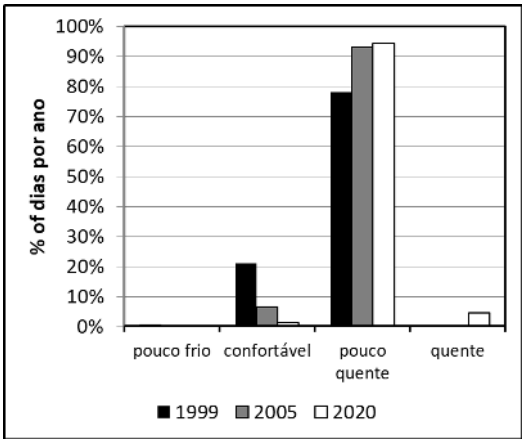
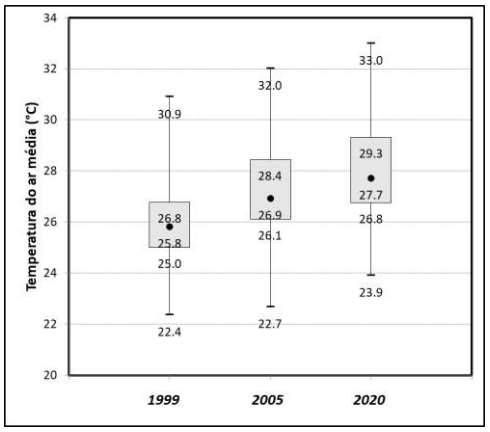


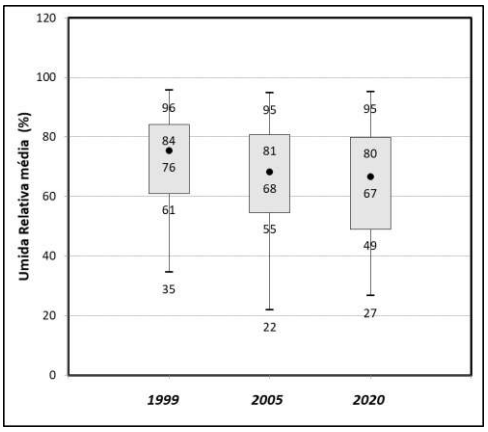
Figura 2 - Alterações na sensação térmica prevista ao longo do tempo (classes de ET).

Nota-se um aumento do calor com uma diminuição gradual dos dias frescos e confortáveis. Deve-se enfatizar que os totais anuais são para dados médios diários de ET. Os *boxplots* com as variáveis apresentadas mostram mudanças em sua distribuição para cada ano (Figura 3).

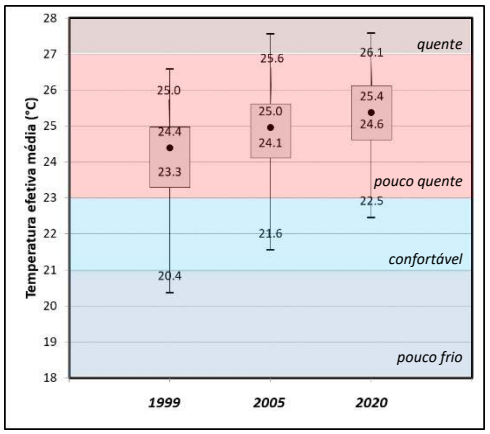
Nota-se um aumento consistente na temperatura e umidade com uma distribuição semelhante para os três anos. O gráfico de ET mostra mais evidentemente a mudança gradual de condições frias (ainda existentes em 1999, e completamente ausentes nos últimos anos) para condições de calor nos dois anos mais recentes. Observe-se que o quartil superior e as médias estão situados dentro da faixa ET 'pouco quente' para os três anos.



(A)



(B)



(C)

Figura 3 - Boxplot com valores absolutos mínimos, máximos e médios, quartis superior (Q3) e inferior (Q1) para (A) temperatura do ar, (B) umidade relativa e (C) temperatura efetiva para os três TRYs em Palmas entre 1994 e 2021.

4.2. Processo de urbanização em Palmas

A partir do processamento digital das imagens Landsat dos anos de 1984, 1991, 2001, 2011 e 2021 (neste caso, permitindo intervalos de 10 anos entre as imagens digitais), se mostra evidente a redução da cobertura vegetal como efeito direto do processo de urbanização que ocorreu em Palmas ao longo de sua existência (Figura 4). Áreas com níveis de vegetação 'muito baixo' e 'baixo' tiveram um aumento significativo entre 1984 e 2021, 9% e 11%, respectivamente, enquanto as porções classificadas como NDVI 'moderado', com vegetação herbácea, arbustiva ou de regeneração secundária, sofreram uma redução de 29% no mesmo período, sendo substituídas predominantemente por solos expostos ou impermeáveis, estes últimos devido ao processo de urbanização.

Observou-se em 2021 uma expansão das áreas com vegetação mais densa, composta por folhosas de mata aberta. Isso deve estar relacionado à implantação de áreas verdes, com praças e jardins que enriqueceram a arborização da cidade. Assim, as áreas classificadas com NDVI 'alto' e 'muito alto' tiveram um aumento de 5% e 3%, respectivamente, entre 1984 e 2021 (Figura 4).

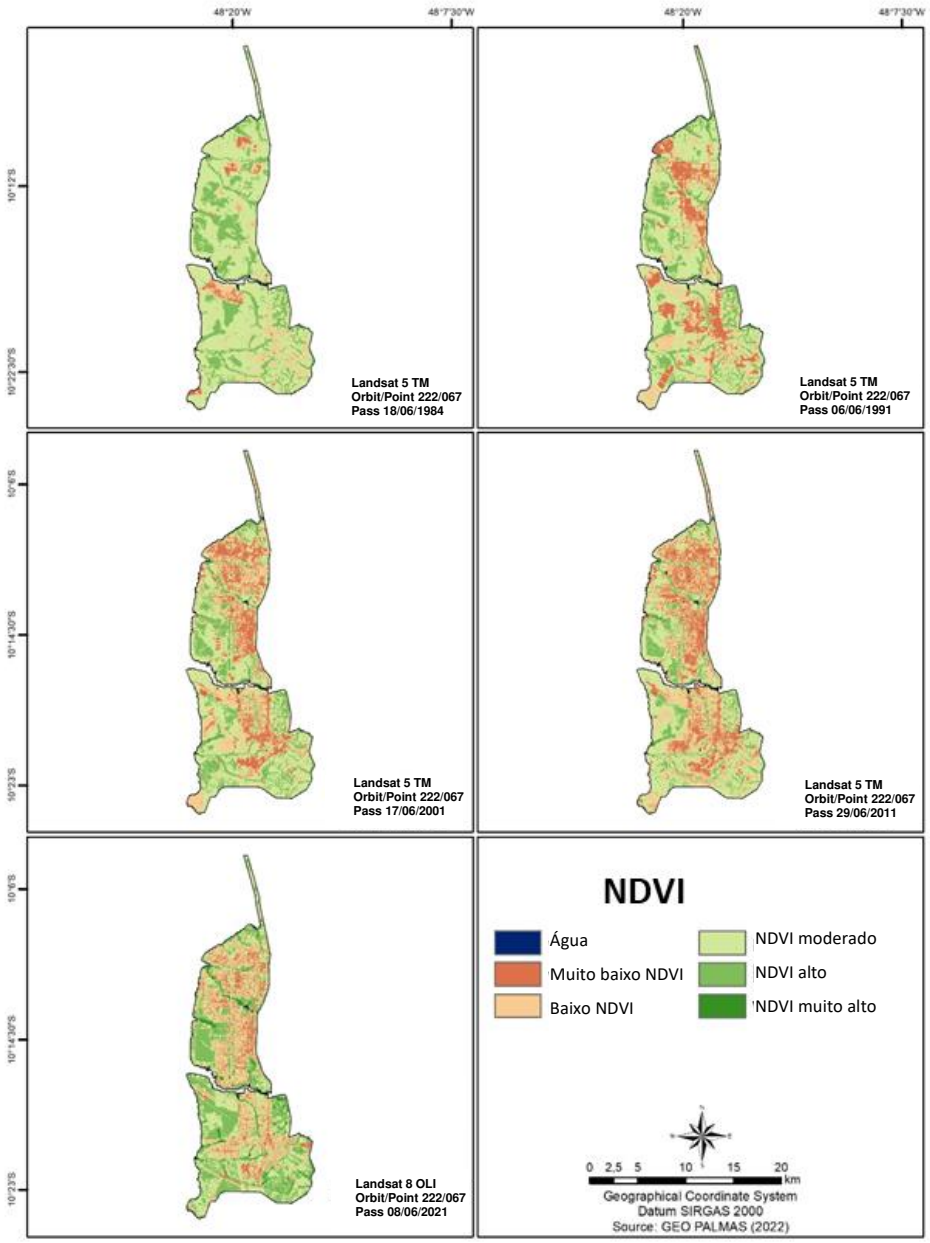


Figura 4 – Evolução do Índice Vegetado por Diferença Normalizada (NDVI) em Palmas

Os dados referentes à área construída acompanham os do índice de vegetação (Figura 5) mostrando uma redução das áreas de cobertura de floresta tropical aberta e arbustiva, as quais foram substituídas por classes de NDBI "médio" e "alto" e solo exposto. A classe dominante de vegetação que em 1984 cobria 58% de Palmas teve redução de 9,5% em 2021. Por sua vez, as áreas com NDBI "médio" e "alto", juntas, tiveram um aumento de 5,5%. A porcentagem de área com solo exposto também aumentou, na ordem de 7%, o que pode estar relacionado ao processo de urbanização, com formação de vazios urbanos, possivelmente devido à especulação imobiliária. Além disso, nota-se a ocupação de áreas periurbanas, com a consolidação da periferia de Palmas, onde as ruas geralmente não são pavimentadas.

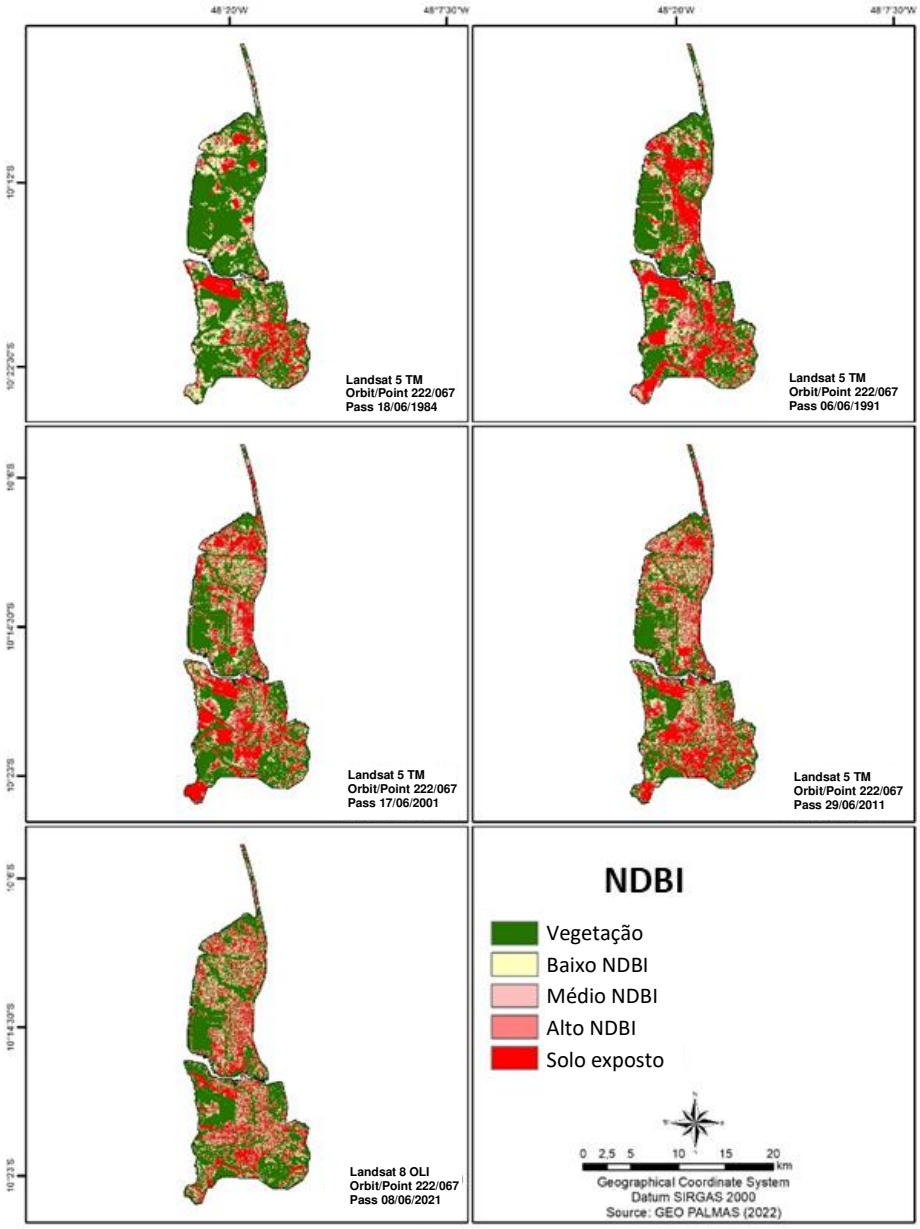


Figura 5 – Evolução do Índice Construído por Diferença Normalizada (NDBI) em Palmas.

O tipo de vegetação dominante da área em 1981 era o NDVI "moderado", que representa *grosso modo* a vegetação do tipo Cerrado, com 63% da área total de Palmas. Em 2021, a classe NDVI "moderada" abrangia cerca de metade disso (34%). As classes de NDVI "alto" e "muito alto" apresentaram um aumento desde a fundação da cidade até 2021, de 24,5% para 33%, embora tais melhorias sejam bastante localizadas e bolsões com NDVI muito baixo ainda possam ser verificados na parte nordeste da área urbana.

O desenvolvimento do NDBI também mostrou melhorias em termos de permitir que mais vegetação prosperasse, reduzindo-se a quantidade de solo exposto na cidade. O desenvolvimento temporal de Palmas sugere, assim, um processo de urbanização que na primeira e nas duas décadas iniciais foi responsável por mudanças indesejadas no uso e cobertura do solo, com certa estabilização do NDVI e do NDBI entre 2001 e 2011 e, após disso, notando-se melhorias em termos de aumentos na vegetação com reduções das superfícies com solo exposto durante a última década.

4.3. Clima local *versus* urbanização em Palmas ao longo de quatro décadas (entre 1984 e 2021)

Os anos obtidos para análise das variações climáticas locais diferem quanto aos intervalos de tempo dos anos climáticos encontrados, por exemplo, 1999 a 2005, sete anos, *versus* 2005 a 2020, mais que o dobro disso. Ainda assim, o tratamento dos dados climáticos de cada período de 10 anos foi feito de forma a minimizar as chances de ocorrência de eventos atmosféricos globais (como El Niño e La Niña), os quais poderiam afetar a dinâmica climática local em anos específicos. Ao comparar alterações no clima local *versus* alterações no uso e cobertura do solo, as modificações climáticas são mais evidentes entre os primeiros sete anos do que nos dezesseis anos seguintes. Embora o efeito de alterações positivas no NDVI devesse ter levado a melhorias no clima local, notou-se uma tendência de aquecimento em Palmas a partir da virada do século e até 2021, na estação do INMET. Desta forma, pode-se supor que dois efeitos simultâneos podem estar ocorrendo:

1) O aquecimento global e também regional durante o período de análise pode ter sido o principal fator de influência no aquecimento verificado em Palmas, com menor contribuição das modificações da área urbana, confundindo a análise de alterações climáticas no nível urbano; e,
2) Modificações promissoras na urbanização de Palmas, com aumento da vegetação e implantação de parques e praças, observadas em escala mais local, beneficiaram climaticamente partes da cidade, enquanto focos de calor ainda são verificados em outros bairros. A adoção de esquemas de urbanização local permanecendo partes da cidade negligenciadas quanto a esse aspecto, resulta de um desenvolvimento urbano desigual, o qual resulta em mudanças imperceptíveis na tendência de aquecimento da cidade.

4.3. Mapa biomas

A dificuldade de explicar a tendência de aquecimento observada na estação meteorológica do INMET *versus* melhorias observadas em termos de NDVI e NDBI na última década que deveriam ter potencialmente melhorado o clima local suscitou a procura por outros dados de superfície relevantes para a análise de Palmas.

Atualmente, a 7ª versão do Mapbiomas abrange 27 classes de uso e cobertura do solo na escala 1:100.000, com resolução de 30×30 pixels usando imagens do satélite Landsat. Os mapas gerados mostram uma distribuição robusta de classes de superfície, pois utiliza-se um mosaico de imagens Landsat de forma a compor a visão geral da área sob análise, com emprego de filtros espaciais e temporais, e também de um método de verificação das mudanças observadas nas classes ao longo do tempo. Como dado relevante para a presente análise, podem ser utilizados mapas de classes de uso e cobertura do solo e transições entre anos, que fornecem áreas de classes individuais de 1985 a 2021 em hectares.

Adotando-se a opção 'Cobertura' (cobertura do solo), a distribuição das classes de superfície no território dos diversos municípios brasileiros, incluindo Palmas, pode ser visualizada em termos de uso e cobertura do solo, anualmente de 1985 a 2021.

Ainda que o município de Palmas seja hoje uma área urbana (em menor extensão) com biomas naturais ao seu redor, incluindo a represa, os mapas permitem potencialmente verificar e, de certa forma, até validar os percentuais de NDVI e NDBI encontrados no presente estudo. A Figura 6 mostra os mapas de cobertura do solo Mapbiomas para três anos selecionados (1985, 2001 e 2021).

O crescimento da mancha urbana ao longo do tempo pode ser facilmente identificado. A redução da área de florestas naturais ocorreu desde o início, em maior grau quando do alagamento advindo da implantação da hidrelétrica em 2001. O processo de urbanização está em curso, tendo ido mais acentuado entre 1985 e 1997, seguindo após isso em ritmo mais moderado. Com relação à área de florestas, nota-se um aumento gradativo na última década.

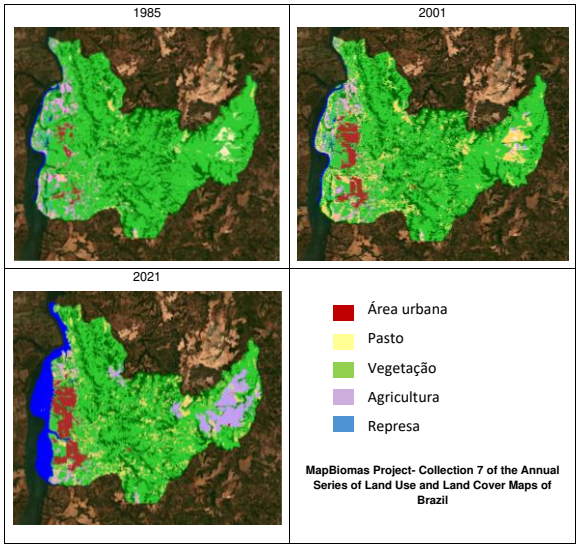


Figura 6 - Distribuição dos mapas de cobertura do solo de Palmas com porção marrom correspondente à área urbana, para 1985, 2001 e 2021.

Gomes et al. (2020), em recente estudo de sensoriamento remoto para o município no período de 2000-2017, também mostraram, para o período 2000-2017, aumento das condições de temperatura local. O NDVI obtido para a área apresentou aumento ao longo do tempo e a explicação dada pelos autores é que as medidas compensatórias devido à construção da hidrelétrica incluíram o reflorestamento. Outra possível causa para o aumento da vegetação observada na série histórica é que a vegetação urbana em Palmas ainda estava em seus estágios iniciais em 2000, consolidando-se paulatinamente após isso.

5. CONCLUSÕES

O estudo de Palmas mostrou que, embora o clima local tenha uma tendência de aquecimento visível ao longo da história da cidade, as modificações nos esquemas de urbanização e o uso de vegetação em áreas específicas da cidade não levaram a uma melhoria do clima local como um todo. Em outras palavras, o impacto de alterações urbanas em nível local afetou sobretudo o balanço de energia no dossel urbano de bairros específicos, não exatamente na estação da rede INMET, na qual permanece a tendência de aquecimento. É provável que, além deste fato, o aquecimento global e as alterações no clima regional possam estar participando deste processo de aquecimento de Palmas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BETTI, G.; TARTARINI, F.; NGUYEN, C.; SCHIAVON, S. CBE Clima Tool: a free and open-source web application for climate analysis tailored to sustainable building design. **Preprint submitted to Software X**, Ythaka, NY, p.1-9, 2022.

BLAZEJCZYK, K.; EPSTEIN, Y.; JENDRITZKY, G.; STAIGER, H.; TINZ, B. Comparison of UTCI to selected thermal indices. **International journal of biometeorology**, v. 56, p. 515–535, 2012.

FIALA, D.; HAVENITH, G.; BRÖDE, P.; KAMPMANN, B.; JENDRITZKY, G. UTCI-Fiala multi-node model of human heat transfer and temperature regulation. **International journal of biometeorology**, v.56, p. 429-441, 2012.

GOBO, J. P. A.; GALVANI, E.; WOLLMANN, C. A. Subjective human perception of open urban spaces in the Brazilian subtropical climate: a first approach. **Climate**, v.6(2), p.24, 2018.

GOMES, F. D. G.; FUZETO, I. M. R.; PRATES, R. P. Análise Multitemporal do Clima Urbano em Palmas, Estado do Tocantins – Brasil. **In Colloquium Exactarum**. v.12, p.1-14, 2020.

HE, C.; SHI, P.; XIE, D.; ZHAO, Y. Improving the normalized difference built-up index to map urban built-up areas using a semiautomatic segmentation approach. **Remote Sensing Letters**, v.1, p.213-221, 2010.

HUANG, Q.; LU, Y. The effect of urban heat island on climate warming in the Yangtze river delta urban agglomeration in China. **Int J Environ Res Public Health.** v.12, 2015.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Malha Municipal**. Rio de Janeiro: IBGE, 2021.

_____. **Estimativas da população residente no Brasil e Unidades da Federação com data de referência em 1º de julho de 2021**, Rio de Janeiro: IBGE, 2023a.

_____. **Estatísticas Sociais / População / Censo Demográfico 1991**. Rio de Janeiro: IBGE, 2023b.

INMET - INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Normais Climatológicas do Brasil 1991-2020**. Brasília:INMET, 2022.

MISSENARD, F.A. Température effective d'une atmosphere Généralisation température résultante d'un milieu. In: **Encyclopédie Industrielle et Commerciale, Etude physiologique et technique de la ventilation**. Librerie de l'Enseignement Technique, Paris, p.131–185, 1933.

PIRES, É. G. **Avaliação de parâmetros biofísicos, derivados de dados satelitários, na área de influência do reservatório da UHE Luís Eduardo Magalhães - TO**. 2017. 224 f. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2017.

SANO, E. E.; ROSA, R.; BRITO, J. L.; FERREIRA, L. G. Land cover mapping of the tropical savanna region in Brazil. **Environmental monitoring and assessment**, v.166, p.113-124, 2010.

SCHNEIDER, A.; FRIEDL, M. A.; POTERE, D. A new map of global urban extent from MODIS satellite data. **Environmental research letters**, v.4, p.1-11, 2009.

SILVA, L. F. G. da. **Percepção climática e conforto térmico: contribuição ao estudo interdisciplinar dos aspectos objetivos e subjetivos do clima em Palmas, TO**. 2018. 550f. Tese (Doutorado em Ciências do Ambiente) – Universidade Federal do Tocantins, Palmas, Brasil, 2018.

SOUZA JÚNIOR, C. M.; et al. Reconstructing three decades of land use and land cover changes in Brazilian biomes with landsat archive and earth engine. **Remote Sensing**, v.12, 2020.

WARD, K.; LAUF, S.; KLEINSCHMIT, B.; ENDLICHER, W. Heat waves and urban heat islands in Europe: A review of relevant drivers. **Science of the Total Environment**, v.569, p. 527-539, 2016.

XU, H. Extraction of urban built-up land features from Landsat imagery using a thematicoriented index combination technique. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v.73, p.1381-1391, 2007.

ZALDO-AUBANELL, Q.; SERRA, I.; SARDANYÉS, J.; ALSEDÀ, L.; MANEJA, R. Reviewing the reliability of Land Use and Land Cover data in studies relating human health to the environment**. Environmental Research**, v.194, p. 110578, 2021.

ZHA, Y.; GAO, J.; NI, S. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. **International journal of remote sensing**, v.24, p.583-594, 2003.