

# CONTEXTO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS POR MEIO DO CAMPO TERMOGRÁFICO E HIDROMÉTRICO EM CIDADES NA BORDA LESTE DA AMAZÔNIA PARAENSE

*Context of climate change through the thermographic and hydrometric field in cities on the eastern edge of the paraense Amazon*

**Abraão Levi dos Santos Mascarenhas**

Geógrafo, Doutor em Geografia, PPGG-Unifesspa, Brasil

[abraaolevi@unifesspa.edu.br](mailto:abraaolevi@unifesspa.edu.br)

**Maria Rita Vidal**

Geógrafo, Doutor em Geografia, PPGG-Unifesspa, Brasil

[ritavidal@unifesspa.edu.br](mailto:ritavidal@unifesspa.edu.br)

Recebido: 24/06/2024

Aceito: 23/03/2025

## Resumo

O cenário de variabilidade climática aponta para uma Amazônia cada vez mais quente, e o crescimento das cidades tem contribuído para as efetivas mudanças antropogênicas nas últimas décadas. Com o objetivo de analisar o clima urbano de três cidades da borda leste da Amazônia, por meio de dados comparativos advindos de estações meteorológicas e sensores termais de Landsat, e com base nas teorias de clima urbano de Monteiro (1990a, 1990b) através de campos hidrométricos e térmicos, foi possível encontrar aumentos de temperatura de 1,2 °C para a cidade de Rondon-PA, de 4,2 °C para cidade de Eldorado do Carajás e de 1,87 °C para a cidade de São Félix do Xingu. As variabilidades termográficas apontam um indicativo de elevadas temperaturas nas cidades amazônicas, mas carecem de estudos mais detalhados. Esses valores expõem a preocupação e a necessidade de se pensar a importância de planos diretores urbanos e de arborização para a efetivação da qualidade de vida nas cidades amazônicas.

**Palavras-chave:** Amazônia, Sensoriamento remoto, variabilidade, clima.

## Abstract

The climate variability scenario shows an increasingly hotter Amazon, and the growth of cities has contributed to effective anthropogenic changes in recent decades. We analysed the urban climate of three cities on the eastern edge of the Amazon through comparative data from meteorological stations and Landsat thermal sensors, and based on the urban climate theories of Monteiro (1990a, 1990b) through hydrometric and thermal data fields. Our data show temperature increases of 1,2 °C for the city of Rondon-PA, 4.2 °C for the city of Eldorado do Carajás and 1.87 °C for the city of São Félix do Xingu. Thermographic variability indicates high temperatures in Amazonian cities, but more detailed studies are needed. These values expose the concern and need for urban master plans and afforestation to achieve a quality of life in Amazonian cities.

**Keywords:** Amazon, Remote sensing, variability, weather.

## 1. INTRODUÇÃO

A notória expansão urbana na Amazônia, atrelada à supressão das florestas primárias, e conseqüentemente seus impactos no uso e cobertura da terra e no padrão das estradas, têm levado a mudanças climáticas expressas nos processos hidrológicos e termográficos. Os espaços urbanos na Amazônia configuram-se como elementos possuidores de retenção de radiação, sendo denominados por Monteiro (1990a) de climas urbanos antropogênicos, da mesma forma que a cidade é vista como estrutura derivadora do clima urbano (Monteiro, 1990b).

As pequenas e médias cidades da Amazônia têm seus processos de urbanização atrelados à retirada da cobertura vegetal e adensamento das áreas construídas, com baixos índices de saneamento básico e alta impermeabilização por mantas asfálticas, o que tem produzido clima antropogênico. Padrões de ocupação do sítio urbano no leste da região de Carajás seguem elementos hidrográficos, como as redes de drenagens nas planícies fluviais. As áreas de colonização programadas pelo governo federal se espraiam pelos eixos rodoviários em processos sinecológicos com fatores topográficos e cobertura vegetal, construindo pontos dispersos que permitem falar em climas antropogênicos.

As pequenas e médias cidades paraenses tendem a não apresentar grandes mudanças em seu microclima, daí a necessidade de tornar estas cidades mais resilientes as mudanças climáticas, pois, tomando como base as variabilidades do clima urbano, entende-se que as perturbações antropogênicas geram ilhas de calor. Assim, objetiva-se analisar o comportamento da temperatura e dinâmica higrométrica de superfície do solo para três cidades do estado do Pará (Rondon do Pará, Eldorado do Carajás e Santana do Araguaia), na borda leste da Amazônia, por meio do campo térmico (calor de superfície do solo) e do campo hidrométrico (umidade do solo), com e escala temporal adotada de 40 anos, seguida pela escala espacial local.

Estudos sobre clima urbano indicam uma porção adensada da cidade nas imediações dos centros comerciais como possuidora de materiais com alto grau de reflectância e emissividade de temperatura, podendo apresentar temperaturas mais elevadas do que as temperaturas das áreas rurais, conforme Nunez e Oke (1977), Landsberg (1981), Voogt e Grimmond (2000), Stull (2017), Alcofarado (2009), Morato *et al.* (2011), Stewart e Oke (2012), Molnár (2016), Lin, Chen e Matzarakis (2017) e Fonseka *et al.* (2019).

As cidades aqui escolhidas foram elencadas aquelas dentro da área de abrangência do arco de desmatamento da Amazônia e inseridas na fronteira agrícola onde são detectados os maiores índices de desmatamento, estudo da variável climática pode ser

inserido nos Planos Diretores e em Políticas de combate a mudanças climáticas. É urgente criar zoneamentos de climas locais para pensar como a influência da morfologia e dos materiais adotados no espaço urbano tendem a aumentar o estresse térmicos, por isso medidas e/ou capacidade de conter o aumento de temperatura por meio de soluções verdes (florestas, agricultura, cobertura verde, etc.), e soluções azuis (sistemas de água, rios, lagos, lagoas, áreas úmidas, etc.) são cada dia mais urgentes.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para analisar a evolução da temperatura de superfície das cidades, foram utilizadas 232 imagens do satélite Landsat, dos sensores TM e TM+ (verde visível e infravermelho próximo) e do sensor TIRS para o levantamento dos dados de evolução da radiação em um período de 40 anos. As imagens da família Landsat são os recursos de geoinformação mais utilizados nas análises ambientais, contudo, para a Amazônia enfrenta-se o problema das nuvens no período de intensas precipitações ocasionadas pelos mecanismos de convecção (verão amazônico = quente e chuvoso) e intensas fumaças provocadas pelas queimadas, que ocorrem em pleno posicionamento da Alta da Bolívia (sistema meteorológico que libera calor sensível e latente), causando altas temperaturas (inverno amazônico = quente e seco).

A disponibilidade de imagens do satélite da série Landsat para o Brasil depende das estações do ano. Levantamentos dessa disponibilidade com dados de reflectância de superfície entre 1981 e 2019, realizados por, Mas *et al.* (2020), já revelavam a baixa disponibilidade de imagens para os anos 1980 e o aumento dessa disponibilidade para a década de 1990. Assim, a opção pelo levantamento junto ao banco de dados da *Earth Explore da USGS* ([earthexplore.usgs.gov](http://earthexplore.usgs.gov)) confirmou esse baixo quantitativo de imagens, apresentando as dificuldades de imagens com poucas nuvens ou fumaças, fato esse que nos levou a optar por imagens de datas disponíveis entre as estações de inverno/primavera do Hemisfério Sul.

Após o processamento de todas as imagens, foi realizada a estatística dos dados de temperatura utilizando como método a média das imagens correspondente a cada década. Na sequência, para conseguir os dados médios dos anos, foram feitas novas médias de todas as imagens das décadas, obtendo-se o comportamento médio da temperatura, da qual foi empregado o esquema de perfil termográfico para apresentar as ilhas de calor de superfície.

Os fatores geoambientais, principalmente a topografia, a vegetação e os processos como vento e umidade, detêm aspectos relacionados aos materiais que constituem as infraestruturas urbanas, bem como os materiais que impermeabilizam o solo urbano, que têm exercido mudanças no padrão da temperatura de superfície em espaços urbanos, conforme relatado por Voogt e Grimmond (2000). Em seus estudos, Lin, Chen e Matzarakis (2017) apontam que o calor sensível em superfícies urbanas simples pode ocasionar estresse térmico a longo prazo nas cidades.

Entre os aspectos importantes da presente pesquisa a serem analisados estão as áreas úmidas e as áreas de inundações, acompanhadas paralelamente pela expansão urbana, com apoio nos dados do Índice de Água por Diferença Normalizada, com acrônimo em inglês NDWI, já desenvolvido pelo clássico trabalho de Gao (1996), que usou imagens AVIRIS no canal na faixa do infravermelho próximo e outro canal na faixa do infravermelho de ondas curtas. A síntese da pesquisa é organizada por meio do diagrama metodológico que aponta as estruturas e processos técnicos operacionais que permitem compreender os elementos constitutivos da análise (Figura 1).

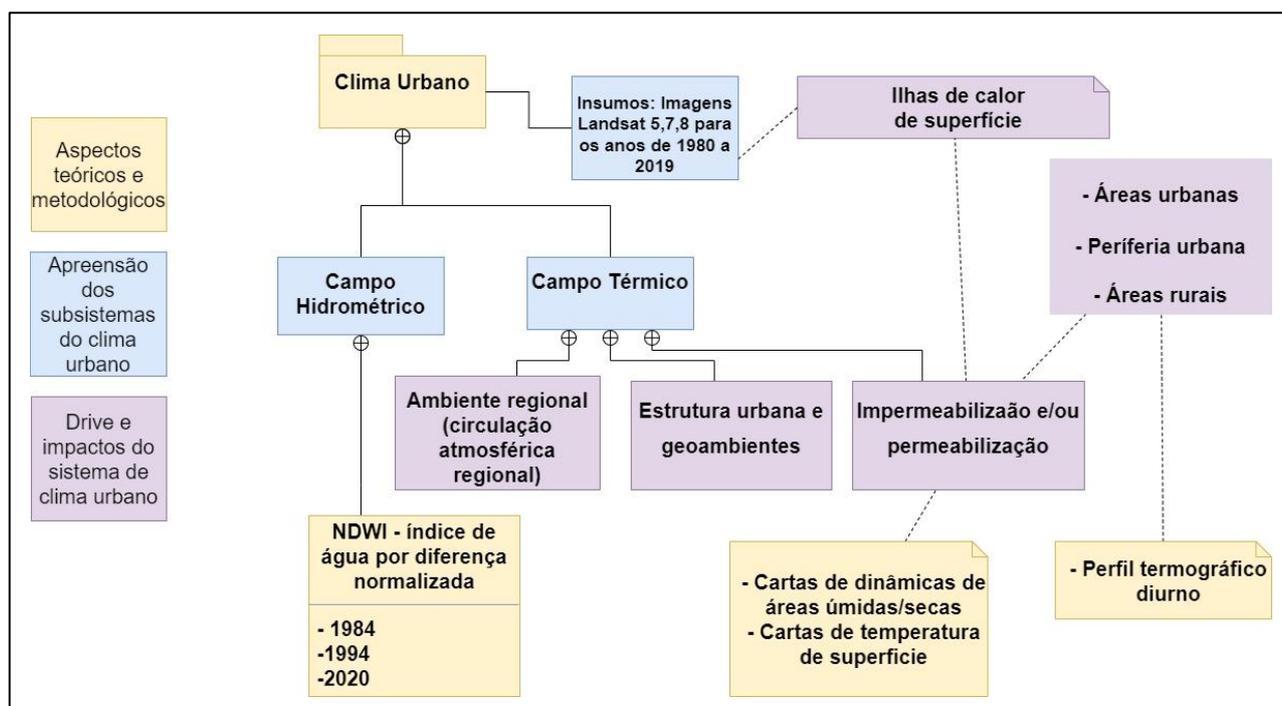


Figura 1 - Diagrama metodológico da pesquisa contendo as fases dos processamentos.

Fonte: elaborada pelos autores (2023).

As mudanças na cobertura e uso da terra têm demonstrado implicações severas com as tendências de aumento da expansão urbana, o que tem levado à supressão das

florestas, daí a necessidade de quantificar qual foi o aumento da temperatura de superfícies dessas áreas e quais áreas de floresta foram convertidas em áreas urbanas ou periurbanas.

Com significância nas mudanças de cobertura da terra, as rodovias têm grande importância no processo de colonização e aberturas de clareiras dentro da Floresta Amazônica, ocasionando mudanças nas estruturas e sistemas ambientais. A produção dos perfis termográficos foi executada em ambiente computacional de vetores, por meio do software *Inkscape*, versão 1.2, usando os dados interpolados de temperatura no Qgis 3.22. Utilizando as ferramentas Grass e SAGA, foi possível gerar imagem de extensão JPEG para apresentar os dados de temperatura, conforme Congedo (2021).

Os fenômenos de secas e inundações na Região Amazônica têm sido amplificados pela ação humana, e, de acordo com Chagas, Chaffe e Blöschl (2022), altas temperaturas e baixas pluviosidades geram maiores demandas de água para agricultura devido ao ressecamento do solo, assim como o aumento de inundações possui fortes paralelismos com os eventos extremos de chuvas. Dados encontrados e já debatidos em Davidson *et al.* (2012) acerca da interconexão existente entre processos biofísicos e socioeconômicos apontam que essas mudanças do clima exigirão medidas mitigatórias de gerenciamento combinado às secas e inundações (Chagas; Chaffe; Blöschl, 2022).

A preocupação com os possíveis aumentos da temperatura e transformações de paisagens tropicais para paisagens savânicas na Região Amazônica é expressa em diversas pesquisas, como as desenvolvidas por Davidson *et al.* (2012), que utilizaram modelos preditivos para climas com influências antropogênicas, e por Chagas *et al.* (2022), que analisaram mudanças no ciclo hidrológico e detectaram fortes influências bio/geofísicas do clima na borda leste da Amazônia. As mais recentes pesquisas revelam que as causas precípuas do aumento de temperatura na região são as queimas e os desmatamentos, que, de acordo com Oliveira *et al.* (2021), causam estresse térmico na escala regional. Os mesmos autores, por meio de modelagem climática, chegaram a encontrar aumento entre 1 °C e 5 °C nos meses mais quentes na Amazônia, e, em forçantes antropogênicas de desmatamento e queimadas, esses valores aumentaram para 11,5 °C no final do século XXI.

Cenários climáticos mais quentes tornam-se um problema ambiental e de saúde pública na região, onde grande parte da população não dispõe de recursos financeiros para aclimatar suas moradias. Assim, serão as crianças e as pessoas mais velhas ou com problemas de saúde que mais irão sofrer com o estresse térmico (Oliveira *et al.*, 2021).

Apesar dos modelos de simulação física, para as forçantes do clima estarem bem avançadas, Liu *et al.* (2023) relacionaram extremos climáticos com as mudanças climáticas e revelaram pontos de inflexões sobre as consequências nefastas das mudanças do clima provocadas pelas ações do homem, também pontuadas por Ritchie *et al.* (2021).

Assim, mesmo com o princípio da incerteza, são unânimes em colocar o homem como responsável pela manutenção da vida no planeta. Esse último argumento envolve a necessidade de novos arranjos de governança global e inovação tecnológica para lidar com as questões clima-sociedade em conjunção com o sistema Terra-biosfera (Steffen *et al.*, 2018). Mesmo autores como Steffen *et al.* (2018), partindo do princípio de que o sistema Terra-Atmosfera já tenha passado por anos de inflexões naturais, afirmam que tais fenômenos seriam capazes de causar instabilidades à vida no planeta.

Nos anos 1960, a fronteira agromineral e silvipastoril na Amazônia passou a ser conhecida como arco do desmatamento, haja vista que as políticas de indução e ocupação da Amazônia foram responsáveis pela supressão da floresta primária para fins de ocupação e circulação de fluxos de capital e mercadorias em escala regional, e a ser denominada por Becker (2007; 2013) de área de povoamento consolidado.

Pesquisas atualizadas mostram que os impactos das diversas atividades na Amazônia estão ultrapassando a funcionalidade da resiliência dos elementos sistêmicos do bioma (Sheil; 2018; Amigo, 2020). Esse  *tipping point*  é caracterizado pelo esgotamento de todos os serviços ecossistêmicos em se estabilizarem, ocasionando a perda total das funções primitivas do sistema climático, momento esse que Liu *et al.* (2023) chegam a caracterizar como “efeito abrupto em cascata”. Outrossim, com as mudanças nas taxas de radiação e de pluviometria, a recomposição/estabilização natural da Floresta Amazônica poderá ser irreversível (Bowman *et al.*, 2021; Lovejoy; Nobre, 2019).

Os regimes climáticos na Amazônia intimamente relacionados com as teleconexões Atmosfera-Terra-Oceano são as anomalias detectadas nas temperaturas de superfícies do Oceano Pacífico Tropical nos períodos interanuais. Essas anomalias são denominadas de El Niño Oscilação Sul (ENOS), em sua fase quente, e La Niña, em sua fase fria. Muitos estudos nessa linha vêm sendo realizados a fim de compreender melhor seus mecanismos e as consequências para os regimes climáticos globais, conforme Saha *et al.* (2022), Wang *et al.* (2019) e An (2009).

Sabe-se que as influências mais fortes ocorrem entre os meses de dezembro, janeiro e fevereiro, atuando sobre os regimes tropicais de chuvas na América do Sul, como afirmam Molion (2005), Kayano *et al.* (2005), Gonzalez *et al.* (2013) e Jiménez-Muñoz *et al.* (2016),

que relatam as influências de ENOS na porção norte e leste da Amazônia como causadoras de anomalias da temperatura de superfície.

Em relação à Região Amazônica, os estudos de Marengo *et al.* (2009) apresentam um panorama dos efeitos do El Niño na Amazônia, dos quais as influências sociais impressas na superfície do solo têm levado a mudanças significativas nos padrões de temperatura e de precipitação na região. Pesquisas de Fisch, Marengo e Nobre (1998) acerca de temperatura e precipitação na Amazônia e mudanças microclimáticas ocasionadas por pastagens fornecem elementos substanciais sobre o papel da floresta na manutenção do clima.

Nesse contexto, as dinâmicas regionais impulsionadas pelo complexo agrossilvipastoril são fortes influenciadoras da expansão do espaço urbano, no sentido de oportunizar espaços de desenvolvimento das atividades econômicas, seja ela no setor de serviço ou no setor secundário.

As perdas de produtivas terras da borda oriental na Amazônia têm acompanhado esse padrão de desenvolvimento das cidades do sudeste do Pará. Outro elemento a ser considerado são as nuances geoestratégicas das políticas territoriais da Amazônia enfocadas em eixos integradores. Assim, as políticas territoriais desse espaço têm sido direcionadas à ocupação e integração efetiva da Amazônia ao cenário regional, em que os espaços urbanos tendem a cumprir esse papel.

Na Região Amazônica, os estudos de Souza e Avalá (2014) colocam em tela as ilhas de calor na cidade de Manaus a partir de dados do Satélite MODIS. Corrêa *et al.* (2016), usando dados temporais de 2002-2005, também do satélite MODIS, reafirmam a tendência de clima antropogênico em Manaus. Nessa linha, as recentes pesquisas de Silva *et al.* (2021) para a Região Metropolitana de Belém, por meio de vários índices geoestatísticos para definir índices biogeofísicos, são uma importante contribuição aos estudos de clima urbano para a Região Amazônica.

A fim de pesquisar as variações sazonais de temperatura de superfície, Souto e Cohen (2021) observaram que a expansão urbana causa déficit na cobertura da vegetação e aumenta a temperatura de superfície, estando esses parâmetros intimamente relacionados. A esse respeito, coadunam as conclusões de Carvalho, Souza e Makino (2013) para o leste da Amazônia brasileira, que, ao analisarem uma área de densa floresta pluvial em comparação à área de pastagem, concluíram que, em áreas de floresta, existe maior variação diurna de temperatura em relação às áreas de pastagem. Assim, vegetação e

umidade são indicadores ambientais importantes no controle das temperaturas de superfícies.

Esses processos também afetam os ambientes rurais, e as comunidades tradicionais amazônicas têm procurado adaptar-se às mudanças do clima. A percepção dos povos tradicionais em relação a esses processos infere que essas mudanças estão em franco processo e já podem ser sentidas na diminuição das chuvas. Dubreuil *et al.* (2017) e Fanatsu *et al.* (2019) têm se debruçado sobre os efeitos da variabilidade das chuvas na vida de agricultores e os impactos das variações de cheias e secas dos rios na vida dos ribeirinhos.

Estudos realizados por Aleixo *et al.* (2021) e Aleixo e Silva-Neto (2019), utilizando dados de temperatura de superfície e índice de vegetação por diferença normalizada, apontam mudanças significativas no campo térmico, produzindo ilhas de calor urbana, e indicam que a presença de cobertura vegetal favorece ilhas de frescor. Contudo, o estudo de Lopes, Aleixo e Silva-Neto (2019) afirma que, em áreas com significativa cobertura vegetal nas bordas da cidade, isso não é necessariamente um fator de amenidade da temperatura, já que a cidade influencia o balanço de energia.

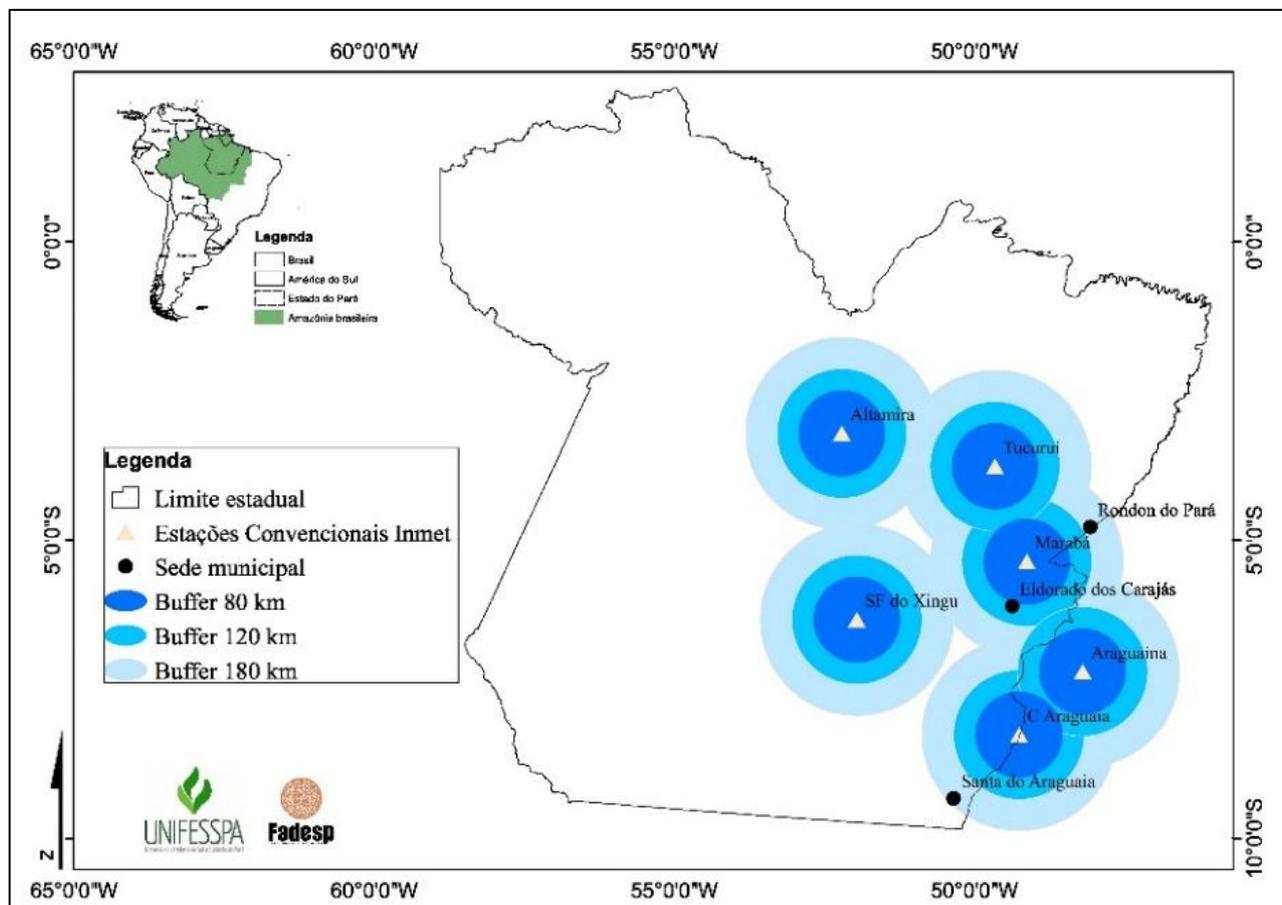
As temperaturas de superfície são fortes indicadores de variabilidade climática das cidades amazônicas, cuja expansão ocorre em consequência da eliminação das florestas e das intervenções nas calhas dos rios intermitentes, os vazios urbanos, que, para se manterem sem a presença de vegetação, passam por processos de queima que são economicamente mais baratos e têm resultados rápidos, sendo herança milenar das práticas das comunidades amazônicas.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As sucessivas revisões de literatura no campo da variabilidade climática nas regiões tropicais apontam uma complexidade desse clima (Bahr *et al.*, 2021; Fleischmann *et al.*, 2020; Marengo *et al.*, 2009; Fisch; Marengo; Nobre, 1998). O quantitativo de radiação proveniente do sol que chega às áreas tropicais gera um extenso campo convectivo (Betts *et al.*, 2009) e migrações da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), produzindo padrões de precipitação que estão entre as forçantes climáticas atuantes na América do Sul

O maior desafio ao realizar análises temporais dos elementos do clima do município da região sudeste do Pará reside no fato de que há distribuição irregular das estações meteorológicas. Outrossim, grande parte das análises estatísticas fica comprometida; contudo, é possível estimar valores de temperatura para os municípios onde não há

estações meteorológicas para realização de coletas, daí a importância dos satélites de observação da Terra. Ao analisar a distribuição das estações dos municípios de Rondon do Pará, Eldorado do Carajás e Santana do Araguaia, percebe-se que as estações mais próximas desses municípios são as de Marabá e Conceição do Araguaia (Figura 2).



**Figura 2** - Distribuição das estações meteorológicas e sua influência para alguns municípios da região de Carajás no estado do Pará. **Fonte:** Elaborada pelos autores (2023) com base em IBGE (2010) e Inmet (2022).

Assim, foram usados como referência os municípios de Rondon do Pará e Eldorado do Carajás (com sedes distantes 80 km e 120 km da estação Marabá, respectivamente) para os dados de temperaturas com séries históricas maiores que 30 anos. Para caracterização das normas termográficas de Santana do Araguaia, foram tomados com base os dados da estação convencional de Conceição do Araguaia, distante 180 km da sede de Santana do Araguaia. A Tabela 1 demonstra as células, em tons de verde e marrom, respectivamente, com dados de temperaturas mais frias e mais quentes. A célula destacada em tom vermelho traz referência ao mês com temperatura mais alta entre as décadas analisadas.

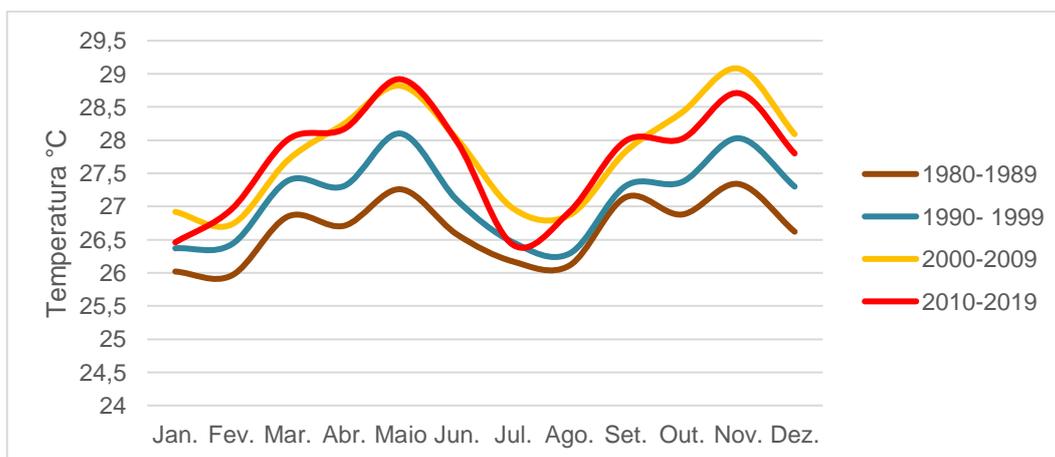
**Tabela 1** – Temperaturas na estação do município de Marabá–PA entre as décadas de 1980 e a década de 2010.

Meses	Décadas			
	1980-1989	1990-1999	2000-2009	2010-2019
Jan	26,02	26,37	26,92	26,46
Fev	25,96	26,43	26,73	26,96
Mar	26,85	27,39	27,70	28,01
Abr	26,71	27,31	28,25	28,17
Mai	27,26	28,10	28,82	28,92
Jun	26,58	27,10	28,02	27,98
Jul	26,17	26,46	26,97	26,42
Ago	26,11	26,29	26,87	26,92
Set	27,14	27,31	27,83	27,99
Out	26,88	27,37	28,42	28,02
Nov	27,34	28,03	29,08	28,71
Dez	26,62	27,30	28,09	27,80

**Fonte:** elaborada pelos autores (2023) com base em Inmet (2022).

A década de 2000 foi a que registrou as maiores temperaturas. Conforme o Gráfico 1, é possível conferir toda a série em comparação com as demais décadas, e, em todos os períodos dos anos, é possível perceber o incremento das temperaturas, bem como a década de 1980 como a que apresentou temperaturas mais baixas.

De modo geral, analisando as séries temporais na década de 1980, a temperatura mais alta registrada foi de 27,34 °C; na década de 1990, foi de 28,10 °C; na década de 2000, foi de 29,08 °C no mês de novembro; e na década de 2010, foram registrados novos picos de temperaturas, apresentando 29,93 °C. Esses eventos colaboram com os dados de Davidson *et al.* (2012), Jiménez-Muñoz *et al.* (2016) e, mais recentemente, Chagas *et al.* (2022). Assim, entre as décadas de 1980 a 2010, as médias de temperatura tiveram um aumento de 1,06 °C nos últimos 39 anos (Gráfico 1).



**Gráfico 1** – Variações termográficas do município de Marabá–PA, aumento entre as médias de temperaturas entre a década de 1980 e a década de 2010.

**Fonte:** elaborado pelos autores (2023) com base em Inmet (2022).

Foram usados os dados da estação meteorológica de Conceição do Araguaia para estimar dados de temperatura de Santana do Araguaia a fim de realizar a análise do comportamento térmico e, posteriormente, comparar com os dados do sensor térmico Landsat, conforme diagrama metodológico da Figura 1.

No caso do município de Santana do Araguaia, a estação mais próxima é a de Conceição do Araguaia, que disponibiliza dados de temperatura desde os anos 1980 (Tabela 2).

**Tabela 2** – Temperaturas por década na estação do município de Conceição de Araguaia entre as décadas de 1980, 1990, 2000 e 2010, com valores indicativos de aumento de 1,87 °C de temperatura em 39 anos.

Meses	Décadas			
	1980-1989	1990-1999	2000-2009	2010-2019
Jan	25,12	25,83	26,44	26,42
Fev	25,46	26,2	26,34	26,88
Mar	25,15	27,21	27,54	28,42
Abr	26,55	27,28	27,88	28,58
Mai	27,02	27,98	28,56	29,85
Jun	26,04	26,44	26,95	27,38
Jul	25,44	25,83	26,76	26,42
Ago	25,65	26,24	26,34	26,86
Set	26,41	27,33	27,54	28,35
Out	26,59	27,36	27,86	28,58
Nov	27,08	27,98	28,84	29,85
Dez	26,04	26,39	26,98	27,38

**Fonte:** elaborada pelos autores (2023) com base em Inmet (2022).

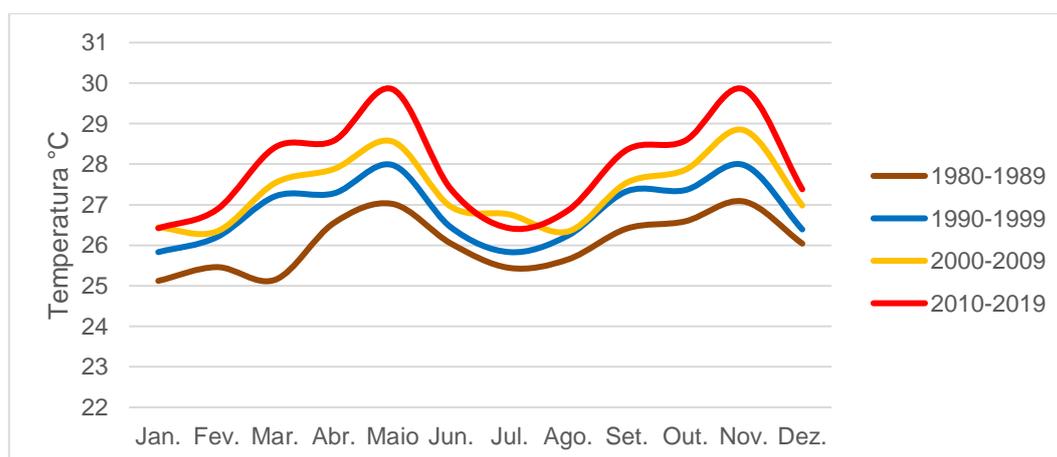
Dois comportamentos termográficos aparecem na Tabela 2: o mês de janeiro da década de 1980 apresenta temperatura mais amena (25,12 °C) do que o restante dos demais anos da década, sendo possível notar crescimento de temperatura nos últimos anos; e a média mensal de temperatura da década 2010 aparece nos meses de janeiro e julho, com 26,42 °C.

O mês de novembro de todas as décadas vem caracterizando-se como o mais quente, mantendo os padrões de elevação de temperatura em todos os períodos, o que permite inferir que o mês de novembro, na década de 1980, era de 27,08 °C e, na década de 2010, era de 29,85 °C, representando mais uma vez acréscimo.

Na distribuição das médias de temperatura nas décadas de 1980, 1990, 2000 e 2010, houve um aumento de 1,87 °C de temperatura nesses 39 anos. Esses dados revelam variabilidade climática com riscos climáticos, já discutido por Davidson *et al.* (2012) e por

Jiménez-Muñoz *et al.* (2016), ficando acima das previsões mais pessimistas do Acordo de Paris, no qual se estabeleceu a meta global de aumento de temperatura de, no máximo, 1,5 °C em relação à era pré-industrial (IPCC, 2022).

As normais termográficas apresentam fortes oscilações na transição entre o fim do inverno e início da primavera do Hemisfério Sul. A ZCIT, que gera precipitações no norte da Amazônia, também é sentida na porção leste da região de Carajás, como bem caracterizado no gráfico 2 para a estação de Conceição do Araguaia. Assim, foram usados como referência os municípios de Rondon do Pará (80 km) e Eldorado do Carajás (120 km), que não disponibilizam dados de temperatura para séries históricas maiores que 30 anos.



**Gráfico 2** – Variações termográficas do município de Conceição do Araguaia–PA entre a década de 1980 e a década de 2010. **Fonte:** elaborado pelos autores (2023) com base em Inmet (2022).

Nos anos da década de 2010, representado no gráfico 2, as temperaturas estavam sob efeitos moderados dos fenômenos El Niño e La Niña, sendo na borda leste da Amazônia que se experimentam os períodos mais prolongados de acréscimo/decréscimo das normas pluviométricas e, conseqüentemente, maior/menor ressecamento do solo. Esses dados também corroboram os já encontrados por Molion (2005), Gonzalez *et al.* (2013) e Jiménez-Muñoz *et al.* (2016).

### 3.1. Comportamento térmico e hidrométrico de cidades na borda leste da região de Carajás

Cidades como Santana do Araguaia, no Pará, apresentam clima comandado regionalmente pela massa de ar equatorial continental, a ZCIT, e pelas linhas de instabilidades. No final da década 1970, Nimer (1979) já havia classificado o clima da parte sudeste do Pará em quente e úmido, com três meses secos.

Novas análises têm sido feitas com pequenos ajustes, atualizando os estudos de Nimer (1979), como a análise de Sant'Anna Neto e Nery (2005), que, por meio dos sistemas atmosféricos, caracterizaram regionalmente a porção sudeste do Pará em clima tropical com verões quentes e chuvosos.

Mendonça e Danni-Oliveira (2007) usaram critérios de distribuição de temperatura e pluviosidade e definiram a região sudeste do Pará como um clima tropical equatorial com quatro a cinco meses secos. E, em estudo mais recente para tipos de clima anual, Dubreuil *et al.* (2018) definiram o clima regional do sudeste do Pará como quente com chuvas de verão. Assim, os efeitos da continentalidade, em todo o município, são atuantes em todos os períodos do ano, sendo influenciados pelos sistemas de circulação primários e secundários.

Ao analisar os dados do sensor termal da série Landsat para a área urbanizada do município de Santana do Araguaia, observou-se que as médias de temperaturas na década de 1980 foram de 19,3 °C para as mínimas e de 27 °C para as máximas, com média de 23 °C; na década de 1990, as máximas e as mínimas foram, respectivamente, de 16,6 °C e 26,2 °C, com média de 22,8 °C; na década de 2000, as mínimas temperaturas foram de 21,2 °C e as máximas foram de 28,3 °C, ficando com média de 25 °C; e na década de 2010, o incremento dos dados termográficos ficou com mínimas de 24,2 °C e máximas de 31,7 °C, apresentando médias de 28,2 °C (Tabela 3).

**Tabela 3** – Diferenças entre a dinâmica termográfica da cidade de Santana do Araguaia entre as décadas de 1980, 1990, 2000 e 2010, com ênfase nas temperaturas mínima e máxima.

Décadas	Temp. mínima em °C	Temp. máxima em °C	Temp. média em °C	Desvio-padrão
1980	19,3	27	23	1,7
1990	16,6	26,2	22,8	1,3
2000	21,2	28,3	25	1,3
2010	24,2	31,7	28,2	1,5

Fonte: elaborada pelos autores (2023) com base em Landsat 5, 7, 8.

Na década de 1980, a média foi de 23 °C; já na década de 1990, muito provavelmente, a média de 22,8 °C estava sendo influenciada por efeitos de La Niña. Na década de 2000, houve um incremento da média para valores de 25 °C, enquanto, na década de 2010, houve média de 28,2 °C, demonstrando claramente efeitos de El Niño. A diferença de temperatura apresenta um gradiente térmico de 5,2 °C (temperatura média entre 23 °C e 28 °C) entre as quatro décadas analisadas. Ao comparar os dados do sensor termal com os dados da estação de Conceição do Araguaia, percebe-se que a dinâmica termográfica tem uma

diferença de 13,2% entre os valores encontrados para as médias de temperaturas nas décadas, ou seja, enquanto a década de 1980 apresentava valor de 23 °C nos dados do sensor termal, na estação meteorológica apresentava valor de 26,05 °C (Tabela 4).

**Tabela 4** – Dinâmica termográfica da cidade de Santana do Araguaia entre a década de 1980 e a década de 2010.

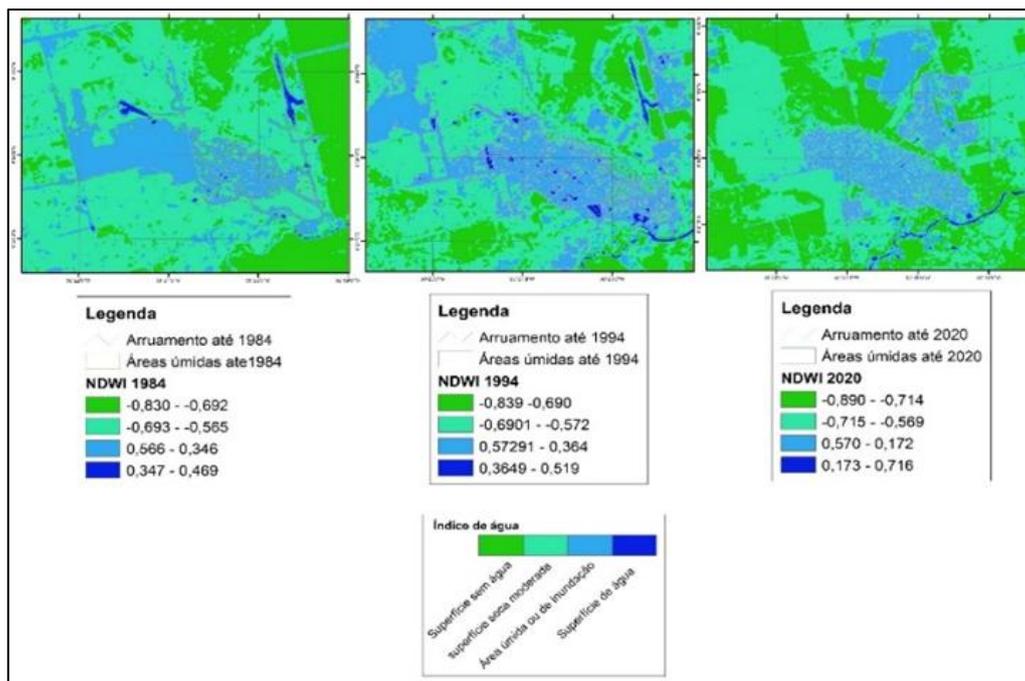
Meses	Intervalos			
	1980 a 1989	1990 a 1999	2000 a 2009	2010 a 2019
Jan	25,12	25,83	26,44	26,42
Fev	25,46	26,2	26,88	26,88
Mar	25,15	27,21	27,54	28,42
Abr	26,55	27,28	27,88	28,58
Mai	27,02	27,98	28,56	29,85
Jun	26,04	26,44	26,95	27,38
Jul	25,44	25,83	26,76	26,42
Ago	25,65	26,24	26,34	26,86
Set	26,41	27,33	27,54	28,35
Out	26,59	27,36	27,86	28,58
Nov	27,08	27,98	28,84	29,85
Dez	26,04	26,39	26,98	27,38
<b>Médias</b>	<b>26,05</b>	<b>26,84</b>	<b>27,33</b>	<b>27,91</b>

**Fonte:** elaborada pelos autores (2023) com base em Inmet (2022).

Na década de 1990, há diferenças de 17,7%; na década de 2000, de 9,32%; e, por fim, na década de 2010, a diferença foi de -3% entre dados do sensor e dados da estação meteorológica. Essas variações entre sensor termal e estação meteorológica apontam que os dados do primeiro são mais próximos da realidade do município de Santana do Araguaia.

Outro aspecto importante sobre as diferenças é que, quando se adentram as questões da temperatura de superfície das cidades, os dados apresentam outro comportamento conforme as questões dos materiais e fontes de absorção e reflectância de radiação. Seguindo um padrão de estabelecimento de sítio urbano próximo às calhas de rios, Santana do Araguaia também apresenta tendência de expansão da malha urbana pelas calhas dos rios. As imagens de satélites processadas com índices de água na superfície possuem porções da superfície em que é possível identificar as áreas úmidas que foram sendo ocupadas (Figura 3).

No ano de 1984, é possível perceber que a cidade se encontrava adensada em planícies de inundações dos rios, ao norte pelo ribeirão Pantera e a sudeste pelo rio Campo Alegre. Os limiares do NDWI de 0,5 revelam que a expansão da cidade esteve atrelada a áreas úmidas, mas que, a partir dos anos de 1994 a 2020, as superfícies de água – limiares do NDWI entre 0,34 e 0,17 – foram desaparecendo, o que indica áreas drenadas ou aterradas para darem lugar à instalação de novos bairros.

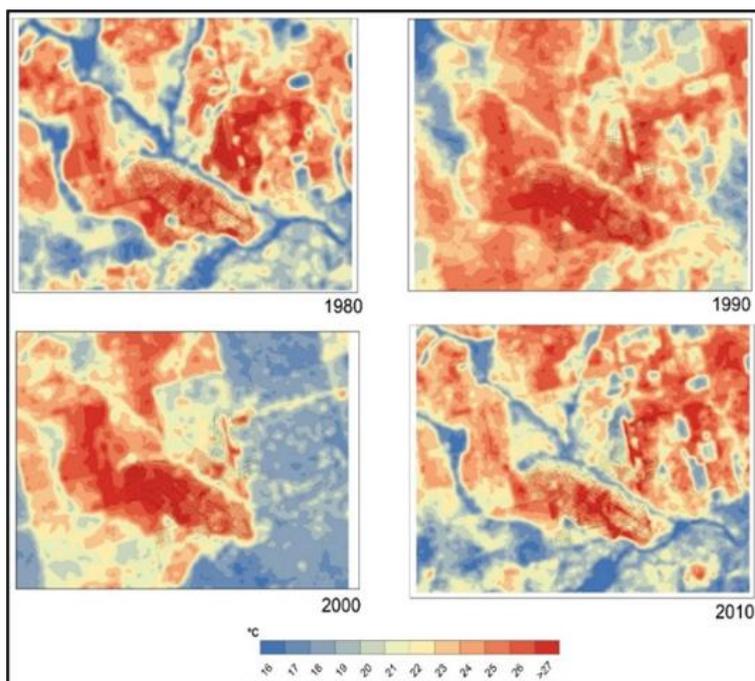


**Figura 3** – Dinâmica das áreas úmidas e expansão das áreas urbanas de Santana do Araguaia entre 1984, 1994 e 2020 por meio da composição do NDWI com ênfase na identificação das planícies de inundações. **Fonte:** elaborada pelos autores (2023) com base em Landsat 5,7,8.

O fato é que, ao longo dos anos, essas áreas, que poderiam ser destinadas a espaços públicos capazes de se tornarem pontos de umidade que levariam amenidades para a área urbana, foram se perdendo. Dando destaque para o subsistema hidrométrico por meio de dados de sensores orbitais, é possível dimensionar os aspectos de perda de umidade do solo ou mesmo o ressecamento de áreas do centro da cidade, que contribuem sobremaneira com as alterações de temperaturas e a formação de bolhas de ar quente ao longo dos anos. Esse fator reflete o comportamento de altas taxas de radiação em todas as partes da cidade, e mesmo nas áreas periféricas pode-se inferir que houve perturbações significativas nos níveis de temperatura de superfície do solo.

A expansão da cidade acompanha o aumento de fluxo de radiação dentro dos espaços urbanos por meio das malhas viárias, construção de prédios, praças e seus monumentos arquitetônicos. Mantas asfálticas são responsáveis pela concentração de início de ilhas de calor na cidade de Santana do Araguaia (Figura 4).

A presença da vegetação nas drenagens fluviais (manchas em azul na Figura 4) começa a ser percebida principalmente nas décadas de 1980 e de 2010, fruto de intensas chuvas provocadas pelos fenômenos de La Niña, também podendo ser vistas pelos índices de água. Os trabalhos de Saha *et al.* (2022), Wang *et al.* (2019) e Cavalcanti e Silveira (2013) têm permitido compreender tais influências dos fenômenos de La Niña.



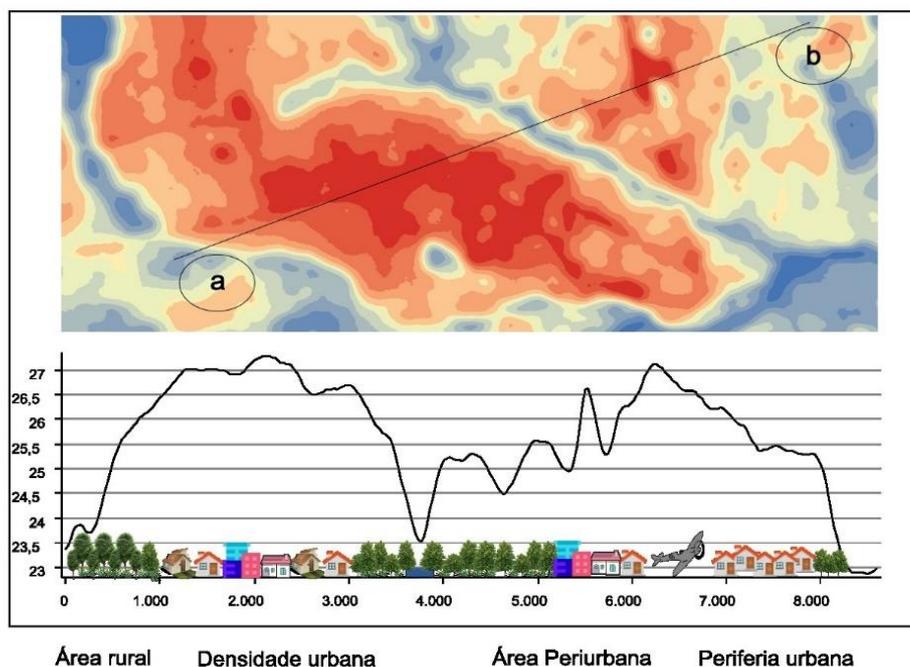
**Figura 4** – Variabilidade de temperatura de superfície em °C da cidade de Santana do Araguaia para as décadas de 1980 a 2010. **Fonte:** elaborada pelos autores (2023) com base em Landsat 5, 7, 8.

Na transição entre o fim do inverno e a chegada da primavera na borda oriental da Amazônia, os efeitos de La Niña estão no grande volume de umidade no ambiente. Mesmo havendo umidade, esta não é capaz de amenizar os efeitos da temperatura, já que os processos de condensação liberam energia, processo este capturado pelos sensores orbitais.

Os efeitos da transição das estações do ano (inverno-primavera) e os efeitos de La Niña estão bem representados entre as altas temperaturas e a grande concentração de água nas manchas das áreas úmidas, revelando que, mesmo com a densificação e o espraiamento da malha urbana, os ambientes fluviais, como terraços e planícies de inundações, são reativados. Essa influência está em consonância com os estudos de Gonzalez *et al.* (2013) e Kayano *et al.* (2005), já que as imagens processadas por meio dos índices de água (NDWI) revelam mudanças de anos de El Niño/La Niña, como evidenciado na Figura 3.

As áreas de expansão da cidade distantes dos centros urbanos apresentam médias de temperatura de 23,5 °C, com forte tendência à produção de clima antropogênico nas áreas periféricas da cidade, ou seja, mesmo próximos a ilhas de frescor, com temperatura em torno de 17 °C, o fato de as casas estarem adensadas, com ambiente altamente

impermeabilizado, topografia plana e existência de poucas árvores, contribui para o quadro de altas temperaturas (Figura 5).



**Figura 5** – Perfil termográfico diurno da cidade de Santana do Araguaia, transecto a - b com as formas de uso da terra e as médias das décadas de 1980 a 2020. **Fonte:** elaborada pelos autores com base em Landsat 5, 7, 8 e trabalho de campo (2022).

O comportamento termal apresenta diferenças marcantes entre os dados coletados na estação de Marabá e os dados do sensor termal. Ao realizar um perfil termográfico entre a área urbana e a área rural, observa-se um gradiente térmico na ordem de aproximadamente 11 °C entre as duas áreas.

As altas temperaturas de superfície do solo, em torno de 27 °C, revelam o dado contraditório de que há 51% de áreas urbanizadas, que as imagens de satélites em resolução de 30 metros não foram capazes de demonstrar, em razão dos efeitos dessa cobertura vegetal, necessitando de melhores informações sobre a metodologia e sensor utilizado para chegar a esse percentual. Assim, recalculer essas taxas de urbanização fugiu ao escopo da presente pesquisa.

Ilhas de calor, clássicas dentro do espaço urbano, são bem caracterizadas no perfil termográfico. As médias dos 40 anos revelam a existência da formação do clima antropogênico nas áreas mais adensadas (centro comercial tradicional). Também é possível apreender que, na área de expansão urbana, há a formação de ilhas de calor, e essas duas porções da cidade precisam ser mais bem analisadas por meio de estudos de

topoclimas e análise do conteúdo urbano. Por outro lado, a presença de vegetação como elemento geoambiental regulamenta o clima da cidade.

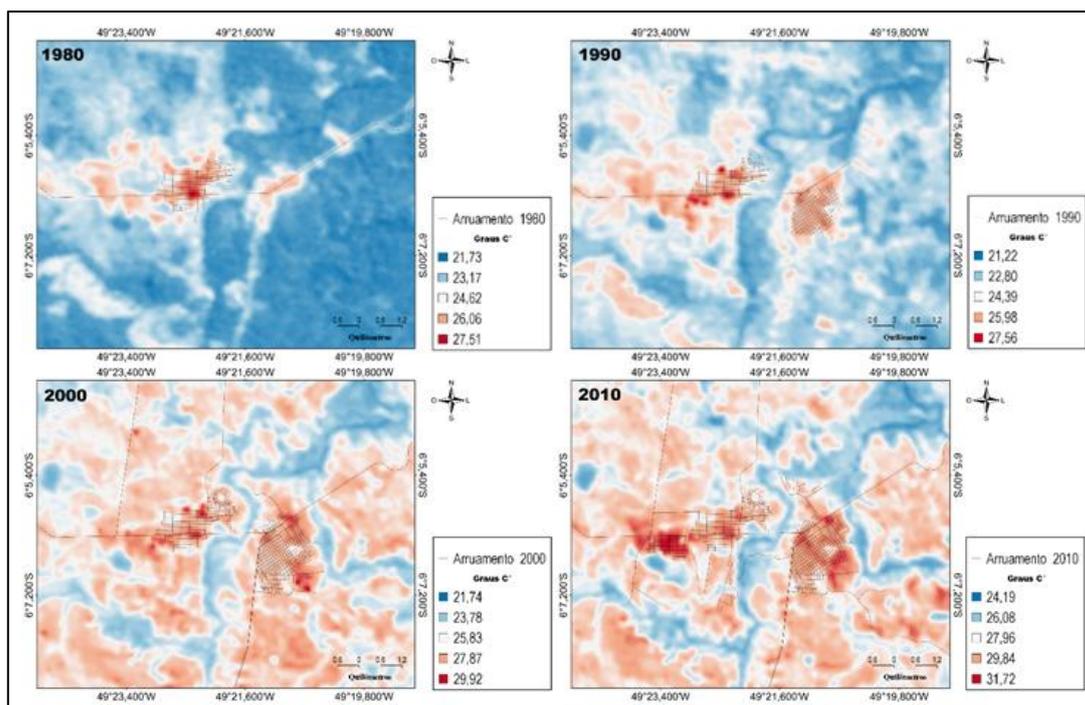
O centro urbano com concentração de veículos e prédios comerciais junto à confluência das avenidas Núncio Malzoni e Wilton Brito, e entre a avenida Cirilo Martins de Souza e a rua Cento e Trinta e Oito, é uma grande mancha de temperaturas acima dos 27 °C que está diretamente associada à densidade urbana, sendo amenizada pela presença das matas ripárias que fornecem ilhas de frescor dentro das cidades – esta última área apresenta temperatura de até menos 18 °C.

Os aspectos geoambientais, como vales fluviais com aproximadamente 160 metros de altitude, formações florestais, solos umidificados e disponibilidade de umidades, refletem ambientes com temperaturas mais baixas. Esses bolsões de ar frio, em torno dos 18 °C, estão localizados nas áreas periurbanas e nas periferias rurais. Esta última está relacionada a fragmentos de florestas, reservas legais de propriedades rurais ou ainda a matas ripárias que bordejam a cidade em questão.

O município de Eldorado do Carajás está localizado na latitude -6.1059 e longitude -49.3033, tem uma população de 31.786 habitantes e densidade demográfica de 10,75 hab/m<sup>2</sup> e, em 2010, contava com um IDH de 0,560, apresentando uma taxa de arborização de vias públicas de 24% (IBGE, 2010). A sua sede vem experimentando nas últimas quatro décadas aumento de temperatura da superfície do solo. Aspectos como topografia, vento, impermeabilização com manta asfáltica, uso de cimento nos prédios comerciais e habitacionais, entre outros elementos do urbano, são responsáveis por tais mudanças do clima intraurbano.

Foram utilizados dados climatológicos da estação de Marabá (INMET, 2022), com buffer de 120 km do mapa de distribuição das estações em relação à sede municipal de Eldorado do Carajás (ver Figura 2); assim, as médias termográficas anuais são de 26,9 °C, com média máxima de 27,8 °C e média mínima de 26,3 °C.

Os dados do sensor Landsat demonstram que as áreas com temperaturas mais elevadas na década de 1980 eram aquelas próximas ao eixo rodoviário da PA-275, com médias de temperatura mínima de 21,7 °C e máxima de 27,5 °C, ficando com variação de 5 °C entre janeiro-dezembro. Para a década de 1990, também já é possível ver a expansão da malha urbana, em que as temperaturas apresentaram mínima de 21,2 °C e máxima de 27,5°, ficando com variação de 6,3 °C entre janeiro-dezembro. Entre as décadas, houve um aumento de 26% nos valores de temperatura dos primeiros 20 anos analisados (Figura 6).



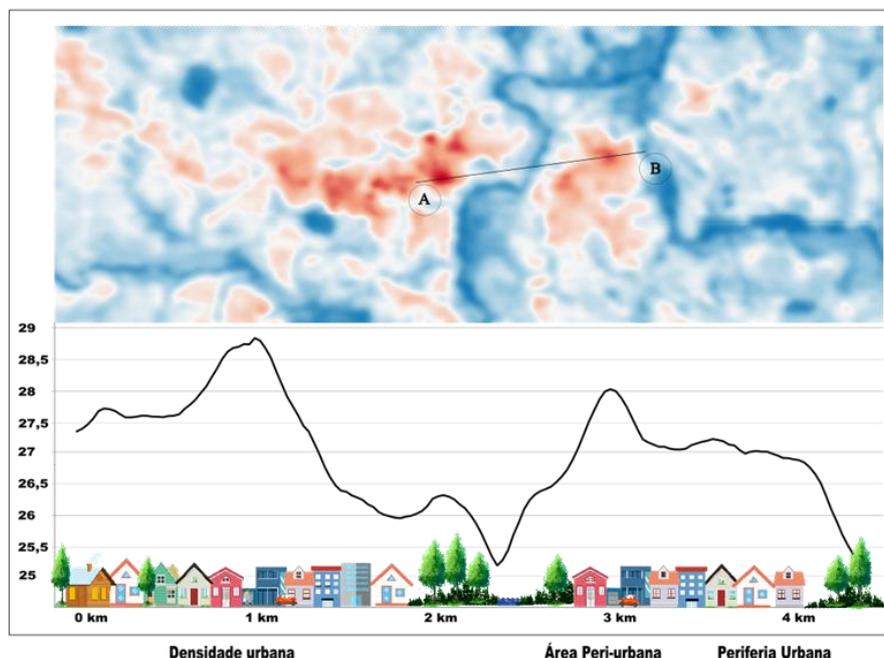
**Figura 6** – Sequência de mapas das médias termais das décadas 1980, 1990, 2000 e 2010 para Eldorado do Carajás. **Fonte:** elaborada pelos autores (2022) com base em Landsat 5,7,8.

Com a consolidação da malha urbana de Eldorado do Carajás, as décadas de 2000 e 2010 foram as que mais registraram aumentos nas temperaturas. É possível ver um acréscimo de aproximadamente 11% nas médias mínimas, que estavam entre 21,7 °C para a década de 2000 e 24,19 °C para a década de 2010. Ao analisar a Tabela 5, pode-se afirmar que a temperatura mínima na década de 1980 foi de 22,2 °C e a máxima foi de 31 °C, com média de 26,6 °C. Para a década de 1990, a mínima foi de 21,1 °C e a máxima foi de 29,7 °C, com média de 25,4 °C, sendo que essa última década apresentou a menor temperatura de todas as décadas analisadas.

Seguindo a análise da Tabela 5, há temperaturas máximas de 31 °C para a década de 1980, de 29 °C para a década de 1990 e 33,3 °C para a década de 2000 – essa última década apresentou a temperatura de 33,3 °C, sendo a mais alta em todas as décadas analisadas. A cidade de Eldorado do Carajás é dividida em dois núcleos urbanos separados pelo rio Vermelho; diante disso, a estrutura térmica da malha urbana também se divide em duas áreas com temperaturas mais elevadas, sendo possível ver o perfil termográfico diurno (Figura 7).

Outro caso de anomalia e formação de bolsas de ar quente é a cidade de Rondon do Pará, delimitada pelas coordenadas 04°46'34" S e 48°04'02" W, com gradientes topográficos de 195 metros, e distante 147 km da cidade de Marabá. A temperatura de

superfície do solo de Rondon do Pará assemelha-se às demais cidades analisadas, em que se percebe aumento das temperaturas nas últimas quatro décadas.



**Figura 7** – Perfil termográfico diurno da cidade de Eldorado do Carajás.

**Fonte:** elaborada pelos autores (2022) com base em Landsat 5,7,8.

A diferença do padrão do desenho urbano de Rondon do Pará é que a cidade se concentrou no eixo da BR-222, apresentando aumento crescente dos valores termográficos. Para a década de 1990, observa-se uma pequena variação das temperaturas mínimas, marcando 21,1°C, que foi captada pelo sensor termal Landsat, revelando forte influência de fatores de La Niña. Nos anos de maior estiagem, provocados pelo efeito do El Niño, como a década de 2000, as temperaturas chegaram a apresentar máximas de 33,3°C (Tabela 5).

**Tabela 5** – Dinâmica termográfica da cidade de Rondon do Pará entre as décadas de 1980 a 2000.

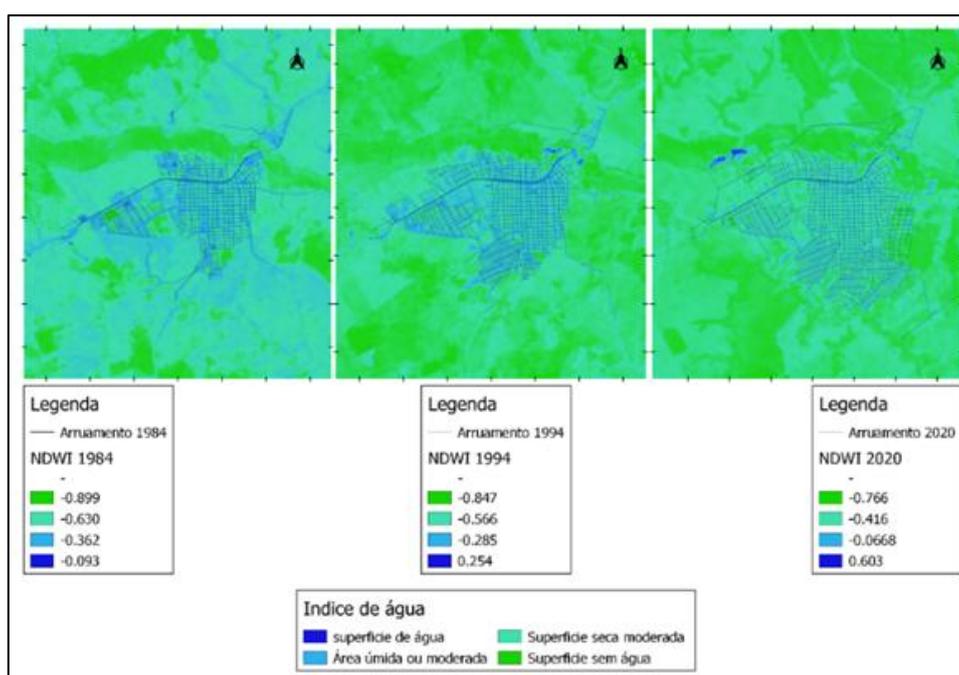
Décadas	Temp. mínima em °C	Temp. máxima em °C	Temp. média em °C	Desvio-padrão
1980	22,2	31,0	26,6	1,7
1990	21,1	29,7	25,4	1,0
2000	22,4	33,3	27,8	1,7

**Fonte:** elaborada pelos autores (2022) com base em Landsat 5,7,8.

Na década de 1980, a média de temperatura estava em 26,6°C; na década de 1990, 25,4°C; e na década de 2000, já apresentava valores de 27,8°C, representando um aumento de 1,2°C. Os valores de ressecamento do solo analisado pelo NDWI corroboram

os dados do sensor Landsat da mesma série, sintetizado na Tabela 5. Utilizando como referência o ano de 1994, os valores de ressecamento do solo, entendido aqui como índice de água (NDWI), demonstram a dinâmica do campo hidrométrico do Sistema de Clima Urbano – SCU (Figura 8).

O ano de 1984 se caracterizou como ano de La Niña, e as superfícies de água estão bem visíveis, nos limiares de -0,093 de NDWI. Já para os anos de 1994, teve-se a influência de El Niño, que marcou fortemente superfícies sem água, nos limiares negativos de -0,847 de NDWI. Em 2020, La Niña voltou a influenciar a dinâmica da umidade; assim, os valores de superfície de água com seca moderada estavam em valores negativos de -0,416 de NDWI.

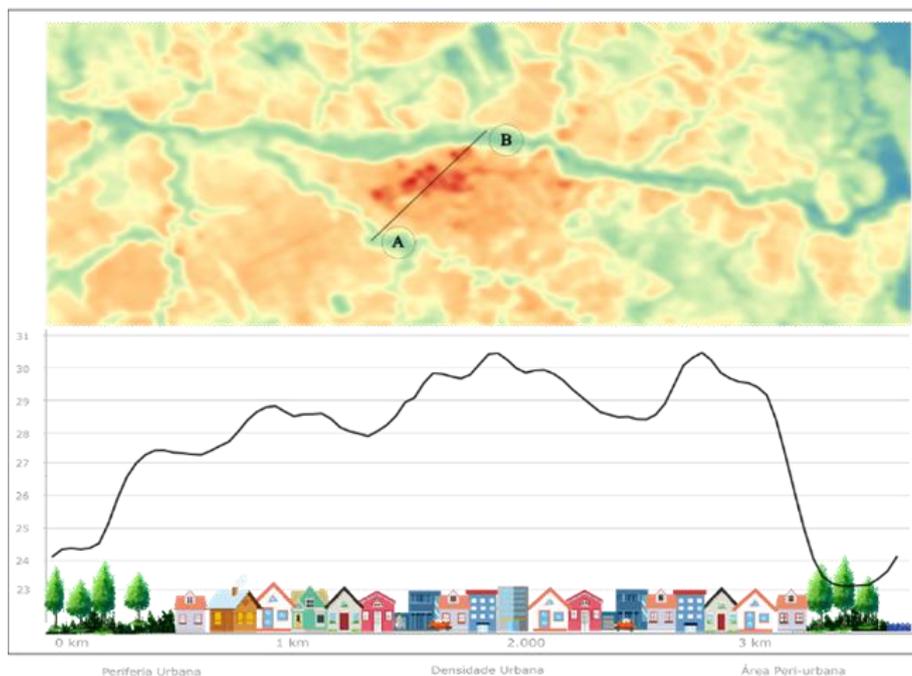


**Figura 8** – Dinâmica das áreas úmidas e expansão das áreas urbanas da cidade de Rondon do Pará entre 1984, 1994 e 2020 por meio da composição do NDWI.

**Fonte:** elaborada pelos autores (2022) com base em Landsat 5, 7, 8.

A dinâmica de clima urbano nos últimos anos apresentada pela formação de ilhas de calor na cidade de Rondon do Pará pode ser percebida no perfil termográfico (Figura 9). As florestas ripárias são bioindicadores de conforto térmico que apresentam temperatura de 23°C, diferenciando-se da área central da cidade, que aponta para temperaturas de aproximadamente 30°C. O gradiente térmico entre a periferia urbana e periurbana em comparação com a área adensada ficou em torno de 7°C, revelando ilhas de calor em uma pequena cidade da Amazônia.

O desenho urbano é, sem dúvida, um elemento importante na análise de formação de ilhas de calor em Rondon do Pará, acompanhado da baixa cobertura vegetal e da tipologia dos materiais que compõem a infraestrutura dos prédios, somado à manta asfáltica de suas vias que completam os mecanismos de formação de anomalias de temperatura na cidade.



**Figura 9** – Perfil termográfico da cidade de Rondon do Pará dos anos de 1980 a 2020.

**Fonte:** elaborada pelos autores (2022) com base em Landsat 5, 7, 8.

O processamento de imagens Landsat, a composição de NDWI e a estruturação do perfil termográfico foram realizados em todas as cidades pesquisadas. Conclui-se que, em Santana do Araguaia, os resultados obtidos mostram que o aumento da expansão urbana, agravados pelos efeitos de ENOS na borda oriental da Região Amazônica, levou a aumentos expressivos de temperatura, na ordem de 5,2°C nos anos analisados. Para a cidade de Rondon do Pará, os resultados produzidos demonstram um aumento na temperatura na ordem de 1,2°C, mostrando que a alteração do uso do solo por processos urbanos influencia diretamente o campo térmico local (ilhas de calor). Eldorado do Carajás apresentou, entre as cidades estudadas, o maior acréscimo da temperatura, com valores alcançados na ordem de 6,3°C. Isso ocorreu em função da consolidação de sua malha urbana entre as décadas de 2000 e 2010, influenciando diretamente o aumento das temperaturas.

As variabilidades climáticas são condições naturais do comportamento da atmosfera, e suas mudanças em escalas de topoclima e mesoclima já estão bem descritas na literatura. Na Amazônia, as condições meteorológicas na porção leste da região sofrem

influência significativa dos ENOS. Essas anomalias são responsáveis por excesso e deficiência de precipitações em toda a região sudeste do Pará.

A expansão espontânea das áreas urbanas tem implicado em várias mudanças ambientais, daí o presente estudo aponta para possíveis e indelévels alterações no clima urbano com a formação de ilhas de calor.

#### **4. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Elementos como solos expostos têm grande influência na formação anômala de bolsas de radiações nas bordas dos centros urbanos. Outro elemento importante de formação de ilhas de calor nas cidades pesquisadas relacionou-se com os eixos rodoviários, já que há uma tendência de as cidades crescerem acompanhando as rodovias. Soma-se à formação de ilhas de calor urbana a baixa densidade de árvores, em que é sabido que estas retêm umidade, fornecem sombras, filtram o ar etc., exercendo um importante papel nos serviços ecossistêmicos.

A Gestão ambiental para combater as mudanças climáticas passa pela articulação de uma secretária especial nas prefeituras (plano diretor verde) que inclui-se a expertise dos centros de pesquisa locais, essa secretária teria recursos próprios para o desenvolvimento de políticas e ações visando o funcionamento do plano diretor integrado ao desenvolvimento regional. Isso é essencial ao fortalecimento de uma governança municipal comprometida com os rumos que a morfologia da cidade estar se constituindo, a governança no âmbito ambiental, é o esforço coletivo entre agentes públicos, setores econômicos e cientistas, em espaço participativos e deliberativos com diálogo e ações conjuntas para mitigar dilemas associado à emergência climática.

A valorização do verde dando condição de resiliência as cidades por meio de delimitação de arquipélagos e ilhas de calor deverão ser seguidas por mapas informando os melhores corredores da cidade para implementação pela prefeitura com a coordenação dos cientistas e executores de políticas públicas de um cinturão de esverdeamento, assim, a produção de áreas verdes adensadas por vias públicas e em passeios públicos por meio de chafariz completaria a nova arquitetura de espaços urbanos de baixo carbono.

Recursos hídricos urbanos como corpos hídricos auxiliando no arrefecimento de superfícies impermeáveis são elementos importantes para ajuste de corpos d'água em espaço urbano, como estudos mais detalhados em modelagem de evapotranspiração para cada cidade, já que cada uma tem sua própria morfologia urbana. A pesquisa demonstrou que há expressivo gradiente de temperatura entre as áreas centrais e as áreas periféricas,

apontando que as temperaturas são mais baixas onde há maior área vegetada e que, ao contrário, as temperaturas tendem a ser mais altas onde há pouca vegetação.

## REFERÊNCIAS

ALCOFORADO, M. J.; ANDRADE, H.; LOPES, A.; VASCONCELOS, J. Application of climatic guidelines to urban planning: the example of Lisbon (Portugal). **Landscape and Urban Planning**, v. 90, 2009.

ALEIXO, N. C. R.; SILVA-NETO, J. C. A.; ALVEZ, C. S.; FIGUEIRA FILHO, A. Ilhas de calor em cidade de pequeno porte na Amazônia brasileira: análise de Uarini-am. **Revista Geoaraguaia**, v. 11 n. esp., p. 166-186, 2021.

ALEIXO, N. C. R.; SILVA-NETO, J. C. A. O campo térmico em área urbana na Amazônia brasileira: análise episódica na cidade de Tefé-AM. **Geo UERJ**, n. 34, p. 1-29, 2019.

AMIGO, I. When will the Amazon hit a tipping point? **Nature**, v. 7769, n. 578, 2020.

BAHR, A.; KABOTH-BAHR, S.; JAESCHKE, A. CHIESSI, C.; CRUZ, L.; CARVALHO, L.; RETHEMEYER, J.; SCHEFU, E.; GEPPERT, P.; ALBUQUERQUE, A. L.; PROSS, J.; FRIEDRICH, O. Late Holocene precipitation fluctuations in South America triggered by variability of the North Atlantic overturning circulation. **Paleoceanography and Paleoclimatology**, v. 36, p. 1-17, 2021.

BECKER, B. K. A. **Urbe Amazônica**. Rio de Janeiro: Garamond, 2013. 88p.

BECKER, B. K. A. **Amazônia: geopolítica na virada do III milênio**. Rio de Janeiro: Garamond, 2017. 172p

BETTS, A. K.; FISCH, G.; RANDOW, C. V.; DIAS, M. A. F. S.; COHEN, J. C. P.; SILVA, R.; FITZJARRALD, D. R. The Amazonian Boundary Layer and Mesoscale Circulations. In: KELLER, M.; BUSTAMANTE, M.; GASH, J.; DIAS, P. S. (Orgs). **Amazonia and Global Change**, American Geophysical Union (AGU). v. 186, 2009.

BOWMAN, K. W.; DALE, S. A.; DHANANI, S.; NEHRU, J.; RABISHAW, B. T. Environmental degradation of indigenous protected areas of the Amazon as a slow onset event. **Journal Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 50, 2021.

CARVALHO, S. P.; SOUZA, J. R. S.; MAKINO, M. Observações e estimativas de propriedades térmicas do solo sob floresta e pastagem no leste da Amazônia. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n. 3, p. 331-340, 2013.

CAVALCANTI, I. F. A.; SILVEIRA, V. P. Influência das TSM dos oceanos Pacíficos e Atlântico nos eventos de seca. In: BORMA, L de S.; NOBRE, C. A. **Secas na Amazônia**. São Paulo: Oficina de Textos, p. 78-88, 2013.

CORRÊA, P. B.; CANDIDO, L. A.; SOUZA, R. A. F.; ANDREOLI, R. V.; KAYANO, M. T. Estudo do Fenômeno da Ilha de Calor na Cidade de Manaus/AM: um estudo a partir de

dados de sensoriamento remoto, modelagem e estações meteorológicas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 2, p. 167-176, 2016.

CHAGAS, V. B. P.; CHAFFE, P. L.B. e BLÖSCHL, G. Climate and land management accelerate the Brazilian water cycle. **Nature Communication**, n. 13, p. 5136, 2022.

CONGEDO, L. Semi-Automatic Classification Plugin: A Python tool for the download and processing of remote sensing images in QGIS. **Journal of Open Source Software**, v. 06, n. 64, 2021.

DAVIDSON, E. A. ; ARAÚJO, A. C. ; ARTAXO, P. ; BALCH, J. K. ; BROWN, I. F. ; BUSTAMANTE, M. M. C. ; COE, M. T. ; DEFRIES, R. S. ; KELLER, M. ; LONGO, M. ; MUNGER, W. ; SCHROEDER, W. ; SOARES FILHO, B. S. ; SOUZA, C. M. ; WOFSY, S. C. The Amazon basin in transition. **Nature**, n. 481, p. 321-238, 2012.

DUBREUIL, V.; FANTE, K. P., PLANCHON, O.; SANT'ANNA NETO, J. L. Os tipos de climas anuais no Brasil: uma aplicação da classificação de Köppen de 1961 a 2015. **Revue Confins**, n. 37, 2018.

DUBREUIL, V.; FUNATSU, B. M. MICHOT, V.; NASUTI, S.; DEBORTOLI, N.; MELLO-THERY, N. A. LE TOURNEAU, F. M.; Local rainfall trends and their perceptions by Amazonian communities. **Climatic Change**, n. 143, p. 461-472, 2017.

ESTEFFEN, W.; ROCKSTROM, J.; RICHARDSON, K.; LENTON, T. M.; FOLKE, C.; LIVERMAN, D.; SUMMERHAYES, C. P.; BARNOSKY, A. D.; CORNELL, S. E.; CRUCIFIX, M.; DONGES, J. F.; FETZER, I.; LADE, S. J.; SCHEFFER, M.; WINKELMANN, R.; SCHELLNHUBER, J. Trajectories of the Earth System in the Anthropocene. **PNAS**, n. 3, v. 115, 2018.

FUNATSU, B. M.; DUBREUIL, V.; RECAPÉ, A.; DEBORTOLI, N. S.; NASUTI, S., LE TOURNEAU, F. M. Perceptions of climate and climate change by Amazonian communities. **Global Environmental Change**, v. 57, 2019.

FONSEKA, P. H. U.; ZHANG, H., SUN, Y.; SU, H.; LIN, H.; LIN, Y. Urbanization and Its Impacts on Land Surface Temperature in Colombo Metropolitan Area, Sri Lanka, from 1988 to 2016. **Journal Remote Sens**, v. 11, n. 957, 2019.

FISCH, G.; MARENGO, J. M. e NOBRE, C. A., Uma Revisão Geral sobre o Clima da Amazônia. **Acta Amazonica**, v. 28, n. 2, p. 101-126, 1998.

FLEISCHMANN, A. S; SIQUEIRA, V. A.; CORREA, S. W.; COLLISCHONN, W.; PAIVA, R. C. D. The great 1983 floods in South American large rivers: a continental hydrological modelling approach. **Hydrological Sciences Journal**, v. 65, n. 8, p. 1358-1373, 2020.

GAO, B. NDWI - A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space, **Journal Remote Sensing of Environment**, v. 03, n. 58, 1996.

GONZALEZ, R. A. A influência do evento El Niño – Oscilação Sul e Atlântico Equatorial na precipitação sobre as regiões norte e nordeste da América do Sul. **Acta Amazonica**, v. 43, n. 4. 2013.

INMET - INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. DADOS METEOROLÓGICOS. **Temperaturas medias anuais**. 2020. Disponível em: <https://bdmep.inmet.gov.br/#>. Acesso em: 01 nov. 2022.

JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C.; MATTAR, C.; BARICHIVICH, J.; SANTAMARÍA-ARTIGAS, A.; TAKAHASHI, K.; MALHI, Y.; SOBRINO, J. A.; SCHRIER, G. V. D. Record-breaking warming and extreme drought in the Amazon rainforest during the course of El Niño 2015–2016. **Scientific Reports**, v. 6, p. 33130, 2016.

KAYANO, M. T. ; ANDREOLLI, R. V. ; SOUZA, R. A. F. ; GARCIA, S. R. ; CALHEIROS, A. J. P. El Niño e La Niña dos últimos 30 anos: diferentes tipos. **Climanalise**, ed. esp., 30 anos, p. 1-6, 2005.

LANDSBERG, H. E. **The urban climate**. Academic Press: Elsevier Science, 1981. 272p.

LIU, T.; CHEN, D.; YANG, L.; MENG, J.; WANG, Z.; LUDESCHER, J.; FAN, J.; YANG, S.; CHEN, D.; KURTHS, J.; CHEN, X.; HAVLIN, S.; SCHELLNHUBER, H. J. Teleconnections among tipping elements in the Earth system. **Nature Climate Change**, v. 13, p. 67-74, 2023.

LIN, T. P.; CHEN, Y. C. C.; MATZARAKIS, A. Urban thermal stress climatic mapping: combination of long-term climate data and thermal stress risk evaluation. **Journal Sustainable Cities and Society**, n. 34, p. 12-21, 2017.

LOPES, J. S. G.; ALEIXO, N. C. R.; SILVA-NETO, J. C. A. Amplitude térmica e magnitude das ilhas de calor em Tefé-AM, Brasil. **Bol. geogr., Maringá**, v. 37, n. 1, 2019.

LOVEJOY, T. E.; NOBRE, C. Amazon tipping point: Last chance for action. **Science Advance**, n. 5, 2019.

MARENGO, J. A.; JONES, R.; ALVES, L. M.; VALVERDE, M. C. Future change of temperature and precipitation extremes in South America as derived from the PRECIS regional climate modeling system. **Journal Int. J. Climatol**, Royal Meteorological Society, p. 1-15, 2009.

MAS, J. F.; SOPCHAKI, C. H.; BRAZ RABELO, F. D.; ARAÚJO, F. S.; SOLÓRZANO, J. V.; Análise da disponibilidade de imagens Landsat e Sentinel para o Brasil. **Geografia Ensino & Pesquisa**, v. 24, 2020.

MENDONÇA, F.; DANNI-OLIVEIRA, I. M. **Climatologia: noções básicas e climas do Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007. 208p.

MOLION, L. C. B. Aquecimento global, El niños, manchas solares, vulcões e oscilação decadal do pacífico. **Climanalise**, Edição especial 30 anos, 2005.

MOLNÁR, G. Analysis of land surface temperature and NDVI distribution for budapest using Landsat 7 ETM+ data. **Journal Acta Climatologica et Chorologica**, Universitatis Szegediensis, p. 49-61, 2016.

MONTEIRO. C. A. F. Adentrar a cidade para tomar-lhe a temperatura. **Geosul**, v. 5, n. 9, p. 61-79, 1990a.

MONTEIRO, C. A. F. A cidade como processo derivador ambiental e estrutura geradora de um clima urbano. **Geosul**, Florianópolis, v. 5, n. 9, p. 80-114, 1990b.

MORATO, R. G.; KAWAKUBO, F. S.; HAYAKAWA, E. H.; MACHADO, R. P. P.; Análise da expansão urbana por meio de composições coloridas multitemporais. **Rev. Mercator**, Fortaleza, v. 10, n. 22, p. 221-231, 2011.

NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. IBGE-SUPREN, 1979. 421p.

NUNEZ, M.; OKE, T. R. Long-wave radiative flux divergence and nocturnal cooling of the urban atmosphere. **Boundary-Layer Meteorol**, v. 10, 1976.

OLIVEIRA, B. F.; BOTTINO, M. J.; NOBRE, P.; NOBRE, C. A. Deforestation and climate change are projected to increase heat stress risk in the Brazilian Amazon. **Communications Earth & Environment**. 2021.

RITCHIE, P. D. L.; CLARKE, J. J.; COX, P. M.; HUNTINGFORD, C. Overshooting tipping point thresholds in a changing climate. **Nature**, n. 592, p. 517-523, 2021.

SAHA, J.; PRICE, C. G.; PLOTNIK, T.; GUHA, A. Impact of the El Niño–Southern Oscillation on upper-tropospheric water vapor. **Atmospheric Research**, v. 280, 2022.

SANT'ANA NETO, J. L.; NERY, J. T. Variabilidade e mudanças climáticas no Brasil e seus impactos regionais. In: SOUZA, C. R. (ed.). **Quaternário do Brasil**. Ribeirão Preto, Holos editora, 2005.

SOUTO, J. I. O.; COHEN, J. C. P. Spatiotemporal variability of urban heat island: Influence of urbanization on seasonal pattern of land surface temperature in the Metropolitan Region of Belém, Brazil. **Rev. Bras. Gest. Urbana**, n. 13, p. 1-17, 2021.

SILVA, M. T.; MARGALHO, E. S.; SERRÃO, E. A. O.; SOUZA, A. C.; SOARES, C. S.; SANTOS, C. A. C.; SILVA, B. B.; Application of Spatial Modeling of Biophysical Variables in an Urbanized Area in the Amazon: The Case of the Metropolitan Area of Belém-Pará, **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 36, n. 2, p. 271-283, 2021.

SHEIL, D. Forests, atmospheric water and an uncertain future: the new biology of the global water cycle. **For. Ecosyst**. v. 5, n. 19, 2018.

SOUZA, D. O.; ALVALA, R. C. S. Observational evidence of the urban heat island of Manaus City, Brazil. **Journal Meteorol. Appl**. n. 21, v. 2, p. 186-193, 2014.

STEFEN, W.; ROCKSTROM, J.; RICHARDSON, K.; LENTON, T. M.; FOLKE, C.; LIVERMAN, D.; SUMMERHAYES, C. P.; BARNOSKY, A. D.; CORNELL, S. E.; CRUCIFIX, M.; DONGES, J. D.; FETZER, I.; LADE, S. J.; SCHEFFER, M.; WINKELMANN, R.; SCHELLNHUBER, H. J. Trajectories of the Earth System in the Anthropocene. **PNAS**, n. 33, v. 115, 2018.

STEWART, I. D.; OKE, T. R.; Local climate zones for urban temperature studies. **Journal of Applied Meteorology, American Meteorological Society**, p. 1879-1900, 2012.

STULL, R. **Practical meteorology: an algebra-based survey of atmospheric science**, version 1.02b. Vancouver: Dept. of Earth, Ocean & Atmospheric Sciences University of British Columbia, 2017.

VOOGT, J. A.; GRIMMOND, S. B.; Modeling surface sensible heat flux using surface radiative, temperatures in a simple urban area. **Journal of Applied Meteorology, American Meteorological Society**, p.1679-1699, 2000.

WANG, B.; LUO, X.; YANG, Y. M.; SUN, W.; CANE, M. A.; CAI, W.; YEH, S. W.; LIU, J. Historical change of El Niño properties sheds light on future changes of extreme El Niño. **PNAS**, v. 116, 2019.

Recebido: 24/06/2024

Aceito: 23/03/2025