



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

CARLOS BENEDITO BARREIROS GUTIERREZ

**DINÂMICA DA URBANIZAÇÃO NA REGIÃO METROPOLITANA
DE BELÉM E MUDANÇAS NOS REGIMES SAZONAIS DURANTE
O CLIMA ATUAL E FUTURO NUM CENÁRIO AMAZÔNICO**

BELÉM – PA
2022

CARLOS BENEDITO BARREIROS GUTIERREZ

**DINÂMICA DA URBANIZAÇÃO NA REGIÃO METROPOLITANA
DE BELÉM E MUDANÇAS NOS REGIMES SAZONAIS DURANTE
O CLIMA ATUAL E FUTURO NUM CENÁRIO AMAZÔNICO**

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

Área de Concentração: Clima e Dinâmica Socioambiental na Amazônia.

Linha de Pesquisa: Interação Clima, Sociedade e Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. Everaldo Barreiros de Souza

BELÉM – PA
2022

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

- G983d Gutierrez, Carlos Benedito Barreiros.
Dinâmica da Urbanização na Região Metropolitana de Belém e Mudanças nos Regimes Sazonais Durante o Clima Atual e Futuro num Cenário Amazônico / Carlos Benedito Barreiros Gutierrez. — 2022.
131 f. : il. color.
- Orientador(a): Prof. Dr. Everaldo Barreiros de Souza
Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Belém, 2022.
1. Clima Urbano. 2. Uso e Cobertura da Terra. 3. Mudanças climáticas. 4. RegCM4. 5. Sazonalidade. I. Título.

CDD 551.609811

CARLOS BENEDITO BARREIROS GUTIERREZ

**DINÂMICA DA URBANIZAÇÃO NA REGIÃO METROPOLITANA
DE BELÉM E MUDANÇAS NOS REGIMES SAZONAIS DURANTE
O CLIMA ATUAL E FUTURO NUM CENÁRIO AMAZÔNICO**

Tese 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.

Área de Concentração: Clima e Dinâmica Socioambiental na Amazônia.

Linha de Pesquisa: Interação Clima, Sociedade e Ambiente.

Data de aprovação: 29/04/2022.

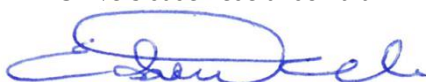
Banca Examinadora:



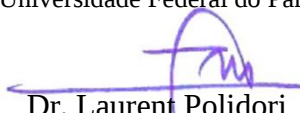
Prof. Everaldo Barreiros de Souza - Orientador
Doutor em Meteorologia
Universidade Federal do Pará



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



Prof. Edson José Paulino da Rocha
Doutor em Meteorologia
Universidade Federal do Pará



Dr. Laurent Polidori
Doutor em Ciências Geodésicas
Centro de Estudos Espaciais da Biosfera (França) e Universidade Federal do Pará



Prof. João de Athaydes Silva Jr.
Doutor em Desenvolvimento Sustentável do Trópico Úmido
Universidade Federal do Pará

À minha esposa Dione pela paciência e compreensão quando precisei dedicar-me aos estudos e pesquisas.

Aos meus filhos Erickson e Lucas, pelo incentivo e apoio.

Aos meus pais Alberto e Suzana, que nunca mediram esforços para proporcionar minha educação.

AGRADECIMENTOS

À Deus por não nos dar, com facilidade, tudo que lhe pedimos.

Aos professores, colaboradores e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais da UFPA, pela dedicação no aprimoramento do curso.

À Universidade do Estado do Pará (UEPA) pela concessão da bolsa de doutorado.

Ao meu orientador Prof. Dr. Everaldo Barreiros de Souza, pelo apoio, atenção, dedicação, paciência e, principalmente pela empatia, característica ímpar, que o fez entender meus momentos de fraqueza. Serei eternamente agradecido.

“É sintomático que a urbanização brasileira não haja merecido muitos estudos de conjunto, seja pela abrangência interdisciplinar ou mesmo por uma visão do território tomado como um todo.”

(Milton Santos)

RESUMO

O intenso e sistemático processo de adensamento populacional urbano e a supressão vegetal, característico das transformações antrópicas, podem desencadear diversas mudanças não só na paisagem geográfica, mas também no clima regional, propiciando consequentemente impactos nas dimensões sociais e ambientais. Este estudo tem como objetivo principal quantificar a dinâmica espaço/temporal das mudanças na cobertura superficial da Região Metropolitana de Belém (RMB), com foco na urbanização, durante as últimas quatro décadas, incluindo análises dos efeitos/impactos nos regimes sazonais do período chuvoso (janeiro a abril) e seco (julho a novembro). Além disso, foi realizado um estudo de Downscaling usando modelo regional RegCM4 para gerar projeções de clima futuro (próximas duas décadas) para a RMB associadas aos impactos das mudanças climáticas globais. Para atingir os objetivos propostos, o estudo fez uso de dados demográficos do IBGE, mapeamento por sensoriamento remoto com aplicação de índices físicos para realçar o uso e cobertura do solo, dados ambientais extraídos da plataforma MapBiomas e diversas bases de dados climáticos provenientes de estação in situ do INMET e estimativas de satélites (CRU, CHIRPS e CMORPH). Diversos métodos estatísticos e análises quantitativas foram empregados nestas bases de dados. Os resultados obtidos no estudo independente de mapeamento multitemporal por sensoriamento remoto, corroborado pelos dados do MapBiomas, revelaram grandes transformações ocorridas na paisagem regional da RMB ao longo das últimas décadas. Dentre as principais evidências encontradas podemos reportar: a expansão urbana condicionou um clima mais quente na cidade de Belém; na RMB, a supressão vegetal levou à expansão das áreas de pastagem/agricultura, cujas mudanças ambientais explicaram a tendência de aumento monotônico da temperatura do ar em ambos os regimes sazonais; Belém e RMB apresentam tendências de intensificação sistemática do regime chuvoso. As projeções geradas pelo RegCM4 (considerando o cenário RCP8.5 considerado mais extremo de aquecimento global) indicam que os padrões regionais de clima futuro em Belém e RMB serão afetados pelas mudanças climáticas globais. As simulações climáticas futuras (próximos 25 anos, 2021 a 2045) em relação aos dados do clima atual (últimos 35 anos, 1986 a 2020) apontam que as condições climáticas urbanas mais quentes devem persistir nas próximas décadas, com um aumento da temperatura do ar de 1,5°C na RMB e 1,3°C em Belém para o regime seco e 1°C na RMB e 0,9°C em Belém para o regime chuvoso. Há indícios de continuação da tendência positiva do regime chuvoso com aumento da precipitação de cerca de 25% na RMB e 14% em Belém. Por fim, depreende-se que a disponibilidade e facilidade no acesso às imagens de satélites, conjuntos de bases observacionais climáticas e séries temporais de dados meteorológicos, associados às técnicas de geoprocessamento de imagens, avanço na ciência de modelagem e de tecnologias computacionais para efetuar downscaling com o RegCM4, tornam possível o monitoramento contínuo e a investigação integrada do espaço geográfico urbano e padrões sazonais de clima regional, cujos resultados científicos são relevantes para subsidiar o planejamento e tomada de decisão da gestão ambiental municipal e elaboração de políticas públicas em benefício da sociedade.

Palavras-chave: clima urbano; uso e cobertura da terra; Amazônia; RegCM4; mudanças climáticas; sazonalidade

ABSTRACT

The intense and systematic process of urban population densification and vegetation suppression, a characteristic of anthropic transformations, can trigger several changes not only in the geographic space, but also in the regional climate, thus yielding impacts on social and environmental dimensions. The main objective of this study is to quantify the spatial/temporal dynamics of changes in the surface cover of the Metropolitan Region of Belém (RMB), in eastern Amazon, with a focus on urbanization, during the last four decades, including analysis of the effects/impacts on the seasonal regimes of the rainy (January to April) and dry (July to November) regimes. In addition, a Downscaling study was performed using the regional model RegCM4 to generate future climate projections (next two decades) for the RMB associated with the impacts of global climate change. To achieve the proposed objectives, the study made use of demographic data from the IBGE, mapping by remote sensing with the application of physical indices to identify land use and cover changes, environmental data extracted from the MapBiomass platform and several in situ (station) and satellite (CRU, CHIRPS and CMORPH) climate databases. Statistical methods and quantitative analyzes were used in these databases. The results obtained in the independent study of multitemporal mapping by remote sensing, corroborated by the MapBiomass data, revealed major transformations over the regional landscape of the RMB in the last decades. Among the main evidences found, we can report: urban expansion conditioned a warmer climate in the city of Belém; in the RMB, the vegetation suppression led to the expansion of pasture/agriculture areas, whose environmental changes explained the trend of monotonic increase in air temperature in both seasonal regimes; Belém and RMB present trends of systematic intensification of the rainy regime. The projections generated by RegCM4 (considering the RCP8.5 scenario that is the most extreme of global warming) indicate that regional patterns of future climate in Belém and RMB will be affected by global climate change. Future climate simulations (next 25 years, 2021 to 2045) in relation to current climate data (last 35 years, 1986 to 2020) indicate that warmer urban climate conditions are expected to persist in the coming decades, with an increase in air temperature of 1.5°C in the RMB and 1.3°C in Belém for the dry regime and 1°C in the RMB and 0.9°C in Belém for the rainy regime. There are indications of continuation of the positive trend of the rainy regime with an increase in precipitation of about 25% in the RMB and 14% in Belém. Finally, it appears that the availability of satellite images, observational climate data bases and time series of meteorological data, associated with image geoprocessing techniques, advances in modeling science and computational technologies to perform downscaling with RegCM4, make possible the continuous monitoring and integrated investigation of the urban geographic space and seasonal climate pattern, whose scientific results are relevant to support the planning and decision-making of municipal environmental management and the elaboration of public policies for the benefit of society .

Keywords: urban climate; land use and cover; Amazon; RegCM4; climate change; seasonality.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

CAPÍTULO 2

Figura 1: Área de Estudo.....	23
Figura 2: População Urbana e Rural da RMB (1980 A 2020).	30
Figura 3: Taxa de Urbanização Brasil, Região Norte e RMB (1980 A 2020).....	31
Figura 4: Classes de Uso e Cobertura.	32
Figura 5: Mapas de Distribuição Espacial de Cobertura do Solo, NDVI, NDBI e NDWI-1984.	34
Figura 6: Mapas de Distribuição Espacial de Cobertura do Solo, NDVI, NDBI e NDWI -1989.	35
Figura 7: Mapas de Distribuição Espacial de Cobertura do Solo, NDVI, NDBI e NDWI -1995.	35
Figura 8: Mapas de Distribuição Espacial de Cobertura do Solo, NDVI, NDBI e NDWI -1999.	36
Figura 9: Mapas de Distribuição Espacial de Cobertura do Solo, NDVI, NDBI e NDWI -2008.	36
Figura 10: Mapas de Distribuição Espacial de Cobertura do Solo, NDVI, NDBI e NDWI -2020.	37
Figura 11: Dinâmica da Classes na RMB de 1984 a 2020 em Km2.	38
Figura 12: Proporções Percentuais das Classes na RMB de 1984 a 2020.....	39
Figura 13: Uso e Cobertura da RMB do Ano de 1984.	41
Figura 14: Uso e Cobertura da RMB do Ano de 1989.	41
Figura 15: Uso e Cobertura da RMB do Ano de 1995.	42
Figura 16: Uso e Cobertura da RMB do Ano de 1999.	42
Figura 17: Uso e Cobertura da RMB do Ano de 2008.	43
Figura 18: Uso e Cobertura da RMB do Ano de 2020.	43

CAPÍTULO 3

Figura 1. Área de Estudo.....	53
Figura 2. Dinâmica Multitemporal do Uso e Cobertura na RMB.	58
Figura 3. Teste de Dupla Massa	59
Figura 4. Matrizes de Correlação de Spearman.....	61
Figura 5. Média Histórica Sazonal da Precipitação (1974-2018).....	62
Figura 6. Proporção Mensal da Média Histórica Sazonal da Precipitação (1974-2018).	63
Figura 7. Média Histórica Sazonal da Temperatura Máxima (1974-2018).	64
Figura 8. Média Histórica Sazonal da Temperatura Mínima (1974-2018).....	65
Figura 9. Regime Chuvoso: Dinâmica Multitemporal das Classes de Uso e Cobertura (Vegetação, Urbano, Antropizado) da RMB com os Dados Climáticos de Prec, Tmax e Tmin do Inmet e WC na Sequência dos Anos 1984, 1989, 1995, 1999, 2008 e 2018.....	66
Figura 10. Diferença Entre as Medidas das Variáveis Climáticas do Regime Chuvoso [2009/2018 - 1974/1984].....	67
Figura 11. Regime Seco: Dinâmica Multitemporal das Classes de Uso e Cobertura (Vegetação, Urbano, Antropizado) da RMB com os dados Climáticos de Prec, Tmax e Tmin do Inmet e WC na Sequência dos Anos 1984, 1989, 1995, 1999, 2008 e 2018.....	67
Figura 12. Diferença Entre as Medidas das Variáveis Climáticas do Regime Seco.....	68
Figura 13. Precipitação Média do Regime Chuvoso Observada de 1974 a 2018.....	69
Figura 14. Precipitação Média do Regime Seco Observada de 1974 a 2018.	70
Figura 15. Temperatura Máxima Média do Regime Chuvoso Observada de 1974 a 2018.	71
Figura 16. Temperatura Máxima Média do Regime Seco Observada de 1974 a 2018	72
Figura 17. Temperatura Mínima Média do Regime Chuvoso Observada de 1974 a 2018.....	72
Figura 18. Temperatura Mínima Média do Regime Seco Observada de 1974 a 2018	74
Figura 19. Compilação Da Variabilidade Climática Dos Regimes Sazonais na RMB.....	76
Figura 20. Aumento de Precipitação na RMB (1974 A 2018).	77
Figura 21. Aumento de Temperatura na RMB (1974 A 2018).....	79

CAPÍTULO 3

Figure 1. Study Area In The Mrb With The 2020 Landcover Map, Locations Of The Seven Municipalities And Meteorological Station, And The Main Highway Crossing The Region	87
Figure 2. (A) Hadgem2-Es Global Model (Topography); (B) Regcm4 Domain Over Mrb With The Landcover Updated To Represent The Metropolitan Region Of The Study Area	91

Figura 3. (A) Boxplot Of Prec (Mm/Day) And Temp (°C, Only The Climatological Mean) For Belém Station (Period 1985–2020); (B) Monthly Percentages (Relative To The Annual Total) Of Prec, Emphasizing The Seasonal Regimes	92
Figura 4. Cru, Chirps, And Cmorph Observed Prec (Mm/Day) For (A) Rainy; (B) Dry Regime. Figure 43cru, Chirps, And Cmorph Observed Prec (Mm/Day) For (A) Rainy; (B) Dry Regime.	93
Figura 5. RegCM4 Simulated Prec (Mm/Day) Using Ema, Tie, And Kfr Schemes For (A) Rainy; (B) Dry Regime.....	94
Figura 6. Cru Observed And Regcm4 Simulated Temp (°C) Using Ema, Tie, And Kfr Schemes For (A) Rainy; (B) Dry Regime.	95
Figura 7. Taylor Diagram Of Observed (Cru, Chirps, And Cmorph, Circles In Red) And Simulated (Ema, Tie, And Kfr, Circles In Magenta) Prec For The (A) Rainy And (B) Dry Regimes.	96
Figura 8. (A) Landcover Maps Over Mrb; (B) Percentages By Classes; (C) Forest; (D) Pasture/Agriculture; And (E) Urbanization. Results For (A,B) Are Shown In The Years 1985, 1995, 2005, 2015, And 2020. The Annual Series For (C–E) Are In Area (Ha) From 198	97
Figura 9. The 1985 To 2020 Percentage Changes For Belém (Green) And Mrb (Brown) In The (A) Landcover Classes; (B) Population Growth.....	99
Figura 10. Scatterplots Of (A) Pag And Urb With Temp For Mrb; (B) Urb With Temp For Belém. Time Se-Ries In The Period 1985–2020	100
Figura 11. Change Patterns Of Future (2021/2045) Relative To Present (1985/2020) For Temp (Left Panel) And Prec (Right Panel) In The Rainy And Dry Regimes. The Color Bar Indicates Temp In °C And Prec In %.....	102
Figura 12. Boxplots Of Present (1985/2020) And Future (2021/2045) Climate Considering The Rainy And Dry Regime For (A) Prec; (B) Temp. Changes In The Future Relative To The Present For (C) Prec (%); (D) Temp (°C).....	103

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2

Tabela 1. Dados Popacionais Da Rmb	29
Tabela 2. Áreas Das Classes (Km ²) De Uso E Cobertura Para O Período De 1984 A 2020.	37

CAPÍTULO 3

Tabela 1. Sensoriamento Remoto (Áreas Em Km ²) E População De 1984 A 2018	57
Tabela 2. Médias Decadais Das Variáveis Climáticas De 1974 A 2018.	61

CAPÍTULO 4

Tabela 1. Pearson's Correlations Between The Landcover Class Areas And The Temp And Prec In The Rainy And Dry Regimes. Time Series In The Period 1985–2020. Table 5 Pearson's Correlations Between The Landcover Class Areas And The Temp And Prec In The Rainy And Dry Regimes. Time Series In The Period 1985–2020	99
Tabela 2. Mann–Kendall Test With The Values Of T, P-Value, And Sen's Slope For The Series (1985–2020) Of Temp And Prec In Belém And Mrb In The Rainy And Dry Regimes.....	100

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas e Técnicas
BATS	Transferência da Biosfera-Atmosfera
BSI	Bare Soil Index
CA	Corpos d'água
ENVI	Environment for Visualizing Images
EMA	Esquema de Emanuel
FLO	Floresta
GNU	General Public License
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICTP	Centro Internacional de Física Teórica
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
ISC	Interstício Sazonal Climático
IVm	Infra Vermeho Médio
IVp	Infra Vermeho Próximo
KRF	Esquema de Kain-Fritsch
LST	Land Surface Temperature
ND	Números Digitais
NDBI	Normalized Difference Built-Up Index
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NDWI	Normalized Difference Water Index
NFL	Não Floresta
OLI	Operational Land Imager
PAG	Pasto/Agricultura
PREC	Precipitação
RMB	Região Metropolitana de Belém
SIG	Sistemas de Informação Geográfica
TAR	Temperatura do ar
TEMP	Temperatura
TIE	Esquema de Tiedtke
TM	Thematic Mapper
UHI	Urban Heat Island
UCT	Uso e Cobertura da Terra
URB	Urbanização
USGS	United States Geological Survey
VEG	Vegetação
WC	WorldClim

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	12
1.1 PROBLEMA DA PESQUISA.....	14
1.2 OBJETIVOS.....	16
1.3 INTERDISCIPLINARIDADE DA PESQUISA	16
1.4 ESTRUTURA DA TESE	17
CAPÍTULO 2 – DINÂMICA MULTITEMPORAL DA URBANIZAÇÃO NA REGIÃO METROPOLITANA DE BELÉM: EVIDÊNCIAS DE ANTROPISMO NUM CENÁRIO AMAZÔNICO	19
2.1 INTRODUÇÃO	19
2.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	22
2.2.1 Caracterização da área de estudo.....	22
2.2.2 Dados e Métodos de Sensoriamento Remoto.....	23
2.2.3 Dados Populacionais	27
2.2.4 Planilhas e Gráficos.....	27
2.3 RESULTADOS.....	27
2.3.1 Instituição histórica da RMB e o processo de urbanização	27
2.3.2 Classes de Coberturas de Terras.....	31
2.3.3 Aplicação dos Índices Físicos	33
2.3.4 Classificação do Uso e Cobertura da RMB.....	37
2.4 DISCUSSÃO	44
2.5 CONCLUSÃO	45
AGRADECIMENTOS.....	46
REFERÊNCIAS	47
CAPÍTULO 3 – MUDANÇAS DECADAIS NOS PADRÕES SAZONAIS DE CLIMA REGIONAL ASSOCIADOS À DINÂMICA DA URBANIZAÇÃO NA REGIÃO METROPOLITANA DE BELÉM	50
RESUMO	50
ABSTRACT	50
3.1 INTRODUÇÃO	50
3.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	52
3.2.1 Área de estudo.....	52
3.2.2 Conjunto de Dados Climáticos.....	53
3.2.3 Teste de Dupla Massa	54
3.2.4 Dados das Áreas de Cobertura da RMB.....	54
3.2.5 Geoprocessamento do Conjunto de Dados <i>WorldClim</i>	55
3.2.6 Dados da População da RMB.....	55
3.2.7 Planilhas e Gráficos.....	56
3.2.8 Correlação Estatística	56
3.3 RESULTADOS.....	57
3.3.1 Dinâmica Multitemporal do Uso e Cobertura na RMB e População	57
3.3.2 Teste de Dupla Massa	58
3.3.3 Análise Estatística	59
3.3.4 Análise da Média Histórica dos Dados Meteorológicos e Regimes Sazonais	61

3.3.5 Análise conjunta da Dinâmica do Clima x Uso e Cobertura na RMB	65
3.3.6 Interstício sazonal climático (ISC) entre estação chuvosa e seca.....	74
3.3.7 Álgebra de Mapas Climáticos	76
3.4 DISCUSSÃO	79
3.5 CONCLUSÃO	81
AGRADECIMENTOS.....	82
REFERÊNCIAS	82
CAPÍTULO 4 – IMPACTO GLOBAL/REGIONAL NO REGIME CLIMÁTICO PRESENTE E FUTURO PRÓXIMO NA REGIÃO METROPOLITANA DE BELÉM, AMAZÔNIA ORIENTAL.....	84
4.1 INTRODUÇÃO	85
4.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	86
4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	92
4.3.1 Ciclo anual e regimes sazonais.....	92
4.3.2 PREC e TEMP observados e simulados no clima atual.....	92
4.3.3. Mudanças na cobertura do solo e impactos nos regimes sazonais durante o clima atual	96
4.3.4 Projeções de cenários futuros associados às mudanças climáticas globais	101
4.4 Discussão e Conclusão	103
AGRADECIMENTOS.....	106
REFERÊNCIAS	106
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÃO GERAL	112
5.1 RESULTADOS CHAVES: IMPACTOS E IMPLICAÇÕES	112
5.2 CONCLUSÕES DE FORMA INTEGRADA	113
5.3 PRIORIDADES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	114
REFERÊNCIAS.....	114
APÊNDICE A – Valores mensais de precipitação WORLDCLIM (1974-2018)	122
APÊNDICE B – Valores mensais de precipitação INMET (1974-2018)	123
APÊNDICE C – Valores mensais de TMAX WORLDCLIM (1974-2018)	124
APÊNDICE D – Valores mensais de TMAX INMET (1974-2018)	125
APÊNDICE E – Valores mensais de TMIN WORLDCLIM (1974-2018).....	126
APÊNDICE F – Valores mensais de TMIN INMET (1974-2018).....	127
APÊNDICE G – Mapas de uso e cobertura da terra da RMB.....	128

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

As questões ambientais cada vez mais têm ganhado força e relevância no mundo. As mudanças climáticas, globais ou regionais, têm sido um problema crescente em vários pontos do planeta, principalmente em zonas urbanas, nas quais as alterações no clima local ou regional (notadamente, a temperatura do ar e umidade atmosférica) implicam no conforto térmico da população e por vezes na saúde (BEZERRA et al., 2017; CUI et al., 2018). A urbanização influencia diretamente o clima da cidade. Fatores como ocupação do solo, emissões atmosféricas, adensamento populacional e supressão vegetal são fundamentais na determinação da condição climática de um local, provocando direta ou indiretamente, alterações na atmosfera urbana (BROWNLEE & RAY, 2017; PAULINO et al, 2017; SIQUEIRA, 2018).

Em áreas urbanas, as superfícies impermeáveis absorvem o calor durante o dia e liberam-no à noite, tornando as áreas urbanas mais quentes em comparação com as áreas rurais que se esfriam mais rapidamente durante a noite (MWANGI; KARANJA, KAMAU, 2018). Nesse contexto, as características da paisagem, incluindo vegetação e superfícies impermeáveis, influenciam os microclimas urbanos e podem trazer efeitos adversos à saúde por altas temperaturas ambientes (SCHINASI; BENMARHIA, DE ROOS, 2018).

De acordo com Monteiro (1976), o clima urbano é um sistema que abrange o clima de um dado espaço terrestre e sua urbanização, por isso será específico para cada ambiente urbanizado, uma vez que as cidades se diferem de acordo com suas características naturais, como: geomorfologia, direção predominante dos ventos, tipo e cor dos materiais utilizados nas edificações, densidades de construções, pavimentação, verticalização, presença de áreas verdes e arborização nas ruas e em fundos de quintais (DORIGON; AMORIN, 2013). Dos Santos et al. (2018) e Vieira et al. (2018) ratificam o problema exposto sobre o clima urbano, advertindo que a construção civil é um dos setores que mais gera impactos ambientais.

Houve um intenso processo de expansão demográfica no Brasil, principalmente após os anos 1960 com o crescimento de atividades econômicas e nos anos 1970 com desenvolvimento de tecnologias, causando um grande processo de migração populacional do campo para a cidade, propiciando um crescimento urbano acelerado, que inchou as cidades e desencadeou diversos problemas ambientais (SANTO e QUEIROZ, 2007; NASCIMENTO, 2011; BEZERRA, 2017).

Bento, Basso e Nery (2017) corroboram explanando que o modelo urbano adotado pelas cidades pode ser bom para seu crescimento e desenvolvimento, porém pode ser ineficaz no âmbito meteorológico e climatológico, já que a falta de planejamento urbano, o uso e ocupação e a retirada da vegetação natural do município é propícia a uma série de problemas e impactos para população como o aumento da temperatura e desconforto térmico, problemas de saúde, calamidades, tais como inundações, destruição do solo e poluição atmosférica. Residentes urbanos enfrentam risco crescente de estresse por calor devido ao impacto combinado da mudança climática e intensificação da ilha de calor urbano associada ao crescimento urbano (CHAPMAN et al., 2019).

Maturana (2021) adverte que entender o crescimento urbano no passado e simulá-lo no futuro tornou-se uma ferramenta para aumentar sua visibilidade e desafiar os planejadores territoriais. A ciência da modelagem ou simulação do clima avançou tanto no aprofundamento dos processos físicos atmosféricos e ambientais (prescritos dentro dos modelos), como nos aspectos tecnológicos de computação que aumentaram a capacidade de processamento e integração dos códigos numéricos dos modelos globais e regionais. Atualmente, é consenso na comunidade científica de que uma das ferramentas mais avançadas nos estudos de clima atual e futuro é o Downscaling dinâmico (PBMC, 2012), cuja metodologia consiste em usar um modelo regional aninhado a um modelo global. Basicamente, as saídas dos modelos globais com baixa resolução espacial (acima de 100 km) são utilizadas como condições de fronteira dentro do modelo regional que realiza as simulações em alta resolução espacial (abaixo de 20 km). O Downscaling proporciona uma representação mais realística do clima, em que fatores locais (proximidade com o oceano, topografia acentuada, solo e cobertura superficial heterogênea) que são capturados pelos modelos regionais, funcionam como importantes moduladores das condições de tempo e clima, adicionados aos fatores de grande escala (modulação dos oceanos e circulação geral da atmosfera) que são capturados pelos modelos globais (Ambrizzi et al., 2007; De Souza et al., 2016).

Na presente pesquisa realizar-se-á um estudo de Downscaling usando o sistema de modelagem climática regional denominado de RegCM4 (Giorgi et al., 2012), com o enfoque na Região Metropolitana de Belém (RMB), Estado do Pará, num cenário climático da Amazônia oriental. Trata-se de uma abordagem pioneira abordando Downscaling com o RegCM4 para a Amazônia, cujos resultados darão ganho de conhecimento sobre a investigação dos impactos da urbanização no clima local/regional. Assim sendo, o presente estudo é justificável diante da necessidade de investigar a relação

das variáveis meteorológicas com a urbanização e a supressão vegetal, bem como as possíveis consequências dessas mudanças na região. Assim, insere-se a importância deste estudo, portanto, por contribuir para o entendimento de como as mudanças climáticas poderão impactar a RMB, bem como pela geração de cenários climáticos por meio de simulações e projeções futuras, cujas informações poderão ser úteis ao planejamento e tomada de decisão no contexto do planejamento ambiental e políticas públicas em benefício da sociedade.

1.1 PROBLEMA DA PESQUISA

Os problemas referentes à dinâmica atmosférica afetam de maneira sistemática os espaços urbanos e condizem principalmente com a ocupação em áreas com grande concentração populacional (FERNANDES; DA ANUNCIAÇÃO, 2017). Nunes et al. (2017) corroboram alertando que adensamento populacional no ambiente urbano tem proporcionado diversos problemas ambientais e sociais resultantes das atividades econômicas, expansão do espaço construído e falta de planejamento adequado que considere os fatores ambientais e socioeconômicos. Nesse sentido, compreende-se que o clima é uma variável no espaço e no tempo, constituindo um importante elemento na organização da superfície terrestre (SANTOS; ZAMPARONI; SOARES, 2017).

Para Alcofodaro (1996), um dos objetivos das organizações meteorológicas é dar diretrizes no sentido de reduzir incertezas nas previsões das variações climáticas e dos possíveis impactos. Assim, investigação no sentido de detectar as variações climáticas, deve ser considerada uma tarefa prioritária. Para Angelocci e Sentelha (2007), a flutuação temporal do clima é uma característica que deve ser discutida com maiores detalhes, pois o seu estudo nas mais diferentes escalas permite compreender como era o clima no passado longínquo, no passado recente e como o é no presente, além de permitir, a partir de modelos, simular cenários de clima no futuro.

Outrossim, tem sido um grande desafio da comunidade científica a elaboração dos estudos de atribuição climática, ou seja, a identificação dos mecanismos naturais e antrópicos que explicam os sinais da variabilidade e tendências climáticas, bem como os eventos extremos. Na Amazônia, estudos prévios observacionais e de modelagem demonstraram a modulação dos mecanismos de variabilidade natural dos Oceanos Pacífico e Atlântico sobre os padrões de precipitação ao longo da região (De Souza et al., 2009). Não obstante, várias pesquisas abordaram os problemas ambientais decorrentes do

desmatamento do bioma de floresta. A conversão da cobertura florestal original em áreas de pastagens para pecuária, agricultura de pequeno e grande porte, assentamentos, indústrias de mineração, urbanização, dentre outras atividades de uso e ocupação da terra, induzem mudanças no balanço hidrológico e de energia que resultam em impactos diretos e indiretos nos padrões climáticos ao longo da região (Marengo, 2006; Marengo et al., 2018). Poucos estudos enfocaram os aspectos antrópicos da urbanização e seus impactos locais/regionais no cenário amazônico. Com base nesse contexto, menciona-se a formulação das questões centrais que se almejam investigar no presente estudo, a saber:

- As transformações antrópicas das últimas décadas que resultaram na expansão e adensamento urbano em Belém impactaram os regimes climáticos na escala municipal?
- Considerando a escala geográfica toda a área metropolitana, o processo de supressão da cobertura florestal (resultante das atividades antrópicas de uso e cobertura da terra - UCT) suscitaram a ampliação preferencial de áreas de urbanização ou de agricultura/pastagens? Tais mudanças ambientais impactaram os regimes climáticos sazonais das últimas décadas?
- Mudanças climáticas globais afetam os regimes sazonais da RMB? Há indicações de mudanças significativas nos padrões de clima regional levando em conta as projeções futuras dos cenários de aquecimento global?

Após determinação das questões norteadoras, algumas hipóteses foram definidas como solução das problemáticas, objetos de investigação. As Hipóteses são provisórias porque poderão ser confirmadas ou refutadas com o desenvolvimento da pesquisa. Nesta abordagem sobre os impactos no clima local/regional na RMB causados pela urbanização e setor agropecuário, admitiu-se as seguintes formulações:

- As áreas urbanizadas e de pastagem/agricultura aumentam substancialmente com o passar dos anos e existem correlações significantes entre o antropismo e as variáveis climáticas na RMB;
- As projeções futuras decorrentes das mudanças climáticas (aquecimento global) irão agravar os impactos ambientais nas áreas urbanizadas da RMB.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral é quantificar a dinâmica espaço/temporal das mudanças na cobertura superficial da RMB resultantes das atividades de UCT e analisar os impactos/efeitos da expansão urbana e do setor agropecuário nos regimes climáticos sazonais durante o clima presente (últimas três décadas), bem como desenvolver estudo de modelagem regionalizada com projeções de clima futuro (próximas duas décadas) para a RMB associadas aos impactos das mudanças climáticas globais.

Os objetivos específicos são:

- Quantificar e mapear por sensoriamento remoto a dinâmica multitemporal da urbanização na RMB, durante as últimas quatro décadas;
- Analisar os impactos da dinâmica de urbanização (antropização) no clima regional (padrões sazonais de temperatura do ar e precipitação) da RMB por meio de um conjunto de dados climáticos e ambientais das últimas décadas;
- Gerar simulações regionalizadas de cenários futuros de mudanças climáticas globais e investigar as alterações nos padrões sazonais de clima regional da RMB nos próximos 25 anos.

1.3 INTERDISCIPLINARIDADE DA PESQUISA

De Souza (2012) explica que o termo interdisciplinaridade não possui ainda um sentido único e estável, mas que o mesmo se caracteriza pela intensidade das discussões entre especialistas de diferentes áreas científicas e pelo grau de integração real das disciplinas no interior de um mesmo projeto de pesquisa. Neste sentido, a interdisciplinaridade além do aspecto da colaboração existente entre disciplinas diversas, caracteriza-se por uma intensa reciprocidade nas trocas, visando um enriquecimento mútuo (FAZENDA, 2002).

O presente estudo apresenta proposta para trabalhar na linha de Pesquisa: Interação Clima, Sociedade e Ambiente, objetivando identificar/mapear a dinâmica das mudanças de uso e cobertura da terra, com enfoque nos aspectos da urbanização, e analisar de forma integrada os efeitos/impactos concomitantes no clima regional da RMB, considerando uma abordagem usando geoprocessamento e modelagem climática regional. Neste contexto, esta pesquisa estabelece trocas entre as diferentes áreas do conhecimento que se entrecruzam, haja vista que a pesquisa abarca a modelagem regional, que compreende conhecimentos de Meteorologia/Climatologia em simulações

computacionais de alto desempenho do sistema climático global/regional; o Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento para determinar a dinâmica espaço/temporal da urbanização, que compreende conhecimentos da geografia física e utilização das ferramentas científicas de Geomática (SIG, geoprocessamento e gerenciamento de dados espaciais); cujas análises integradas permitem a investigação das interações no meio físico (interação clima e ambiente) e mudanças ambientais com implicações diretamente na sociedade. Desta forma, a abordagem contempla uma interface entre diversas áreas do conhecimento, o que reforça a interdisciplinaridade como fio condutor no presente estudo, buscando na interdisciplinaridade subsídios para sua elaboração e atingimento das metas propostas.

1.4 ESTRUTURA DA TESE

A tese está organizada com a seguinte estrutura:

O Capítulo 1 é uma introdução geral que contextualiza o tema, abordando a problemática e as justificativas que motivaram essa pesquisa, as questões científicas centrais a serem abordadas, bem como os objetivos propostos pelo estudo. O capítulo encerra com um tópico destinado a caracterização da interdisciplinaridade do estudo.

O Capítulo 2 apresenta o primeiro artigo com o título: Dinâmica multitemporal da urbanização na região metropolitana de Belém: evidências de antropismo num cenário amazônico, com o objetivo de identificar/mapear a dinâmica multitemporal da urbanização na atual Região Metropolitana de Belém, por meio de sensoriamento remoto, evidenciando o crescimento populacional na região de 1984 a 2020.

O Capítulo 3 expõe o segundo artigo com o título: Mudanças Decadais nos Padrões Sazonais de Clima Regional Associados à Dinâmica da Urbanização na Região Metropolitana de Belém, com o objetivo de determinar os impactos da antropização/urbanização nos padrões sazonais do clima regional na RMB considerando uma abordagem de escala decadal.

No Capítulo 4 consta o terceiro artigo com o título: Mudanças nos regimes sazonais da Região Metropolitana de Belém no clima presente e em projeções futuras de mudanças climáticas globais. Neste artigo apresentam-se análises quantitativas integrando dados climáticos e ambientais das últimas três décadas e meia (1985 a 2020) com uma abordagem mais completa sobre a avaliação dos impactos da expansão urbana e do setor agropecuário nos regimes climáticos sazonais da RMB, bem como a geração

das projeções regionalizadas de clima futuro (próximas duas décadas) para a RMB associadas aos impactos das mudanças climáticas globais.

No Capítulo 5 finaliza-se a Tese com as conclusões gerais e integradas, bem como as principais contribuições da pesquisa para as ciências ambientais da Amazônia.

CAPÍTULO 2 – DINÂMICA MULTITEMPORAL DA URBANIZAÇÃO NA REGIÃO METROPOLITANA DE BELÉM: EVIDÊNCIAS DE ANTROPISMO NUM CENÁRIO AMAZÔNICO¹

RESUMO

As imagens de satélites são de grande importância na elaboração de estudos multitemporais da expansão urbana, seja em escala micro, meso ou macrorregional. Este estudo objetivou identificar/mapear a dinâmica multitemporal da urbanização na Região Metropolitana de Belém, evidenciando o antropismo mediante a constatação do crescimento populacional na região. Para atingir o objetivo proposto, o estudo fez uso de sensoriamento remoto de 1984 a 2020, aplicando os índices físicos NDBI, NDWI, NDVI e BSI para realçar o uso e cobertura das áreas de interesse na região. Os resultados constataram que, no período de estudo, houve supressão vegetal de 390 km²; o núcleo urbano concentrou-se a sudoeste da região com aproximadamente 2 milhões de residentes; a taxa de urbanização subiu para 96.27%, maior que a do Brasil (90%) e as áreas antropizadas, em certos momentos, cobriam mais de 20% da região. Inferiu-se que os índices físicos podem ser incorporados nos estudos para fornecer importantes informações sobre o ambiente urbano e regional.

Palavras-chave: Sensoriamento remoto, índices físicos, área urbana, área antropizada.

ABSTRACT

Satellite images are of great importance in the development of multitemporal studies of urban expansion, whether on a micro, meso or macroregional scale. This study aims to identify/map the multitemporal dynamics of urbanization in the Metropolitan Region of Belém, showing anthropism through the observation of population growth in the region. To achieve the proposed objective, the study used remote sensing from 1984 to 2020, applying the physical indices NDBI, NDWI, NDVI and BSI to highlight the use and coverage of areas of interest in the region. The results showed that, during the study period, there was a vegetation suppression of 390 km²; the urban core was concentrated in the southwest of the region with approximately 2 million residents; the rate of urbanization rose to 96.27%, higher than that of Brazil (90%) and the anthropized areas, at certain times, covered more than 20% of the region. It was inferred that the physical indexes can be incorporated into the studies to provide important information about the urban and regional environment.

Keywords: Remote sensing, physical indexes, urban area, anthropized area.

2.1 INTRODUÇÃO

A Amazônia é hoje uma floresta urbanizada, com os altos índices de crescimentos citadinos, caracterizados por um estilo de urbanização diferenciado do restante do país, justamente por apresentar crescimento humano em áreas de menor densidade populacional (BECKER, 2013; DA TRINDADE 2013, WANG et al., 2019). Conforme explica Hüffner e Bello (2013), urbanização pode ser entendida como o processo de

¹ Artigo publicado na Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais, v. 12 n. 10 (2021).
<https://www.sustenere.co/index.php/rica/article/view/6364>

transformação de uma área rural para urbana, por meio da implantação de infraestrutura, equipamentos e serviços típicos das cidades, ou seja, uma transformação estrutural e funcional.

Silva et al. (2021) afirmam que a razão política e econômica ligada à intensificação da exploração da região Amazônica vem sendo questionada pelos países do mundo todo, pois, tem sido extremamente prejudicial ao meio ambiente. No Estado do Pará, o processo de ocupação e urbanização se deu em função das construções das estradas, da exploração do garimpo e dos grandes projetos de ocupação territorial (DIAS, 2010).

Spinelli (2016) explica que devido ao crescimento populacional ao longo dos séculos, é notória a influência de ações antrópicas, causadoras de distúrbio nos ecossistemas naturais e urbanos, consequentes da expansão das cidades. Estudos que caracterizam as áreas urbanas dentro das perspectivas social, econômica e espacial configuram-se como importantes ferramentas de gestão e planejamento urbano e ambiental (LOVISI e SEABRA, 2016).

Percebe-se que os vários tipos de usos do solo, que antes eram ocupadas por vegetação, vão convertendo paisagens naturais em extensas áreas antropizadas (PONTE et al., 2016). Globalmente, a temperatura urbana está aumentando gradualmente a cada dia. A proeminente condição climática chamada Ilha de Calor Urbana está aumentando especialmente nas cidades rapidamente desenvolvidas (LIAQUT et al., 2019).

Muitas técnicas têm sido aplicadas para caracterizar e quantificar áreas urbanas, seja através de medições, por meio de mapas impressos ou mapeamento por meio de imagens de sensoriamento remoto (ALMEIDA e NETO, 2018). O Sensoriamento Remoto caracteriza-se como importante aparato tecnológico para os geocientistas, pois através dele podemos analisar o espaço geográfico em diferentes escalas cartográficas/geográficas, estudar diversos temas, elaborar diagnósticos e até prognósticos (DA SILVA, DE CARVALHO e CRUZ, 2019). Chhetri e Thai (2019) explicam que o uso de sensoriamento remoto e sistemas de informação geográfica (SIG) têm aumentado constantemente em estudos ambientais.

Os usos das técnicas de sensoriamento remoto potencializam os estudos das alterações da paisagem no ambiente urbano (SILVA et al., 2016). De acordo com Padilha (2016), o geoprocessamento constitui hoje uma ferramenta primordial para as etapas de levantamento e processamento de informações relacionadas a questões ambientais, o que é ratificado por Coelho et al. (2015) ao destacar que o geoprocessamento se torna importante ferramenta para compreender a estrutura e dinâmica das paisagens em

diversas escalas temporais e espaciais, podendo auxiliar a compreender os processos ambientais.

A utilização de técnicas de geoprocessamento, conjuntamente com o sensoriamento remoto e SIG tem permitido a realização de inúmeros trabalhos nos vários campos da ciência, notadamente na área ambiental (FUJACO, 2010). O uso das técnicas de sensoriamento remoto vem sendo cada vez mais utilizadas para extração de informações relacionadas à cobertura, utilizando para tanto, métodos de classificação de imagens, seja ela supervisionada ou não-supervisionada (LACERDA, 2021). Gutierrez et al. (2017) corroboram alertando que o uso de técnicas de sensoriamento remoto através do SIG é uma ferramenta poderosa que pode ser utilizada para o monitoramento de ecossistemas e para tomada de decisão na gestão ambiental.

A análise multitemporal possibilita comparar uma mesma paisagem entre dois ou mais períodos, permitindo o monitoramento e avaliação das suas dinâmicas (Araújo e Fonseca, 2016). A análise multitemporal utiliza imagens de satélite de determinada área em períodos distintos, não se restringindo a usar imagens de um mesmo sensor na coleta de informações (MOREIRA, 2011).

Freimpong e Molkenthin (2021) relatam que a rápida expansão urbana é considerada uma das causas antrópicas mais evidentes das alterações ambientais e que índices de sensoriamento remoto podem ser incorporados para fornecer mais informações sobre o ambiente urbano. De acordo com Yu et al. (2019), a aglomeração urbana tornou-se a característica mais marcante da urbanização global nas últimas décadas, enquanto os padrões espaço-temporais e a evolução permanecem pouco compreendidos nas aglomerações urbanas, o que limita os tomadores de decisão em ações mais assertivas para melhorar e planejar as condições do ambiente regional.

Segundo o censo demográfico 2010, realizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), estima-se que a taxa de urbanização no Brasil corresponde a 84,36 %, da região norte 73,54% e RMB 96,02% (IBGE, 2010). A taxa de urbanização é a porcentagem da população da área urbana em relação à população total. Real e Vasconcelos (2017) relatam que a taxa de urbanização no Brasil continua crescendo e a sua rede urbana deve ficar cada vez mais complexa. Para Lombardo (2009), a rápida urbanização ocorrida nos últimos cinquenta anos, em nível mundial, está associada ao agravamento nos aspectos de vulnerabilidade das cidades.

Conforme contextualizado, técnicas de detecção de mudanças digitais usando imagens de satélite multitemporais ajudam a entender a dinâmica da paisagem (RAWAT

e KUMAR, 2015). Este estudo tem por objetivo identificar/mapear a dinâmica multitemporal da urbanização na atual Região Metropolitana de Belém, por meio de sensoriamento remoto, evidenciando o antropismo através da constatação do crescimento populacional na região ocorrido no período de 1984 a 2020 (últimos 37 anos).

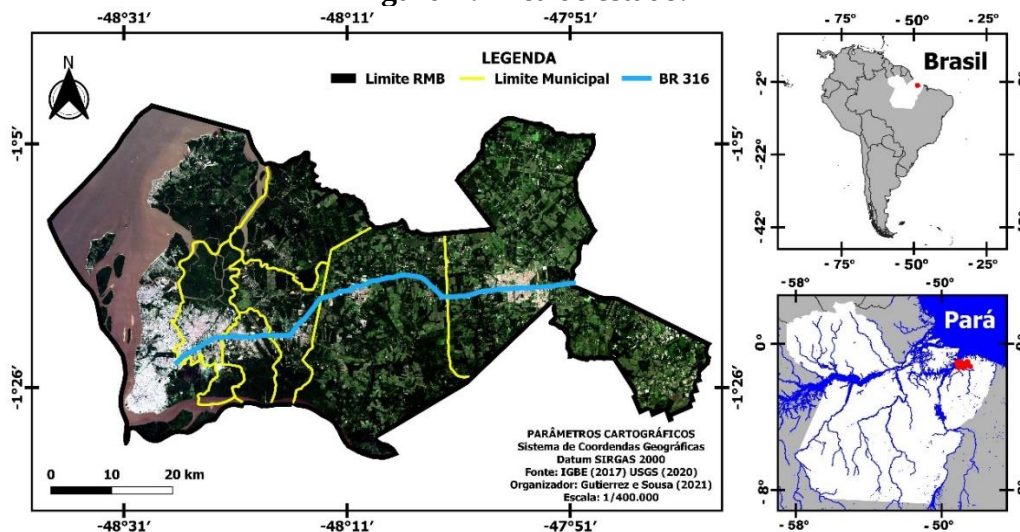
2.2 MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1 Caracterização da área de estudo

De acordo com o IBGE (2021), o Estado do Pará tem população estimada de 8.690.745 habitantes, formado pela união de 144 municípios, com densidade demográfica de 6,98 hab/km², ocupando área territorial de 1.245.870,707 km² e índice de desenvolvimento humano (IDH) de 0,646. A área de estudo proposta é a atual Região Metropolitana de Belém (RMB), também conhecida como Grande Belém, hoje composta por sete municípios em relativo processo de conurbação, são eles: Ananindeua, Belém, Benevides, Castanhal, Marituba, Santa Bárbara do Pará e Santa Izabel do Pará.

A Figura 1 apresenta a área de estudo. É importante reiterar que a atual configuração da RMB é composta pelos sete municípios já elencados anteriormente, mas que em 1973, quando se instituiu a RMB, eram apenas dois municípios (Belém e Ananindeua). Desta forma, como o estudo faz uma análise multitemporal de imagens de satélites desde 1984, é possível visualizar na figura os limites dos municípios em tom amarelo, mas a escala a ser considerada para todas as análises e cálculos das classes utilizadas no sensoriamento remoto é o polígono que delimita a área total da Região Metropolitana de Belém com linha negra, inserindo-se neste polígono tanto a área urbana quanto a rural, as quais somam 3.566,3 km².

Figura 1: Área de estudo.



Fonte: Gutierrez e Souza (2021)

2.2.2 Dados e Métodos de Sensoriamento Remoto

Na área ambiental, o geoprocessamento é uma ferramenta importante, senão a mais utilizada para monitoramento. Para Silva et al. (2016), com a crescente disponibilização de imagens orbitais de média e alta resolução espacial oriundas de sensores remotos, pesquisas que se utilizam desses produtos são cada vez mais comuns para estudar problemas ambientais em diversas escalas.

No procedimento de elaboração do mapeamento da dinâmica da urbanização na área de estudo, foram utilizadas imagens do sensor *Thematic Mapper (TM)*, abordo do satélite Landsat-5, na órbita 223, ponto 61, para estudos até 11/02/2013. Por outro lado, para estudos a partir de 11/02/2013 foram utilizadas imagens do sensor *Operational Land Imager (OLI)*, abordo do satélite Landsat-8, na órbita 223, ponto 61. Desta forma, o estudo compilou imagens orbitais digitais dos anos de 1984, 1989, 1995, 1999, 2008 e 2020, abrangendo um período de quase quatro décadas. As imagens podem ser obtidas gratuitamente no banco de dados do Serviço de Levantamento Geológico Americano (USGS - *United States Geological Survey*), disponível no endereço eletrônico <http://landsat.usgs.gov/>. As seleções das imagens de satélite foram obtidas para o período seco, de julho a novembro, pois de acordo com Siqueira (2018), é o período em que há pouca presença de nuvens na região amazônica, por serem as melhores cenas. Todas as bandas das imagens têm resolução espacial de 30x30 metros.

Através do *software* ENVI 4.8 foi feito tratamento das imagens para remover eventuais presenças de névoas e nuvens. Para calcular índices por diferença normalizada, fazer classificação, vetorizar as áreas das classes de uso cobertura e gerar mapas, foi

utilizado o Sistema de Informação Geográfica QGIS 3.16 Hannover de longa duração, *software* livre licenciado pela “*General Public License*” (GNU), que conjuga funções de processamento de imagens, análises espaciais, modelagem numérica de terreno e consulta a banco de dados espaciais.

No QGIS calcularam-se quatro índices por diferença normalizada, o NDBI (*Normalized Difference Built-up Index*), NDWI (*Normalized Difference Water Index*), NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) e BSI (*Bare Soil Index*), cujo objetivo foi realçar respectivamente áreas urbanizadas, feições de água, coberturas de vegetação e solo exposto. Após calcular os índices, fez-se a composição colorida RGB por meio de combinação, onde R = NDBI, G = NDVI e B = NDWI para obtenção de contrastes que facilitaram a identificação de quatro classes de uso e cobertura do solo utilizadas no estudo, são elas: Área Urbanizada, Área Antropizada, Vegetação e Água.

No QGIS também foi feita a classificação supervisionada das imagens. O classificador usado foi o da distância mínima, que examina as “distâncias” entre um pixel e as médias das classes e atribui ao pixel a classe que apresentar a menor distância. Nesta etapa foi feito o treinamento para o reconhecimento da assinatura espectral de cada uma das classes necessárias para o estudo. Os critérios usados na identificação e determinação das classes temáticas foram: forma, que está relacionada à geometria do objeto; tamanho, que varia conforme a resolução espacial da imagem; tonalidade, relacionada à quantidade de energia refletida por um objeto; e textura, que pode ser lisa ou rugosa.

Para identificação de áreas urbanas o estudo fez uso do NDBI (Índice de Área Construída por Diferença Normalizada), proposto por Zha et al. (2003), o qual é largamente utilizado para a identificação de manchas urbanas, podendo destacar por exemplo: áreas edificadas, bancos de areias e solo exposto.

A metodologia proposta por Zha et al. (2003) automatiza o mapeamento de áreas construídas, urbanas e periurbanas baseando-se no incremento do número digital nos intervalos das bandas do infravermelho médio e infravermelho próximo. Segundo o autor, o método NDBI foi concebido e aplicado para mapear a cidade de Nanjing, leste da China, cujos resultados mapeados tiveram precisão de 92,6%, indicando que o método pode ser usado para cumprir o objetivo de mapeamento de forma confiável.

O NDBI é expresso pela equação que segue e resulta da diferença normalizada entre as bandas Infra Vermelho Médio e Infra Vermelho Próximo, presentes nos sensores do Landsat-5 e do Landsat-8:

$$NDBI = \frac{IVm - IVp}{IVm + IVp} \quad (1)$$

Onde:

IVm é a banda do Infra Vermelho Médio.

IVp é a banda do Infra Vermelho Próximo.

Desta forma, as equações a serem utilizadas para os dois satélites são:

$$\text{Landsat-5: } NDBI = \frac{(Banda\ 5 - Banda\ 4)}{(Banda\ 5 + Banda\ 4)} \quad (2)$$

$$\text{Landsat-8: } NDBI = \frac{(Banda\ 6 - Banda\ 5)}{(Banda\ 6 + Banda\ 5)} \quad (3)$$

A equação resulta valores entre -1 e +1, sendo que os valores positivos se referem às áreas urbanas, ou seja, os maiores valores representam os pixels contidos em áreas construídas e os valores negativos representam pixels contidos em áreas não construídas, como por exemplo, superfícies com vegetação.

Para identificação da cobertura de corpos d'água, utilizou-se o NDWI (Índice da Diferença Normalizada de Água), um método desenvolvido por McFeeters (1996) que permite caracterizar feições presentes no ambiente aquático, realçando corpos d'água nas imagens. Assim, para calcular o NDWI, foi aplicada a Equação que segue:

$$NDWI = \frac{G - IVp}{G + IVp} \quad (4)$$

Onde:

G é a banda do Verde.

IVp é a banda do Infra Vermelho Próximo.

Desta forma, as equações a serem utilizadas para os dois satélites são:

$$\text{Landsat-5: } NDWI = \frac{(Banda\ 2 - Banda\ 4)}{(Banda\ 2 + Banda\ 4)} \quad (5)$$

$$\text{Landsat-8: } NDWI = \frac{(Banda\ 3 - Banda\ 5)}{(Banda\ 3 + Banda\ 5)} \quad (6)$$

O cálculo do NDWI resulta valores entre -1 e +1, assim, espera-se que os valores sejam maiores que zero, ou seja, que realcem os corpos d'água.

Para melhor determinar a cobertura de vegetação, fez-se o cálculo do NDVI (Índice de Vegetação por Diferença Normalizada), proposto por Rouse et al. (1974). Este índice realça o contraste da radiação refletida nos intervalos espectrais do vermelho e do

infravermelho, característico da atividade da fotossíntese, favorecendo a identificação das diferentes fitofisionomias da vegetação. O NDVI foi determinado por meio da seguinte equação:

$$NDVI = \frac{IVp - R}{R + IVp} \quad (7)$$

Onde:

R é a banda do Vermelho.

IVp é a banda do Infra Vermelho Próximo.

Desta forma, as equações a serem utilizadas para os dois satélites são:

$$\text{Landsat-5: } NDVI = \frac{(Banda\ 4 - Banda\ 3)}{(Banda\ 4 + Banda\ 3)} \quad (8)$$

$$\text{Landsat-8: } NDVI = \frac{(Banda\ 5 - Banda\ 4)}{(Banda\ 5 + Banda\ 4)} \quad (9)$$

O NDVI, assim como os índices NDBI e NDWI, também apresenta valor normalizado que varia de -1 a +1.

O índice BSI (Índice de Solo Exposto), proposto por Chen et al. (2004), que como o próprio nome sugere, tem o propósito de identificação de solos descobertos nas imagens obtidas de satélites. Combina as bandas espectrais de azul, vermelho, infravermelho próximo e infravermelho de onda curta e seus valores variam também entre -1 e +1, onde um valor mais alto indica uma mudança mais alta em solo descoberto. O BSI irá auxiliar o índice NDBI para caracterizar presença de áreas antropizadas com ausência de construções em áreas urbanizadas. Seu cálculo é feito utilizando-se a equação que segue:

$$BSI = \frac{(IVm + R) - (IVp + B)}{(IVm + R) + (IVp + B)} \quad (10)$$

Onde:

IVm é a banda do Infra Vermelho Médio.

R é a banda do Vermelho.

IVp é a banda do Infra Vermelho Próximo.

B é a banda do Azul.

Desta forma, as equações a serem utilizadas para os dois satélites são:

$$\text{Landsat-5: } BSI = \frac{(Banda\ 5 + Banda\ 3) - (Banda\ 4 + Banda\ 1)}{((Banda\ 5 + Banda\ 3) + (Banda\ 4 + Banda\ 1))} \quad (11)$$

$$\text{Landsat-8: } BSI = \frac{(Banda\ 6 + Banda\ 4) - (Banda\ 5 + Banda\ 2)}{((Banda\ 6 + Banda\ 4) + (Banda\ 5 + Banda\ 2))} \quad (12)$$

2.2.3 Dados Populacionais

No portal oficial do IBGE, foram obtidos os dados da população urbana e rural da Região Metropolitana de Belém, taxa de urbanização do Brasil, da região Norte e da Região Metropolitana de Belém para o período de 1980 até 2020, período esse que se abrange os anos deste estudo, 1984, 1989, 1995, 1999, 2008 e 2020.

Os dados coletados para os anos de 1980, 1991, 2000 e 2010 são resultados dos censos que ocorreram no Brasil, sendo que os dados de 2020 são estimativas oficializadas pelo IBGE, tendo em vista que a realização do censo demográfico foi adiada para 2022 em decorrência da pandemia e avanço do Covid-19 (Coronavírus) no Brasil nos anos de 2020/2021.

2.2.4 Planilhas e Gráficos

A organização de valores calculados neste estudo e de dados numéricos obtidos a partir das instituições fontes de dados foram compilados no software Microsoft Excel 2010, o qual permitirá elaboração de tabelas e produção de gráficos necessários para análises das informações.

2.3 RESULTADOS

2.3.1 Instituição histórica da RMB e o processo de urbanização

A RMB abriga aproximadamente 2,5 milhões de habitantes, com taxa de urbanização acima de 96%. Para compreender esse processo de ocupação, realizou-se um resgate histórico de alguns vetores que impulsionaram a migração de pessoas para região. Não se tem pretensão de esgotar o tema, mas relatar alguns fatos históricos responsáveis pela ocupação e instituição da RMB.

No final do século XIX e início do século XX, quando a atividade principal era o extrativismo, especialmente no Pará, a extração da borracha acelerou o processo de aumento da população da RMB. Nesse período, também conhecido como ciclo da borracha, houve crescimento de centros urbanos, construção de rodovias e de estradas de ferro (FENZL et al., 2020).

Em 1920, Ananindeua, Benevides, Santa Izabel e Castanhal figuravam como distrito de Belém. Em 28/01/1932, Castanhal foi desmembrado de Belém e elevado à categoria de município pelo Decreto Estadual nº 600.

Destaca-se que o ciclo da borracha teve outro boom durante a segunda guerra mundial, ocasionando também migrações para região. Em 30/12/1943, o Decreto Lei estadual nº 4.505 instituiu o município de Ananindeua (abrangendo Benevides) e o município João Coelho, que em 10/01/1961 através da Lei Estadual nº 2.160, passou a denominar-se Santa Izabel do Pará.

Durante o governo militar no Brasil (1964 a 1985), grandes projetos econômicos (rodoviário, ferroviário, portuário, hidrelétrico, minerário e agropecuário) para ocupação territorial e desenvolvimento da Amazônia tiveram início. Esses projetos tinham intuito de povoar a região, e a partir de meados 1960 produziu novas tipologias de ocupação na região (Becker, 2018), além de resultarem em uma migração massiva para a região, o que localmente também influenciou no processo de reestruturação, estimulando a expansão urbana e o aumento da produção de periferias na Região Metropolitana de Belém (MELLO e FEITOSA, 2020).

Ainda na década de 1960, com a abertura da rodovia Belém–Brasília, marco principal para a entrada de grandes grupos de migrantes para região, fez a urbanização alavancar na RMB, consolidando-se a partir dos anos 1970, como resultado das políticas de integração nacional e dos grandes projetos (DIAS et al., 2020). Em dezembro de 1961, foi criado o município de Benevides, que ainda era distrito de Ananindeua. Dessa forma, a partir das décadas de 1960 e 1970, o estado do Pará sofreu grande influência da rodovia Belém-Brasília, favorecendo o aparecimento de novos núcleos urbanos e um acentuado crescimento demográfico na RMB, pois a região Amazônica se tornou alvo e palco de um processo de radicalização conservadora das políticas desenvolvimentistas do governo militar, que introduziram mudanças drásticas no espaço regional (LACERDA e DINIZ, 2020).

Entre 1966 e 1986, impulsionados pelas políticas habitacionais em âmbito federal, também foram inaugurados conjuntos habitacionais construídos pela Companhia de Habitação do Estado do Pará (COHAB), que disponibilizou 19.190 casas para a população de baixa e média renda no estado (PINHEIRO et al., 2007).

A partir da metade da década de 1980, acelerou-se o movimento das ocupações coletivas via rodovia BR-316, afetando os municípios de Ananindeua, Marituba, Benevides, Santa Bárbara, Santa Izabel e Castanhal. Marituba, o menor dos municípios da RMB em termos territoriais, está no centro da RMB e conurbado com Ananindeua, ocasionado pelo crescimento urbano acelerado no município de Ananindeua nas décadas de 1980 e 1990, que atingiu a maior taxa de crescimento populacional da RMB. Em

13/12/1991, Santa Bárbara do Pará foi elevado à categoria de município pela lei estadual nº 5693, pois antes era distrito de Benevides. Pouco depois, em 22/09/1994, Marituba passou a categoria de município pela Lei Estadual nº 5.857, pois antes pertencia a Benevides.

Rodrigues et al. (2020) corroboram relatando que ao longo das últimas décadas, algumas ocupações informais foram reconhecidas pelo poder público e sofreram ações de intervenção, consolidados por meio de políticas públicas, como no caso do Programa de Aceleração do Crescimento (PAC), iniciado em 2008, que contemplou diversos assentamentos informais na RMB, com ações de urbanização e regularização.

Em síntese, a RMB foi instituída pela Lei Complementar Federal nº 14/1973 e era composta apenas pelos municípios de Belém e Ananindeua. Em 1995, através da Lei Complementar Estadual nº 27/1995, os municípios de Marituba, Benevides e Santa Bárbara do Pará foram incluídos. Em 2010, a Lei Complementar Estadual nº 72/2010 incluiu o município de Santa Izabel do Pará, e em 2011, a Lei Complementar Estadual nº 76/2011 incorporou o município de Castanhal.

Portanto, a atual RMB está delimitada pela soma dos espaços territoriais de sete municípios: Ananindeua, Belém, Benevides, Castanhal, Marituba, Santa Bárbara do Pará e Santa Izabel do Pará. A Tabela 1, a seguir, elenca alguns Dados Populacionais da RMB, apresentando estimativas de população, área em Km² e densidade demográfica.

Tabela 1. Dados Populacionais da RMB

Código do Município (IBGE)	Município	População Estimada IBGE (2020)	Área total (Km²)	Densidade demográfica (Hab/Km²)
1500800	Ananindeua	535547	190.6	2810.1
1501402	Belém	1499641	1059.5	1415.5
1501501	Benevides	63768	187.8	339.5
1502400	Castanhal	203251	1029.3	197.5
1504422	Marituba	133685	103.2	1295.2
1506351	Santa Bárbara do Pará	21449	278.2	77.1
1506500	Santa Izabel do Pará	71837	717.7	100.1
Totais (RMB)		2529178	3566.3	709,2

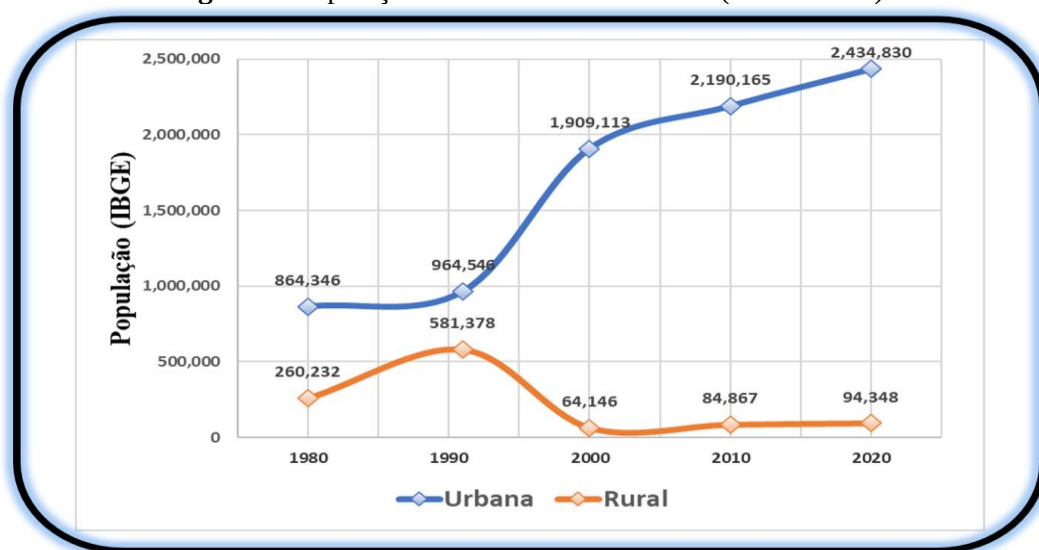
Fonte: IBGE (2021)

A Tabela 1 apresenta, na sua primeira coluna, o código identificador do município no cadastro IBGE. Pode-se inferir que a área total da RMB é de 3.566,3 Km², equivalente a soma das áreas dos sete municípios, correspondendo a apenas 2,86% do território do Estado do Pará. Ainda assim, a população na RMB totaliza 2.529.178 habitantes, condizendo a 29,1% de toda a população do Estado e densidade demográfica de 709,2

hab/km² frente aos 6,98 hab/km² do Pará, desta forma, consolidando-se como uma região populosa e urbanizada.

A Figura 2 apresenta a População Urbana e Rural da RMB (1980 a 2020), e de acordo com estimativa do IBGE, a população atual da RMB é de 2.529.178, considerando a soma da população urbana e rural, conforme pode ser observado. A partir dos dados coletados dos censos dos anos de 1980, 1991, 2000 e 2010 e estimativa para 2020 é perceptível que a linha que representa o quantitativo da população da área urbana é sempre crescente. A população urbana que em 1980 era de 864.346 habitantes, passou para o patamar de 2.434.830 em 2020, resultando num crescimento de 281,7%. Por outro lado, a população rural que era 260.232 habitantes em 1980, diminuiu para 94.348 em 2020, ou seja, reduziu para pouco mais de um terço do total populacional em 1980, resultando, dessa forma numa linha com tendência decrescente.

Figura 2: População Urbana e Rural da RMB (1980 a 2020).



Fonte: Gutierrez e Souza (2021).

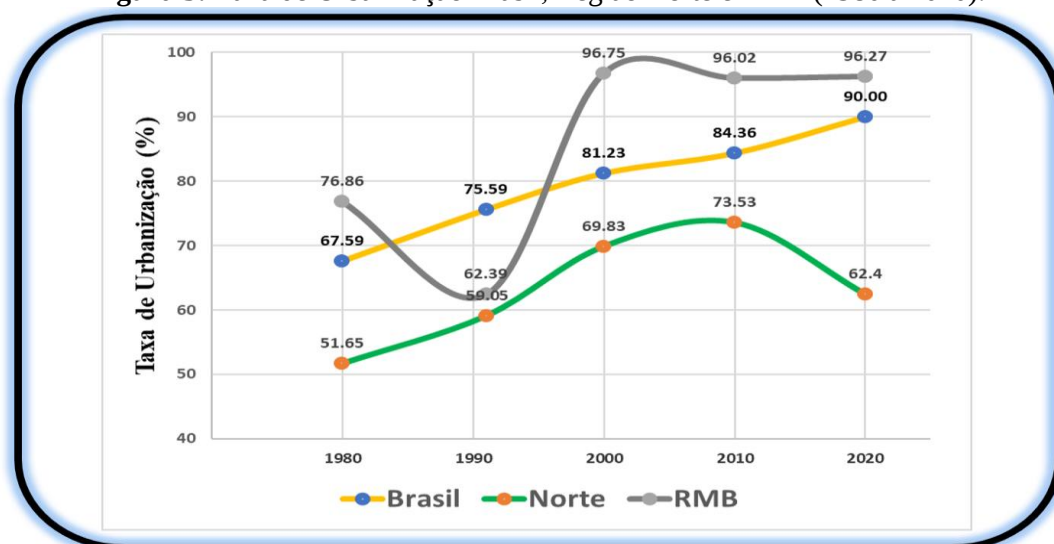
Ainda observando-se a Figura 2, nota-se que população total (urbana+rural) da RMB em 1980 era de 1.124.578 habitantes e passou para o patamar de 2.529.178 em 2020, resultando num crescimento de 224,90% para o período. Essa diferença é equivalente a um total de 1.404.600 pessoas, bem maior que a atual população de 15 capitais brasileiras, dentre elas: São Luis (1.108.975), Maceió (1.025.360), Campo Grande (906.092), Natal (890.480), etc.

A Figura 3 a seguir, apresenta a Taxa de Urbanização Brasil, Região Norte e RMB (1980 a 2020). O propósito é ter um parâmetro de comparação da taxa de urbanização da RMB em relação a Região Norte, onde ela se insere, e ao Brasil. Notadamente, segundo

dados coletados e estimados pelo IBGE, a RMB apresenta hoje taxa de urbanização (96,27%) com índice maior que da Região Norte (62,4%) e do Brasil (90%).

O último censo brasileiro (2010) reportou as taxas de urbanização de 84,36% para o Brasil, 73,54% para Região Norte e 96,02% para Região Metropolitana de Belém, conforme pode-se observar, evidenciando a alta taxa de urbanização da região.

Figura 3: Taxa de Urbanização Brasil, Região Norte e RMB (1980 a 2020).



Fonte: Gutierrez e Souza (2021).

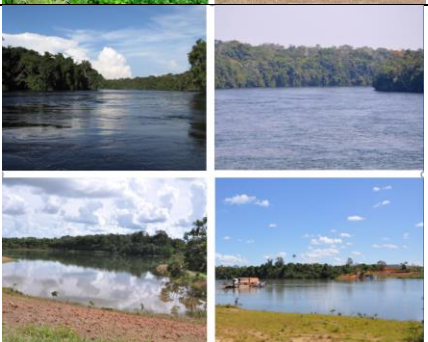
Na Figura 3, na linha (tom cinza) que representa a taxa de urbanização da RMB percebe-se que apenas no censo de 1991 houve queda na taxa, o que é também evidenciado na Figura 2 - População Urbana e Rural da RMB (1980 a 2020), pois, em 1980 a população rural era de 260.232 habitantes e cresceu para 581.378 em 1991. Agregado a isso, a população urbana que em 1980 era de 864.346 habitantes, também cresceu em 1991, passando para 964.546 habitantes, ou seja, houve um crescimento maior na área rural, ocasionando a redução da taxa de urbanização, mas notadamente a população total permaneceu crescente no intervalo entre os dois censos (1980 e 1991), saindo de 1.124.578 para 1.545.924 habitantes na RMB.

2.3.2 Classes de Coberturas de Terras

Uma vez que este estudo propôs fazer a análise da dinâmica multitemporal da urbanização na RMB, através de sensoriamento remoto, quatro classes de uso e coberturas foram determinadas utilizando-se o software QGIS.

A Figura 4, apresenta as Classes de Uso e Cobertura classificadas para este estudo com breve descrição e imagens ilustrativas que sugerem a cobertura correspondente. As imagens foram obtidas e adaptadas do projeto TerraClass Amazônia (INPE, 2021).

Figura 4: Classes de Uso e Cobertura.

Classe	Descrição	Imagem
Urbana	Áreas cujas características originais foram alteradas para fins urbanos ou de influência urbana. Ex: construção de casas, prédios, vilarejo, lugarejo, povoado, aldeia, assentamento.	
Vegetação	Qualquer vegetação primária, secundária, que apresente indivíduos lenhosos, arbustos, silvicultura, agricultura perene ou temporária.	
Água	Coberturas cujo resposta espectral seja compatível com massas d'água. Ex: rios, lagos, açudes, lagoas, represas, cursos d'água, lagoas.	
Antropizada	Áreas cujas características originais foram alteradas pelo homem, com atividades antrópicas para fins sociais ou econômicas ou culturais sobre o ambiente, com resposta espectral diferente da classe urbana. Ex: cobertura vegetal suprimida, mineração, solo exposto, áreas queimadas, afloramentos rochosos.	

Fonte: Gutierrez e Souza (2021).

2.3.3 Aplicação dos Índices Físicos

Ao concluir os cálculos dos índices físicos, para cada ano de estudo, obtiveram-se as imagens apresentadas nas Figuras 5, 6, 7, 8, 9 e 10, as quais apresentam os mapas RGB de distribuição espacial de cobertura do solo, NDVI, NDBI e NDWI para os anos 1984, 1989, 1995, 1999, 2008 e 2020, respectivamente. A interpretação sobre as respostas espectrais produzidas nestas Figuras é descrita a seguir.

Os cálculos dos índices resultaram valores entre -1 e +1. Assim, o NDWI obteve valores maiores que zero e próximos de +1 para as áreas apontadas como corpos d'água no treinamento supervisionado de classificação, a exemplo de áreas como o Rio Guamá, Lago Bolonha, Lago da Água Preta e outros corpos d'água visualmente identificáveis no interior da RMB. Desta forma, o NDWI realçou feições características de ambiente aquático com áreas em azul escuro onde os valores foram de pixel altos. As coberturas que tiveram valores próximos de zero (valores médios) foram compatíveis com às áreas de vegetação. Por fim, o retorno espectral foi negativo (azul claro) em áreas antropizadas.

O NDVI obteve-se contrastes mais acurados para fitofisionomias relacionados ao verde da cobertura, pois o índice espectral realçou áreas onde a classificação supervisionada detectou presença de floresta e áreas verdes, cujos valores dos pixels aproximaram-se de +1. Valores negativos (próximo de -1) de NDVI são áreas compatíveis a corpos d'água. Sob o mesmo ponto de vista, áreas na cor verde claro retornaram valores médios (próximo de zero) de NDVI, compatíveis às áreas construídas, áreas urbanas, ou seja, áreas antropizadas.

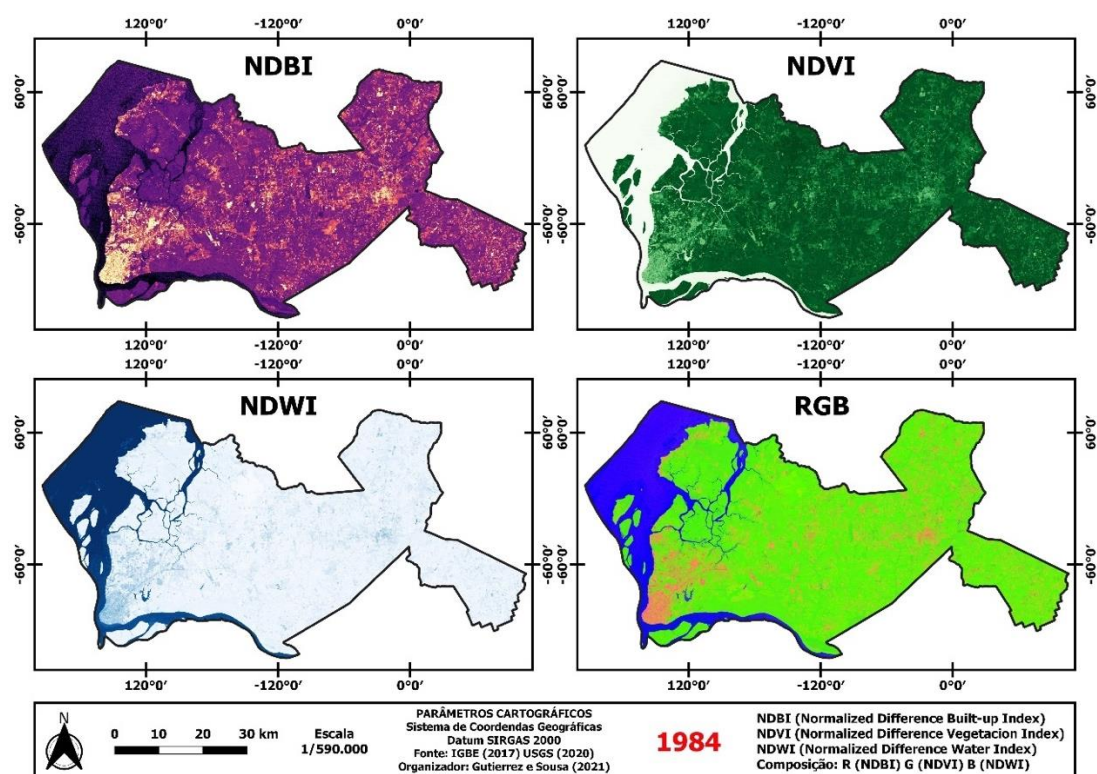
O NDBI foi utilizado para extração de áreas antropizadas das imagens estudadas. A equação resultou valores positivos e próximos de +1 em áreas urbanas, áreas construídas, áreas com solo exposto e outras áreas similares, conforme determinado no treinamento de classificação. O índice espectral NDBI também retornou valores negativos (próximo de -1) para pixels na cor preta, que correspondem às áreas de distribuição dos corpos d'água. As áreas em tom lilás/laranja retornaram valores médios, cuja resposta espectral é compatível com as superfícies de vegetação.

As cores no sensoriamento remoto são derivadas da composição de bandas. O método aplicou a fusão RGB dos índices, combinando as cores Red (NDBI), Green (NDVI) e Blue (NDWI), realçando a distribuição espacial dos padrões de uso e cobertura na RMB. Após fusionar os índices e aplicar falsa-cor, observa-se que as coberturas na cor azul são compatíveis com corpos d'água e foram realçadas pelo NDWI, as coberturas na cor verde são compatíveis com superfícies de vegetação, realçadas pelo NDVI e as

coberturas nas cores laranja/cinza são compatíveis com as áreas antropizadas, realçadas pelo NDBI.

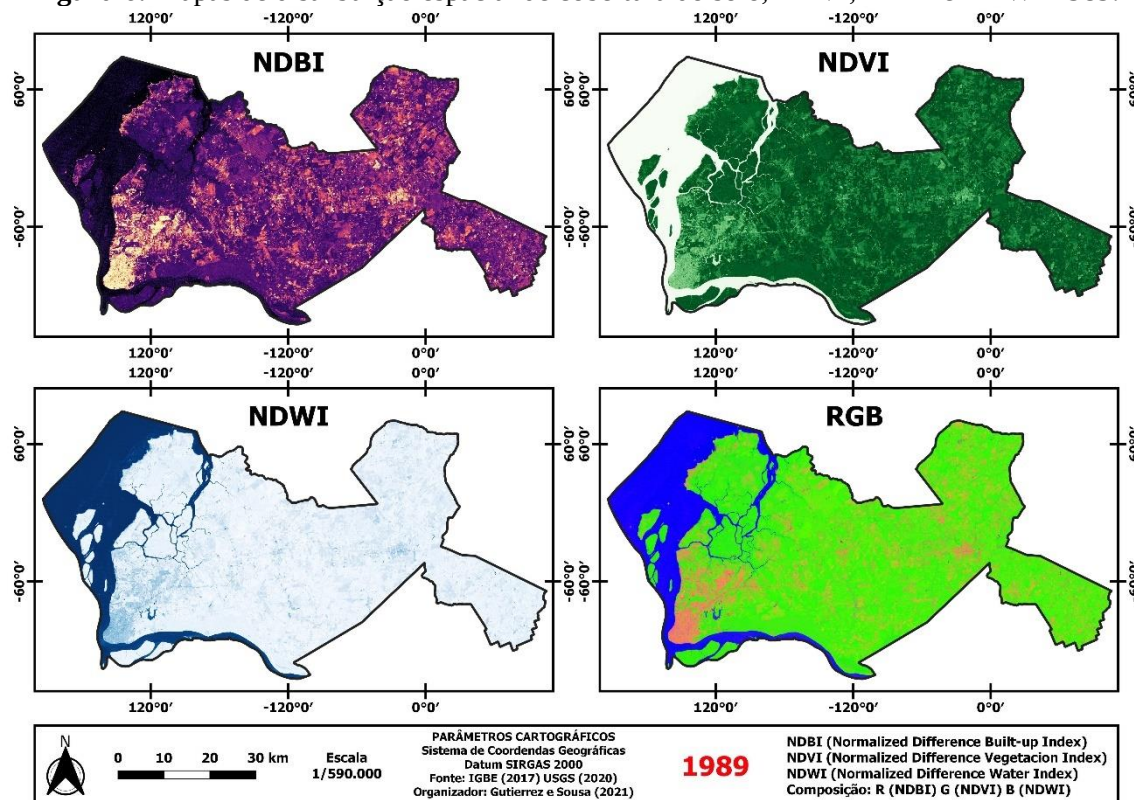
Analisando as imagens de 2020, o padrão de cor do NDBI apresenta-se em tonalidade próximo do laranja. Isso se deve a diferença de sensor, pois as imagens de 1984 a 2008 usam o sensor *Thematic Mapper (TM)*, abordo do satélite Landsat-5 e 2020 é o sensor *Operational Land Imager (OLI)*, abordo do satélite Landsat-8, tecnologias diferentes que realçam de forma diferente quando se faz composição de falsa-cor.

Figura 5: Mapas de distribuição espacial de cobertura do solo, NDVI, NDBI e NDWI-1984.



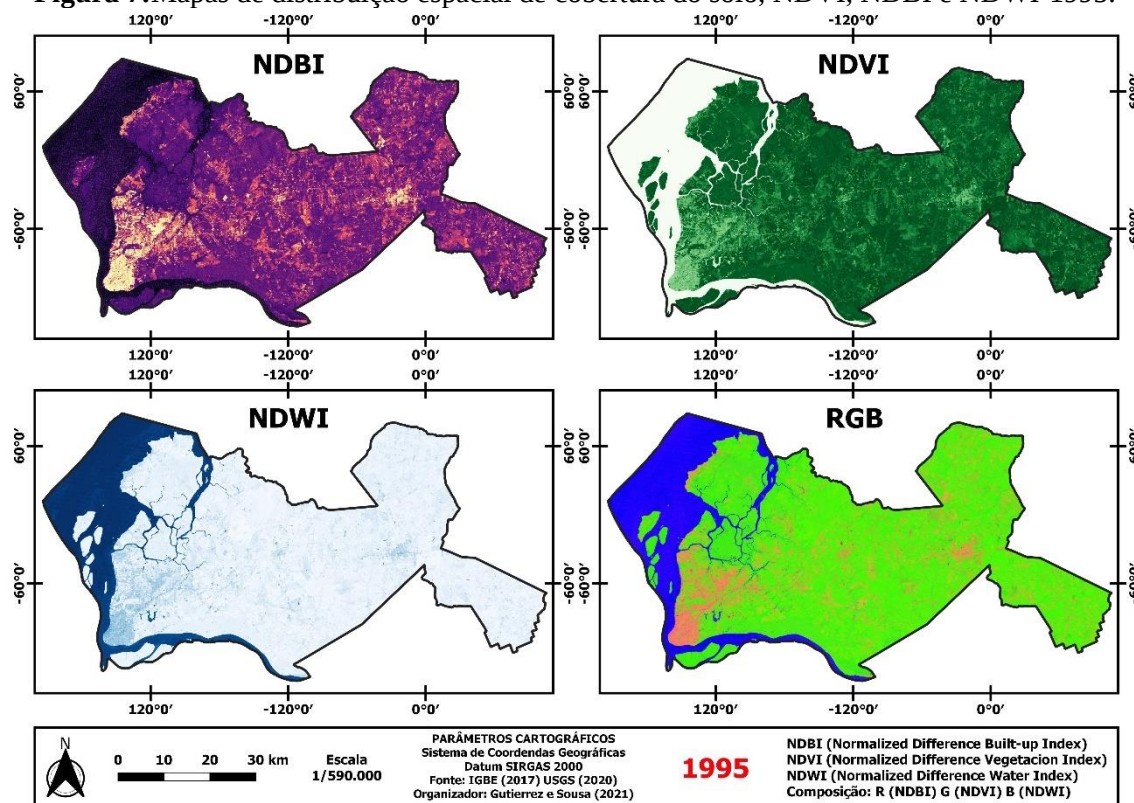
Fonte: Gutierrez e Souza (2021).

Figura 6: Mapas de distribuição espacial de cobertura do solo, NDVI, NDBI e NDWI-1989.



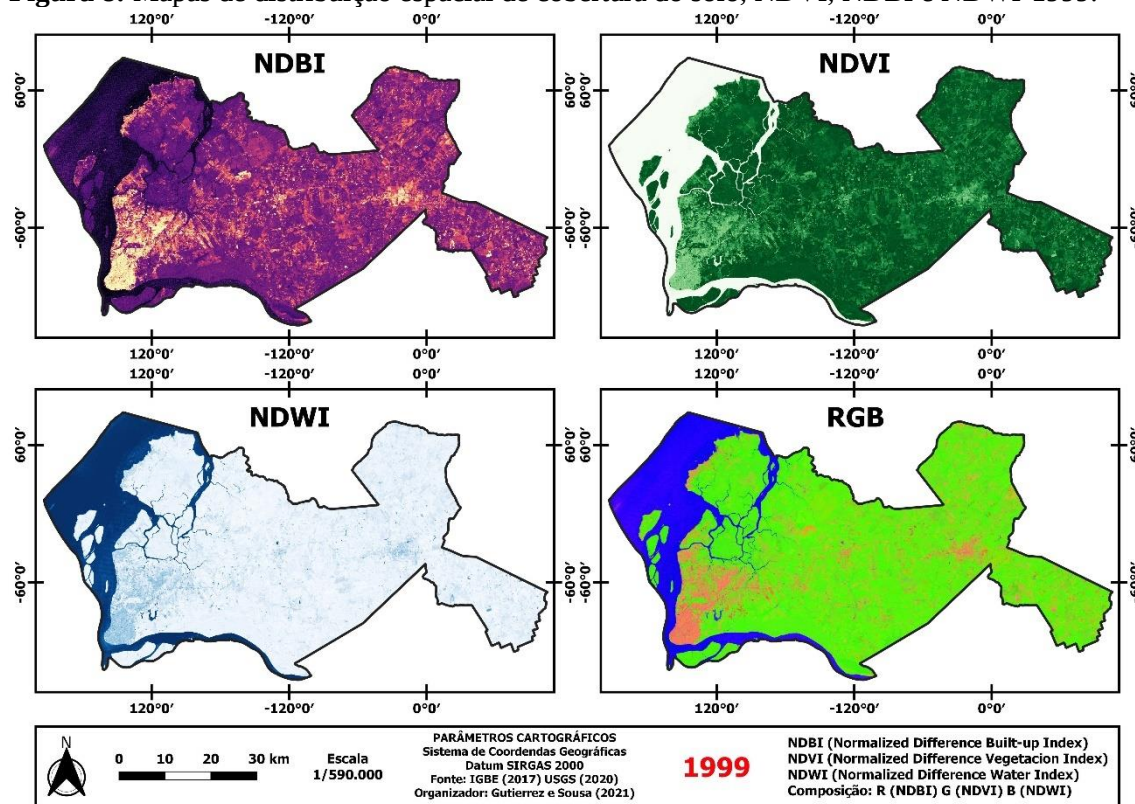
Fonte: Gutierrez e Souza (2021).

Figura 7: Mapas de distribuição espacial de cobertura do solo, NDVI, NDBI e NDWI-1995.



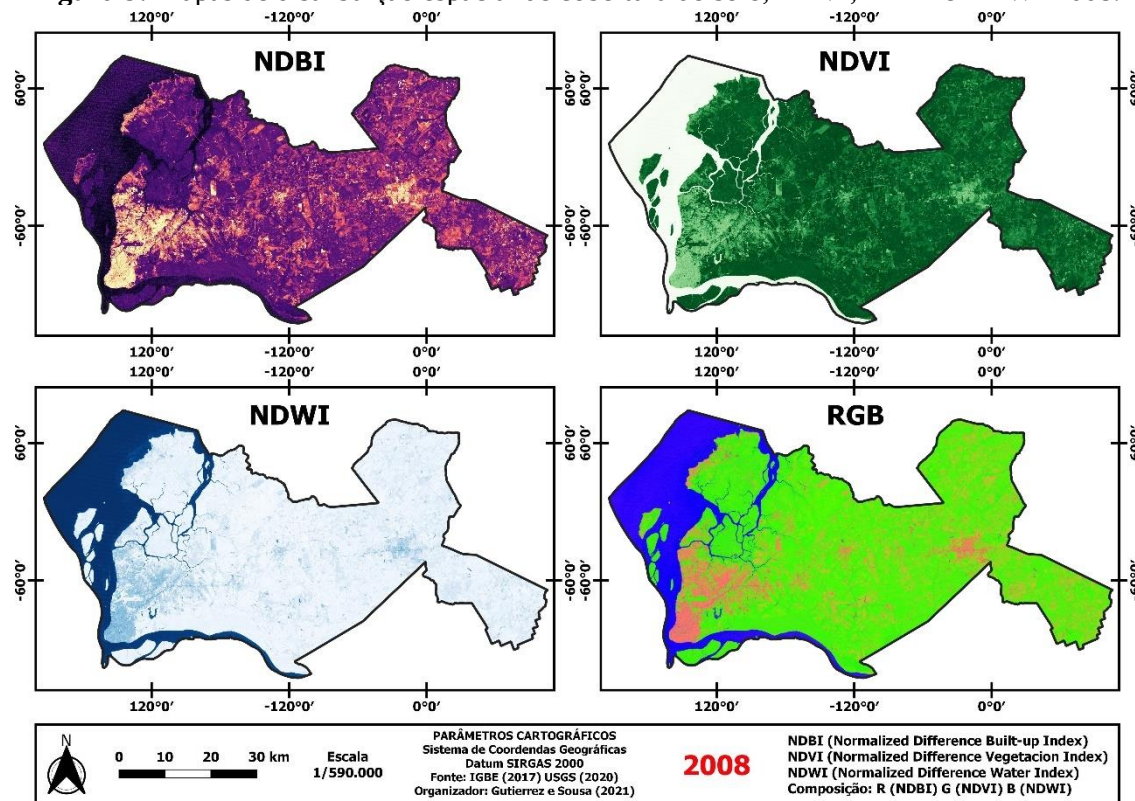
Fonte: Gutierrez e Souza (2021).

Figura 8: Mapas de distribuição espacial de cobertura do solo, NDVI, NDBI e NDWI-1999.

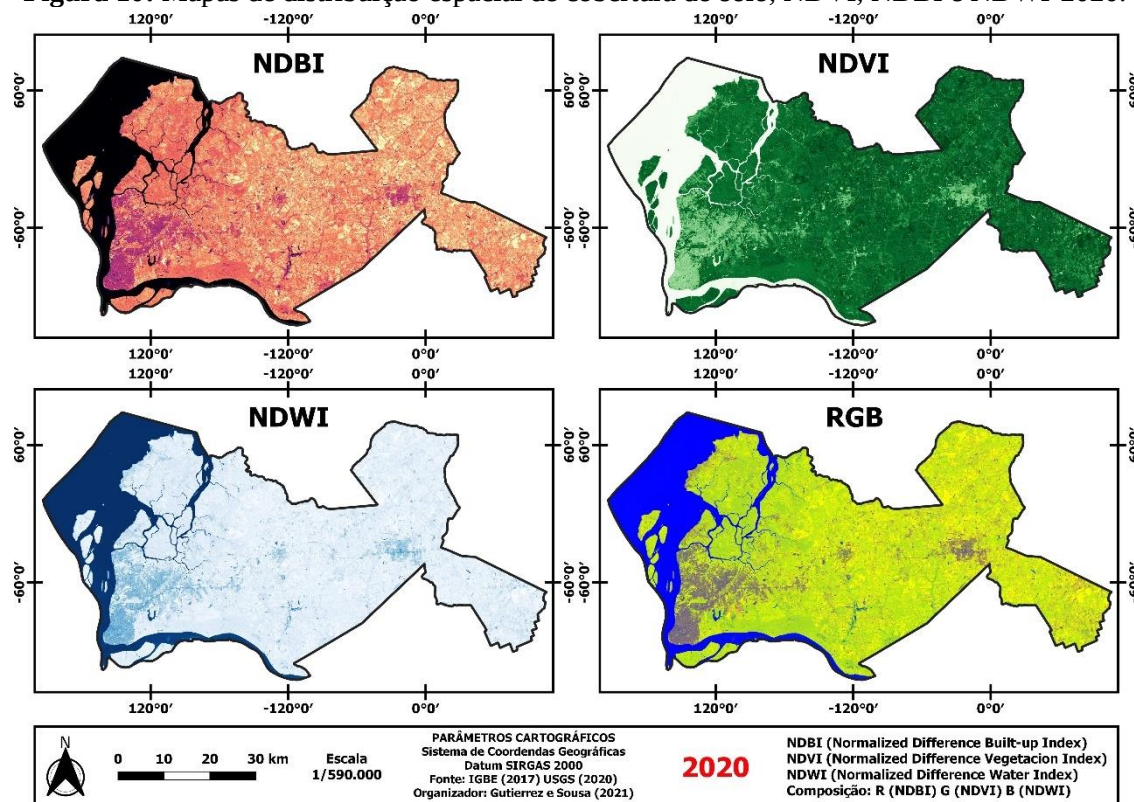


Fonte: Gutierrez e Souza (2021).

Figura 9: Mapas de distribuição espacial de cobertura do solo, NDVI, NDBI e NDWI-2008.



Fonte: Gutierrez e Souza (2021).

Figura 10: Mapas de distribuição espacial de cobertura do solo, NDVI, NDBI e NDWI-2020.

Fonte: Gutierrez e Souza (2021).

2.3.4 Classificação do Uso e Cobertura da RMB

A Tabela 2 apresenta as áreas, em quilômetros quadrado, das classes de uso e cobertura para o período de 1984 a 2020. Para calcular as áreas de coberturas de cada classe, fez-se a vetorização dessas áreas, para cada ano estudado, a partir da ferramenta SIG e calculou-se a área de cada classe, em quilômetros quadrado.

Tabela 2. Áreas das classes (km²) de uso e cobertura para o período de 1984 a 2020.

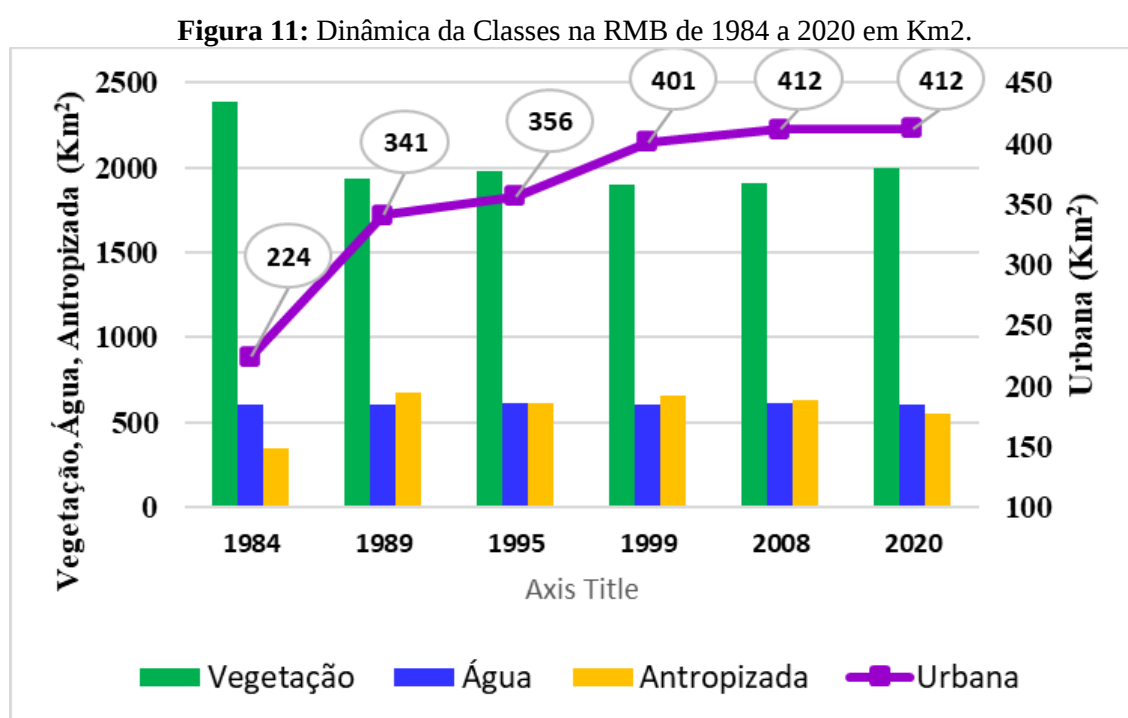
	1984		1989		1995		1999		2008		2020	
	valor	%	Valor	%	valor	%	valor	%	valor	%	valor	%
Urbana	224	6.3	341	9.6	356	10.0	401	11.2	412	11.5	412	11.6
Vegetação	2386	66.9	1939	54.4	1981	55.6	1899	53.2	1912	53.6	1996	56.0
Água	609	17.1	609	17.1	615	17.2	607	17.0	611	17.1	605	17.0
Antropizada	346	9.7	677	19.0	614	17.2	660	18.5	631	17.7	552	15.5

Fonte: Gutierrez Souza (2021).

Conforme pode se observar na Tabela 2, a classe Urbana (casas, prédios, vilarejo, lugarejo, povoado, aldeia, assentamento) é a que cobre menor porção da RMB, mas em contrapartida a que mais cresceu proporcionalmente. No início do estudo (1984) cobria apenas 224 km², equivalente a 6,3% da região, enquanto no final do estudo (2020)

sucedeu para 412 km², similar a 11,6% do total da RMB. Esses dados apontam para um crescimento de 188 km², ou ainda, 184,1%. Desta forma, infere-se que o crescimento do núcleo urbano afetou consideravelmente a paisagem da região, uma vez que a presença humana é o principal fator para antropização do uso e cobertura da terra. Um ponto relevante e que merece destaque é o fato que nos últimos 21 anos (1999 a 2020) a área do núcleo urbano permaneceu quase constante, ainda assim, a população cresceu conforme estimativa IBGE de 1.920.466 para 2.529.178, aumentando o adensamento populacional.

A Figura 11 apresenta a dinâmica das classes na RMB de 1984 a 2020, cujo objetivo é representar graficamente os dados apresentados na Tabela 2, com destaque para classe Urbana que proporcionalmente foi a que mais cresceu no período (184,1%).



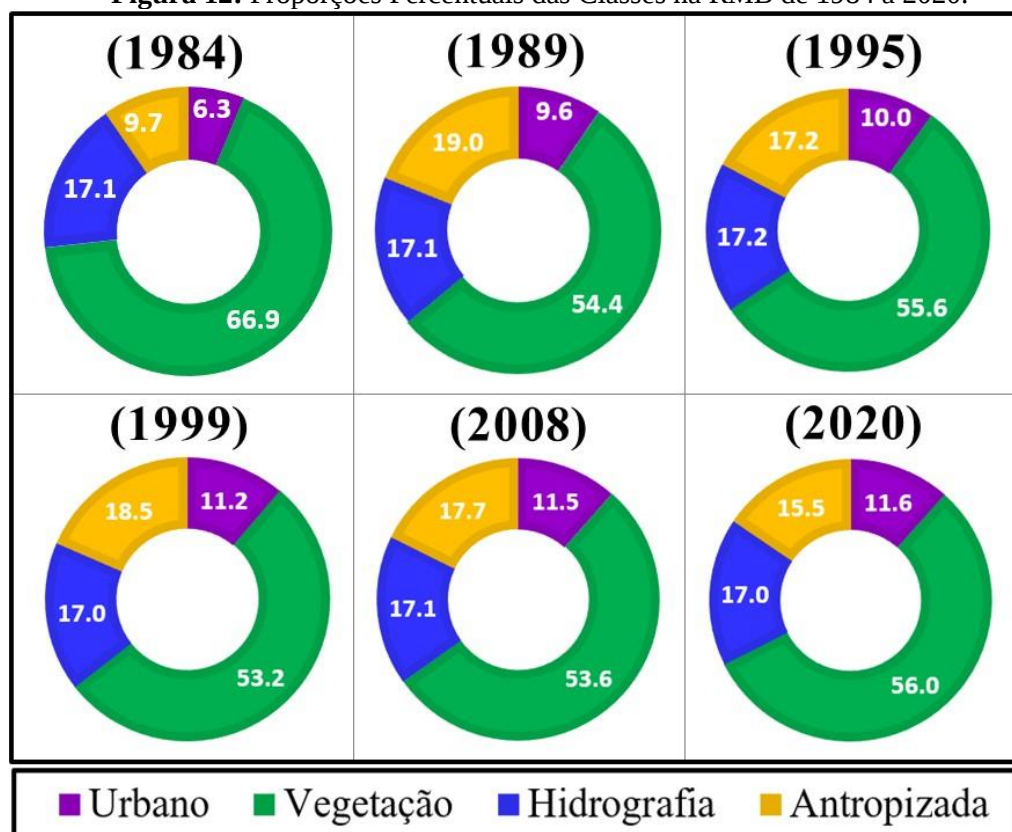
Fonte: Gutierrez e Souza (2021).

As áreas de vegetação, nomeadamente, florestas e áreas verdes, foram as que mais reduziram comparadas aos outros tipos de uso e cobertura na região. Em toda a área de estudo, elas ocupavam o total de 2387 km², representando o grande percentual de 66,9% em 1984. Após 36 anos, passou a ocupar 1996 km² (56,0%). Assim, a supressão de vegetação na região totalizou 390,3 km², possivelmente ocasionadas por ações antrópicas para usos diversos. Essas proporções percentuais podem ser observadas na Figura 12.

Com uma área de cobertura de 609 km², os corpos d'água representavam um (17,1%) da área de estudo em 1984 e no final do estudo em 2020 ocupavam 605 km² (17,0%), conforme Figura 12. Notadamente às áreas dessa classe permanecem quase

estabilizadas durante o período do estudo. Isso se deve ao fato de que o antropismo se deu na área continental e a extensão da RMB incorpora bacias hidrográficas de grandes portes, como é o caso da baía do Marajó, baía do Guajará, baía de Santo Antônio, rio Guamá, rio Acará e muitos outros. Dessa forma, o estudo calculou uma redução de apenas 4 km² nos corpos d'água.

Figura 12: Proporções Percentuais das Classes na RMB de 1984 a 2020.



Fonte: Gutierrez e Souza (2020).

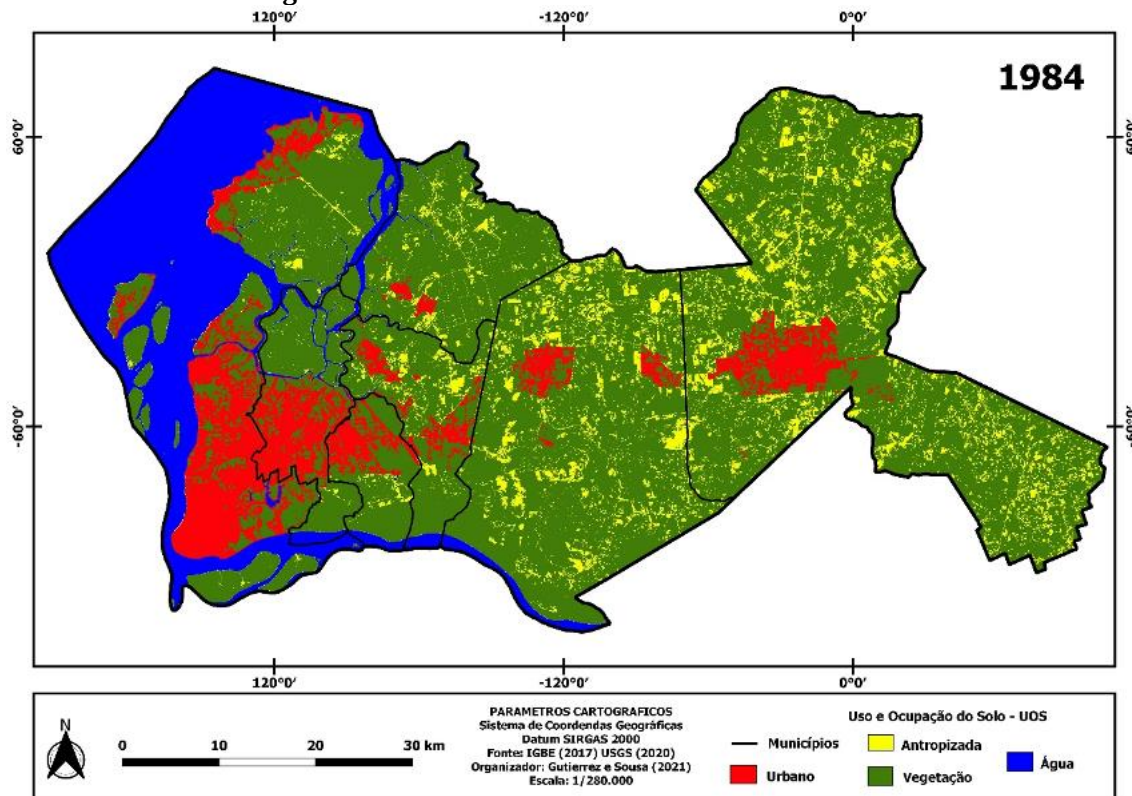
Após transcorridos 36 anos, os resultados indicaram que as áreas antropizadas eram cerca 346 km² em 1984, representando porção de 9,7% da RMB, passando para 552 km² em 2020, correspondendo atualmente a 15,5% do total. Desta forma, determinou-se que a área aumentou em 205,8 km² no período estudado. Reiterando o que já havia sido explanado, neste estudo, as áreas classificadas como antropizadas são aquelas cujas características originais foram alteradas pelo homem, mas que não corresponda a resposta espectral da classe urbana. Isto posto, possivelmente essas áreas correspondem à cobertura vegetal suprimida para culturas agrícolas, pastagem com solo exposto, áreas queimadas e outras áreas afins.

As Figura 13, 14, 15, 16, 17 e 18 apresentam os mapas temáticos do uso e cobertura na RMB dos anos 1984, 1989, 1995, 1999, 2008 e 2020, respectivamente. Nelas as áreas urbanas estão representadas pelas manchas vermelhas, a vegetação pelas cores verdes, os corpos d'água na cor azul e as áreas antropizadas em amarelo.

Os mapas temáticos evidenciaram que as áreas classificadas como antropizadas (manchas amarelas) tiveram maior expansão no primeiro período (1984 a 1989), com perceptível supressão da vegetação (cor verde). Posteriormente, as manchas amarelas oscilaram durante o restante do período de estudo, ora decrescendo, ora crescendo, possivelmente decorrente de atividades agrícolas, pastoris e queimadas, que em dado momento apresentam áreas descampadas ou solo exposto e em outros estão com o solo coberto por vegetação em regeneração. As coberturas de águas (mancha azul), persistem estáveis, em função da presença de grandes corpos d'água (bacias, baías, rios) no polígono que delimita a região. Observa-se também que ao longo do período algumas áreas mantêm-se preservadas/conservadas na região noroeste, sudoeste e sudeste, representadas por manchas verdes em tom escuro. Quanto às áreas urbanizadas (mancha vermelha), visualmente, percebe-se que a mancha se avolumou pouco na parte leste da RMB. A parte central da região comportou-se de forma discreta. E notadamente, os núcleos urbanos se intensificaram a sudoeste da região, onde se encontra a maior parte da população residente – quase 2 milhões de habitantes, segundo estimativa IBGE (2021).

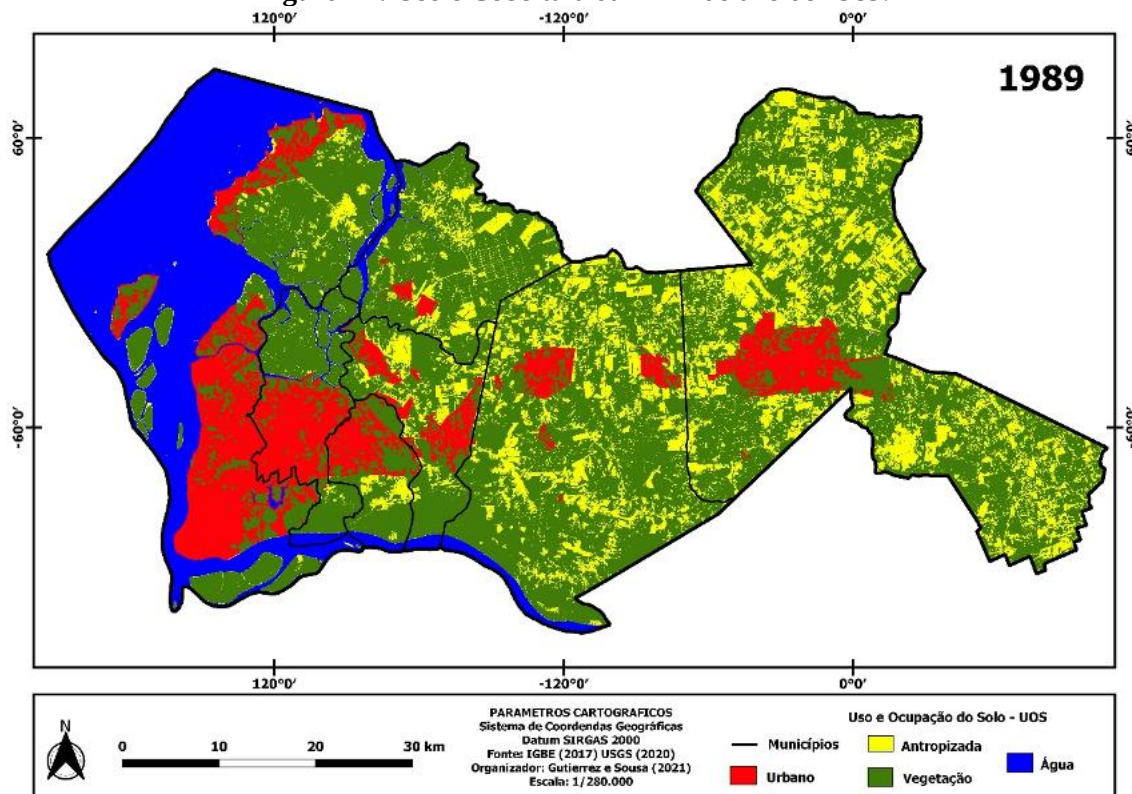
Como o método aplicado no sensoriamento remoto utilizou índices físicos para realçar água (NDWI), vegetação (NDVI), área urbanizada (NDBI) e área antropizada (BSI), o estudo observou também uma quantidade insignificante de áreas (0,5 Km²) que não se identificaram com as classes definidas, ou seja, áreas cuja resposta espectral não corresponderam com as demais. Essas áreas podem ser regiões não mapeadas em função da presença de nuvens, sobra de nuvens, chuvas, fumaça de queimadas, cujo comportamento espectral do sensor do satélite não permitiu ao software clusterizar compativelmente com as outras classes. Outra possibilidade de classificação incompatível com as classes seria a condição atmosférica no momento da cena, como por exemplo insolação que também provocariam dispersão dos valores digitais.

Figura 13: Uso e Cobertura da RMB do ano de 1984.



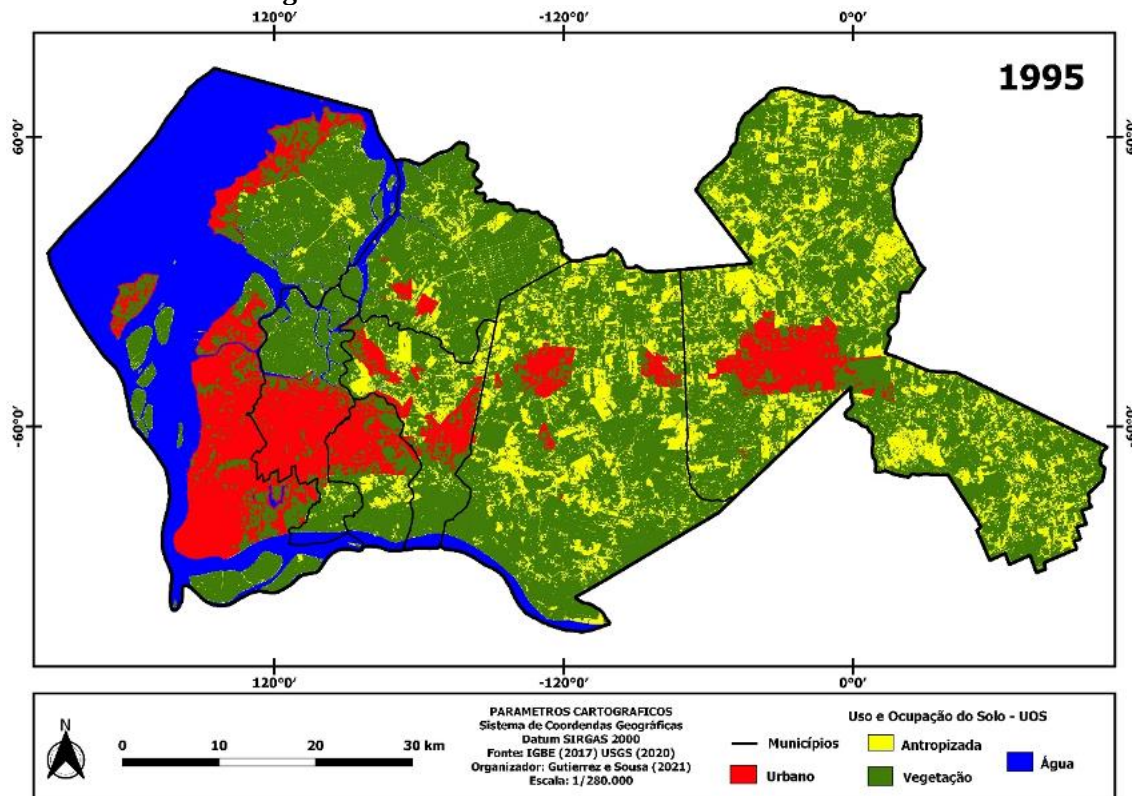
Fonte: Gutierrez e Souza (2021).

Figura 14: Uso e Cobertura da RMB do ano de 1989.



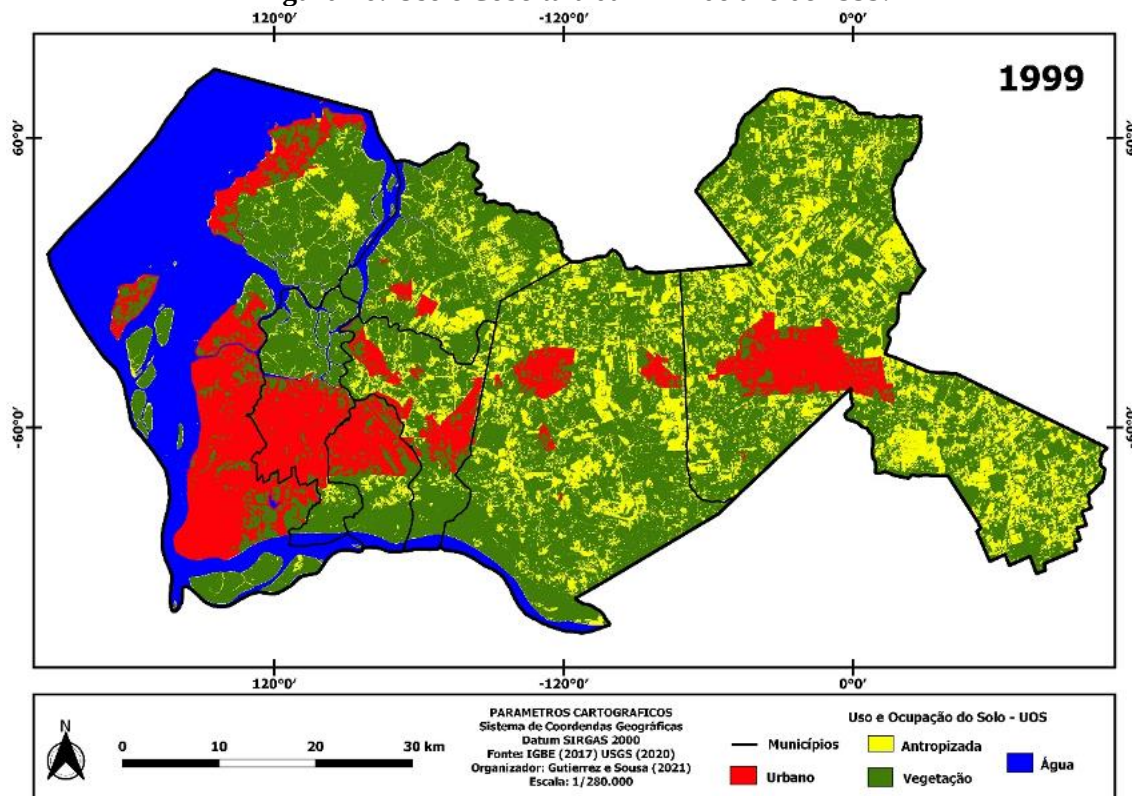
Fonte: Gutierrez e Souza (2021).

Figura 15: Uso e Cobertura da RMB do ano de 1995.



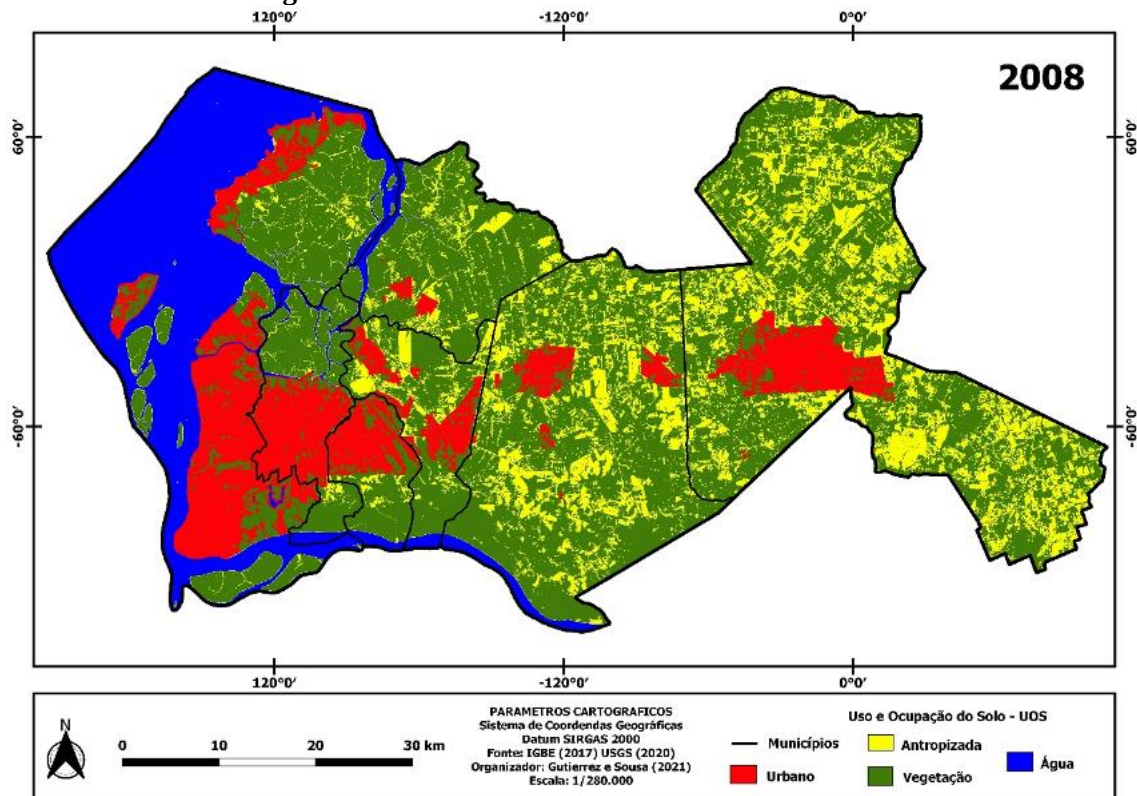
Fonte: Gutierrez e Souza (2021).

Figura 16: Uso e Cobertura da RMB do ano de 1999.



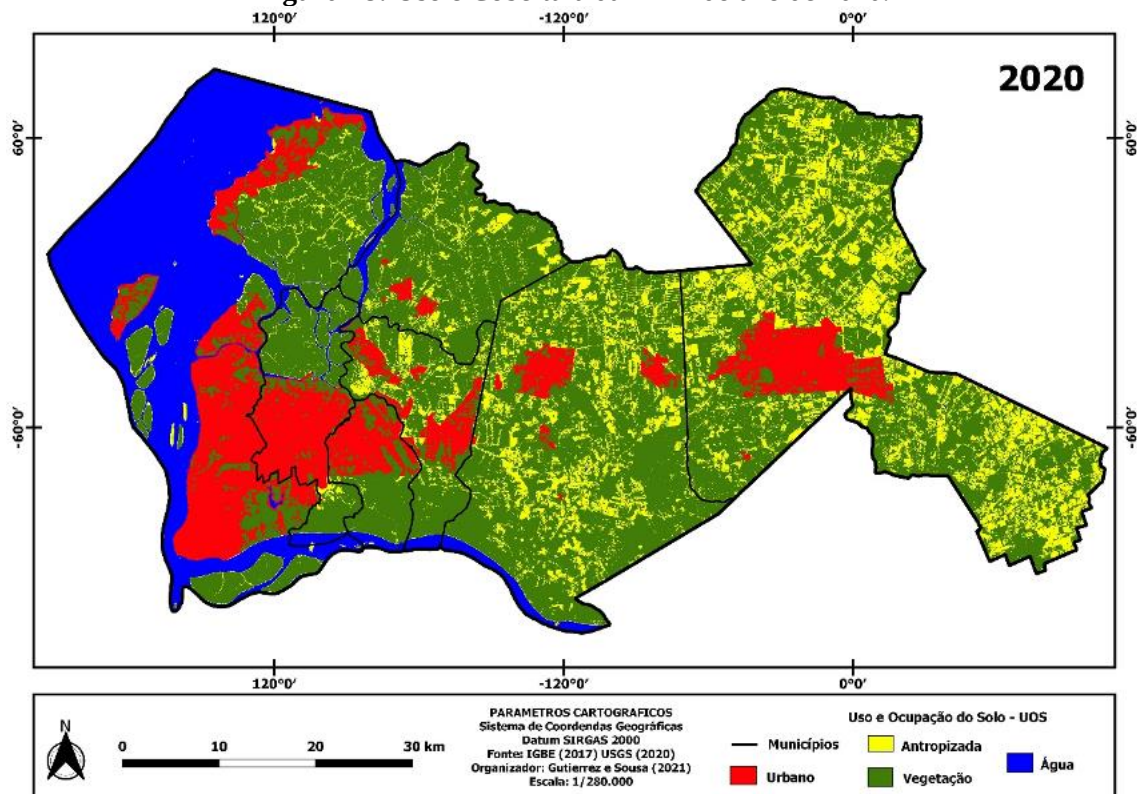
Fonte: Gutierrez e Souza (2021).

Figura 17: Uso e Cobertura da RMB do ano de 2008.



Fonte: Gutierrez e Souza (2021).

Figura 18: Uso e Cobertura da RMB do ano de 2020.



Fonte: Gutierrez e Souza (2021).

2.4 DISCUSSÃO

Correlacionando este estudo com outros, De Sousa et al. (2020) ao estudarem os reflexos socioambientais da expansão metropolitana de Belém, observaram que durante o ciclo da borracha - também apontados por este estudo como um dos marcos para ocupação da região - havia grande interesse do mercado internacional nesse produto, que estimulou a migração nordestina como fonte de mão de obra para implantação de sistemas de transportes interligando o interior com a capital e com a Europa, através de estradas, ferrovias e portos construídos. O estudo indica que a ocupação da região, de maneira geral, foi realizada sem um devido planejamento voltado ao desenvolvimento local.

Este estudo também contextualizou que durante o governo militar no Brasil (1964-1985), grandes projetos econômicos tiveram início com intuito de integração da região Amazônica. Outro estudo correlato, De Almeida e Cañete (2015), abordaram os grandes empreendimentos, a exemplo da construção de barragens, que atraíram grande contingente populacional em busca postos de trabalho na condição de funcionários das grandes empresas que ordenavam o processo de construção. Para os autores, a população viu a possibilidade de perspectivas de trabalho em diferentes setores da economia que se aglutina no entorno desses empreendimentos.

Outro vetor de ocupação relatado nesta pesquisa, reporta que a partir da metade da década de 1980, acelerou-se o movimento das ocupações coletivas via rodovia BR-316, afetando os municípios cortados por esta importante via. O relatório IPEA/IDESP (2013) corrobora retificando que, nos últimos anos, a população da RMB vem crescendo em direção aos municípios localizados ao longo da BR-316, mas apesar dessa constatação, destaca que o município de Santa Bárbara do Pará, que não se insere entre os municípios ao longo da BR-316, obteve a maior taxa de crescimento populacional, que é bem acima da observada para a RMB.

No que concerne aos estudos correlatos que utilizaram metodologias de sensoriamento remoto similares, ZHANG et al. (2021) mapearam áreas urbanas de três cidades na China selecionadas como área de estudo, Pequim, Xi'an e Xiamen. Todas as imagens foram obtidas do Landsat-8 em 2017, calculando-se os índices NDVI, NDBI e NDWI, tal qual este estudo. A pesquisa, objetivou constatar que o método pode ser usado como uma referência para outros estudos de mapeamentos de uso e cobertura da terra. Assim como o presente estudo, os resultados de Zhang e colaboradores mostraram que a qualidade das imagens melhorou significativamente aplicando-se ferramenta de

redução do impacto das nuvens e sombras de nuvens, dessa forma garantindo maior precisão para o mapeamento de áreas urbanas, concluindo que a incerteza devido à confusão espectral entre os diferentes tipos de cobertura pode ser mitigado com uso de filtros. E por fim, os índices de vegetação e água (NDVI e NDWI) são significativos para identificar áreas urbanas quando usados em conjunto com o NDBI.

Oliveira et al. (2019) também fizeram uso de índices físicos NDVI, NDBI e NDWI como suporte para o mapeamento e monitoramento de uso e ocupação da terra, para o ano de 2016, no Estado de Pernambuco, Brasil. Assim como este estudo, a pesquisa de Oliveira e colaboradores aplicou técnica de fusão RGB (R-NDBI, G-NDVI, B-NDWI) dos índices para avaliar o uso e ocupação da terra da área, concluindo que a classe estrada e área construída tiveram resposta espectral similares. Para esta pesquisa que não utiliza a classe estrada, essas respostas espectrais correspondem exatamente a pretensão de classificação, pois o propósito é consolidar qualquer área antropizada numa única classe. No trabalho de Oliveira, também ocorreram confusões na interpretação entre a classe água e as nuvens por apresentarem valores de pixel próximos. Este último problema também não se aplica a este estudo, porque a seleção criteriosa de imagens do satélite garimpou apenas imagens limpas, com pouquíssima ou nenhuma presença de nuvem, além de usar filtro para retirada de possíveis névoas.

2.5 CONCLUSÃO

Os dados quantitativos e dados imageados gerados por este estudo sugerem que, com o passar dos anos, a concentração populacional particularmente na porção sudoeste da RMB poderá saturar e apresentar altas taxas de urbanização e adensamento.

Esta pesquisa não apenas examinou a dinâmica espaço-temporal da RMB, mas também forneceu uma compreensão mais profunda e detalhada da expansão urbana na região, revelando que as áreas verdes foram acometidas de supressão vegetal de mais de 390 km². Essa perda corresponde a uma área maior que as ocupadas por muitas capitais brasileiras (Belo Horizonte, Fortaleza, Recife, Natal, Vitória e outras).

O estudo também constatou que a população rural reduziu e a urbana aumentou demasiadamente, uma vez que a RMB apresenta hoje taxa de urbanização de 96,27%, com índice maior que da Região Norte (62,4%) e do Brasil (90%). O sensoriamento remoto determinou que existe má distribuição da massa populacional, concentrando-se em maior quantidade na parte sudoeste da região.

As áreas antropizadas também passaram a se estender de forma distribuída dentro da região, notadamente em alguns períodos cobrindo mais de 20% da área total da RMB.

O estudo alcançou seu objetivo, uma vez que propôs analisar a dinâmica multitemporal da urbanização na atual RMB, por meio de sensoriamento remoto, evidenciando o antropismo mediante a constatação do crescimento populacional na região.

Ao aplicar o uso de índices físicos (NDBI, NDVI, NDWI e BSI), foi possível realçar as coberturas de interesse para estudo e medi-las, possibilitando, dessa forma, o monitoramento dinâmico multitemporal. Portanto, infere-se que os índices de sensoriamento remoto também podem ser incorporados para fornecer mais informações sobre o ambiente urbano e regional. Assim, a escolha dessa metodologia pode ser considerada um ponto forte neste estudo.

O uso de índices pode apresentar desvantagens, ou seja, pode se tornar um ponto fraco, pois a fórmula do NDWI tende a retornar valores positivos com presença de chuvas, o NDBI pode confundir retorno o espectral de banco de areia como área urbana e o NDVI pode classificar áreas com arbustos espaçados como solo exposto ou área urbana. Esses problemas não se aplicaram neste estudo porque houve preocupação de selecionar cenas de imagens de satélite no período do regime seco amazônico, em dias limpos, sem presença de nuvens, além da classificação ter sido supervisionada e sem divisão em subclasses.

A principal limitação deste estudo foi a impossibilidade de obter dados de satélite de mais alta resolução para o período estudado, uma vez que as imagens compreendem período de 36 anos.

Propõe-se como recomendação para estudos futuros, o monitoramento apenas dos núcleos urbanos com imagens de altíssima resolução; a aplicação do mesmo método, mas com imagens de outros satélites que não os Landsat; e por fim, o uso de outros índices físicos combinados aos utilizados neste estudo para aprimorar o método e mitigar possíveis erros de classificação.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais da UFPA (Universidade Federal do Pará), vinculado ao Instituto de Geociências - IG da Universidade Federal do Pará (UFPA), em parceria com as instituições de pesquisa

Museu Paraense Emílio Goeldi (MPEG) e Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA/Amazônia Oriental). Agradecem também à Universidade do Estado do Pará (UEPA) pela concessão da bolsa de doutorado.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, Antonio José Pereira; NETO, José Vicente Ferreira. MAPEAMENTO DE ÁREAS IMPERMEÁVEIS PARA CARACTERIZAÇÃO DA URBANIZAÇÃO DA BACIA ENDORREICA DO TABULEIRO DO MARTINS, MACEIÓ/AL. **Revista Contexto Geográfico**, v. 2, n. 3, p. 100-109, 2018.
- ALMEIDA, Neila de Jesus Ribeiro; CAÑETE, Voyner Ravena. RECURSOS NATURAIS E COTIDIANO: POPULAÇÃO RIBEIRINHA E A GESTÃO DA RDS ALCobaça-UHE TUCURUÍ/PA. **Tessituras: Revista de Antropologia e Arqueologia**, v. 3, n. 1, p. 191, 2015.
- ALTHOR, Glenn; WATSON, James EM; FULLER, Richard A. Global mismatch between greenhouse gas emissions and the burden of climate change. **Scientific reports**, v. 6, n. 1, p. 1-6, 2016.
- ARAÚJO, T. D.; FONSECA, E. L. Análise Multitemporal dos Lençóis Maranhenses entre 1984 a 2014 utilizando Sensoriamento Remoto orbital. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, n. 1, p. 280-295, 2016.
- BECKER, Bertha K. A Urbe Amazônida. A floresta e a cidade. Rio de Janeiro: Editora Garamond, Rio de Janeiro, 2018.
- CHEN, Wanhui; LIANGYUN, Liu; CHAO, Zhang; JIHUA, Wang; JINDI, Wang; YUCHUN, Pan. Monitoring the seasonal bare soil areas in Beijing using multitemporal TM images. In: **IGARSS 2004, IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium**. IEEE, 2004. p. 3379-3382, 2004.
- CHHETRI, Parveen K.; THAI, Eric. Remote sensing and geographic information systems techniques in studies on treeline ecotone dynamics. **Journal of Forestry Research**, p. 1-11, 2019.
- COELHO, I. A. M.; DUARTE, S. M. A.; COELHO, O. A. M. Estudo da dinâmica da cobertura vegetal no município de Floresta/PE através de processamento digital de imagens. **Revista GEAMA**, v. 2, n. 1, 2015.
- DA SILVA, Gabriella Ferreira; DE CARVALHO, Marcus Vinícius Alves; CRUZ, Carla Bernardete Madureira. ANÁLISE ESPAÇO-TEMPORAL DO DESASTRE AMBIENTAL EM MARIANA-MG A PARTIR DAS GEOTECNOLOGIAS. **Revista Continentes**, n. 13, p. 49-67, 2019.
- DA TRINDADE, Saint-Clair Cordeiro. Uma Floresta Urbanizada? Legado e Desdobramentos de uma Teoria sobre o Significado da Cidade e do Urbano na Amazônia. **Espaço Aberto**, v. 3, n. 2, p. 89-108, 2013.
- DE SOUSA, Eliezilda Oliveira; RIBEIRO, Priciane Cristina Correa; SANCHES, Heloisa Negri. Os reflexos socioambientais da expansão metropolitana de Belém sobre a Comunidade Remanescente Quilombola de Abacatal (CRQA). **Revista Cerrados**, v. 18, n. 01, p. 129-158, 2020.
- DIAS, Luanna Costa; DA CRUZ VALENTE, Alexandre Miguel; FERNANDES, Lindemberg Lima. Análise e correlação de variáveis climatológicas com os fenômenos climáticos e a urbanização na Cidade de Belém, no Estado do Pará, região Norte do Brasil. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 8, p. e972986790-e972986790, 2020.
- DIAS, Solange Valadares. Licenciamento Ambiental: as sobreposições das ações entre; caso, três níveis de governo: o caso do Estado do Pará. 125p., 2010. Licenciamento ambiental. Dissertação (Mestrado em gestão de Recursos Naturais e Desenvolvimento Local na Amazônia) – **Núcleo do Meio Ambiente, Universidade Federal do Pará**, Belém, 2010.
- FENZL, Norbet; SOMBRA, Daniel; DO CANTO, Otávio; FARIAS, André; NASCIMENTO, Fernanda. OS ‘GRANDES PROJETOS’ E O PROCESSO DE URBANIZAÇÃO DA AMAZÔNIA BRASILEIRA: consequências sociais e transformações territoriais. **InterEspaço: Revista de Geografia e Interdisciplinaridade**, v. 5, n. 19, 2020.

FRIMPONG, Bernard Fosu; MOLKENTHIN, Frank. Tracking Urban Expansion Using Random Forests for the Classification of Landsat Imagery (1986–2015) and Predicting Urban/Built-Up Areas for 2025: A Study of the Kumasi Metropolis, Ghana. **Land**, v. 10, n. 1, p. 44, 2021.

FUJACO, Maria Augusta Gonçalves; LEITE, Mariangela Garcia Praça; MESSIAS, Maria Cristina Teixeira Braga. Análise multitemporal das mudanças no uso e ocupação do Parque Estadual do Itacolomi (MG) através de técnicas de geoprocessamento. **REM: Revista Escola de Minas**. Ouro Preto, v. 63, n. 4, p. 695-701, 2010.

GUTIERREZ, Carlos B. Barreiros; RIBEIRO, Hebe M. Campos; GUTIERREZ, Dione M. Gomes; MORALES, Gundisalvo Piratoba; DOS SANTOS, Leonardo Sousa; DE PAULA, Manoel Tavares. Análise espaço-temporal do uso e cobertura do solo no interior da APA Belém e correlação com os parâmetros de água dos seus mananciais. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 10, n. 1, p. 521-534, 2017.

HÜFFNER, João Gabriel Pinheiro; BELLO, Leonardo Augusto Lobato. Análise dos impactos ambientais da expansão urbana na ilha de Cotijuba, Belém-pa. **Caminhos de Geografia**, v. 13, n. 44, 2013.

IBGE - **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Censo Demográfico. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pa/belem/panorama>. Acesso em: 20/02/2021.

INPE - Instituto Nacional De Pesquisas Espaciais. Desmatamento por municípios. Projeto TERRACLASS AMAZÔNIA. São José dos Campos, São Paulo: **Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais**, 2014. Disponível em: <http://www.inpe.br/noticias/arquivos/pdf/TerraClass_2014.pdf> Acesso em 11/03/2021.

IPEA/IDESP. Relatório de Pesquisa 1.2: Análise Comparativa das Funções Públicas de Interesse Comum. Região Metropolitana de Belém. Brasília: 2013.

LACERDA, Alberto Franco. O Estudo de Uso e Cobertura do Solo para a bacia hidrográfica do rio Carinhanha (BA/MG). **Revista Brasileira de Sensoriamento Remoto**, v. 1, n. 2, 2021.

LACERDA, Elisângela Gonçalves; DINIZ, Alexandre Magno. GÊNESE URBANA NA AMAZÔNIA SETENTRIONAL: CONSIDERAÇÕES A PARTIR DO MUNICÍPIO DE RORAINÓPOLIS-RR. **Acta Geográfica**, v. 14, n. 34, p. 216-241, 2020.

LIAQUT, Anum; YOUNES, Isma; SADAF, Rakhshanda; ZAFAR, Haris. Impact of Urbanization Growth on Land Surface Temperature using remote sensing and GIS: A Case Study of Gujranwala City, Punjab, Pakistan. **International Journal of Economic and Environmental Geology**, p. 44-49, 2019.

LOMBARDO, M. A. Análise das mudanças climáticas nas metrópoles o exemplo de São Paulo e Lisboa. **In SciELO Books: impactos socioambientais no espaço urbano [online]**. São Paulo: Editora UNESP; São Paulo: Cultura Acadêmica, 2009. 146 p. ISBN 978-85-7983-007-5.

LOVISI, Tahmires Pinnola; SEABRA, Vinicius da Silva. Análise de Dados Censitários e Temáticos na Caracterização da Ocupação Urbana dos Bairros de Niterói. **Revista Continentes**, n. 8, p. 6-20, 2016.

MCFEETERS, Stuart K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. **International journal of remote sensing**, v. 17, n. 7, p. 1425-1432, 1996.

MELLO, Andréa Hentz; FEITOSA, Nathália Karolinne. Dinâmicas da ocupação territorial na Amazônia: Reflexões sobre os impactos socioambientais pós-pandemia decorrentes do avanço do desmatamento. **Unifesspa: Painel Reflexão em tempos de crise**, v. 15, 2020.

MOREIRA, M. A. Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação. 4a. edição. Viçosa: Ed. UFV. ISBN13: 9788572693813. 2011.

OLIVEIRA, Claudianne Brainer de Souza; CANDEIAS, Ana Lúcia Bezerra; JÚNIOR, João Rodrigues Tavares. Utilização de índices físicos a partir de imagens OLI–TIRS para o mapeamento de uso e cobertura da terra no entorno do aeroporto internacional do Recife/Guararapes–Gilberto Freire. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 12, n. 03, p. 1039-1053, 2019.

PADILHA, R.; PORTUGAL, J. L.; DOS SANTOS, A. V.; PEREIRA, S. V.; DO CARMO, T. V. B. Proposição de Modelo de Corredores Ecológicos com Base no Sistema de Informações Geográficas na Região de Suape, Pernambuco, Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, n. 1, p. 079-090, 2016.

PINHEIRO, Andréa; LIMA, José Júlio Ferreira; DE SÁ, Maria Elvira Rocha; PARACAMPO, Maria Vitória. A questão habitacional na Região Metropolitana de Belém. **Revista Habitare. Porto Alegre: ANTAC**, 2007.

- PONTE, F. C.; FURTADO, A. M. M., DA SILVA, C. N.; DA SILVA, J. M. P.; LIMA, R. S. Parâmetros Fisiográficos e Impactos Ambientais da Rodovia Santarém-Cuiabá (BR-163), Estado do Pará, Brasil. **REDE-Revista Eletrônica do PRODEMA**, v. 9, n. 2, 2016.
- RAWAT, J. S.; KUMAR, Manish. Monitoring land use/cover change using remote sensing and GIS techniques: A case study of Hawalbagh block, district Almora, Uttarakhand, India. **The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science**, v. 18, n. 1, p. 77-84, 2015.
- REAL, Mauro Marcelo Furtado; VASCONCELOS, Mário. O SISTEMA ÚNICO DE SAÚDE E O PROGRAMA SAÚDE DA FAMÍLIA NO BRASIL: CONCEPÇÃO E MODELO. **Revista Movendo Ideias**, v. 15, n. 1, 2017.
- RODRIGUES, Jondison Cardoso; DE LIMA, Ricardo Angelo Pereira. Grandes projetos de infraestrutura na Amazônia: imaginário, colonialidade e resistências. **Revista NERA**, v. 23, n. 51, 2020.
- ROUSE, J. W.; HAAS Jr.; R. H.; SCHEKK, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. **NASA Special Publication**, v. 351, n. 1974, p. 309, 1974.
- SANTOS, Amanda Rayana da Silva; DE FARIAS, André Luís Assunção; FREITAS, Marcus Robert Ferreira. Política Agroambiental na Amazônia: A Insustentabilidade da Produção do Dendê. **Revista Agroecossistemas**, v. 12, n. 2, p. 152-174, 2021.
- SILVA, J. S.; Da Silva, R. M.; SILVA, A. M. Mudanças do Uso e Ocupação do Solo e Degradação Eco-Ambiental Usando Imagens Orbitais: o estudo de caso da bacia do Rio Bacanga, São Luís (MA). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 8, n. 5, 2016.
- SIQUEIRA, Renata Alves. A INFLUÊNCIA DA URBANIZAÇÃO NA AMPLITUDE TÉRMICA DA CIDADE DE BELO HORIZONTE. **Cadernos do LESTE**, 2018.
- SPINELLI, M. V. P.; CARVALHO, R. M. C. M. de O.; DA SILVA, H. P.; BRANDÃO, S. S. F.; FRUTUOSO, M. N. M. de A., 2016. Estudo Sustentável da Capacidade de Carga Antrópica e a sua Influência no Ponto de Equilíbrio da Resiliência Ambiental. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, n. 1, p. 185-199.
- WANG, J.; LI, P.; SUN, J.; LIN, Y. T. Analyzing urban forest coverage variation in Guangzhou-Foshan region using factorial analysis based multivariate statistical prediction models. **Forest Ecology and Management**, v. 432, p. 121-131, 2019.
- XIE, Qijiao; SUN, Qi. Monitoring the Spatial Variation of Aerosol Optical Depth and Its Correlation with Land Use/Land Cover in Wuhan, China: A Perspective of Urban Planning. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 18, n. 3, p. 1132, 2021.
- YU, Zhaowu; YAO, Yawen; YANG, Gaoyuan; WANG, Xiangrong; VEJRE, Henrik. Spatiotemporal patterns and characteristics of remotely sensed region heat islands during the rapid urbanization (1995–2015) of Southern China. **Science of the Total Environment**, v. 674, p. 242-254, 2019.
- ZHA, Yong; GAO, Jay; NI, Shaoxiang. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. **International Journal of Remote Sensing**, v. 24, n. 3, p. 583-594, 2003.
- ZHANG, Zhaoming; WEI, Mingyue; PU, Dongchuan; HE, Guojin; WANG, Guizhou; LONG, Tengfei. Assessment of Annual Composite Images Obtained by Google Earth Engine for Urban Areas Mapping Using Random Forest. **Remote Sensing**, v. 13, n. 4, p. 748, 2021.

CAPÍTULO 3 – MUDANÇAS DECAIAIS NOS PADRÕES SAZONAIS DE CLIMA REGIONAL ASSOCIADOS À DINÂMICA DA URBANIZAÇÃO NA REGIÃO METROPOLITANA DE BELÉM

RESUMO

Os impactos das transformações antrópicas de longo prazo numa região se processam em diversas dimensões, sendo a climática a mais direta e perceptível em escala local. Neste contexto, este estudo teve como propósito determinar os impactos da antropização na forma de urbanização sobre o clima local/regional da Região Metropolitana de Belém, na Amazônia oriental, no período de 1974 a 2018. Para atingir esse objetivo, fez-se uso do conjunto de dados climáticos WorlClim e das séries temporais da estação meteorológica do INMET. Constatou-se que tanto os índices de precipitação quanto os de temperatura (máxima e mínima) apresentam tendências crescentes, cujos padrões se correlacionam diretamente com a urbanização e supressão da vegetação.

Palavras-chave: Clima regional, Sazonalidade, Antropismo, Amazônia.

ABSTRACT

The impacts of anthropogenic transformations in a region corroborate the variability in regional climate on a micro and mesoclimatic scale. In this context, time series and geospatialized climate data sets can assist research to better understand the temporal behavior of climate variables in the region. This study had the purpose of determining the impacts of anthropization on the local/regional climate in an Amazonian Metropolitan Region through a set of climatic data in a high resolution grid, for a period from 1974 to 2018. To achieve this objective, the WorlClim climate data set and the time series of the INMET meteorological station were used. It was found that both precipitation rates and temperature (maximum and minimum) show increasing trends, continue to increase and are strongly correlated with urbanization and vegetation suppression.

Keywords: Regional climate, Seasonality, Anthropism, Amazon.

3.1 INTRODUÇÃO

A alteração da cobertura terrestre superficial de uma região é reflexo do intenso processo de ocupação das cidades. As estimativas indicam que até o ano 2050, 70% da população mundial viverá em áreas urbanas, expandindo o espaço geográfico construído e a densidade dessas áreas (MONTEIRO, 2021). A expansão das áreas urbanas tem sido impulsionada principalmente pelo crescimento populacional e desenvolvimento econômico. Essa rápida expansão que geralmente preenche áreas mais baixas e provoca supressão da vegetação resulta em uma ampla gama de impactos ambientais (DEWAN e YAMAGUCHI, 2009).

Nas últimas décadas, a magnitude e os impactos das transformações urbanas ao longo do globo tornaram-se cada vez mais evidentes para cientistas e formuladores de políticas (MELCHIORRI et al., 2018). Para Changnon (1992), existe influência da

urbanização na mudança climática global e alguns autores levantam a questão de que os climas urbanos podem representar um microcosmo dos climas de larga escala do futuro.

Considerar o efeito combinado do crescimento urbano e da mudança climática é vital para entender como as temperaturas nas áreas urbanas mudarão no futuro (CHAPMAN, 2019). Nesse contexto, o espaço urbano representa a materialidade das relações sociais de produção e de consumo, produzindo fragmentação na paisagem, degradação ambiental, alterações climáticas em micro, meso e macroescala (LOMBARDO, 2009).

A cidade gera um clima próprio que é resultado da influência de vários fatores que agem sobre a malha urbana. Monteiro (1976) reitera o exposto relatando que muitos fatores alteram o clima em escala local, sendo que os efeitos mais sentidos pela população são: a qualidade do ar, o impacto das chuvas e o conforto térmico, em virtude do acúmulo de temperatura pelas estruturas urbanas. Para Vale e Silva (2021), o constante desenvolvimento urbano e aglomerados populacionais sem planejamento estrutural proporcionam um sistema agressivo de supressão vegetal associado ao processo de urbanização, fato que acarreta imensos transtornos à população, principalmente em regiões altamente ensolaradas.

No âmbito da Amazônia oriental, a Região Metropolitana de Belém (RMB) caracteriza-se por ser uma região ensolarada, com temperaturas sempre altas, elevado índice pluviométrico, instabilidade do ar e a alta umidade. Para Dias et al. (2020), o aumento da urbanização na RMB nos últimos quarenta anos pode ter relação nas alterações das variáveis climatológicas. De acordo com Ferreira Filho et al. (2020), a distribuição da média mensal da precipitação na região revela comportamentos de sazonalidade pronunciada com duas estações bem distintas ao longo do ano, uma chuvosa e outra menos chuvosa.

De acordo com Barreto et al. (2020), a temperatura média anual na RMB é de 26,5°C, as temperaturas mais baixas ocorrem no período chuvoso (dezembro a maio) e as temperaturas mais altas durante o período menos chuvoso (junho a novembro). Martins et al. (2019) identificaram o período chuvoso e o seco na RMB, a partir da média mensal da série histórica de 1962 a 2018, constatando que o mês de março é o mês com maior precipitação e os meses com menores alturas pluviométricas são outubro e novembro.

A RMB está inserida na Região Norte do Brasil e para Coutinho *et al* (2017), além da urbanização, a variabilidade climática na região pode ocasionar secas anormais em grandes áreas e inundações intensas. Durante as últimas décadas, tem sido recorrente

na Amazônia as secas intensas e períodos chuvosos mais prolongados que o normal, os quais invariavelmente deflagram impactos na população e em diversos setores da economia (FERREIRA et al., 2020).

As formas de uso e cobertura do solo desordenadas resultam na intensa impermeabilização das cidades, ocupação gradativa de áreas ambientalmente frágeis, além de provocar a intensificação das ilhas de calor (RAMIRES et al., 2018). O fácil acesso às imagens de satélites e os desenvolvimentos recentes nas técnicas de processamento de imagens tornam o monitoramento de eventos climáticos atraente para inspecionar continuamente valores de temperatura, precipitação, umidade, vento e outras variáveis climáticas.

Atualmente, o Sistema de Informação Geográfica e o Sensoriamento Remoto desempenham um papel crucial em vários temas de cunho ambiental (RANJAN, VALLISREE e SINGH, 2016). O sensoriamento remoto mostrou-se eficaz em revelar a urbanização temporal e suas possíveis consequências, contudo, uma abordagem holística da investigação precisa ser desenvolvida para entender melhor a contribuição de atividades antrópicas para os impactos ambientais no contexto das variabilidades/mudanças climáticas (TUONG et al., 2018).

O uso de imagens de satélite representa um momento no tempo-espaço e possibilitam identificar tendências e padrões que determinam o comportamento térmico e energético das superfícies urbanas (FERREIRA et al., 2021). Ademais, a utilização do sensoriamento remoto também é uma alternativa para aquisição de dados de temperatura superficial em ambientes terrestres (NUNES e FILHO, 2021).

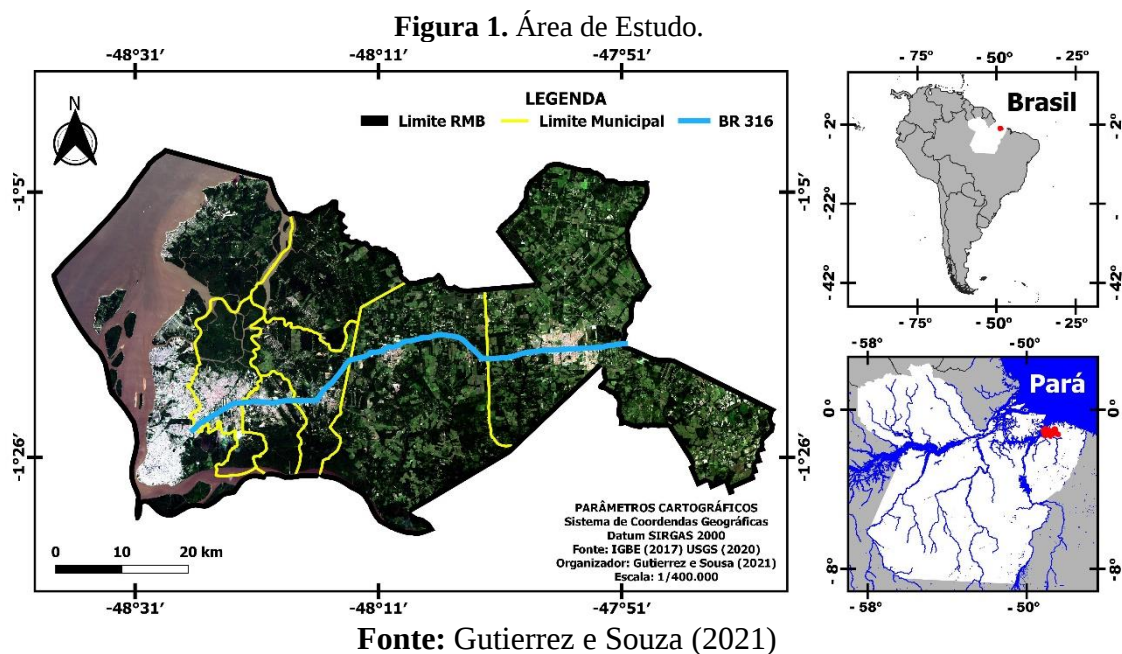
Visando contribuir com as temáticas científicas acima mencionadas, o presente estudo tem como objetivo determinar os impactos da urbanização decorrente da antropização no clima local/regional da RMB durante um período de 44 anos.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1 Área de estudo

A Figura 1 apresenta a área de estudo na RMB, localizado na porção nordeste do estado do Pará, sobre a Amazônia oriental. De acordo com o IBGE (2021), a RMB tem população estimada de 2.529.178 habitantes, também conhecida como Grande Belém, hoje composta por sete municípios, a saber: Ananindeua, Belém, Benevides, Castanhal, Marituba, Santa Bárbara do Pará e Santa Izabel do Pará. A RMB apresenta densidade

demográfica de 709,2 hab./km², ocupando área territorial de 3.566,3 Km² e índice de desenvolvimento humano de 0,646. De acordo com Siqueira e Aprile (2013), a região está distante cerca de 120 km do Oceano Atlântico e segundo a classificação climática de Köppen, o clima da RMB se enquadra na categoria "monçônico" do tipo Am, um tipo de clima tropical com duas estações do ano bem definidas, uma quente e chuvosa, e outra mais amena e seca. Conforme Silva Junior et al. (2013), a média anual da temperatura do ar é de $26,0 \pm 0,4^{\circ}\text{C}$, com máximas e mínimas variando de $31,5 \pm 0,7$ a $22,0 \pm 0,3^{\circ}\text{C}$, respectivamente, durante o ano. A pluviosidade média anual é de $2.858,7 \pm 76,6$ mm/ano com maior volume no período chuvoso (dezembro a maio), correspondendo a 71,2% do total anual, e os 28,8% restantes relacionados ao período menos chuvoso (junho a novembro).



3.2.2 Conjunto de Dados Climáticos

Utilizou-se os dados mensais de precipitação total (mm) e temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$) mínima e máxima para o período de 44 anos, a partir do conjunto de dados *WorldClim* (HARRIS et al, 2014 e FICK et al., 2017), um banco de dados meteorológico global de alta resolução espacial, disponível em <https://worldclim.org> para uso em pesquisas climáticas. Destaca-se que estes dados foram gerados por meio da interpolação espacial de dados climáticos derivados das estações meteorológicas em uma grade de alta resolução e incluem dados de precipitação de 47.554 locais e dados de temperatura máxima/mínima de 14.835 locais pelo mundo (PANAGOS et al., 2017). As matrizes ou grades disponíveis do conjunto de dados *WorldClim* consolidam informações desde

1960, atualizados até 2018. Para este estudo, optou-se em usar grades com resolução espacial de 2,5 minutos (4,63 km). Cada download é um arquivo “zip” contendo 120 arquivos GeoTiff (.tif), um para cada mês do ano, para um período de 10 anos. Desta forma, foram feitos os downloads dos arquivos referente aos períodos de 1970-1979, 1980-1989, 1990-1999, 2000-2009 e 2010-2018.

Outros dados meteorológicos de precipitação (mm), temperatura mínima (°C) e temperatura máxima (°C) foram obtidos, também para o período de 44 anos, provenientes do conjunto de dados da estação meteorológica do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) situada no município de Belém, Pará, Brasil, nas coordenadas de latitude 01°25'48"S e longitude 48°25'48"W, altitude 10 metros, com início de operação em 01/11/1923, disponível gratuitamente no endereço eletrônico <http://www.inmet.gov.br>.

3.2.3 Teste de Dupla Massa

Para analisar a consistência e homogeneidade das séries de dados meteorológicos, aplicou-se o método da Dupla Massa com os dados compilados da WorldClim e da estação meteorológica do INMET localizada na RMB. O teste de dupla massa é um método desenvolvido pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS), o qual consiste em acumular os valores das médias através da plotagem de um gráfico cartesiano com os valores acumulados da primeira fonte de dados no eixo das ordenadas e os valores das médias da segunda fonte no eixo das abscissas. Por esse método é possível identificar erros sistemáticos, mudança de declividade ou tendência (USGS, 1996).

3.2.4 Dados das Áreas de Cobertura da RMB

Para vetorizar e calcular as áreas das classes de uso e cobertura da RMB, foram desenvolvidos procedimentos baseados nas ferramentas de sensoriamento remoto utilizando o Sistema de Informação Geográfica QGIS 3.16 Hannover de longa duração, *software* livre licenciado pela “*General Public License*” (GNU), que conjuga funções de processamento de imagens, análises espaciais, modelagem numérica de terreno e consulta a banco de dados espaciais.

Assim, por meio do QGIS, aplicou-se quatro índices físicos para realçar as coberturas de interesse na região, para os anos 1984, 1989, 1995, 1999, 2008 e 2018. Os índices utilizados foram o NDBI (*Normalized Difference Built-up Index*), NDWI (*Normalized Difference Water Index*), NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*)

e BSI (*Bare Soil Index*). Posteriormente, quantificou-se as áreas das classes em quilômetros quadrados, são elas: Urbanizada, Antropizada, Vegetação e Água.

3.2.5 Geoprocessamento do Conjunto de Dados *WorldClim*

Por meio de técnicas de geoprocessamento, utilizando-se o QGIS, obteve-se o recorte da área de estudo no formato *Geotiff* (.tif), a partir do conjunto de dados *WorldClim*, em escala mundial, extraído-se para cada variável climática (temperatura máxima, temperatura mínima e precipitação) um novo conjunto de dados em escala local, dentro do limite da RMB, para o período de 1974 a 2018, pois as análises das variáveis climáticas foram feitas a partir de 10 anos anterior ao primeiro sensoriamento remoto das classes (1984). O vetor que contém os limites da RMB foi utilizado como base para os recortes, conforme a base de dados do IBGE. O novo conjunto de dados resultante do recorte gerou centenas de imagens da região, pois, foram 44 anos de dados climáticos, contendo 12 grades de alta resolução, por ano, para cada uma das três variáveis climáticas. Desta forma, obteve-se 44x12x3 imagens, totalizando 1584 recortes da RMB em resolução de 2,5 minutos. Assim, determinou-se as variações mínimas e máximas de cada variável climática.

3.2.6 Dados da População da RMB

O Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE se constitui como principal provedor de dados e informações do Brasil, que atendem às necessidades dos mais diversos segmentos da sociedade civil. Uma de suas principais atuações está nos levantamentos, que têm como base a coleta de dados nos domicílios, constituindo as principais fontes estatísticas sociodemográficas, dentre essas, o censo demográfico realizado decenalmente. Ao meio da década, no intervalo entre dois censos, é efetuada a contagem da população, operação também censitária que visa atualizar os contingentes populacionais municipais e subsidiar o cálculo de suas estimativas anuais nos anos subsequentes (IBGE, 2021). Assim sendo, foram obtidos do site do IBGE os dados da população da RMB para o período de 1980 até 2018. Os dados coletados para os anos de 1980, 1991, 2000 e 2010 são resultados dos censos que ocorreram no Brasil. Os dados dos demais anos são estimativas divulgadas pelo IBGE.

3.2.7 Planilhas e Gráficos

A organização dos dados numéricos de áreas das classes, quantitativo populacional, valores das temperaturas e precipitações, foram compilados no software Microsoft Excel 2010, o qual permitiu a elaboração de tabelas e produção de gráficos necessários para as análises das informações.

Desta forma, foram planilhados os quantitativos da população oriundas dos dados IBGE, as áreas (km²) de coberturas das quatro classes resultantes do sensoriamento remoto, os valores de temperaturas mínima (°C), temperatura máxima (°C) e precipitação (mm), a partir dos recortes feitos no geoprocessamento.

3.2.8 Correlação Estatística

O estudo elaborou análises estatísticas de correlação para investigar a relação entre as variáveis temperatura mínima (°C), temperatura máxima (°C), precipitação (mm), Área Urbanizada, Área Antropizada, Área de Vegetação e Área da Água. O intuito da correlação é determinar (mensurar) o grau de relacionamento entre as variáveis climáticas (médias decadais) e as variáveis de uso e coberturas (km²) obtidas no sensoriamento remoto.

Foram realizadas tentativas de normalizar a distribuição das amostras. Desta forma, aplicou-se o teste Shapiro-Wilk que apontou a não normalidade dos dados. Após algumas tentativas de normalizar os dados, utilizando-se o método Box-Cox para encontrar a melhor transformação a ser aplicada nos dados, constatou-se que as amostras não normalizavam e assim houve necessidade de utilização de método de correlação não paramétrica.

Optou-se em pela correlação de Spearman, um método não paramétrico que avalia a relação monotônica entre variáveis contínuas ou ordinais. Em uma relação monotônica, as variáveis tendem a mudar juntas, mas não necessariamente a uma taxa constante. Durante a análise de correlação, optou-se pelo teste de Friedman, um teste não-paramétrico utilizado para avaliar se há diferença significativa entre as amostras. Adotou-se o nível de significância de 5%.

Para análise de correlação linear, foi utilizado o *software* SPSS, uma ferramenta estatística que possibilita determinar o Coeficiente de Correlação de Spearman (ρ), o qual é uma medida entre -1 e 1, sendo o primeiro valor a correlação inversa perfeita e o segundo valor a correlação direta perfeita. A ideia da análise é verificar se as variáveis

estão ou não correlacionadas e ainda o sentido das mesmas, ou seja, se as variáveis são inversamente ou diretamente proporcionais. De acordo com Cielo et al. (2015), a classificação utilizada para os valores de correlação é: correlação bem fraca (0 a 0,19); correlação fraca (0,20 a 0,39); correlação moderada (0,40 a 0,69); correlação forte (0,70 a 0,89); correlação muito forte (0,90 a 1,00). Desta forma, foi possível determinar e analisar o coeficiente de correlação de Spearman (ρ) e avaliar o grau de relação entre as variáveis.

3.3 RESULTADOS

3.3.1 Dinâmica Multitemporal do Uso e Cobertura na RMB e População

O estudo determinou, por meio de sensoriamento remoto baseado no software QGIS, a dinâmica multitemporal do uso e cobertura superficial na Região Metropolitana de Belém, considerando as áreas das quatro classes calculadas para seis anos pontuais. A Tabela 3 apresenta as áreas, em quilômetros quadrado, das classes de uso e cobertura e a quantidade populacional da RMB no período 1984 a 2018. Nota-se que a medida que a população aumenta, as áreas de urbanização e antropizadas também se expandem. Por outro lado, a vegetação é suprimida e a cobertura de massas d'água se mantem praticamente constante, conforme Tabela 1.

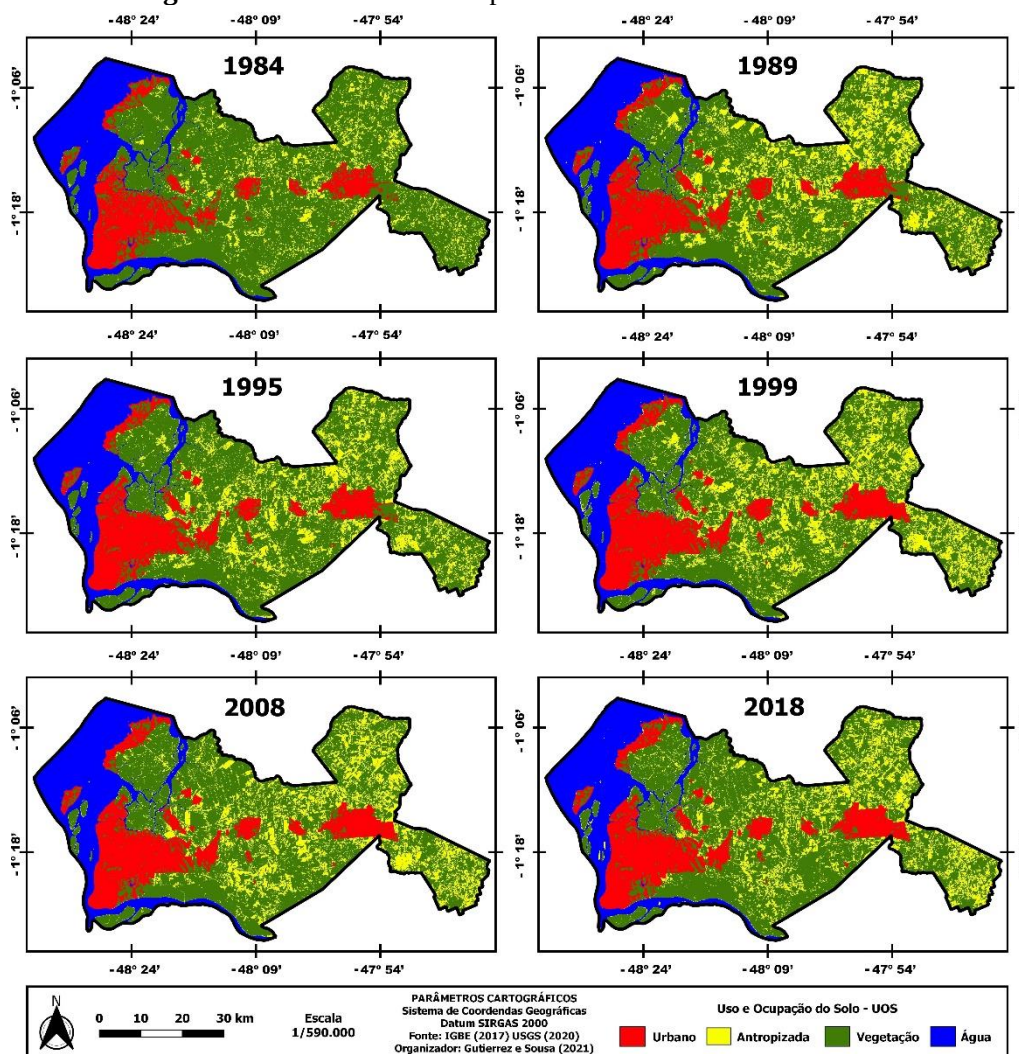
Tabela 1. Sensoriamento Remoto (Áreas em km²) e População de 1984 a 2018.

	1984	1989	1995	1999	2008	2018
Urban	224,0	340,7	356,2	400,9	411,7	412,4
Vegetation	2386,6	1939,0	1981,0	1898,6	1911,7	1982,2
Water	609,0	609,0	615,0	606,7	611,4	606,2
Anthropized	346,2	677,1	613,6	659,7	631,1	565,2
Population	1.239.586	1.439.007	1.711.601	1.917.908	2.211.194	2.493.070

Fonte: Gutierrez Souza (2021).

A dinâmica multitemporal do uso e cobertura na RMB é evidenciada nas imagens apresentadas na Figura 2 para os anos de 1984, 1989, 1995, 1999, 2008 e 2018. Conforme observa-se na Figura 2, as áreas das classes foram representadas em cores, estando as áreas urbanas representada pelas manchas vermelhas, a vegetação na cor verde, os corpos d'água em azul e as áreas antropizadas por manchas amarelas.

Figura 2. Dinâmica Multitemporal do Uso e Cobertura na RMB.



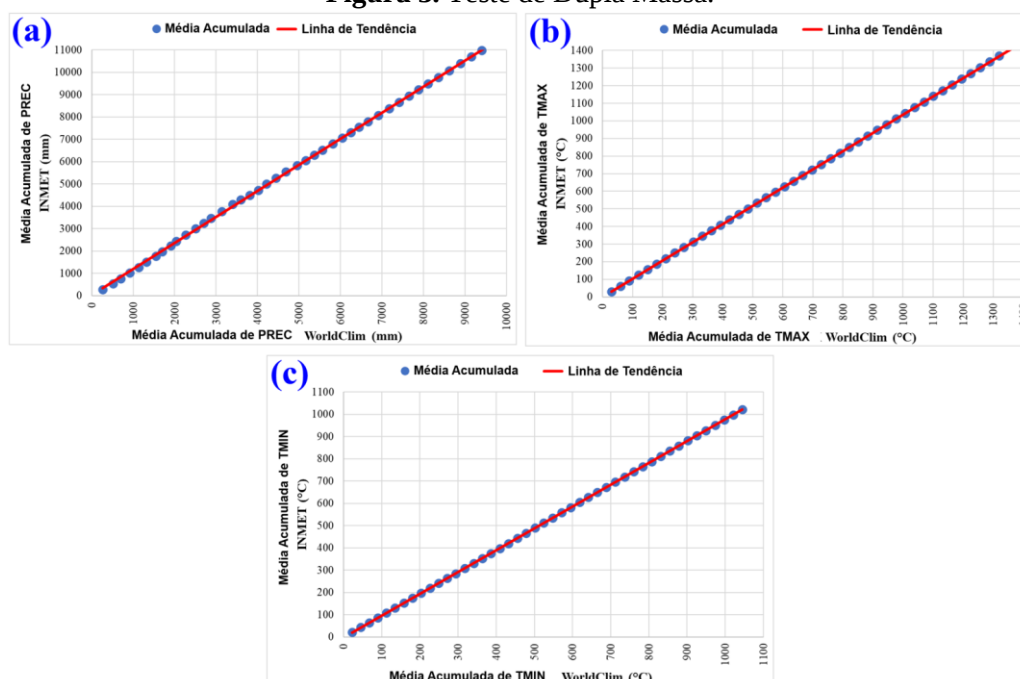
Fonte: Gutierrez e Souza (2021).

3.3.2 Teste de Dupla Massa

Após calcular as médias acumuladas dos dados climáticos (precipitação, temperatura máxima e temperatura mínima), tanto para as séries WorldClim como para série de dados da estação INMET, plotou-se os valores nos gráficos, conforme pode ser observado na Figura 3. A linha de tendência (vermelha) são linhas interpoladas que exibem as retas que melhor se ajustam aos pontos plotados a partir do método dos mínimos quadrados utilizado pelo software Excel. Conforme explica De Oliveira et al. (2010), para que haja consistência dos dados, deve haver uma tendência linear na relação entre as fontes de dados. O método mostrou-se bastante satisfatório na análise de consistência de dados meteorológicos, pois tanto para PREC, TMAX e TMIN, os pontos quase coincidem sobre as linhas de tendências. Ressalva-se que para PREC, o valor acumulado foi ligeiramente maior para os dados INMET (11885,07mm), comparado aos dados WorldClim (10175,39mm), conforme Figura 3a. Para as temperaturas, os valores

acumulados comportam-se de forma similar, ou seja, para TMAX (Figura 3b), os valores acumulados da estação INMET foram maiores (1.435,39) contra 1.385,28 WordClim, por outro lado, para TMIN (Figura 3c), os valores acumulados INMET foram menores (1.021,77) e WordClim (1.045,49). Neste contexto, pode-se inferir que as séries históricas apresentaram boa consistência e homogeneidade de acordo com o método da Dupla Massa.

Figura 3. Teste de Dupla Massa.



Fonte: Gutierrez e Souza (2021).

3.3.3 Análise Estatística

Como o presente estudo tem como objetivo determinar os impactos da antropização (urbanização) da RMB no clima local/regional, adotaram-se os seguintes procedimentos. Num primeiro momento, fez-se uma análise estatística correlacionando as médias decadais de cada variável climática (precipitação, temperatura máxima e temperatura mínima) com as classes de uso e cobertura, determinando-se assim, três matrizes de correlação de Spearman. A matriz de correlação possibilitou a análise simultânea da associação, aos pares, entre variáveis, através dos coeficientes de Spearman (ρ). A Figura 4 apresenta as matrizes de correlações elaboradas no software SPSS. A primeira matriz (Figura 4a) apresenta a correlação entre a temperatura máxima (TMAX) com as variáveis URB (área ocupada pela mancha urbana), VEG (área da vegetação), ÁGUA (área com corpos d'água) e ANT (área antropizada). A Figura 4b é a correlação

entre a temperatura mínima (TMIN) e as classes. E por fim, a Figura 4c mostra a matriz de correlação entre a precipitação (PREC) e as áreas determinadas no sensoriamento remoto.

Os valores apresentados em vermelho, são coeficientes de Spearman que apresentaram significância estatística menores que 0,05. Desta forma, observa-se nas três matrizes que a classe URB apresenta correlação muito forte e positiva com todas as variáveis climática, sendo $\rho=1,000$ para TMAX, ou seja, correlação direta perfeita e $\rho=0,943$ tanto para TMIN quanto para PREC, resultando também numa relação monotônica diretamente proporcional e muito forte. Neste contexto, pode-se inferir que conforme a área urbana se expandiu ao longo do tempo, os índices de precipitação e temperaturas também aumentaram, o que pode ser constatado observando-se os valores de PREC, TMAX e TMIN apresentados na Tabela 2.

Outro ponto importante detectado na análise com significância estatística é a correlação ($\rho= -0,829$) forte e inversa entre as variáveis VEG e ANT, permitindo concluir que conforme relação monotônica entre as duas variáveis, elas tendem a mudar juntas e de forma inversa, mas não necessariamente a uma taxa constante, ou seja, à medida que ocorreu supressão vegetal (VEG), as áreas antropizadas (ANT) aumentaram na RMB, o que pode ser constatado também na Tabela 2.

Os valores apresentados nas colunas da Tabela 2 são resultantes dos cálculos das médias decadais das variáveis climáticas de 1974 a 1984, 1979 a 1989, 1985 a 1995, 1989 a 1999, 1998 a 2008 e 2008 a 2018, respectivamente. Assim, constata-se pela diferença entre o último (2018) e o primeiro (1984) valor que houve, de fato, aumento nos índices de precipitação (52,06 mm) durante o período de estudo. A temperatura máxima que em 1984 tinha média de 30,21 °C, em 2018 passou para 31,28 °C, elevando em 1,07 °C. Já a temperatura mínima cresceu 1,40 °C no mesmo período.

Figura 4. Matrizes de Correlação de Spearman.

(a)						(b)					
TMAX	URB	VEG	ÁGUA	ANT		TMAX	URB	VEG	ÁGUA	ANT	
TMAX	1.000					TMAX	1.000				
URB	1.000	1.000				URB	0.943	1.000			
VEG	-0.314	-0.314	1.000			VEG	-0.371	-0.314	1.000		
ÁGUA	-0.348	-0.348	-0.058	1.000		ÁGUA	-0.522	-0.348	-0.058	1.000	
ANT	0.029	0.029	-0.829	0.058	1.000	ANT	0.086	0.029	-0.829	0.058	1.000

(c)					
PREC	URB	VEG	ÁGUA	ANT	
TMAX	1.000				
URB	0.943	1.000			
VEG	-0.143	-0.314	1.000		
ÁGUA	-0.116	-0.348	-0.058	1.000	
ANT	-0.086	0.029	-0.829	0.058	1.000

Fonte: Gutierrez e Souza (2021).

Tabela 2. Médias Decadais das Variáveis Climáticas de 1974 a 2018.

	(1974-1984)	(1979-1989)	(1985-1995)	(1989-1999)	(1998-2008)	(2008-2018)
TMAX	30.21	30.36	30.47	30.65	31.03	31.28
TMIN	21.93	22.19	22.65	22.93	22.92	23.33
PREC	200.06	207.80	218.27	217.28	228.45	252.12

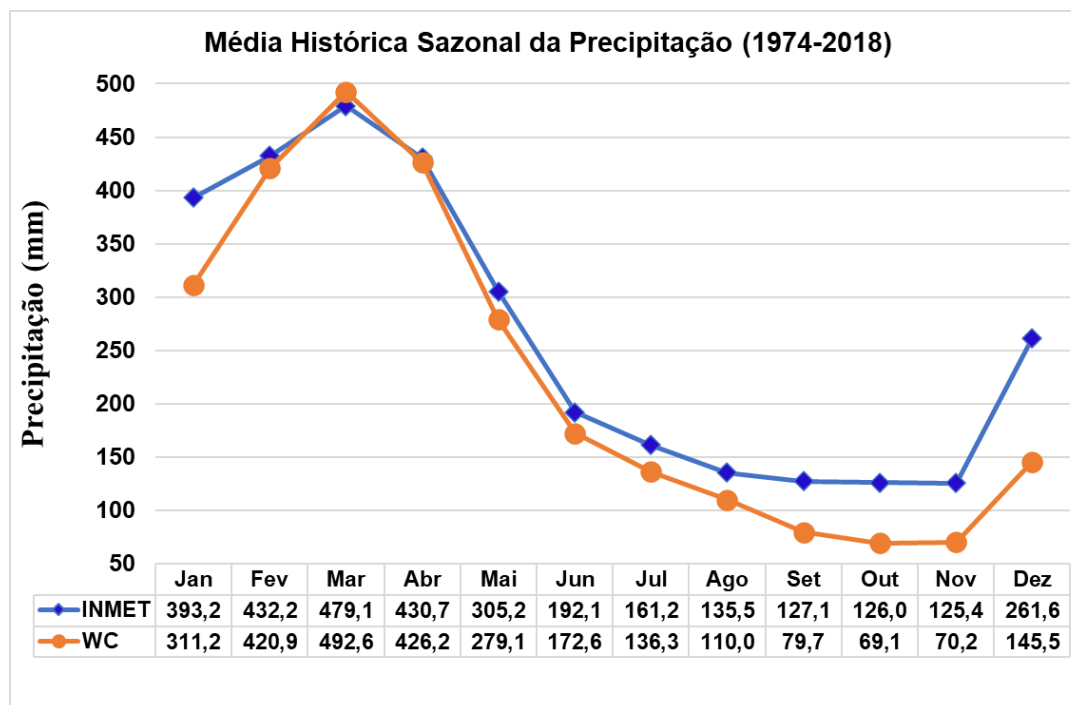
Fonte: Gutierrez Souza (2021).

3.3.4 Análise da Média Histórica dos Dados Meteorológicos e Regimes Sazonais

Fez-se a compilação dos valores meteorológicos do conjunto de dados WorldClim (WC) e INMET referente ao período base de 1974 a 2018, para Precipitação (Apêndice A e B), Temperatura Máxima (Apêndice C e D) e Temperatura Mínima (Apêndice E e F), respectivamente. A partir dessa compilação, calcularam-se as médias históricas mensais (janeiro a dezembro) para o período estudado (média histórica de 45 anos, 1974 a 2018). Ressalta-se que a série de dados do INMET representa um ponto dentro da cidade de Belém, enquanto a série do WC caracteriza a RMB como um todo (média espacial).

A Figura 5 apresenta o gráfico das médias mensais de precipitação do INMET e WC, o qual exibe um ciclo anual bem definido com os valores mais altos no primeiro semestre, especialmente nos meses de janeiro, fevereiro, março e abril. O mês de março apresenta 479,1 mm (INMET) e 492,6 mm (WC). No segundo semestre tem-se os menores valores de chuva nos meses de agosto, setembro, outubro e novembro, cujos índices variaram de 125,4 a 135,5 mm (INMET) e 70,2 a 110,0 mm (WC).

Figura 5. Média Histórica Sazonal da Precipitação (1974-2018).



Fonte: Gutierrez e Souza (2021).

A Figura 6 mostra o gráfico de pizza contendo os percentuais mensais (relativos ao total anual) de precipitação de janeiro a dezembro. Através desse resultado, foi possível definir os regimes sazonais sobre a RMB, baseado nos critérios abaixo:

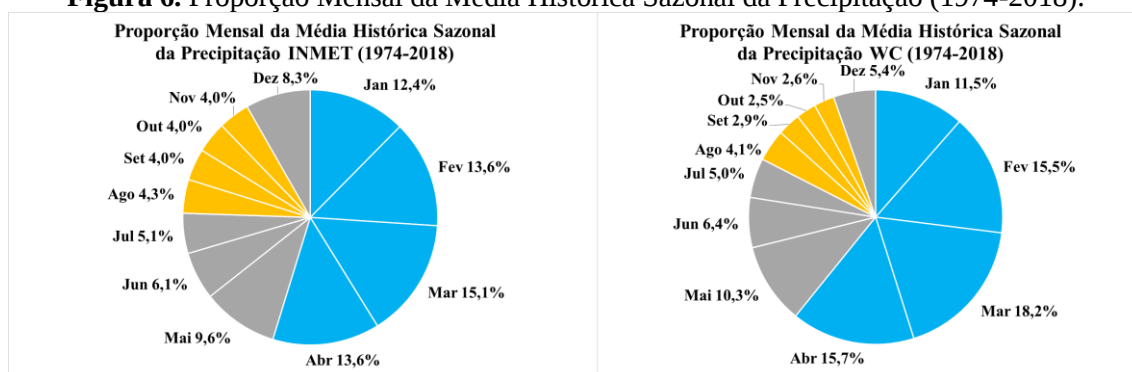
- Os meses consecutivos com percentuais mensais acima de 10% compreendem o regime chuvoso;
- Os meses consecutivos com percentuais mensais abaixo de 5% abrangem o regime seco.

Aplicando os critérios acima na Figura 6, demonstra-se que o regime chuvoso na RMB ocorre entre os meses de janeiro a abril (destaque na cor azul), enquanto o regime seco se processa entre os meses de agosto a novembro (destaque na cor laranja). Ambos os regimes sazonais possuem duração de quatro meses. Ainda na Figura 6, constata-se outro período com duração de três meses, entre maio e julho, o qual configura um terceiro regime sazonal, o qual neste trabalho denomina-se de interstício entre o regime chuvoso e seco.

A Figura 6 permite extrair as proporções de precipitação para os períodos sazonais, tendo a estação seca acumulado 16,3% (INMET) e 12,1% (WC), o interstício sazonal 20,8% (INMET) e 21,7% (WC), ligeiramente acima do período seco, e

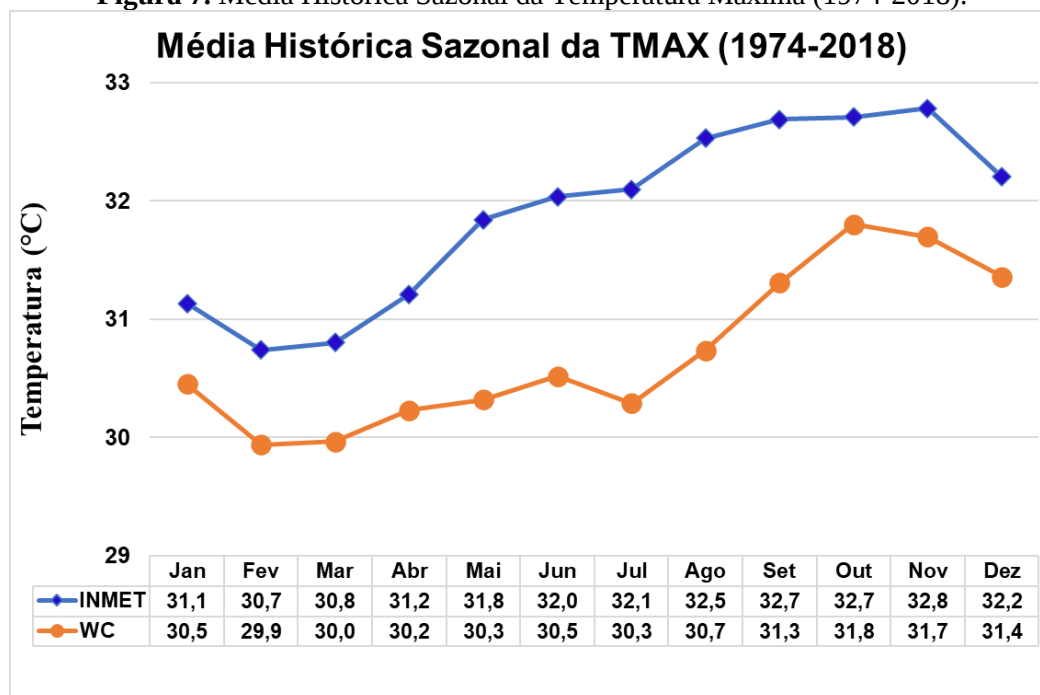
finalmente, a estação chuvosa com 54,7% (INMET) e 60,9% (WC). Em outros termos, os quatro meses do período chuvoso são responsáveis por mais da metade da precipitação anual na RMB. O mês de dezembro é um período de transição entre o período seco e chuvoso. No regime de interstício os índices são decrescentes, saindo de 305,2 para 161,2 mm (INMET) e de 279,1 para 136,3 mm (WC). Dentro do regime chuvoso, o mês de março é responsável por 15,1% (INMET) e 18,2% (WC), estabelecendo-se como o mês mais chuvoso. No regime seco, o mês de novembro apresenta menor índice correspondente a 4,0% (INMET) e 2,6% (WC) do total anual.

Figura 6. Proporção Mensal da Média Histórica Sazonal da Precipitação (1974-2018).



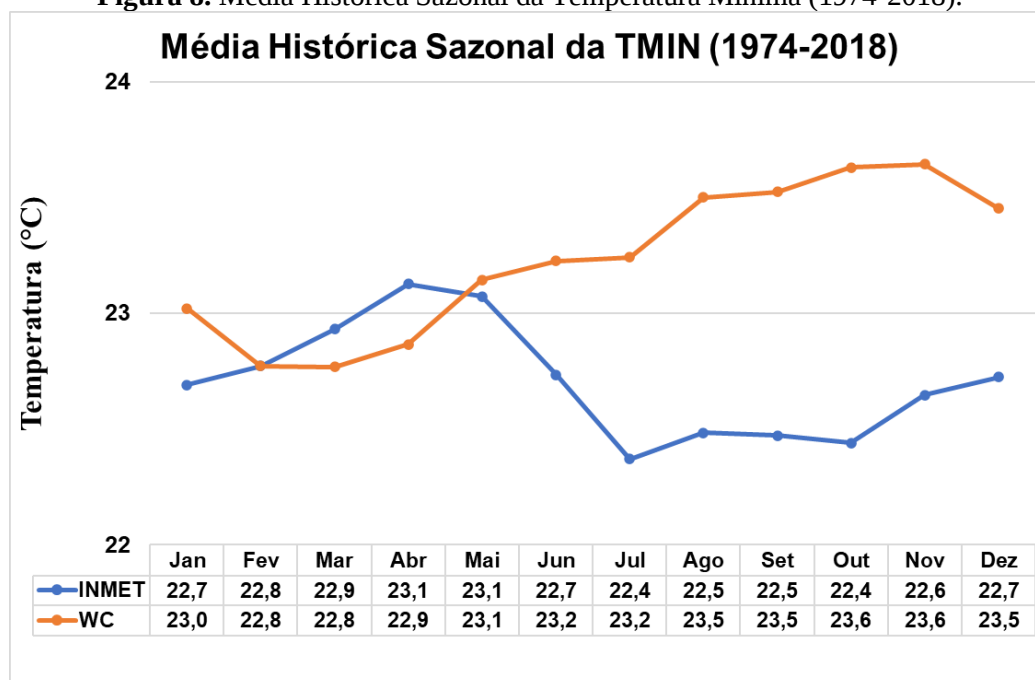
Fonte: Gutierrez e Souza (2021).

A Figura 7 exibe a média histórica sazonal da TMAX, na qual constata-se que na estação seca ocorrem as maiores médias oscilando de 32,5 °C a 32,8 °C (INMET) e 30,7 °C a 31,7 °C (WC), sendo o mês de novembro, historicamente, o mês mais quente do ano, 32,8°C (INMET) e 31,7°C (WC). Por outro lado, na estação chuvosa registra-se os menores valores, sendo o mês de fevereiro o que registra a menor temperatura máxima do ano 30,7°C (INMET) e 29,9°C (WC). Para ambas fontes de dados meteorológicos, o interstício sazonal na RMB registra temperaturas máximas, ligeiramente maiores que a estação chuvosa e relativamente menores que o período seco, ao passo que dezembro, novamente comporta-se como sendo um mês de transição para esta variável meteorológica. Destaca-se que o conjunto de dados WorldClim apresentou valores de temperatura máxima sempre abaixo do conjunto de dados da estação INMET, registrando as maiores diferenças nos meses de julho e agosto (1,8 °C), conforme Figura 7.

Figura 7. Média Histórica Sazonal da Temperatura Máxima (1974-2018).

Fonte: Gutierrez e Souza (2021).

A Figura 8 exibe a média histórica sazonal da temperatura mínima (TMIN), com as curvas que representam as duas fontes de dados apresentando comportamentos quase simétricos, pois nos meses que a estação meteorológica INMET registrou valores maiores de temperatura mínima, o conjunto de dados WorldClim assinalou valores menores, sendo a maior diferença no mês de outubro (1,19 °C). A menor temperatura mínima, registrada pelo conjunto de dados WC, ocorreu nos meses de fevereiro e março (22,8 °C), já para estação meteorológica INMET, se deu em julho (22,4 °C), durante o interstício sazonal. Sob outra perspectiva, as maiores temperaturas mínimas INMET foram em abril e maio (23,1 °C) e para WC em outubro e novembro (23,6 °C).

Figura 8. Média Histórica Sazonal da Temperatura Mínima (1974-2018).

Fonte: Gutierrez e Souza (2021).

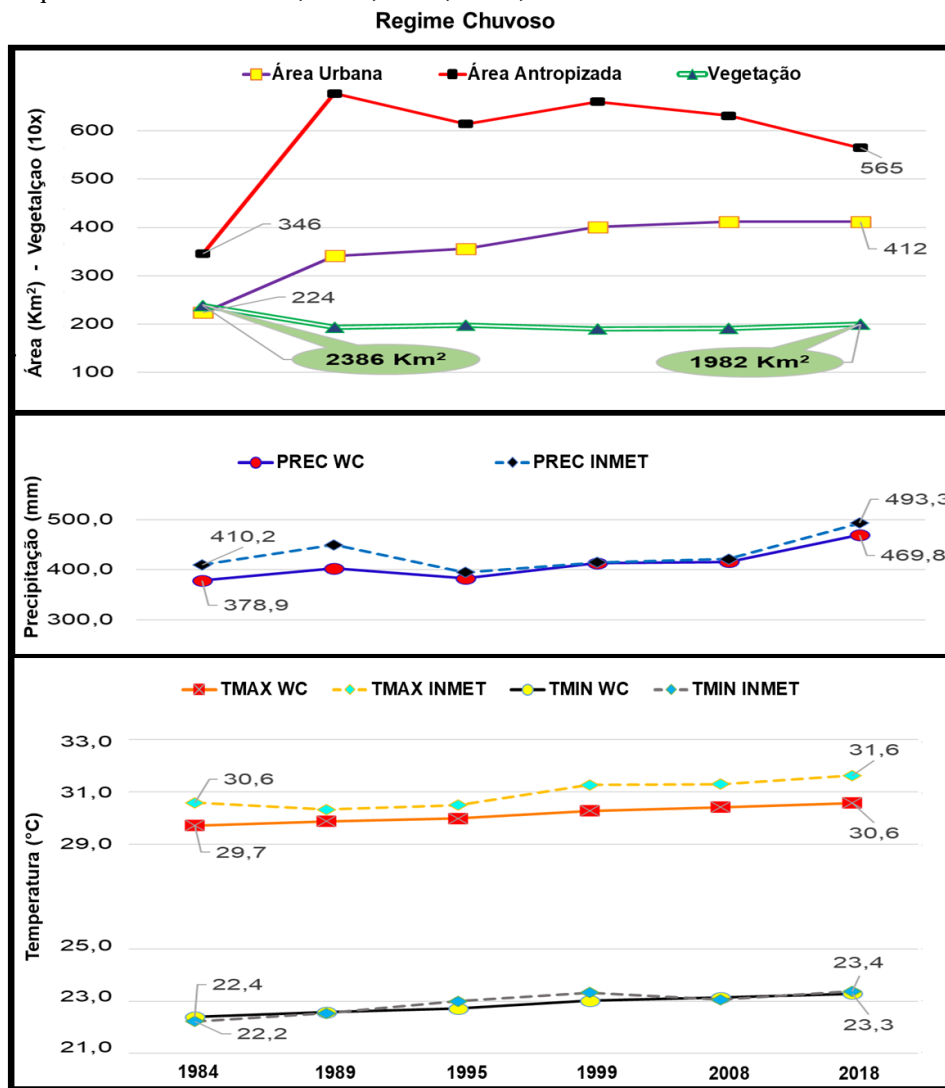
3.3.5 Análise conjunta da Dinâmica do Clima x Uso e Cobertura na RMB

Nesta secção analisa-se de forma conjunta os dados obtidos por sensoriamento remoto que retratam a dinâmica multitemporal das classes de uso e cobertura da RMB com os dados climáticos de PREC, TMAX e TMIN do INMET e WC na sequência dos anos 1984, 1989, 1995, 1999, 2008 e 2018. Tais análises são feitas para os dois regimes sazonais, chuvoso e seco através dos resultados plotados nas Figuras 9 e 10, respectivamente. Nestas Figuras, os valores referem-se a médias cobrindo um período em torno de 5 a 10 anos, ou seja, os dados climáticos no ano de 1984 são médias obtidas de 1974 a 1984. Para o ano de 1989, as médias foram calculadas de 1985 a 1989. As demais médias, para cada ano pontual, foram determinadas a partir do ano pontual anterior somado de 1 (um) até aquele ano.

A Figura 9, correspondente ao regime chuvoso, mostra que à medida que ocorreram supressões na vegetação, as áreas urbanas e antropizadas se expandiram, afetando diretamente no clima local, haja vista que a precipitação média (WC) em 1984 era 378,9 mm e passou para 469,8 mm em 2018, enquanto a estação INMET variou de 410,2 mm para 493,3 mm. A temperatura máxima (WC) aumentou no mesmo período, iniciando em 29,7 °C e passando para o patamar de 30,6 °C, já para estação INMET, a

média subiu de 30,6 °C para 31,6 °C. A temperatura mínima comportou-se similarmente para as duas fontes de dados, aumentando de 22,4 °C para 23,3 °C (WC) e de 22,2 °C para 23,4 °C para estação meteorológica INMET.

Figura 9. Regime chuvoso: dinâmica multitemporal das classes de uso e cobertura (vegetação, urbano, antropizado) da RMB com os dados climáticos de PREC, TMAX e TMIN do INMET e WC na sequência dos anos 1984, 1989, 1995, 1999, 2008 e 2018.

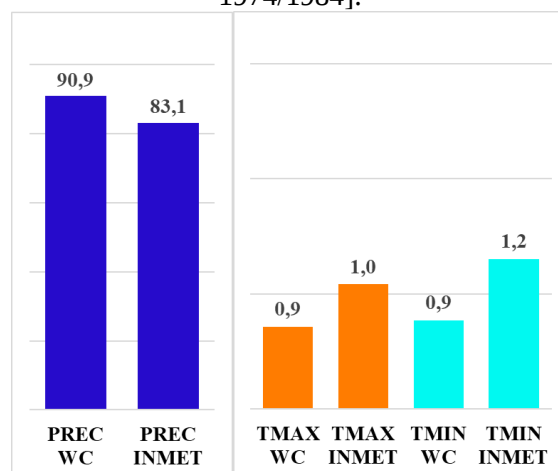


Fonte: Gutierrez e Souza (2021).

A Figura 10 apresenta a diferença entre as medidas das variáveis climáticas na estação chuvosa, subtraindo-se os valores em 2018 dos valores em 1984. Desta forma, determinou-se a variação ou tendência quantitativa de longo prazo. Assim, constatou-se que a precipitação média aumentou 90,9 mm (WC) e 83,1 mm (INMET), a temperatura máxima subiu 0,9°C (WC) e 1,0°C (INMET) e, por fim, a temperatura mínima cresceu

0,9°C (WC) e 1,2°C (INMET). Desta forma, demonstra-se que no regime chuvoso todas as variáveis climáticas aumentaram no lapso temporal das últimas quatro décadas.

Figura 10. Diferença entre as medidas das variáveis climáticas do regime chuvoso [2009/2018 - 1974/1984].

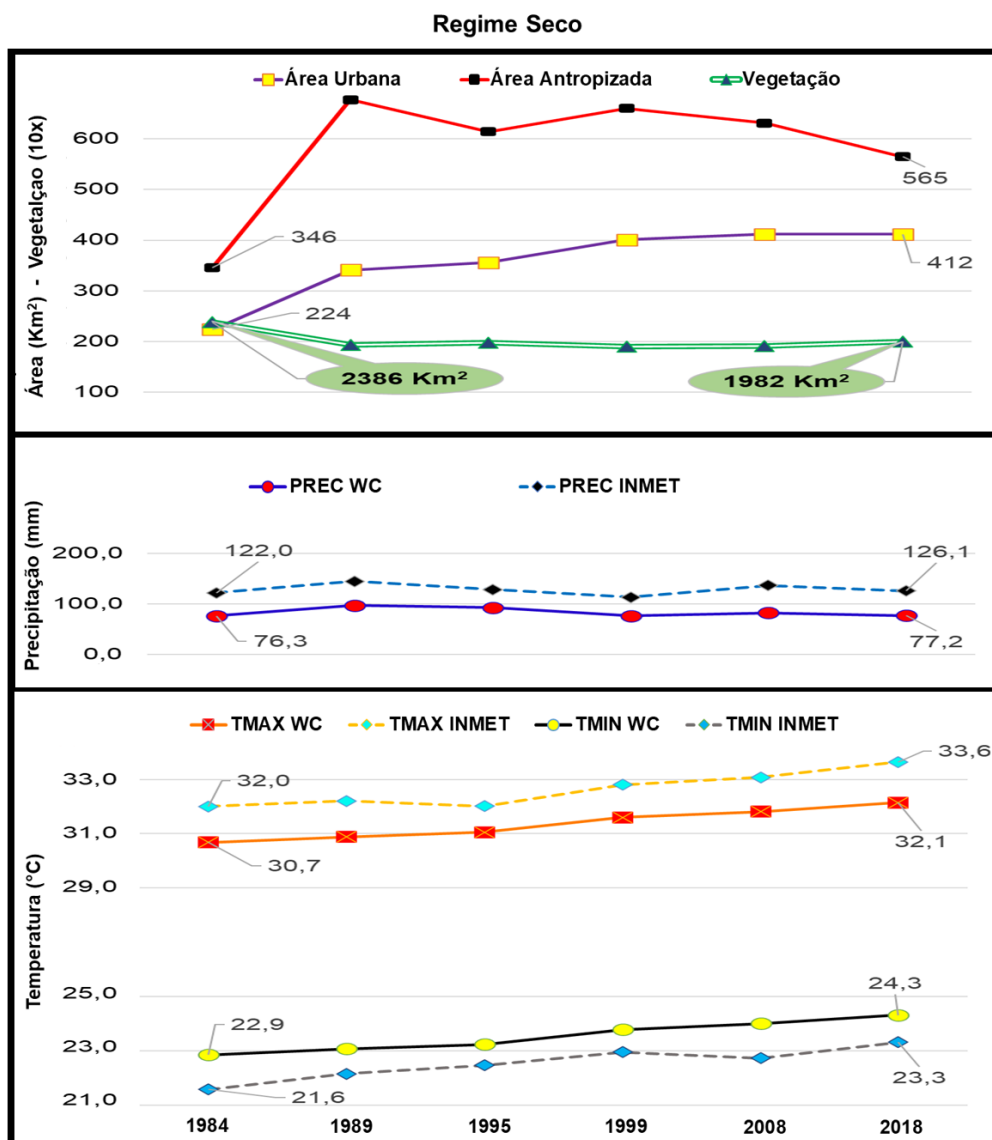


Fonte: Gutierrez e Souza (2021).

A Figura 11 apresenta a compilação dos dados climáticos e do uso e cobertura para o regime seco. Observa-se que a precipitação média aumentou de 73,3 mm para 77,2 mm (WC) e de 122,0 mm para 126,1 mm (INMET). A temperatura máxima também subiu de 30,7°C para 32,1°C (WC), e de 32,0°C para 33,6°C para estação INMET. Assim como as outras variáveis meteorológicas, a média da temperatura mínima elevou de 22,9°C para 24,3°C (WC) e de 21,6°C para 23,3°C (INMET).

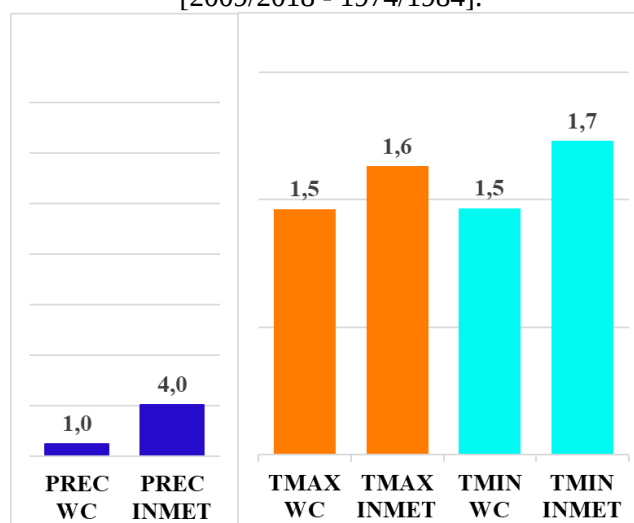
Assim como evidenciou-se que todas as variáveis climáticas cresceram na estação chuvosa, o mesmo comportamento foi constatado para o período seco, conforme ilustra a Figura 12. Neste regime a precipitação média dilatou de 1,0 mm (WC) para 4,0 mm (INMET), a temperatura máxima subiu em 1,5°C (WC) e 1,6°C (INMET) e a temperatura mínima cresceu 1,5°C (WC) e 1,7°C (INMET).

Figura 11. Regime seco: dinâmica multitemporal das classes de uso e cobertura (vegetação, urbano, antropizado) da RMB com os dados climáticos de PREC, TMAX e TMIN do INMET e WC na sequência dos anos 1984, 1989, 1995, 1999, 2008 e 2018.



Fonte: Gutierrez e Souza (2021).

Figura12. Diferença entre as medidas das variáveis climáticas do regime seco [2009/2018 - 1974/1984].

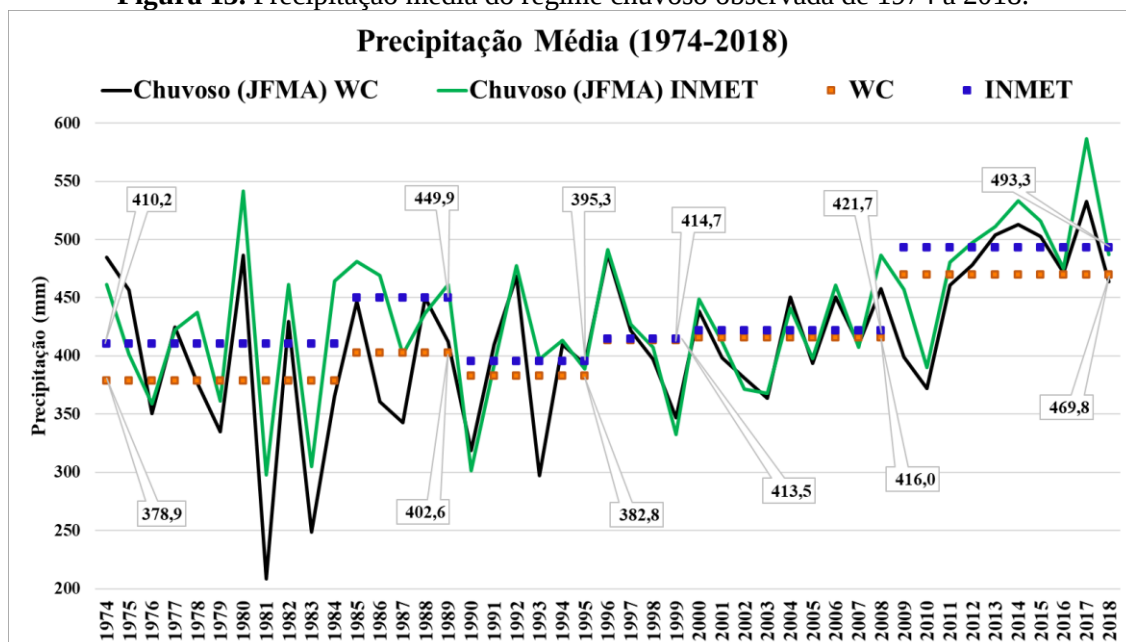


Fonte: Gutierrez e Souza (2021).

Para complementar os resultados das variações e tendências das variáveis climáticas no período estudado, apresentam-se os gráficos com a variabilidade interanual dos regimes sazonais, a seguir.

A Figura 13 mostra a precipitação (linhas contínuas) para estação chuvosa na sequência temporal de 1974 a 2018, além de exibir as médias (quadrículos) referente aos períodos em que foram compilados por sensoriamento as classes de uso e cobertura da RMB. As linhas nas cores preta (WC) e verde (INMET) mostram variações pronunciadas do regime chuvoso ao longo de 44 anos, sendo que as menores precipitações ocorreram em 1981, com 208,6mm (WC) e 297,8mm (INMET), em contrapartida, as maiores médias foram registradas em 2017, com 532,6mm (WC) e 586,6mm (INMET). A análise visual revela uma tendência crescente de precipitação no período estudado.

Figura 13. Precipitação média do regime chuvoso observada de 1974 a 2018.

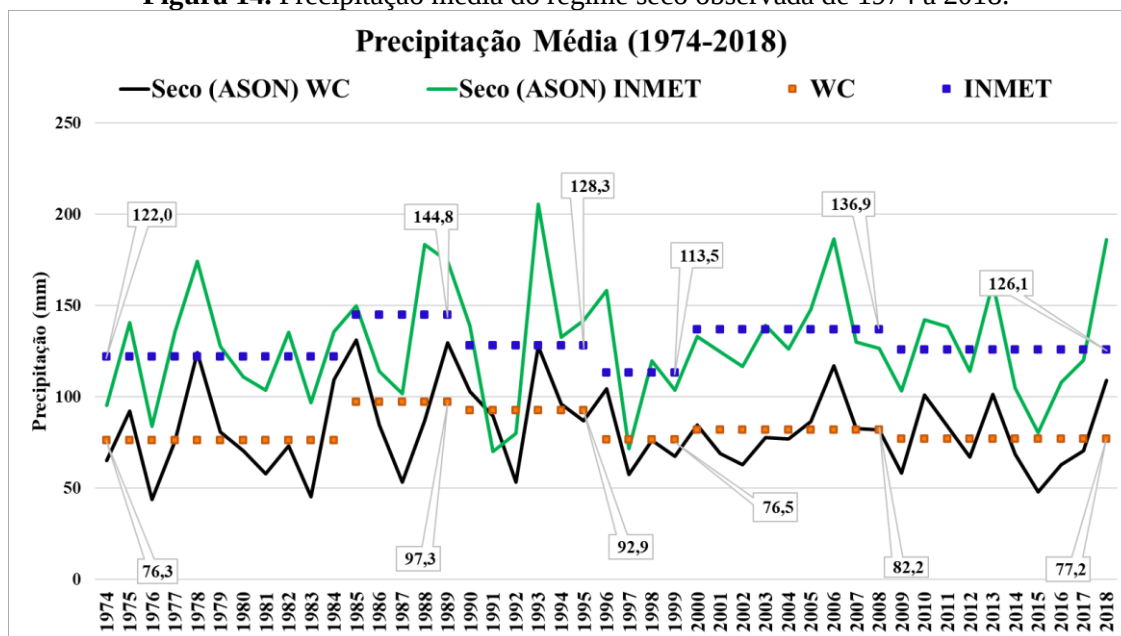


Fonte: Gutierrez e Souza (2021).

Similarmente a figura anterior, a Figura 14 mostra a precipitação (linhas contínuas) para estação seca na sequência temporal de 1974 a 2018. Vislumbra-se que a precipitação apresenta tendência de quase de constância, pois as linhas que representam os valores das médias anuais oscilam entre baixas e altas ao longo dos 44 anos de observação, para ambas as fontes de dados climáticos. Os quadrículos que representam as médias de precipitação revelam que a maior diferença de precipitação ocorreu entre o primeiro (1974-1984) e o segundo (1984-1989) período, variando de 76,3 para 97,3mm (WC) e de 122,0 para 144,8mm (INMET). A variabilidade da precipitação no período

seco é pequena, pois modificou de 122,0 para 126,1mm (INMET) e de 76,3 para 77,2mm (WC) em 44 anos de estudo.

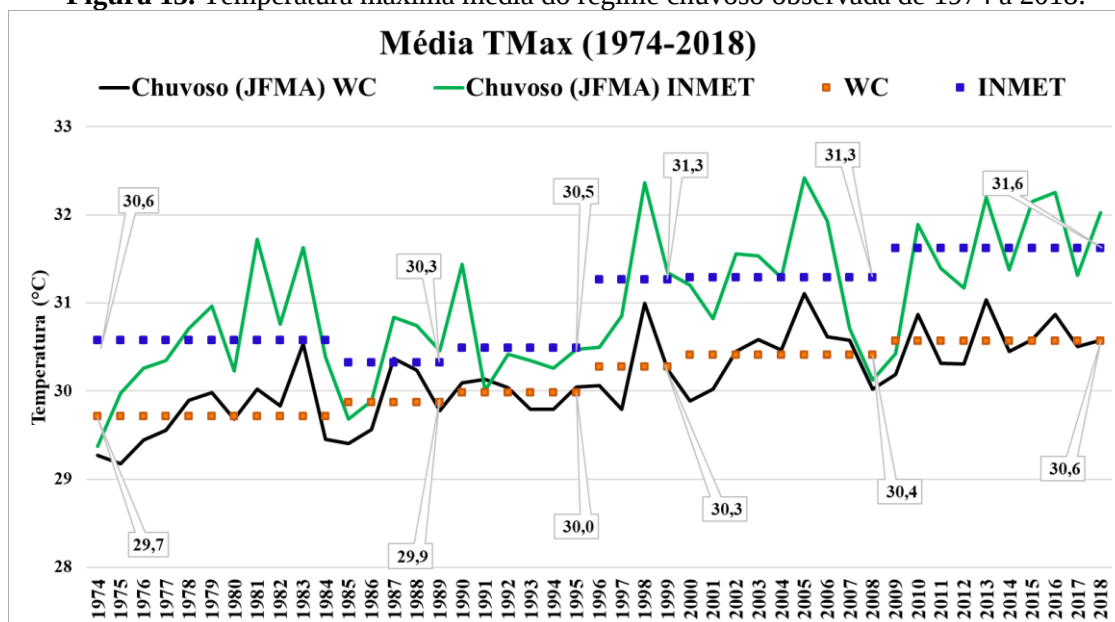
Figura 14. Precipitação média do regime seco observada de 1974 a 2018.



Fonte: Gutierrez e Souza (2021).

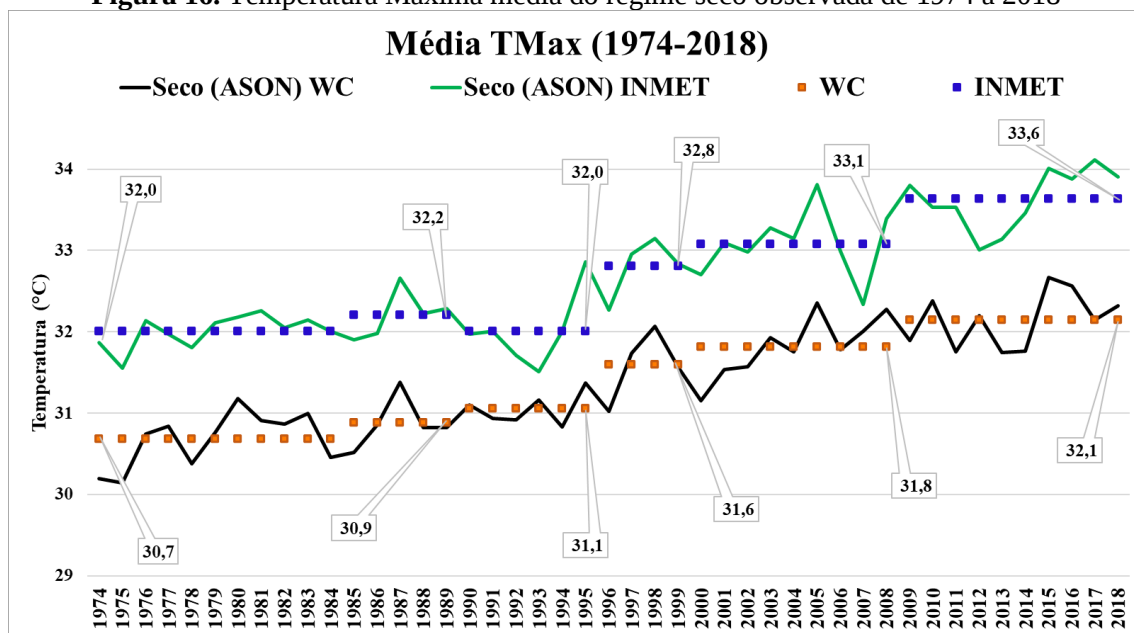
A Figura 15 exibe temperatura máxima (TMAX) média do regime chuvoso de 1974 a 2018. A TMAX apresenta tendência visivelmente crescente, pois as séries temporais representadas pelas linhas contínuas variaram de 29,3°C para 30,6°C (WC) e de 29,4°C para 32,0°C (INMET). Outra importante informação é que durante o período (44 anos), as menores TMAX registradas foram 29,2°C (WC) e 29,4°C (INMET) e as maiores 31,1°C (WC) e 32,4°C (INMET). No que concerne aos períodos de observação do sensoriamento remoto de uso e cobertura da RMB, o conjunto de dados WC apresentou TMAX sempre crescente, de 29,7°C para 32,6°C. De outra parte, a série de dados INMET auferiu queda da TMAX no segundo período (1984 a 1989), mesmo período correspondente ao elevado registro de precipitação, no período chuvoso da RMB.

Figura 15. Temperatura máxima média do regime chuvoso observada de 1974 a 2018.



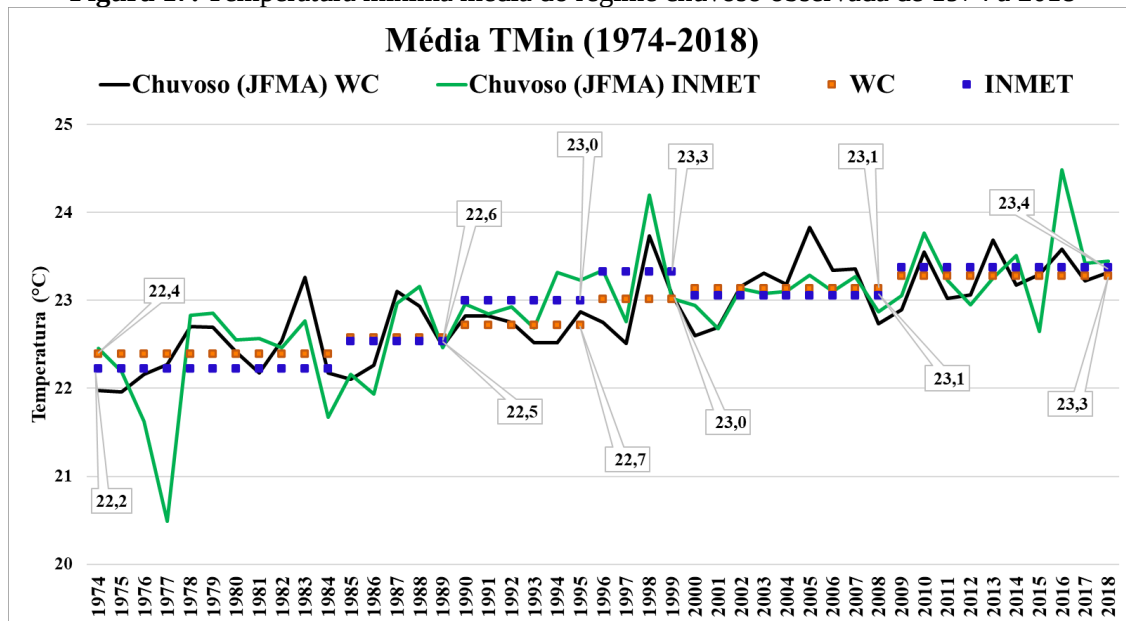
Fonte: Gutierrez e Souza (2021).

A Figura 16 apresenta a temperatura máxima (TMAX) do regime seco de 1974 a 2018, nas qual irrefutavelmente verifica-se tendência crescente da TMAX, com valores de 30,2°C (WC) e 31,9°C (INMET) em 1974 expandindo para 32,3°C (WC) e 33,9°C (INMET) em 2018. As maiores médias de TMAX, na estação seca, para as duas fontes de dados, ocorreram em 2015 para WC (32,7°C) e em 2017 para INMET (34,1°C). No que se refere aos períodos de observação do sensoriamento remoto na RMB, quando se registrou aumento das áreas urbanas e de antropização, bem como supressão de vegetação, os valores de TMAX, tanto para o conjunto de dados WC quanto para os valores registrados pela estação INMET revelaram médias anuais crescentes, assinalando tendência positiva de 32,0°C para 33,6°C (INMET) e de 30,7°C para 32,1°C (WC).

Figura 16. Temperatura Máxima média do regime seco observada de 1974 a 2018

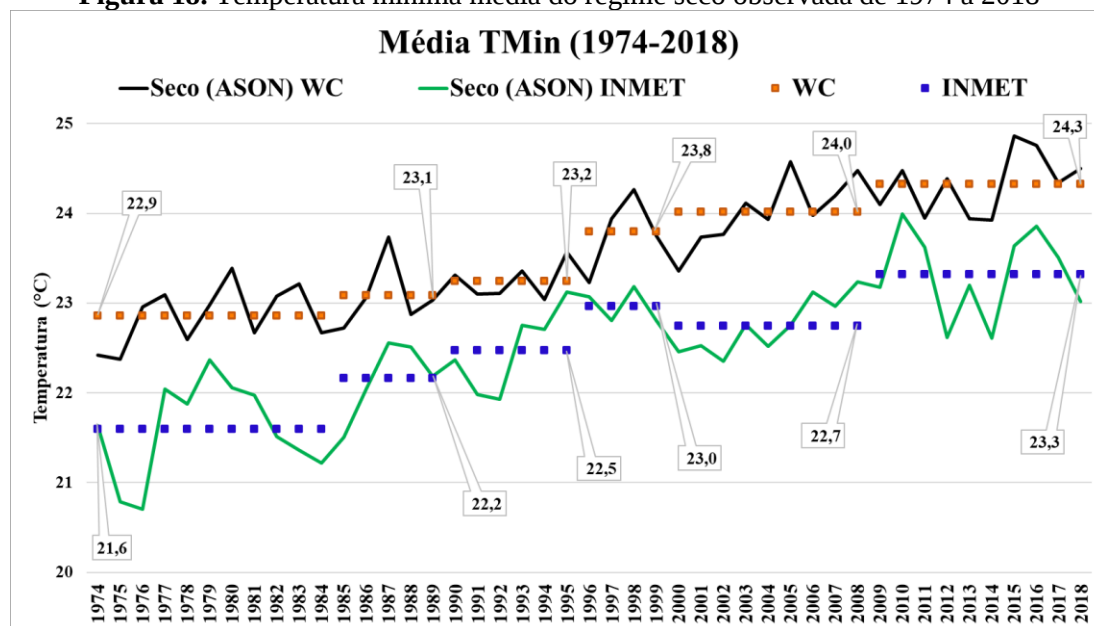
Fonte: Gutierrez e Souza (2021).

A Figura 17 expõe a temperatura mínima (TMIN) do regime chuvoso de 1974 a 2018. Infere-se que a TMIN também teve comportamento crescente, verificado pelo comportamento das linhas contínuas, oscilando entre 22,0°C a 23,8°C (WC) e 20,5°C a 24,5°C (INMET), cujas amplitudes são 1,8°C (WC) e 4,0°C (INMET). No que diz respeito aos períodos do sensoriamento remoto na RMB, a Figura 17 revelou que os valores do conjunto de dados WC estavam acima dos valores registrados pela estação meteorológica INMET em três períodos (1974-1984, 1985-1989 e 2000-2008), alternadamente aos valores INMET que apresentaram valores acima em outros três (1990-1995, 1996-1999 e 2009-2018), evidenciando um comportamento de TMIN muito diferente das médias anuais de precipitação e temperatura máxima, pois para essas variáveis climáticas, os valores da estação meteorológica INMET sempre registrou valores acima do conjunto de dados WC.

Figura 17. Temperatura mínima média do regime chuvoso observada de 1974 a 2018

Fonte: Gutierrez e Souza (2021).

A Figura 18 exibe a temperatura mínima (TMIN) para o regime seco de 1974 a 2018, a qual revela um comportamento claramente crescente ao longo do período estudado. A linha preta (WC) apresentou média anual de 22,4°C em 1974 e 24,5°C em 2018, enquanto a linha verde (INMET) registrou média anual em 1974 de 21,6°C e em 2018 de 23,0°C, exprimindo nitidamente o crescimento de TMIN no período. A Figura 18, por intermédio dos quadrículos que representam os períodos do sensoriamento remoto, reforçam o comportamento crescente da TMIN na estação seca, uma vez que para o conjunto de dados WC o primeiro período registrou 22,9°C contra 24,3°C do último, ao passo que, para estação INMET, o primeiro período apresentou 21,6°C contra 23,3°C no último.

Figura 18. Temperatura mínima média do regime seco observada de 1974 a 2018

Fonte: Gutierrez e Souza (2021).

3.3.6 Interstício sazonal climático (ISC) entre estação chuvosa e seca

Este estudo constatou pela compilação dos dados históricos oriundos das fontes WorldClim e INMET, que existem regimes sazonais bem definidos na região. Embora muitas pesquisas climatológicas sobre a região amazônica serem destinadas apenas ao estudo das estações chuvosa e seca, durante o trimestre (maio, junho e julho) ficou bem perceptível que acontece uma transição entre essas duas estações na RMB. Conforme demonstraram os dados, trata-se de um terceiro regime sazonal também bem definido, mas com carência de estudos voltados para propósito de aprofundar esse tema. Neste contexto, a Figura 19 faz a compilação da variabilidade climática das estações sazonais, considerando a estação chuvosa (janeiro, fevereiro, março e abril), seca (agosto, setembro, outubro e novembro) e o ISC (maio, junho e julho).

Independente da fonte dos dados, conforme observa-se na Figura 19, para todas as variáveis climáticas (precipitação, temperatura máxima e temperatura mínima) a estação do Interstício Sazonal Climático (ISC), representada pela linha vermelha, sempre apresentou médias entre os valores da estação chuvosa e seca. Essa condição da estação ISC é mais perceptível de se vislumbrar na Figura 19a e 19b, tendo em vista que a precipitação apresenta valores absolutos maiores, cuja plotagem facilita a visualização.

Outro fato a ser considerado é que a linha pontilhada de tendência (cor marrom) da estação ISC apresenta-se crescente, para todas as variáveis climáticas, revelando que,

à medida que os anos passaram, os índices de precipitação e temperaturas (TMAX e TMIN) aumentaram, considerando-se as duas origens de informação (WC e INMET).

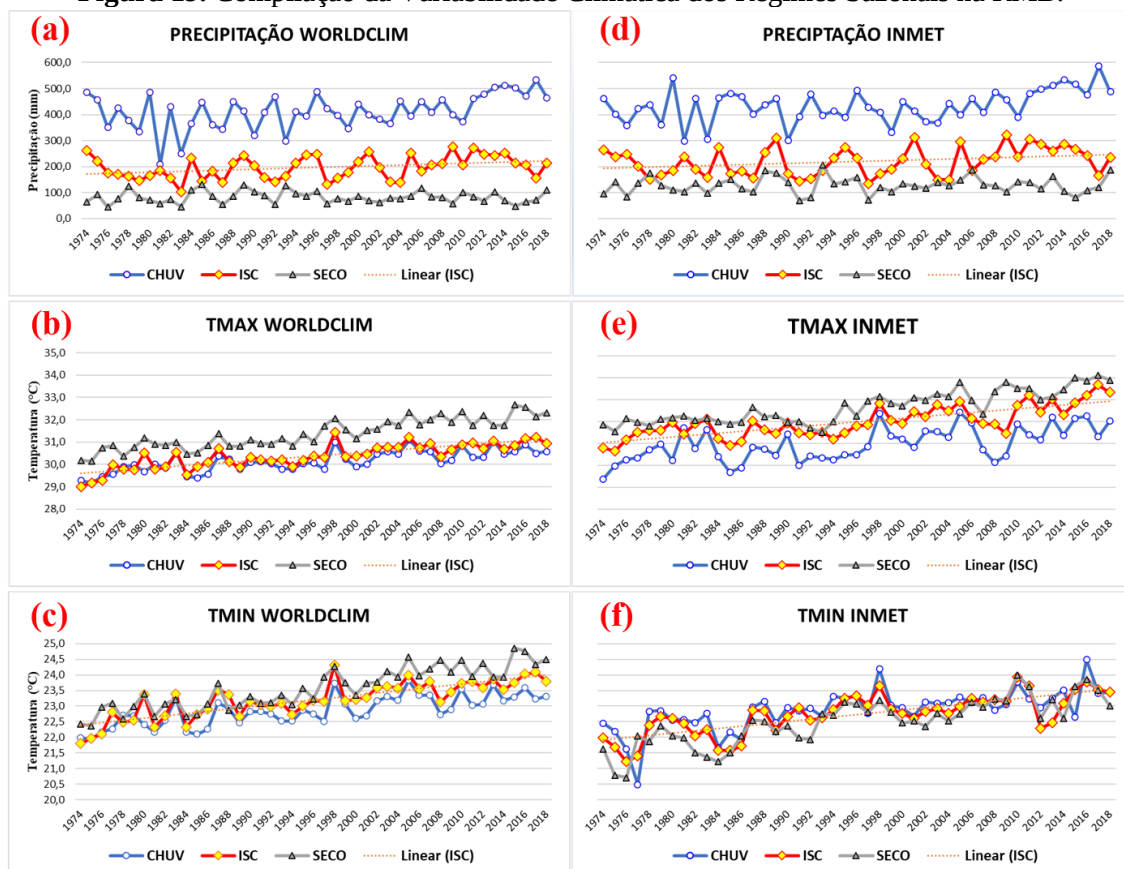
As Figuras 19a e 19b registram menores médias de precipitação na ISC de 102.9mm (WC) e 135.0 (INMET), nos anos de 1983 e 1997, respectivamente. De outro lado, as maiores médias foram 276,1mm (WC) e 322,3 (INMET), ambas no ano de 2009.

As Figuras 19c e 19d marcaram médias de TMAX oscilando de 29,0°C a 31,5°C (WC) e de 30,6°C a 33,7°C (INMET) para ISC, cujas amplitudes térmicas foram 2,4°C (WC) e 3,0°C (INMET). Comparando-se esses últimos valores com as amplitudes de TMAX na estação seca, 2,5°C (WC) e 2,6°C (INMET), observa-se que para o primeiro conjunto de dados (WC), a amplitude térmica ISC esteve muito próxima da amplitude da estação seca, com diferença de apenas 0,1°C e confrontado com a amplitude da estação seca INMET, apresentou amplitude de 0,4°C acima, mas isso é compreensível levando-se em conta que a estação ISC é um período de transição e algumas médias anuais estão próximas da estação chuvosa (abril) e outras estão próxima da estação seca (agosto).

As Figuras 19e e 19f apresentam as médias de TMIN com temperaturas variando de 21,8°C a 24,3°C (WC) e de 21,2°C a 33,9°C (INMET) para estação ISC. As amplitudes térmicas computaram os seguintes valores 2,5°C (WC) e 2,7°C (INMET). Fazendo uma analogia com as amplitudes térmicas da estação seca, o conjunto de dados (WC) apresentou valor idêntico (2,5°C), mas esteve abaixo da amplitude INMET (3,3°C).

Analisando as séries temporais dos dados climáticos, constatou-se que uma característica importante do Interstício Sazonal Climático é que, neste período de transição, o mês de maio ainda registra pancadas moderadas de chuvas e temperaturas amenas, e à medida que se aproxima o final do trimestre, os índices de precipitação reduzem para médias de $148,8 \pm 12,5$ mm e a temperatura máxima se eleva em aproximadamente 1,0°C acima da média.

Figura 19. Compilação da Variabilidade Climática dos Regimes Sazonais na RMB.



Fonte: Gutierrez e Souza (2021).

3.3.7 Álgebra de Mapas Climáticos

O estudo revelou que os índices de precipitação e temperaturas da RMB aumentaram nas últimas décadas. Para complementar esses resultados, calculou-se a subtração entre grades climáticas de 2,5'' da última década pela primeira, resultando num mapa cujos pixels revelam a variação ou tendência distribuída espacialmente dentro da RMB, ou seja, os mapas exibem, por meio de isoietas, o quanto a PREC, TMAX e TMIN aumentaram ou diminuíram espacialmente da primeira para última década.

A Figura 20 exibe o aumento de precipitação na RMB, de 1974 a 2018, para as estações sazonais Chuvosa, Seca e Interstício Sazonal Climático.

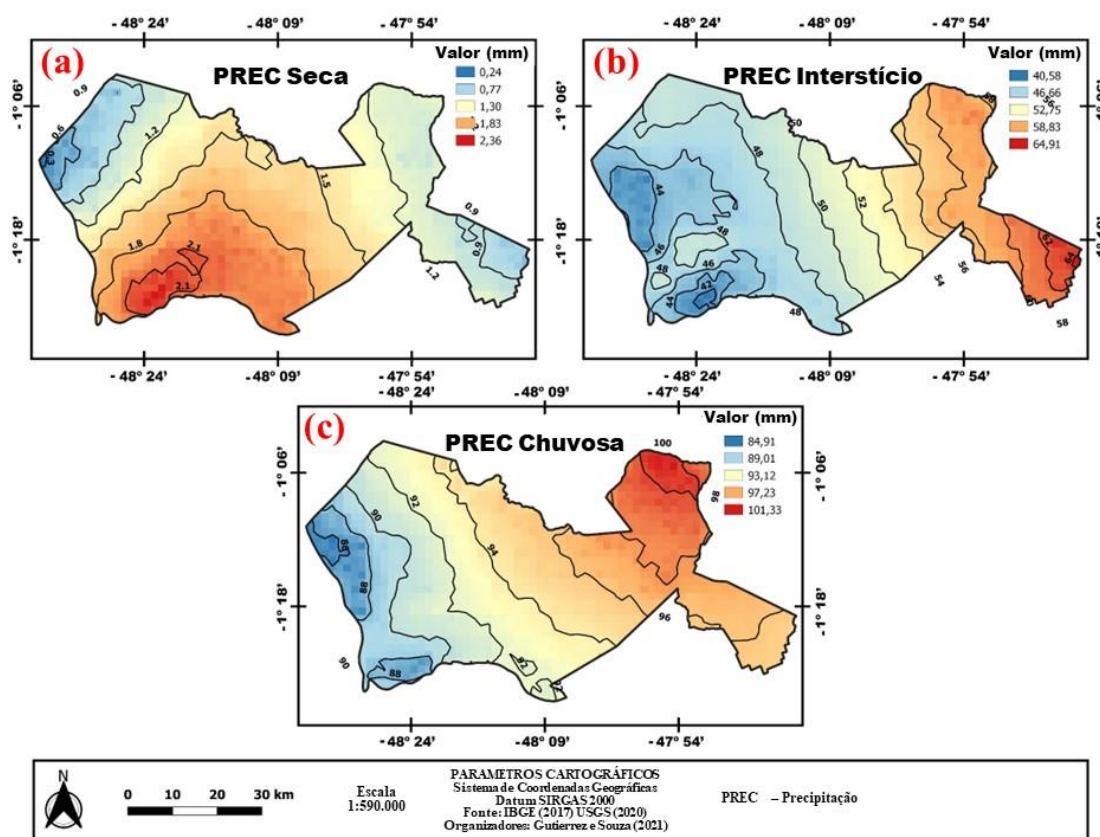
Conforme observa-se, a estação seca (Figura 20a) apresentou pouca mudança pluviométrica com variação de 0,24 a 2,36mm. A região sudoeste da RMB (mancha avermelhada) corresponde a área com maior expansão da urbanização e nela registrou-se as maiores variações nos índices de precipitação, já os extremos leste e oeste as menores oscilações.

A Figura 20b mostra que a variação da precipitação no interstício sazonal aumentou consideravelmente em comparação a estação seca. Na região leste a precipitação aumentou até 64,91mm e à oeste da RMB registrou-se a menor diferença de precipitação (até 40,58mm).

Na estação chuvosa (Figura 20c) registrou-se a maior variabilidade da precipitação, com algumas localidades do nordeste da RMB alcançando 101,33mm a mais de chuva na última década. A região oeste teve aumento de precipitação acima de 84,91, enquanto a região central alternou valores entre 89,01 e 97,23mm.

Não é possível afirmar que a urbanização e a antropização na RMB afetaram diretamente a variabilidade da precipitação, tendo em vista que, o regime de chuva sofre influência de alguns fatores globais e outros regionais que não são objetos deste estudo, tais como ZCIT, ZCAS, El Niño, La Niña e outros fenômenos.

Figura 20. Aumento de Precipitação na RMB (1974 a 2018).



Fonte: Gutierrez e Souza (2021).

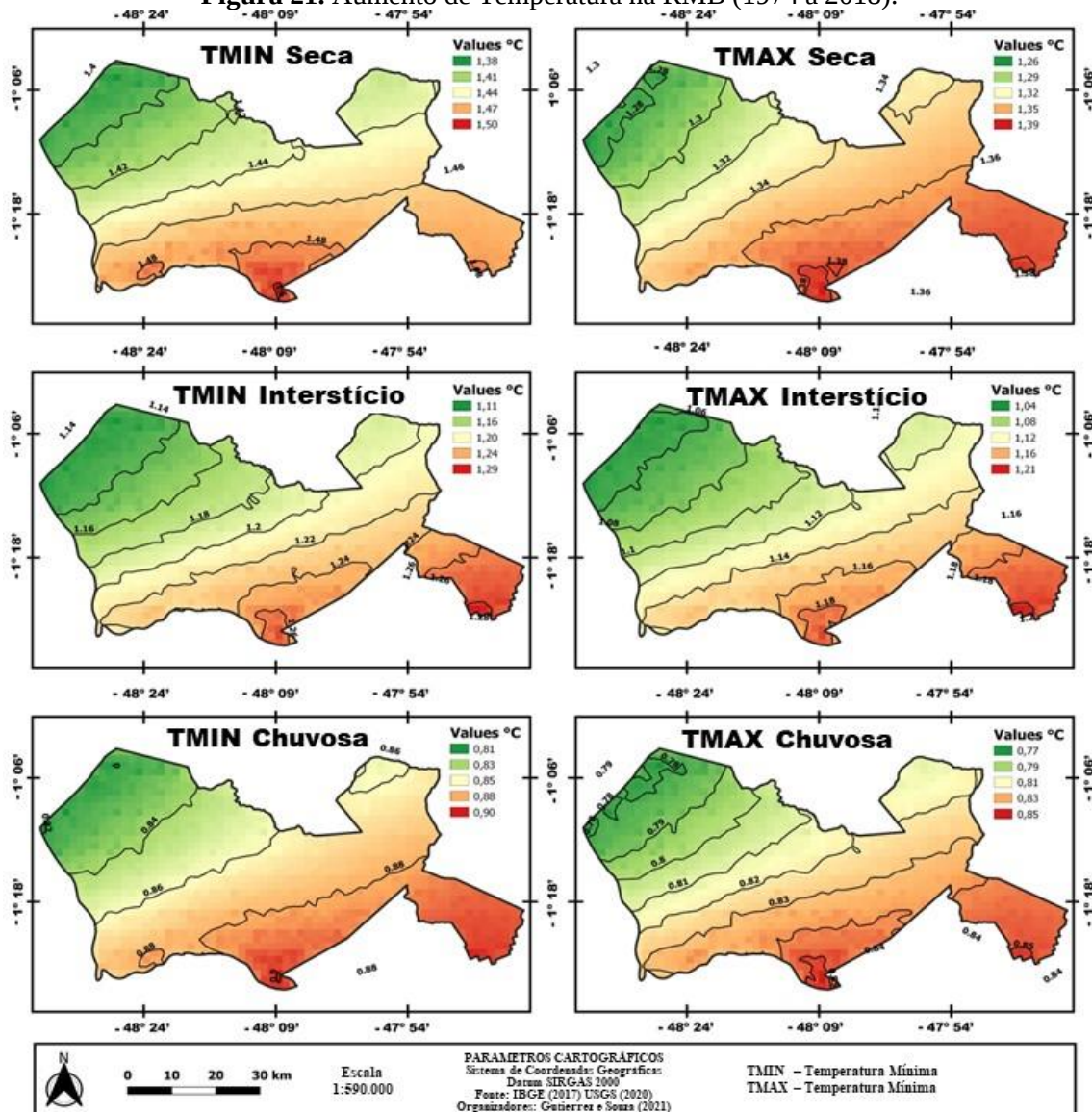
A Figura 21 exibe a variação da temperatura na RMB para as três estações sazonais de 1974 a 2018. As Figura 21a, 21b e 21c, referem-se a variabilidade da

temperatura Mínima (TMIN) e as 21d, 21e e 21f, dizem respeito a temperatura máxima (TMAX).

De acordo com Figura 21, as manchas verdes são regiões onde houve as menores variabilidade de temperatura na RMB, mas deve-se atentar que essas regiões correspondem às coberturas com presença de grandes corpos d'água, o que justifica a pouca variabilidade. A Figura 21 também exibe um gradiente de aquecimento que se estende no sentido noroeste-sudeste, assim à medida que as isoietas são plotadas nessa direção constata-se maiores variações na temperatura. Ressalva-se que a faixa que vai da região sudoeste até o leste da RMB, corresponde as coberturas com maiores áreas de urbanização e as regiões centro, nordeste e sudeste apresentaram grandes áreas de antropização, o que pode justificar a maior alteração nessas regiões.

Diferente do que ocorre com a precipitação, que sofre outras influências no regime de chuva, as temperaturas são afetadas diretamente pelas mudanças na cobertura superficial impactando sobremaneira na elevação da temperatura e no microclima. Deste modo, foram registradas variações para TMIN de até 1,5°C na estação seca, até 1,29°C na ISC e 0,90°C na estação chuvosa. De outra parte, a TMAX auferiu variabilidade limitada a 1,39°C, 1,21°C e 0,85°C nas estações seca, ISA e chuvosa, respectivamente.

Figura 21. Aumento de Temperatura na RMB (1974 a 2018).



Fonte: Gutierrez e Souza (2021).

3.4 DISCUSSÃO

Azevedo et al. (2021) estudaram a temperatura e o uso e cobertura do solo em dois importantes municípios (Belém e Ananindeua) da RMB, constatando perda de 44% da vegetação e aumento de 62% da área antropizada de 2001 a 2018, observando que esta última classe foi onde ocorreu a maior evolução de área. Somado ao exposto, o mesmo estudo detectou aumento da temperatura local. Análogo a pesquisa citada, o presente estudo também determinou perda da vegetação (17%), aumento nas classes urbana (184%) e antropizada (63%) na RMB, além de confirmar aumento da temperatura regional.

Ferreira Filho et al. (2020) efetuaram a espacialização da distribuição da precipitação média anual de 1986 a 2015 no estado do Pará, através do método de interpolação Krigagem, evidenciando que os maiores índices pluviométricos estão localizados no Nordeste Paraense, onde se insere a RMB. Para os autores, o mês de março é o mês com maior precipitação (464 mm), enquanto que outubro e novembro são os meses com menores alturas pluviométricas (122 mm). Similarmente, este estudo fez espacialização da precipitação média na RMB de 1974 a 2018 por meio do interpolador IDW (Inverso da Distância à Potência), confirmando o mês de março como sendo o que apresenta os maiores índices de precipitação na região, com médias variando de 479mm (WC) e 492mm (INMET), ratificando também que os meses de outubro (WC=126mm INMET=125mm) e novembro (WC=69mm INMET=70mm) são os meses com menores taxas pluviométricas.

Pesquisando os efeitos naturais do clima e da ação antrópica em Belém, que influenciaram nas variáveis meteorológicas (temperatura e precipitação) de 1973 a 2015, Cirino et al. (2019) observaram que os valores anuais de temperatura máxima e mínima demonstram tendência de aumento ao longo dos anos, o que de fato é confirmado no presente trabalho, relatando que a temperatura máxima média subiu de 30,6°C para 31,6°C na estação chuvosa e de 32,0°C para 33,6°C na seca, enquanto a temperatura mínima média elevou de 22,2°C para 23,4°C na estação chuvosa e de 21,6°C para 23,3°C na seca, desta forma confirmando a tendência de aumento com o passar dos anos.

CHAPMAN et al. (2019) investigaram o impacto do crescimento urbano e mudanças climáticas em Brisbane, Austrália, de 1991 a 2000 durante o verão, concluindo que as temperaturas aumentaram mais com as mudanças climáticas e o crescimento urbano combinados do que apenas com as mudanças climáticas, indicando que, se o crescimento urbano for ignorado, as temperaturas urbanas futuras podem ser subestimadas. Acompanhado a conclusão e o relato destes autores, este estudo não apenas constatou o crescimento da temperatura na estação seca, mas também da precipitação no período chuvoso e no interstício sazonal climático da RMB, os quais estão fortemente relacionados com a urbanização na região, conforme atestou a análise estatística de correlação.

3.5 CONCLUSÃO

O estudo atingiu o objetivo proposto, uma vez que utilizou dois conjuntos de dados climáticos de fontes diferentes somado aos dados gerados por geoprocessamento, num período de 44 anos, comprovando por análises estatísticas que o crescimento dos núcleos urbanos na RMB impactou a variabilidade climática local/regional.

Durante o período estudado (1974-2018), constatou-se que tanto os índices de precipitação quanto os de temperatura do ar (máxima e mínima) apresentam tendências crescentes em Belém e na RMB como um todo, sendo que este padrão se correlaciona fortemente com a expansão da urbanização decorrente do processo de antropização com a supressão de vegetação ao longo da região. Verificou-se que a precipitação média aumentou até 4,0mm na estação seca (sem tendência de crescimento), até 90,9mm no período chuvoso (com tendência de crescimento). O estudo apurou que a temperatura máxima subiu até 1,6°C na estação seca e até 1,7°C na chuvosa. A temperatura mínima cresceu até 1,7°C, no período seco e 1,2°C na estação chuvosa.

As ferramentas de geoprocessamento possibilitaram identificar a distribuição espacial dos locais onde ocorreram as variabilidades climáticas, além de determinar o quanto aumentou os valores de precipitação e temperatura do ar ao longo da RMB.

Outra importante constatação foi que, além dos conhecidos regimes sazonais chuvoso e seco, existe um interstício sazonal climático na região, caracterizando-se como um terceiro período sazonal bem definido nos meses de maio, junho e julho, marcando o regime de transição entre as estações chuvosa e seca.

Este estudo coaduna com outros estudos científicos no pensamento de que o aumento da urbanização na região metropolitana de Belém se intensificou, mas não é o único responsável pelo microclima regional. Evidentemente, outros fatores externos e de escala global corroboram para variabilidade no clima regional, principalmente no que concerne ao regime de chuva, mas é preciso lançar olhos com maior atenção para intensificação da urbanização que está afetando, de certo, na variabilidade em escala micro e mesoclimática.

Para trabalhos futuros, recomenda-se investigar a relação da ação antrópica na região com outras variáveis climáticas, tais como insolação, nebulosidade, umidade e vento. E finalmente, o aprofundamento mais detalhado de estudos destinados à estação sazonal denominada de interstício climático.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais da UFPA (Universidade Federal do Pará), vinculado ao Instituto de Geociências - IG da Universidade Federal do Pará (UFPA), e desenvolvido em parceria com as instituições de pesquisa Museu Paraense Emílio Goeldi (MPEG) e Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA/Amazônia Oriental). Agradecem também à Universidade do Estado do Pará (UEPA) pela concessão da bolsa de doutorado.

REFERÊNCIAS

- AZEVEDO, Sarah Dias; SOARES, Lorena Fernanda Araújo; TORRES, Leandro Marques. Temperatura de superfície e uso e cobertura do solo em municípios da região metropolitana de Belém/PA. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 12, n. 1, p. 214-222, 2021.
- BARRETO, Lidianne Pereira Gomes Lucas; DA ROSA SALES, Davidson; BARRETO, Wagner Davy Lucas. Perfil dos incêndios urbanos na região metropolitana de Belém. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 7, p. 53714-53727, 2020.
- CHANGNON, Stanley A. Inadvertent weather modification in urban areas: Lessons for global climate change. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 73, n. 5, p. 619-627, 1992.
- CHAPMAN, Sarah; THATCHER, Marcus; SALAZAR, Alvaro; WATSON, James E.M.; MACALPINE, Clive A. The impact of climate change and urban growth on urban climate and heat stress in a subtropical city. **International Journal of Climatology**, 2019.
- CIELO, C. A.; GONÇALVES, B. F. T.; LIMA, J. P. M.; CHRISTMANN, M. K. Maximum phonation time of/a/, maximum phonation time predicted and respiratory type in adult women without laryngeal disorders. **Revista CEFAC**, v. 17, n. 2, p. 358-363, 2015.
- CIRINO, Luciana Dos Santos; VITORINO, Maria Isabel; DE HOLANDA, Bruno Silva. Análise climática da variabilidade natural e antrópica para uma metrópole amazônica. **Revista Brasileira de Iniciação Científica**, v. 6, n. 2, p. 3-26, 2019.
- COUNTINHO, Eliane de Castro; DA ROCHA, Edson José Paulino; LIMA, Aline Maria Meiguins; RIBEIRO, Hebe Morganne Campos; GUTIERREZ, Lucy Anne Cardoso Lobão; BARBOSA, Ana Júlia Soares; PAES, ALVES, Gleicy Karen Abdon Alves; BISPO, Carlos José Capela; TAVARES, Paulo Amador. Riscos socioeconômicos e ambientais em municípios banhados pelos afluentes do Rio Amazonas. **Revista Ambiente & Água**, Taubaté, v.12, n.5, p.814-828, 2017.
- DE OLIVEIRA, Luiz F. C.; FIOREZE, Ana. P.; MEDEIROS, Antonio M. M.; SILVA, Melissa A. Comparação de metodologias de preenchimento de falhas de séries históricas de precipitação pluvial anual. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 11, p. 1186-1192, 2010.
- DEWAN, Ashraf M.; YAMAGUCHI, Yasushi. Land use and land cover change in Greater Dhaka, Bangladesh: Using remote sensing to promote sustainable urbanization. **Applied Geography**, v. 29, n. 3, p. 390-401, 2009.
- DIAS, Luanna Costa; DA CRUZ VALENTE, Alexandre Miguel; FERNANDES, Lindemberg Lima. Análise e correlação de variáveis climatológicas com os fenômenos climáticos e a urbanização na Cidade de Belém, no Estado do Pará, região Norte do Brasil. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 8, p. e972986790-e972986790, 2020.
- FERREIRA, Douglas Batista da Silva; DE SOUZA, Everaldo Barreiros; DE OLIVEIRA, Juarez Ventura. Identificação de extremos de precipitação em municípios do Estado do Pará e sua relação com os modos climáticos atuantes nos oceanos pacífico e atlântico. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 27, 2020.
- FERREIRA, Fabiana Lourenço; PEREIRA, Enio Bueno; LABAKI, Lucila Chebel. Fatores associados à distribuição da temperatura das superfícies em áreas urbanas: zonas climáticas locais e características espectrais. **Ambiente Construído**, v. 21, n. 1, p. 237-262, 2021.
- FERREIRA FILHO, David Figueiredo; LIRA, Bruna Roberta Pereira; CRISPIM, Diêgo Lima; PESSOA, Francisco Carlos Lira; FERNANDES, Lindemberg Lima. ANÁLISE PLUVIOMÉTRICA NO ESTADO

DO PARÁ: COMPARAÇÃO ENTRE DADOS OBTIDOS DE ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS E DO SATÉLITE GPCC. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 26, 2020.

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.

HARRIS, I.; JONES, P. D.; OSBORN, T. J.; LISTER, D. H. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations—the CRU TS3. 10 Dataset. **International journal of climatology**, v. 34, n. 3, p. 623-642, 2014.

IBGE - **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística**. Censo Demográfico. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pa/belem/panorama>. Acesso em: 20/02/2021.

LOMBARDO, M. A. Análise das mudanças climáticas nas metrópoles o exemplo de São Paulo e Lisboa. **Da produção ao consumo: impactos socioambientais no espaço urbano**, Editora UNESP. São Paulo: Cultura Acadêmica, p. 111-146, 2009. E-Book. ISBN 9788579830075. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/109101>>. Acesso em: 05/03/2021.

MARTINS, Rubens Takeji Aoki Araujo; PENNER, Giovanni Chaves Penner; GONÇALVES, Moisés Marçal. Estimativa da recarga natural do aquífero livre na microbacia hidrográfica do entorno do aterro sanitário de Marituba/PA. In: PENNER, Giovanni Chaves. Demandas essenciais para o avanço da engenharia sanitária e ambiental. Ponta Grossa: **Atena Editora**, 2019. Cap. 6. p. 52-65.

MELCHIORRI, Michele; Aneta J. Florczyk; Sergio Freire; Marcello Schiavina; Martino Pesaresi; Thomas Kemper. Unveiling 25 Years of Planetary Urbanization with Remote Sensing: Perspectives from the Global Human Settlement Layer. **Remote Sensing**, v. 10, n. 5, p. 768, 2018.

MONTEIRO, C. A. F. **Teoria e Clima Urbano**. São Paulo: IGEOG/USP, 1976.

MONTEIRO, Felipe Ferreira; Weber Andrade Gonçalves; Lara de Melo Barbosa Andrade; Lourdes Milagros Mendoza Villavicencio; Cassia Monalisa dos Santos Silva. Assessment of Urban Heat Islands in Brazil based on MODIS remote sensing data. **Urban Climate**, v. 35, p. 100726, 2021.

NUNES, Leticia Gonçalves; DE MENEZES FILHO, Frederico Carlos Martins. Avaliação das temperaturas de superfície obtidas por sensoriamento remoto nas estações seca e chuvosa. **Holos Environment**, v. 21, n. 1, p. 143-159, 2021.

PANAGOS, Panos; Ballabio, Cristiano; Meusburger, Katrin; Spinonia, Jonathan; Alewell, Christine; Borrelli, Pasquale. Towards estimates of future rainfall erosivity in Europe based on REDES and WorldClim datasets. **Journal of Hydrology**, v. 548, p. 251-262, 2017.

RAMIRES, Jane Zilda dos Santos; MELLO-THÉRY, Neli Aparecida de. Uso e ocupação do solo em São Paulo, alterações climáticas e os riscos ambientais contemporâneos. **Confins. Revue franco-brésilienne de géographie/Revista franco-brasileira de geografia**, n. 34, 2018.

RANJAN, Avinash Kumar; ANAND, Akash; VALLISREE, S.; SINGH, Rahul Kumar. LU/LC change detection and forest degradation analysis in Dalma wildlife sanctuary using 3S technology: A case study in Jamshedpur-India. **Aims Geosciences**, v. 2, n. 4, p. 273-285, 2016.

SILVA JÚNIOR, João de Athaydes, DA COSTA, Antonio Carlos Lôla; PEZZUTI, Juarez Carlos Brito; GALBRAITH, Rafael Ferreira da Costa, David Galbraith. Variabilidade espacial do conforto térmico e a segregação social do espaço urbano na cidade de Belém, PA. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n. 4, p. 419-428, 2013.

SIQUEIRA, Gilmar W.; APRILE, Fabio. Avaliação de risco ambiental por contaminação metálica e material orgânico em sedimentos da bacia do Rio Aurá, Região Metropolitana de Belém-PA. **Acta Amazônica**, v. 43, n. 1, p. 51-61, 2013.

TUONG, Vu Thuy; THY, Pham Thi Mai; LAM, Nguyen Dao. Multiscale remote sensing of urbanization in Ho Chi Minh city, Vietnam—a focused study of the south. **Applied Geography**, v. 92, p. 168-181, 2018.

USGS - UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. Double-Mass Curves. Manual of Hydrology: Part I. General Surface-Water Techniques, by James K. Searcy and Clayton H. Hardison, United States Department of the Interior, 1966.

VALE, Clemeson Cardoso; SILVA, Antonia Lima. CLASSIFICAÇÃO SUPERVISIONADA DOS MACIÇOS VEGETAIS E COBERTURA DO SOLO NO AGLOMERADO URBANO DE SÃO RAIMUNDO DAS MANGABEIRAS—MA. **Acta Tecnológica**, v. 14, n. 1, p. 93-101, 2021.

CAPÍTULO 4 – GLOBAL/REGIONAL IMPACTS ON PRESENT AND NEAR-FUTURE CLIMATE REGIMES IN THE METROPOLITAN REGION OF BELÉM, EASTERN AMAZON²

RESUMO

Os estudos de impactos têm contribuído para uma melhor compreensão científica integrada do clima e meio ambiente da Amazônia, no presente, passado e futuro. Este trabalho tem como objetivo descrever os impactos regionais das mudanças na cobertura do solo induzidas pelo homem sobre os regimes CHUVOSO (janeiro a abril) e SECO (julho a novembro) da Região Metropolitana de Belém (RMB), a primeira fronteira da ocupação amazônica. Além disso, um downscaling dinâmico (RegCM4 aninhado ao HadGEM2-ES no cenário RCP8.5) foi executado visando investigar os impactos futuros das mudanças climáticas globais. Uma análise quantitativa do clima atual (1985/2020) mostrou que o adensamento urbano desordenado em Belém e a supressão florestal que levou à expansão descontrolada da área de pastagem/agricultura sobre a RMB condicionou um clima local mais quente com uma tendência de aumento significativo da temperatura do ar em ambos os regimes sazonais. Outra evidência clara foi a intensificação sistemática da precipitação durante o período CHUVOSO. As simulações do RegCM4 indicam que a região será impactada pelas mudanças climáticas globais, de modo que as condições mais quentes no regime SECO e chuvas intensas no regime CHUVOSO devem persistir nas próximas décadas (2021/2045). Nossos achados para a RMB (área 3.565 km² para uma população de cerca de 2,5 milhões de habitantes) são relevantes e devem ser considerados nas tarefas de planejamento de longo prazo e elaboração de estratégias avançadas para mitigar futuros riscos relacionados ao clima, bem como na gestão de desastres urbanos.

Palavras-chave: Mudanças climáticas globais; Clima urbano; Amazônia; Modelagem climática; Impactos da cobertura do solo

ABSTRACT

Impact studies have contributed to a better integrated scientific understanding of the climate and environment of the Amazon, in the present, past, and future. This work aims to describe the re-gional impacts of human-induced landcover changes on the RAINY (January to April) and DRY (July to November) regime of the Metropolitan Region of Belém (MRB), the first frontier of Amazonian occupation. Furthermore, a dynamic downscaling (RegCM4 driven by HadGEM2-ES under the RCP8.5 scenario) was performed to investigate future global climate change impacts. A present climate (1985/2020) quantitative analysis showed that the disorderly urban enlargement in Belém and the forest suppression that led to the uncontrolled expansion of pasture/agriculture area over MRB has conditioned a local warmer climate with a significant increasing air temperature trend in both seasonal regimes. Another clear piece of evidence was the systematic intensification of the precipitation during the RAINY period. RegCM4 simulations indicate that the re-gion will be impacted by the global climate change, such that warmer conditions in the DRY and intensified rainfall in the RAINY regime are expected to persist in the coming decades (2021/2045). Our findings for the MRB (area 3565 km² for a population about 2.5 million inhabitants) are relevant and should be

² Artigo publicado: Gutierrez, C.B.B.; de Souza, E.B.; Gutierrez, D.M.G. Global/Regional Impacts on Present and Near-Future Climate Regimes in the Metropolitan Region of Belém, Eastern Amazon. *Atmosphere* 2022, 13, 1077. <https://doi.org/10.3390/atmos13071077>

considered in the tasks of long-term planning and elaboration of advanced strategies to mitigate future climate-related risks and urban disaster management.

Keywords: Global climate change; Urban climate; Amazon; Climate modelling; Landcover impacts

4.1 INTRODUCTION

Multiple anthropic activities have been systematically altered the natural landscape along the Brazilian Amazon and the consequent climate impacts arise at a variety of spatial and temporal scales [1–3]. Due the density of the in situ stations network along the Amazonian territory being the lowest in Brazil with the availability of few historical series [4], a complicating factor to characterize the regional climate [5], the numerical modeling tool has contributed greatly to the integrated scientific understanding of climate and environment of the region. Since the pioneering work by [6] that simulated a large-scale deforestation of the Amazon, several authors have conducted global and regional modeling experiments to evaluate the impacts of landuse and landcover (LULC) changes on the Amazon climate during the last decades. Consensual results indicate that the conversion of the forest into pasture/agriculture areas directly affects the regional energy balance with lower latent and higher sensible heat flux that explains the basin-wide increase in surface air temperature [7–9]. However, the effects on the water balance are spatially heterogeneous, with signs of increase and decrease in precipitation along the region [10,11]. The Regional Climate Model (RegCM4) simulations carried out by [12] under a scenario of Amazon deforestation (replacing broadleaf evergreen trees with grass) indicated robust results of higher air temperature (up to 2 °C) and a zonally dipole pattern response in the rainfall with a reduction over the west (7.9%) and an increase over the east (8.3%). Such opposite changes during Amazonian wet season are consistent with the findings of [13] and the rainfall intensification in eastern South America, including the Amazon region, was also simulated by [8].

Moreover, of particular importance is the global climate change as a critical factor in determining rainfall and air temperature in tropical South America, especially in the Amazonian region in the near- and long-term future [2,3]. An assessment and synthesis of ensemble projections of multiple global and regional models evaluated in the Fifth (CMIP5, [14]) and Sixth (CMIP6, [15]) Phase of the Coupled Model Intercomparison Project, under different future global emissions scenarios, was described by [16]. Overall, models project a very likely persistent air temperature increase over South America ranging from 1 to 6 °C by the end of the 21st century, so that the largest warmings are

expected over the Amazon basin and central Andes. On the other hand, the climate projections show a general increase pattern in annual rainfall over southern South America and decrease in northern South America (including the Amazon), considering all global emissions scenarios over the coming decades [17,18].

Another noteworthy factor is the urbanization process which, acting synergistically with LULC changes and global climate change [1,3], can exacerbate socio-environmental impacts [19]. The disorderly urbanization is the most radical form of transformation of the natural landscape, generating an eminently anthropized environment [20]. Becker [21] demonstrated that in the Amazon, the urban development reached relevant proportions from the early 1990s onwards, when a major structural modification took place in the regional peopling that started to happen predominantly along the highways (and no longer along the rivers, as in the past). In the official 2000 Census data, 70% of the population of the Brazilian Amazonian states was in urban nucleus; thus, the author of [21] launched the denomination of “urbanized forest”.

Amid the considerable scientific advances mentioned above, regarding regional/global impacts particularly on the Amazon environment, attention to the issue of urbanization impacts on climate has been somewhat limited. In this context, the present work has two main objectives: (1) to describe the regional impacts of human-induced landcover changes on the seasonal climate regimes of the Metropolitan Region of Belém (MRB), the first frontier of Amazonian occupation; (2) to investigate the future global climate change impacts on MRB seasonality based on dynamic downscaling performed with the RegCM4 driven by a global model under the RCP8.5 scenario.

4.2 MATERIAL AND METHODS

Figure 1 illustrates the study area, the MRB located in northeast of the state of Pará in eastern Amazon (see reference map). The MRB encompasses seven municipalities that include Belém (the state capital), Ananindeua, Benevides, Castanhal, Marituba, Santa Bárbara, and Santa Isabel, whose total metropolitan area is 3566.3 km². The 2020 land-cover map shows the urban sprawl (red areas) encompassing most of Belém and adjacent municipalities of Ananindeua, Marituba, and Benevides, characterizing the conurbation process. Other urbanized centers are concentrated along the highway easterward, over municipal seats of Santa Isabel and Castanhal, as well as to the north in Santa Barbara and in the far north coastal strip of Belém. Concerning other landcover classes, it is

possible to distinguish the spatial predominance of extensive areas of pasture/agriculture (yellow areas) over most of the central and eastern MRB. Some forest remnants (green areas) are observed over northern and southernmost areas.

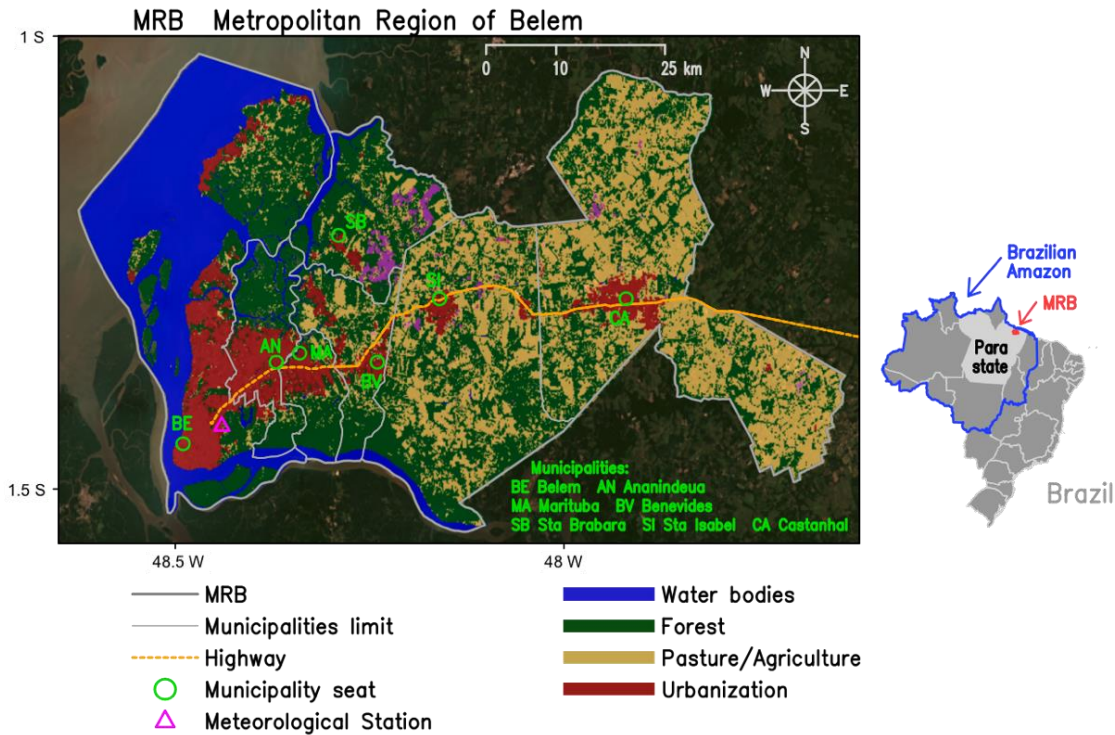


Figure 1: Study area in the MRB with the 2020 landcover map, locations of the seven municipalities and meteorological station, and the main highway crossing the region.

We used the monthly precipitation (PREC) and surface air temperature (TEMP) data from in situ measurements of the conventional meteorological station in Belém, provided by the Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). The station location (latitude -1.436 , longitude -48.437 , and altitude 7.13 m) is given by the triangle in Figure 1 (magenta symbol) and the data were available from January/1985 to December/2020. In addition, three observational gridded databases retrieved from satellites estimates merged with stations data were also used: the Climatic Research Unit (CRU) version 4 compiled by [22], the Climate Hazards group Infra-Red Precipitation with Stations (CHIRPS) described in [23], and the Climate Prediction Center Morphing technique (CMORPH) compiled by [24]. CRU has the variables PREC and TEMP, while CHIRPS and CMORPH contain only PREC, with time availability from 1985 to 2020, except CMORPH that is 1998 onwards. The high horizontal resolutions (CRU with 0.04° or 4.4 km; CHIRPS with 0.05° or 5.5 km; and CMORPH with 0.07° or 7.7 km) are suitable for regional climate studies, allowing to analyze the spatial PREC and TEMP patterns over the study area.

The environmental data were extracted from the MapBiomass platform (<https://plataforma.brasil.mapbiomas.org>, accessed on December 2, 2021), with data available at the municipal scale covering the historical series from 1985 to 2020 (Collection 6 published in August 2021). The Mapbiomas methodology is detailed in [25]. In summary, this multi-institutional initiative of groups of scientists generated annual landcover/landuse maps in matrix format (spatial resolution of 30 m) over Brazilian territory, from a pixel-by-pixel classification of a historical set of satellites images from Landsat 5, 7, and 8. The entire process was completed with extensive machine learning algorithms through the Google Earth Engine platform that offers high digital processing capacity in the cloud. For the present work, the thematic landcover maps were extracted for the MRB domain, considering five classifications that represent forest (FOR), non-forest (NFO), pasture/agriculture (PAG), urbanization (URB), and water bodies (WB). Thus, the annual digital data of FOR, NFO, PAG, URB, and WB in units of area in hectares (ha) on a municipal scale were obtained for the seven municipalities of the MRB during years 1985–2020.

Total population data for the years 1985–2020 for the seven MRB municipalities were obtained from Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), which is the official organization in Brazil responsible for counting and estimating the population.

Several statistical and quantitative analyses were employed. Initially, descriptive statistics were calculated for the 1985–2020 historical series of Belém station PREC data, including the analysis of the annual cycle through the boxplots that graphically illustrate the main statistical parameters (mean, median, and quartiles). The monthly climatological percentages (relative to the annual total) of PREC from January to December were used to define the seasonal regimes. The consecutive months that present percentages above 10% were defined as the rainy regime (RAINY), while the successive months with percentages below 5% comprise the dry regime (DRY).

Climatological means (1985–2020) for RAINY and DRY regimes were obtained for observational databases to investigate the spatial PREC (CRU, CHIRPS, and CMORPH) and TEMP (only CRU) patterns along the MRB. The time series of PREC in both regimes for the three bases were extracted over Belém gridpoint, and also for the entire MRB (we used a computational routine that averages all grid points within the shapefile of the MRB) in order to verify what one best represents in situ and observational data. For this, we used the calculation of bias, correlation coefficient (r), and normalized standard deviation (σ_n) between the station and each observational base, then the Taylor

diagram [26] was plotted to synthesize and interpret all statistical results for data comparison and validation. The gridded database with the best validation result will be used in the PREC and TEMP analyses for the entire MRB.

With the information derived from the MapBiomass, the annual sums of seven municipalities for each class of FOR, NFO, PAG, URB, and CA areas were computed to obtain the index for the whole MRB, aiming to evaluate the dynamics of human-induced landcover changes during the last three and a half decades. Visual inspection of the color-imaged maps that represent the surface cover classes was important in the spatio-temporal understanding of how the conversions and transformations from FOR to PAG or URB occurred throughout the region. To investigate the effects and impacts of the expansion of PAG and URB areas on MRB climatic seasonality, Pearson's correlations were calculated between the series of PREC and TAR in the RAINY and DRY and the series of the landcover classes, with sample size $n = 36$ (1985 to 2020) and emphasizing the results with statistical significance given by $p\text{-value} < 0.05$. The scatter plots with the variations in the landcover classes and the PREC and TAR variables helped in these analyses, whose approach was conducted individually for the municipality of Belém and for the entire MRB. Furthermore, as a form of quantitative evidence the long-term trends in seasonal regimes during the present climate, the nonparametric Mann–Kendall test [27] was used, considering the null hypothesis H_0 of non-existence of trend (series are randomly ordered in time), against the alternative hypothesis H_1 that there is a monotonic tendency of increase or decrease in the variable. The test provides Kendall's τ whose positive or negative sign indicates increasing or decreasing trend, and the $p\text{-value}$ is calculated at the 5% level to accept or reject the alternative hypothesis.

To achieve the second objective of this work, a dynamic downscaling over the MRB domain was performed using version 4.7.1 of RegCM4 (source code available at <https://github.com/ictp-esp/RegCM>, accessed on March 10, 2020), which is the fourth generation of the regional modeling system developed at the International Center for Theoretical Physics (ICTP). This latest updated version includes multiple choices of different physical processes and new convective parameterization schemes, as detailed in [28]. As the approach of this work is in a metropolitan area, requiring simulations in high horizontal resolution, RegCM was compiled with the non-hydrostatic core using the Biosphere–Atmosphere Transfer Scheme (BATS, [29]) to describe land surface processes. Global databases describing land cover features with 30s spatial resolution are from GLCC [30] and digital terrain topography and elevation (GTOPO) were provided

by USGS. The initial and lateral boundary conditions every 6 h (variables: SST, relative humidity, geopotential height, air temperature, zonal and meridional wind) required to run the RegCM4 downscaling were taken from Hadley Centre Global Environmental Model version 2 (HadGEM2-ES), an earth system model considered state-of-the-art in global climate simulations with representation of terrestrial ecosystems, dynamic vegetation, oceanic circulation, and tropospheric chemistry including the processes of greenhouse gases and aerosols and the carbon cycle [31]. HadGEM2-ES produced global outputs with lon-lat resolution of $1.875^\circ \times 1.25^\circ$ (see Figure 2a, left map) corresponding to CMIP5 under the IPCC/AR5 emissions scenario named as RCP8.5, which is considered the most extreme in terms of future impacts of global climate change [32].

The RegCM4 domain was defined over the MRB (56×44 points in longitude and latitude, with a central point at 1.3° S and 48.3° W) considering a grid spacing of 0.045° (5 km horizontal resolution) and 23 vertical sigma-p levels. Then, we ran the RegCM4 routine to generate the grid domain with the soil and surface data (topography and landcover classes). We found that the default landcover in the study area showed some discrepancies (especially the absence of urban areas) compared to the current data generated by Mapbiomas. Thus, we used the version of the BATS code within RegCM4 that was updated by [33] in which the new landcover class that represents urban coverage was introduced, so that albedo values, roughness and soil characteristics simulate changes in energy balance specific to urbanized centers. Figure 2b shows the regional domain and updated landcover map configured in RegCM4 with the MRB situated in the northeast of the state of Pará in eastern Brazilian Amazon. This map shows the URB areas covering Belém and municipalities eastward (dark red grid points), as well as the extensive PAG (in yellow) areas and remaining FOR (in green) cover, in accordance with the 2020 landcover map generated by MapBiomas (see Figure 1).

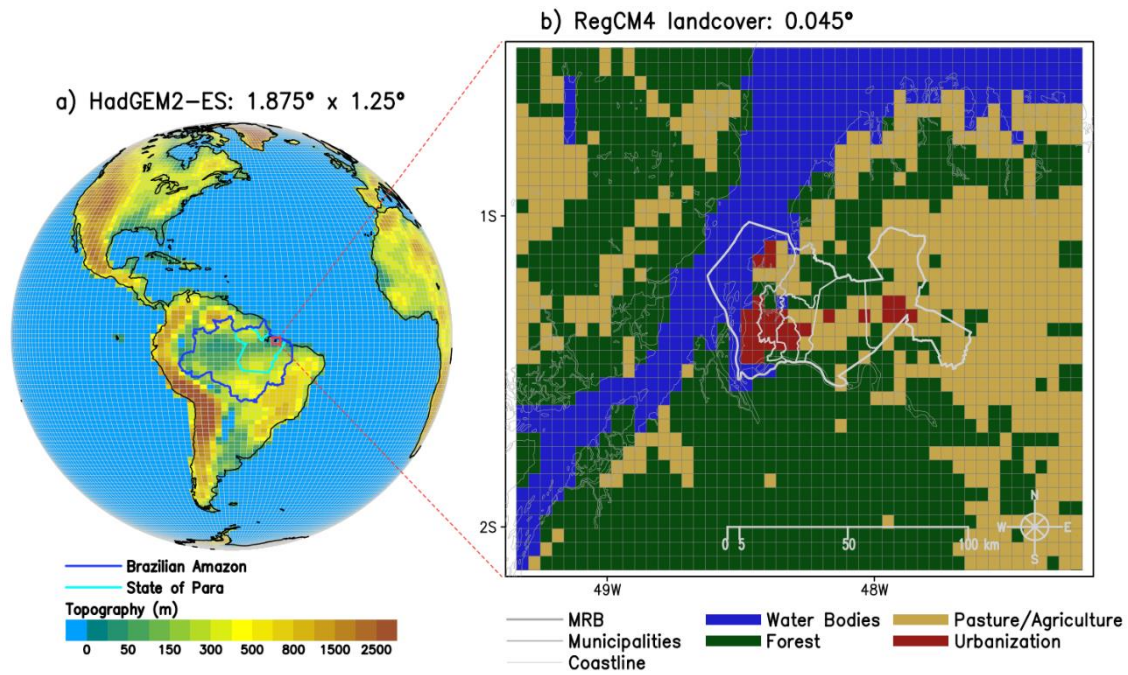


Figure 2. (a) HadGEM2-ES global model (topography); **(b)** RegCM4 domain over MRB with the landcover updated to represent the metropolitan region of the study area.

Three experiments using RegCM4 with different convective parameterizations were conducted, the Emanuel scheme (EMA) [34], the Kain–Fritsch scheme (KFR) [35], and the Tiedtke scheme (TIE) [36]. All simulations were performed for a continuous integration starting on 1 January 2005 and ending on 31 December 2045 (41 years long run), with the first year being discarded, considered a spin-up period. The RegCM4 simulations were conducted using high-performance computing technology and parallel processing in a cluster containing a total of 112 processors. The PREC and TAR patterns in the RAINY and DRY regimes simulated by RegCM4 were compared with the observational databases (CRU, CHIRPS, and CMORPH). The verification of the best configuration of the model (EMA, TIE, and KFR) in relation to the in situ Belém data was carried out, based on the statistics, and plotting of the Taylor diagram (method already mentioned above). For the purpose of model validation (in terms of the spatial patterns over the study area), the bias between the TAR and PREC simulated by RegCM4 and the CRU and CHIRPS observational data was calculated considering the 15-year statistics, 2006–2020, that is the co-incident period between observations and simulations. Finally, the bias correction method was applied to the results of future simulations generated by RegCM4, aiming to demonstrate the differences between the near-future (next 25 years, 2021–2045) and the present climate (last 35 years, 1986–2020). In these comparative analyses, the two-tailed Student’s t-test with a level of 5%

(p -value < 0.05) will be considered to confirm whether the difference between the future and present means is statistically significant.

4.3 RESULTS

4.3.1 Annual cycle and seasonal regimes

Figure 3a shows a very well-defined annual cycle in Belém, with the first four months of the year presenting PREC above 10 mm/day and TEMP below 26.6 °C (rainier and less hot period), while in the second semester, mainly between July and November, the PREC decreases for values below 5 mm/day and TEMP rises above 27 °C (less rainy and warmer period). The quantitative values of the other parameters obtained in the descriptive statistics can be found in Table A1 (see Appendix A). Monthly percentages in Figure 3b reveal that the RAINY regime occurs in the consecutive months from January to April (percentages > 10%), while the DRY regime (DRY) occurs successively between the months of July and November (percentages < 5%). Thus, all the results of this work refer to the seasonal means of the four months in the RAINY and the five months in the DRY regime.

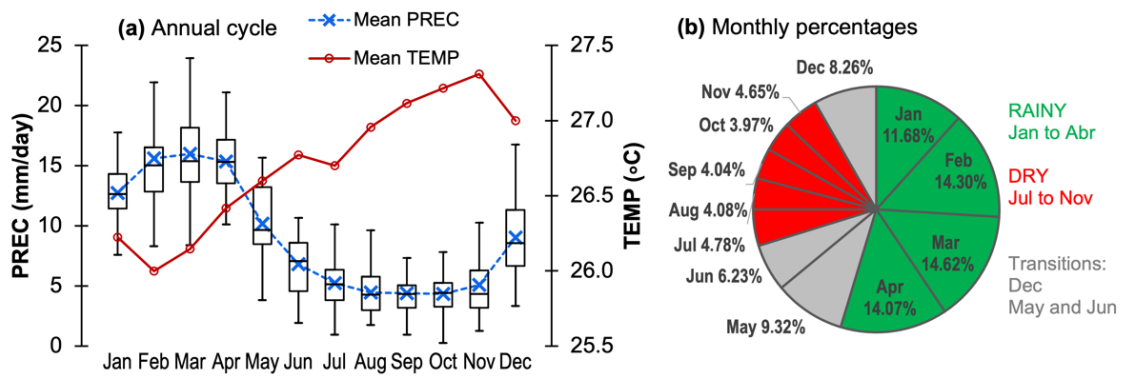


Figure 3. **(a)** Boxplot of PREC (mm/day) and TEMP (°C, only the climatological mean) for Belém station (period 1985–2020); **(b)** monthly percentages (relative to the annual total) of PREC, emphasizing the seasonal regimes.

4.3.2 Observed and simulated PREC and TEMP in the present climate

Figures 4 and 5 show the respective climatological patterns of the observed (CRU, CHIRPS, and CMORPH) and simulated (EMA, TIE, and KFR schemes) PREC over MRB in the RAINY and DRY regimes, considering the present climate. For the RAINY, the three observed databases exhibit similar spatial patterns with rainfall increasing towards the north of the region, reaching above 13.5 mm/day. The central and south

sectors encompassing Belém, Ananindeua, Marituba, Santa Isabel, and Castanhal present PREC between 12 and 13 mm/day (Figure 4a). The three RegCM4 convective schemes did not reproduce well the maximum rainfall to the north of the region in the RAINY, but the TIE shows a PREC pattern along the central and southern MRB with values around 12–13.5 mm/day like the intensity verified in the observed data. The EMA restricts PREC in Belém, while the KFR simulates generalized PREC over the entire domain that are much higher than the observed pattern (Figure 5a). On the other hand, the DRY (Figure 4b) is characterized by the presence of an approximately rounded area with maximum PREC (values 4–5 mm/day) centered in Belém and a gradual decrease towards the edge of the area, along the municipalities to the eastern MRB. This configuration appears most clearly in the CRU and CHIRPS data. CMOPRH has a slightly different pattern. Examining the patterns simulated by RegCM4 in the DRY regime (Figure 5b), it was found that the EMA and KFR schemes differ from the observed pattern, while the TIE can better capture the rounded area of PREC, similarly to the CRU and CHIRPS results.

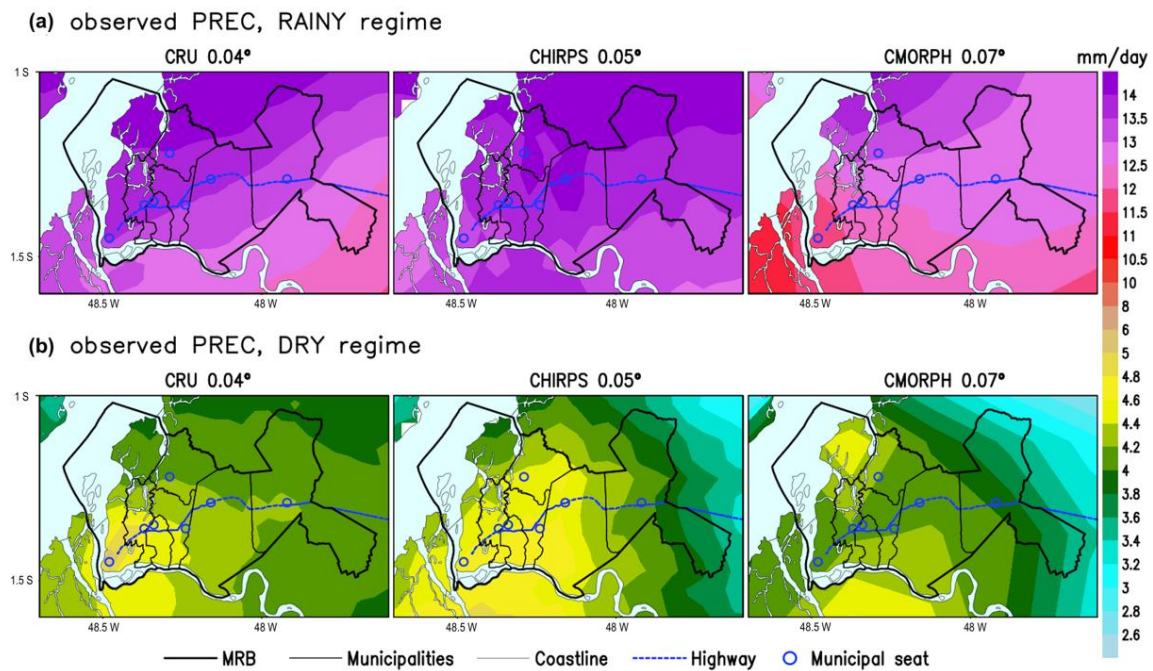


Figure 4. CRU, CHIRPS, and CMORPH observed PREC (mm/day) for (a) RAINY; (b) DRY regime.

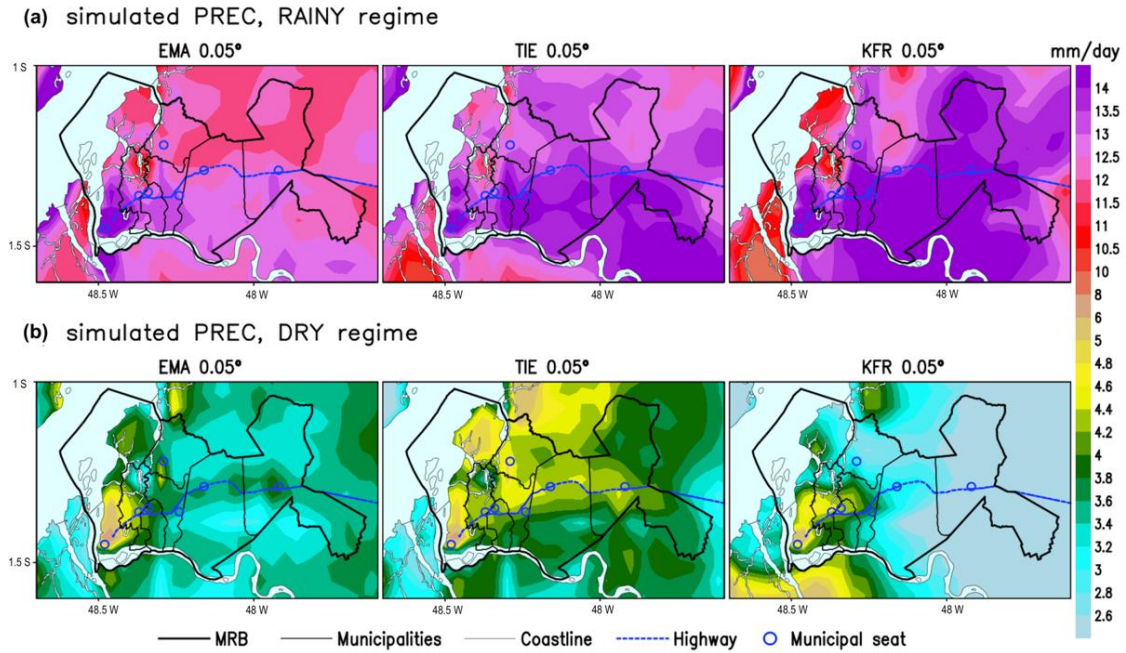


Figure 5. RegCM4 simulated PREC (mm/day) using EMA, TIE, and KFR schemes for (a) RAINY; (b) DRY regime.

The CRU TEMP is consistent with the in situ Belém data (see Figure 3a), with milder (less hot) conditions during the RAINY and much warmer in the DRY regime, whose patterns are reproduced by RegCM4 simulations. An interesting pattern in both seasonal regimes is the presence of a zonal thermal gradient over the metropolitan area, with higher values to the western (Belém) and a gradual decrease to the municipalities located east of the MRB. In the RAINY (Figure 6a), the CRU shows higher TEMP in the municipality of Belém (western portion) reaching 27.4 °C and in the areas further east the values decrease to 27.2 and 27.0 °C. An overestimation is noted in the KFR simulation, but EMA and TIE capture well the CRU observed pattern, although the model shows a zonal band of heating along the highway. In the DRY regime (Figure 6b), CRU exhibits TEMP above 28.6 °C in the western and lower values between 27.8 and 28.2 °C in the eastern portion. RegCM4 again simulated overestimated TEMP in the KFR scheme, but the EMA and TIE are closer to the observed patterns.

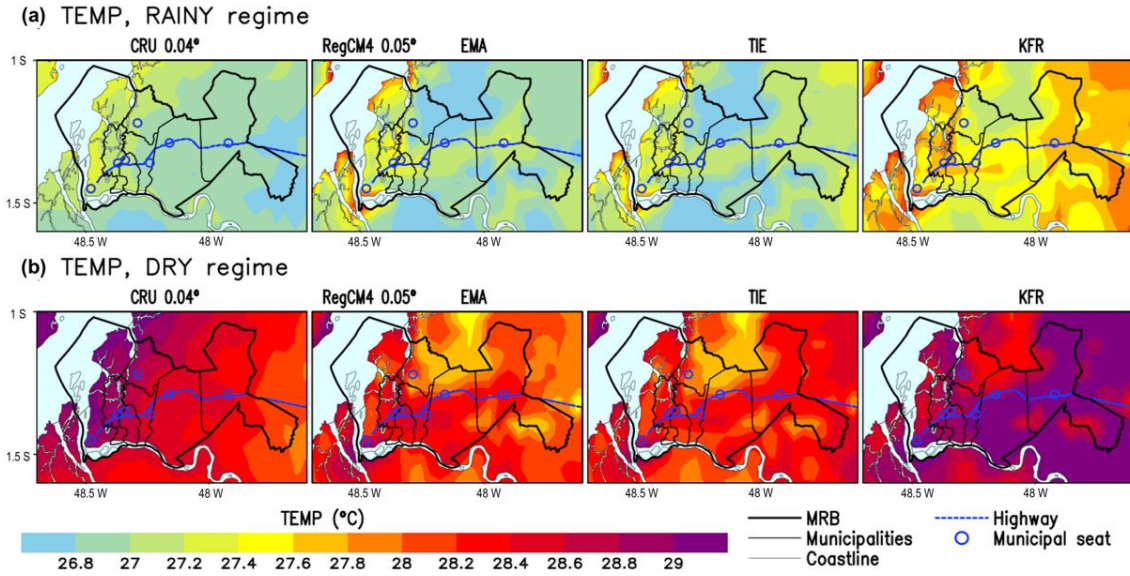


Figure 6. CRU observed and RegCM4 simulated TEMP (°C) using EMA, TIE, and KFR schemes for (a) RAINY; (b) DRY regime.

Concerning the variable precipitation, the verification of what is the best observational database and the best RegCM4 configuration, in relation to the in situ Belém data, is based on statistical results listed in Table A2 (Appendix A) and the Taylor diagrams shown in Figure 7. The best statistical scores for the RAINY regime were found for CRU with $r = 0.91$ and $R2 = 0.82$, while the TIE simulation obtained $r = 0.36$ and $R2 = 0.14$. For the DRY regime, the highest values were obtained for CHIRPS ($r = 0.86$ and $R2 = 0.74$) and TIE ($r = 0.5$ and $R2 = 0.30$). In the Taylor diagram, the positioning of the results over the region containing the smallest errors (lines in green) and largest correlations (lines in blue) demonstrates that the best observational basis is CRU for the RAINY and is CHIRPS for the DRY regime, and the TIE is the best RegCM4 simulation for both seasonal regimes (Figure 7).

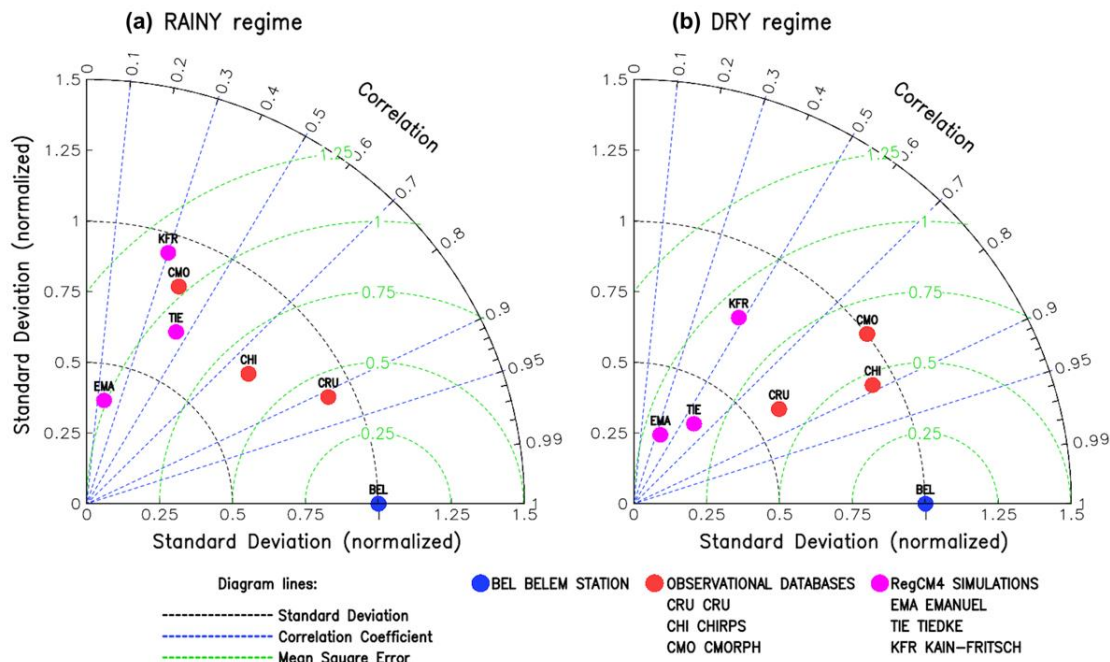


Figure 7. Taylor diagram of observed (CRU, CHIRPS, and CMORPH, circles in red) and simulated (EMA, TIE, and KFR, circles in magenta) PREC for the **(a) RAINY** and **(b) DRY** regimes.

4.3.3. Landcover Changes and Impacts on Seasonal Regimes during the Present Climate

The integrated historical analysis (1985–2020) of landcover (MapBiomas) and climate data, both on a municipal scale, allowed us to establish the multitemporal dynamics of environmental transformations on the landscape and their effects or impacts on climate seasonality considering the entire MRB (regional scale), as well as only the municipality of Belém (local scale)

First, we present the results for the regional perspective, through the temporal sequence of the thematic landcover maps (Figure 8a), the percentages by classes (Figure 8b) specifically in the years 1985, 1995, 2005, 2015, and 2020, as well as the complete annual series of FOR, PAG, and URB areas (Figure 8c–e). In the percentage graphs and annual series, it is verified that the FOR (results in green) fluctuated from 205,241 ha in 1985 (57.6% of the total area) to 141,414 ha in 2020 (decrease to 39.7% of the total area). Conversely, the PAG (results in yellow) ranged from 62,879 ha in 1985 to 114,950 ha in 2020, a proportion increasing from 17.6% to 32.2% of the total area. It is visually perceived in the landcover maps that the FOR was significantly suppressed especially over the central and eastern portions, whose areas were exactly where the PAG enlargement took place. The other class with significant changes was the URB (results in red), ranging from 21,806 ha (6.1% of the total area) in 1985 to 35,832 ha (10% of the

total area) in 2020, corresponding to a 3.9% growth in the urban areas built over the region. Such a systematic increase in URB is seen in the maps preferably in the northernmost portions together with some areas along the highway that zonally crosses the region. The two remaining classes of WB and NFL showed significantly smaller changes, so they will not be emphasized in the analyses.

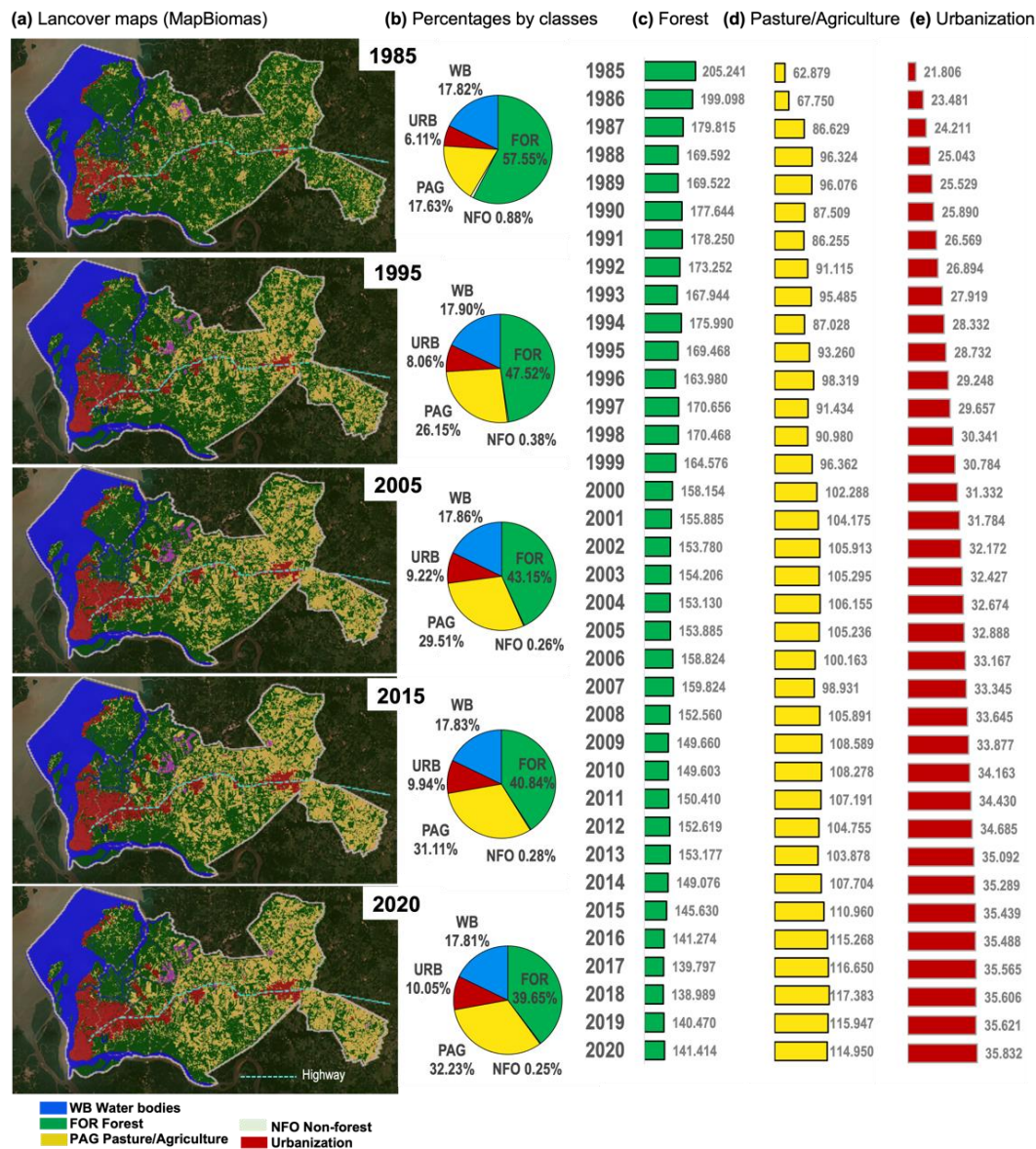


Figure 8. (a) Landcover maps over MRB; (b) percentages by classes; (c) forest; (d) pasture/agriculture; and (e) urbanization. Results for (a,b) are shown in the years 1985, 1995, 2005, 2015, and 2020. The annual series for (c–e) are in area (ha) from 1985 to 2020.

We analyzed the landcover changes for Belém on a municipal scale (Figure A1, Appendix A). We evidenced that the greatest transformations of the landscape in Belém were processed in the classes of FLO and URB. FLO cover ranged from 33,828 ha

(31.9%) in 1985 to 28,911 ha (27.3%) in 2020, signaling a vegetation suppression of 4.6%. URB areas expanded from 11,418 ha (10.8%) in 1985 to 16,063 ha (15.2%) in 2020, representing an increase of 4.4%. The PAG areas had a positive variation from 2704 ha (2.6%) in 1985 to 4226 ha (4.0%) in 2020, corresponding to an intensification of 1.4%. The coverage of WB, which occupies over half of the total area (53.3%) reduced by only 0.1% in recent decades. NFO areas decreased by 1.0% in the period, with 1386 ha (1.3%) in 1985 and 283 ha (0.3%) in 2020.

Figure 9a summarizes the most relevant anthropic transformations in the landscape of MRB (brown bars) and Belém (green bars) between 1985 and 2020 (the last three and a half decades). The vegetation cover area of the MRB was systematically reduced along the municipalities of the central-eastern portion (-17.9% FLO), whose conversion occurred primarily to areas destined for agriculture and pasture activities associated with cattle raising ($+14.6\%$ PAG) and to a minor extent for expansion of urbanized areas ($+3.9\%$ URB). On the other hand, the continental Belém experienced a vegetation suppression of forests (-4.6% FLO), whose conversion was mainly due to the enlargement of urban areas ($+4.4\%$ URB) to the northernmost portion and, to a lesser extent, for pasture/agriculture areas ($+1.4\%$ PAG). Such environmental changes are directly linked to the intensified human occupation in the last three decades, as according to IBGE estimates illustrated in Figure 9b. The MRB showed a significant growth in the total population from 1,360,160 in 1985 to 2,529,178 inhabitants in 2020, totaling a positive variation of 85.9%, while Belém varied from 1,120,777 in 1985 to 1,499,641 inhabitants in 2020, totaling a population growth of around 33.8% in the period.

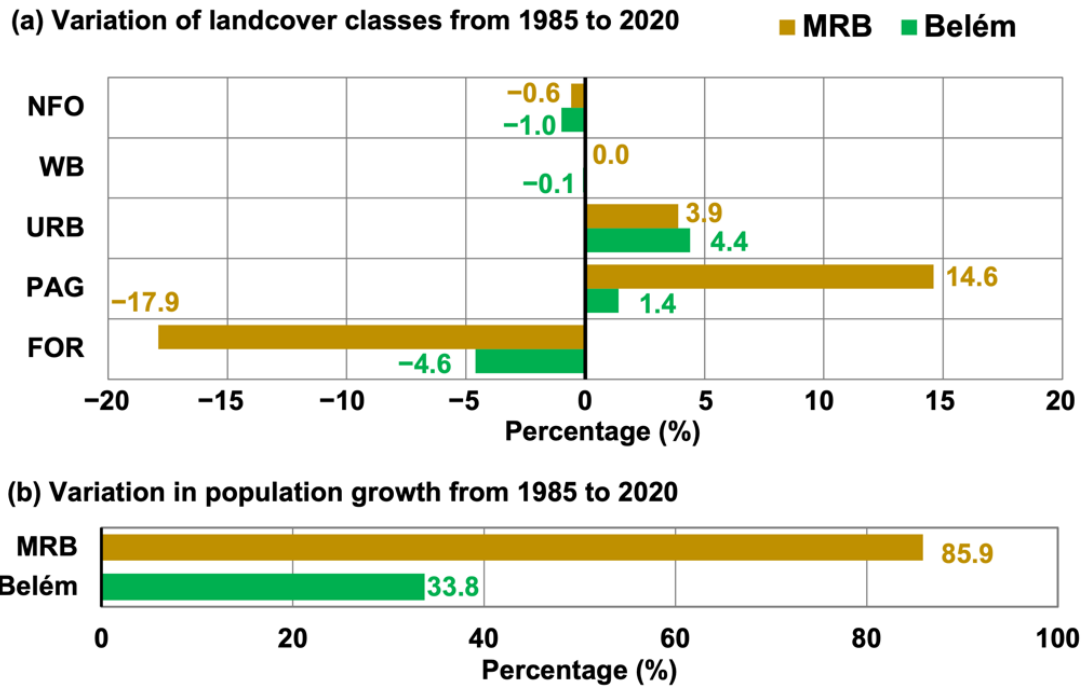


Figure 9. The 1985 to 2020 percentage changes for Belém (green) and MRB (brown) in the (a) landcover classes; (b) population growth.

As intense anthropism has induced deep long-term changes in the landscape, the triggering of impacts on climate seasonality is consequently assumed, whose understanding was approached through the calculations of Pearson's correlations between the annual series (1985 to 2020) of FLO, PAG, and URB and the TEMP and PREC series for the RAINY and DRY regimes. In the case of the TEMP variable, the effects resulting from landcover changes are direct (alteration of the energy balance and partition of latent/sensible heat fluxes by regulating the surface air temperature), while the PREC variable, although it has some direct signal, the most dominant effect is indirect (remote climate mechanisms and external precipitating meteorological systems). Table 1 shows the results emphasizing significant correlations with $p\text{-value} < 0.05$ for TEMP (direct effect) and $p\text{-value} < 0.10$ for PREC (non-direct effect). Results for TEMP in Belém in both RAINY and DRY showed significant negative correlations with FLO and positive correlations with URB. For TEMP in MRB in both seasonal regimes, significant correlations were observed with a negative sign for FLO and positive for PAG and URB.

Table 1. Pearson's correlations between the landcover class areas and the TEMP and PREC in the RAINY and DRY regimes. Time series in the period 1985–2020.

	FOR		PAG		URB	
	RAINY	DRY	RAINY	DRY	RAINY	DRY
TEMP Belém	-0.68 ¹	-0.86 ¹	0.42	0.55	0.72 ¹	0.88 ¹
TEMP MRB	-0.67 ¹	-0.79 ¹	0.64 ¹	0.75 ¹	0.68 ¹	0.86 ¹
PREC Belém	-0.46 ²	-0.22	0.42 ²	0.34	0.37	0.11
PREC MRB	-0.33	-0.01	0.31	0.02	0.42 ²	-0.03

¹ p -value < 0.05 for TEMP. ² p -value < 0.10 for PREC.

The scatterplots in Figure 10 help to interpret the results of the significant correlations particularly for the variable TEMP. For Belém (Figure 10a), the expansion of the URB area explained the systematic increase in TEMP with a more intense impact in the DRY (R^2 0.78) than the RAINY regime (R^2 0.51). Considering the entire MRB (Figure 10b), the joint spatial enlargement of the PAG and URB areas is strongly related to the continuous increase in TEMP with greater effect in the DRY (R^2 0.56 for PAG and 0.73 for URB) and lower impacts in the RAINY regime (R^2 0.41 for PAG and 0.46 for URB).

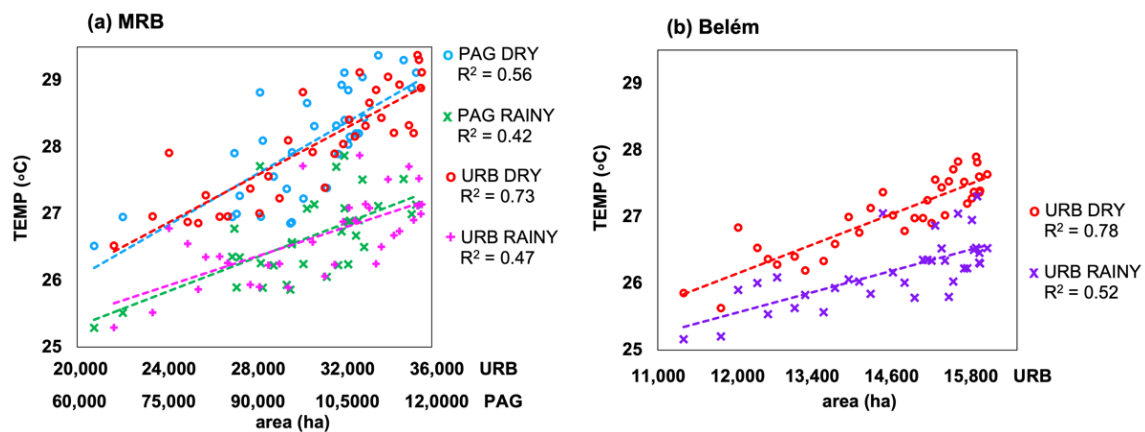


Figure 10. Scatterplots of (a) PAG and URB with TEMP for MRB; (b) URB with TEMP for Belém. Time series in the period 1985–2020.

An additional quantitative analysis was conducted to demonstrate long-term trends in seasonal TEMP and PREC patterns. The results of the Mann–Kendall test applied on the original time series of TEMP and PREC in Belém and MRB in both seasonal regimes are shown in Table 2. The TEMP in Belém showed a slope of Sen and positive τ with values of 0.52 and 0.66 in the RAINY and DRY, respectively. For the TEMP in MRB, the trend test indicated an increasing Sen slope and a positive τ 0.70 (the most intense of all results) for the DRY and τ 0.48 for RAINY regime. For PREC, significant positive trends were evidenced only for the RAINY regime in Belém and MRB, with a positive slope and τ of 0.37 and 0.31, respectively.

Table 2. Mann–Kendall test with the values of τ , p-value, and Sen's slope for the series (1985–2020) of TEMP and PREC in Belém and MRB in the RAINY and DRY regimes.

	Kendall τ		p-Value		Sen's Slope	
	RAINY	DRY	RAINY	DRY	RAINY	DRY
TEMP Belém	0.527 ¹	0.663 ¹	<0.0001	<0.0001	0.031	0.045
TEMP MRB	0.480 ¹	0.701 ¹	<0.0001	<0.0001	0.046	0.073
PREC Belém	0.371 ¹	0.114	0.002	0.334	0.110	0.018
PREC MRB	0.316 ¹	−0.019	0.009	0.881	0.098	−0.003

¹ statistically significant value.

4.3.4 Projections of Future Scenarios Associated with Global Climate Change

As The future projections generated by dynamic downscaling (RegCM4 nested to HadGEM2-ES) are presented only for the results using the TIE scheme (best configuration of the regional model for the study area). The geographic domain of the MRB within RegCM4 contemplates the current 2020 landcover (URB, PAG, and FOR remnants) which was kept constant throughout the simulation. Therefore, the primary forcing of future climate is related to climate change induced by the most extreme global warming scenario (RCP8.5).

The bias correction method (2006 to 2020 statistics between simulated and observed data) was applied on the results of RegCM4 simulations. With this, it was possible to quantitatively compute the changes in seasonal patterns of PREC and TEMP for the future climate (next 25 years, 2021–2045) relative to the present climate observed data (last 35 years, 1986–2020). Such results are plotted in Figure 11 with the changes patterns of TEMP in °C and PREC in percentages (%). The future climate conditions simulated by RegCM4 indicate the continuation of the widespread warming trend of the near-surface atmosphere over MRB, with the increase in TEMP in the RAINY regime varying from 0.98 °C in the western to 1.1 °C in the eastern portion of the region, while in the DRY more intense impacts are expected, with an increase in TEMP of 1.6 °C in the western and 1.72 °C in the eastern MRB (Figure 11, left panel). On the other hand, future changes in the spatial PREC patterns (Figure 11, right panel) point to a progression of intensification of the RAINY regime, i.e., an increase of about 20% in the western portion to 30% in the easternmost municipalities of MRB. In the DRY regime, a heterogeneous pattern is predicted with signs of a weak increase in PREC up to 5% in the southern Belém and Santa Isabel and northern Castanhal, while in the rest of the municipalities, notably in the central (Ananindeua, Marituba, and Benevides) and north

portion (northern Belém and Santa Bárbara) there are indications of decreased PREC up to -5% .

Change patterns in the Future (2021/2045) relative to Present (1985/2020)

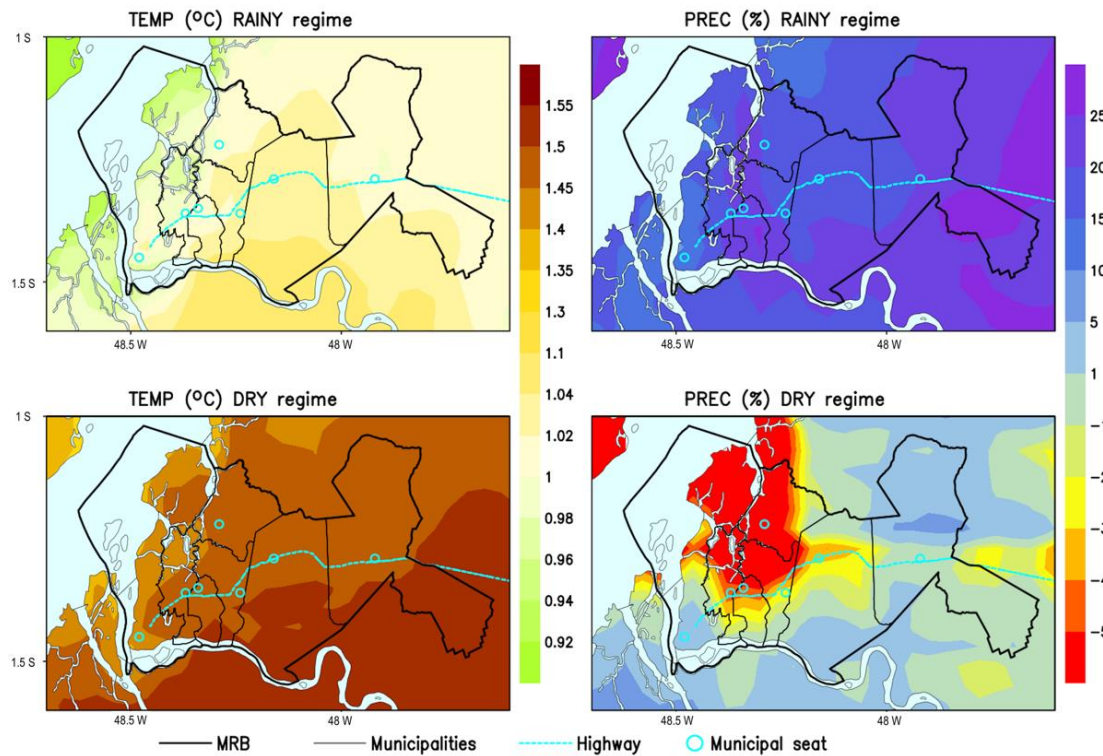


Figure 11. Change patterns of future (2021/2045) relative to present (1985/2020) for TEMP (**left** panel) and PREC (**right** panel) in the RAINY and DRY regimes. The color bar indicates TEMP in °C and PREC in %.

To complement the understanding of climate change, observed and simulated TEMP and PREC data were extracted for the entire MRB (regional scale) and for the municipality of Belém (local scale) and plotted in the form of boxplots to better summarize the visualization and comparison of present and future climate. The TEMP boxplots clearly illustrate the change in behavior of the statistical parameters (mean, median, 1st and 3rd quartiles) of future climate compared to present climate (Figure 12a). Figure 12c emphasizes the increase in TEMP that in the DRY regime reaches $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ in the MRB and $1.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ in Belém, while in the RAINY regime it reaches $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ in the MRB and $0.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ in Belém. On the other hand, it is not possible to notice major differences in the behavior of the PREC boxplots of the DRY regime in the periods considered (present and future). However, as already mentioned, the RAINY regime reveals significant changes in the statistical parameters of PREC for the future climate compared to the present climate. Figure 12d summarizes the percentage changes in PREC that in the RAINY increase by around 25% in MRB and around 14% in Belém. In the DRY regime,

the predicted changes are a decrease in PREC of around 5% in MRB and 3% in Belém. The statistical verification whether the differences between the means of future and present climate are significantly consistent is based on the calculation of Student's t-test at the 5% level ($p\text{-value} < 0.05$), whose results are shown in Table A3 (Appendix A). As expected, the differences for TEMP in MRB and Belém in both seasonal regimes are statistically significant, as well as the PREC in MRB and Belém only for the RAINY regime.

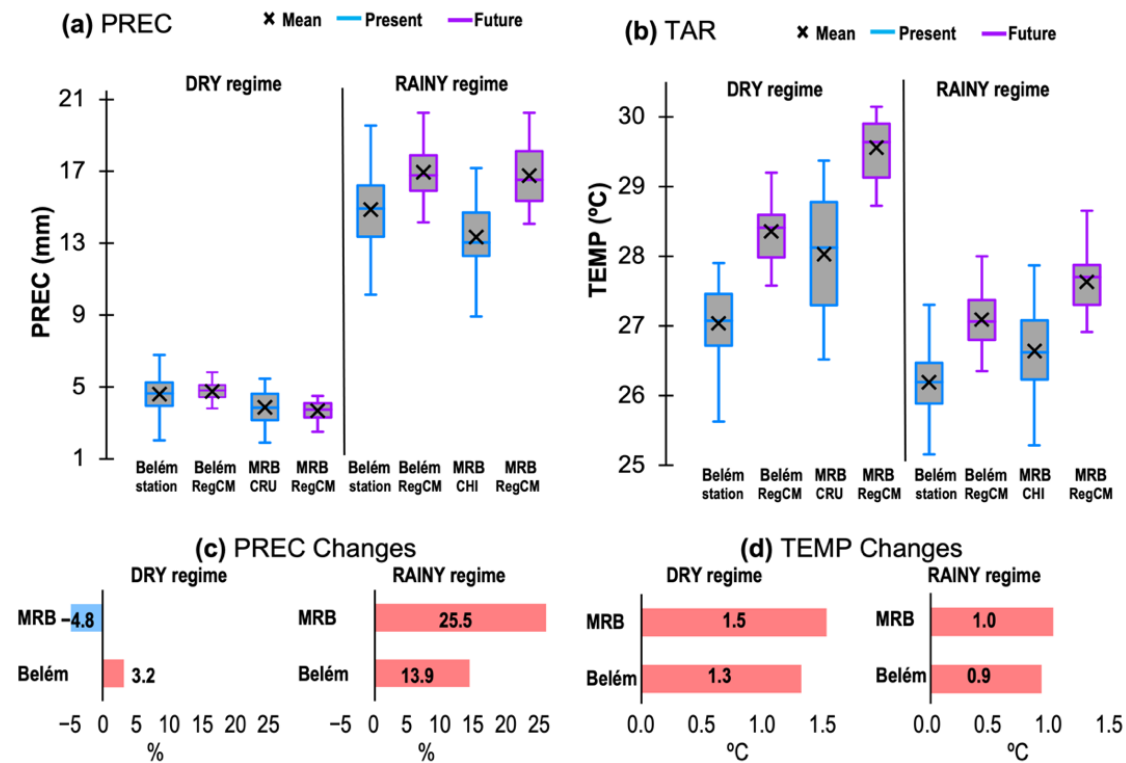


Figure 12. Boxplots of present (1985/2020) and future (2021/2045) climate considering the RAINY and DRY regime for **(a)** PREC; **(b)** TEMP. Changes in the future relative to the present for **(c)** PREC (%); **(d)** TEMP (°C).

4.4 Discussion and Conclusions

Based on comprehensive quantitative analyses integrating high-resolution observational climate measurements (in situ and satellite) with environmental data (LCLU mapping using advanced remote sensing techniques) during the last three decades (1985/2020), considered as the present climate, we evidenced the following key results:

- Considering the local/municipal scale of Belém, the disorderly enhanced urban sprawl conditioned a warmer local climate with statistically significant positive trends in surface air temperature in both seasonal regimes, being much more intense in the DRY season;
- Taking into account the regional scale of the entire MRB, the forest vegetation suppression primarily led to the uncontrolled expansion of pasture/agriculture areas, whose environmental changes explained the monotonic increase trend in air temperature in the two seasonal regimes, with greater intensity in the DRY regime;
- In Belém and the entire MRB, there were no changes in the rainfall of the DRY period; however, a systematic intensification of the precipitation during the RAINY regime was clearly evidenced.

Our results contributed to improving regional climatological knowledge particularly for the eastern Amazon and are consistent with previous studies that considered broader aspects related to the observed and simulated LULC impacts on the Amazon climate [12]. Concerning the mean air temperature over the Amazon region, observational studies have detected an increase of the order of 0.7 °C in the last 40 years, with several data sources indicating that the last two decades (2000s and 2010s) were the warmest [3,37]. Therefore, the basin-wide warming trends over the Amazon are unequivocal as a result of the synergistically integrated impacts related to LULC changes and ongoing global climate change [2,12,38,39]. Here, we demonstrate that the effect of urbanization in an eastern Amazon metropolis also explains the significant trend of atmospheric warming on a local/municipal scale. On the other hand, there are numerous works focusing on precipitation trends. Although most studies have reported that there is no systematic unidirectional trend for the twentieth century [40,41], some statistical calculations applied in different updated databases have indicated significantly drier conditions in the southern and wetter in the northern Amazon [42]. In particular, the persistent signal of increased precipitation observed in the present study for the MRB (near the mouth of the Amazon basin), during the peak of the rainy regime, is in agreement with [41,43,44] who documented positive trends individually for pluviometric series of the Belém station.

Finally, we conducted a climate modeling study (RegCM4 driven by HadGEM2-ES under the scenario RCP8.5 considered more extreme in the emissions of greenhouse

gases that exacerbate future global warming) for the MRB in a 5 km domain with the inclusion of the urban cover class in the processes of the surface model, which allowed the generation of the following main results:

- Warmer climate conditions are expected to persist in the coming decades, with projections of an increase in mean air temperature reaching 1.5 °C in MRB and 1.3 °C in Belém during the DRY and 1 °C in the MRB and 0.9 °C in Belém during the RAINY regime;
- Regarding precipitation, the intensification of the RAINY season persists in the next two decades, with an increase of about 25% in the MRB and 14% in Belém. Future projections for the DRY regime do not point out significant changes.

The climate modeling approach of representing urban processes in densely populated regions of the Amazon was pioneered in the present work, giving robustness to the climate projections on a regional scale for the entire MRB and on a local scale for Belém. The projections obtained for our study area are generally in accordance with some previous global and regional simulations for the Amazon [17,18].

The 1.5 °C increase predicted to occur in the MRB in the next two decades, before the mid-21st century, has worrying implications, as it is precisely this threshold established by the Glasgow Climate Pact [45] that the global temperature should not exceed. Likewise, the projection of an intensification of around 25% in the MRB rainy period is closely related to the increased frequency of extreme precipitation events [46], with high potential of aggravation of urban flooding, that in turn provokes serious socioeconomic damage to the local population. In a long-term field study aimed at the application of climate perception questionnaires to the residents of Belém's neighborhoods, it was indicated that the population is perceiving a warmer climate with the heavy rainfall events more frequent over the years, in such a way that these conditions already reflect the local climate change due to urbanization [47].

Therefore, considering the aforementioned scientific knowledge and supported by our observational/modeling findings, we conclude that, taken together, suppression of forest areas with intense alteration/degradation of landcover for use mainly in cattle rising, the intensification of urbanization, as well as global climate change, we have a set of regional/global factors that can result in even faster significant climate and environmental changes in some parts of the Amazon, such as the metropolitan region studied here.

Moreover, our findings for the MRB (area 3565 km² for a population about 2.5 million inhabitants) are relevant and considering them is essential in government actions for urban policy, as they can help in the tasks of long-term planning and elaboration of advanced strategies to mitigate future climate risks. Additionally, these results should be used to improve urban disaster management.

ACKNOWLEDGMENTS

The APC was funded by the Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação/Universidade Federal do Pará (PROPESP/UFPA) — PAPQ (Programa de Apoio à Publicação Qualificada). The authors thank the reviewers for their constructive comments and suggestions, and ICTP for providing the RegCM4. C.B.B.G. thanks UEPA for the doctoral scholarship. E.B.d.S thanks CNPQ (PQ2 process 313148/2020-1 and project process 442261/2020-9).

Appendix A

Table A1. Descriptive statistic calculated for the 1985–2020 historical series of Belém station PREC.

Statistics	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
1st Quartile	11.4	12.8	13.6	13.5	8.5	4.6	3.8	3.0	3.2	3.3	3.2	6.7
Median	12.7	15.0	15.4	15.3	9.6	7.1	5.1	4.3	4.3	4.4	4.3	8.5
3rd Quartile	14.3	16.5	18.2	17.2	13.2	8.6	6.3	5.8	5.1	5.3	6.3	11.3
Mean	12.7	15.6	16.0	15.4	10.2	6.8	5.2	4.4	4.4	4.3	5.1	9.0
Variance	8.7	14.6	12.5	8.1	10.8	5.8	4.8	3.9	4.0	3.5	9.3	10.3
Stand. deviation	2.9	3.8	3.5	2.8	3.3	2.4	2.2	2.0	2.0	1.9	3.0	3.2
Coeff. variation	0.23	0.24	0.22	0.18	0.32	0.35	0.42	0.44	0.45	0.43	0.60	0.36

Table A2. Bias, correlation coefficient r , coefficient of determination R^2 , and normalized standard deviation σ_n in RAINY and DRY regimes calculated between PREC station data and the observational bases (CRU, CHIRPS, and CMORPH) and RegCM4 simulations (EMA, TIE, and KFR).

	Bias		r		R^2		σ_n	
	RAIN Y	DRY	RAIN Y	DRY	RAIN Y	DRY	RAIN Y	DRY
CRU	1.01	0.10	0.91	0.84	0.82	0.70	0.91	0.60
CHIRPS	1.85	0.36	0.77	0.86	0.59	0.74	0.72	0.92
CMORPH	2.49	0.98	0.38	0.83	0.15	0.69	0.83	1.01
RegCM4 EMA	6.51	1.61	0.16	0.35	0.05	0.12	0.37	0.26
RegCM4 TIE	3.43	0.75	0.36	0.55	0.14	0.30	0.68	0.33
RegCM4 KFR	3.57	0.39	0.31	0.48	0.10	0.23	0.93	0.75

(a) Percentages by landcover classes in Belém

WB=Water bodies; FOR=Forest; NFO=Non-Forest; PAG=Pasture/Agriculture; URB=Urbanization

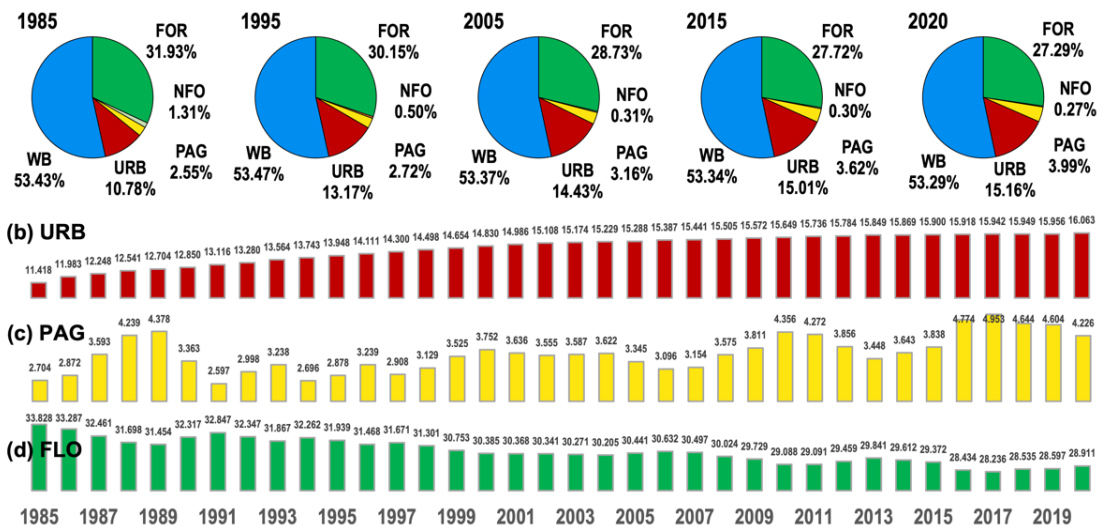


Figure A1. Results for Belém, (a) percentages by landcover classes; (b) URB urbanization; (c) PAG pasture/agriculture; and (d) URB urbanization. Results for a are shown in the years 1985, 1995, 2005, 2015, and 2020. The annual series for (b–d) are in area (ha) from 1985 to 2020.

REFERENCES

1. Davidson, E.A.; de Araujo, A.C.; Artaxo, P.; Balch, J.K.; Brown, I.F.; Wofsy, S.C. The Amazon basin in transition. *Nature* **2012**, *481*, 321–328. <https://doi.org/10.1038/nature10717>.
2. Nobre, C.A.; Sampaio, G.; Borma, L.S.; Castilla-Rubio, J.C.; Silva, J.S.; Cardoso, M. The Fate of the Amazon Forests: Land-use and climate change risks and the need of a novel sustainable development paradigm. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **2016**, *113*, 10759–10768. <https://doi.org/10.1073/pnas.1605516113>.
3. Marengo, J.A.; Souza, C.; Thonicke, K.; Burton, C.; Halladay, K.; Betts, R.A.; Alves, L.M.; Soares, W.R. Changes in Climate and Land Use Over the Amazon Region: Current and Future Variability and Trends. *Front. Earth Sci.* **2018**, *6*, 228. <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00228>.
4. Sombroek, W. Spatial and Temporal Patterns of Amazon Rainfall. *AMBIO J. Hum. Environ.* **2001**, *30*, 388–396. <https://doi.org/10.1579/0044-7447-30.7.388>.
5. Paca, V.H.d.M.; Espinoza-Dávalos, G.E.; Moreira, D.M.; Comair, G. Variability of Trends in Precipitation across the Amazon River Basin Determined from the CHIRPS Precipitation Product and from Station Records. *Water* **2020**, *12*, 1244. <https://doi.org/10.3390/w12051244>.
6. Nobre, C.A.; Sellers, P.J.; Shukla, J. Amazonian deforestation and regional climate change. *J. Clim.* **1991**, *4*, 957–988. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1991\)004<0957:ADARCC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1991)004<0957:ADARCC>2.0.CO;2).
7. Nobre, P.; Malagutti, M.; Urbano, D.F.; de Almeida, R.A.F.; Giarolla, E. Amazon Deforestation and Climate Change in a Coupled Model Simulation. *J. Clim.* **2009**, *22*, 5686–5697. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2757.1>.
8. Silva, M.E.S.; Pereira, G.; da Rocha, R.P. Local and remote climatic impacts due to land use degradation in the Amazon “Arc of Deforestation”. *Theor. Appl. Climatol.* **2016**, *125*, 609–623. <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1516-9>.
9. Alves, L.M.; Marengo, J.A.; Fu, R.; Bombardi, R.J. Sensitivity of Amazon Regional Climate to Deforestation. *Amer. J. Clim. Change* **2017**, *6*, 75–98. <https://doi.org/10.4236/ajcc.2017.61005>.
10. Gandu, A.; Cohen, J.; de Souza, J. Simulation of deforestation in eastern Amazonia using a high-resolution model. *Theor. Appl. Climatol.* **2004**, *78*, 123–135. <https://doi.org/10.1007/s00704-004-0048-5>.
11. Mu, Y.; Jones, C. An observational analysis of precipitation and deforestation age in the Brazilian Legal Amazon. *Atmos. Res.* **2022**, *271*, 106122. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106122>.
12. Llopart, M.; Reboita, M.S.; Coppola, E.; Giorgi, F.; Da Rocha, R.P.; De Souza, D.O. Land Use Change over the Amazon Forest and Its Impact on the Local Climate. *Water* **2018**, *10*, 149. <https://doi.org/10.3390/w10020149>.
13. Ramos da Silva, R.; Werth, D.; Avissar, R. Regional impacts of future land-cover changes on the Amazon basin wet-season climate. *J. Clim.* **2008**, *21*, 1153–1170. <https://doi.org/10.1175/2007JCLI1304.1>.
14. Taylor, K.E.; Stouffer, R.J.; Meehl, G.A. An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. *Bull. Amer. Met. Soc.* **2012**, *93*, 485–498. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>.
15. Eyring, V.; Bony, S.; Meehl, G.A.; Senior, C.A.; Stevens, B.; Stouffer, R.J.; Taylor, K.E. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geosci. Model Dev.* **2016**, *9*, 1937–1958. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>.
16. Gutiérrez, J.M.; Jones, R.G.; Narisma, G.T.; Alves, L.M.; Amjad, M.; Gorodetskaya, I.V.; Grose, M.; Klutse, N.A.B.; Krakovska, S.; Li, J.; et al. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment*

- Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 1st ed.; Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S.L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M.I.; et al.; Eds.; Cambridge University Press: Cambridge, UK; New York, NY, USA, 2021; pp. 1927–2058, <https://doi.org/10.1017/9781009157896.021>.
17. Llopart, M.; Coppola, E.; Giorgi, F.; Da Rocha, R.P.; Cuadra, S.V. Climate change impact on precipitation for the Amazon and La Plata basins. *Clim. Chang.* **2014**, *125*, 111–125. <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1140-1>.
 18. Ambrizzi, T.; Reboita, M.S.; da Rocha, R.P.; Llopart, M. The state of the art and fundamental aspects of regional climate modeling in South America. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* **2019**, *1436*, 98–120. <https://doi.org/10.1111/nyas.13932>.
 19. Borma, L.S.; Nobre, C.A.; Cardoso, M.F. 2.15—Response of the Amazon Tropical Forests to Deforestation, Climate, and Ex-tremes, and the Occurrence of Drought and Fire. In *Climate Vulnerability*; Roger, A.P., Ed.; Academic Press: Cambridge, MA, USA, 2013; pp. 153–163, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384703-4.00228-8>.
 20. Lima, G.N.; Lombardo, M. Urban climatology in Brazil: An analysis based on the methodology of the urban climate system. *Environ. Conserv. J.* **2019**, *20*, 1–8. <https://doi.org/10.36953/ECJ.2019.1008.1201>.
 21. Becker, B.K. Geopolítica da amazônia. *Est. Avançados*, **2005**, *19*, 71–86. <https://doi.org/10.1590/S0103-40142005000100005>.
 22. Harris, I.; Osborn, T.J.; Jones, P.; Lister, D. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. *Sci. Data* **2020**, *7*, 109. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0453-3>.
 23. Funk, C.; Peterson, P.; Landsfeld, M.; Pedreros, D.; Verdin, J.; Shukla, S.; Husak, G.; Rowland, J.; Harrison, L.; Hoell, A.; et al. The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. *Sci. Data* **2015**, *2*, 150066. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>.
 24. Xie, P.; Joyce, R.; Wu, S.; Yoo, S.; Yarosh, Y.; Sun, F.; Lin, R. Reprocessed, Bias-Corrected CMORPH Global High-Resolution Precipitation Estimates from 1998. *J. Hydromet.* **2017**, *18*, 1617–1641. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-16-0168.1>.
 25. Souza, C.M.Z.; Shimbo, J.; Rosa, M.R.; Parente, L.L.; Alencar, A.A.; Rudorff, B.F.T.; Hasenack, H.; Matsumoto, M.; Ferreira, L.G.; Souza-Filho, P.W.M.; et al. Reconstructing Three Decades of Land Use and Land Cover Changes in Brazilian Biomes with Landsat Archive and Earth Engine. *Remote Sens.* **2020**, *12*, 2735. <https://doi.org/10.3390/rs12172735>.
 26. Taylor, K.E. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *J. Geoph. Res.* **2001**, *106*, 7183–7192. <https://doi.org/10.1029/2000JD900719>.
 27. Hirsch, R.M.; Slack, J.R.; Smith, R.A. Techniques of trend analysis for monthly water quality data. *Wat. Res. Res.* **1982**, *18*, 107–121. <https://doi.org/10.1029/WR018i001p00107>.
 28. Giorgi, F.; Coppola, E.; Solmon, F.; Mariotti, L.; Sylla, M.B.; Bi, X.; Elguindi, N.; Diro, G.T.; Nair, V.; Giuliani, G.; et al. RegCM4: Model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains. *Clim. Res.* **2012**, *52*, 7–29. <https://doi.org/10.3354/cr01018>.
 29. Dickinson, R.E.; Henderson-Sellers, A.; Kennedy, P.J. *Biosphere–Atmosphere Transfer Scheme (BATS) Version 1e as Coupled to the NCAR Community Model*; NCAR Technical Note NCAR/TN-3871STR; National Center for Atmospheric Research: Boulder, CO, USA, 1993; p. 72. <http://dx.doi.org/10.5065/D67W6959>.
 30. Loveland, T.R.; Reed, B.C.; Brown, J.F.; Ohlen, D.O.; Zhu, Z.; Yang, L.; Merchant, J.W. Development of a global land cover characteristics database and IGBP DISCover from 1 km AVHRR data. *Int. J. Remot. Sens.* **2000**, *21*, 1303–1330. <https://doi.org/10.1080/014311600210191>.

31. Collins, W.J.; Bellouin, N.; Doutriaux-Boucher, M.; Gedney, N.; Halloran, P.; Hinton, T.; Hughes, J.; Jones, C.D.; Joshi, M.; Liddicoat, S.; et al. Development and evaluation of an Earth-System model—HadGEM2. *Geosci. Model Dev.* **2011**, *4*, 1051–1075. <https://doi.org/10.5194/gmd-4-1051-2011>.
32. Van Vuuren, D.P.; Edmonds, J.; Kainuma, M.; Keywan, R.; Thomson, A.; Hibbard, K.; Hurtt, G.C.; Kram, T.; Krey, V.; Lamarque, J.F.; et al. The representative concentration pathways: An overview. *Clim. Change* **2011**, *109*, 5. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>.
33. Huszar, P.; Halenka, T.; Belda, M.; Zak, M.; Sindelarova, K.; Miksovsky, J. Regional climate model assessment of the urban land-surface forcing over central Europe. *Atmos. Chem. Phys.* **2014**, *14*, 12393–12413, <https://doi.org/10.5194/acp-14-12393-2014>.
34. Emanuel, K.A.; Zivkovic-Rothman, M. Development and evaluation of a convection scheme for use in climate models. *J. Atmos. Sci.* **1999**, *56*, 1766–1782. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1999\)056<1766:DAEOAC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1999)056<1766:DAEOAC>2.0.CO;2).
35. Anderson, C.J.; Arritt, R.W.; Kain, J.S. An Alternative Mass Flux Profile in the Kain–Fritsch Convective Parameterization and Its Effects in Seasonal Precipitation. *J. Hydrometeorol.* **2007**, *8*, 1128–1140. <https://doi.org/10.1175/JHM624.1>.
36. Tiedtke, M. A Comprehensive Mass Flux Scheme for Cumulus Parameterization in Large-Scale Models. *Mon. Wea. Rev.* **1989**, *117*, 1779–1800. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1989\)117<1779:ACMFSF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1989)117<1779:ACMFSF>2.0.CO;2).
37. Almeida, C.T.; Oliveira-Júnior, J.F.; Delgado, R.C.; Cubo, P.; Ramos, M.C. Spatiotemporal rainfall and temperature trends throughout the Brazilian Legal Amazon, 1973–2013. *Int. J. Climatol.* **2017**, *37*, 2013–2026. <https://doi.org/10.1002/joc.4831>.
38. Silva, P.E.; Silva, C.M.S.; Spyrides, M.H.C.; Andrade, L.M.B. Precipitation and air temperature extremes in the Amazon and northeast Brazil. *Int. J. Climatol.* **2019**, *39*, 579–595. <https://doi.org/10.1002/joc.5829>.
39. Souza, D.O.; Nascimento, M.G.; Alvala, R.C.S. Influência do crescimento urbano sobre o microclima de Manaus e Belém: Um estudo observacional. *Rev. Brasil. Geogr. Fis.* **2015**, *8*, 1109–1124. <http://dx.doi.org/10.5935/1984-2295.20150057>.
40. Marengo, J.A. Inter-decadal variability and trends in rainfall in the Amazon basin. *Theor. Appl. Climatol.* **2004**, *78*, 79–96. <https://doi.org/10.1007/s00704-004-0045-8>.
41. Satyamurty, P.; Castro, A.A.; Tota, J.; Gularte, J.J.S.; Manzi, A.O. Rainfall trends in the Brazilian Amazon in the past eight decades. *Theor. Appl. Climatol.* **2010**, *99*, 139–148. <https://doi.org/10.1007/s00704-009-0133-x>.
42. Espinoza, J.C.; Ronchail, J.; Marengo, J.A.; Segura, H. Contrasting North–South changes in Amazon wet-day and dry-day frequency and related atmospheric features (1981–2017). *Clim. Dyn.* **2019**, *52*, 5413–5430. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4462-2>.
43. Lira, B.R.P.; Lopes, L.N.A.; Chaves, J.R.; Santana, L.R.; Fernandes, L.L. Identificação de Homogeneidade, Tendência e Magnitude da Precipitação em Belém (Pará) entre 1968 e 2018. *An. Inst. Geoci.* **2020**, *43*, 426–439. http://dx.doi.org/10.11137/2020_4_426_439.
44. De Souza, E.B.; Ferreira, D.B.S.; Guimarães, J.T.F.; Franco, V.S.; Azevedo, F.T.M.; Moraes, B.C.; Souza, P.J.O.P. Padrões climatológicos e tendências da precipitação nos regimes chuvoso e seco da Amazônia oriental. *Rev. Brasil. Clim.* **2017**, *21*, 81–93. <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v21i0.41232>.
45. UNFCCC—United Nations Framework Convention on Climate Change. Glasgow Climate Pact. Available online: <https://unfccc.int/documents/310475> (accessed on 21 January 2022).

46. Campos, T.T.L.O.B.; Mota, M.A.S.; Santos, S.R.Q. Eventos extremos de precipitação em Belém-PA: Uma revisão de notícias históricas de jornais. *Rev. Amb. Água* **2015**, *10*, 182–194. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1433>.
47. Oliveira, J.V.; Cohen, J.C.P.; Pimentel, M.; Tourinho, H.L.Z.; Lôbo, M.A.; Sodré, G.; Abdala, A. Urban climate and environmental perception about climate change in Belém, Pará, Brazil. *Urban Clim.* **2020**, *31*, 100579. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100579>.

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÃO GERAL

5.1 RESULTADOS CHAVES: IMPACTOS E IMPLICAÇÕES

O Estudo revelou através do mapeamento da cobertura superficial por sensoriamento remoto que as mudanças ambientais da Região Metropolitana de Belém sinalizam para o adensamento populacional na área sudoeste da região, o qual apresenta alta taxas de urbanização e possível saturação no futuro, causada pela má distribuição da massa populacional na região.

Outra consequência das mudanças ambientais da cobertura de superfície é o impacto no clima local, pois constatou-se pela análise de tendências o aumento generalizado da temperatura do ar nos dois regimes sazonais e da precipitação no regime chuvoso, ratificando a hipótese do estudo de que as áreas urbanas em Belém aumentam substancialmente com o passar dos anos e que existe correlação significativa entre a urbanização na escala municipal e as variáveis climáticas na região.

Evidenciou-se que na RMB a supressão vegetal das florestas suscitou primordialmente na expansão das áreas de pastagens/agricultura, cujas mudanças ambientais explicaram a tendência de aumento da temperatura do ar nos dois regimes sazonais. O fato de o aquecimento atmosférico particularmente no regime seco ter sido quantitativamente maior na escala regional (RMB) do que na escala municipal (Belém), conclui-se que o impacto da expansão regional da área de pastagem/agricultura sobrepujou o impacto da expansão municipal da área urbana.

O sexto relatório do IPCC, de 2021, mostrou que o mundo provavelmente atingirá ou excederá 1,5 °C de aquecimento nas próximas duas décadas, mais cedo do que em avaliações anteriores. Os resultados obtidos no Downscaling (modelo regional RegCM4 aninhado ao modelo global HadGEM2 considerando o cenário futuro RCP8.5 considerado mais extremo nas emissões de gases que exacerbam o aquecimento global), apontam que condições de clima mais quente devem persistir nas próximas décadas, com projeções de aumento da temperatura do ar da ordem de 1,5°C na RMB e 1,3°C em Belém no regime seco e de 1°C na RMB e 0,9°C em Belém no regime chuvoso. Portanto, nossos resultados sobre o aumento de temperatura corroboram com aqueles reportados no último relatório do IPCC.

Outro resultado obtido nas projeções regionalizadas foi a indicação de persistência da tendência de intensificação do regime chuvoso nas próximas décadas, com aumento em cerca de 25% da precipitação na RMB e de 14% em Belém. Tais projeções tem sérias

implicações no contexto da RMB com probabilidade de intensificação das inundações nas áreas urbanas. A região é composta por muitas bacias hidrográficas, as quais além das cheias naturais, são afetadas pelos índices pluviométricos extremos, especialmente quando coincidem as marés altas de sizígia (MARANHÃO, 2011).

Outra preocupação se refere a saúde da população, que está fora do escopo deste estudo, mas a abordagem sobre o tema sugere reflexões. Um impacto notório durante os episódios de inundações urbanas são aqueles relacionados à ocorrência de casos de doenças de veiculação hídrica, tais como febre tifoide, cólera e leptospirose. Outra implicação notória, na RMB, é o aumento dos casos de doenças respiratórias durante os períodos chuvosos. Os riscos para a saúde humana, incluindo morbidade e mortalidade relacionadas ao clima quente e úmido em áreas urbanas e as demais implicações para o futuro próximo causadas pelas alterações climáticas, devem ser temas de discussão para as tomadas de decisões do governo nas esferas municipal, estadual e federal.

5.2 CONCLUSÕES DE FORMA INTEGRADA

O estudo atingiu seu objetivo proposto, tendo em vista que quantificou a dinâmica espaço/temporal das mudanças na cobertura superficial, com foco na urbanização, durante as últimas quatro décadas, analisou os impactos concomitantes das mudanças no uso e cobertura da superfície no clima regional, considerando os padrões sazonais de temperatura do ar e precipitação, bem como gerou simulações de cenários futuros de mudanças climáticas e investigou as alterações nos padrões sazonais de clima regional nos próximos 25 anos através de modelagem climática com RegCM4. No que concerne as duas hipóteses formuladas, ambas foram confirmadas, uma vez que o estudo constatou o aumento substancialmente da urbanização com o passar dos anos e correlações significantes entre o antropismo e as variáveis climáticas, além de revelar com as projeções para o futuro próximo (25 anos) que o aumento da temperatura e aumento no regime de chuva irão agravar os impactos ambientais na RMB. Assim, infere-se que o estudo gerou informações climáticas relevantes no contexto do clima atual e clima futuro, as quais podem subsidiar as atividades de gestão, tomada de decisão e planejamento ambiental e formulação de políticas públicas em benefício da sociedade.

5.3 PRIORIDADES PARA PESQUISAS FUTURAS

Propõe-se como recomendação para estudos futuros, o monitoramento do uso e cobertura dos núcleos urbanos com imagens de alta resolução, utilizando outros índices físicos no sensoriamento remoto combinados aos NDBI (*Normalized Difference Built-up Index*), NDWI (*Normalized Difference Water Index*), NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) e BSI (*Bare Soil Index*) para aprimorar o método e mitigar possíveis erros de classificação, bem como investigar a relação da ação antrópica na região com outras variáveis climáticas, tais como insolação, nebulosidade, umidade e vento.

Outra proposta interessante para pesquisas futuras, seria: a aplicação da mesma ferramenta de modelagem (RegCM4); utilização de mais esquemas, além dos utilizados neste estudo (Emanuel, Kain-Fritsch e Tiedtke); uso de outras bases observacionais além de CMORPH, CRU e CHIRPS; e por fim, gerar projeções de clima futuro com domínio RegCM4 sobre RMB com a cobertura do solo dinâmica para os anos futuros.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, Antonio José Pereira; NETO, José Vicente Ferreira. MAPEAMENTO DE ÁREAS IMPERMEÁVEIS PARA CARACTERIZAÇÃO DA URBANIZAÇÃO DA BACIA ENDORREICA DO TABULEIRO DO MARTINS, MACEIÓ/AL. **Revista Contexto Geográfico**, v. 2, n. 3, p. 100-109, 2018.
- ALMEIDA, C. T.; OLIVEIRA-JÚNIOR, J.F.; DELGADO, R.C.; CUBO, P.; RAMOS, M.C. Spatiotemporal rainfall and temperature trends throughout the Brazilian Legal Amazon, 1973–2013. **International Journal of Climatology**, v. 37, n. 4, p. 2013-2026, 2017. <https://doi.org/10.1002/joc.4831>
- ALMEIDA, Neila de Jesus Ribeiro; CAÑETE, Voyner Ravena. RECURSOS NATURAIS E COTIDIANO: POPULAÇÃO RIBEIRINHA E A GESTÃO DA RDS ALCobaça–UHE TUCURUÍ/PA. **Tessituras: Revista de Antropologia e Arqueologia**, v. 3, n. 1, p. 191, 2015.
- ALTHOR, Glenn; WATSON, James EM; FULLER, Richard A. Global mismatch between greenhouse gas emissions and the burden of climate change. **Scientific reports**, v. 6, n. 1, p. 1-6, 2016.
- ALVES, Lincoln Muniz; MARENGO, J.A.; FU, R.; BOMBARDI, R.J. Sensitivity of Amazon regional climate to deforestation. **American Journal of Climate Change**, v. 6, n. 1, p. 75-98, 2017. <https://doi.org/10.4236/ajcc.2017.61005>
- AMBRIZZI, Tércio; REBOITA, M.S.; DA ROCHA, R.P.; LLOPART, M. The state of the art and fundamental aspects of regional climate modeling in South America. **Annals of the new york academy of sciences**, v. 1436, n. 1, p. 98-120, 2019. <https://doi.org/10.1111/nyas.13932>
- ANDERSON, Christopher J.; ARRITT, Raymond W.; KAIN, John S. An alternative mass flux profile in the Kain–Fritsch convective parameterization and its effects in seasonal precipitation. **Journal of Hydrometeorology**, v. 8, n. 5, p. 1128-1140, 2007. <https://doi.org/10.1175/JHM624.1>
- ARAÚJO, T. D.; FONSECA, E. L. Análise Multitemporal dos Lençóis Maranhenses entre 1984 a 2014 utilizando Sensoriamento Remoto orbital. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, n. 1, p. 280-295, 2016.

- AZEVEDO, Sarah Dias; SOARES, Lorena Fernanda Araújo; TORRES, Leandro Marques. Temperatura de superfície e uso e cobertura do solo em municípios da região metropolitana de Belém/PA. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 12, n. 1, p. 214-222, 2021.
- BARRETO, Lidianne Pereira Gomes Lucas; DA ROSA SALES, Davidson; BARRETO, Wagner Davy Lucas. Perfil dos incêndios urbanos na região metropolitana de Belém. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 7, p. 53714-53727, 2020.
- BECKER, Bertha K. Geopolítica da amazônia. **Estudos avançados**, v. 19, n. 53, p. 71-86, 2005. <https://doi.org/10.1590/S0103-40142005000100005>
- BECKER, Bertha K. A Urbe Amazônida. A floresta e a cidade. Rio de Janeiro: Editora Garamond, Rio de Janeiro, 2018.
- BORMA, L.S.; NOBRE, C.A.; CARDOSO, M.F. 2.15 - Response of the Amazon Tropical Forests to Deforestation, Climate, and Ex-tremes, and the Occurrence of Drought and Fire. In **Climate Vulnerability**, Roger A. Pielke, Ed.; Academic Press, 2013, Pages 153-163, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-384703-4.00228-8>
- CAMPOS, T.L.O.B.; MOTA, M.A.S.; SANTOS, S.R.Q. Eventos extremos de precipitação em Belém-PA: uma revisão de notícias históricas de jornais. **Rev. Amb. & Água** 2015, 10(1), 182-194. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1433>
- CHANGNON, Stanley A. Inadvertent weather modification in urban areas: Lessons for global climate change. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 73, n. 5, p. 619-627, 1992.
- CHAPMAN, Sarah; THATCHER, Marcus; SALAZAR, Alvaro; WATSON, James E.M.; MACALPINE, Clive A. The impact of climate change and urban growth on urban climate and heat stress in a subtropical city. **International Journal of Climatology**, 2019.
- CHEN, Wanhui; Liangyun, Liu; Chao, Zhang; Jihua, Wang; Jindi, Wang; Yuchun, Pan. Monitoring the seasonal bare soil areas in Beijing using multitemporal TM images. In: **IGARSS 2004, IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium**. IEEE, 2004. p. 3379-3382, 2004.
- CHHETRI, Parveen K.; THAI, Eric. Remote sensing and geographic information systems techniques in studies on treeline ecotone dynamics. **Journal of Forestry Research**, p. 1-11, 2019.
- CIELO, C. A.; GONÇALVES, B. F. T.; LIMA, J. P. M.; CHRISTMANN, M. K. Maximum phonation time of/a/, maximum phonation time predicted and respiratory type in adult women without laryngeal disorders. **Revista CEFAC**, v. 17, n. 2, p. 358-363, 2015.
- CIRINO, Luciana Dos Santos; VITORINO, Maria Isabel; DE HOLANDA, Bruno Silva. Análise climática da variabilidade natural e antrópica para uma metrópole amazônica. **Revista Brasileira de Iniciação Científica**, v. 6, n. 2, p. 3-26, 2019.
- COELHO, I. A. M.; DUARTE, S. M. A.; COELHO, O. A. M. Estudo da dinâmica da cobertura vegetal no município de Floresta/PE através de processamento digital de imagens. **Revista GEAMA**, v. 2, n. 1, 2015.
- COLLINS, W.J.; BELLOUIN, N.; DOUTRIAUX-BOUCHER, M.; GEDNEY, N.; HALLORAN, P.; HINTON, T.; HUGHES, J.; JONES, C.D.; JOSHI, M.; LIDDICOAT, S.; MARTIN, G.; O'CONNOR, F.; RAE, J.; SENIOR, C.; SITCH, S.; TOTTERDELL, I.; WILTSHIRE, A.; WOODWARD, S. COLLINS, W. J. et al. Development and evaluation of an Earth-System model–HadGEM2. **Geoscientific Model Development**, v. 4, n. 4, p. 1051-1075, 2011. <https://doi.org/10.5194/gmd-4-1051-2011>
- COUNTINHO, Eliane de Castro; DA ROCHA, Edson José Paulino; LIMA, Aline Maria Meiguins; RIBEIRO, Hebe Morganne Campos; GUTIERREZ, Lucy Anne Cardoso Lobão; BARBOSA, Ana Júlia Soares; PAES, ALVES, Gleicy Karen Abdon Alves; BISPO, Carlos José Capela; TAVARES, Paulo Amador. Riscos socioeconômicos e ambientais em municípios banhados pelos afluentes do Rio Amazonas. **Revista Ambiente & Água**, Taubaté, v.12, n.5, p.814-828, 2017.
- DA SILVA, Gabriella Ferreira; DE CARVALHO, Marcus Vinícius Alves; CRUZ, Carla Bernardete Madureira. ANÁLISE ESPAÇO-TEMPORAL DO DESASTRE AMBIENTAL EM MARIANA-MG A PARTIR DAS GEOTECNOLOGIAS. **Revista Continentes**, n. 13, p. 49-67, 2019.
- DA TRINDADE, Saint-Clair Cordeiro. Uma Floresta Urbanizada? Legado e Desdobramentos de uma Teoria sobre o Significado da Cidade e do Urbano na Amazônia. **Espaço Aberto**, v. 3, n. 2, p. 89-108, 2013.

- DAVIDSON, E.A.; DE ARAUJO, A.C.; ARTAXO, P.; BALCH, J.K.; BROWN, I.F.; WOFSY, S.C. The Amazon basin in transition. **Nature**, 2012, 481 (7381), 321–328. <https://doi.org/10.1038/nature10717>
- DE OLIVEIRA, Luiz F. C.; FIOREZE, Ana. P.; MEDEIROS, Antonio M. M.; SILVA, Melissa A. Comparação de metodologias de preenchimento de falhas de séries históricas de precipitação pluvial anual. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 11, p. 1186-1192, 2010.
- DE SOUZA, E.B.; FERREIRA, D.B.S.; GUIMARÃES, J.T.F.; FRANCO, V.S.; AZEVEDO, F.T.M.; MORAES, B.C.; SOUZA, P.J.O.P.; Padrões climatológicos e tendências da precipitação nos regimes chuvoso e seco da Amazônia oriental. **Revista Brasileira de Climatologia**. 2017, 21, 81-93. <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v21i0.41232>
- DE SOUSA, Eliezilda Oliveira; RIBEIRO, Priciane Cristina Correa; SANCHES, Heloisa Negri. Os reflexos socioambientais da expansão metropolitana de Belém sobre a Comunidade Remanescente Quilombola de Abacatal (CRQA). **Revista Cerrados**, v. 18, n. 01, p. 129-158, 2020.
- DEWAN, Ashraf M.; YAMAGUCHI, Yasushi. Land use and land cover change in Greater Dhaka, Bangladesh: Using remote sensing to promote sustainable urbanization. **Applied Geography**, v. 29, n. 3, p. 390-401, 2009.
- DIAS, Luanna Costa; DA CRUZ VALENTE, Alexandre Miguel; FERNANDES, Lindemberg Lima. Análise e correlação de variáveis climatológicas com os fenômenos climáticos e a urbanização na Cidade de Belém, no Estado do Pará, região Norte do Brasil. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 8, p. e972986790-e972986790, 2020.
- DIAS, Solange Valadares. Licenciamento Ambiental: as sobreposições das ações entre; caso, três níveis de governo: o caso do Estado do Pará. 125p., 2010. Licenciamento ambiental. Dissertação (Mestrado em gestão de Recursos Naturais e Desenvolvimento Local na Amazônia) – **Núcleo do Meio Ambiente, Universidade Federal do Pará**, Belém, 2010.
- DICKINSON, R.E.; HENDERSON-SELLERS, A.; KENNEDY, P.J. Biosphere–Atmosphere Transfer Scheme (BATS) Version 1e as Coupled to the NCAR Community Model; NCAR Technical Note NCAR/TN-3871STR; **National Center for Atmospheric Research**: Boulder, CO, USA, 1993; 72 p. <http://dx.doi.org/10.5065/D67W6959>
- ESPINOZA, J.C.; RONCHAIL, J.; MARENGO, J.A.; SEGURA, H. Contrasting North–South changes in Amazon wet-day and dry-day frequency and related atmospheric features (1981–2017). **Climate Dynamics**. 2019, 52, 5413–5430. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4462-2>
- EMANUEL, K.A.; ZIVKOVIC-ROTHMAN, M. Development and evaluation of a convection scheme for use in climate models. **Journal of the Atmospheric Sciences**. 1999, 56, 1766–1782. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1999\)056<1766:DAEOAC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1999)056<1766:DAEOAC>2.0.CO;2)
- EYRING, V.; BONY, S.; MEEHL, G.A.; SENIOR, C.A.; STEVENS, B.; STOUFFER, R.J.; TAYLOR, K.E. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. **Geoscientific Model Development**. 2016, 9, 1937–1958, <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>
- FENZL, Norbet; SOMBRA, Daniel; DO CANTO, Otávio; FARIAS, André; NASCIMENTO, Fernanda. OS ‘GRANDES PROJETOS’ E O PROCESSO DE URBANIZAÇÃO DA AMAZÔNIA BRASILEIRA: consequências sociais e transformações territoriais. **InterEspaço: Revista de Geografia e Interdisciplinaridade**, v. 5, n. 19, 2020.
- FERREIRA, Douglas Batista da Silva; DE SOUZA, Everaldo Barreiros; DE OLIVEIRA, Juarez Ventura. Identificação de extremos de precipitação em municípios do Estado do Pará e sua relação com os modos climáticos atuantes nos oceanos pacífico e atlântico. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 27, 2020.
- FERREIRA, Fabiana Lourenço; PEREIRA, Enio Bueno; LABAKI, Lucila Chebel. Fatores associados à distribuição da temperatura das superfícies em áreas urbanas: zonas climáticas locais e características espectrais. **Ambiente Construído**, v. 21, n. 1, p. 237-262, 2021.
- FERREIRA FILHO, David Figueiredo; LIRA, Bruna Roberta Pereira; CRISPIM, Diêgo Lima; PESSOA, Francisco Carlos Lira; FERNANDES, Lindemberg Lima. ANÁLISE PLUVIOMÉTRICA NO ESTADO DO PARÁ: COMPARAÇÃO ENTRE DADOS OBTIDOS DE ESTAÇÕES PLUVIOMÉTRICAS E DO SATÉLITE GPCC. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 26, 2020.
- 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.

FRIMPONG, Bernard Fosu; MOLKENTHIN, Frank. Tracking Urban Expansion Using Random Forests for the Classification of Landsat Imagery (1986–2015) and Predicting Urban/Built-Up Areas for 2025: A Study of the Kumasi Metropolis, Ghana. **Land**, v. 10, n. 1, p. 44, 2021.

FUJACO, Maria Augusta Gonçalves; LEITE, Mariangela Garcia Praça; MESSIAS, Maria Cristina Teixeira Braga. Análise multitemporal das mudanças no uso e ocupação do Parque Estadual do Itacolomi (MG) através de técnicas de geoprocessamento. **REM: Revista Escola de Minas**. Ouro Preto, v. 63, n. 4, p. 695-701, 2010.

FUNK, C.; PETERSON, P.; LANDSFELD, M.; PEDREROS, D.; VERDIN, J.; SHUKLA, S.; HUSAK, G.; ROWLAND, J.; HARRISON, L.; HOELL, A.; MICHAELSEN, J. The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. **Scientific data**. 2015, 2, 150066. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>

GANDU, A.; COHEN, J.; DE SOUZA, J. Simulation of deforestation in eastern Amazonia using a high-resolution model. **Theoretical and Applied Climatology**. 2004, 78, 123–135. <https://doi.org/10.1007/s00704-004-0048-5>

GIORGI, F.; COPPOLA, E.; SOLMON, F.; MARIOTTI, L.; SYLLA, M.B.; BI, X.; ELGUINDI, N.; DIRO, G.T.; NAIR, V.; GIULIANI, G.; et al. RegCM4: Model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains. **Climate Research**. 2012, 52, 7–29. <https://doi.org/10.3354/cr01018>

GUTIERREZ, Carlos B. Barreiros; RIBEIRO, Hebe M. Campos; GUTIERREZ, Dione M. Gomes; MORALES, Gundisalvo Piratoba; DOS SANTOS, Leonardo Sousa; DE PAULA, Manoel Tavares. Análise espaço-temporal do uso e cobertura do solo no interior da APA Belém e correlação com os parâmetros de água dos seus mananciais. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 10, n. 1, p. 521-534, 2017.

GUTIÉRREZ, J.M.; JONES, R.G.; NARISMA, G.T.; ALVES, L.M.; AMJAD, M.; GORODETSKAYA, I.V.; GROSE, M.; KLUTSE, N.A.B.; KRAKOVSKA, S.; LI, J.; MARTÍNEZ-CASTRO, D.; MEARNES, L.O.; MERNILD, S.H.; NGO-DUC, T.; VAN DEN HURK, B.; YOON, J.-H. **Atlas. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 1st ed.; MASSON-DELMOTTE, V. P. ZHAI, A. PIRANI, S.L. CONNORS, C. PÉAN, S. BERGER, N. CAUD, Y. CHEN, L. GOLDFARB, M.I. GOMIS, M. HUANG, K. LEITZELL, E. LONNOY, J.B.R. MATTHEWS, T.K. MAYCOCK, T. WATERFIELD, O. YELEKÇI, R. YU, AND B. ZHOU, Eds.; Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1927–2058, doi:10.1017/9781009157896.021

HARRIS, I.; OSBORN, T.J.; JONES, P.; LISTER, D. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. **Scientific data**. 2020, 7, 109. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0453-3>

HARRIS, I.; JONES, P. D.; OSBORN, T. J.; LISTER, D. H. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations—the CRU TS3. 10 Dataset. **International journal of climatology**, v. 34, n. 3, p. 623-642, 2014.

HIRSCH, R. M.; SLACK, J.R.; SMITH, R.A. Techniques of trend analysis for monthly water quality data. **Water resources research**. 1982, 18 (1), 107–121. <https://doi.org/10.1029/WR018i001p00107>

HÜFFNER, João Gabriel Pinheiro; BELLO, Leonardo Augusto Lobato. Análise dos impactos ambientais da expansão urbana na ilha de Cotijuba, Belém-pa. **Caminhos de Geografia**, v. 13, n. 44, 2013.

HUSZAR, P.; HALENKA, T.; BELDA, M.; ZAK, M.; SINDELAROVA, K.; MIKSOVSKY, J. Regional climate model assessment of the urban land-surface forcing over central Europe. **Atmospheric Chemistry and Physics**. 2014, 14, 12393–12413, <https://doi.org/10.5194/acp-14-12393-2014>

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo Demográfico. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pa/belem/panorama>. Acesso em: 20/02/2021.

INPE - Instituto Nacional De Pesquisas Espaciais. Desmatamento por municípios. Projeto TERRAClass AMAZÔNIA. São José dos Campos, São Paulo: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2014. Disponível em: <http://www.inpe.br/noticias/arquivos/pdf/TerraClass_2014.pdf> Acesso em 11/03/2021.

IPEA/IDESP. Relatório de Pesquisa 1.2: Análise Comparativa das Funções Públicas de Interesse Comum. Região Metropolitana de Belém. Brasília: 2013.

LACERDA, Alberto Franco. O Estudo de Uso e Cobertura do Solo para a bacia hidrográfica do rio Carinhanha (BA/MG). **Revista Brasileira de Sensoriamento Remoto**, v. 1, n. 2, 2021.

LACERDA, Elisângela Gonçalves; DINIZ, Alexandre Magno. GÊNESE URBANA NA AMAZÔNIA SETENTRIONAL: CONSIDERAÇÕES A PARTIR DO MUNICÍPIO DE RORAINÓPOLIS-RR. **Acta Geográfica**, v. 14, n. 34, p. 216-241, 2020.

LIAQUT, Anum; Younes, Isma; Sadaf, Rakhshanda; Zafar, Haris. Impact of Urbanization Growth on Land Surface Temperature using remote sensing and GIS: A Case Study of Gujranwala City, Punjab, Pakistan. **International Journal of Economic and Environmental Geology**, p. 44-49, 2019.

LIMA, G. N.; LOMBARDO, M. Urban climatology in Brazil: An analysis based on the methodology of the urban climate system. **Environment Conservation Journal**. 2019, 20(1&2), 1-8. <https://doi.org/10.36953/ECJ.2019.1008.1201>

LIRA, B.R.P.; LOPES, L.N.A.; CHAVES, J.R.; SANTANA, L.R.; FERNANDES, L.L. Identificação de Homogeneidade, Tendência e Magnitude da Precipitação em Belém (Pará) entre 1968 e 2018. **Anuário do Instituto de Geociências**. 2020, 43(4), 426-439. http://dx.doi.org/10.11137/2020_4_426_439

LLOPART, M.; COPPOLA, E.; GIORGI, F.; DA ROCHA, R.P.; CUADRA, S.V. Climate change impact on precipitation for the Amazon and La Plata basins. **Climate Change**. 2014, 125, 111-125. <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1140-1>

LLOPART, M.; REBOITA, M.S.; COPPOLA, E.; GIORGI, F.; DA ROCHA, R.P.; DE SOUZA, D.O. Land Use Change over the Amazon Forest and Its Impact on the Local Climate. **Water**. 2018, 10, 149. <https://doi.org/10.3390/w10020149>

LOMBARDO, M. A. Análise das mudanças climáticas nas metrópoles o exemplo de São Paulo e Lisboa. **Da produção ao consumo: impactos socioambientais no espaço urbano**, Editora UNESP. São Paulo: Cultura Acadêmica, p. 111-146, 2009. E-Book. ISBN 9788579830075. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/11449/109101>>. Acesso em: 05/03/2021.

LOVELAND, T.R.; REED, B.C.; BROWN, J.F.; OHLEN, D.O.; ZHU, Z.; YANG, L.; MERCHANT, J.W. Development of a global land cover characteristics database and IGBP DISCover from 1 km AVHRR data. **International journal of remote sensing**. 2000, 21, 6-7, 1303-1330. <https://doi.org/10.1080/014311600210191>

LOVISI, Tahmires Pinnola; SEABRA, Vinicius da Silva. Análise de Dados Censitários e Temáticos na Caracterização da Ocupação Urbana dos Bairros de Niterói. **Revista Continentes**, n. 8, p. 6-20, 2016.

MARENGO, J.A. Inter-decadal variability and trends in rainfall in the Amazon basin. **Theoretical and applied climatology**. 2004, 78, 79-96. <https://doi.org/10.1007/s00704-004-0045-8>

MARENGO, J.A.; SOUZA, C.; THONICKE, K.; BURTON, C.; HALLADAY, K.; BETTS, R.A.; ALVES, L.M.; SOARES, W.R. Changes in Climate and Land Use Over the Amazon Region: Current and Future Variability and Trends. **Frontiers in Earth Science**. 2018, 6, 228. <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00228>

MARTINS, Rubens Takeji Aoki Araujo; PENNER, Giovanni Chaves Penner; GONÇALVES, Moisés Marçal. Estimativa da recarga natural do aquífero livre na microbacia hidrográfica do entorno do aterro sanitário de Marituba/PA. In: PENNER, Giovanni Chaves. Demandas essenciais para o avanço da engenharia sanitária e ambiental. Ponta Grossa: **Atena Editora**, 2019. Cap. 6. p. 52-65.

MCFEETERS, Stuart K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. **International journal of remote sensing**, v. 17, n. 7, p. 1425-1432, 1996.

MELCHIORRI, Michele; Aneta J. Florczyk; Sergio Freire; Marcello Schiavina; Martino Pesaresi; Thomas Kemper. Unveiling 25 Years of Planetary Urbanization with Remote Sensing: Perspectives from the Global Human Settlement Layer. **Remote Sensing**, v. 10, n. 5, p. 768, 2018.

MELLO, Andréa Hentz; FEITOSA, Nathália Karolinne. Dinâmicas da ocupação territorial na Amazônia: Reflexões sobre os impactos socioambientais pós-pandemia decorrentes do avanço do desmatamento. **Unifesspa: Paineis Reflexão em tempos de crise**, v. 15, 2020.

MONTEIRO, C. A. F. **Teoria e Clima Urbano**. São Paulo: IGEOG/USP, 1976.

MONTEIRO, Felipe Ferreira; Weber Andrade Gonçalves; Lara de Melo Barbosa Andrade; Lourdes Milagros Mendoza Villavicencio; Cassia Monalisa dos Santos Silva. Assessment of Urban Heat Islands in Brazil based on MODIS remote sensing data. **Urban Climate**, v. 35, p. 100726, 2021.

MOREIRA, M. A. Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação. 4a. edição. Viçosa: **Ed. UFV**. ISBN13: 9788572693813. 2011.

- MU, Y.; JONES, C. An observational analysis of precipitation and deforestation age in the Brazilian Legal Amazon. **Atmospheric Research**. 2022, 271, 106122. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106122>
- NOBRE, C.A.; SAMPAIO, G.; BORMA, L.S.; CASTILLA-RUBIO, J.C.; SILVA, J.S.; CARDOSO, M. The Fate of the Amazon Forests: land-use and climate change risks and the need of a novel sustainable development paradigm. **Proceedings of the National Academy of Sciences**. U.S.A. 2016, 113, 10759–10768. <https://doi.org/10.1073/pnas.1605516113>
- NOBRE, C.A.; SELLERS, P.J.; SHUKLA, J. Amazonian deforestation and regional climate change. **Journal of climate**. 1991, 4, 957–988. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1991\)004<0957:ADARCC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1991)004<0957:ADARCC>2.0.CO;2)
- NOBRE, P.; MALAGUTTI, M.; URBANO, D.F.; DE ALMEIDA, R.A.F.; GIAROLLA, E. Amazon Deforestation and Climate Change in a Coupled Model Simulation, **Journal of climate**. 2009, 22(21), 5686–5697. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2757.1>
- NUNES, Leticia Gonçalves; DE MENEZES FILHO, Frederico Carlos Martins. Avaliação das temperaturas de superfície obtidas por sensoriamento remoto nas estações seca e chuvosa. **Holos Environment**, v. 21, n. 1, p. 143–159, 2021.
- OLIVEIRA, Claudianne Brainer de Souza; CANDEIAS, Ana Lúcia Bezerra; JÚNIOR, João Rodrigues Tavares. Utilização de índices físicos a partir de imagens OLI–TIRS para o mapeamento de uso e cobertura da terra no entorno do aeroporto internacional do Recife/Guararapes–Gilberto Freire. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 12, n. 03, p. 1039–1053, 2019.
- OLIVEIRA, J.V.; COHEN, J.C.P.; PIMENTEL, M.; TOURINHO, H.L.Z.; LÔBO, M.A.; SODRÉ, G.; ABDALA, A. Urban climate and environmental perception about climate change in Belém, Pará, Brazil. **Urban Climate**. 2020, 31, 100579. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100579>
- PACA, V.H.D.M.; ESPINOZA-DÁVALOS, G.E.; MOREIRA, D.M.; COMAIR, G. Variability of Trends in Precipitation across the Amazon River Basin Determined from the CHIRPS Precipitation Product and from Station Records. **Water**. 2020, 12, 1244. <https://doi.org/10.3390/w12051244>
- PADILHA, R.; Portugal, J. L.; DOS SANTOS, A. V.; PEREIRA, S. V.; DO CARMO, T. V. B. Proposição de Modelo de Corredores Ecológicos com Base no Sistema de Informações Geográficas na Região de Suape, Pernambuco, Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, n. 1, p. 079–090, 2016.
- PANAGOS, Panos; Ballabio, Cristiano; Meusburger, Katrin; Spinonia, Jonathan; Alewell, Christine; Borrelli, Pasquale. Towards estimates of future rainfall erosivity in Europe based on REDES and WorldClim datasets. **Journal of Hydrology**, v. 548, p. 251–262, 2017.
- PINHEIRO, Andréa; LIMA, José Júlio Ferreira; DE SÁ, Maria Elvira Rocha; PARACAMPO, Maria Vitória. A questão habitacional na Região Metropolitana de Belém. **Revista Habitare. Porto Alegre: ANTAC**, 2007.
- PONTE, F. C.; Furtado, A. M. M., DA SILVA, C. N.; DA SILVA, J. M. P.; LIMA, R. S. Parâmetros Fisiográficos e Impactos Ambientais da Rodovia Santarém-Cuiabá (BR-163), Estado do Pará, Brasil. **REDE-Revista Eletrônica do PRODEMA**, v. 9, n. 2, 2016.
- RAMIRES, Jane Zilda dos Santos; MELLO-THÉRY, Neli Aparecida de. Uso e ocupação do solo em São Paulo, alterações climáticas e os riscos ambientais contemporâneos. **Confins. Revue franco-brésilienne de géographie/Revista franco-brasileira de geografia**, n. 34, 2018.
- RAMOS DA SILVA, R.; WERTH, D.; AVISSAR, R. Regional impacts of future land-cover changes on the Amazon basin wet-season climate. **Journal Climate**. 2008, 21, 1153–1170. <https://doi.org/10.1175/2007JCLI1304.1>
- RANJAN, Avinash Kumar; ANAND, Akash; VALLISREE, S.; SINGH, Rahul Kumar. LU/LC change detection and forest degradation analysis in Dalma wildlife sanctuary using 3S technology: A case study in Jamshedpur-India. **Aims Geosciences**, v. 2, n. 4, p. 273–285, 2016.
- RAWAT, J. S.; KUMAR, Manish. Monitoring land use/cover change using remote sensing and GIS techniques: A case study of Hawalbagh block, district Almora, Uttarakhand, India. **The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science**, v. 18, n. 1, p. 77–84, 2015.
- REAL, Mauro Marcelo Furtado; VASCONCELOS, Mário. O SISTEMA ÚNICO DE SAÚDE E O PROGRAMA SAÚDE DA FAMÍLIA NO BRASIL: CONCEPÇÃO E MODELO. **Revista Movendo Ideias**, v. 15, n. 1, 2017.

- RODRIGUES, Jondison Cardoso; DE LIMA, Ricardo Angelo Pereira. Grandes projetos de infraestrutura na Amazônia: imaginário, colonialidade e resistências. **Revista NERA**, v. 23, n. 51, 2020.
- ROUSE, J. W.; HAAS Jr.; R. H.; SCHEKK, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. **NASA Special Publication**, v. 351, n. 1974, p. 309, 1974.
- SANTOS, Amanda Rayana da Silva; DE FARIAS, André Luís Assunção; FREITAS, Marcus Robert Ferreira. Política Agroambiental na Amazônia: A Insustentabilidade da Produção do Dendê. **Revista Agroecossistemas**, v. 12, n. 2, p. 152-174, 2021.
- SATYAMURTY, P.; CASTRO, A.A.; TOTA, J.; GULARTE, J.J.S.; MANZI, A.O. Rainfall trends in the Brazilian Amazon in the past eight decades. **Theoretical and applied climatology**. 2010, 99, 139–148. <https://doi.org/10.1007/s00704-009-0133-x>
- SILVA, M.E.S.; PEREIRA, G.; DA ROCHA, R.P. Local and remote climatic impacts due to land use degradation in the Amazon “Arc of Deforestation”. **Theoretical and applied climatology**. 2016, 125, 609–623. <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1516-9>
- SILVA, P.E.; SILVA, C.M.S.; SPYRIDES, M.H.C.; ANDRADE, L.M.B. Precipitation and air temperature extremes in the Amazon and northeast Brazil. **International Journal of Climatology**. 2019, 39, 579–595. <https://doi.org/10.1002/joc.5829>
- SILVA, J. S.; Da Silva, R. M.; SILVA, A. M. Mudanças do Uso e Ocupação do Solo e Degradação Eco-Ambiental Usando Imagens Orbitais: o estudo de caso da bacia do Rio Bacanga, São Luís (MA). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 8, n. 5, 2016.
- SILVA JÚNIOR, João de Athaydes, DA COSTA, Antonio Carlos Lôla; PEZZUTI, Juarez Carlos Brito; GALBRAITH, Rafael Ferreira da Costa⁴, David Galbraith. Variabilidade espacial do conforto térmico e a segregação social do espaço urbano na cidade de Belém, PA. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n. 4, p. 419-428, 2013.
- SIQUEIRA, Gilmar W.; APRILE, Fabio. Avaliação de risco ambiental por contaminação metálica e material orgânico em sedimentos da bacia do Rio Aurá, Região Metropolitana de Belém-PA. **Acta Amazônica**, v. 43, n. 1, p. 51-61, 2013.
- SIQUEIRA, Renata Alves. A INFLUÊNCIA DA URBANIZAÇÃO NA AMPLITUDE TÉRMICA DA CIDADE DE BELO HORIZONTE. **Cadernos do LESTE**, 2018.
- SOMBROEK, W. Spatial and Temporal Patterns of Amazon Rainfall. **AMBIO: A Journal of the Human Environment**. 2001, 30(7), 388-396. <https://doi.org/10.1579/0044-7447-30.7.388>
- SOUZA, C.M.Z.; SHIMBO, J.; ROSA, M.R.; PARENTE, L.L.; ALENCAR, A.A.; RUDORFF, B.F.T.; HASENACK, H.; MATSUMOTO, M.; FERREIRA, L.G.; SOUZA-FILHO, P.W.M.; et al. Reconstructing Three Decades of Land Use and Land Cover Changes in Brazilian Biomes with Landsat Archive and Earth Engine. **Remote Sensing**. 2020, 12, 2735. <https://doi.org/10.3390/rs12172735>
- SOUZA, D.O.; NASCIMENTO, M.G.; ALVALA, R.C.S. Influência do crescimento urbano sobre o microclima de Manaus e Belém: Um estudo observacional. **Revista Brasileira de Geografia Física**. 2015, 08(04), 1109-1124. <http://dx.doi.org/10.5935/1984-2295.20150057>
- SPINELLI, M. V. P.; Carvalho, R. M. C. M. de O.; Da Silva, H. P.; Brandão, S. S. F.; Frutuoso, M. N. M. de A., 2016. Estudo Sustentável da Capacidade de Carga Antrópica e a sua Influência no Ponto de Equilíbrio da Resiliência Ambiental. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, n. 1, p. 185-199.
- TAYLOR, Karl E. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**. 2001, 106, 7183–7192. <https://doi.org/10.1029/2000JD900719>
- TAYLOR, Karl E.; STOUFFER, R. J.; MEEHL, G.A. An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. **Bulletin of the American meteorological Society**. 2012, 93(4), 485-498. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00094.1>
- TIEDTKE, M. A Comprehensive Mass Flux Scheme for Cumulus Parameterization in Large-Scale Models. **Monthly weather review**. 1989, 117(8), 1779-1800. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1989\)117<1779:ACMFSF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1989)117<1779:ACMFSF>2.0.CO;2)
- TUONG, Vu Thuy; THY, Pham Thi Mai; LAM, Nguyen Dao. Multiscale remote sensing of urbanization in Ho Chi Minh city, Vietnam-a focused study of the south. **Applied Geography**, v. 92, p. 168-181, 2018.

UNFCCC - United Nations Framework Convention on Climate Change. Glasgow Climate Pact. Disponível em: <https://unfccc.int/documents/310475>. Acesso em: 21 Janeiro 2022.

USGS - UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. Double-Mass Curves. Manual of Hydrology: Part I. General Surface-Water Techniques, by James K. Searcy and Clayton H. Hardison, United States Department of the Interior, 1966.

VALE, Clemeson Cardoso; SILVA, Antonia Lima. CLASSIFICAÇÃO SUPERVISIONADA DOS MACIÇOS VEGETAIS E COBERTURA DO SOLO NO AGLOMERADO URBANO DE SÃO RAIMUNDO DAS MANGABEIRAS-MA. **Acta Tecnológica**, v. 14, n. 1, p. 93-101, 2021.

VAN VUUREN, D.P.; EDMONDS, J.; KAINUMA, M.; KEYWAN, R.; THOMSON, A.; HIBBARD, K.; HURTT, G.C.; KRAM, T.; KREY, V.; LAMARQUE, J.F.; MASUI, T.; MEINSHAUSEN, M.; NAKICENOVIC, N.; SMITH, S.J.; ROSE, S.K. The representative concentration pathways: an overview. **Climatic change**. 2011, 109, 5. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>

WANG, J.; LI, P.; SUN, J.; LIN, Y. T. Analyzing urban forest coverage variation in Guangzhou-Foshan region using factorial analysis based multivariate statistical prediction models. **Forest Ecology and Management**, v. 432, p. 121-131, 2019.

XIE, P.; JOYCE, R.; WU, S.; YOO, S.; YAROSH, Y.; SUN, F.; LIN, R. Reprocessed, Bias-Corrected CMORPH Global High-Resolution Precipitation Estimates from 1998. **Journal of Hydrometeorology**. 2017, 18(6), 1617-1641. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-16-0168.1>

XIE, Qijiao; SUN, Qi. Monitoring the Spatial Variation of Aerosol Optical Depth and Its Correlation with Land Use/Land Cover in Wuhan, China: A Perspective of Urban Planning. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 18, n. 3, p. 1132, 2021.

YU, Zhaowu; YAO, Yawen; YANG, Gaoyuan; WANG, Xiangrong; VEJRE, Henrik. Spatiotemporal patterns and characteristics of remotely sensed region heat islands during the rapid urbanization (1995–2015) of Southern China. **Science of the Total Environment**, v. 674, p. 242-254, 2019.

ZHA, Yong; GAO, Jay; NI, Shaoxiang. Use of normalized difference built-up index in automatically mapping urban areas from TM imagery. **International Journal of Remote Sensing**, v. 24, n. 3, p. 583-594, 2003.

ZHANG, Zhaoming; WEI, Mingyue; PU, Dongchuan; HE, Guojin; WANG, Guizhou; LONG, Tengfei. Assessment of Annual Composite Images Obtained by Google Earth Engine for Urban Areas Mapping Using Random Forest. **Remote Sensing**, v. 13, n. 4, p. 748, 2021.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Valores mensais de precipitação WORLDCLIM (1974-2018)

	Jan	Fev	Mar	Apr	Mar	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dec
1974	389.2	477.5	606.8	465.1	448.3	190.5	142.6	64.3	111.5	40.3	44.4	194.7
1975	254.4	472.0	578.2	522.5	314.7	166.4	183.2	105.4	114.8	85.8	63.2	127.2
1976	259.3	426.7	468.5	248.1	240.6	191.2	93.9	105.2	28.8	16.0	25.3	79.8
1977	290.2	416.3	563.5	430.2	226.0	160.9	121.5	115.8	102.2	63.3	23.1	107.8
1978	308.7	267.7	578.1	352.3	209.5	117.1	159.8	184.2	138.2	140.6	35.3	132.3
1979	243.9	357.4	403.8	333.6	191.5	135.8	110.3	106.4	119.5	37.4	60.1	131.2
1980	580.8	527.5	479.5	358.7	174.6	171.0	154.1	114.1	90.9	39.7	37.0	49.8
1981	215.3	233.4	193.5	192.2	284.0	121.1	148.7	91.1	85.7	39.7	14.8	145.6
1982	329.7	468.9	465.5	453.2	216.0	87.7	163.8	163.6	73.4	31.0	24.4	54.5
1983	118.9	271.2	343.9	261.2	134.6	88.0	86.1	81.5	42.3	51.8	5.4	107.3
1984	229.9	442.4	519.9	270.2	415.6	164.9	120.4	136.0	81.9	146.5	74.4	92.4
1985	328.5	635.2	421.9	403.0	153.0	144.9	133.5	75.9	34.3	138.6	276.9	92.7
1986	202.5	485.2	407.8	348.3	232.5	202.6	110.2	77.6	79.1	83.0	99.7	123.8
1987	238.4	335.2	475.4	322.3	140.1	159.1	116.1	87.7	40.7	69.8	15.7	68.7
1988	376.8	396.7	573.6	452.8	275.2	191.9	173.3	135.4	92.6	35.9	83.7	288.2
1989	278.6	433.5	482.1	455.2	346.5	204.3	175.6	117.9	174.3	148.4	79.0	243.3
1990	222.9	373.0	321.1	357.7	312.0	120.7	176.8	167.6	59.5	97.4	88.3	110.7
1991	326.7	475.4	358.3	477.9	306.7	137.2	30.1	119.9	136.5	78.0	23.6	52.3
1992	339.0	640.6	462.9	432.2	175.5	120.2	131.1	64.7	86.0	21.6	41.7	63.2
1993	368.9	380.1	104.3	335.2	240.8	138.5	111.4	169.6	74.9	88.9	178.1	142.6
1994	291.6	405.9	506.8	434.8	348.2	209.8	81.6	102.4	124.7	55.7	101.8	118.1
1995	306.8	349.7	452.5	462.4	399.9	182.7	152.1	50.5	60.7	75.7	161.3	178.0
1996	340.1	322.6	703.1	585.6	243.0	262.0	235.1	150.2	112.6	59.1	97.0	119.0
1997	336.5	356.8	497.6	496.5	244.1	59.1	89.9	118.7	24.3	4.6	82.9	142.6
1998	342.9	326.3	437.4	482.7	188.2	179.4	96.8	112.9	45.7	35.3	111.9	180.4
1999	226.7	336.2	448.0	376.7	343.3	134.3	57.0	87.3	78.9	63.4	39.8	203.2
2000	354.2	415.6	488.8	495.8	352.3	115.5	188.4	112.7	94.6	83.2	48.8	164.7
2001	363.5	351.0	474.2	404.8	267.2	249.6	253.8	46.9	74.6	103.1	51.1	118.8
2002	367.7	265.3	466.6	424.8	225.3	225.7	137.2	64.0	46.7	54.9	85.5	157.8
2003	149.7	451.0	498.0	357.0	203.4	114.4	106.0	76.9	101.1	65.8	67.4	159.0
2004	305.6	533.2	562.6	401.0	147.9	160.9	105.0	119.4	78.5	65.2	44.6	122.6
2005	213.8	389.9	444.9	525.3	378.4	226.2	152.5	94.5	71.6	124.9	54.9	281.3
2006	357.9	290.2	707.9	446.2	294.9	139.5	110.3	174.8	93.7	56.9	142.8	271.9
2007	236.8	406.2	504.5	490.8	259.1	195.5	164.7	124.7	55.0	95.0	56.3	265.2
2008	430.6	423.1	490.5	486.3	277.2	258.8	96.5	108.7	65.0	87.0	66.8	138.2
2009	187.2	451.9	497.1	460.5	393.5	279.6	155.3	76.5	66.4	68.1	21.9	144.0
2010	378.9	337.4	314.4	458.0	361.3	147.2	107.0	158.0	60.5	105.8	80.9	137.3
2011	424.1	347.6	551.0	520.6	421.0	217.9	175.8	137.2	30.1	80.9	87.8	98.2
2012	357.7	413.6	767.1	374.3	229.1	270.6	245.4	90.7	101.3	24.8	52.1	120.9
2013	328.9	585.2	561.3	539.2	408.6	137.7	184.2	195.2	62.2	45.1	104.1	155.9
2014	328.1	588.7	576.4	558.7	296.7	264.3	194.7	76.9	133.8	44.2	20.5	94.6
2015	397.9	389.5	600.3	622.6	375.0	179.3	85.4	85.7	48.0	12.8	46.4	127.5
2016	281.0	525.5	637.5	443.2	227.1	246.3	142.5	75.6	38.3	78.9	59.8	217.7
2017	476.2	570.2	667.0	417.1	239.6	170.6	57.3	81.2	51.8	100.5	48.9	149.4
2018	316.2	593.4	503.7	442.0	399.5	125.7	117.8	144.8	97.9	65.4	128.8	272.4

APÊNDICE B – Valores mensais de precipitação INMET (1974-2018)

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1974	403.7	405.4	526.4	510.0	406.9	175.9	211.9	52.7	131.8	81.3	116.3	293.0
1975	272.9	360.9	531.9	441.1	293.2	189.4	232.3	134.5	66.9	197.0	165.5	183.3
1976	324.7	494.7	377.0	239.6	297.2	305.4	138.7	162.5	92.5	16.9	64.5	236.2
1977	355.7	482.8	449.0	401.0	255.0	183.2	169.8	129.3	232.1	129.3	53.1	267.5
1978	467.5	360.8	531.7	389.5	232.3	82.0	135.1	173.4	124.0	279.7	120.9	158.6
1979	367.1	406.5	329.4	343.0	256.4	167.1	81.4	136.0	160.1	126.9	88.4	225.9
1980	386.2	776.2	630.2	372.8	204.7	162.9	183.7	150.8	112.7	55.6	125.3	120.6
1981	366.0	335.9	237.2	252.0	359.6	188.5	162.8	95.8	150.9	124.9	44.1	195.9
1982	560.1	436.6	422.8	425.4	291.6	89.8	190.4	212.1	178.1	69.8	81.8	132.6
1983	255.5	298.3	391.5	275.0	200.6	124.9	145.6	141.1	91.5	138.2	17.6	234.7
1984	447.4	585.4	509.0	314.7	518.8	187.1	111.9	162.1	151.0	147.2	82.6	148.6
1985	545.8	388.0	581.0	409.2	281.0	96.3	137.4	196.4	151.0	100.8	152.4	379.0
1986	353.1	462.8	495.7	564.3	233.5	217.8	97.4	74.0	151.9	136.9	94.0	182.5
1987	418.6	393.3	470.2	324.6	118.9	180.3	164.8	168.1	90.9	82.9	65.9	154.7
1988	551.0	319.2	506.2	370.2	279.6	233.0	250.7	116.1	219.9	90.9	307.4	362.8
1989	395.0	459.5	485.0	505.0	416.5	274.5	235.5	119.0	256.6	186.7	135.0	384.3
1990	210.1	393.5	260.6	340.6	177.9	120.6	218.1	219.9	84.9	121.5	129.8	173.8
1991	392.3	420.5	454.3	303.5	263.6	139.1	29.1	56.8	28.1	157.3	37.9	103.3
1992	435.3	644.9	402.9	427.3	179.9	123.6	157.2	78.9	121.8	45.8	73.9	119.0
1993	443.7	386.4	438.8	320.5	265.2	136.9	151.5	243.1	117.7	194.3	268.2	265.3
1994	336.6	446.7	459.6	412.0	355.2	236.1	105.8	133.9	120.2	118.1	159.6	343.0
1995	336.8	362.4	443.4	413.6	485.7	159.7	179.2	65.1	103.1	158.5	241.8	342.0
1996	382.0	351.6	599.6	633.0	262.7	294.1	139.8	202.7	135.4	107.0	188.8	167.9
1997	378.1	355.0	462.3	513.4	267.6	57.9	79.4	111.9	48.3	8.2	117.8	265.0
1998	409.3	321.9	384.0	514.5	199.3	199.5	118.4	143.2	89.2	73.0	174.5	305.7
1999	234.8	353.0	377.9	364.4	389.0	135.3	47.1	79.2	129.9	127.5	79.3	362.8
2000	411.9	435.6	440.3	507.7	358.6	114.8	219.3	141.9	146.5	160.3	83.6	331.6
2001	395.8	346.9	484.7	422.6	298.9	301.2	337.0	62.0	145.9	187.0	104.7	217.5
2002	446.1	232.5	393.1	415.1	196.8	254.4	173.9	75.5	95.4	119.7	176.3	277.2
2003	181.6	453.6	476.7	359.9	220.9	123.3	101.7	105.5	171.7	143.2	137.2	294.1
2004	373.8	487.0	510.5	393.6	121.0	180.1	146.0	132.3	131.5	146.6	95.3	222.5
2005	249.8	363.9	413.7	565.1	449.2	257.8	177.8	103.0	141.6	242.1	105.0	459.5
2006	387.8	275.1	685.6	495.7	325.6	121.0	106.7	236.1	155.9	113.6	240.9	519.8
2007	306.9	442.9	419.8	459.7	265.9	219.9	196.4	135.3	96.9	168.9	119.1	454.5
2008	532.2	450.8	457.4	505.1	308.1	299.0	108.9	151.5	109.6	110.6	135.2	171.2
2009	354.5	422.0	582.3	469.9	456.6	317.3	193.1	92.7	134.1	142.3	45.1	253.7
2010	452.3	359.7	296.8	450.4	403.0	176.3	132.1	188.1	95.5	152.1	134.2	224.8
2011	520.3	332.4	490.9	579.4	477.3	241.5	195.3	179.4	60.3	139.1	174.6	201.7
2012	451.2	411.9	742.5	382.8	225.1	320.0	313.2	112.2	197.0	44.3	103.0	259.8
2013	372.7	612.5	532.3	527.0	409.6	150.5	220.8	245.5	110.4	83.9	210.7	299.7
2014	406.9	602.9	562.7	561.2	332.9	285.8	240.0	84.8	211.2	82.2	41.3	186.5
2015	503.2	414.3	540.3	604.9	413.7	216.2	172.4	100.6	96.7	26.4	98.3	258.2
2016	354.9	534.3	596.5	414.2	269.1	283.0	175.3	98.2	56.4	173.9	103.5	357.1
2017	599.3	597.9	670.2	478.8	271.4	186.8	35.8	102.6	51.9	222.5	103.3	243.4
2018	362.8	671.6	506.7	406.3	438.2	132.8	135.0	192.5	170.9	134.7	246.1	432.8

APÊNDICE C – Valores mensais de TMAX WORLDCLIM (1974-2018)

	Jan	Fev	Mar	Apr	Mar	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dec
1974	29.6	29.3	28.8	29.4	29.2	29.2	28.7	29.2	29.9	31.0	30.6	29.8
1975	29.2	29.1	28.9	29.6	29.4	29.4	28.7	29.0	30.0	30.7	30.9	30.7
1976	29.4	29.1	29.4	29.8	29.4	29.4	29.1	30.6	30.6	30.8	31.1	31.0
1977	30.0	29.0	29.5	29.7	29.9	30.1	30.0	29.6	30.8	31.3	31.7	30.9
1978	30.1	30.2	29.4	29.9	30.0	29.7	29.6	29.5	30.1	30.9	31.0	30.7
1979	30.2	29.8	29.9	30.1	30.0	29.9	29.4	30.1	30.1	31.2	31.6	32.5
1980	30.2	29.0	29.6	30.0	30.4	30.6	30.6	30.7	31.3	31.7	31.0	30.8
1981	30.0	29.8	29.9	30.4	29.9	30.0	29.5	30.2	30.9	31.2	31.3	31.2
1982	30.0	29.7	29.7	29.9	29.8	30.2	29.7	29.9	30.5	31.8	31.3	31.4
1983	31.0	30.3	30.3	30.6	30.7	30.7	30.3	30.4	31.1	31.1	31.5	31.2
1984	29.5	29.5	29.4	29.4	29.4	29.7	29.5	29.9	30.2	30.8	31.0	31.0
1985	29.6	29.2	29.5	29.4	29.6	30.2	29.9	29.5	31.2	30.9	30.4	30.4
1986	29.9	29.4	29.2	29.7	30.2	30.1	30.0	30.4	31.1	30.9	31.0	31.0
1987	30.7	30.2	29.8	30.8	30.6	31.0	30.5	30.7	31.3	32.0	31.5	32.0
1988	30.5	30.3	30.1	30.0	30.2	30.2	29.9	30.3	30.7	31.4	30.9	30.3
1989	29.9	29.7	29.8	29.7	29.6	30.2	29.8	30.3	30.8	31.2	31.1	30.6
1990	30.4	29.7	30.0	30.3	30.3	30.6	30.1	30.5	30.9	31.5	31.5	31.4
1991	30.3	30.2	29.9	30.1	30.2	30.7	29.8	30.3	31.1	31.0	31.3	31.4
1992	30.5	29.5	29.8	30.2	30.4	30.3	29.7	30.6	30.6	31.4	31.0	31.0
1993	30.1	29.5	29.5	30.0	30.2	30.3	30.1	30.8	30.9	31.5	31.4	31.2
1994	30.1	29.8	29.5	29.8	29.9	30.2	29.7	30.0	30.9	31.3	31.1	31.1
1995	30.4	29.7	30.0	30.1	30.1	30.5	30.0	30.8	31.4	31.9	31.4	31.2
1996	30.3	30.1	29.8	30.0	30.1	30.7	30.2	30.7	30.8	31.5	31.2	31.1
1997	29.7	29.8	29.7	30.0	30.0	30.6	30.4	30.9	31.5	32.4	32.1	31.7
1998	31.1	31.2	30.7	31.0	31.5	31.5	31.4	31.8	32.2	32.4	31.9	31.4
1999	30.5	30.6	29.9	30.0	30.0	30.6	30.4	31.2	31.5	31.9	31.7	31.1
2000	30.2	29.7	29.8	29.8	30.3	30.6	30.2	30.6	30.7	31.6	31.7	31.2
2001	30.2	29.7	30.0	30.2	30.6	30.4	30.4	30.9	31.5	31.9	31.8	32.1
2002	30.4	30.6	30.3	30.5	30.8	30.6	30.8	31.1	31.4	31.9	31.9	31.7
2003	31.3	30.1	30.2	30.8	30.7	31.1	30.5	31.4	31.8	32.4	32.1	31.9
2004	30.9	30.0	30.3	30.7	31.0	30.9	30.4	31.0	31.5	32.3	32.2	32.1
2005	31.7	30.9	30.8	31.0	31.0	31.5	31.1	31.7	32.0	32.9	32.8	31.4
2006	31.2	30.5	30.5	30.3	30.6	30.8	30.8	31.1	31.9	32.4	31.7	31.6
2007	31.6	30.0	30.3	30.4	30.7	31.0	31.1	31.3	32.0	32.3	32.4	31.7
2008	30.3	29.9	29.7	30.2	30.1	30.3	30.6	31.6	32.1	32.8	32.5	31.8
2009	30.8	29.8	30.0	30.2	30.2	31.0	30.8	31.3	31.8	32.1	32.4	31.5
2010	31.0	31.1	30.3	31.1	31.1	30.3	31.2	31.6	32.4	33.1	32.4	31.8
2011	30.5	29.9	30.3	30.6	31.0	31.2	30.6	31.2	32.0	32.2	31.6	31.9
2012	30.6	29.6	30.2	30.8	30.5	30.4	31.2	31.4	32.1	32.9	32.4	31.8
2013	31.4	30.5	31.2	30.9	30.8	31.3	31.0	31.3	31.8	32.2	31.7	31.5
2014	30.5	30.1	30.5	30.7	30.6	30.9	30.5	31.0	31.5	32.1	32.4	32.0
2015	31.0	30.3	30.2	30.8	30.8	31.1	30.7	32.0	32.6	32.8	33.4	32.1
2016	31.4	30.7	31.1	30.2	31.4	31.1	31.0	31.7	32.6	32.9	33.1	32.0
2017	30.9	30.2	30.4	30.5	30.9	31.5	31.2	31.5	32.3	32.2	32.6	32.0
2018	30.9	29.9	30.9	30.6	30.3	31.2	31.3	31.6	32.4	32.8	32.5	31.4

APÊNDICE D – Valores mensais de TMAX INMET (1974-2018)

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1974	29.7	29.8	28.8	29.2	30.4	30.8	31.3	31.6	31.7	31.9	32.2	31.0
1975	30.5	29.4	30.3	29.8	30.1	31.0	30.9	31.6	31.5	31.6	31.6	31.6
1976	30.5	29.8	30.1	30.6	31.3	31.1	31.1	31.6	31.8	32.4	32.7	32.2
1977	30.4	30.1	30.3	30.5	31.4	31.5	31.6	31.8	31.7	32.0	32.4	32.1
1978	30.6	31.1	30.2	31.0	31.6	31.5	31.6	31.8	31.8	31.8	31.8	31.5
1979	30.7	30.8	31.3	31.1	31.7	31.4	31.6	32.1	32.1	31.9	32.3	32.0
1980	30.8	28.7	30.4	31.1	32.2	31.8	31.9	31.9	32.1	32.3	32.4	32.2
1981	31.3	31.5	31.6	32.5	31.3	31.6	31.4	31.8	32.0	32.5	32.7	32.3
1982	30.4	30.4	31.0	31.2	32.0	32.0	31.7	31.8	31.9	32.0	32.5	32.4
1983	32.0	31.0	31.3	32.2	32.3	32.2	31.8	31.6	32.1	32.1	32.7	32.1
1984	30.8	30.5	30.1	30.1	30.5	31.6	31.5	31.8	32.0	32.0	32.2	32.3
1985	29.5	30.5	29.3	29.5	30.5	30.9	31.3	31.7	32.0	32.1	31.9	30.3
1986	30.7	30.1	29.4	29.4	31.1	31.0	31.2	32.1	31.8	32.2	31.8	31.6
1987	30.7	30.9	30.2	31.6	32.2	31.9	32.0	32.2	32.5	32.7	33.2	32.7
1988	31.2	31.0	30.5	30.4	31.3	31.7	31.9	32.8	32.2	32.0	31.9	31.3
1989	30.8	30.5	30.2	30.4	30.9	31.5	31.9	32.3	32.3	32.0	32.5	30.6
1990	31.6	30.4	31.4	32.3	32.2	32.1	31.5	31.7	32.1	32.3	31.8	31.5
1991	29.7	30.1	29.4	30.8	31.3	31.7	31.5	31.7	32.7	31.7	32.0	32.1
1992	30.6	29.9	30.1	31.0	31.9	31.3	31.0	31.1	31.8	32.0	32.0	32.1
1993	30.9	29.7	30.2	30.6	31.4	31.6	31.5	31.4	31.7	31.8	31.1	31.2
1994	30.0	30.2	30.2	30.6	31.0	31.4	31.2	31.8	32.3	32.0	31.9	31.6
1995	30.8	29.7	30.7	30.6	30.8	31.9	31.7	33.1	33.2	32.8	32.4	31.9
1996	30.7	30.9	30.1	30.4	31.5	32.0	31.9	32.1	32.3	32.4	32.3	32.1
1997	30.5	31.3	30.8	30.8	31.6	32.0	32.0	32.3	32.8	33.7	33.0	32.4
1998	31.6	32.9	31.8	33.1	33.4	32.6	32.5	33.0	33.1	33.5	33.0	32.7
1999	31.8	31.0	31.0	31.5	31.1	32.3	32.7	33.1	32.6	32.6	33.0	32.4
2000	31.8	30.7	31.0	31.3	31.9	31.9	32.0	32.5	32.5	32.6	33.2	31.9
2001	30.9	30.4	30.8	31.3	32.6	32.3	32.4	32.7	33.0	33.4	33.3	33.5
2002	31.6	31.6	31.6	31.4	32.3	32.2	32.3	33.0	33.4	32.7	32.9	32.2
2003	32.0	31.1	31.0	32.0	32.6	32.9	32.8	33.3	33.3	33.0	33.4	32.7
2004	31.4	30.4	30.9	32.4	33.1	32.3	32.1	32.8	33.2	33.3	33.3	33.0
2005	32.8	32.4	32.2	32.3	32.4	33.0	33.4	34.0	33.8	33.7	33.7	32.5
2006	32.4	31.9	31.8	31.7	31.7	32.1	32.6	32.9	33.2	33.2	32.7	32.0
2007	32.0	29.7	30.3	30.8	31.8	32.0	32.0	32.2	32.7	32.2	32.3	31.6
2008	29.8	30.3	30.0	30.5	31.5	31.5	32.6	33.5	33.4	33.4	33.3	32.7
2009	31.3	30.0	30.2	30.2	30.1	31.6	32.7	33.8	33.7	33.7	34.1	32.5
2010	31.2	31.9	32.9	31.6	32.6	32.7	33.0	33.5	33.6	33.2	33.8	32.9
2011	31.3	31.0	31.4	31.8	33.5	33.1	33.0	33.9	33.8	33.3	33.0	32.7
2012	31.4	30.4	30.9	32.0	32.5	32.3	32.4	32.7	32.9	33.1	33.3	33.1
2013	32.4	31.9	31.8	32.7	33.0	33.4	32.7	33.3	33.3	33.2	32.8	32.6
2014	31.6	31.0	31.3	31.6	31.8	32.6	32.6	33.0	33.0	33.2	34.6	34.1
2015	32.7	32.3	31.8	31.8	32.7	33.0	32.8	33.5	33.9	34.5	34.2	33.1
2016	31.9	32.2	32.0	32.9	33.2	33.1	33.3	33.8	33.6	34.0	34.1	32.5
2017	31.5	31.2	30.9	31.7	33.4	33.7	33.9	34.3	34.5	33.6	34.1	33.3
2018	32.5	30.8	32.7	32.1	32.8	33.6	33.6	33.5	34.0	34.1	34.0	32.0

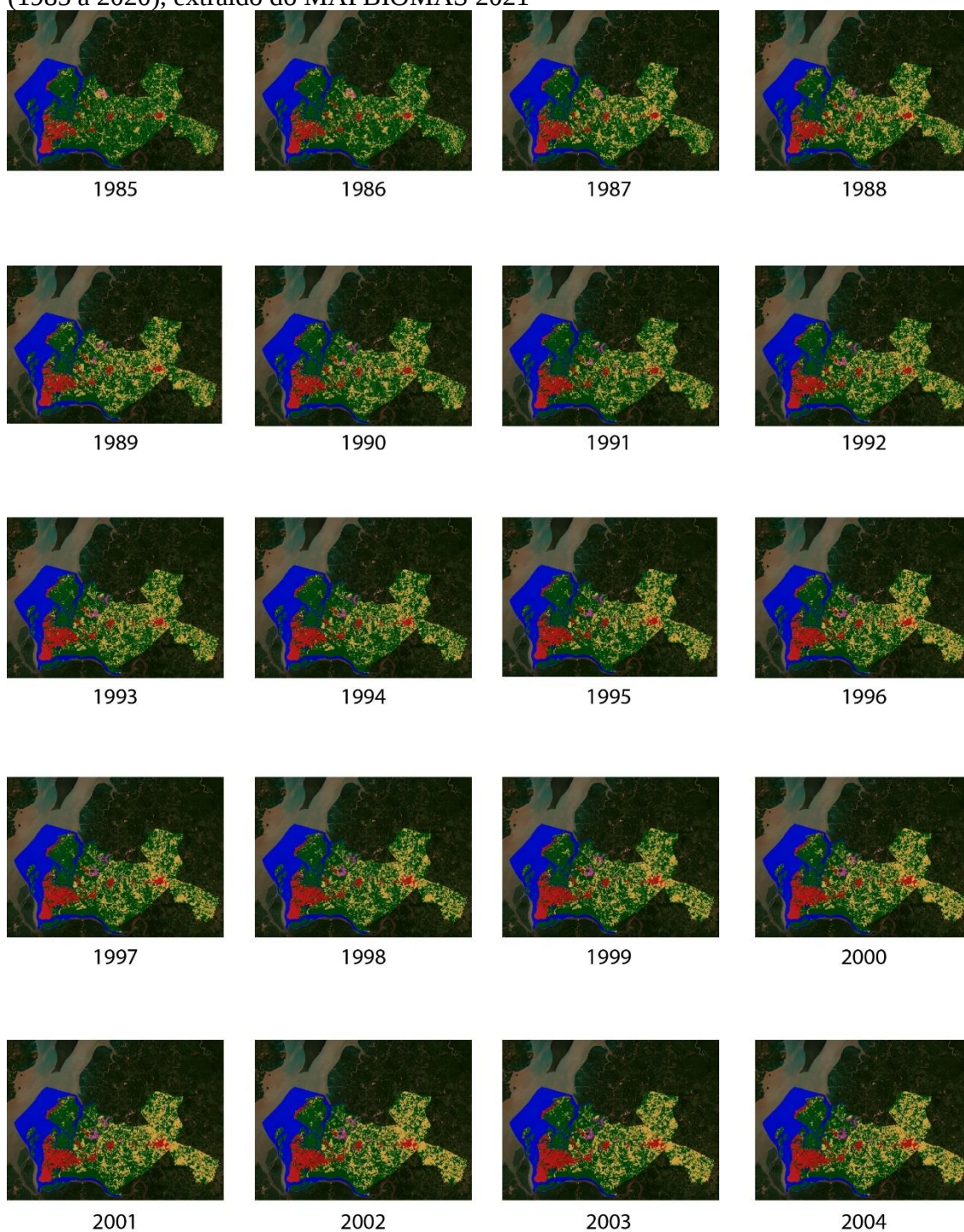
APÊNDICE E – Valores mensais de TMIN WORLDCLIM (1974-2018)

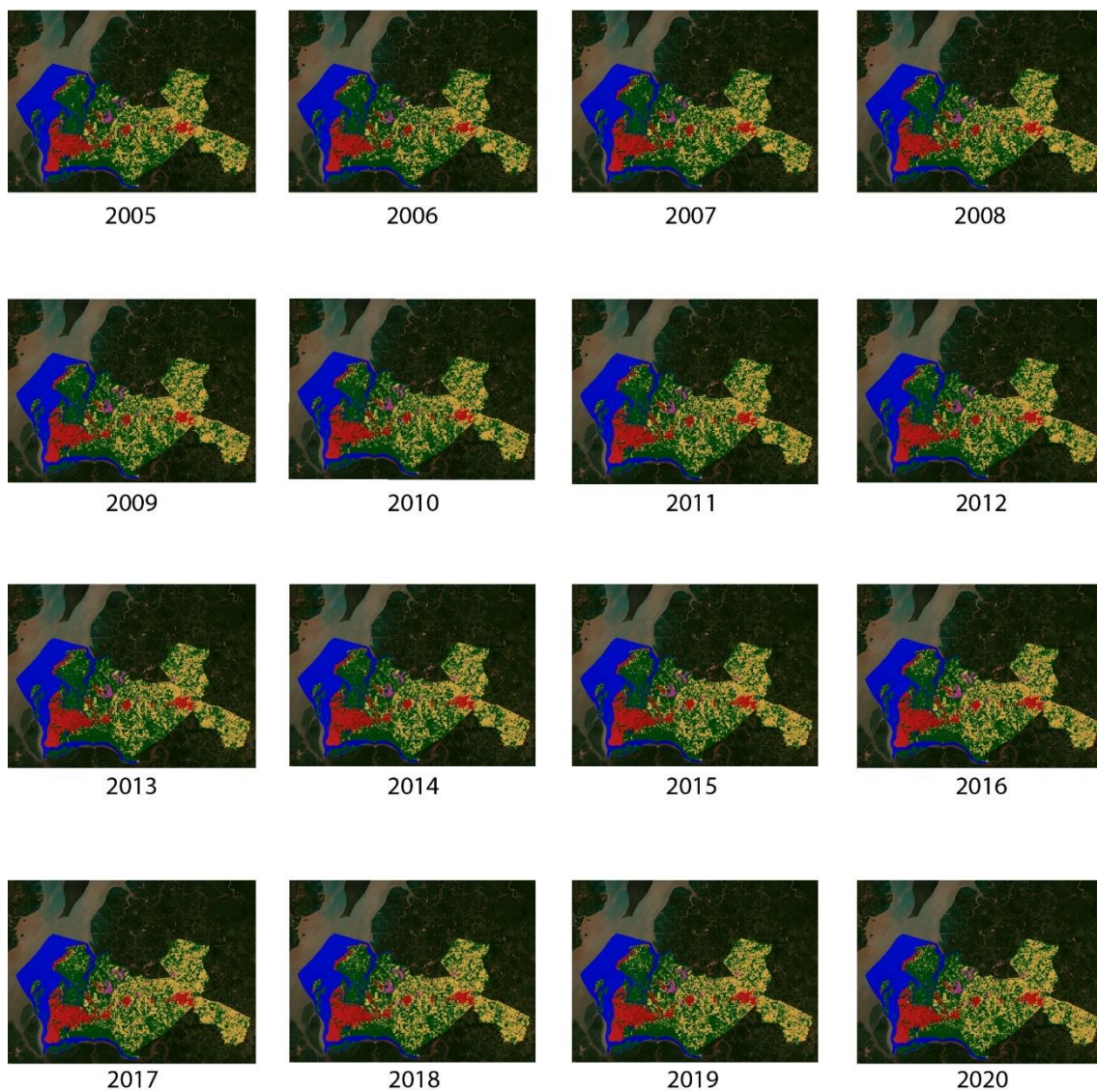
	Jan	Fev	Mar	Apr	Mar	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dec
1974	22.2	22.1	21.6	22.0	22.0	21.9	21.6	22.1	22.2	22.9	22.5	21.9
1975	21.8	21.9	21.7	22.4	22.2	22.1	21.6	21.9	22.2	22.5	22.9	22.8
1976	22.0	22.0	22.2	22.5	22.2	22.1	22.0	23.4	22.8	22.6	23.0	23.2
1977	22.5	21.9	22.3	22.4	22.7	22.7	22.9	22.4	23.0	23.1	23.8	23.0
1978	22.6	23.1	22.6	22.5	22.5	22.4	22.6	22.3	22.4	22.8	22.9	22.8
1979	22.8	22.6	22.7	22.7	22.8	22.5	22.3	22.9	22.4	23.0	23.6	23.1
1980	22.8	21.8	22.4	22.7	23.2	23.3	23.5	23.5	23.5	23.6	22.9	22.9
1981	22.1	22.3	22.2	22.0	22.3	22.3	22.5	22.7	22.4	22.6	23.0	23.1
1982	22.5	22.6	22.5	22.5	22.6	22.8	22.7	22.7	22.7	23.6	23.3	23.5
1983	23.6	23.1	23.1	23.2	23.6	23.3	23.3	23.1	23.4	22.9	23.4	23.4
1984	22.1	22.3	22.2	22.0	22.3	22.3	22.5	22.7	22.4	22.6	23.0	23.1
1985	22.1	22.0	22.3	22.0	22.4	22.9	22.8	22.3	23.4	22.8	22.4	22.5
1986	22.5	22.2	22.1	22.3	23.1	22.7	22.9	23.2	23.3	22.8	23.0	23.1
1987	23.3	23.0	22.7	23.4	23.4	23.7	23.5	23.5	23.6	23.8	24.0	24.1
1988	23.2	22.9	22.7	23.0	22.9	24.1	23.1	23.0	23.2	22.8	22.5	22.5
1989	22.5	22.6	22.6	22.3	22.4	22.8	22.8	23.0	23.0	23.0	23.1	22.7
1990	23.0	22.5	22.8	23.0	23.1	23.3	23.1	23.3	23.1	23.3	23.5	23.5
1991	22.8	23.1	22.7	22.8	23.0	23.3	22.8	23.0	23.3	22.8	23.3	23.5
1992	23.1	22.4	22.7	22.9	23.3	23.0	22.7	23.4	22.8	23.3	23.0	23.1
1993	22.7	22.3	22.3	22.7	23.1	23.1	23.1	23.5	23.1	23.4	23.4	23.4
1994	22.7	22.7	22.3	22.5	22.8	22.8	22.6	22.8	23.2	23.1	23.0	23.3
1995	22.9	23.0	22.8	22.7	22.9	23.1	23.0	23.6	23.7	23.7	23.3	23.3
1996	22.8	22.9	22.6	22.6	23.0	23.4	23.2	23.4	23.0	23.3	23.1	23.2
1997	22.3	22.6	22.5	22.6	22.9	23.2	23.3	23.7	23.7	24.2	24.1	23.9
1998	23.7	24.1	23.5	23.7	24.4	24.2	24.3	24.5	24.4	24.2	23.8	23.5
1999	23.1	23.4	23.1	22.7	22.8	23.3	23.4	23.9	23.7	23.7	23.6	23.2
2000	22.8	22.5	22.6	22.5	23.1	23.3	23.2	23.4	22.9	23.5	23.7	23.3
2001	22.7	22.6	22.8	22.7	23.4	23.0	23.4	23.7	23.7	23.8	23.8	24.2
2002	22.9	23.5	23.1	23.1	23.6	23.4	23.8	23.9	23.6	23.8	23.9	23.8
2003	23.9	23.0	23.0	23.4	23.6	23.8	23.5	24.1	24.0	24.3	24.0	24.0
2004	23.4	22.9	23.1	23.3	23.8	23.5	23.3	23.7	23.7	24.1	24.1	24.3
2005	24.3	23.8	23.6	23.7	23.8	24.2	24.1	24.5	24.3	24.7	24.8	23.5
2006	23.8	23.4	23.3	22.9	23.4	23.5	23.8	23.9	24.1	24.3	23.7	23.7
2007	24.4	22.8	23.1	23.1	23.6	23.8	24.0	24.1	24.2	24.2	24.3	23.8
2008	22.9	22.7	22.5	22.8	22.8	22.9	23.6	24.4	24.3	24.7	24.5	24.0
2009	23.4	22.6	22.8	22.7	23.0	23.6	23.7	24.1	24.0	23.9	24.3	23.6
2010	23.5	24.0	23.0	23.7	24.0	23.0	24.2	24.4	24.6	24.5	24.4	23.9
2011	23.1	22.7	23.1	23.2	23.9	23.9	23.6	24.0	24.2	24.1	23.5	24.0
2012	23.3	22.5	23.0	23.5	23.4	23.2	24.2	24.2	24.3	24.7	24.3	23.9
2013	24.1	23.4	23.8	23.5	23.6	24.0	24.0	24.1	24.1	24.0	23.6	23.6
2014	23.1	23.0	23.3	23.3	23.4	23.6	23.5	23.8	23.7	23.9	24.2	24.1
2015	23.6	23.1	23.0	23.5	23.7	23.8	23.7	24.7	24.8	24.6	25.3	24.2
2016	24.0	23.6	23.9	22.9	24.3	23.9	23.9	24.4	24.8	24.7	25.1	24.1
2017	23.5	23.0	23.1	23.2	23.8	24.3	24.2	24.2	24.5	24.1	24.6	24.1
2018	23.6	22.7	23.6	23.4	23.2	24.0	24.2	24.4	24.6	24.6	24.4	23.5

APÊNDICE F – Valores mensais de TMIN INMET (1974-2018)

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1974	22.0	22.3	22.6	22.9	22.7	22.1	21.2	21.5	21.8	21.6	21.6	21.9
1975	21.8	22.2	22.0	22.8	22.5	21.8	20.8	20.9	20.9	20.5	20.8	21.5
1976	20.9	21.2	22.1	22.3	22.0	21.1	20.6	21.0	20.7	20.8	20.3	20.3
1977	20.5	20.1	20.4	20.9	21.2	21.3	21.7	21.5	22.3	22.4	21.9	22.0
1978	22.6	23.3	22.8	22.6	23.0	22.3	21.9	21.8	21.7	21.7	22.2	22.8
1979	22.8	22.8	22.7	23.1	23.1	22.7	22.2	22.4	22.3	22.5	22.3	22.5
1980	22.5	22.5	22.3	22.9	22.9	22.7	22.1	22.0	22.2	21.9	22.1	21.9
1981	22.3	22.3	22.6	23.1	23.0	22.5	21.8	22.1	21.8	21.7	22.3	22.4
1982	22.2	22.6	22.4	22.6	22.4	21.9	21.8	21.5	21.5	21.3	21.7	22.0
1983	22.6	22.6	22.9	23.0	22.9	22.3	21.6	21.7	21.4	21.2	21.1	21.5
1984	21.1	21.5	22.0	22.0	22.0	21.5	21.3	21.1	20.9	21.1	21.7	21.9
1985	22.1	22.1	22.5	22.0	22.1	21.6	21.0	21.4	21.3	21.4	21.9	22.1
1986	21.7	21.7	22.0	22.3	22.1	21.7	21.3	21.5	22.3	22.1	22.3	22.3
1987	22.7	22.9	23.1	23.2	23.0	22.9	22.7	22.8	22.5	22.4	22.5	22.8
1988	22.8	23.3	23.2	23.4	23.4	22.7	22.4	22.5	22.5	22.5	22.5	22.4
1989	22.2	22.4	22.5	22.8	22.4	22.4	21.9	22.1	21.9	22.1	22.7	22.8
1990	22.8	22.8	22.9	23.4	23.0	22.8	22.3	22.3	22.2	22.5	22.6	23.0
1991	22.5	23.1	22.9	22.9	23.0	23.3	22.6	22.1	22.0	21.7	22.2	22.2
1992	22.8	22.5	23.2	23.2	23.2	22.6	21.9	22.1	21.9	21.7	22.0	22.6
1993	22.5	22.6	22.6	23.0	23.1	22.7	22.0	22.2	22.2	22.8	23.8	23.5
1994	23.5	23.3	23.2	23.4	23.3	22.9	22.5	22.5	22.9	22.6	22.8	22.8
1995	22.9	23.0	23.2	23.8	23.2	23.7	22.9	23.2	23.0	22.8	23.5	23.3
1996	23.1	23.2	23.5	23.6	23.6	23.5	22.9	23.2	23.0	22.9	23.1	23.1
1997	22.5	22.3	23.1	23.1	23.3	23.2	22.6	22.8	22.3	22.9	23.2	23.2
1998	23.8	24.3	24.2	24.5	24.2	23.5	23.2	23.2	23.2	23.0	23.4	22.9
1999	23.0	22.9	23.0	23.2	23.2	23.1	22.5	22.8	22.8	22.7	22.9	23.0
2000	22.9	22.8	22.9	23.2	23.1	22.7	22.5	22.4	22.4	22.4	22.6	22.4
2001	22.5	22.4	22.7	23.1	23.0	22.5	22.3	22.4	22.5	22.4	22.8	23.3
2002	22.9	23.2	23.1	23.3	23.2	22.7	22.5	22.6	22.3	22.1	22.4	23.2
2003	23.0	22.9	23.1	23.3	23.1	23.0	22.6	22.7	22.6	22.8	23.0	22.7
2004	23.4	22.7	23.1	23.2	23.4	22.4	22.4	22.4	22.7	22.5	22.5	22.8
2005	23.2	23.4	23.4	23.2	23.2	23.1	22.7	22.9	22.5	22.7	23.0	23.0
2006	23.1	23.1	23.0	23.2	23.3	23.3	23.2	23.0	23.3	23.0	23.2	23.0
2007	23.6	23.1	23.1	23.3	23.5	23.0	23.0	23.1	23.0	22.7	23.1	23.0
2008	22.6	22.7	23.1	23.1	23.4	23.1	23.1	23.3	23.2	23.2	23.3	23.6
2009	23.1	22.9	23.1	23.2	23.1	23.2	23.1	23.4	23.1	22.9	23.3	23.6
2010	23.2	23.8	24.2	23.9	24.1	23.8	23.9	24.1	24.2	23.6	24.0	23.8
2011	23.0	23.2	23.2	23.5	24.3	23.4	23.2	23.3	24.0	23.5	23.7	23.3
2012	23.0	22.7	22.9	23.2	22.4	22.1	22.3	22.2	22.1	23.1	23.0	23.0
2013	23.3	23.2	23.4	23.1	22.8	22.6	22.0	23.1	23.1	23.2	23.4	23.3
2014	23.2	23.6	23.7	23.6	23.3	23.1	22.8	22.8	22.4	22.6	22.6	22.2
2015	22.0	22.1	22.6	23.8	23.7	23.5	23.4	23.7	23.4	23.9	23.6	23.6
2016	24.5	24.3	24.5	24.7	24.2	23.5	23.6	23.8	23.8	23.8	24.0	23.7
2017	23.4	23.4	23.3	23.6	23.8	23.7	23.1	23.4	23.9	23.6	23.2	23.7
2018	23.1	23.7	23.6	23.4	23.5	23.5	23.3	22.9	22.9	22.9	23.3	22.8

APÊNDICE G – Mapas de uso e cobertura da terra da Região Metropolitana de Belém (1985 a 2020), extraído do MAPBIOMAS 2021





Fonte: MAPBIOMAS, com processamento dos Autores.