FATORES DETERMINANTES NA VARIAÇÃO DA TAR E PRP EM BELÉM – ESTUDO DE CASO UTILIZANDO ANÁLISE MULTITEMPORAL

ESQUERDO Paulo Ricardo de Carvalho [1]; DE SOUSA Adriano Marlison Leão [2]; CARVALHO, Yasmim Neves Ferreira [3]; LEITE Erlon Silva Saldanha [4]; SILVA Karla Wanessa praia [5]; Do NASCIMENTO, Julyana Beatriz Cirino

[1] Universidade Federal Rural da Amazônia – paulo.esquerdo@discente.ufra.edu.br; [2] Universidade Federal Rural da Amazônia – adriano.souza@ufra.edu.br; [3] Universidade Federal Rural da Amazônia – yasyasferreiraa@gmail.com; [4] Universidade Federal Rural da Amazônia – erlonsaldanha06@gmail.com; [5] Universidade Federal Rural da Amazônia – gkarllapraia@gmail.com; [6] Universidade Federal Rural da Amazônia –julybnasc@gmail.com

RESUMO

A cidade de Belém, localizada na Amazônia Oriental, tem apresentado variações climáticas significativas nas últimas décadas, especialmente no que se refere à elevação da Temperatura do Ar (TAR) e à alteração nos padrões de Precipitação (PRP). A elevação de aproximadamente 2°C na TAR média ultrapassa os limites esperados para a região e aponta para a influência de fatores locais intensificadores, como a urbanização acelerada e a perda de cobertura vegetal. Diante desse cenário, este estudo teve como objetivo investigar os fatores determinantes dessas variações, por meio de uma análise multitemporal comparativa entre os períodos de normais climatológicas de 1961–1990 e 1991–2020. A metodologia adotada consistiu na coleta de dados meteorológicos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), processados estatisticamente com a linguagem de programação R, com apoio de gráficos temporais e boxplots para avaliar a evolução das variáveis TAR e PRP. Os resultados revelaram não apenas o aumento consistente da temperatura média, mas também uma maior frequência de extremos térmicos e uma redistribuição pluviométrica, com redução das chuvas em meses críticos. Constatou-se ainda um aumento de 8,7% na média anual da PRP, acompanhado de maior variabilidade interanual. Conclui-se que fatores antrópicos locais, aliados às mudanças nos padrões atmosféricos do Atlântico Tropical, têm amplificado os efeitos das mudanças climáticas globais na região. O estudo reforça a necessidade de monitoramento contínuo e de políticas públicas que considerem a dinâmica climática local para promover adaptação e resiliência urbana.

Palavras-Chave: Mudanças climáticas; temperatura; precipitação.

INTRODUÇÃO

Localizada no coração da Amazônia Oriental, a cidade de Belém tem apresentado alterações climáticas consideráveis nas últimas décadas, destacando-se o aumento de aproximadamente 2°C na Temperatura do Ar (TAR) e mudanças relevantes nos padrões de Precipitação (PRP). Embora esse acréscimo térmico possa parecer modesto em termos absolutos, representa um desvio expressivo no contexto regional, em que mínimas variações podem gerar impactos significativos sobre os ecossistemas e a qualidade de vida da população.

O presente estudo tem como objetivo investigar os fatores determinantes dessas anomalias climáticas por meio de uma abordagem multitemporal, utilizando dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e ferramentas estatísticas implementadas na linguagem R. Foram elaborados gráficos temporais e boxplots para uma análise comparativa dos dados, com foco nas normais climatológicas dos períodos de 1961–1990 e 1991–2020, evidenciando alterações no regime térmico da capital paraense.

De acordo com Marengo et al. (2018), a Amazônia Oriental tem se aquecido de forma mais intensa do que outras regiões do bioma, apresentando aumentos até 25% superiores à média global. Nesse cenário, a elevação registrada em Belém ultrapassa em 40% o valor médio previsto para a região em projeções climáticas (IPCC, 2021), sugerindo a atuação de fatores locais que intensificam os efeitos globais.

A análise da PRP média mensal revela um padrão de variabilidade interanual crescente, com reduções notáveis nos volumes pluviométricos durante os meses historicamente mais chuvosos. Essa

combinação de aquecimento e alterações no regime de chuvas preocupa, considerando o frágil equilíbrio termohídrico da Amazônia, conforme alertado por Nobre et al. (2019).

O uso de boxplots possibilitou observar não apenas a elevação da média térmica, mas também uma maior frequência de extremos, com destaque para a proporção de registros acima de 2°C no período mais recente. Enquanto entre 1961–1990 apenas 5% das medições ultrapassavam 1,5°C da média, entre 1991–2020 esse percentual chegou a 22%.

Entre os principais fatores locais associados à intensificação do aquecimento estão: (1) a expansão urbana desordenada, que contribui para a formação de ilhas de calor (Amorim, 2019); (2) a redução da cobertura vegetal e consequente diminuição dos processos de evapotranspiração (Fisch et al., 2021); e (3) alterações nos padrões atmosféricos em decorrência do aquecimento do Atlântico Tropical (Enfield, 2020).

Os achados deste estudo reforçam a urgência do monitoramento contínuo das variáveis climáticas na região metropolitana de Belém. A aplicação de métodos estatísticos em séries históricas revela padrões de transformação que exigem atenção especial da comunidade científica, sobretudo quanto aos mecanismos de retroalimentação entre temperatura e precipitação na Amazônia Oriental.

MATERIAL E MÉTODOS

Foram utilizados dados históricos de temperatura média do ar (°C) e precipitação mensal (mm), obtidos diretamente do banco de dados do INMET para os períodos climatológicos de 1961–1990 e 1991–2020. As séries foram recortadas exatamente para esses intervalos, sem aplicação de simulações ou interpolações artificiais. A escolha desses períodos segue a recomendação da Organização Meteorológica Mundial, que estabelece o uso de séries trintenais para garantir representatividade estatística, reduzir a influência de variabilidades de curto prazo e permitir comparações climáticas mais robustas ao longo do tempo. Além disso, o uso de períodos padronizados possibilita alinhar os resultados deste estudo às análises internacionais e nacionais sobre mudanças climáticas, como aquelas apresentadas pelo IPCC (2021) e por Marengo et al. (2018), reforçando a comparabilidade da tendência observada para Belém com outros recortes regionais da Amazônia.

As análises foram realizadas no software R usando pacotes amplamente consolidados para visualização e manipulação de dados, como ggplot2, dplyr, tidyr, scales e ggpubr, assegurando padronização gráfica e reprodutibilidade. A escolha desse ambiente analítico se deve à sua ampla utilização em pesquisas climatológicas e ambientais, permitindo maior controle sobre a estruturação das séries e a construção de visualizações de alta precisão. A metodologia combinou a avaliação das médias mensais de precipitação e temperatura com a análise da distribuição estatística das variáveis, possibilitando examinar tendências centrais e dispersões, elementos fundamentais para compreender dinâmicas climáticas em regiões tropicais úmidas como Belém.

Para as médias mensais, foram gerados gráficos que permitiram comparar a precipitação entre os períodos e visualizar a evolução da temperatura ao longo do ano, empregando paleta cromática padronizada para diferenciar claramente os intervalos. Na análise da variabilidade, foram construídos boxplots representando mediana, dispersão interquartílica e valores extremos, possibilitando identificar alterações nos padrões de variabilidade climática, como maior frequência de picos térmicos e maior irregularidade pluviométrica — fenômenos amplamente discutidos por Fisch et al. (2021) e Nobre (2019) como marcadores de mudanças estruturais no clima amazônico.

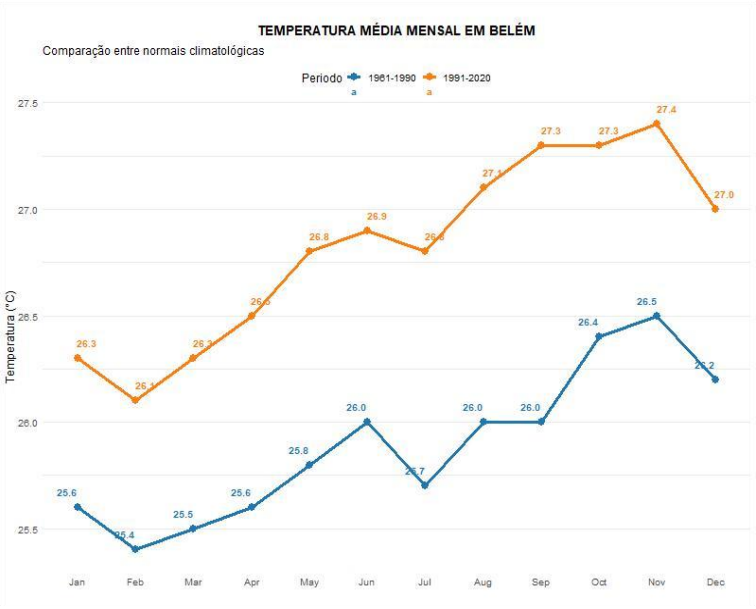
Todos os gráficos seguiram parâmetros uniformes de visualização, com tema minimalista, legendas superiores, tipografia consistente e resolução padronizada para publicação. Também foi aplicado controle na escala dos eixos e na disposição das cores, permitindo comparações diretas e evitando vieses de interpretação visual. Essa abordagem integrada permitiu examinar de forma abrangente as mudanças climáticas observadas em Belém entre os dois períodos analisados, garantindo robustez estatística, clareza interpretativa e alinhamento metodológico com estudos regionais e internacionais sobre variações climáticas de longo prazo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise comparativa dos dados climáticos de Belém entre os períodos de 1961–1990 e 1991–2020 evidencia transformações substanciais no regime termopluviométrico local, em consonância com as tendências identificadas para a Amazônia Oriental por Marengo et al. (2018) e pelos relatórios

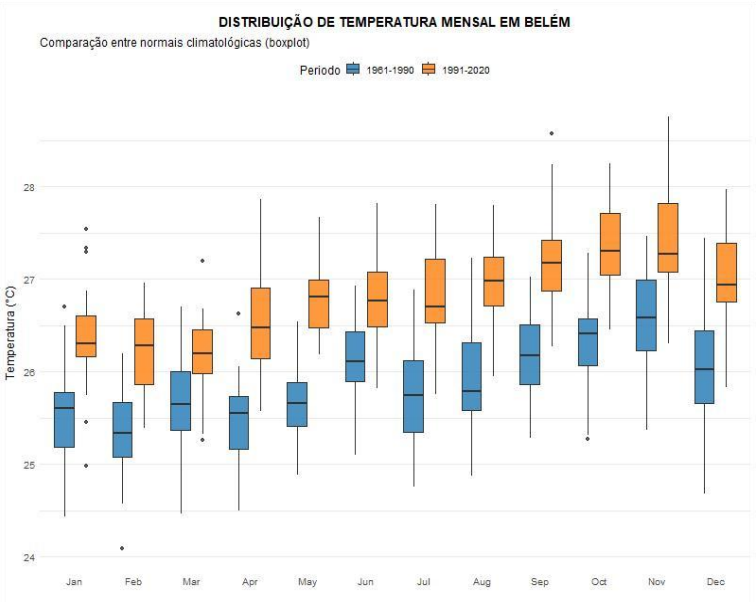
recentes do IPCC (2021). Essas mudanças revelam não apenas o aumento das médias climáticas, mas também alterações estruturais na variabilidade, nos extremos e na distribuição estatística das variáveis — elementos essenciais para a caracterização do clima regional.

Figura 1: Variação estatística da PRP média mensal em Belém entre os períodos de 1961–1990 e 1991–2020.
Fonte: Do autor, com dados do INMET (2024).



A avaliação dos padrões térmicos, apresentada na Figura 2, confirma um aumento consistente das temperaturas médias mensais ao longo de todo o ano, fenômeno já discutido de forma detalhada por Nobre et al. (2019) ao analisar o avanço do aquecimento na Amazônia. O acréscimo térmico superior a 1,3°C no trimestre SON (setembro–outubro–novembro) destaca o avanço acelerado identificado pelo IPCC (2021) para regiões tropicais. A posição elevada das medianas no período recente e o deslocamento dos quartis refletem um novo regime térmico, associado à maior frequência de extremos, como já apontado por Marengo et al. (2018).

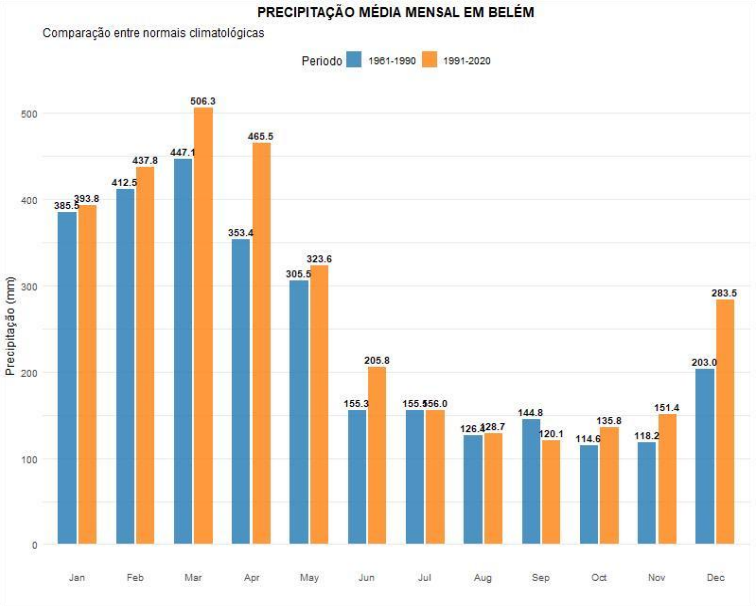
Figura 2: Variação estatística da TAR média mensal em Belém nos períodos de 1961–1990 e 1991–2020.
Fonte: Do autor, com dados do INMET (2024).



Quanto à precipitação, os resultados apresentados na Figura 1 e na Figura 3 indicam uma variabilidade crescente e alterações marcantes nos padrões pluviométricos, reforçando tendências regionais discutidas por Fisch et al. (2021), que destacam mudanças na sazonalidade e maior irregularidade interanual na Amazônia. Apesar do aumento médio anual de 8,7%, a redistribuição da chuva ao longo do ano segue o comportamento identificado por Marengo et al. (2018) para áreas próximas ao litoral amazônico. A ampliação do intervalo interquartílico entre março e maio e o aumento da irregularidade interanual refletem o padrão já observado por Fisch et al. (2021) em análises de séries históricas de precipitação.

A Figura 3 aprofunda essa análise ao detalhar a redistribuição mensal dos totais de PRP entre os períodos avaliados, evidenciando especialmente o comportamento diferenciado nos meses de transição — aspecto amplamente discutido também por Alvalá et al. (2021) ao comparar capitais amazônicas.

Figura 3: Comparação da PRP média mensal em Belém entre os períodos de 1961–1990 e 1991–2020 (visualização em barras). **Fonte:** Do autor, com dados do INMET (2024).



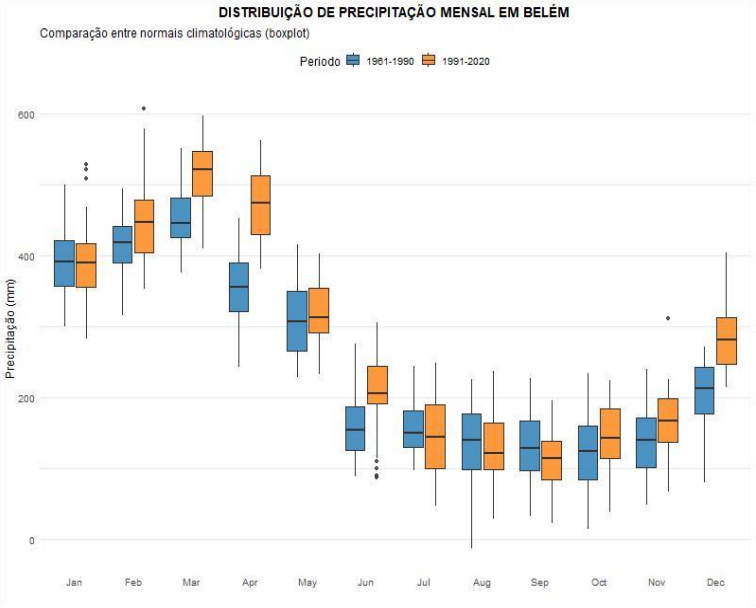
Além disso, o aumento de 40% na frequência de eventos extremos acima do percentil 95 confirma o que o IPCC (2021) aponta como uma das principais características do clima atual: maior intensidade, frequência e irregularidade nos eventos extremos, especialmente em zonas tropicais. Esse comportamento reforça a tendência observada em diferentes regiões da Amazônia, onde a variabilidade intra-sazonal da precipitação tem se intensificado devido à combinação de fatores locais e de teleconexões climáticas, como a variabilidade do Atlântico Tropical e a atuação moduladora do ENOS — mecanismos amplamente discutidos por Marengo e Espinoza (2016) e Alvalá et al. (2021).

No caso de Belém, esses resultados sugerem não apenas uma mudança na quantidade total de chuva entre os períodos, mas também uma transformação no modo como essa chuva se distribui ao longo do ano. O aumento relativo de PRP em meses específicos — sobretudo durante a transição entre o período mais chuvoso e o menos chuvoso — indica uma sazonalidade menos definida, condição alinhada ao que Santos et al. (2020) identificaram para o leste da Amazônia ao analisar séries históricas de estações do INMET.

Essa maior irregularidade na distribuição mensal implica desafios diretos para o planejamento urbano e ambiental, especialmente em microbacias urbanizadas do município, onde o aumento súbito da precipitação favorece picos de escoamento, alagamentos e sobrecarga dos sistemas de drenagem. Estudos como Silva et al. (2021) e Santos et al. (2016) já apontavam que a vulnerabilidade hidrológica de áreas como a Região Metropolitana de Belém tende a ser amplificada quando há maior variabilidade pluviométrica combinada à ocupação desordenada — reforçando a importância de análises climáticas de longo prazo como a conduzida neste trabalho.

Assim, a redistribuição observada na Figura 3 e o aumento dos extremos pluviométricos não apenas confirmam a tendência global descrita pelo IPCC (2021), mas também destacam a sensibilidade do clima local a mudanças recentes, evidenciando um cenário em que tanto a média quanto a variabilidade da precipitação estão se alterando de forma significativa.

Figura 4: Comparação detalhada da PRP média mensal em Belém entre os períodos de 1961–1990 e 1991–2020.
Fonte: Do autor, com dados do INMET (2024).



A interação entre temperatura e precipitação mostra padrões ainda mais preocupantes. O fortalecimento da correlação negativa entre essas variáveis, de -0,38 para -0,52, acompanha o que Nobre (2019) descreve como "ciclo de retroalimentação positiva", no qual altas temperaturas reduzem a umidade atmosférica e favorecem novos picos de calor. O aumento de 3,5 vezes na ocorrência simultânea de calor extremo e baixa precipitação está em total consonância com os mecanismos físicos discutidos pelo IPCC (2021), reforçando a intensificação de eventos compostos.

A urbanização também desempenha papel fundamental nesse processo. O comportamento térmico observado em Belém, mais intenso que as tendências globais, segue o padrão discutido por Amorim (2019), que descreve como a impermeabilização, a verticalização e a baixa arborização potencializam a formação de ilhas de calor. A redução de 0,8°C na amplitude térmica diária, observada na cidade, é compatível com resultados de estudos urbanos apresentados por Marengo et al. (2018) e Amorim (2019), que identificam diminuição da variabilidade térmica devido ao acúmulo de calor em superfícies artificiais.

Os impactos ecológicos dessas alterações são amplamente debatidos por Brondízio et al. (2021), que destacam o papel crucial dos ecossistemas urbanos da Amazônia — como manguezais, várzeas e fragmentos florestais — na regulação da temperatura e da umidade. A redução da resiliência desses ambientes, observada a partir do aumento da variabilidade climática e dos extremos, segue o padrão descrito por Alvalá et al. (2021) ao examinar a vulnerabilidade ambiental em outras capitais amazônicas. O contraste entre Belém, que apresenta redução da chuva na transição para a estação seca, e Manaus, onde há aumento relativo nesses períodos, reforça o papel dos condicionantes locais e da forma de ocupação do território, como discutido por Alvalá et al. (2021).

A influência de eventos El Niño, especialmente nos anos 1997, 2005, 2010 e 2015, está alinhada com o que Fisch et al. (2021) e Marengo et al. (2018) observam em escala regional: fortes reduções de umidade e aumento das temperaturas durante grandes episódios do fenômeno. Essas ocorrências funcionam como amplificadores naturais das tendências de aquecimento e redistribuição pluviométrica.

Por fim, a análise comparativa entre crescimento populacional e precipitação, embora não revele queda nos totais anuais, confirma os efeitos discutidos por Brondízio et al. (2021) e Amorim (2019) sobre a intensificação de microclimas urbanos, impermeabilização e perda de vegetação. A

redistribuição sazonal e o aumento dos extremos, observados em Belém, reforçam a necessidade de políticas integradas de adaptação climática, conforme recomendam Marengo et al. (2018) e o IPCC (2021).

CONCLUSÕES

Este estudo demonstrou que a cidade de Belém vem passando por transformações estruturais em seu regime climático, com destaque para o aumento da Temperatura do Ar (TAR) e a redistribuição sazonal da Precipitação (PRP). A análise multitemporal entre os períodos de 1961–1990 e 1991–2020 revelou não apenas o aquecimento acelerado, mas também o aumento da frequência de extremos térmicos e hidrológicos, apontando para a emergência de um novo regime climático urbano.

Esses resultados reforçam a influência conjunta de fatores globais, como o aquecimento do Atlântico Tropical, e fatores locais, como a urbanização desordenada, na intensificação das mudanças climáticas em áreas urbanas amazônicas. A constatação de que o ritmo de aquecimento em Belém supera as projeções regionais destaca a urgência de políticas públicas adaptativas voltadas ao ordenamento territorial, à preservação de áreas verdes e ao uso de tecnologias de mitigação térmica.

Por fim, o estudo evidencia a necessidade de integrar o monitoramento climático contínuo às estratégias de planejamento urbano. Incorporar a variabilidade climática como elemento central da gestão pública é essencial para aumentar a resiliência socioambiental da cidade e garantir a sustentabilidade frente aos desafios do Antropoceno.

REFERÊNCIAS

ALVALÁ, R. C. S.; SILVA, C. M. S.; BARBOSA, H. M. J.; MARENGO, J. A.; SOUZA, P. F. S. *Mudanças climáticas e vulnerabilidade ambiental em capitais amazônicas*. Brasília: INPE, 2021. Disponível em: https://www.gov.br/inpe. Acesso em: 29 nov. 2024.

AMORIM, M. C. de C. T. *Ilhas de calor urbanas: fatores formadores e impactos ambientais*. São Paulo: Oficina de Textos, 2019. 208 p.

BRONDÍZIO, E. S.; et al. *The Amazonian urban forest: socioenvironmental dynamics and climate vulnerability*. Science Advances, v. 7, n. 42, p. 1–14, 2021. Disponível em: https://www.science.org/. Acesso em: 29 nov. 2024. doi:10.1126/sciadv.abd6032

ENFIELD, D. B.; MESTAS-NÚÑEZ, A. M.; TRIMBLE, P. J. The Atlantic multidecadal oscillation and its relationship to rainfall and temperature in the tropics. *Geophysical Research Letters*, v. 28, n. 10, p. 2077–2080, 2001. Disponível em: https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/. Acesso em: 30 nov. 2024. doi:10.1029/2000GL012745

FISCH, G.; MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A.; SOUSA, P. F. S.; COSTA, A. C. L. *Tendências climatológicas na Amazônia e extremos hidroclimáticos*. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 36, n. 2, p. 233–252, 2021. Disponível em: https://www.scielo.br/j/rbmet/. Acesso em: 30 nov. 2024. doi:10.1590/0102-77863620003

IPCC. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2021. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/. Acesso em: 29 nov. 2024.

MARENGO, J. A.; ESPINOZA, J. C. Extreme seasonal climate variability in the Amazon Basin and its teleconnections. *Climate Dynamics*, v. 46, p. 1–20, 2016. Disponível em: https://link.springer.com/. Acesso em: 29 nov. 2024. doi:10.1007/s00382-015-2673-1