

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS

LEONARDO SEABRA FURTADO

**HEMEROBIA DA PAISAGEM DE BELÉM NA AMAZÔNIA ORIENTAL E ESTUDO
DE IMPACTO DA URBANIZAÇÃO NO CLIMA LOCAL**

BELÉM – PA

2024

LEONARDO SEABRA FURTADO

**HEMEROBIA DA PAISAGEM DE BELÉM NA AMAZÔNIA ORIENTAL E ESTUDO
DE IMPACTO DA URBANIZAÇÃO NO CLIMA LOCAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará em parceria com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária Amazônia Oriental e Museu Paraense Emílio Goeldi, como parte requisito para a obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais.

Área de concentração: Clima e dinâmica socioambiental na Amazônia

Linha de pesquisa: Interação Clima, Sociedade e Ambiente

Orientador (a): Prof. Dr. Everaldo Barreiros Souza

BELÉM – PA

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBDSistema
de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a)
autor(a)

F992h Furtado, Leonardo Seabra.
Hemerobia da paisagem de Belém na Amazônia Oriental e
estudo de impacto da urbanização no clima local / Leonardo
Seabra Furtado. — 2024.
66 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Everaldo Barreiros Souza
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,
Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em
Ciências Ambientais, Belém, 2024.

1. Clima urbano. 2. Área metropolitana. 3. Ilha de calor. 4.
Impactos LULC. 5. Amazônia oriental. I. Título.

CDD 370.19348

LEONARDO SEABRA FURTADO

**HEMEROBIA DA PAISAGEM DE BELÉM NA AMAZÔNIA ORIENTAL E ESTUDO
DE IMPACTO DA URBANIZAÇÃO NO CLIMA LOCAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará em parceria com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária Amazônia Oriental e Museu Paraense Emílio Goeldi, como parte requisito para a obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais.

Data da Defesa: 30/01/2024

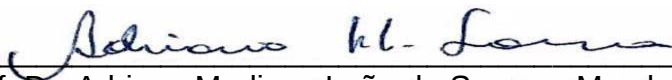
Banca Examinadora:



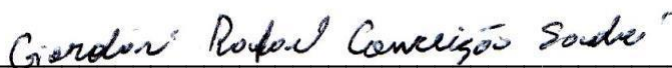
Prof. Dr. Everaldo Barreiros Souza - Orientador
Doutor em Meteorologia
Universidade Federal do Pará



Profa. Dra. Aline Maria Meiguins de Lima – Membro interno
Doutora em Desenvolvimento Sustentável do Trópico Úmido
Universidade Federal do Pará



Prof. Dr. Adriano Marlison Leão de Sousa – Membro interno
Doutor em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental
Universidade Federal Rural da Amazônia



Dr. Giordani Rafael Conceição Sodré – Membro externo
Doutor em Ciências Ambientais
Universidade Federal do Pará

AGRADECIMENTOS

Ao alcançar o término deste mestrado, é com profunda gratidão que reconheço o apoio fundamental de muitas pessoas e instituições que tornaram esta jornada possível.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), expresso meu sincero agradecimento pela bolsa de incentivo concedida. O suporte financeiro oferecido foi indispensável para minha dedicação à pesquisa ao longo desses dois anos, representando não apenas um investimento em minha formação, mas também um estímulo valioso para o desenvolvimento acadêmico.

Aos professores da graduação, em especial à Professora Roberta Raiol e ao Professor Álvaro José, agradeço pelos ensinamentos e pelo incentivo que influenciaram minha decisão de ingressar no Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais (PPGCA). A confiança depositada por eles em meu potencial foi um impulso significativo e motivador.

Ao meu colega Vitor Pereira, expresso minha gratidão pela parceria e colaboração ao longo desta jornada. Sua ajuda foi crucial, enriquecendo meu trabalho e tornando a pesquisa uma experiência colaborativa e enriquecedora.

Ao Professor Dr. Everaldo Barreiros, meu orientador, dedico palavras de profundo agradecimento. Sua orientação experiente, dedicação incansável e incentivo constante foram pilares fundamentais para o sucesso desta pesquisa. Sob sua supervisão, não apenas desenvolvi habilidades acadêmicas, mas também cresci como pesquisador.

Aos amigos, familiares e colegas, meu agradecimento pelo suporte emocional e encorajamento constantes. Esta conquista é resultado do esforço coletivo de uma comunidade que acreditou no meu potencial.

Encerro este capítulo expressando minha profunda gratidão a todos que contribuíram para esta jornada. Que este trabalho possa não apenas agregar conhecimento à área, mas também inspirar outros pesquisadores. Este é apenas o início de uma trajetória que pretendo percorrer com dedicação e paixão pelo conhecimento.

RESUMO

Dentre as atividades humanas que modificam a cobertura superficial das paisagens naturais, o processo de urbanização se destaca como uma das formas mais graves de antropização ambiental. Os impactos da urbanização são sistêmicos nas dimensões físicas e ecológicas, sendo que um efeito direto é a mudança no clima local, particularmente o aumento da temperatura do ar em superfície. No presente estudo aplica-se o conceito de hemerobia (termo originado na ecologia da paisagem que significa “distância da natureza”) como técnica de sensoriamento remoto para mapear o processo de urbanização no município de Belém, a capital do estado do Pará na região da Amazônia oriental. Os resultados do mapeamento das mudanças na cobertura do solo, comparando os anos de 1985 e 2021, revelaram um aumento significativo da urbanização, que se expandiu 17% em detrimento das áreas florestais que reduziram em 11%. A mancha urbana denotada pelas áreas de metahemerobia e polihemerobia (classes com médio e alto grau de cobertura urbana) se expandiu para os bairros e distritos situados no centro e norte do município e ao longo da faixa costeira das ilhas de Outeiro e Mosqueiro. Os resultados do mapeamento ambiental foram integrados com as análises estatísticas dos dados de temperatura do ar (dado pontual da estação meteorológica e dado do CRU em alta resolução espacial), visando investigar os impactos da urbanização nos padrões sazonais da temperatura do ar máxima (TX) e mínima (TN). As análises de tendências mostraram padrões de clima significativamente mais quente, com uma indicação notável de TX e TN sistematicamente mais elevadas nas áreas mais densamente urbanizadas em comparação com as áreas de vegetação preservada, sendo que o aumento de temperatura do ar foi mais expressivo (estatisticamente significante) no período da estação seca (julho a novembro). Um resultado interessante foi encontrado nos mapas espaciais de TX para o regime seco, com um padrão climatológico semelhante ao modelo clássico de ilha de calor com isotermas concêntricas que atingem centro máximo sobre a região continental mais urbanizada de Belém e diminuição térmica nas bordas. O estudo ressalta a importância urgente de políticas governamentais para mitigar os impactos negativos da urbanização na área metropolitana de Belém.

Palavras-chave: clima urbano; área metropolitana; ilha de calor; impactos LULC; Amazônia oriental.

ABSTRACT

Among the human activities that modify the surface coverage of natural landscapes, the urbanization process can be considered as one of the most serious forms of environmental anthropization. The impacts of urbanization are systemic in physical and ecological dimensions, with a direct effect being the change in local climate, particularly the increase in surface air temperature. In the present study, the concept of hemerobia (a term from landscape ecology that means “distance from nature”) is applied as a remote sensing technique to map the urbanization process in the municipality of Belém, the capital of the state of Pará in the region of Eastern Amazon. The results of mapping changes in land cover, comparing the years 1985 and 2021, revealed a significant increase in urbanization, which expanded by 17% at the expense of forest areas, which reduced by 11%. The urban area denoted by the areas of metahemerobia and polyhemerobia (classes with a medium and high degree of urban coverage) expanded to the neighborhoods and districts located in the center and north of the municipality and along the coastal strip of the islands of Outeiro and Mosqueiro. The results of the environmental mapping were integrated with statistical analyzes of air temperature data (point data from the meteorological station and CRU data at high spatial resolution), aiming to investigate the impacts of urbanization on seasonal patterns of maximum air temperature (TX) and minimum (TN). Trend analyzes showed significantly warmer climate patterns, with a notable indication of systematically higher TX and TN in the most densely urbanized areas compared to areas with preserved vegetation, with the increase in air temperature being more significant (statistically significant) during the dry season (July to November). An interesting result was found in the spatial maps of TX for the dry regime, with a climatological pattern similar to the classic heat island model with concentric isotherms that reach a maximum center over the more urbanized continental region of Belém and thermal decrease at the edges. The study highlights the urgent importance of government policies to mitigate the negative impacts of urbanization in the metropolitan area of Belém.

Keywords: urban climate; metropolitan area; heat island; LULC impacts; Eastern Amazon

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 — Início da verticalização em Belém	19
Figura 2 — Mapa com o sentido da expansão urbana da cidade de Belém	20
Figura 3 — Características das Paisagens e Hemerobia.	25
Figura 4 — Imagem ilustrativa do balanço de energia.	31
Figura 5 — (a) Área de estudo no município de Belém, (b) Estado do Pará, (c) na região leste da Amazônia brasileira. A área destacada em vermelho com hachuras representa a porção continental e as ilhas onde a análise será enfatizada.	36
Figura 6 — Diagrama com uma visualização realista das principais características da paisagem associadas aos sete graus de hemerobia para uma área metropolitana na Amazônia Oriental.	39
Figura 7 — Mapas de graus de hemerobia sobre a porção continental de Belém para os anos (a) 1985 e (b) 2021. Os graus são indicados na legenda.	43
Figura 8 — (a) Área total (km ²) e porcentagens (%) em cada grau de hemerobia para 1985 e 2022; (b) mudanças (%) de 1985 para 2022.	44
Figura 9 — (a) Gráfico de dispersão de TX e TN de 1985 a 2021 para os dados da ESTAÇÃO e do CRU durante as estações ÚMIDA e SECA, incluindo os respectivos valores de R ² e correlação; Séries temporais de 1985 a 2021 de (b) TX e (c) TN para a ESTAÇÃO e o CRU durante as estações CHUVOSA e SECA. A unidade é °C.	45
Figura 10 — Climatologia do CRU (média histórica de 1985 a 2021) de (a) TN e (b) TX nas estações CHUVOSA e SECA sobre a porção continental de Belém e áreas vizinhas. O intervalo das isolinhas de temperatura do ar é de 0,1 °C. O fundo é o mapa de hemerobia no ano de 2021.	47
Figura 11 — Mudança (diferença entre as amostras de 2004/2021 e 1985/2002) de (a) TN e (b) TX nas estações CHUVOSA e SECA sobre a porção continental de	

Belém e municípios vizinhos. O intervalo das isolinhas de temperatura do ar é de 0,05 °C. O fundo é o mapa de hemerobia no ano de 2021.....48

Figura 12 — *Boxplots* para (a) TN e (b) TX para as estações CHUVOSA e SECA considerando o conjunto de pontos de grade do CRU sobre áreas naturais e artificiais (pontos indicados no mapa hemeróbico à direita) nos períodos 1985/2002 e 2004/2021; Mudanças para (c) TN e (d) TX dadas pela diferença entre as médias de 2004/2021 e 1985/2002 sobre áreas naturais e artificiais. A unidade é °C.49

Figura 13 — Gráficos de dispersão dos conjuntos de pontos de grade do CRU para áreas artificiais (urbanização) e naturais (floresta) sobre Belém para (a) TN e (b) TX nas estações CHUVOSA e SECA. As séries temporais são de 1985 a 2021 e a unidade é °C.50

LISTA DE TABELA

Tabela 1 — Correlações entre as séries temporais das taxas de desmatamento e as médias de TMax e TMin nos regimes chuvoso e seco em cada estação/município.....	29
Tabela 2 — Grau de hemerobia e a correspondente intensidade de interferência humana incluindo descrições da paisagem europeia que foi adaptada para a área de estudo.	38
Tabela 3 — Teste T de Student para a diferença entre os conjuntos de pontos de grade do CRU de TN e TX para áreas artificiais e naturais sobre o município de Belém nas estações CHUVOSA e SECA.	50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BOC	Balanço de Ondas Curtas
BOL	Balanço de Ondas Longas
CRU	Climatic Research Unit
CRU-TS	Climatic Research Unit gridded Time Series
EPAMRB	Área de Proteção Ambiental da Região Metropolitana de Belém
F	Fotossíntese
G	Energia Transmitida ao Solo
H	Calor sensível
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
K	Kelvin
LE	Calor Latente
LULC	Land Use Land Cover
NDBAI	Normalized Difference Bareness Index
NDBI	Normalized Difference Built-Up Index
OLI	Operational Land Imager
PM	Post Meridiem – “Após o meio-dia”
QGIS	Quantum GIS
RGB	Red, Blue, Green
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SR	Saldo de Radiação
TM	Thematic Mapper
TN	Temperatura mínima
TX	Temperatura máxima
USGS	United States Geological Survey
USPCU	Unidade de Conservação do Parque Estadual Utinga

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	16
2.1	Objetivo Geral	16
2.2	Objetivos específicos	16
3	REFERENCIAL TEÓRICO	17
3.1	O processo histórico de ocupação urbana	17
3.2	Expansão urbana na Região Metropolitana de Belém	18
3.2.1	Meio ambiente e urbanização	20
3.3	Meio Ambiente: Ecologia Urbana	22
3.3.1	Conceito de ecologia urbana	22
3.4	Hemerobia de Paisagem Conceitos e métodos	22
3.5	Urbanização e clima	27
3.5.1	O aumento da temperatura do ar nas cidades	28
3.6	Fluxo de calor nos ecossistemas tropicais	30
4	MATERIAL E MÉTODOS	35
4.1	Área de estudo	35
4.2	Dados climatológicos	35
4.3	Análise de hemerobia	36
4.4	Análise climática	39
5	RESULTADOS	41
5.1	Mapeamento <i>LULC</i> usando graus de hemerobia	41
5.2	Padrões espaciais e mudanças na temperatura do ar sazonal	44
6	DISCUSSÃO	51
7	CONCLUSÃO	54
	REFERÊNCIAS	56
	APÊNDICE A	63

1 INTRODUÇÃO

As ações humanas no meio ambiente, intrinsecamente ligadas a fatores econômicos, sociais e culturais, causam perturbações capazes de alterar o ecossistema pré-existente. As múltiplas atividades humanas que exercem pressão sobre as paisagens naturais, especialmente dentro das áreas metropolitanas, podem ser consideradas a forma mais grave de antropização ambiental, devido às intensas e sistemáticas mudanças no uso e cobertura da terra (LULC) (Kennedy; Pincetl; Bunje, 2011). Entre os efeitos antropogênicos mais relevantes durante o processo de urbanização, podemos mencionar a supressão da vegetação natural com perda de biodiversidade, selamento do solo, poluição do ar e da água e o impacto direto no clima local (Glaeser, 2014).

As modificações espaço-temporais ou transformações induzidas no solo e na cobertura superficial em uma determinada região ou ecossistema, principalmente por processos coletivos de origem antropogênica e/ou até mesmo por processos naturais de sucessão, podem ser investigadas objetivamente por meio de técnicas de sensoriamento remoto, que determinam classes de LULC variando das áreas mais preservadas (naturais) às mais modificadas (artificiais) (Souza JR *et al.*, 2020).

Neste contexto, utilizaremos uma abordagem específica para estudar mudanças na LULC, baseada no conceito de hemerobia. O termo "hemerobia" deriva da ecologia da paisagem e significa "distância da natureza", sendo empregado para estimar a ação humana no meio ambiente (Fehrenbach *et al.*, 2015). O botânico finlandês Jalas foi pioneiro ao introduzir esse termo nos componentes ecológicos, classificando as paisagens em quatro graus hemeróbicos (Jalas, 1955). Diversos autores ampliaram o estudo da hemerobia no âmbito da LULC, considerando uma classificação mais abrangente de sete a dez categorias para avaliar a intensidade da interferência humana na natureza (Steinhardt *et al.*, 2000; Hill; Roy; Thompson, 2002). A distância entre uma paisagem eminentemente natural (sem impacto humano) e uma paisagem artificial (resultado de um impacto humano intenso e sistemático) é indicada pela classe de uso da terra que contém o menor e o maior grau hemeróbico, respectivamente. Dessa forma, em regiões com grau de hemerobia mais elevado, são esperados efeitos adversos nos componentes naturais da flora e fauna, bem como nas condições físicas. Portanto, a hemerobia emerge como uma ferramenta crucial de mapeamento de paisagens em estudos de mudanças ambientais (Walz; Stein, 2014).

No Brasil, a técnica da hemerobia foi empregada como ferramenta de monitoramento ambiental em diferentes contextos. Em um distrito de Fortaleza, no Estado do Ceará, situado na região Nordeste, foi utilizada para avaliar unidades de paisagem (Belém; Godinho; Nucci, 2011). Em um estudo voltado para compreender a dinâmica da paisagem urbana, a hemerobia foi aplicada no município de Pinhais, no estado do Paraná, na região Sul (Liberti *et al.*, 2019). Além disso, uma análise multitemporal da perda de naturalidade de uma bacia hidrográfica no bioma Cerrado, próxima à região de São Carlos, no Estado de São Paulo, na região Sudeste, também se beneficiou dessa técnica (Silva *et al.*, 2022).

Na região Norte, que engloba os estados amazônicos, Gusmão *et al.* (2021) conduziram um estudo de hemerobia da paisagem na Região Geográfica Imediata, abrangendo quinze municípios no estado do Pará. Utilizando geoprocessamento de imagens fornecidas pela plataforma MapBiomas (Souza Jr *et al.*, 2020; Mapbiomas, 2022), esses autores evidenciaram um grau moderado de intervenção humana nas paisagens estudadas, sendo a cobertura de pastagem a classe que mais contribuiu para as mudanças no solo entre 1985 e 2018 (Gusmão *et al.*, 2021). Outro estudo, realizado por Gutierrez (2022), analisou as mudanças na LULC nas sete principais cidades da região metropolitana de Belém. Especificamente para o município de Belém, os resultados indicaram que, de 1985 a 2020, as maiores transformações ambientais ocorreram nas classes de floresta (diminuição de 4,6%) e urbana (aumento de 4,4%), conforme revelado pela análise de mapas temáticos do MapBiomas.

Aqui, realizaremos uma aplicação da hemerobia como técnica de mapeamento por sensoriamento remoto para analisar a intensidade das mudanças na estrutura da paisagem resultantes das atividades humanas sobre o município de Belém. Esta cidade está localizada na foz da bacia amazônica, onde ocorreu a primeira fronteira de ocupação humana na Amazônia Oriental. Belém é a segunda cidade mais populosa da região Norte (após Manaus, na Amazônia Central) e ocupa a décima segunda posição entre as 27 capitais brasileiras (Ibge, 2022).

Estudos sobre os efeitos ou impactos da urbanização no clima local em cidades de diferentes tamanhos ao redor do mundo (Arnfield, 2003; Voodt; Oke, 2003) e geralmente, os trabalhos se preocuparam com descrições e descobertas baseadas em evidências empíricas e senso comum (Arnfield, 2003). Apesar da baixa densidade de redes de estações meteorológicas na região Norte do Brasil, o que limita o uso de

dados históricos in situ, a crescente disponibilidade de dados estimados por vários satélites ambientais tem permitido progressos notáveis na pesquisa científica quantitativa sobre climatologia urbana (Romero *et al.*, 2019). Desde o trabalho pioneiro de Lombardo (1988), para a megacidade de São Paulo, inúmeros estudos comprovaram o aumento sistemático da temperatura do ar na superfície associado ao processo de urbanização desencadeado na maioria das capitais estaduais espalhadas de norte a sul do território brasileiro (Monteiro *et al.*, 2001). Da mesma forma, aqui relatamos uma contribuição aos estudos sobre a caracterização espaciotemporal do processo de urbanização e seus impactos nos padrões térmicos sazonais ao longo da superfície metropolitana de Belém no leste da Amazônia.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Aprimorar os estudos de mapeamento de Uso e Cobertura da Terra (LULC) na área continental do município de Belém, com enfoque especial nas classes relacionadas à cobertura urbana, visando responder a questões pertinentes à interação entre padrões climáticos e ambiente no contexto amazônico.

2.2 Objetivos específicos

1. Avaliar a extensão das classes de cobertura urbana induzidas pela ação humana, considerando unidades de paisagem, e analisar a direção e intensidade da expansão espacial dessas classes artificiais.
2. Investigar a magnitude do impacto direto da expansão urbana nos padrões sazonais de temperatura do ar (máxima e mínima) nas últimas décadas.
3. Analisar a relação entre áreas urbanizadas e áreas naturais preservadas, considerando a interação entre clima e ambiente de superfície, e avaliar se as áreas mais urbanizadas apresentam valores linearmente mais altos de temperatura do ar em comparação com as áreas preservadas.
4. Utilizar o método de hemerobia para abordar as questões de mudanças de *LULC* relevantes no contexto do conhecimento científico integrado clima e ambiente no território amazônico.
5. Considerar a marcada sazonalidade do clima amazônico ao longo do ano, abordando os dois regimes sazonais correspondentes ao período chuvoso/mais ameno e ao período seco/mais quente, no estudo de impacto climático.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 O processo histórico de ocupação urbana

A estimulação do fenômeno urbano brasileiro, desfruta de uma relação intrínseca com a industrialização ocorrente no mundo, sendo ainda possível verificar a mesma ação atualmente. Esta atividade tem origem no século XVIII, porém no Brasil a industrialização dá seus primeiros passos no fim do século XIX e início do século XX. A transferência da população rural para a urbe (êxodo rural) se torna um processo sem precedentes, a qual ocasiona atividades econômicas, atraindo um número de pessoas cada vez maior (Santos, 2005).

Na região amazônica, o incentivo à ocupação é iniciado pela exploração das especiarias ou drogas do sertão (guaraná, anil, salsa, cacau, castanha-do-pará, pau-cravo e outros) e extração de látex, a qual, acarretou na apropriação de áreas às margens de rios, favorecendo assim o crescimento urbano, fruto de uma urbanização tradicional, cognominado de rio-várzea-floresta (Trindade; Silva; Amaral, 2008; Lomba; Nobre, 2013; Becker, 1990).

O crescimento urbano de Belém não se difere do restante do Brasil, a não ser por um processo de enraizamento do desenvolvimento urbano que adentra o território Amazônico por meio dos rios. A ocupação da futura capital do Estado do Pará se inicia no início do século XVII pelos portugueses que instalam no litoral complexos como o Forte do Presépio, favorecendo a formação da cidade (Tourinho; Meira Filho; Couto, 1976).

As primeiras transformações urbanas em Belém se instauram no século XIX provenientes da riqueza que a extração do látex trouxe à capital. Com a ampliação da economia gomífera a estimulação à modernização da cidade se expande objetivando o progresso, modernidade e civilização, todas induzidas pelo poder público local, a fim da construção de uma Belém moderna. Com a riqueza proveniente da borracha a cidade logo chegaria a tempos de prosperidade, a busca pela modernização era capaz de atrair mão-de-obra, lojas, financiamentos e comércio. O estabelecimento de infraestrutura urbana permitiria que seus habitantes pudessem se instalar, o que ocasionou na criação de novos bairros como Batista Campos, Marco, Nazaré e Umarizal, permitindo que a burguesia construísse suas casas (Araújo Junior; Azevedo, 2012; Sarges, 2000).

Na necessidade de ampliação da área central da cidade, a modernização e implementação de projetos arquitetônicos volumosos, ocasionam em políticas “regras” para restabelecimento de famílias que moravam na região e detinham imóveis que não condizem com a estética que seria implantada, sendo assim, houve a obrigação imposta aos moradores “irregulares” a se deslocarem para as periferias do núcleo central. Esta conjuntura permitiu que as novas construções adjacentes ao centro crescem influenciadas pelos fatores econômicos, sociais, culturais, políticas públicas, espaciais e outros, devendo assim diversidade habitacional que ao olhar atual, padece de estruturação (Kampel; Camara; Monteiro, 2001).

O crescimento urbano de Belém é impulsionado por períodos de crise da borracha. A estagnação econômica belenense provém da implementação de seringais na Ásia, sendo assim, o cultivo em maior escala e uma mão de obra barata ocasiona no declínio de extração de látex local, levando os extrativistas a migrarem para a capital do Pará em busca de melhores condições econômicas, levando ao grande êxodo rural no período (Kampel; Camara; Monteiro., 2001).

A visão francesa de progresso na Belle-époque é deixada de lado e durante a segunda guerra mundial, Belém revive o ciclo da borracha, através do acordo de Washington, permitindo que o fornecimento de látex fosse trocado pelo estabelecimento de infraestrutura urbana, a capital deixa os palacetes e os bondes elétricos e optam por asfalto e arranha-céus. Durante o governo de Juscelino Kubitschek de Oliveira (1956 – 1961) planos de desenvolvimento são instaurados e a criação da rodovia Belém-Brasília leva a ocupação urbana a ser mais densa viabilizando a criação de novos municípios, a rede urbana dendrítica do lugar a rede urbana complexa (Araújo Junior, Azevedo, 2012; Dias, C.; Dias, S., 2007).

O processo de expansão da região de Belém pode ser mensurado na Tabela 1A (ver Apêndice A), o qual apresenta as modificações espaço-temporais da rede urbana amazônica.

3.2 Expansão urbana na Região Metropolitana de Belém

A Configuração das formas de viver em cidades amazônicas, originalmente denominadas “cidades ribeirinhas” sofre uma progressiva alteração com a dinâmica capitalista envolvente, inicialmente as relações dominariam sobre as formas naturais, modos de vida, hábitos e valores todos envolvidos à temporalidade. A cidade de

Belém em sua dinâmica urbana inicial que logo seria transmutada com a presença dos europeus e moldada por uma economia que trouxe prosperidade tornara-se atrativa à classe trabalhadora, sendo assim, o desenvolvimento conduziria à ocupação da capital, a qual se expandiu e as áreas da região designadas críticas seriam também ocupadas. A forte demanda ocasionada prioritariamente pela crescente da população acarreta na ocupação que se estabelece evoluindo de acordo com os níveis sociais e econômico dos novos habitantes, áreas peculiares do centro urbano denominadas de áreas de baixada são alternativas, e a expansão das áreas adjacentes ao centro surgiriam, seguindo a mesma ordem (Trindade Jr, 1998).

A expansão de Belém Segundo Moreira (1966), está dividida em três fases:

- a) Fase periférica ou ribeirinha (até meados do século XVIII)
- b) Fase de penetração (meados do século XVIII a meados do século XIX)
- c) Fase de continentalização (meados do século XIX até 1960-1970)

Trindade Jr, (1998), diz ainda que há uma quarta fase que se estende até os dias atuais, denominada, metropolização. A fase de metropolização citada por Trindade Jr (1998) em Belém está envolvida em uma interface de crescimento vertical (Imagem 1), favorecendo a habitação no centro da capital. Esta verticalização é oriunda da valorização do solo ocasionada pela oferta e procura de áreas para habitação (bairros) e outra ocorrência da expansão, é o crescimento horizontal, especialmente após a década de 60 com a abertura de rodovias. Segundo Trindade Jr. (1998), “dessa década para cá foram aproximadamente um milhão de pessoas que passaram a incrementar a dinâmica do espaço urbano de Belém”, este número expressa a concentração de pessoas apenas na área central da capital que em sua maioria vivem em áreas inapropriadas e sem infraestrutura.

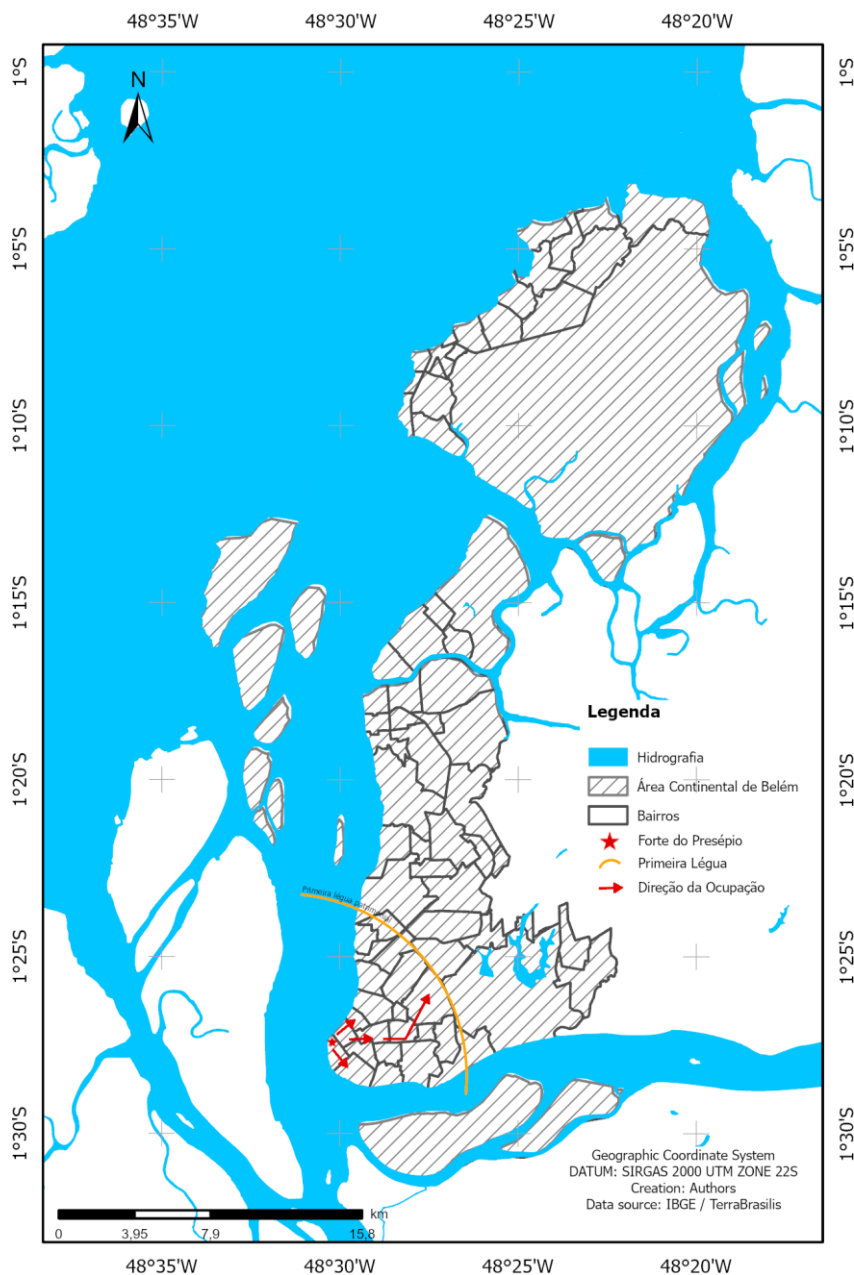
Figura 1 — Início da verticalização em Belém



Fonte: (Cruz, 1973).

Estes habitantes não mais tendo áreas para se estabelecer na capital, começam a se fixar em áreas denominadas periféricas, acima da primeira légua patrimonial conforme a Figura 2, mais distantes demonstrando uma interface urbana maior, a partir de então novos assentamentos urbanos, especialmente às margens da rodovia BR 316, se multiplicam dando origem a novas cidades (Trindade Jr, 1998).

Figura 2 — Mapa com o sentido da expansão urbana da cidade de Belém



Fonte: Adaptado de ABelém (1989) por Borges e Silva (2011).

3.2.1 Meio ambiente e urbanização

Durante o processo de expansão urbana no Brasil é notável a degradação

ambiental envolvida pela concentração populacional, está em sua dinâmica de posse ocasiona em diversos problemas socioambientais, elevando a destruição do ambiente (Barbosa; Nascimento Junior, 2009).

O sistema urbano é muito importante para a sociedade e economia, entretanto existe a preocupação das consequências ao meio ambiente (Santiago, 2014). A urbanização, por envolver a concentração de pessoas e atividades produtivas sobre um espaço restrito, gera impactos que degradam o meio natural com efeitos sinérgicos e persistentes (Jatobá, 2011). A poluição do ar, do solo e das águas, o desmatamento e a perda de uma grande porcentagem de biodiversidade são efeitos claros da decorrência do ambiente urbanizado. O avanço das técnicas e a facilidade resultaram no aumento do ritmo cotidiano de trabalho, transporte e comunicações, não sendo capaz de exercer uma influência positiva à manutenção dos sistemas naturais. (Minaki; Amorim, 2007).

Na Amazônia, o processo de urbanização, segundo De Oliveira e Trindade (2013), não se difere do restante do Brasil. Em 1970 o índice demográfico na Amazônia legal era de 37%, subindo para 46% em 1980 e em 2010 chega a 73% da população residindo em centros urbanos.

O Município de Belém, demograficamente, conta com mais de 1,3 milhões de pessoas vivendo no centro urbano, cerca de 99% residem na área urbana principal. Toda esta exuberância de crescimento rápido é caracterizada, em especial, pela ausência de infraestrutura, falta de saneamento e pobreza (Ibge, 2012). Estes fatores, em geral pressupõem uma estrutura física-cultural das moradias a não obedecerem a dinâmica ambiental existente, acarretando um déficit ambiental extremamente forte.

As mudanças dos padrões naturais geradas pela urbanização viabilizam passivos ambientais, sendo o clima um dos principais componentes afetados, tais passivos modificam o balanço energético, hídrico e atmosférico que podem vir a alterar o clima urbano (Lombardo, 1985). Na cidade de Belém o clima urbano segue um padrão regional, porém estudos mostram uma elevada precipitação, comparada com as demais e esse padrão junto a impermeabilização do solo e deficiência na rede de drenagem, e a própria topografia da região, provocam diversos problemas de enchentes. Além disto, a percepção térmica da população é levada em consideração quando a mesma percebe que com a remoção das “áreas verdes” a temperatura local é modificada (De Oliveira, 2020).

3.3 Meio Ambiente: Ecologia Urbana

3.3.1 Conceito de ecologia urbana

Em um contexto de transições e mudanças nas concepções relacionadas à relação homem / natureza, surge em 1920 a ecologia urbana, concebida pela escola de sociologia na Universidade de Chicago. Até então a ecologia urbana manifesta-se de derivações da ecologia humana, a qual foi criada com o intuito de incorporar o homem enquanto espécie integrante e interdependente da natureza, assim superando deficiências da ecologia geral (Oliveira; Santos, 2021).

A ecologia urbana advém de diversas abordagens de distintas áreas do conhecimento, as quais promovem uma diversidade em seu conceito, tal variedade fez a ecologia urbana tornar-se interdisciplinar (Adler; Tanner, 2015).

Dada a complexidade existente para propor um conceito universal de definição da ecologia urbana, deve-se entender além do conceito de ecologia, o conceito de urbano. Para Wu (2014), conceituar urbano provém de três fatores primários, “tamanho populacional total, densidade populacional e área de superfície impermeável ou estruturas construídas”.

Sukopp (1998, apud Cilliers e Siebert, 2012 p. 1), conceitua ecologia urbana como, “estudo das interações entre biótico e abiótico no meio urbano, usando abordagens e técnicas semelhantes ao do ambiente natural”. Porém nota-se certa inconclusão, acarretando uma definição genérica ao termo. Já Marzluff *et al.* (2008) e Wu (2014), definem como um estudo de padrões espaço-temporais que visa entender como humanos e processos ecológicos podem coexistir em um ambiente artificial; impactos ambientais e sustentabilidade na urbanização com base nos serviços ecossistêmicos. Esta última definição é bem mais persuasiva, impondo uma dinâmica interdisciplinar ao escopo da ecologia urbana, vale ressaltar ainda que definir a ecologia urbana como disciplina interdisciplinar é limitá-la ao seu real objetivo, devendo tal, de acordo com Fry *et al.*, (2007), ser conceituada como transdisciplinar, pela inserção de participantes de diversos setores não relacionados que objetivam desenvolver novos conhecimentos para responder perguntas comuns de pesquisa.

3.4 Hemerobia de Paisagem Conceitos e métodos

O termo hemerobia provém do grego: (*hémeros* = cultivado, *bios* = vivo), este

conceito tem origem na ecologia de paisagens e significa *a distância da natureza*” Fehrenbach *et al.* (2015) e Zhou; Ning; Bai, (2018) definem hemerobia como um indicador usado para mensurar os impactos da ação humana na natureza.

A hemerobia é introduzida nos componentes ecológicos pelo botânico Jalas, sugerindo uma classificação para sistematizar as paisagens das mais preservadas até as mais antropizadas, às graduando em quatro níveis: a-hemerobiótico, oligo-hemerobiótico, meso-hemerobiótico e eu-hemerobiótico, o qual o nível a-hemeróbico se relaciona às atividades nulas do homem na natureza e eu-hemeróbico traz maior influência humana, ou seja, maior uso do solo por atividades antrópicas. Porém seu método estava ligado e condicionado à capacidade de resiliência da vegetação, não abrangendo mudanças de flora e fauna em áreas urbanizadas (Belém; Godinho; Nucci, 2011),

Com o conceito de hemerobia se difundindo no meio acadêmico autores, como Sukopp (1972), Monteiro (2001), Haber (1994), Belém, Godinho e Nucci (2011), Walz e Stein (2014), Tian *et al.* (2020) dentre outros, se destacam apresentando novas propostas na pesquisa voltada a hemerobia.

A partir das teorias de Jalas, Sukopp (1972), classifica hemerobia como, “totalidade dos efeitos das ações humanas sobre a paisagem”, apresentado um número de classes maior para avaliar a interferência antrópica, como: ahemeróbico (natural); oligo-hemeróbico (quase natural); meso-hemeróbico (semi-agro natural); eu-hemeróbico (agrícola); poli-hemeróbico (quase natural); e, meta-hemeróbico (cultural). Esta abordagem de Sukopp sugere maior amplitude na avaliação da interferência humana na natureza abrindo possibilidades para sua aplicação em paisagens altamente diversificadas.

Monteiro (2001), trata as ações humanas na paisagem como uma “derivação antropogênica” as categorizando como “transformações positivas e transformações negativas”. Não citando hemerobia em seu trabalho, o autor destaca necessidades de reverter condições que alteram as paisagens, inserindo meios para reflorestar áreas expostas a ação antrópica.

Haber (1994), assim como Monteiro, não cita hemerobia em seu diálogo, apenas trata suas classificações voltadas à dependência tecnologia, sendo assim a presença antrópica no meio ambiente o torna artificial, sendo elas classificadas em bioecossistemas a técnoecossistemas:

- a) Bioecossistemas, caracterizados pela dominância de componentes naturais e biológicos;
- b) Ecossistemas naturais, sem influência antrópica e capaz de se autorregular-se;
- c) Ecossistemas próximos dos naturais, influenciados por humanos, semelhante aos ecossistemas naturais e com capacidade de autorregulação;
- d) Ecossistemas seminaturais, resultados do uso humano, mas não intencionalmente criados, com capacidade restrita de autorregulação e com demanda por manejo;
- e) Ecossistemas antropogênicos, são aqueles criados intencionalmente com grande dependência de controle e gerência humana;
- f) Tecnosistemas, intencionalmente criados pelo ser humano para atividades industriais, econômicas e culturais, com dominância de estruturas e processos técnicos, altamente dependente do manejo humano com bioecossistemas dispersos no seu entorno.

Alguns estudos realizados no Brasil sobre hemerobia, destaca as abordagens de avaliação do grau de artificialidade ou naturalidade das áreas urbanas que foram propostas por Sukopp, um exemplo são os estudos de Belém, Godinho e Nucci (2011), que aplicam hemerobia para definir a dependência energética e tecnológica, porém sua análise está restrita as paisagens por eles analisadas, mas podem ser aplicadas para áreas maiores desde que as paisagens sejam reanalisadas. Este trabalho traz em seu escopo a utilização de imagens áreas para associação dos graus de hemerobia e foi desenvolvido em dois bairros distintos, em Santa Felicidade (Curitiba/PR) e Pici (Fortaleza/CE), propondo sete categorias para classificação de hemerobia, sendo elas: mínima, muito baixa, baixa, média, alta, muito alta e máxima (Figura 3). Outro exemplo que usa o mesmo método é o trabalho de Liberti *et al.* (2019), o qual determina a dependência energética e tecnologia das paisagens de Pinhais no Paraná, porém neste exemplar é utilizado cinco classes de hemerobia (mínima, muito baixa, média, muito alta e máxima).

Não obstante, estudos com maior área de análise foram realizados utilizando imagens de satélite disponibilizadas pelo software Google Earth para aplicar classificação de hemerobia, como por exemplo a pesquisa de Silva e Nucci (2016) que aplica o conceito no bairro Capela Velha em Araucária no Estado do Paraná e utilizando a matriz de classificação de unidades de paisagens e hemerobia, conforme a Figura 3.

Figura 3 — Características das Paisagens e Hemerobia.

Característica da Paisagem	Exemplo (imagem aérea)	Hemerobia	Cor
Baixa dependência tecnológica e energética para a manutenção da funcionalidade; alta capacidade de auto-regulação; alto aproveitamento das funções da natureza; superfícies permeáveis; vegetação original e flora/fauna nativa.  Alta dependência tecnológica e energética para a manutenção da funcionalidade; baixa capacidade de auto-regulação; pouca conexão com a dinâmica dos valores naturais, desenho padrão e como expressão de esmero, estética e civismo, baixa relação com as características locais, impermeabilização das superfícies; sem vegetação original e flora/fauna exótica.		Mínima	
		Muito baixa	
		Baixa	
		Média	
		Alta	
		Muito alta	
		Máxima	

Fonte: Belém e Nucci (2011).

Steinhardt *et al.* (2000) são reconhecidos por destacar a importância de combinar dados de satélite, fotografia aérea e Sistemas de Informações Geográficas (SIG) para este tipo de estudo, mesmo sem adotar o conceito de hemerobia ou um sistema de classificação. Com este método, eles também criaram análises cronológicas utilizando várias imagens de satélite.

Em 1990, Steinhardt *et al.* (2000) reconheceram que as atividades humanas

estavam alterando significativamente as paisagens e, portanto, era necessário monitorar e avaliar a interferência antrópica. Steinhardt *et al.* (2000) utilizaram a hemerobia como índice para monitorar paisagens através de imagens de satélite. Os autores também enfatizaram a importância do uso e cobertura da terra como componentes importantes na definição dos impactos humanos nas paisagens.

No mundo, Walz e Stein (2014) apresentam uma abordagem para a aplicação do conceito de hemerobia como indicador para monitorar as paisagens na Alemanha. Os autores utilizaram o Índice de Hemerobia baseado em sete níveis para avaliar a hemerobia do país estudado: 1- Ahemeróbico (quase sem impacto); 2- Oligohemeróbico (impacto fraco); 3- Mesohemeróbico (impacto moderado); 4- β -hemeróbico (impacto moderado-alto); 5- α -hemeróbico (impacto alto); 6- Polihemeróbico (impacto muito alto) e 7- Metahemeróbico (impacto excessivamente alto com biocenose destruída). O método proposto é baseado em dados de sensoriamento remoto, com a utilização de imagens de satélite e ferramentas SIG. Este segmento foi inicialmente proposto para o Estado da Saxônia na Alemanha e, em seguida, foi proposto e aplicado em todo o país.

As classes ahemeróbia, oligohemeróbia e mesohemeróbia de Walz e Stein (2014), estão esquematizadas como aquelas que possuem menor interferência humana e podem ser diagnosticadas pelos seguintes itens: a) Com uma biodiversidade mais elevada; b) São mais semelhantes a um ambiente natural nativo; c) Contêm menos artefatos humanos; d) São menos ocupadas por seres humanos; e) Têm uma maior capacidade de autorregulação; f) Incluem espécies animais e vegetais menos afetadas pelas atividades humanas; g) Possuem menos dependência energética e tecnológica.

Walz e Stein (2014) afirmam que à medida que avançamos da classe β -hemeróbia, as consequências das atividades antrópicas se intensificam até atingirmos o estágio metahemeróbico, no qual a biocenose é totalmente destruída e as estruturas e processos técnicos assumem o controle. O grau máximo de mudança na paisagem, em que tudo é produzido pelo homem é resultado do trabalho humano, é representado pela classe metahemeróbia.

O trabalho formulado por Tian *et al.* (2020) descreve o uso do conceito de hemerobia para monitorar mudanças espaço-temporais no uso da terra na cidade de Daqing, localizada no oeste da província de Heilongjiang, na China. Os autores

avaliaram o uso e a cobertura da terra em 1990, 2000, 2010 e 2017, usando imagens de satélite, e utilizaram o índice de hemerobia para quantificar as mudanças na paisagem ao longo do tempo. O índice proposto é similar ao empregado por Walz e Stein (2014), possuindo sete categorias para classificar hemerobia. Para investigar as conexões entre os diferentes tipos de uso e cobertura da terra e a hemerobia, Tian *et al.* (2020) também usaram análise de correlação espacial. Eles descobriram que os níveis baixos de hemerobia estão relacionados a regiões de conservação e proteção ambiental, enquanto os níveis altos de hemerobia estavam relacionados a mudanças na paisagem, incluindo urbanização crescente e agricultura intensiva.

3.5 Urbanização e clima

A pressão antrópica exercida sobre o ambiente trouxe mudanças drásticas às características naturais. A distribuição espacial das cidades, resultado do emaranhado antrópico no ambiente, ocasionando na redução do espaço verde, aumentando a área de superfície impermeável. Este pressuposto mostra a significativa alteração na diferença de temperatura do ar entre zonas urbanas e não urbanas envolventes, a cobertura terrestre artificial e o calor antropogênico, são assim, revertidas em áreas significativamente mais quentes (Souto; Cohen, 2021).

Na região amazônica, os ciclos de desenvolvimento foram centrados no agroextrativismo, apresentando um cenário de utilização do solo orientado ao mercado às questões de atividades madeireiras, pecuária e agricultura, sendo estas atividades associadas a elevadas taxas de desflorestamento na Amazônia Legal. Não restrito apenas a tal, o desenvolvimento na Amazônia foram influenciados também pelo estabelecimento de grandes obras de infraestrutura atraindo grande quantitativo populacional (Fearnside; Laurance, 2012; Prates; Bacha, 2011).

Nas últimas décadas as adversidades originadas durante o século XX, como migração urbana, fragmentação e segregação assumiram uma nova importante face ao clima global e uma grande necessidade de responder a estas mudanças e estabelecer novas faces à governança. Este arcabouço eleva o fato de as cidades sofrerem com os impactos climáticos e colaborarem com a estimulação do processo global (Espíndola; Ribeiro, 2020).

A discussão das mudanças climáticas e sua conjuntura com as políticas urbanas e metropolitanas demonstra que o assunto ainda necessita de atenção e

aprofundamento. As estratégias de uso e ocupação do solo estão ainda ligadas ao lucro e o quanto pode produzir para a cidade, deixando conteúdos relacionados ao meio ambiente em segundo plano, em especial o acesso aos serviços ecossistêmicos (Espíndola; Ribeiro, 2020).

3.5.1 O aumento da temperatura do ar nas cidades

Associar o desmatamento e os efeitos que ele traz ao clima local é debatido em diversos trabalhos, na região amazônica, no estado do Pará, por exemplo é possível verificar um aumento em temperatura do ar proveniente de taxas elevadas de desmatamento, conforme reportado em Ribeiro *et al.* (2023). Na Tabela 1 os valores em vermelho apontam relação significativa que o elevado índice de desmatamento está provocando na temperatura do ar, destacando-se em temperatura máxima (TMax) para o regime seco em relação às taxas de desmatamento “Belém (BE) (50%), Belterra (BT) (54%), Cametá (CM) (68%), Itaituba (IT) (50%), Marabá (MB) (51%) e Porto de Moz (PM) (50%) (Ribeiro *et al.*, 2023 p.172)” e temperatura mínima (TMin) “Belterra (BT) (62%), Cametá (CM) (73%), Itaituba (IT) (64%), Óbidos (OB) (85%) e Porto de Moz (PM) (90%) (Ribeiro *et al.*, 2023 p.172)”. no município de Breves houve um aumento na TMax no regime chuvoso de 55% e em Porto de Moz 74% TMin no regime chuvoso e 90% TMin no regime seco demonstrando assim que o aumento dos níveis de desmatamento influencia, no aumento da temperatura (Ribeiro *et al.*, 2023).

Tabela 1 — Correlações entre as séries temporais das taxas de desmatamento e as médias de TMax e TMin nos regimes chuvoso e seco em cada estação/município.

Est.	TMin Regime CHUV	TMin Regime SECO	TMax Regime CHUV	TMax Regime SECO
AL	0,06	0,25	0,03	-0,14
BE	0,37	0,62	0,21	0,50
BT	-0,51	0,09	0,39	0,54
BV	0,06	0,40	0,55	0,35
CA	0,33	0,73	0,41	0,68
CM	0,07	0,37	0,17	0,14
IT	0,29	0,64	0,07	0,50
MA	-0,49	-0,43	0,03	0,51
MB	-0,05	-0,47	-0,10	0,13
OB	0,20	0,85	-0,02	0,38
PM	0,74	0,90	0,42	0,50
SO	-0,50	-0,45	0,25	0,12
SX	-0,28	-0,03	0,71	0,78
TR	0,34	0,46	0,05	-0,19
TU	-0,38	-0,29	-0,13	0,37

Fonte: (Ribeiro *et al.*, 2023).

Ao analisar os dados foi possível diagnosticar que o desmatamento tem influência positiva na temperatura do ar nas cidades estudadas por Ribeiro *et al.*, 2023. Belém (BE) (que é assunto deste trabalho), Breves (BV), Soure (SO), Tracuateua (TR) e Tucuruí (TU) que possuem TMax entre 29°C a 35°C no período seco e chuvoso e TMin entre 21°C a 25°C no período seco e chuvoso, estão com baixos índices de desmatamento, Belém por exemplo que no estudo apresenta aumento da temperatura do ar, mínima e máxima nos regimes seco, não é afetada pelo desmatamento, mas possivelmente a intensa urbanização resultou em elevados níveis de aquecimento (Ribeiro *et al.*, 2023).

A deterioração do clima local promovida pela ocupação e utilização do espaço urbano pela sociedade que culturalmente substituem as características naturais por superfícies artificiais vem resultando em alterações físico-químicas na interface entre litosfera e atmosfera (Chandler, 1976). A evolução na expansão da população da urbe ocasiona excessivas alterações na paisagem elevando o déficit na ecologia das cidades resultado no acelerado crescimento e planejamento inadequado, todas estas

alterações no ambiente natural são marcadas pelo elevado número de construções que consequentemente vem substituindo as áreas arborizadas, gerando altas concentrações de poluentes e aumento da temperatura (Hobbs, 1980).

Nas cidades fatores físicos de grande prevalência à sensação térmica são vistos, um exemplo é o albedo que expressa a refletividade de um objeto ou superfície e pode ser obtido pela associação entre energia refletida e energia incidente, podendo a energia ser totalmente absorvida (corpo negro) ou refletida. A área urbana por ser constituída majoritariamente por prédios, calçadas, indústrias, asfalto, etc., pode haver variabilidade em seu albedo pela heterogeneidade da superfície, sendo assim, áreas mais escuras serão propensas a absorver mais energia, enquanto as mais claras irão refletir, exemplo, o asfalto tem um baixo albedo, enquanto vidros e tinta branca podem variar de 8 a 90% de albedo. A artificialização da paisagem influencia significativamente nos índices de albedo, causando assim possível aumento na temperatura urbana (Oke, 1987).

3.6 Fluxo de calor nos ecossistemas tropicais

O fornecimento de energia promovida pelo sol para diversos fins no sistema terra-atmosfera é responsável por gerir os principais processos naturais ocorrentes na superfície terrestre, a partir deste pressuposto da disponibilidade energética ao planeta podemos inferir que a quantidade de energia que chega à superfície e a que se desloca pode ser denominada por meio do balanço de radiação, que pode ser compreendida pelos fluxos de radiação incidente, absorvida, emitida e refletida por um ecossistema, corpo ou objeto como: prédios, carros e etc. (Araújo *et al.*, 2019). Sendo assim, a radiação de ondas curtas, que corresponde à energia emitida pelo Sol em distintas frequências nas faixas ultravioleta (10 - 400 nm), visível (400 - 700 nm) e infravermelho (700 nm - 1000 μ m), pode ser direta ou difusa. Essa radiação é emitida à superfície, ocasionando a elevação da temperatura terrestre (Filhot, 2010). A partir deste evento, consequentemente, há emissão de radiação de ondas longas, ou seja, a radiação oriunda do Sol anteriormente absorvida é emitida pela superfície terrestre, obedecendo à Lei de *Stefan-Boltzmann*, (Equação 1) que pode ser expressa, desde que se conheça sua temperatura (Marin *et al.*, 2008; Ayoade, 1986).

Equação 1 — *Stefan-Boltzmann*

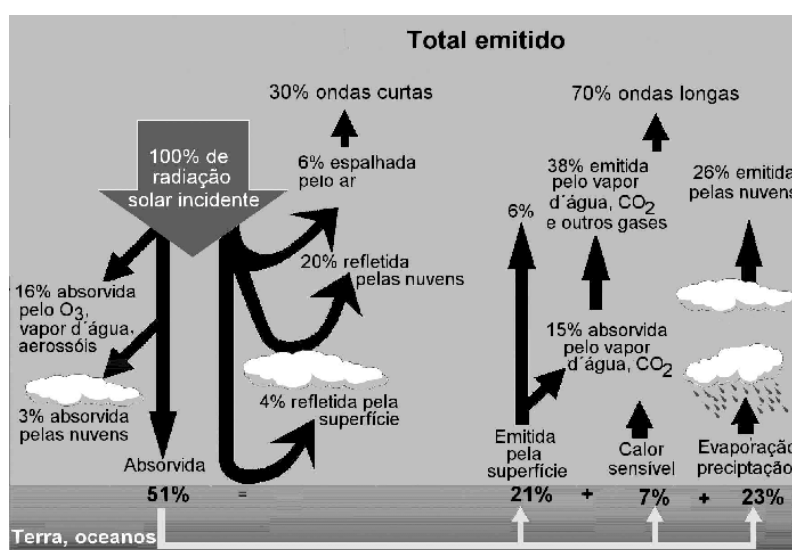
$$E_r = \varepsilon \sigma T^4$$

— A lei denomina que a energia emitida por um corpo E_r é proporcional à quarta potência da temperatura absoluta T em (K). ε é a emissividade do corpo com valor igual ou menor que 1 e σ é a constante universal de Stefan-Boltzmann ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2} \text{ K}^{-4}$)

A energia emitida por um determinado corpo ou objeto pode ser expressa pelo albedo, que corresponde à reflexão da radiação solar e pode variar com a cor e elementos que compõem o corpo. Por exemplo: rugosidade, umidade, tipo de cobertura (vegetação, solo, água), ângulo de incidência do sol, horário e localidade (Gielow *et al.*, 1999; Marin *et al.*, 2008).

Levando em consideração a localidade, o albedo pode ser maior em certas regiões, como as polares, que apresentam ângulo zenital maior e maior quantidade de nuvens e neve. Outro ponto são as regiões tropicais e subtropicais, que possuem uma quantidade superior de nuvens densas e áreas desérticas. Os albedos mais baixos estão presentes em áreas predominantemente uniformes, como os oceanos (Hartmann, 2015).

Figura 4 — Imagem ilustrativa do balanço de energia.



Fonte: Fiorin *et al.* (2011).

Alguns fatores determinam a quantidade de energia recebida na Terra, como a estação do ano, período do dia e latitude. Outro ponto importante é a duração do dia, que em locais específicos pode ser mais extensa ou mais curta, promovendo aumento ou diminuição da quantidade diária de radiação. Também há a determinação de radiação positiva durante o dia, pois a quantidade de radiação de ondas curtas recebida pelo solo é maior que a energia radiante (ondas longas). Durante a noite, o processo é inverso, resultando em um balanço de ondas longas negativo, pois não há radiação sendo emitida diretamente do Sol à superfície. No entanto, a Terra continua emitindo energia para o espaço.

Este processo de balanço de radiação (Equação 2) é uma característica da superfície que pode ser representada pelo saldo de energia (SR). O saldo de energia é definido pelo somatório do balanço de ondas curtas (BOC) e ondas longas (BOL). Assim, o valor final do SR será positivo durante o dia e negativo durante a noite (Pereira, 2002; Ayoade, 1986).

Equação 2 — Balanço de radiação.

$$SR = BOC + BOL$$

O conceito de balanço de radiação apresentado até o momento, diz respeito a um valor específico da radiação disponível no ambiente, já o balanço de energia, (Equação 3), corresponde ao ponto de destino da energia. Logo, o balanço de energia tem o intuito de relacionar o saldo de radiação aos fluxos de calor latente (LE), calor sensível (H), a fotossíntese (F) e fluxo de calor no solo (G), ambos processos correspondem ao destino da radiação disponível, sendo representado na forma da equação abaixo (Marin *et al.*, 2008; Ayoade, 1986).

Equação 3 — Balanço de energia

$$SR = LE + H + G + F + \Delta A$$

Em SR temos o saldo de radiação ou radiação líquida; em LE, se tem a energia capaz de realizar as mudanças de estado da água de líquido para gasoso (processo de evapotranspiração); em (H), se tem a energia que aquece as moléculas do ar; em (G), está a energia transmitida ao solo; em (F), a energia empregada no processo de

fotossíntese, que geralmente simboliza menos de 5% do saldo de radiação, sendo excluída dos processos de análises macroclimáticas e ΔA é a variação da energia do ambiente podendo tal ser positiva ou negativa. Levando em consideração (F) e ΔA , já descritos acima, ambas possuem uma quantidade de energia mínima e acabam sendo negligenciadas. LE e H correspondem a mais de 90% do saldo de radiação os tornando os principais constituintes do balanço de energia continental.

Ao levar em consideração áreas com presença de corpos d'água e vegetação abundante o fluxo de LE pode corresponder a mais de 70% de (SR), enquanto para ambientes mais secos H ganha notoriedade ocasionando em uma elevação da temperatura do ar durante o dia, e acentuada queda durante períodos noturnos, especialmente em áreas desérticas (Marin, 2008).

Este princípio de relação do calor latente ser maior em áreas mais densamente arborizadas e com presenças de corpos d'água eleva a umidade no solo, favorecendo assim o fluxo de calor latente, que comumente fica entre 70 e 80% do saldo de radiação, sendo a energia neste critério mais utilizada para o processo de mudança de estado da água. Isto explica por que a existência de arborização nas zonas urbanas é efetiva para a redução de temperatura. Já em áreas onde a presença de arborização e corpos d'água é ausente a conversão de energia se dá por meio do calor sensível, e este processo ocasiona o aumento da temperatura do ar em especial nos horários mais quentes do dia (Marin *et al.*, 2008).

Os ecossistemas tropicais e subtropicais apresentam a maior variação de temperatura em um dia e a presença de áreas florestadas é essencial à manutenção da umidade. O estudo entre superfície e atmosfera é essencial à caracterização do microclima e isto pode auxiliar nos estudos voltados a regiões afetadas pela crescente antropogênica, desmatamentos e queimadas, tais eventos configuram impacto nas trocas de energia na superfície e atmosfera, afetando a disponibilidade de umidade e ocasionando elevação da temperatura do ar.

O processo de evapotranspiração envolve a perda de água da superfície terrestre para a atmosfera (Ayoad, 1996). Esse fenômeno resulta da combinação de dois processos: evaporação, que é a conversão da água do estado líquido para o estado gasoso, removendo-a de superfícies como oceanos, lagos, rios, pavimentos, solos e vegetação úmida (incluindo a evaporação do orvalho e da chuva interceptada pela copa das árvores); e transpiração, que é a liberação de água pelas plantas para

a atmosfera através dos estômatos, ou por meio da transpiração cuticular (Vicente-Serrano *et al.*, 2015).

O calor latente (LE) é um componente crucial do balanço de energia em diversos ecossistemas, pois está envolvido na transformação da água do estado líquido para o estado gasoso (Silva *et al.* 2008). A evapotranspiração é fortemente influenciada por fatores relacionados à vegetação, ao manejo do solo e às condições ambientais, principalmente os elementos meteorológicos. A radiação solar, a temperatura da superfície, a temperatura e a umidade relativa do ar, juntamente com a velocidade do vento, desempenham papéis fundamentais no controle desse processo (Pereira *et al.*, 2002).

A vegetação desempenha um papel crítico na evapotranspiração, pois sua morfologia, tipo, resistência interna ao transporte de água e características da folhagem influenciam diretamente a taxa desse processo (Klocke *et al.*, 1996). O albedo da vegetação, que reflete a quantidade de radiação solar incidente, também afeta a disponibilidade de energia para a evapotranspiração. Vegetações mais escuras absorvem mais radiação solar e, portanto, têm um saldo de radiação mais alto (Pereira *et al.*, 2002). Além disso, a profundidade do sistema radicular, a altura e a rugosidade das plantas desempenham papéis significativos na evapotranspiração. Plantas com sistemas radiculares mais profundos exploram uma maior quantidade de solo em busca de água, e plantas mais altas e rugosas interagem mais eficientemente com a atmosfera em movimento, aumentando a evapotranspiração. Esta dinâmica é essencial para o processo pluviométrico da Amazônia, o qual é sustentado por uma parcela significativa dos fluxos de calor latente na floresta (Pereira *et al.*, 2002).

Estudos de modelagem climática sugerem que o desmatamento em grande escala na Amazônia pode gerar consequências significativas, incluindo o aumento da temperatura da superfície regional e a redução na evaporação e na precipitação (Malhi *et al.*, 2002). Portanto, o entendimento das trocas de energia na interface entre a vegetação e a atmosfera, envolvendo o balanço de radiação e os fluxos de calor sensível e calor latente, é fundamental para a modelagem do clima e a calibração de modelos hidrológicos. Essas magnitudes e suas variações em escalas de tempo menores que um dia desempenham um papel crítico na modelagem de impactos climáticos globais decorrentes das interações entre a superfície terrestre e a atmosfera (Baldocchi; Meyers, 1998).

4 MATERIAL E MÉTODOS

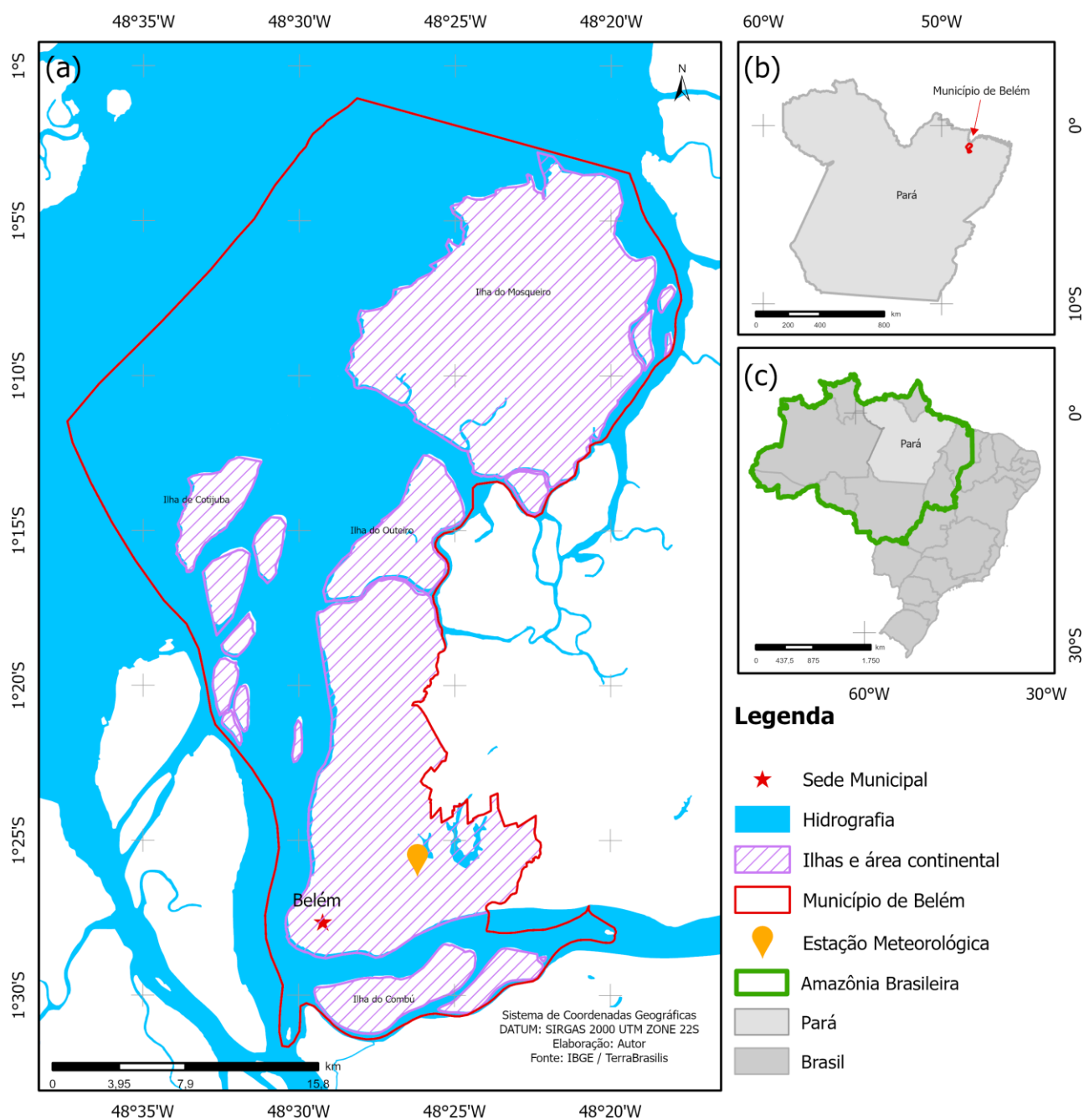
4.1 Área de estudo

A Figura 5 exibe a área de estudo que abrange o município de Belém, a capital do estado do Pará na Amazônia Oriental brasileira. O domínio geográfico do município é indicado pela linha vermelha na Figura 4a com uma área total de 1.059 km² para uma população de cerca de 1,3 milhão de habitantes e uma densidade demográfica de 1.230 habitantes por km² (Ibge, 2022). Desconsiderando a extensa porção hidrográfica (a baía do Guajará e o rio Guamá bordejando o município de norte a sul), a área continental (área hachurada na Figura 5a), incluindo ilhas menores ao sul e as maiores ilhas ao norte, Cotijuba, Outeiro e Mosqueiro, tem dimensão de aproximadamente 509 km². Como já mencionado, o foco deste trabalho será na área continental de Belém.

4.2 Dados climatológicos

Os dados de temperatura do ar (mínima TN e máxima TX) coletados *in situ* pela estação meteorológica convencional que foram obtidos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) do Brasil, através do portal de dados <https://bdmep.inmet.gov.br>. Esta é a única estação na área de estudo com disponibilidade de dados meteorológicos completos (todas as variáveis de superfície) e com uma série histórica consistente para estudos climatológicos. A localização da estação (latitude -1.436, longitude -48.437 e altitude 7.13 m) é dada pelo símbolo laranja na Figura 5a e os dados mensais da série estão disponíveis de janeiro/1985 a dezembro/2021. Além disso, utilizamos dados observacionais TN e TX derivados do CRU-TS 4.06 (*Climatic Research Unit gridded Time Series*), compilado por Harris *et al.* (2020) que foram reduzidos com o WorldClim 2.1 (Fick; Hijmans, 2017) para uma grade horizontal com resolução espacial de 0,041° ou 4,5 km adequada para análises espaciais na escala municipal. O CRU-TS foi gerado pela interpolação de variáveis mensais a partir de extensas redes de observações de estações meteorológicas sobre todos os domínios terrestres do mundo. Séries mensais de 1985 a 2021 (dados Geotiff estão disponíveis em www.worldclim.org/data/monthlywth.html) foram extraídas para a área de estudo.

Figura 5 — (a) Área de estudo no município de Belém, (b) Estado do Pará, (c) na região leste da Amazônia brasileira. A área destacada em vermelho com hachuras representa a porção continental e as ilhas onde a análise será enfatizada.



Fonte: elaborado pelo autor.

4.3 Análise de hemerobia

A análise de hemerobia utilizada neste trabalho é baseada em adaptações da proposta de avaliação formulada por Walz e Stein (2014), para regiões com paisagens europeias (Alemanha), que foram adaptadas à paisagem de uma área metropolitana localizada na Amazônia Oriental. Assim, o grau de impacto antrópico na paisagem

continental do município de Belém foi avaliado usando uma escala ordinal que varia do grau mais baixo (classe ahemeróbica, indicando uma área com zero ou nenhuma interferência humana, ou seja, uma região considerada natural) ao grau mais alto (classe metahemeróbica, representando uma área intensamente antropizada com interferência humana máxima, ou seja, uma região artificial), conforme descrito na Tabela 2. Para uma melhor compreensão e visualização realística da paisagem associada aos sete graus de hemerobia, a Figura 6 ilustra as principais características ambientais superficiais presentes na região, em que as classes de LULC representando a interferência humana foram devidamente adaptadas à área de estudo (Tabela 2, última coluna à direita).

O processamento e georreferenciamento foram realizados no software QGIS 3.30.1 (QGIS, 2023), utilizando o sistema de projeção *Universal Transverse Mercator* (UTM), o Datum SIRGAS2000 e a zona 22S. A dinâmica do uso da terra foi analisada com base em imagens Landsat-5 (TM) e Landsat-8 (OLI), ambas com resolução de 30m, fornecidas pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS) para os anos de 1985 e 2021. Posteriormente, foi criada uma malha GeoTiff de 1km sobre o domínio de Belém, seguida pela geração de um compósito multiespectral de três bandas RGB. A classificação das tipologias de uso da terra foi realizada considerando critérios de textura, tom e contexto das imagens de satélite coletadas nesses dois anos. Após o treinamento computacional e a classificação supervisionada das imagens, cada polígono de cobertura superficial foi associado a um nível hierárquico predefinido de classe LULC, seguindo os sete graus de hemerobia detalhados na Tabela 2 e na Figura 6. Para aprimorar a classificação LULC, pontos de validação aleatórios foram estabelecidos por meio de trabalho de campo, julgamento especializado e ferramentas computacionais utilizando o Google Earth. No final, o coeficiente Kappa foi calculado para avaliar a precisão dos resultados do mapeamento numa escala de 0 (sem concordância) a 1 (concordância perfeita).

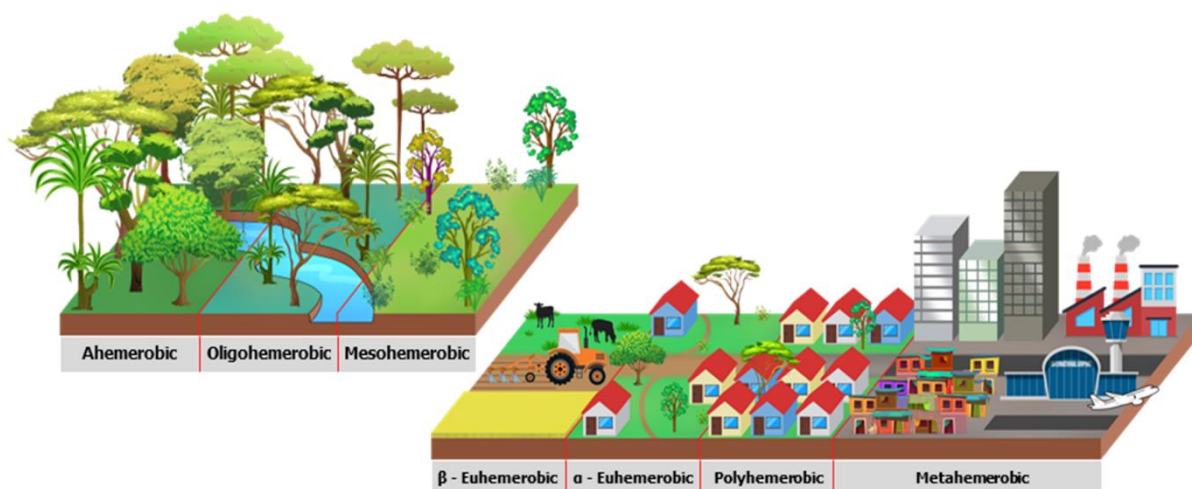
A escolha dos anos de 1985 como ano inicial e 2021 como ano final foi justificada pela intenção de comparar os resultados com um estudo semelhante conduzido por (Gutierrez; Souza; Gutierrez, 2022), que utilizou a plataforma Mapbiomas. Reproduzimos os mapas temáticos de LULC dessa plataforma, a qual possui apenas quatro classes principais de cobertura: Floresta, Formação Natural não Florestal, Agricultura e Área não vegetada (Mapbiomas, 2022)

Tabela 2 — Grau de hemerobia e a correspondente intensidade de interferência humana incluindo descrições da paisagem europeia que foi adaptada para a área de estudo.

Grau de Hemerobia	Intensidade de Interferência Humana	Paisagem europeia de Walz; Stein, 2014	Adaptação à paisagem metropolitana da Amazônia	Caracterização da paisagem metropolitana da Amazônia
Ahemeróbico	Natural: nenhum ou mínimo impacto humano	Rochas geleiras e neve perene	Floresta primária	Áreas preservadas com flora e fauna nativas. Possivelmente, pequenas comunidades indígenas ou populações tradicionais.
Oligohemeróbico	Quase natural: fraca alteração antrópica e vegetação em recuperação	Florestas, praias, dunas, areias, lagoas, áreas úmidas, mar e oceano	Floresta secundária e áreas úmidas	Recuperação de áreas úmidas e florestas secundárias. Possível presença de comunidades com práticas sustentáveis.
Mesohemeróbico	Semi-natural: impacto humano moderado	Pastos naturais, arbustos de floresta, floresta de transição, áreas queimadas e vegetação esparsa	Sucessão ecológica pioneira e pequenas clareiras	Áreas com pastagens naturais, transição florestal e pequenas clareiras. Desenvolvimento sustentável com práticas agroecológicas.
β -Euhemeróbico	Agrícola: área perturbada pela ação humana de forma regular	Áreas verdes urbanas, pastagens, agricultura, cursos de água	Pastos, plantações, fazendas, áreas verdes urbanas e habitações ribeirinhas	Pastagens, áreas verdes urbanas e pequenas e grandes propriedades agrícolas. Integração de práticas agrícolas sustentáveis.
α -Euhemeróbico	Cultural: altos impactos no sistema natural	Instalações esportivas e de lazer, terras aráveis não irrigadas, vinhas, árvores frutíferas e padrões complexos de cultivo	Áreas urbanas de baixa densidade e praças públicas	Áreas urbanas de baixa densidade com influência cultural. Presença de espaços de lazer e práticas agrícolas tradicionais.
Polyhemeróbico	Artificial: pouca presença natural e mudanças irreversíveis	Rede urbana descontínua, canteiros de obras, locais públicos e indústrias de descarte e mineração	Áreas urbanas de média densidade, extração mineral e locais de descarte de lixo	Áreas urbanizadas, construção intensiva, indústrias e presença de resíduos. Desafios ambientais significativos.
Metahemeróbico	Totalmente artificial: ambiente completamente modificado	Rede urbana contínua, ferrovias, portos e aeroportos	Sistema urbano denso, verticalização, indústrias e rodovias	Áreas urbanas densas, infraestrutura desenvolvida, indústrias e rodovias. Desafios ambientais extremos e necessidade de planejamento sustentável.

Fonte: Adaptada de Walz e Stein (2014).

Figura 6 — Diagrama com uma visualização realista das principais características da paisagem associadas aos sete graus de hemerobia para uma área metropolitana na Amazônia Oriental.



Fonte: elaborado pelo autor.

4.4 Análise climática

Como a sazonalidade na Amazônia é um fator relevante, para estudar o impacto da urbanização no clima, calculamos séries temporais de TN e TX para as estações CHUVOSA (meses consecutivos de janeiro a abril) e SECA (meses sucessivos de julho a novembro), cujos períodos foram definidos nos estudos climatológicos documentados por (Gutierrez; Souza; Gutierrez, 2022; Souza *et al.*, 2017). Os dados de TN e TX da estação localizada em Belém foram comparados estatisticamente (cálculo de correlações de Pearson e gráfico de dispersão com o coeficiente de determinação R^2) aos dados do CRU (ponto da grade mais próximo), com o propósito de validação e demonstração de que essa base de dados é consistente e adequada para a análise de padrões espaciais de temperatura do ar em todo o município de Belém.

Foram gerados mapas climatológicos (média histórica de 1985 a 2021) de TN e TX para as estações CHUVOSA e SECA. Consideramos separadamente as duas médias de 18 anos (1985/2002 e 2004/2021) para calcular a diferença entre as amostras e para uma subsequente avaliação das mudanças espaciais (em °C) em cada regime sazonal. Os dados do CRU em grade foram georreferenciados para o mapa de hemerobia de 2021 e, assim, foram obtidos dois conjuntos distintos contendo as séries temporais de TN e TX representativas dos pontos da grade que contêm a classe artificial urbanizada e a classe natural de floresta. Estabelecemos um conjunto

de doze pontos representativos das áreas artificiais e outro conjunto de sete pontos em áreas naturais (o mapa ilustrando esses pontos da grade é mostrado na Figura 8 no item de resultados). Estatísticas descritivas e gráficos de caixa (Boxplot) foram usados nesses conjuntos de dados específicos, com o objetivo de realizar uma análise quantitativa e verificar se a maioria dos distritos e áreas artificiais tem temperatura do ar significativamente mais alta em comparação com áreas naturais na área continental de Belém. Nessas análises comparativas, o teste T de Student com um nível de 5% (valor-p < 0,05) foi considerado para confirmar se a diferença entre as áreas artificiais e naturais é estatisticamente significativa.

5 RESULTADOS

5.1 Mapeamento *LULC* usando graus de hemerobia

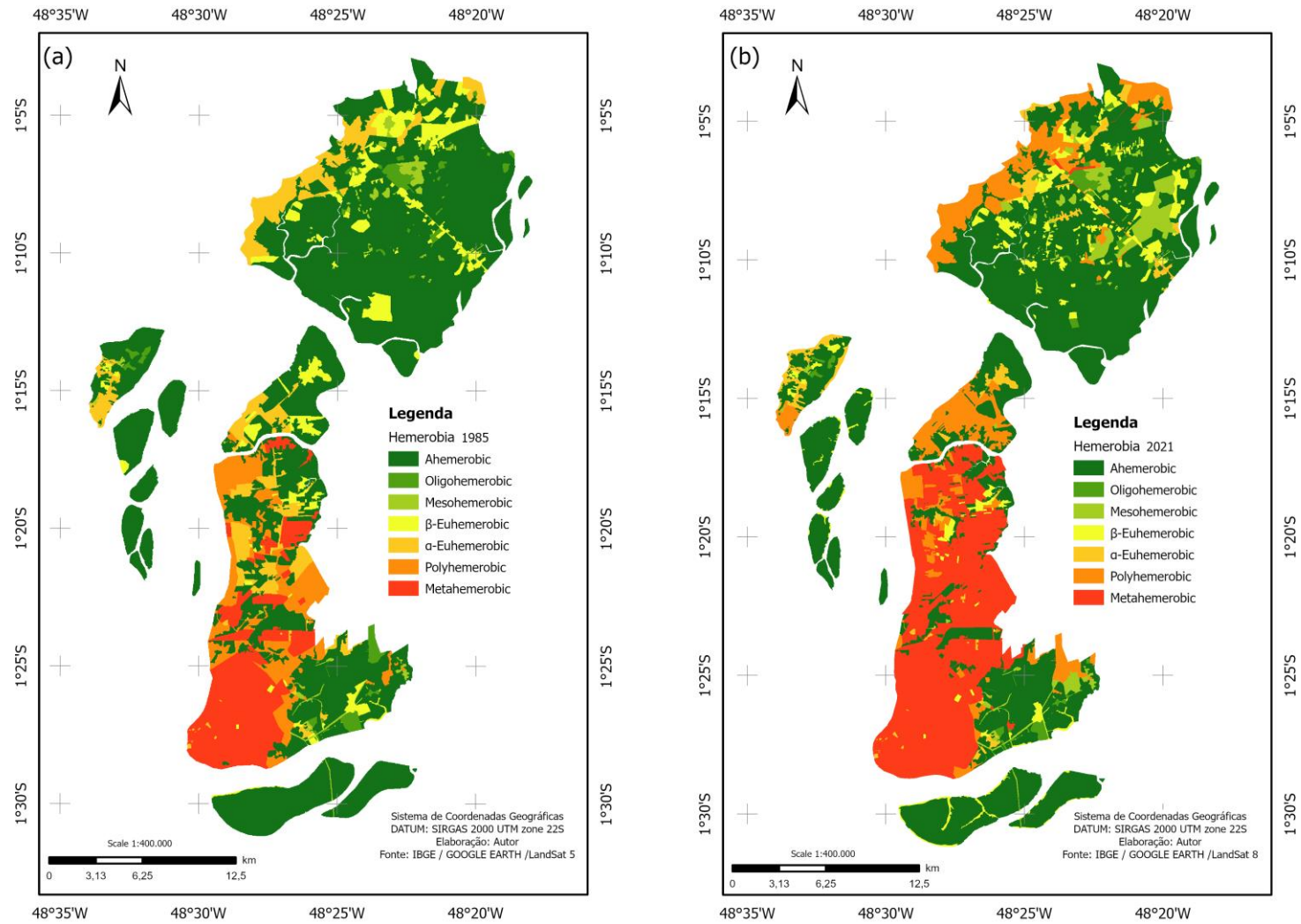
Ao analisar a precisão do mapeamento digital através do valor *kappa*, obtivemos 0,928399 para o ano de 1985 e 0,950106 para 2021, indicando que os resultados apresentaram concordância significativa e alta qualidade nos mapas de hemerobia gerados para o município de Belém.

A Figura 7 mostra os mapas de hemerobia sobre a porção continental de Belém. Em 1985, ano inicial da análise, a área mais ao sul da porção continental de Belém (primeira liga patrimonial) já apresentava cobertura densamente urbanizada, conforme indicado pela classe metahemeróbia. Nesse período, as classes polihemeróbia e α -euhemeróbia, correspondentes a densidade urbana média e baixa, respectivamente, predominam nas porções central e norte do município e ao longo da faixa costeira ocidental da ilha de Mosqueiro, no extremo norte da região. Em relação às áreas de vegetação natural representadas pelas classes oligohemeróbia e ahemeróbia, destacam-se nas pequenas ilhas ao sul e oeste, bem como na porção continental sudeste de Belém e na maior parte da ilha de Mosqueiro (Figura 7a). Ao examinar o mapa de hemerobia para o ano de 2021 e realizar uma comparação visual com o mapa de 1985, é possível notar uma certa preservação da cobertura natural (florestas primárias, vegetação secundária e áreas alagadas), restrita ao setor continental sudeste de Belém, nas pequenas ilhas ao sul e oeste, bem como em grande parte da ilha de Mosqueiro, onde predominam as classes ahemeróbia e oligohemeróbia. Especificamente na área verde mais preservada no sudeste de Belém, não houve grandes transformações a longo prazo devido à criação, pelo governo do Estado do Pará em 1993, do Parque Estadual da Utinga (USPCU) e da Área de Proteção Ambiental da Região Metropolitana de Belém (EPAMRB). Essas áreas protegidas são essenciais para o abastecimento público de água de todos os municípios na região metropolitana (Durta *et al.*, 2022). Por outro lado, destaca-se a expansão da classe metahemeróbia sobre os setores central e norte da sede municipal, indicando que o intenso e desordenado processo de urbanização (paisagem completamente artificial) agora ocupa toda a área continental de Belém e a ilha adjacente de Outeiro (Figura 3b).

O mapeamento de hemerobia na região de Belém é consistente com os resultados da dinâmica de uso da terra conduzida por (Gutierrez; Souza; Gutierrez, 2022) que utilizou o banco de dados do MapBiomias, reproduzido na Figura A2 no Apêndice A do presente trabalho. Tanto os mapas de 1985 quanto de 2021 mostram que a configuração espacial das áreas com a classe metahemeróbica artificial indicando um sistema urbano denso (Figura 7) coincide com as áreas da classe de infraestrutura urbana do MapBiomias (Figura A1). Da mesma forma, as áreas destacando a classe ahemeróbica natural na Figura 7 são consistentes com as áreas na classe de floresta natural do MapBiomias na Figura A2.

Os resultados quantitativos das transformações ambientais denotadas pelo mapeamento de hemerobia ao comparar os anos de 1985 e 2021, ao longo de três décadas e meia, são mostrados na Figura 8, com gráficos circulares mostrando a área em km² e a respectiva porcentagem em cada classe (Figura 8a), bem como as mudanças percentuais observadas no período (Figura 8b). As mudanças mais significativas foram observadas nas classes extremas que representam áreas naturais (ahemeróbica) e completamente artificiais (metahemeróbica). Ou seja, a área com cobertura de floresta primária variou de 322,44 km² (63,33%) em 1985 para 267,33 km² (52,49%) em 2021, enquanto a área densamente urbanizada expandiu de 52,49 km² (10,31%) em 1985 para 116,41 km² (22,86%) em 2021 (Figura 8a). Assim, foi evidenciada uma supressão da classe ahemeróbica de 10,84% e uma expansão da classe metahemeróbica de 12,55% (Figura 8b). A classe polihemeróbica, representando cobertura urbana com intensidade média, também aumentou de 38,11 km² (7,48%) em 1985 para 59,39 km² (11,66%) em 2022, sinalizando um aumento no período de 4,18%. A classe α -euhemeróbica (cobertura urbana com baixa intensidade) flutuou negativamente de 45,07 km² (8,85%) em 1985 para 14,02 km² (2,75%) em 2022, com uma variação no período de -6,10%. As áreas com as classes restantes de índices β -euhemeróbica, mesohemeróbica e oligohemeróbica apresentaram variações menores, com mudanças no período de -1,50%, 2,07% e -0,38%, respectivamente.

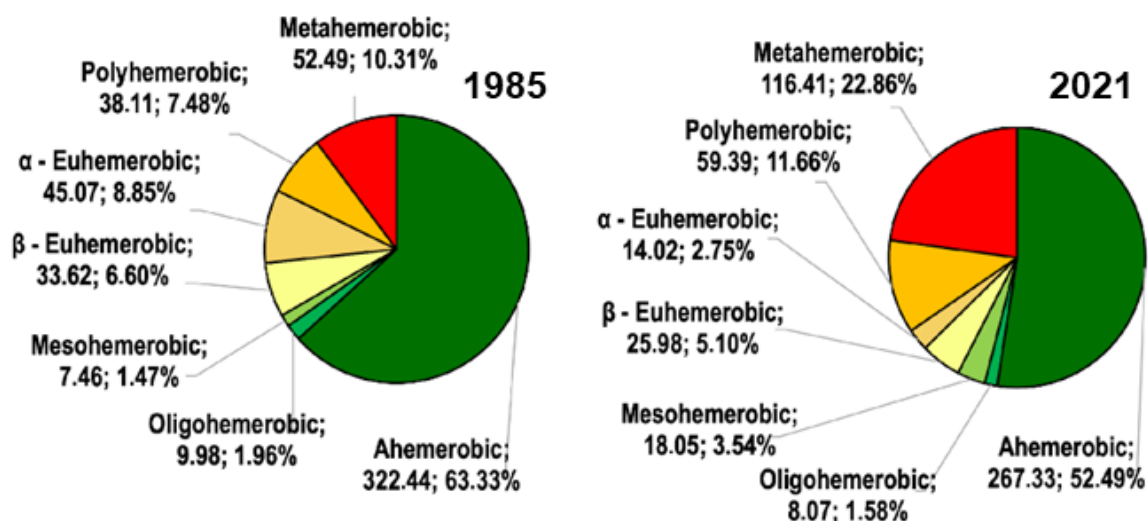
Figura 7 — Mapas de graus de hemerobia sobre a porção continental de Belém para os anos (a) 1985 e (b) 2021. Os graus são indicados na legenda.



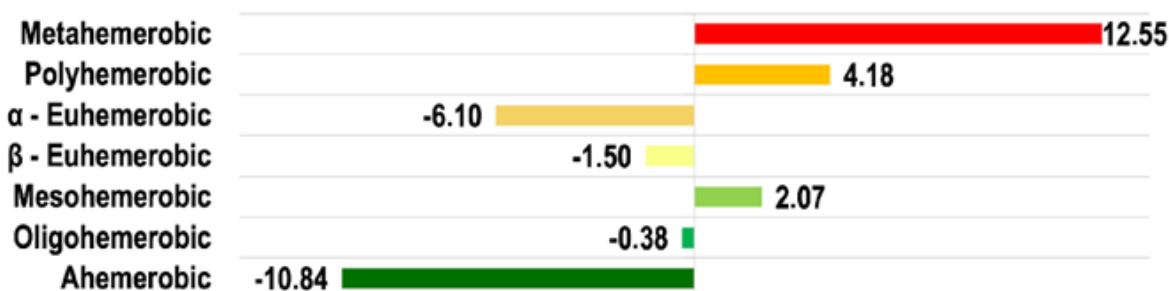
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 8 — (a) Área total (km²) e porcentagens (%) em cada grau de hemerobia para 1985 e 2022; (b) mudanças (%) de 1985 para 2022.

(a) Área total (km²) e Porcentagens (%) em cada grau de Hemerobia



(b) Alterações (%) de 1985 a 2021



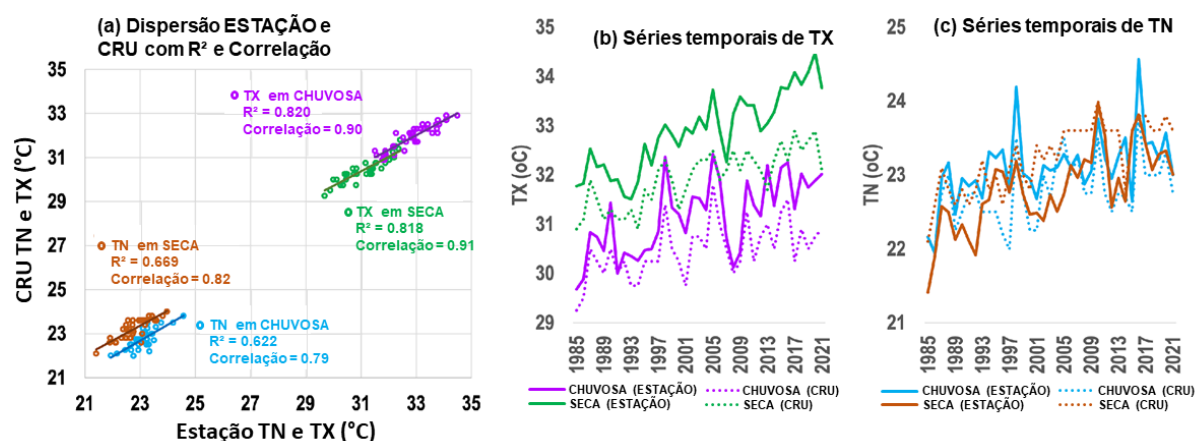
Fonte: elaborado pelo autor.

5.2 Padrões espaciais e mudanças na temperatura do ar sazonal

Primeiramente, analisamos os dados sazonais de TN e TX para a estação *in loco* de Belém e o CRU (ponto da grade mais próximo) no período de 1985 a 2021. Na Figura 9a, o gráfico de dispersão para a variável TX revela uma relação linear positiva com alta correspondência entre os dados, com R^2 de 0,818 e correlação de 0,91 na estação SECA e R^2 de 0,820 e correlação de 0,90 na estação CHUVOSA. Para a variável TN, também são verificados altos valores de R^2 de 0,669 e correlação de 0,82 na estação SECA e R^2 de 0,622 e correlação de 0,79 na estação CHUVOSA. As Figuras 9b e 9c mostram as séries temporais de 1985 a 2021 das variáveis sazonais de TX e TN, onde é perceptível a tendência de aumento sistemático em ambas as variáveis e regimes sazonais, e o CRU captura bem a variabilidade temporal dos regimes sazonais ao longo do período analisado. Portanto, demonstramos que os

dados do CRU são consistentes com as observações *in loco* e, portanto, podemos usar de maneira coerente esses dados em grade de alta resolução espacial para analisar os padrões espaciais em toda a área metropolitana de Belém.

Figura 9 — (a) Gráfico de dispersão de TX e TN de 1985 a 2021 para os dados da ESTAÇÃO e do CRU durante as estações ÚMIDA e SECA, incluindo os respectivos valores de R² e correlação; Séries temporais de 1985 a 2021 de (b) TX e (c) TN para a ESTAÇÃO e o CRU durante as estações CHUVOSA e SECA. A unidade é °C.



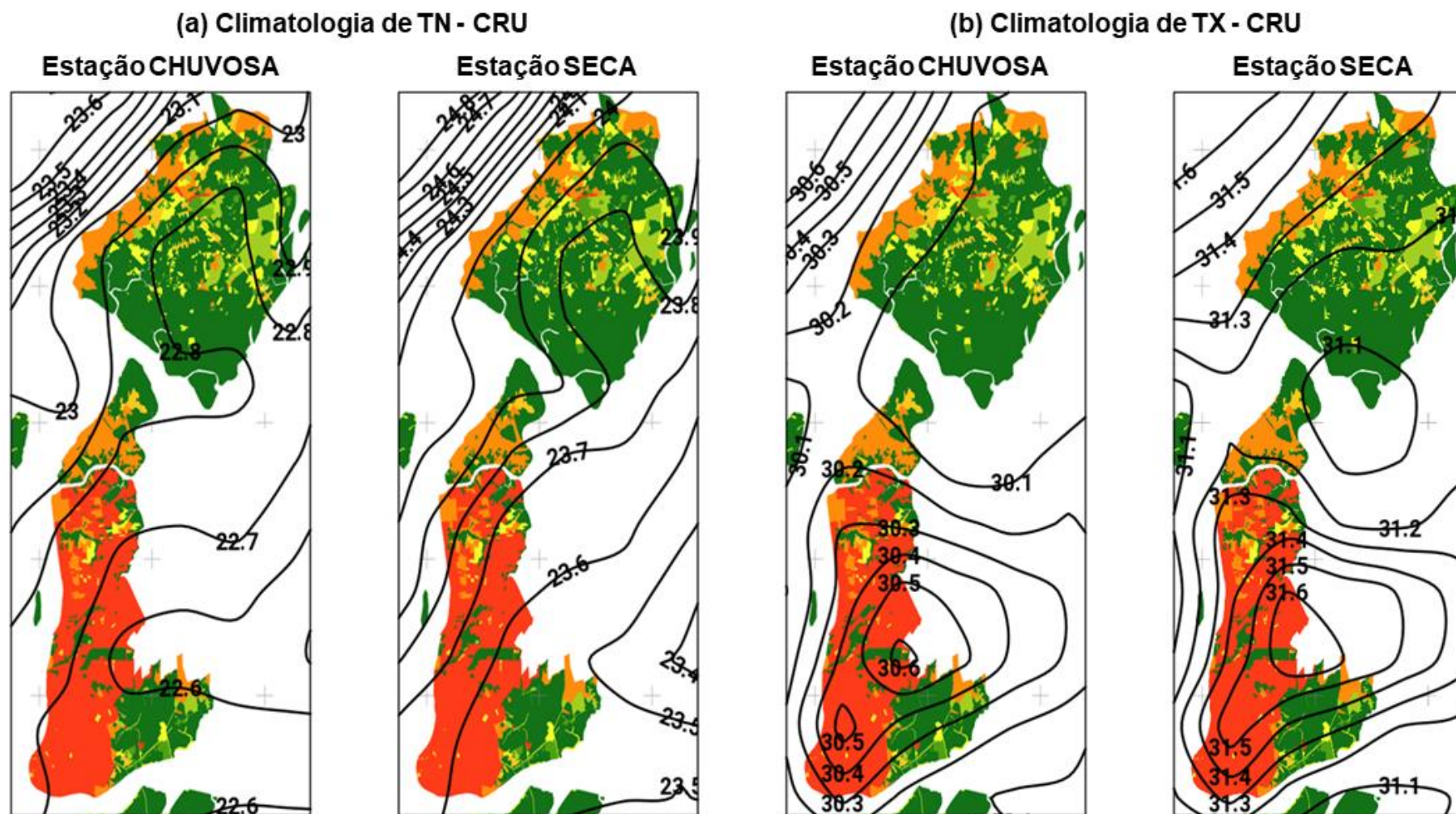
Fonte: elaborado pelo autor.

Os padrões climatológicos do CRU (média histórica de 1985 a 2021) das variáveis TN e TX nas estações CHUVOSA e SECA sobre a porção continental do município de Belém e áreas vizinhas são mostrados na Figura 10. Nestes resultados, o mapa de hemerobia foi colocado em segundo plano para enfatizar que, em geral, a temperatura do ar é relativamente mais alta em áreas artificiais e mais baixa em áreas naturais. As condições climatológicas de TN são semelhantes em ambos os períodos sazonais, com valores relativamente mais baixos (22,6 a 22,8 °C na CHUVOSA; 23,6 a 23,8 °C na SECA) na porção mais oriental da região (sudeste da sede municipal e oeste da ilha de Mosqueiro) e mais altos (22,8 a 23 °C na CHUVOSA; 23,7 a 24 °C na SECA) na parte mais ocidental que abrange a área mais densamente urbanizada de Belém e na zona costeira com urbanização de intensidade média sobre a ilha de Mosqueiro (Figura 10a). Por outro lado, a climatologia de TX exhibe uma configuração interessante em ambos os regimes sazonais, com uma área em formato circular apresentando um centro mais quente (atingindo um valor máximo de 30,6 °C na CHUVOSA e 31,6 °C na SECA) sobre a área urbana continental de Belém, e uma diminuição gradual nas bordas norte e leste, com valores em torno de 30,1 °C na CHUVOSA e 31,2 °C na SECA (Figura 10b).

Nos dados pontuais da estação de Belém, já mostramos evidências de um aumento sistemático da temperatura do ar (Figura 9) nas últimas décadas. Essa tendência de aquecimento é confirmada espacialmente em toda a região, como mostrado na Figura 11 contendo as mudanças positivas em TN e TX dadas pela diferença entre as amostras de 2004/2021 e 1985/2002. O mapa de TN (Figura 11a) para a estação CHUVOSA, valores de 0,45 a 0,5 °C são vistos na porção com predominância de cobertura de urbanização artificial no centro e sul e 0,4 °C na área norte com superfície mais natural, enquanto a estação SECA apresenta valores de 0,55 a 0,65 °C no setor centro-sul (cobertura artificial) e valores 0,5 e 0,55 °C no setor mais ao norte (cobertura natural). No mapa de TX (Figura 11b), olhando particularmente para a ilha de Mosqueiro ao norte, uma maior tendência positiva (0,75 °C na CHUVOSA e 0,95 °C na estação SECA) é notável na faixa costeira com urbanização média, e uma menor tendência na área interior onde há presença de floresta natural. Na área continental mais urbana ao sul, a tendência de aquecimento varia entre 0,65 e 0,7 °C na CHUVOSA e atinge um valor máximo de 1 °C na estação SECA.

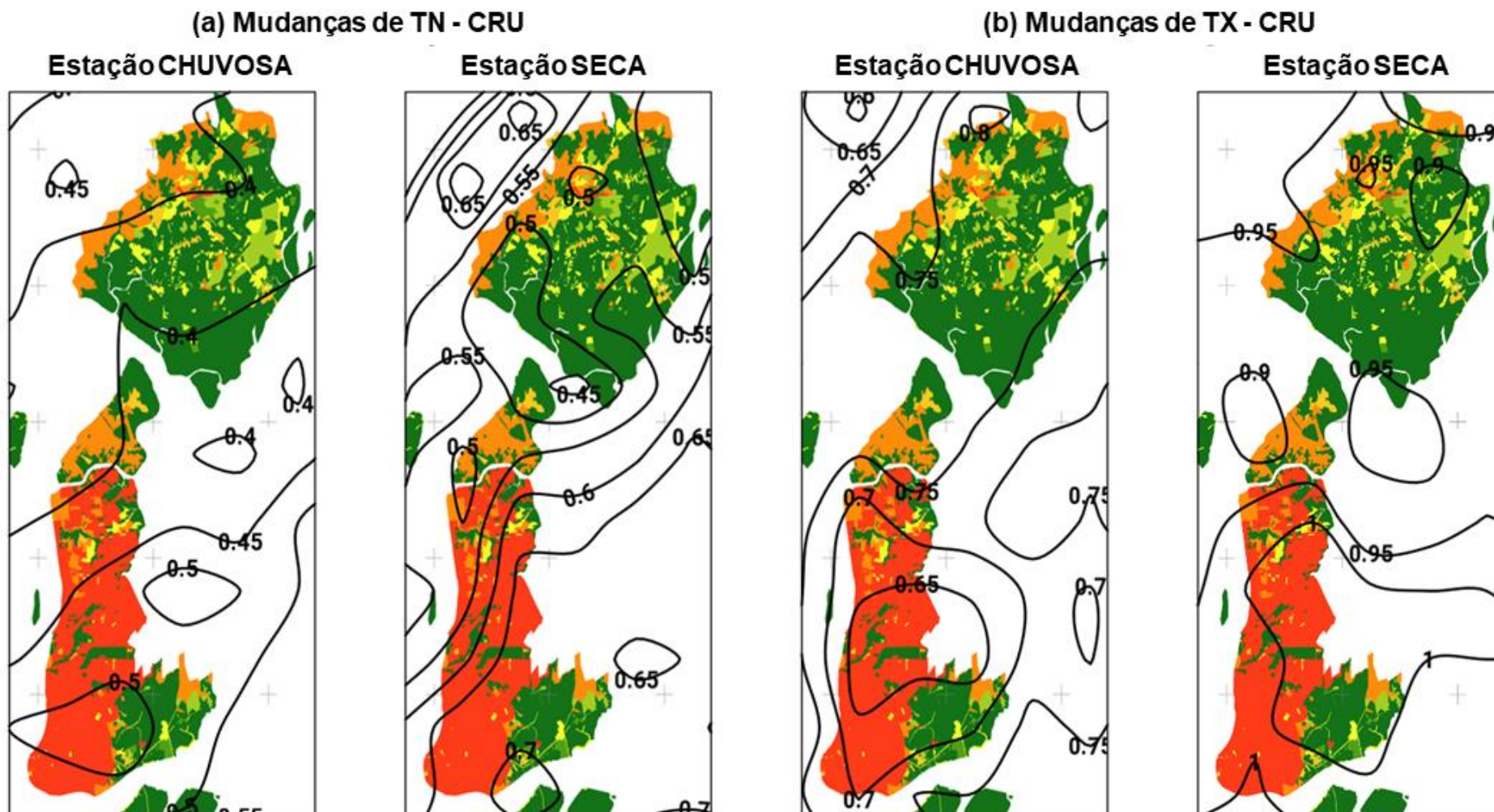
A evidência de um clima atual mais quente associado à urbanização na metrópole de Belém é confirmada quantitativamente por meio de estatísticas descritivas e boxplots apresentados na Tabela A2 (ver Apêndice A) e Figura 12. Exceto pela variância e desvio padrão (com valores mais baixos), os parâmetros estatísticos de TN e TX no período de 2004/2021 são todos mais altos quando comparados aos valores no período de 1985/2002 (Tabela 3), conforme mostrado nos boxplots em laranja posicionados acima dos boxplots em azul (Figura 12a 12b). A análise considerando o conjunto de pontos da grade com classes de hemerobia natural e artificial (veja a localização dos pontos indicados no mapa à direita na Figura 12) nos permitiu verificar que as mudanças, ou seja, o aumento sistemático na temperatura do ar, são relativamente maiores em áreas com urbanização quando comparadas a áreas com vegetação. O incremento de TN foi de 0,39 e 0,45 na CHUVOSA e 0,53 e 0,60 na SECA para as áreas naturais e artificiais, respectivamente (Figura 12c). Os valores mais expressivos foram observados para TX com um aumento de 0,58 e 0,62 na CHUVOSA e 0,83 e 0,97 na SECA para áreas naturais e artificiais, respectivamente (Figura 12d).

Figura 10 — Climatologia do CRU (média histórica de 1985 a 2021) de (a) TN e (b) TX nas estações CHUVOSA e SECA sobre a porção continental de Belém e áreas vizinhas. O intervalo das isolinhas de temperatura do ar é de 0,1 °C. O fundo é o mapa de hemerobia no ano de 2021.



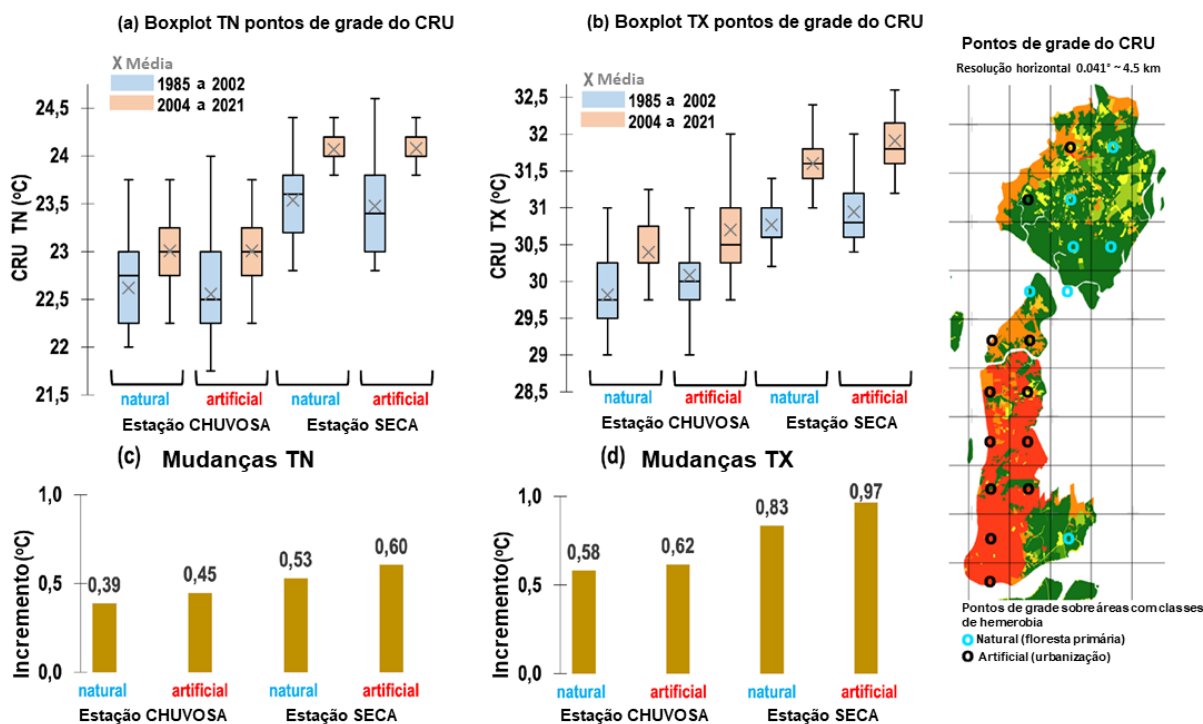
Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 11 — Mudança (diferença entre as amostras de 2004/2021 e 1985/2002) de (a) TN e (b) TX nas estações CHUVOSA e SECA sobre a porção continental de Belém e municípios vizinhos. O intervalo das isolinhas de temperatura do ar é de 0,05 °C. O fundo é o mapa de hemerobia no ano de 2021.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 12 — *Boxplots* para (a) TN e (b) TX para as estações CHUVOSA e SECA considerando o conjunto de pontos de grade do CRU sobre áreas naturais e artificiais (pontos indicados no mapa hemeróbico à direita) nos períodos 1985/2002 e 2004/2021; Mudanças para (c) TN e (d) TX dadas pela diferença entre as médias de 2004/2021 e 1985/2002 sobre áreas naturais e artificiais. A unidade é °C.



Fonte: elaborado pelo autor.

Por fim, apresentamos os resultados obtidos nos cálculos estatísticos da diferença entre as séries temporais históricas (de 1985 a 2021) dos conjuntos de pontos da grade CRU selecionados para as áreas artificiais e naturais sobre a porção continental de Belém. A Tabela 3 mostra os valores obtidos no teste T e a Figura 13 ilustra os gráficos de dispersão nos quais é possível visualizar a distribuição dos conjuntos de pontos para TN e TX sazonais. A variável TN não passou no teste (diferença próxima a zero), no entanto, TX apresentou uma diferença positiva estatisticamente significativa de 0,27 °C na estação CHUVOSA e 0,31 °C na estação SECA, assim, provamos que os distritos e áreas urbanizadas são significativamente mais quentes do que outras regiões de Belém. Em outras palavras, a expansão da área urbana em Belém contribui diretamente para o aumento da temperatura máxima (período da tarde), especialmente nos meses de julho a novembro.

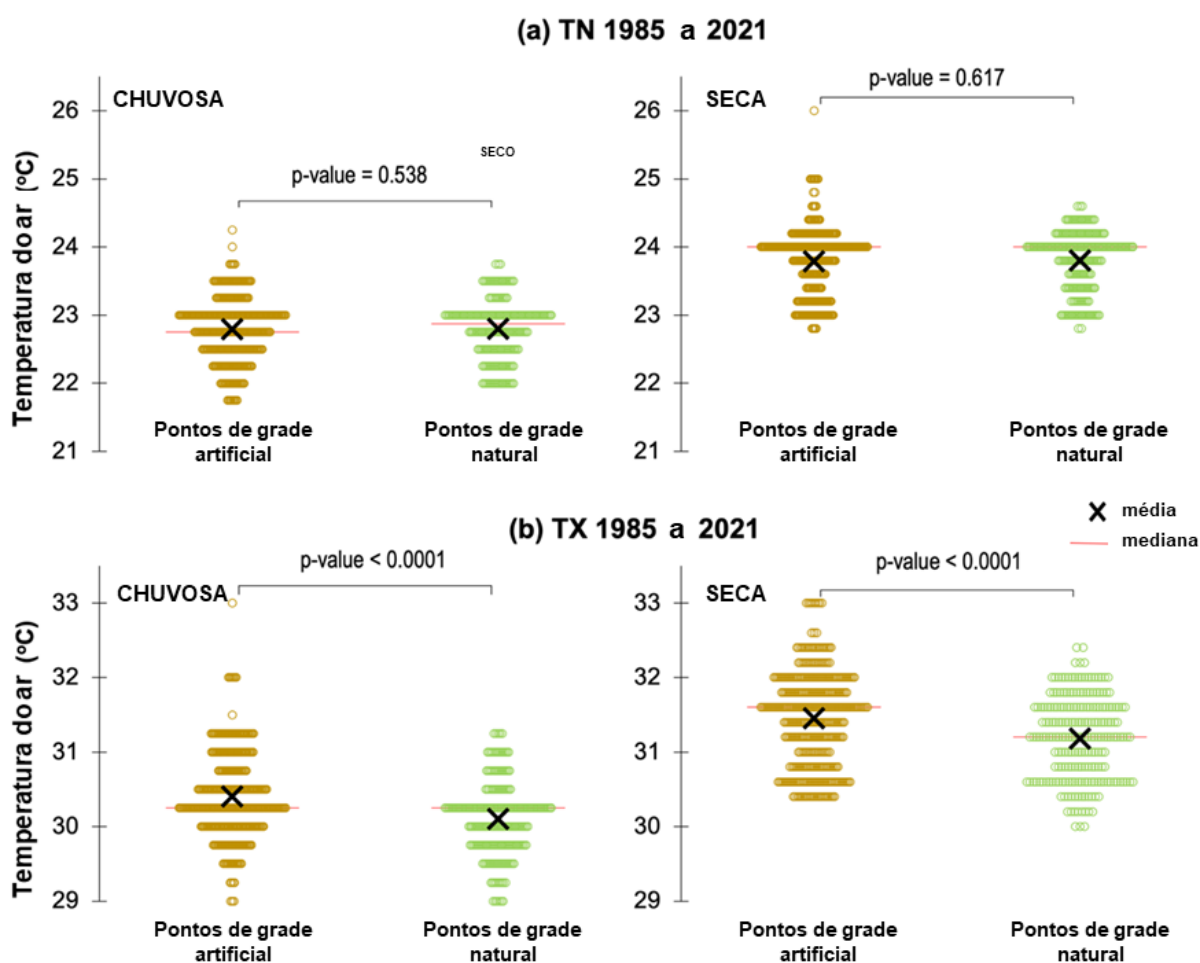
Tabela 3 — Teste T de Student para a diferença entre os conjuntos de pontos de grade do CRU de TN e TX para áreas artificiais e naturais sobre o município de Belém nas estações CHUVOSA e SECA.

	TN		TX	
	CHUVOSA	SECA	CHUVOSA	SECA
Diferença (°C)	0.004	0.012	0.27 ¹	0.31 ¹
Graus de liberdade	415	491	498	496
Valor - p	0.538	0.617	< 0.0001	< 0.0001

¹ Statistically significant.

Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 13 — Gráficos de dispersão dos conjuntos de pontos de grade do CRU para áreas artificiais (urbanização) e naturais (floresta) sobre Belém para (a) TN e (b) TX nas estações CHUVOSA e SECA. As séries temporais são de 1985 a 2021 e a unidade é °C.



Fonte: elaborado pelo autor.

6 DISCUSSÃO

A metodologia da hemerobia em estudos de mudanças antropogênicas na paisagem foi inicialmente usada na Europa (Walz; Stein, 2014; Hill; Roy; Thompson, 2002). Na América do Sul, Gutiérrez, Gärtner e López (2013), investigaram as mudanças de *LULC* de longo prazo usando métricas de hemerobia na bacia hidrográfica de Mucujún dos Andes venezuelanos e documentou não apenas a recuperação florestal, mas também o crescimento da área urbana, o uso intensificado da terra e as invasões por espécies não nativas. Niño *et al.*, (2023) utilizou essa técnica para gerar cartografia temática e análise espacial para apoiar o planejamento do uso da terra na Orinoquia colombiana aos pés da Cordilheira dos Andes. Especificamente para o Brasil, existem exemplos de aplicações em diferentes paisagens das regiões Sul, Sudeste e Nordeste (Belém; Godinho; Nucci, 2011; Silva *et al.*, 2022). A aplicabilidade dessa técnica de sensoriamento remoto em uma região metropolitana dentro da Amazônia brasileira foi realizada no presente trabalho. Nossas descobertas sobre o grau de artificialidade induzida por pressões antropogênicas no município de Belém (Figura 7), além dos resultados do mapeamento serem consistentes com o produto MapBiomias (Gutierrez; Souza; Gutierrez, 2022), também há correspondência com o estudo de classificação de *LULC* usando os produtos da família Sentinel (Tavares *et al.*, 2019).

O mapeamento dinâmico multitemporal neste município de 1985 a 2020 foi investigado por (Gutierrez; Souza; Gutierrez, 2022), com indicações de crescimento populacional significativo de cerca de 34% (1.120.777 em 1985 para 1.499.641 habitantes em 2020), de modo que a supressão de vegetação de quase 5% da cobertura florestal foi convertida principalmente em áreas urbanas (aumento de 4,4%) e em menor medida em áreas de pastagem/agricultura. Esses autores relataram um crescimento urbano sistemático e desordenado ocorrido na porção norte da região, cujos resultados estão em conformidade com o nosso mapeamento de hemerobia (Figura 7) que indicou um processo de urbanização mais intenso ocupando agora toda a porção central e norte da Belém continental, incluindo a ilha do Outeiro e a zona costeira da ilha de Mosqueiro no extremo norte da região.

De acordo com estudos regionais anteriores de modelagem, o efeito direto das mudanças no uso da terra, resultando na modificação da distribuição de energia com uma parcela do fluxo de calor sensível relativamente maior que o fluxo de calor latente,

é a explicação plausível para o aquecimento da superfície, resultando em um clima mais quente (Llopart *et al.*, 2018). Esses impactos ambientais no clima local foram abordados para a região de Belém, por meio de análises integradas de padrões de paisagem heterogêneos (mapeamento de hemerobia) e a correspondente configuração espacial e intensidade da temperatura do ar. Nossas descobertas observacionais mostraram que as regiões onde prevaleceu a conservação da vegetação de floresta primária (grau natural de ahemerobia) coincidem com um aumento relativamente menor na temperatura do ar quando comparadas às áreas onde predomina o processo de urbanização (grau artificial de metahemerobia), de acordo com os resultados quantitativos na Tabela 3 e Figura 12. Silva *et al.*, (2021), encontrou uma correlação positiva significativa entre mapas de temperatura da superfície e os índices NDBI e NDBal (indicadores espectrais de cobertura da terra em áreas construídas e terra nua primária e secundária) gerados por imagens de satélite Landsat na região metropolitana de Belém.

Os dados de temperatura do ar TN e TX de alta resolução espacial da base de dados CRU, que foram devidamente validados com medições *in situ* da estação de Belém, apresentaram padrões sazonais consistentes com estudos anteriores. Um resultado relevante foi a configuração aproximadamente circular do TX climatológico em ambos os regimes sazonais (Figura 10b) com um centro predominantemente mais quente sobre a área urbanizada e uma diminuição térmica gradual nas áreas mais periféricas, cujo padrão se assemelha ao modelo clássico de ilha de calor urbano (Lombardo, 1988; Freitas; Dias, 20005). Lola *et al.* (2013), realizou um experimento de campo com medições horárias de temperatura do ar durante outubro de 1995 em vinte distritos diferentes na cidade de Belém, produzindo mapas geoespaciais nos quais os valores mais altos foram observados na área com maior densidade vertical de construções. Esses autores encontraram a configuração circular mais intensa da ilha de calor no período entre 13h e 15h, com valores superiores a 32 °C no centro da cidade. Silva Jr, *et al.* (2014), expandiu essas campanhas de coleta de dados e combinou-as com uma série histórica para calcular o índice de calor, com resultados que indicam uma ampla área de desconforto térmico centrada na metrópole de Belém. Por outro lado, Souza e Alvalá (2014), relataram evidências observacionais da ilha de calor na região de Manaus, no coração da Amazônia central, indicando que o ambiente urbano cria um aumento local na temperatura do ar e uma diminuição na

umidade relativa principalmente à tarde (entre 15h e 17h, hora local). Da mesma forma, o fenômeno da ilha de calor na cidade de Manaus foi detectado a partir da análise de estações meteorológicas e padrões de temperatura da superfície a partir do sensor MODIS do satélite ambiental Aqua, considerando a média de setembro de 2009 a 2012, com indicações de um aquecimento forte atingindo 40°C no centro urbano (Corrêa *et al.*, 2016).

7 CONCLUSÃO

O processo sistemático e desordenado de urbanização é considerado a forma mais radical de transformação da paisagem natural, resultando em um ambiente eminentemente antropizado. Neste trabalho, relatamos uma contribuição para os estudos da dinâmica da paisagem induzida pela pressão humana diretamente relacionada ao processo de urbanização, cuja abordagem é baseada no conceito de hemerobia aplicado a áreas metropolitanas na Amazônia oriental brasileira. Nossa primeira conclusão é que essa técnica de sensoriamento remoto foi bem-sucedida em representar as mudanças no uso da terra no município de Belém, com evidências observacionais robustas e consistentes com estudos anteriores, indicando que a cobertura urbana artificial (graus polihemeróbicos e metahemeróbicos que indicam um sistema urbano com intensidade média a alta) aumentou em quase 17% nos últimos três décadas e meia, enquanto a supressão da vegetação da cobertura florestal primária (grau ahemeróbico) foi de cerca de 11% (comparação entre os padrões de 1985 e 2021). Assim, de 100% do domínio geográfico municipal atual, a área com cobertura natural de florestas conservadas é aproximadamente de 52% (restrita em uma área de proteção ambiental localizada no sudeste continental, sobre as pequenas ilhas ao sul e no interior da maior ilha no setor norte), enquanto a cobertura urbana artificial ocupa uma área de cerca de 35%, com uma clara indicação de expansão intensa e desordenada em direção à porção central e norte do continente e ao longo da zona costeira da ilha de Mosqueiro.

Com base em análises estatísticas (comparações entre amostras de 18 anos, 1985/2002 e 2004/2021) integrando os padrões climatológicos e tendências sazonais de dados meteorológicos de alta resolução espacial do CRU com mapas de hemerobia naturais e artificiais sobre a área de estudo, temos nossa segunda conclusão: a expansão urbana teve um impacto direto no clima atualmente significativamente mais quente, com uma indicação notável de temperaturas do ar superficiais mais altas nas áreas mais densamente urbanizadas, em comparação com valores em outras áreas de Belém. O aumento em TN e TX foi mais expressivo na estação seca (julho a novembro), quando grandes sistemas meteorológicos externos estão ausentes, proporcionando a predominância de efeitos fisiográficos locais e regionais, ou seja, o efeito da cidade é mais relevante nesta época do ano. Especificamente para a variável TX, evidenciamos um padrão climatológico similar ao

modelo clássico de ilha de calor urbana, com isotermas concêntricas que atingem um máximo central sobre a região continental mais urbanizada de Belém e uma diminuição térmica nas bordas da região. Como esse padrão não foi verificado na variável TN, o fenômeno da ilha de calor urbana em Belém se manifesta à tarde (momento em que o TX é medido na estação), com maior intensidade durante a estação seca, quando o máximo central atinge 31,6 °C e a periferia 31,1 °C, com uma variação espacial de cerca de 0,5 °C, que é relevante para regiões tropicais úmidas da Amazônia. Esta descoberta interessante requer estudos adicionais, especialmente usando ferramentas de modelagem regional, uma vez que há falta de dados meteorológicos medidos *in loco*.

Portanto, os resultados deste trabalho são convincentes de que Belém já enfrenta os impactos da urbanização no clima local e, diante dos cenários futuros de mudanças climáticas que projetam o agravamento do aquecimento atmosférico em cidades, é crucial desenvolver estratégias governamentais voltadas para ações de mitigação e minimização dos riscos socioambientais e ameaças ao bem-estar e à saúde da população urbana.

REFERÊNCIAS

- ADLER, Frederick R.; TANNER, Colby J. **Ecossistemas urbanos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. DOI: <https://doi.org/10.15406/ijh.2022.06.00313>
- ARAÚJO, Mayara Lucyanne Santos de *et al.* Caracterização espaço-temporal dos componentes do balanço de radiação e calor na região de transição Amazônia-Cerrado. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 24, 2019. DOI: <https://doi.org/10.5380/abclima.v24i0.51586>.
- ARAÚJO JÚNIOR, Antônio Carlos Ribeiro; AZEVEDO, Adriane Karina Amin de. Formação da cidade de Belém (PA): área central e seu papel histórico e geográfico. **Espaço Aberto**, v. 2, n. 2, p. 151-168, 2012. DOI: <https://doi.org/10.36403/espacoaberto.2012.2094>
- ARNFIELD, A. John. Two decades of urban climate research: a review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. **International Journal of Climatology: a Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 23, n. 1, p. 1-26, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.859>.
- AYOADE, Johnson Olaniyi. **Introdução à climatologia para os trópicos**. [S.l.]: Difel, 1986.
- BALDOCCHI, Dennis; MEYERS, Tilden. On using eco-physiological, micrometeorological and biogeochemical theory to evaluate carbon dioxide, water vapor and trace gas fluxes over vegetation: a perspective. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 90, n. 1-2, p. 1-25, 1998.
- BARBOSA, Valter Luís; NASCIMENTO JÚNIOR, Antônio Fernandes. Paisagem, ecologia urbana e planejamento ambiental. **Geografia**, Londrina, v. 18, n. 2, p. 21-36, 2009.
- BECKER, B. **Amazônia**. São Paulo: Ática, 1990.
- BELÉM, A. AG **Urbanização e Remoção—Por que e para quem**. Belém: CFCH, NAEA, UFPA, 1989. (Col. Igarapé).
- BELÉM, Anderson Luiz Godinho; NUCCI, João Carlos. Hemerobia das paisagens: conceito, classificação e aplicação no bairro Pici-Fortaleza/CE. **Raega-O Espaço Geográfico em Análise**, v. 21, 2011. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/raega.v21i0.21247>
- BORGES, D.R.; SILVA, J.M.P. A influência da doação e ocupação de terra urbana em Belém nos atuais conflitos de dominialidades sobre os terrenos de marinha. *In*: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOGRAFIA URBANA, 12., 2011, Belo Horizonte - MG. **Anais[...]**. Belo Horizonte - MG: Editora Belo Horizonte, 2011.
- CHANDLER, T. J. **Urban climatology and its relevance to urban design**. Geneva – Switzerland: World Meteorological Organization, 1976

CILLIERS, Sarel S.; SIEBERT, Stefan J. Urban ecology in Cape Town: South African comparisons and reflections. **Ecology and Society**, v. 17, n. 3, 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.5751/ES-05146-170333>

CORRÊA, Polari Batista *et al.* 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, p. 167-176, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/0102-778631220150012>

CRUZ, Ernesto. **História de Belém**. Belém: Editora UFPA, 1973. (Coleção Amazônica, Sérgio José Veríssimo).

DIAS, Caio Smolarek; DIAS, Solange Irene Smolarek. Belém do Pará: história, urbanismo e identidade. **Planejamento Urbano e Regional: ensaios acadêmicos do CAUFAG**. Cascavel: Smolarek Arquitetura, 2007.

ESPÍNDOLA, Isabela Battistello; RIBEIRO, Wagner Costa. Cidades e mudanças climáticas: desafios para os planos diretores municipais brasileiros. **Cadernos Metrôpole**, v. 22, p. 365-396, 2020.

FEARNSIDE, Philip Martin; LAURANCE, William Frederick. Infraestrutura na Amazônia: As lições dos planos plurianuais. **Caderno CRH**, v. 25, p. 87-98, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-49792012000100007>

FEHRENBACH, Horst *et al.* Hemeroby as an impact category indicator for the integration of land use into life cycle (impact) assessment. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 20, n. 11, p. 1511-1527, 2015. DOI: <https://doi-org.ez3.periodicos.capes.gov.br/10.1007/s11367-015-0955-y>

FICK, Stephen E.; HIJMANS, Robert J. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 12, p. 4302-4315, 2017.

FILHOT, Henrique Bergamin *et al.* **Espectrofotometria no ultravioleta e visível**. [S.l.: s.n.], 2010.

FIORIN, Daniel V. *et al.* Aplicações de redes neurais e previsões de disponibilidade de recursos energéticos solares. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 33, p. 01-20, 2011.

FREITAS, E.D. de; DIAS, Pedro Leite da Silva. Alguns efeitos de áreas urbanas na geração de uma ilha de calor. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 20, n. 3, p. 355-366, 2005.

FRY, G.; TRESS, B.; TRESS, G. **Integrative landscape research: facts and challenges. Key topics in landscape ecology**. Cambridge University Press, Cambridge, p. 246-268, 2007.

GIELOW, Ralf *et al.* Albedo no Pantanal Sul-Matogrossense durante e após o período de inundação de 1998. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA/II REUNIÃO LATINO AMERICANA DE AGROMETEOROLOGIA*, 11., 1999, Florianópolis. **Anais[...]**. Florianópolis: [s.n.], 1999. p. 2026-2031.

GLAESER, Edward L. A World of Cities: The Causes and Consequences of Urbanization in Poorer Countries. **Journal of the European Economic Association**, v. 12, n. 5, p. 1154-1199, 2014. DOI: <https://doi.org/10.3386/w19745>.

GUTIÉRREZ B, Néstor *et al.* The recovery of the lower montane cloud forest in the Mucujún watershed, Mérida, Venezuela. **Regional Environmental Change**, v. 13, p. 1069-1085, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0413-y>

GUTIERREZ, Carlos BB; SOUZA, Everaldo B. de; GUTIERREZ, Dione MG. Global/Regional Impacts on Present and Near-Future Climate Regimes in the Metropolitan Region of Belém, Eastern Amazon. **Atmosphere**, v. 13, n. 7, p. 1077, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/atmos13071077>

HABER, Wolfgang. System ecological concepts for environmental planning. **Ecosystem Classification for Environmental Management**, p. 49-67, 1994. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-017-1384-9_3

HARRIS, Ian *et al.* Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. **Scientific Data**, v. 7, n. 1, p. 109, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0453-3>

HARTMANN, Dennis L. **Global physical climatology**. [S.l.]: Newnes, 2015.

HILL, M. O.; ROY, D. B.; THOMPSON, K. Hemeroby, urbanity and ruderality: bioindicators of disturbance and human impact. **Journal of Applied Ecology**, v. 39, p. 708-720, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1046/j.1365-2664.2002.00746.x>

HOBBS, J. E. **Applied climatology**: a study of atmospheric resources. [S.l.: s.n.], 1980.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo Brasileiro de 2010**. Rio de Janeiro: IBGE, 2012.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Panorama das cidades brasileiras**. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. DOI: <https://cidades.ibge.gov.br>.

JALAS, J. Hemerobe und hemerochore pflanzenarten: ein terminologischer reformversuch. **Acta Societatis pro Fauna et Flora Fennica, Tilgmann**, v. 72, p. 1–15, 1955.

JATOBÁ, Sérgio Ulisses Silva. **Urbanização, meio ambiente e vulnerabilidade social**. [S.l.: s.n.], 2011

KAMPEL, Silvana Amaral; CÂMARA, Gilberto; MONTEIRO, Antônio Miguel Vieira. **Análise espacial do processo de urbanização da Amazônia**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2001.

KENNEDY, Christopher; PINCETL, Stephanie; BUNJE, Paul. The study of urban metabolism and its applications to urban planning and design. **Environmental Pollution**, v. 159, n. 8-9, p. 1965-1973, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2010.10.022>

LIBERTI, Eduardo.; LEITE, Henrique Reisdorfer; SILVA, Maria Consuelo da; NUCCI, João Carlos. As Paisagens Do Município De Pinhais (Paraná/Brasil): Uma Abordagem Segundo O Conceito De Hemerobia. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 20, n. 72, p. 189–201, 2019. DOI: <http://doi.org/10.14393/RCG207242838>

LLOPART, Marta *et al.* Land use change over the Amazon Forest and its impact on the local climate. **Water**, v. 10, n. 2, p. 149, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/w10020149>

LOLA, Antonio Carlos *et al.* Distribuição geoespacial e horária da temperatura do ar na cidade de belém–pa: Estudo de caso em 1995. **Brazilian Geographical Journal: Geosciences and Humanities Research Medium**, v. 4, n. 1, p. 3, 2013. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/braziliangeojournal/article/view/22691>

LOMBA, Roni Mayer; NOBRE-JÚNIOR, Benedito Baliero. A relação rural-urbano a partir das cidades ribeirinhas: O papel do comércio popular (feiras) na cidade de Afuá (PA). **Confins. Revue Franco-brésilienne de Géographie/Revista Franco-brasileira de Geografia**, n. 18, 2013. DOI: <https://doi.org/10.4000/confins.8405>

LOMBARDO, Magda Adelaide. A ilha de calor de São Paulo. **Revista Ambiente**, São Paulo, v. 2, n. 1, p. 14–18, 1988. Disponível em: <https://revista.cetesb.sp.gov.br/revista/article/view/49>

MALHI, Y. *et al.* Energy and water dynamics of a central Amazonian rain forest. **Journal of Geophysical Research: atmospheres**, v. 107, n. D20, p. LBA 45-1-LBA 45-17, 2002.

MAPBIOMAS. MapBiomas General ‘Handbook’: **Algorithm Theoretical Basis Document**. 2022, 7.

MARIN, Fábio R.; ASSAD, Eduardo D.; PILAU, F. A. **Clima e ambiente: introdução à climatologia para ciências ambientais**. 2008.

MARZLUFF, John M. *et al.* **An international perspective on the interaction between humans and nature**. New York, NY: Springer Books Ltd, 2008.

MINAKI, Cíntia; AMORIM, Margarete Cristiane da Costa Trindade. Espaços urbanos e qualidade ambiental—um enfoque da paisagem. **Formação (Online)**, v. 1, n. 14, 2007. DOI: <https://doi.org/10.33081/formacao.v1i14.699>

MONTEIRO, Carlos Augusto de Figueiredo. Derivações antropogenéticas dos geossistemas terrestres no Brasil e alterações climáticas: perspectivas urbanas e agrárias ao problema da elaboração de modelos de avaliação. **Ra'ega: o Espaço Geográfico em Análise**, n. 5, p. 197-226, 2001. DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/raega.v5i1.18325>

MOREIRA, E. **Belém e sua expressão geográfica**. Belém: Imprensa Universitária, 1966.

NIÑO, Larry *et al.* Geomorphology, Land-Use, and Hemeroby of Foothills in Colombian Orinoquia: Classification and Correlation at a Regional Scale. **Papers in Applied Geography**, v. 9, n. 3, p. 295-314, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1080/23754931.2023.2189921>

OKE, T. R. **Boundary layer climates**. Routledge: Taylor & Francis e-Library.

OLIVEIRA, José Lucas dos Santos; SANTOS, Joel Silva. Ecologia Urbana: história, atribuições e abordagens metodológicas interdisciplinares. **Acta Brasiliensis**, [S.l.], v. 5, n. 3, p. 116-122, sep. 2021. ISSN 2526-4338. DOI: <https://doi.org/10.22571/2526-4338549>.

OLIVEIRA, Juarez Ventura de *et al.* Urban climate and environmental perception about climate change in Belém, Pará, Brazil. **Urban Climate**, v. 31, p. 100579, 2020.

OLIVEIRA, Valdejane Lopes de; TRINDADE, José Raimundo Barreto. As cidades médias do hinterland amazônico paraense: urbanização e desenvolvimento em período recente. **Cadernos CEPEC**, v. 2, n. 1-6, 2013.

PEREIRA, Antônio Roberto e ANGELOCCI, Luiz Roberto e SENTELHAS, Paulo César. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba: Agropecuária.

PRATES, Rodolfo Coelho; BACHA, Carlos José Caetano. Os processos de desenvolvimento e desmatamento da Amazônia. **Economia e Sociedade**, v. 20, p. 601-636, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0104-06182011000300006>

QGIS Development Team. **QGIS Geographic Information System**. OpenSource Geospatial Foundation Project, 2023. Disponível em: <https://qgis.org/en/site/>

RIBEIRO, Priscila Dos Santos *et al.* Influência do desmatamento na temperatura do ar. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 16, n. 01, p. 165-176, 2023. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/254555>. Acesso em: 13 jan. 2023.

ROMERO, Marta Adriana Bustos *et al.* **Mudanças climáticas e ilhas de calor urbanas**. 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.18830/ISBN.978-85-67405-25-4>

SANTIAGO, D. R. Urbanização acelerada e as questões ambientais no Brasil: uma relação de sucesso ou fracasso? *In: ENCONTRO NACIONAL DE ESTUDOS POPULACIONAIS: POPULAÇÃO, GOVERNANÇA E BEM-ESTAR*, 19., 2014, São Pedro, SP. **Anais [...]**. Belo Horizonte: ABEP., 2014 p.20

SANTOS, Milton. **A urbanização brasileira**. 5. ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2005

SARGES, Maria de Nazaré. **Belém: riquezas produzindo a Belle-Époque**, (1870-1912). 2000.

SILVA, Fabio Leandro da. *et al.* An Approach to Verify Naturalness Loss and Its Relation with Ecosystems Services in Brazilian Cerrado: Implications to Management. **Journal of Geoscience and Environment Protection**. v. 10, p. 55-74, 2022. DOI: <https://doi.org/10.4236/gep.2022.102005>

SILVA, Madson Tavares *et al.* Aplicação da Modelagem Espacial de Variáveis Biofísicas em uma área Urbanizada na Amazônia: O Caso da Região Metropolitana de Belém-Pará. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 36, p. 271-283, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/0102-77863620063>

SILVA, Maurielle Felix da; NUCCI, João Carlos. Hemerobia das paisagens e lei de zoneamento do bairro Capela Velha no município de Araucária-PR. **Ateliê Geográfico**, v. 10, n. 2, p. 82-96, 2016.

SILVA, Wilton P. da *et al.* Influência da temperatura do ar de secagem no calor latente de vaporização de água em feijão macassar (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.), variedade sempre-verde. **Engenharia Agrícola**, v. 28, p. 315-324, 2008.

SILVA JUNIOR, João de Athaydes *et al.* Análise da distribuição espacial do conforto térmico da cidade de Belém, PA no período menos chuvoso. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 5, n. 2, p. 218-232, 2012.

SOUTO, Jefferson Inayan de Oliveira; COHEN, Julia Clarinda Paiva. Variabilidade espaço-temporal das ilhas de calor urbano: Influência da urbanização no padrão sazonal da temperatura da superfície terrestre na Região Metropolitana de Belém, Brasil. **urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v. 13, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/2175-3369.013.e20200260>

SOUZA, Diego Oliveira de; ALVALÁ, Regina Célia dos Santos. Observational evidence of the urban heat island of Manaus City, Brazil. **Meteorological Applications**, v. 21, n. 2, p. 186-193, 2014.

SOUZA, Everaldo Barreiros de *et al.* Padrões climatológicos e tendências da precipitação nos regimes chuvoso e seco da Amazônia oriental. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 21, 2017. DOI: <https://doi.org/10.5380/abclima.v21i0.41232>.

SOUZA JR, Carlos 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, n. 17, p. 2735, 2020.

STEINHARDT, U. *et al.* 16 The Hemeroby Index for landscape monitoring and evaluation. *In*: PYKH, Yuri A.; HYATT, D. Eric; LENZ, Roman J.M. (ed.). **Environmental indices: systems analysis approach**. [S.l.]: EOLSS Publications, 2000. v. I, p. 237.

SUKOPP, Herbert. **Wandel von flora und vegetation in Mitteleuropa unter dem Einfluß des Menschen**. Germany: Germany Bundesmin Ernähr Landwirt Forsten Ber Landwirt, 1972.

TAVARES, Paulo Amador *et al.* Integration of sentinel-1 and sentinel-2 for classification and LULC mapping in the urban area of Belém, eastern Brazilian Amazon. **Sensors**, v. 19, n. 5, p. 1140, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/s19051140>

TIAN, Yu *et al.* Spatio-temporal land-use changes and the response in landscape pattern to hemeroby in a resource-based city. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 9, n. 1, p. 20, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijgi9010020>

TOURINHO, R.; MEIRA FILHO, A.; COUTO, C. A. O. **Monografia das baixadas de Belém: subsídios para um projeto de recuperação**. 2ª ed. rev. Belém: SUDAM, 1976 (Convênio SUDAM/DNOS/GOVERNO DO ESTADO DO PARÁ).

TRINDADE JÚNIOR, S.-C. C. da. Assentamentos urbanos e reestruturação metropolitana: o caso de Belém. **GEOUSP Espaço e Tempo (Online)**, [S. l.], v. 2, n. 2, p. 39-52, 1998. DOI: 10.11606/issn.2179-0892.geousp.1999.123318.

VICENTE-SERRANO, S. M *et al.* Contribution of precipitation and reference evapotranspiration to drought indices under different climates. **Journal of Hydrology**, v. 526, p. 42-54, 2015.

WALZ, Ulrich; STEIN, Christian. Indicators of hemeroby for the monitoring of landscapes in Germany. **Journal for Nature Conservation**, v. 22, n. 3, p. 279-289, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2014.01.007>

WU, Jianguo. Urban ecology and sustainability: The state-of-the-science and future directions. **Landscape and urban planning**, v. 125, p. 209-221, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.landurbplan.2014.01.018>

ZHOU, Yunkai; NING, Lixin; BAI, Xiuling. Spatial and temporal changes of human disturbances and their effects on landscape patterns in the Jiangsu coastal zone, China. **Ecological Indicators**, v. 93, p. 111-122, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.04.076>.

APÊNDICE A

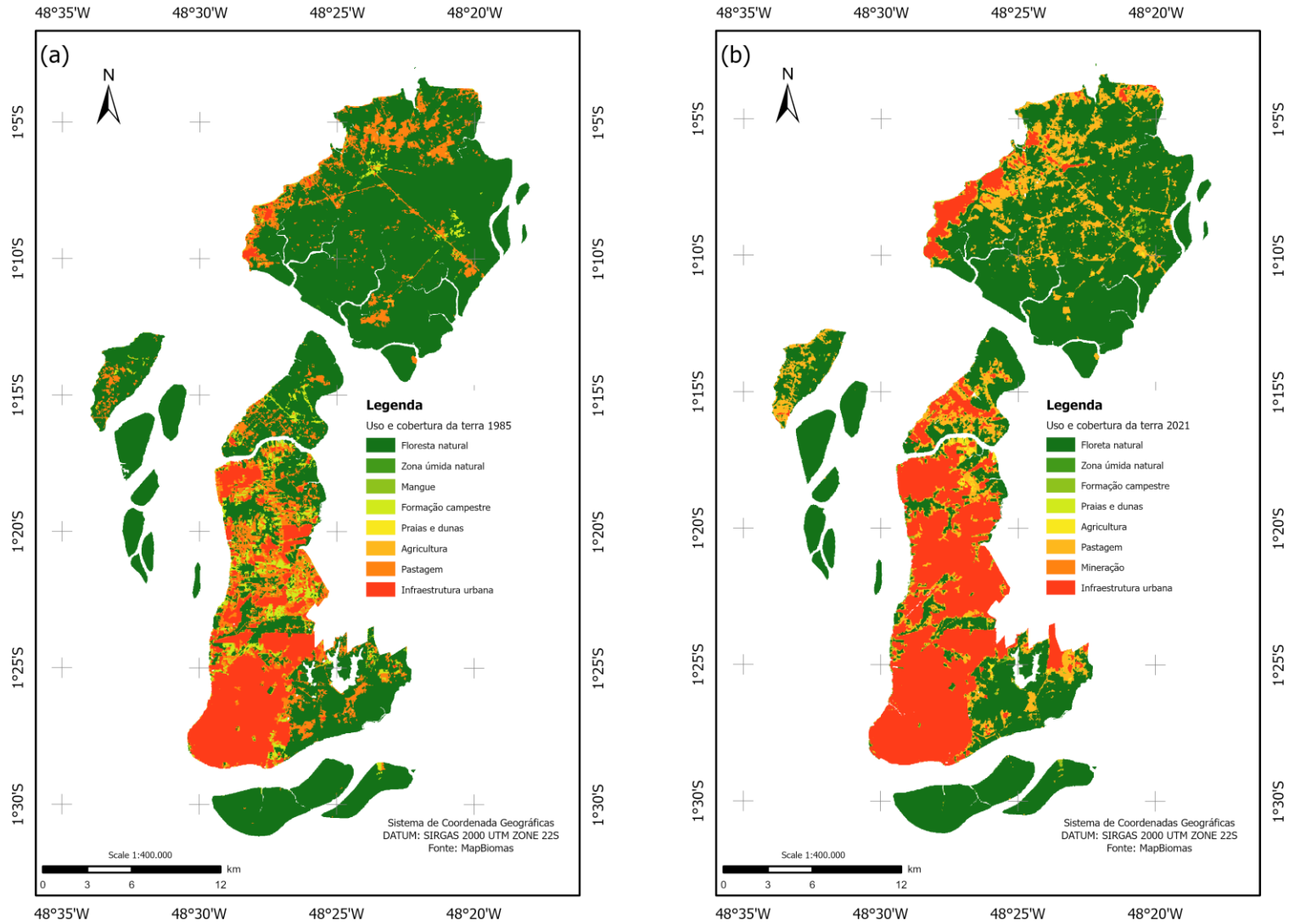
Figura A1 — Histórico da ocupação humana na Amazônia

Periodização	Características	Configuração da rede urbana
1616 a 1655	• Início da conquista do território amazônico. • Interesse em assegurar a defesa do território. • Perspectiva de controle econômico.	• Fundação da cidade de Belém (1616) localização estratégica de caráter político-militar. • Criação dos núcleos Souza do Caeté (Bragança) 1633 e Vila Viçosa de Santa Cruz do Cametá (Cametá) a partir de Belém.
1655 a 1750	• Economia baseada no trabalho indígena e no sistema de aviamento. • Controle e gestão da vida econômica e social pelas ordens religiosas. • Economia voltada para a exportação das “drogas do sertão”.	• Surgimento de núcleos populacionais ao longo do Vale do Amazonas – embrião de rede urbana. • Presença de fortins e aldeias missionárias ao longo dos vales dos rios. • Criação do Forte de São José do Rio Negro (1669)- próximo a embocadura do Rio Negro; • Reafirmação de Belém como centro regional.
1750 a 1778	• Expansão das atividades produtivas. • A Cia. Mercantil do Grão-Pará e Maranhão assume o controle econômico e mercantil. • Doação de terras para colonos e soldados. • Política Pombalina de inserção da economia amazônica no mercado mundial – expulsão dos jesuítas. • Introdução da mão de obra escrava africana e estímulo a agricultura comercial (cacau, café, fumo, anil, etc) e a pecuária. • Retificação do sistema de aviamento – importação de produtos manufaturados e produção exportável.	• Ratificação e esforço da Rede Urbana e da primazia de Belém. • As aldeias missionárias são transformadas em vilas, recebendo outras denominações. • Belém passa a ser a capital do Grão-Pará e Maranhão - fator locacional. • Criação de novos fortes. • Cria-se a Capitania de São José do Rio Negro, com capital em Barcelos.
1778 a 1850	• Estagnação econômica regional. • Queda da demanda de produtos regionais no mercado europeu – declínio econômico regional; • Extinção da Cia. Do Grão-Pará e Maranhão; • Arrefecimento da expansão agrária.	• Estagnação na vida urbana. • Transferência da capital de São José do Rio Negro (1808) de Barcelos para Lugar da Barra (Manaus). • Concentração dos recursos e das riquezas em Belém; • Existência de vários núcleos pequenos. • Ausência de cidades de tamanho intermediário. • Cristalização de uma rede urbana dendrítica.

1850 a 1920	• Período do <i>boom</i> econômico da borracha. • Superação do problema do sistema de transportes e da escassez da mão de obra. • Oferta de capitais para o financiamento da produção. • Reforço ao sistema de “aviamento”, viabilizando a produção, circulação, consumo e estrutura de poder.	• Revigoração econômica e demográfica das cidades já existentes. • Intensificação das relações entre os núcleos de povoamento. • Surgimento de novos centros urbanos na Amazônia Ocidental em sua maioria sedes de seringais. • Prosperidade de cidades como Belém, Manaus e Santarém.
1920 a 1960	• Nova estagnação econômica, fruto da queda da demanda da borracha. • Diminuição do fluxo migratório para a Amazônia; • Existência de um certo refluxo para as áreas de origem das populações aí instaladas. • Impacto na rede urbana por meio da perda de mercado (fator população).	• Estagnação urbana. • Prosperidade urbana é restrita às cidades do médio Amazonas em virtude da produção da Juta (Santarém). • Criação de territórios do Amapá, do Rio Branco (atual Roraima) e Guaporé (atual estado de Rondônia). • A estagnação econômica e regional, por inércia, iria ratificar a posição de Belém e Manaus na rede urbana regional – focos parciais de êxodo proveniente dos seringais.
A partir de 1960	• Rodovias com novos eixos de circulação. • Ação intensiva de empresas capitalistas na exploração dos recursos. • Presença marcante do Estado – PIN. • Criação de órgãos de planejamentos e financiamentos. • Projetos de colonização agropecuários e minerais. • Estrutura fundiária marcada pela grande propriedade rural.	• Reorganização da Rede Urbana – Rede Complexa. • Maior incentivo da urbanização regional. • Surgimento e crescimento de núcleos urbanos e povoados ao longo das rodovias. • Instalação de núcleos de apoio à colonização; • Construção de <i>Company Towns</i>. • Revigoração de centros antigos articulados a uma nova dinâmica local (Ex: Marabá). • Estagnação de cidades em áreas pouco dinâmicas. • Criação da Zona Franca e ascensão de Manaus a condição de Metrópole da Amazônia Ocidental. • Urbanização concentrada nas capitais estaduais. • Conformação metropolitana de Belém e incremento das atividades industriais, com o auxílio dos incentivos fiscais.

Fonte: Júnior e Azevedo (2020 p. 155 *apud* Corrêa 2006).

Figure A1 — Mapas de *LULC* baseados no MapBiomas sobre a porção continental de Belém para os anos (a) 1985 e (b) 2021. As classes são indicadas na legenda



Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela A2 — Estatísticas descritivas de TN e TX para as estações ÚMIDA e SECA considerando o conjunto de pontos da grade CRU sobre áreas naturais e artificiais (pontos indicados no mapa à direita na Figura 8) nos períodos 1985/2002 e 2004/2021. A unidade é °C.

				Mínimo	Máximo	1º Quartil	Mediana	3º Quartil	Média	Variância	Desvio padrão
TN	CHUVOSO	natural	1985 to 2002	22.0	23.8	22.3	22.8	23.0	22.6	0.19	0.44
		artificial	2004 to 2021	22.3	23.8	22.8	23.0	23.3	23.0	0.10	0.32
		natural	1985 to 2002	21.8	24.0	22.3	22.5	23.0	22.6	0.20	0.45
		artificial	2004 to 2021	22.3	24.3	22.8	23.0	23.3	23.0	0.12	0.34
	SECO	natural	1985 to 2002	22.8	24.4	23.2	23.6	23.8	23.5	0.17	0.42
		artificial	2004 to 2021	23.0	24.6	24.0	24.0	24.2	24.1	0.07	0.26
		natural	1985 to 2002	22.8	24.6	23.0	23.4	23.8	23.5	0.18	0.42
		artificial	2004 to 2021	23.2	26.0	24.0	24.0	24.2	24.1	0.12	0.35
TX	CHUVOSO	natural	1985 to 2002	29.0	31.0	29.5	29.8	30.3	29.8	0.17	0.41
		artificial	2004 to 2021	29.8	31.3	30.3	30.3	30.8	30.4	0.15	0.39
		natural	1985 to 2002	29.0	31.3	29.8	30.0	30.3	30.1	0.17	0.41
		artificial	2004 to 2021	29.8	33.0	30.3	30.5	31.0	30.7	0.27	0.52
	SECO	natural	1985 to 2002	30.0	31.6	30.6	30.6	31.0	30.8	0.15	0.38
		artificial	2004 to 2021	31.0	32.4	31.4	31.6	31.8	31.6	0.11	0.33
		natural	1985 to 2002	30.4	32.0	30.6	30.8	31.2	30.9	0.16	0.41
		artificial	2004 to 2021	31.2	33.0	31.6	31.8	32.2	31.9	0.16	0.40

Fonte: elaborado pelo autor.