

## **Meio século de mudanças na temperatura do ar nas capitais da Amazônia Legal**

Half a century of air temperature changes in the capitals of the Legal Amazon

Medio siglo de cambios en la temperatura del aire en las capitales de la  
Amazonía Legal

Un demi-siècle de changements de température de l'air dans les capitales de  
l'Amazonie légale

**Data da submissão:** 29 de maio de 2025    **Data da aprovação:** 19 de setembro de 2025

*Cleber Assis dos Santos<sup>1</sup>  
Nilzele de Vilhena Gomes Jesus<sup>2</sup>  
Letícia Karyne da Silva Cardoso<sup>3</sup>*

---

### **Resumo**

O aumento das temperaturas impacta significativamente os centros urbanos da Amazônia. Este estudo teve como objetivo analisar a evolução temporal e as tendências de aquecimento da temperatura do ar nas capitais da Amazônia Legal no último meio século (1970-2024), com ênfase na identificação de tendências de aquecimento. Utilizaram-se dados de reanálise ERA5, aplicando os testes de Mann-Kendall, estimador de Sen e teste de Pettitt para identificar tendências e pontos de mudança. Todas as capitais apresentaram tendências de aquecimento estatisticamente significativas ( $Z_{MK}$  5,78 a 7,23,  $p < 0,0001$ ), com taxas de aumento anual variando de  $0,019^{\circ}\text{C}$  a  $0,032^{\circ}\text{C}$ . Pontos de mudança foram predominantemente identificados entre as décadas de 1990 e 2000. A comparação entre os períodos pré e pós-mudança revelou aumentos significativos de temperatura, com amplitudes entre  $0,52^{\circ}\text{C}$  (São Luís) e  $0,91^{\circ}\text{C}$  (Boa Vista), indicando aquecimento substancial e heterogeneidade espacial, com maior intensidade no norte da região e em zonas de transição. O estudo fornece evidências robustas do aquecimento persistente nas capitais amazônicas, contribuindo com dados cruciais para políticas de adaptação climática e planejamento urbano nesta região sensível.

**Palavras-chave:** Amazônia Legal; mudanças climáticas; aquecimento urbano.

### **Abstract**

Rising temperatures have a significant impact on urban centers in the Amazon. This study aimed to analyze the temporal evolution and warming trends of air temperature in the capitals of the Legal Amazon over the last half century (1970-2024), with an emphasis on identifying warming trends. ERA5 reanalysis data were

---

<sup>1</sup>Analista em Ciência e Tecnologia do Centro Gestor e Operacional do Sistema de Proteção da Amazônia - CENSIPAM. Doutor em Ciência do Sistema Terrestre pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE. E-mail: cleber.santos@sipam.gov.br.

<sup>2</sup>Analista em Ciência e Tecnologia do Centro Gestor e Operacional do Sistema de Proteção da Amazônia - CENSIPAM. Doutora em Meteorologia pela Universidade Federal de Campina Grande - UFCG. E-mail: nilzele.jesus@sipam.gov.br.

<sup>3</sup>Analista em Ciência e Tecnologia do Centro Gestor e Operacional do Sistema de Proteção da Amazônia - CENSIPAM. Mestre em Meteorologia pela Universidade Federal de Campina Grande - UFCG. E-mail: leticia.cardoso@sipam.gov.br

used, applying the Mann-Kendall test, Sen estimator, and Pettitt test to identify trends and change points. All capitals showed statistically significant warming trends ( $Z_{MK}$  5.78 to 7.23,  $p < 0.0001$ ), with annual increase rates ranging from  $0.019^{\circ}\text{C}$  to  $0.032^{\circ}\text{C}$ . Change points were predominantly identified between the 1990s and 2000s. Comparison between pre- and post-change periods revealed significant temperature increases, with amplitudes between  $0.52^{\circ}\text{C}$  (São Luís) and  $0.91^{\circ}\text{C}$  (Boa Vista), indicating substantial warming and spatial heterogeneity, with greater intensity in the north of the region and in transition zones. The study provides robust evidence of persistent warming in Amazonian capitals, contributing crucial data for climate adaptation policies and urban planning in this sensitive region.

**Keywords:** Legal Amazon; climate change; urban warming.

## Resumen

El aumento de las temperaturas impacta significativamente los centros urbanos de la Amazonía. Este estudio tuvo como objetivo analizar la evolución temporal y las tendencias de calentamiento de la temperatura del aire en las capitales de la Amazonía Legal en el último medio siglo (1970-2024), con énfasis en la identificación de tendencias de calentamiento. Se utilizaron datos de reanálisis ERA5, aplicando las pruebas de Mann-Kendall, el estimador de Sen y la prueba de Pettitt para identificar tendencias y puntos de cambio. Todas las capitales presentaron tendencias de calentamiento estadísticamente significativas ( $Z_{MK}$  5,78 a 7,23,  $p < 0,0001$ ), con tasas de aumento anual que varían entre  $0,019^{\circ}\text{C}$  y  $0,032^{\circ}\text{C}$ . Los puntos de cambio fueron predominantemente identificados entre las décadas de 1990 y 2000. La comparación entre los períodos pre y post-cambio reveló aumentos significativos de temperatura, con amplitudes entre  $0,52^{\circ}\text{C}$  (São Luís) y  $0,91^{\circ}\text{C}$  (Boa Vista), lo que indica un calentamiento sustancial y heterogeneidad espacial, con mayor intensidad en el norte de la región y en zonas de transición. El estudio proporciona pruebas sólidas del calentamiento persistente en las capitales amazónicas, contribuyendo con datos cruciales para políticas de adaptación climática y planificación urbana en esta región sensible.

**Palabras clave:** Amazonía Legal; cambio climático; calentamiento urbano.

## Résumé

L'augmentation des températures impacte de manière significative les centres urbains de l'Amazonie. Cette étude visait à analyser l'évolution temporelle et les tendances de réchauffement de la température de l'air dans les capitales de l'Amazonie légale au cours du dernier demi-siècle (1970-2024), en mettant l'accent sur l'identification des tendances de réchauffement. Des données de réanalyse ERA5 ont été utilisées, en appliquant les tests de Mann-Kendall, l'estimateur de Sen et le test de Pettitt pour identifier les tendances et les points de changement. Toutes les capitales ont montré des tendances de réchauffement statistiquement significatives ( $Z_{MK}$  5,78 à 7,23,  $p < 0,0001$ ), avec des taux d'augmentation annuels variant de  $0,019^{\circ}\text{C}$  à  $0,032^{\circ}\text{C}$ . Les points de changement ont été principalement identifiés entre les décennies de 1990 et 2000. La comparaison entre les périodes avant et après le changement a révélé des augmentations significatives de température, avec des amplitudes allant de  $0,52^{\circ}\text{C}$  (São Luís) à  $0,91^{\circ}\text{C}$  (Boa Vista), indiquant un réchauffement substantiel et une hétérogénéité spatiale, avec une plus grande intensité au nord de la région et dans les zones de transition. L'étude fournit des preuves solides du réchauffement persistant dans les capitales amazoniennes, contribuant ainsi à fournir des données cruciales pour les politiques d'adaptation climatique et la planification urbaine dans cette région sensible.

**Mots-clés:** Amazonie légale ; changement climatique ; réchauffement urbain.

## 1 INTRODUÇÃO

Segundo o Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC), em seu Sexto Relatório de Avaliação (AR6), as temperaturas do ar estão aumentando globalmente como consequência das mudanças climáticas, com efeitos particularmente intensificados nos ambientes urbanos, onde o aquecimento é potencializado pela formação de ilhas de calor e pela rápida urbanização (IPCC, 2023; Shahfahad et al., 2024). De acordo com Liu et al. (2022), o aquecimento das superfícies urbanas varia conforme o porte das cidades e sua localização geográfica, sendo geralmente mais acentuado em centros urbanos maiores,



onde a densidade populacional e o processo de urbanização contribuem significativamente para a elevação das temperaturas. Esse fenômeno se agrava em áreas com infraestrutura compacta e escassez de vegetação, o que compromete os mecanismos naturais de resfriamento (Cheng et al., 2019; Hou; Estoque, 2020; Song; Park, 2021). Nesse cenário, torna-se fundamental entender como essas dinâmicas se manifestam em regiões ecologicamente sensíveis, como a Amazônia (Ferreira, Sávio José Filgueiras et al., 2021; Furtado; Pereira; de Souza, 2024), onde o avanço urbano pode acentuar os efeitos climáticos locais e regionais.

A Amazônia tem registrado mudanças climáticas marcantes nas últimas cinco décadas, com destaque para o aumento persistente e significativo da temperatura do ar (Carvalho et al., 2020; Da Silva et al., 2019; Lucas et al., 2021; Ritchie et al., 2022). Esse aquecimento contínuo afeta diretamente os principais centros urbanos da região, ampliando os desafios relacionados à saúde pública, infraestrutura e qualidade de vida (Alves de Oliveira et al., 2021; Ferreira, Mariana Abou Mourad et al., 2023). A elevação térmica é uma das expressões mais claras das alterações climáticas em escalas global e regional, com impactos profundos sobre os ecossistemas, a biodiversidade e as populações humanas que ocupam essa vasta e sensível porção do território nacional, afetando diretamente o bem-estar das comunidades urbanas (Tham et al., 2020). Diante desse quadro, torna-se imprescindível investigar as tendências de aquecimento nas capitais amazônicas, a fim de subsidiar políticas públicas e orientar o planejamento urbano, promovendo estratégias eficazes de adaptação e mitigação frente aos efeitos adversos do clima (Marengo et al., 2018).

Estudos científicos consolidados, como os de Marengo et al. (2024) e Nobre et al. (2016), têm reiteradamente demonstrado o avanço das temperaturas superficiais na extensa região amazônica. Esse processo está fortemente associado a transformações no uso e cobertura da terra, impulsionadas sobretudo pelo desmatamento voltado à expansão agrícola, pecuária e infraestrutura. No entanto, a revisão da literatura revela que a maior parte das pesquisas sobre dinâmica térmica amazônica tem se concentrado em áreas rurais ou nas zonas de transição entre floresta e áreas antropizadas. Embora essas abordagens sejam essenciais para compreender os impactos da conversão florestal, elas acabam por deixar lacunas importantes no entendimento sobre o aquecimento em áreas urbanizadas. As capitais dos estados amazônicos, que desempenham papéis centrais na administração, economia e demografia regionais, concentram uma parcela significativa e crescente da população. Essa densidade populacional, aliada ao crescimento urbano desordenado e à intensificação do efeito de ilha de calor (Raiol et al., 2024), torna essas cidades particularmente vulneráveis às consequências das mudanças climáticas.

Embora numerosos estudos já tenham documentado a elevação das temperaturas em regiões tropicais, como a Amazônia (Almeida et al., 2017; Da Silva et al., 2019; de Souza et al., 2025; Marengo et al., 2024; Ritchie et al., 2022), ainda persiste uma lacuna relevante no monitoramento contínuo e na análise aprofundada do aquecimento em áreas urbanas da região, especialmente nas capitais. Essas localidades, cada vez mais impactadas pelas transformações no uso do solo e pela intensificação dos efeitos urbanos sobre o clima, requerem abordagens metodológicas que considerem suas especificidades microclimáticas. À luz desse contexto, evidencia-se a importância de avançar na investigação das mudanças e tendências da temperatura do ar nas capitais da Amazônia Legal, que concentram parcela crescente da população regional e apresentam características urbanas singulares. A análise da evolução térmica ao longo de meio século permite não apenas quantificar a magnitude do aquecimento, mas também identificar padrões temporais e espaciais que contribuam para a formulação de respostas adaptativas eficazes. Investigações com esse foco, portanto, são fundamentais para preencher lacunas na literatura científica e oferecer subsídios técnicos ao planejamento urbano sustentável e à construção de políticas públicas voltadas à mitigação dos impactos climáticos sobre os centros urbanos amazônicos. Assim, este estudo tem como objetivo principal analisar a evolução temporal da temperatura do ar e sua tendência nas capitais da Amazônia Legal, durante o último meio século (1970-2024), com ênfase na identificação de tendências de aquecimento.

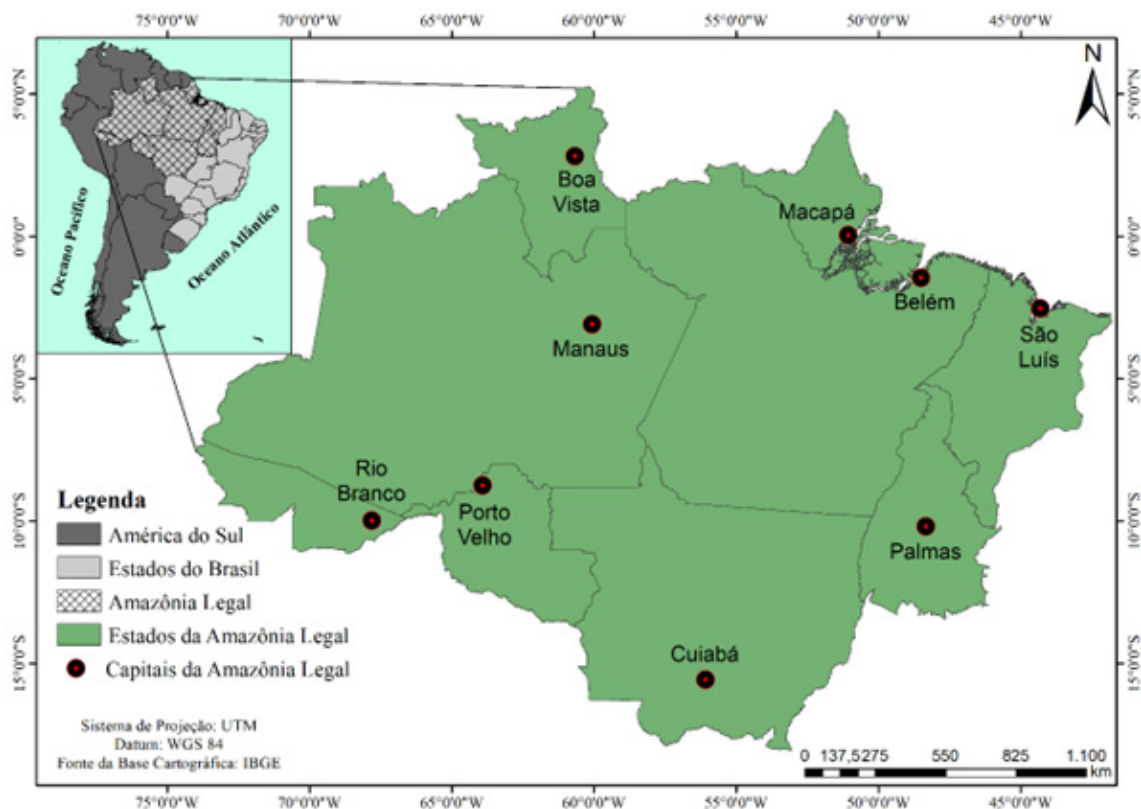
## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo abrange as nove capitais da Amazônia Legal (Figura 1): Belém – PA, Boa Vista – RR, Cuiabá – MT, Macapá – AP, Manaus – AM, Palmas – TO, Porto Velho – RO, Rio Branco – AC e São Luís – MA. Essas cidades apresentam distintas características climáticas, ambientais e urbanas, sendo representativas da diversidade socioambiental da região. De acordo com o último censo do IBGE realizado em 2022 (IBGE, 2022), o total populacional das 9 capitais (7.040.045) equivale a ~3,5% do total de habitantes do Brasil (203.080.756 de habitantes).

# Meio século de mudanças na temperatura do ar nas capitais da Amazônia Legal

**Figura 1** – Localização geográfica das capitais dos estados da Amazônia Legal



**Fonte:** os autores (2025).

Com base na classificação climática de Köppen-Geiger 1936 (Köppen; Geiger, 1936; Lima et al., 2023; Rahimi; Laux; Khalili, 2020), a região da Amazônia Legal possui a tipologia de clima classificada como “A” (correspondente ao clima tropical, se destacando por apresentar temperaturas médias mensais sempre superiores a 18°C ao longo do ano. Esse grupo climático também se caracteriza por apresentar elevada umidade relativa do ar e alto índice pluviométrico, embora a distribuição das chuvas ao longo do ano possa variar conforme a subcategoria). Ele é subdividido em três tipos mais específicos: o tipo “Af” (clima tropical úmido, sem estação seca; todos os meses com precipitação > 60 mm e temperaturas médias > 18°C); “Am” (clima tropical monçônico, com curta estação seca; mês mais seco com precipitação < 60 mm); e “Aw” (clima tropical sazonal, com estação seca no inverno e chuvas concentradas no verão; mês mais seco com precipitação < 60 mm). Durante o ano, a temperatura do ar não apresenta grande variabilidade, exceto no sul da Amazônia. Isso ocorre, devido a influência da passagem de sistemas frontais (Marengo; Nobre; Culf, 1997).

Nessa região existem dois principais sistemas meteorológicos quem impulsionam a elevada quantidade de precipitação entre os meses de dezembro e abril (Reboita et al., 2010). Em sua porção norte, há a atuação da ZCIT (Zona de Convergência Intertropical), que alcança sua posição mais austral (~4°S) entre os meses de fevereiro e abril. Por outro lado, na faixa sul da Amazônia Legal, no sentido NO-SE, desde o sudoeste do Amazonas até o sudeste do Mato Grosso, ocorre a predominância da ZCAS (Zona de Convergência do Atlântico Sul), que tem seu pico de atuação entre os meses de dezembro e fevereiro (Liebmann et al., 1999).

## 2.2 BASE DE DADOS CLIMATOLÓGICOS DE TEMPERATURA DO AR

A variável de temperatura do ar a 2 metros utilizada neste estudo foi extraída do reanálise ERA5, desenvolvido pelo ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) e disponibilizado pelo C3S (Copernicus Climate Change Service) (Bell et al., 2021; Hersbach et al., 2020). O ERA5 representa a quinta geração de reanálises atmosféricas globais e fornece estimativas consistentes e de alta qualidade de diversas variáveis meteorológicas e climáticas, combinando observações (de superfície, balões, satélites, entre outras fontes) com modelos numéricos sofisticados por meio de um sistema de assimilação de dados 4D-Var (Gustafsson, 2007; Lorenc; Rawlins, 2005).

A temperatura do ar a 2 metros (nome da variável: 2m\_temperature, ou t2m) refere-se à estimativa da temperatura do ar livre a uma altura de 2 metros acima da superfície do terreno ou da vegetação. Essa estimativa é derivada da extrapolação dos níveis de pressão mais baixos do modelo atmosférico para o nível de 2 metros, considerando as condições locais de relevo e cobertura do solo. Os valores de temperatura são fornecidos em unidades de Kelvin (K), sendo convertidos para graus Celsius (°C) quando necessário para facilitar a interpretação e visualização. A resolução espacial do ERA5 é de  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$  de latitude/longitude, o que corresponde a aproximadamente 31 km na linha do equador. A resolução temporal é horária, com registros disponíveis a cada 1 hora (UTC), o que permite análises detalhadas de variações diurnas e eventos extremos. Os dados estão disponíveis globalmente desde 1950 (com qualidade operacional mais robusta a partir de 1979).

## 2.3 PROCEDIMENTOS ESTATÍSTICOS

### 2.3.1 Teste de Mann-Kendall

O teste de Mann-Kendall (MK) (Kendall, 1955; Mann, 1945) é um teste não paramétrico amplamente utilizado para detectar tendências monotônicas em séries temporais. Ele avalia a significância de uma tendência sem exigir que os dados sejam normalmente distribuídos. O teste é iniciado calculando a estatística  $S$  usando a seguinte equação (Equação 1):

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \quad (1)$$

em que,  $n$  é o número total de pontos de dados;  $x_j$  e  $x_i$  são os valores de dados nas séries temporais  $j$  e  $i$  ( $j > i$ ), respectivamente e  $\text{sgn}(x_j - x_i)$  é a função de sinal, que pode ser calculada pela seguinte equação (Equação 2):

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} +1, & \text{se } x_j - x_i > 0 \\ 0, & \text{se } x_j - x_i = 0 \\ -1, & \text{se } x_j - x_i < 0 \end{cases} \quad (2)$$

Um valor positivo de  $S$  indica uma tendência ascendente, e um valor negativo indica uma tendência descendente. A distribuição estatística  $S$  é aproximadamente normal quando  $n > 10$ . A média de  $S$  é zero e a variância pode ser calculada da seguinte forma (Equação 3):

$$\text{Var}(S) = \frac{1}{18} \left[ n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^m t_i(t_i-1)(2t_i+5) \right] \quad (3)$$

em que,  $n$  é o número de pontos de dados;  $m$  é o número de grupos empatados (um conjunto de dados com o mesmo valor é considerado um grupo empatado); e  $t_i$  denota o número de empates na extensão  $i$ . No caso em que o tamanho da amostra,  $n > 10$ , os valores de  $S$  e “Var” ( $S$ ) são usados para calcular o teste padrão  $Z_{MK}$  da seguinte forma (Equação 4):

$$Z_{MK} = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & \text{se } S > 0 \\ 0, & \text{se } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{Var}(S)}}, & \text{se } S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

O escore  $Z_{MK}$  segue uma distribuição normal. Considerando um nível de significância de  $\alpha=0,05$ , correspondente a um intervalo de confiança de 95% para um teste bilateral, os valores críticos são  $-1,96$  e  $+1,96$ . Assim, quando o valor de  $Z_{MK}$  é negativo e seu módulo excede  $1,96$ , há uma tendência decrescente estatisticamente significativa. Por outro lado, se  $Z_{MK}$  for positivo e maior que  $1,96$ , a tendência é crescente e significativa. Valores de  $Z_{MK}$  compreendidos entre  $-1,96$  e  $+1,96$  indicam ausência de tendência significativa ao nível de 5%.

## 2.3.2 Estimador da inclinação de Sen

O teste de MK, em conjunto com o estimador de declive de Sen (Sen, 1968), permite estimar a direção e a magnitude da tendência, considerando o nível de significância convencionais 0,05 (95%). Esse estimador calcula a inclinação mediana de todas as combinações possíveis entre N pares de pontos na série temporal (Equação 5):

$$Q_i = \frac{X_j + X_k}{j - k}, i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (5)$$

em que,  $X_j$  e  $X_k$  são os valores dos dados nos momentos  $j$  e  $k$  ( $j > k$ ), respectivamente. Na Equação 5,  $j > k$ , a mediana desses  $N$  valores de  $Q_i$  é representado pela inclinação da estimativa de Sen. A mediana dos valores  $Q_i$  representa a magnitude da tendência. Um valor positivo da inclinação de Sen indica tendência de aumento, enquanto um valor negativo indica tendência de redução (Faquseh; Grossi, 2024).

## 2.3.3 Teste de Pettitt

O teste de Pettitt (Pettitt, 1979) é um teste não paramétrico usado para detectar uma mudança significativa (ou ponto de mudança) em uma série temporal. Ele é particularmente útil quando você quer identificar um ponto em que a mediana da série muda, sem assumir uma distribuição específica para os dados. Nesse estudo, o teste de Pettitt será utilizado para indicar em qual ano houve o ponto de mudança, para separar a série temporal em dois períodos distintos, assim como utilizado em diversos estudos climatológicos (Ahmadi et al., 2018; Mallakpour; Villarini, 2016; Rybski; Neumann, 2011; Serinaldi; Kilsby, 2016; Verma; Prasad; Verma, 2022; Zarenistanak; Dhorde; Kripalani, 2014). Esse teste é apresentado de forma que  $k$  é o índice candidato a ponto de mudança (ou ponto de quebra) e os valores  $x_1, x_2, \dots, x_n$  são valores da série temporal, organizados em ordem crescente (Equação 6). O valor absoluto é usado porque estamos interessados na intensidade da mudança, independentemente da direção:

$$k = \left| \max_k \sum_{i=1}^k \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \right|, 1 < k < n \quad (6)$$

em que  $\text{sgn}(x_j - x_i)$  é a função sinal (Equação 7).

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} +1, & \text{se } x_j - x_i > 0 \\ 0, & \text{se } x_j - x_i = 0 \\ -1, & \text{se } x_j - x_i < 0 \end{cases} \quad (7)$$

O ponto de mudança da série está localizado no teste de Pettitt quando  $k$  atinge seu valor máximo, desde que a estatística seja significativa. A probabilidade de significância de  $k$  é aproximado para  $p \leq 0,05$  com (Equação 8)

$$p \approx 2 \exp \left( \frac{-6k^2}{n^3 + n^2} \right) \quad (8)$$

Enquanto o valor de  $p$  for maior que o nível de significância especificado  $\alpha$  (0,05), a hipótese nula ( $H_0$  indica dados homogêneos) pode ser aceita e não há ponto de mudança na série de dados. Em contrapartida, para valores de  $p$  inferiores a  $\alpha$  (0,05), rejeita-se a hipótese nula e considera-se a hipótese alternativa ( $H_1$  indica ocorrência de mudança).

## 2.4 FAIXAS DE AQUECIMENTO (WARMING STRIPES)

Para expor as anomalias de temperatura anual, em relação à média de 1971-2000 dos dados do ERA5, optou-se por utilizar a metodologia desenvolvida por Ed Hawkins (Hawkins et al., 2025). Essa é uma forma de simples e impactante de visualização do aquecimento nas capitais da Amazônia Legal, sua força está na clareza visual da tendência. Nas visualizações de Hawkins, o uso de cores quentes e frias co-

munica de forma clara e acessível as mudanças climáticas. Cores quentes (tons de vermelho) indicam aquecimento, enquanto cores frias (tons de azul) remetem ao resfriamento, quanto mais escura a cor, maior a magnitude da anomalia facilitando a compreensão por públicos diversos (O'Connor, 2023).

## 2.5 PROCESSAMENTO DOS DADOS

Para a aquisição dos dados de temperatura média anual do ERA5, foi elaborado um script na linguagem Python (Mehare; Anilkumar; Usmani, 2023). De maneira simples, o código automatiza o download, o processamento e a exportação de dados anuais da temperatura do ar a 2 metros para um ponto específico (definido por latitude e longitude), utilizando o reanálise ERA5. Ele acessa a API do Copernicus Climate Data Store para obter médias mensais de temperatura desde 1970, calcula anomalias com base na climatologia do período de 1971–2000 e exporta os resultados em arquivos CSV, tanto em resolução anual.

Com o uso da linguagem Python, foi calculada estatística do teste de Mann-Kendall, inclinação de Sen e o teste Pettitt. Resumidamente, os passos adotados no código realizaram uma análise de tendência e detecção de mudanças em séries temporais anuais de temperatura média, a partir dos dados em formato CSV. Utiliza o teste de Pettitt para identificar pontos de mudança abrupta, o teste de Mann-Kendall para verificar a presença de tendência monotônica e a inclinação de Sen para estimar a taxa de variação da temperatura ao longo do tempo.

As “Warming Stripes” foram elaboradas com um código para representar graficamente as anomalias anuais da temperatura do ar das capitais dos estados da Amazônia Legal, entre 1970 e 2024, com base em dados do ERA5. Tal código utilizou um gradiente de cores do azul (anomalias negativas) ao vermelho (positivas), atribuindo uma cor a cada ano conforme a magnitude da anomalia, compondo uma figura final de alta resolução para comunicação e divulgação climática.

Por fim, os gráficos de tendência da temperatura anual foram elaborados no Microsoft Excel, a partir dos resultados obtidos com os testes estatísticos de Pettitt e Mann-Kendall. No Excel, foram criados gráficos de linhas que representam a série temporal da temperatura, com a adição de elementos visuais como o ano de mudança detectado, permitindo uma interpretação clara e acessível dos padrões climáticos ao longo do tempo. Essa abordagem combinou a robustez das análises estatísticas com a flexibilidade gráfica do Excel para fins de apresentação e comunicação científica.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 ANÁLISE ESTATÍSTICA

A Tabela 1 apresenta os resultados da estatística  $Z_{MK}$ , da declinação de Sen e o p-valor associado às estatísticas adotadas, para a séries temporais anuais da temperatura do ar a 2 metros, das capitais analisadas. Os resultados do teste  $Z_{MK}$ , revelaram tendências significativas ( $p < 0,0001$ ) de aumento em todas as capitais da Amazônia Legal, confirmando o aquecimento regional ao longo do período avaliado, evidenciando a presença de um aquecimento consistente e não aleatório nas séries temporais. Esses resultados vão ao encontro de pesquisas recentes que apontam o aumento da temperatura do ar na Amazônia (Almeida et al., 2017; Da Silva et al., 2019; Dias et al., 2021; Victoria et al., 1998).

Os valores do  $Z_{MK}$  variaram de 5,78 (Cuiabá) a 7,23 (Macapá), sendo os maiores valores observados nas cidades de Macapá ( $Z_{MK} = 7,23$ ) e Belém ( $Z_{MK} = 7,06$ ), indicando tendências mais acentuadas e consistentes de aquecimento. O declive de Sen, que estima a taxa de variação anual, variou entre  $0,019^{\circ}\text{C}/\text{ano}$  (São Luís) e  $0,032^{\circ}\text{C}/\text{ano}$  (Boa Vista), o que reflete uma elevação significativa nas temperaturas médias ao longo dos anos. A elevada significância estatística, combinada com inclinações moderadas a altas, reforça a robustez das tendências detectadas. Embora São Luís tenha apresentado a menor inclinação de Sen, o valor de  $Z_{MK}$  (6,43) sugere que essa tendência, ainda que menos intensa, é altamente consistente ao longo do tempo.

A análise das tendências de aquecimento nas capitais do Norte do Brasil, evidenciada pelos altos valores de  $Z_{MK}$  e pelas taxas positivas de declive de Sen, corrobora estudos mais amplos sobre as mudanças climáticas na região amazônica. Pesquisas que abrangeram múltiplos locais e séries temporais mais extensas, utilizando metodologias estatísticas robustas como o teste de Mann-Kendall, também identificaram um padrão predominante de aumento nas temperaturas médias, particularmente acentuado a partir da década de 1990 (Penreiro et al., 2018). Essa convergência de resultados, tanto em nível de capitais específicas quanto em escala regional, sublinha a consistência do fenômeno de aquecimento observado, reforçando a percepção de que a Amazônia é uma área particularmente sensível às alterações climáticas globais e regionais.

**Tabela 1** – Resultados do teste de Mann–Kendall ( $Z_{MK}$ ), declinação de Sen e o p-valor associado, para séries temporais de temperatura anual de 1970-2024

| Cidade      | $Z_{MK}$ | Declinação de Sen ( $^{\circ}\text{C}/\text{ano}$ ) | p-valor |
|-------------|----------|-----------------------------------------------------|---------|
| Belém       | 7,06     | 0,027                                               | <0,0001 |
| Boa Vista   | 6,43     | 0,032                                               | <0,0001 |
| Cuiabá      | 5,78     | 0,023                                               | <0,0001 |
| Macapá      | 7,23     | 0,027                                               | <0,0001 |
| Manaus      | 6,11     | 0,023                                               | <0,0001 |
| Palmas      | 5,92     | 0,025                                               | <0,0001 |
| Porto Velho | 6,87     | 0,024                                               | <0,0001 |
| Rio Branco  | 5,98     | 0,021                                               | <0,0001 |
| São Luís    | 6,43     | 0,019                                               | <0,0001 |

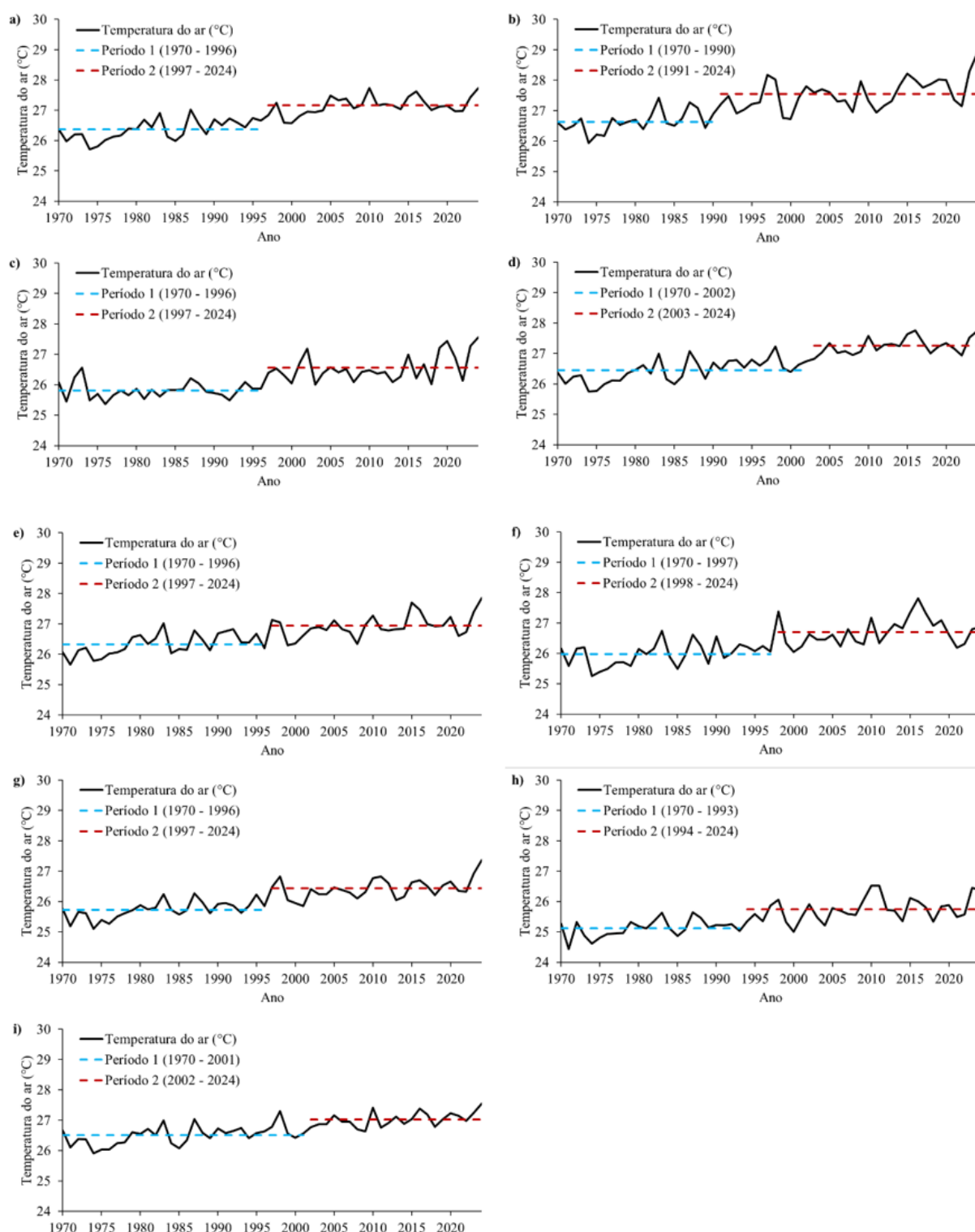
**Fonte:** os autores (2025).

A detecção de tendências de aquecimento estatisticamente significativas, como as apresentadas na Tabela 1, vão ao encontro das projeções e observações do IPCC, que apontam para um aquecimento do sistema climático global (IPCC, 2023). Embora a variabilidade natural, incluindo fenômenos como El Niño, possa influenciar as tendências interanuais e sazonais (Jiménez-Muñoz et al., 2016; Li et al., 2011; Moura et al., 2019), a consistência das tendências de longo prazo sugere uma forte componente associada às mudanças climáticas antropogênicas e às alterações no uso da terra na região (Almeida et al., 2017). A compreensão dessas tendências e de seus possíveis motores é crucial para o desenvolvimento e implementação de políticas públicas e estratégias de adaptação eficazes, que considerem as vulnerabilidades específicas de cada localidade, em função de um cenário de tendência aquecimento evidente (Green; Armstrong; Soon, 2009).

Cabe destacar que os valores de  $Z_{MK}$  e da inclinação de Sen não apresentaram proporcionalidade direta, corroborando a natureza complementar dessas métricas. Enquanto o teste de Mann-Kendall detecta a existência e significância estatística da tendência, a inclinação de Sen quantifica sua magnitude (Aditya; Gusmayanti; Sudrajat, 2021). Além disso, como observado por Yue, Pilon e Cavadias (2002), embora o teste de Mann-Kendall seja eficaz para indicar a existência de tendências monotônicas em séries temporais, ele não fornece informações sobre a taxa de mudança, papel este desempenhado pela inclinação de Sen. Essa abordagem combinada é especialmente útil em estudos climáticos, onde a tendência pode ser estatisticamente significativa mesmo com variações sutis (ou seja, com baixa inclinação), como verificado no caso de São Luís. Dessa forma, localidades com maior consistência estatística nem sempre são aquelas com maior taxa de aquecimento, o que enfatiza a necessidade de interpretação conjunta dessas estatísticas.

A Figura 2 ilustra as séries temporais (1970–2024) de temperatura do ar e a divisão dessa série em dois períodos distintos, após a aplicação do teste de Pettitt, para as capitais da Amazônia Legal. O teste de Pettitt permitiu identificar os pontos de mudança nas séries temporais, sugerindo uma alteração significativa no comportamento da temperatura a partir da década de 1990. A maioria das cidades apresentou ponto de mudança em 1997 (Belém, Cuiabá, Manaus, Porto Velho), com exceções como Boa Vista (1991), Rio Branco (1994), Palmas (1998), São Luís (2002) e Macapá (2003). Esses resultados indicam uma intensificação do aquecimento a partir de meados da década de 1990 em grande parte da região.

**Figura 2** – Representação gráfica das séries de temperaturas anuais (1970-2024) para Belém (a), Boa Vista (b), Cuiabá (c), Macapá (d), Manaus (e), Palmas (f), Porto Velho (g), Rio Branco (h) e São Luís (i). As linhas pontilhadas indicam os resultados encontrados pelo teste de Pettitt, em que as cores em azul indicam o Período 1 (antes da mudança) e as cores em vermelho indicam o Período 2 (após a mudança).



**Fonte:** os autores (2025).

A identificação de pontos de mudança nas séries temporais de temperatura, predominantemente na década de 1990 e início dos anos 2000, conforme detectado pelo teste de Pettitt, fornece evidências adicionais sobre a dinâmica do aquecimento na Amazônia Legal. A concentração dos pontos de mudança nesse período específico sugere um momento de inflexão ou aceleração no processo de aquecimento regional, alinhando-se com observações de outros estudos que também apontam para a década de 1990 como um período chave para a intensificação das tendências positivas de temperatura na Amazônia Legal. Um estudo realizado por Bodas Terassi et al. (2024) revela que, durante as décadas de 1990 e 2000, houve

uma mudança abrupta, ou quebra de padrão, nos dados climáticos relacionados às temperaturas extremas. Essa mudança não foi gradual, mas sim uma descontinuidade, o que indica que algo significativo pode ter influenciado o clima nesse período; o processo de urbanização acelerada (mais construções, mais asfalto, menos vegetação) pode ter alterado o microclima local, contribuindo para aumento de temperatura ou maior frequência de extremos térmicos.

A alteração no regime de temperaturas a partir dos pontos de mudança identificados pode estar associada a uma combinação de fatores, incluindo a intensificação do efeito estufa em escala global, variabilidade climática natural e mudanças regionais no uso e cobertura da terra, como o desmatamento (Bodas Terassi et al., 2024). Estudos indicam que as alterações climáticas observadas na Amazônia Legal, incluindo o aumento das temperaturas, são consistentes com o aquecimento global (IPCC, 2023; Harris; Huntingford; Cox, 2008). A análise de pontos de mudança, como realizada com o teste de Pettitt, é fundamental para entender não apenas a magnitude da tendência de aquecimento, mas também a sua evolução temporal, identificando períodos de alterações mais aceleradas que podem impactar de forma significativa os ecossistemas e as populações locais, exigindo ajustes nas estratégias de resposta e enfrentamento.

Complementarmente a Figura 2, a Tabela 2 apresenta as médias de longo prazo das temperaturas anuais (1970–2024) para as capitais da Amazônia Legal, segmentadas em dois períodos distintos, identificados pelo teste de Pettitt. Os resultados reforçam a tendência de aumento das temperaturas médias anuais nas capitais da Amazônia Legal, mostrando um aumento consistente nas médias anuais de temperatura em todas as capitais entre os dois períodos distintos. As variações observadas (amplitude entre os períodos) variaram de 0,52°C, em São Luís, a 0,91°C, em Boa Vista, indicando um aquecimento significativo ao longo das últimas décadas.

As maiores amplitudes foram observadas em Boa Vista (0,91°C), Macapá (0,81°C) e Belém (0,80°C), todas localizadas na porção norte da região, sugerindo uma possível intensificação dos efeitos do aquecimento global nessa sub-região. Em contrapartida, São Luís (0,52°C) e Rio Branco (0,63°C) apresentaram as menores variações, embora ainda expressivas do ponto de vista climático. A capital mato-grossense, Cuiabá, destacou-se por apresentar um aumento de 0,75°C. Essa amplitude, por exemplo, alinha-se com a observação de que áreas de transição Amazônia-Cerrado podem experimentar alterações climáticas mais pronunciadas devido à combinação de influências climáticas e antrópicas, corroborando estudos que apontam para um aquecimento mais acentuado em áreas de transição entre o cerrado e a floresta amazônica (Bodas Terassi et al., 2024; Joseph; Souza; Sabino, 2021; Marengo et al., 2022).

**Tabela 2** – Médias de longo prazo (1970-2024) das séries de temperaturas anuais das capitais da Amazônia Legal nos diferentes períodos identificados pelo teste de Pettitt

| Cidade      | Período 1 | Período 2 | Amplitude |
|-------------|-----------|-----------|-----------|
| Belém       | 26,4°C    | 27,2°C    | 0,80°C    |
| Boa Vista   | 26,4°C    | 27,5°C    | 0,91°C    |
| Cuiabá      | 25,8°C    | 26,6°C    | 0,75°C    |
| Macapá      | 26,4°C    | 27,3°C    | 0,81°C    |
| Manaus      | 26,3°C    | 26,9°C    | 0,62°C    |
| Palmas      | 26,0°C    | 26,7°C    | 0,73°C    |
| Porto Velho | 25,7°C    | 26,4°C    | 0,71°C    |
| Rio Branco  | 25,1°C    | 25,7°C    | 0,63°C    |
| São Luís    | 26,5°C    | 27,0°C    | 0,52°C    |

**Fonte:** os autores (2025).

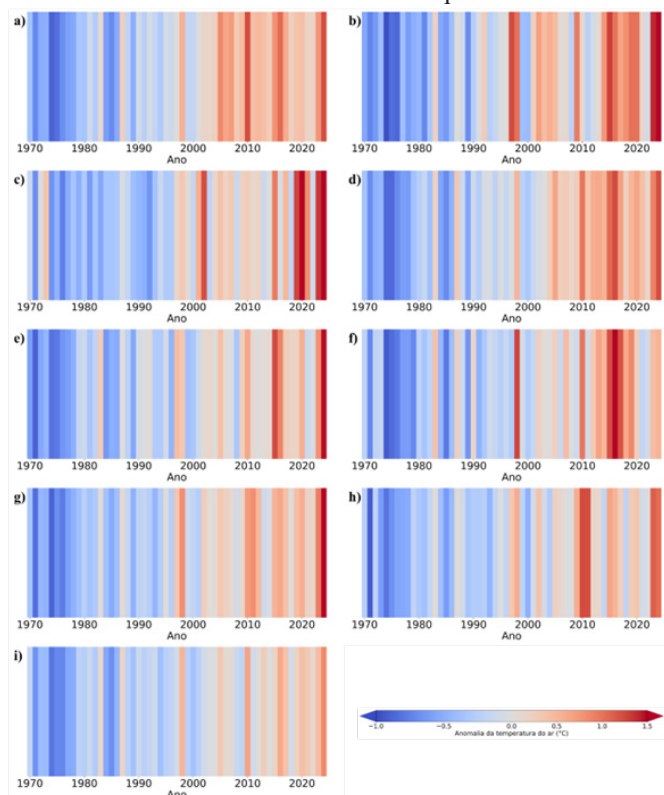
A análise comparativa das médias de temperatura entre os Períodos 1 e 2 (Tabela 2) quantifica a magnitude do aquecimento pós-ponto de mudança em cada capital. A amplitude observada, variando de 0,52°C a 0,91°C, representa um incremento substancial na temperatura média anual em um intervalo de poucas décadas, reforçando a robustez do sinal de aquecimento na região. A heterogeneidade espacial das amplitudes de aquecimento, com valores mais elevados no Norte (Boa Vista, Macapá, Belém) e em áreas de transição como Cuiabá, sugere a influência de fatores regionais modulando a resposta ao aquecimento global.

### 3.2 FAIXAS DE AQUECIMENTO

Com base nas faixas de aquecimento (“warming stripes”) geradas a partir das anomalias anuais de temperatura do ar (1970–2024) para as capitais da Amazônia Legal (Figura 3), observa-se uma clara e consistente tendência de aquecimento ao longo das últimas cinco décadas. Os gráficos revelam uma transição visual marcante de tons azulados (anomalias negativas) para tons avermelhados (anomalias positivas), indicando um aumento gradual e contínuo das temperaturas médias anuais em todas as capitais analisadas. Observa-se uma predominância de tons azulados até meados da década de 1980, seguida por um aumento progressivo da frequência e intensidade dos tons avermelhados, indicando anomalias positivas persistentes a partir dos anos 1990. Esse padrão se intensifica nas décadas de 2000 e 2010, refletindo um processo de aquecimento regional acelerado.

Entre as capitais analisadas, Boa Vista apresenta uma das tendências mais marcantes de aquecimento, com anomalias superiores a  $+1,5^{\circ}\text{C}$  em 2024, valor que representa o ápice da série temporal para essa localidade. Outras capitais, como Cuiabá, Macapá e Belém, também registraram anomalias superiores a  $+1,0^{\circ}\text{C}$  em diversos anos recentes. Capitais situadas nas porções oeste e nordeste da Amazônia Legal, como Rio Branco, Porto Velho e São Luís, igualmente demonstraram um aumento gradual das anomalias positivas, especialmente após o ano 2000. O ano de 2024 destaca-se como um dos mais quentes em toda a série temporal para a maioria das capitais, com anomalia positiva da ordem de  $+1,4^{\circ}\text{C}$ , o que pode estar associado à intensificação de fenômenos climáticos de grande escala, como a atuação do El Niño (Espinoza *et al.*, 2024; Santos de Lima *et al.*, 2024), somados à tendência de aquecimento global.

**Figura 3** – Faixas de aquecimento (“warming stripes”) das anomalias de temperatura do ar das séries anuais (1970-2024) para Belém (a), Boa Vista (b), Cuiabá (c), Macapá (d), Manaus (e), Palmas (f), Porto Velho (g), Rio Branco (h) e São Luís (i). As cores em tons de azul indicam anomalias negativas, por outro lado, as cores em tons de vermelho indicam anomalias positivas



Fonte: os autores (2025).

## 4 CONCLUSÃO

Em síntese, os resultados apontam para um cenário regional de aquecimento significativo e progressivo nas capitais amazônicas, com variações importantes tanto na intensidade quanto na consistência estatística das tendências. Os resultados obtidos por meio da aplicação do teste de Mann-Kendall, estimador de Sen e teste de Pettitt evidenciaram, de forma inequívoca, um processo de aquecimento consistente

e estatisticamente significativo em todas as capitais analisadas. A identificação de pontos de mudança pelo teste de Pettitt permitiu segmentar as séries em dois períodos distintos, revelando que a maioria das capitais experimentou uma alteração significativa no comportamento térmico a partir da década de 1990, com destaque para 1997, ano em que quatro capitais (Belém, Cuiabá, Manaus e Porto Velho) apresentaram pontos de ruptura.

Esses resultados contribuem para o preenchimento de lacunas na literatura científica sobre a dinâmica térmica em centros urbanos amazônicos, oferecendo uma caracterização detalhada da evolução temporal e da magnitude do aquecimento nas capitais da região. As contribuições dos resultados, podem abranger desde questões de saúde pública e conforto térmico urbano até aspectos relacionados à demanda energética e ao planejamento de infraestrutura. Esses achados reforçam a importância de estratégias de adaptação climática regionalizadas, considerando as particularidades de cada capital analisada. Esses dados ressaltam a importância do monitoramento contínuo das variáveis climáticas e da implementação de políticas públicas de adaptação e mitigação frente ao aquecimento observado. Isso representa um desafio crescente para gestores públicos e planejadores urbanos, demandando estratégias adaptativas específicas de mitigação que considerem as particularidades climáticas e socioambientais de cada localidade.

## REFERÊNCIAS

ADITYA, F.; GUSMAYANTI, E.; SUDRAJAT, J. Rainfall trend analysis using Mann-Kendall and Sen's slope estimator test in West Kalimantan. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 893, n. 1, e012006, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/893/1/012006>. Acesso em: 27 maio 2025.

AHMADI, F.; NAZERITAHROUDI, M.; MIRABBASI, R.; KHALILI, K.; JHAJHARIA, D. Spatiotemporal trend and abrupt change analysis of temperature in Iran. **Meteorological Applications**, v. 25, n. 2, p. 314–321, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/met.1694>. Acesso em: 25 maio 2025.

ALMEIDA, C. T. *et al.* 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. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/joc.4831>. Acesso em: 24 abr. 2025.

ALVES DE OLIVEIRA, B. F.; BOTTINO, M. J.; NOBRE, P.; NOBRE, C. A. Deforestation and climate change are projected to increase heat stress risk in the Brazilian Amazon. **Communications Earth & Environment**, v. 2, n. 1, p. 207, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00275-8>. Acesso em: 25 abr. 2025.

BELL, B. *et al.* The ERA5 global reanalysis: Preliminary extension to 1950. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 147, n. 741, p. 4186–4227, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/qj.4174>. Acesso em: 12 abr. 2025.

BODAS TERASSI, P. M. *et al.* Exploring climate extremes in Brazil's Legal Amazon. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 38, n. 4, p. 1403–1422, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00477-023-02634-7>. Acesso em: 05 mar. 2025.

CARVALHO, S. *et al.* A changing Amazon rainforest: Historical trends and future projections under post-Paris climate scenarios. **Global and Planetary Change**, v. 195, e03328, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2020.103328>. Acesso em: 10 maio 2025.

CHENG, L. *et al.* Urban cooling island effect of main river on a landscape scale in Chongqing, China. **Sustainable Cities and Society**, v. 47, e101501, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101501>. Acesso em: 24 maio 2025.

DA SILVA, P. E. *et al.* Precipitation and air temperature extremes in the Amazon and northeast Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 39, n. 2, p. 579–595, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/joc.5829>. Acesso em: 15 abr. 2025.

DE SOUZA, A. *et al.* Analyzing Maximum Temperature Trends and Extremes in Brazil: A Study of Climate Variability and Anthropogenic Influences from 1960 to 2020. **Aerosol Science and Engineering**, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s41810-025-00288-2>. Acesso em: 04 maio 2025.

DIAS, T. S. S. *et al.* Urban Environment and the Air Temperature Trend: The Case of the Metropolis of Brazilian Amazon. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 1, p. 159–171, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.1.p159-171>. Acesso em: 27 maio 2025.

ESPINOZA, J. *et al.* The new record of drought and warmth in the Amazon in 2023 related to regional and global climatic features. **Scientific Reports**, v. 14, n. 1, p. 8107, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-58782-5>. Acesso em: 27 maio 2025.

FAQUSEH, H.; GROSSI, G. Trend analysis of precipitation, temperature and snow water equivalent in Lombardy region, northern Italy. **Sustainable Water Resources Management**, v. 10, n. 1, p. 18, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40899-023-00992-2>. Acesso em: 21 abr. 2025.

FERREIRA, M. A. M.; LEITE, Y. L. R.; JUNIOR, C. C.; VICENTE, C. R. Impact of climate change on public health in Brazil. **Public Health Challenges**, v. 2, n. 1, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/puh2.62>. Acesso em: 30 abr. 2025.

FERREIRA, S. J. F. *et al.* M. S. R.; DA CUNHA, T. R. B.; DOS SANTOS, A. S.; BENDER, S.; DA CUNHA, H. B. Impact of rapid urbanization on stream water quality in the Brazilian Amazon. **Environmental Earth Sciences**, v. 80, n. 8, p. 316, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12665-021-09621-7>. Acesso em: 24 maio 2025.

FURTADO, L. S.; PEREIRA, R. V. S.; DE SOUZA, E. B. Hemeroby Mapping of the Belém Landscape in Eastern Amazon and Impact Study of Urbanization on the Local Climate. **Urban Science**, v. 8, no. 1, p. 15, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/urbansci8010015>. Acesso em: 28 maio 2025.

GREEN, K. C.; ARMSTRONG, J. S.; SOON, W. Validity of climate change forecasting for public policy decision making. **International Journal of Forecasting**, v. 25, no. 4, p. 826–832, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2009.05.011>. Acesso em: 27 maio 2025.

GUSTAFSSON, N. Discussion on ‘4D-Var or EnKF?’ **Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography**, v. 59, n. 5, p. 774, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1600-0870.2007.00262.x>. Acesso em: 26 maio 2025.

HARRIS, P. P.; HUNTINGFORD, C.; COX, P. M. Amazon Basin climate under global warming: the role of the sea surface temperature. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 363, n. 1498, p. 1753–1759, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1098/rstb.2007.0037>. Acesso em: 27 maio 2025.

HAWKINS, E. *et al.* Warming Stripes spark climate conversations: from the ocean to the stratosphere. **Bulletin of the American Meteorological Society**, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-24-0212.1>. Acesso em: 25 maio 2025.

HERSBACH, H. *et al.* The ERA5 global reanalysis. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 146, n. 730, p. 1999–2049, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/qj.3803>. Acesso em: 13 abr. 2025.

HOU, H.; ESTOQUE, R. C. Detecting Cooling Effect of Landscape from Composition and Configuration: An Urban Heat Island Study on Hangzhou. **Urban Forestry & Urban Greening**, v. 53, p. 126719, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126719>. Acesso em: 24 maio 2025.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Demográfico 2022**. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/panorama>. Acesso em: 26 maio 2025.

IPCC. Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima. **Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. [Core Writing Team: LEE, H.; ROMERO, J. (eds.)]. Geneva: IPCC, 2023. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>. Acesso em: 18 set. 2025.

JIMÉNEZ-MUÑOZ, J. C. *et al.* Record-breaking warming and extreme drought in the Amazon rainforest during the course of El Niño 2015–2016. **Scientific Reports**, v. 6, n. 1, e33130, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/srep33130>. Acesso em: 27 maio 2025.

JOSEPH, W.; SOUZA, A. P.; SABINO, M. Índices de extremos de temperatura do ar na Amazônia brasileira. **Confins**, v. 52, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.4000/confins.41520>. Acesso em: 10 mar. 2025.

KENDALL, M. G. **Rank correlation methods**. London: Griffin, 1955. Disponível em: <https://academic.oup.com/jrssa/article/119/1/90/7101500>. Acesso em: 03 fev. 2025.

KÖPPEN, W.; GEIGER, R. **Das Geographische System der Klimatologie**. Berlin: Gebrüder Borntraeger, 1936. v. 1. Disponível em: [https://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at/pdf/Koppen\\_1936.pdf](https://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at/pdf/Koppen_1936.pdf). Acesso em: 24 maio 2025.

LI, W.; ZHANG, P.; YE, J.; LI, L.; BAKER, P. A. Impact of two different types of El Niño events on the Amazon climate and ecosystem productivity. **Journal of Plant Ecology**, v. 4, n. 1-2, p. 91-99, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/jpe/rtq039>. Acesso em: 27 maio 2025.

LIEBMANN, B.; KILADIS, G. N.; MARENGO, J. A.; AMBRIZZI, T.; GLICK, J. D. Submonthly Convective Variability over South America and the South Atlantic Convergence Zone. **Journal of Climate**, vol. 12, no. 7, p. 1877–1891, 1999. Disponível em: [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1999\)012<1877:SCVOSA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1999)012<1877:SCVOSA>2.0.CO;2). Acesso em: 07 maio 2025.

LIMA, R. F. *et al.* Climate Change Assessment in Brazil: Utilizing the Köppen-Geiger (1936) Climate Classification. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 38, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0102-77863810001>. Acesso em: 02 maio 2025.

LIU, Z. *et al.* Surface warming in global cities is substantially more rapid than in rural background areas. **Communications Earth & Environment**, v. 3, n. 1, p. 219, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00539-x>. Acesso em: 24 maio 2025.

LORENC, A. C.; RAWLINS, F. Why does 4D-Var beat 3D-Var? **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 131, n. 613, p. 3247–3257, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1256/qj.05.85>. Acesso em: 26 maio 2025.

LUCAS, E. W. M. *et al.* Trends in climate extreme indices assessed in the Xingu river basin - Brazilian Amazon. **Weather and Climate Extremes**, v. 31, e100306, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.wace.2021.100306>. Acesso em: 21 maio 2025.

MALLAKPOUR, I.; VILLARINI, G. A simulation study to examine the sensitivity of the Pettitt test to detect abrupt changes in mean. **Hydrological Sciences Journal**, v. 61, n. 2, p. 245–254, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/02626667.2015.1008482>. Acesso em: 13 maio 2025.

MANN, H. B. Nonparametric Tests Against Trend. **Econometrica**, v. 13, n. 3, p. 245, 1945. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/1907187>. Acesso em: 24 mar. 2025.

MARENGO, J. A. *et al.* Increased climate pressure on the agricultural frontier in the Eastern Amazonia–Cerrado transition zone. **Scientific Reports**, v. 12, n. 1, p. 457, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-04241-4>. Acesso em: 27 maio 2025.

MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A.; CULF, A. D. Climatic Impacts of “Friagens” in Forested and Deforested Areas of the Amazon Basin. **Journal of Applied Meteorology**, v. 36, n. 11, p. 1553–1566, 1997. Disponível em: [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1997\)036<1553:CIOFIF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1997)036<1553:CIOFIF>2.0.CO;2). Acesso em: 19 abr. 2025.

MARENGO, J. A. *et al.* Changes in Climate and Land Use Over the Amazon Region: Current and Future Variability and Trends. **Frontiers in Earth Science**, v. 6, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00228>. Acesso em: 24 maio 2025.

MARENGO, J. A. *et al.* Long-term variability, extremes and changes in temperature and hydrometeorology in the Amazon region: A review. **Acta Amazonica**, v. 54, n. spe1, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1809-4392202200980>. Acesso em: 15 maio 2025.

MEHARE, H. B.; ANILKUMAR, J. P.; USMANI, N. A. The Python Programming Language. **A Guide to Applied Machine Learning for Biologists**. Cham: Springer International Publishing, p. 27–60, 2023. Disponível em: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-22206-1\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-031-22206-1_2). Acesso em: 25 maio 2025.

MOURA, M. M. Relation of El Niño and La Niña phenomena to precipitation, evapotranspiration and temperature in the Amazon basin. **Science of The Total Environment**, v. 651, p. 1639–1651, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.242>. Acesso em: 27 maio 2025.

NOBRE, C. A. *et al.* Land-use and climate change risks in the Amazon and the need of a novel sustainable development paradigm. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 113, n. 39, p. 10759–10768, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1073/pnas.1605516113>. Acesso em: 24 maio 2025.

O’CONNOR, Z. Environmental color interventions on a macro scale: Tactical urbanism and issues of global concern. **Color Research & Application**, v. 48, n. 5, p. 578–584, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/col.22845>. Acesso em: 25 maio 2025.

PENEREIRO, J. C.; BADINGER, A.; MACCHERI, N. A.; MESCHIATTI, M. C. Distribuições de Tendências Sazonais de Temperatura Média e Precipitação nos Biomas Brasileiros. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, n. 1, p. 97–113, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/0102-7786331012>. Acesso em: 27 maio 2025.

PETTITT, A. N. A Non-Parametric Approach to the Change-Point Problem. **Applied Statistics**, v. 28, n. 2, p. 126, 1979. Disponível em: <https://doi.org/10.2307/2346729>. Acesso em: 19 mar. 2025.

RAHIMI, J.; LAUX, P.; KHALILI, A. Assessment of climate change over Iran: CMIP5 results and their presentation in terms of Köppen–Geiger climate zones. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 141, n. 1–2, p. 183–199, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03190-8>. Acesso em: 25 maio 2025.

RAIOL, L. L. *et al.* Assessment of Urban Heat Islands in an Eastern Amazonian city. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. XLVIII-3–2024, p. 437–443, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-3-2024-437-2024>. Acesso em: 24 maio 2025.

REBOITA, M. S. *et al.* Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 2, p. 185–204, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0102-77862010000200004>. Acesso em: 11 mar. 2025.

RITCHIE, P. D. L. *et al.* Increases in the temperature seasonal cycle indicate long-term drying trends in Amazonia. **Communications Earth & Environment**, vol. 3, no. 1, p. 199, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00528-0>. Acesso em: 15 abr. 2025.

RYBSKI, D.; NEUMANN, J. A Review on the Pettitt Test. **In Extremis**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, p. 202–213, 2011. Disponível em: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-14863-7\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-642-14863-7_10). Acesso em: 13 maio 2025.

SANTOS DE LIMA, L. *et al.* Severe droughts reduce river navigability and isolate communities in the Brazilian Amazon. **Communications Earth & Environment**, v. 5, n. 1, p. 370, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/s43247-024-01530-4>. Acesso em: 27 maio 2025.

SEN, P. K. Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. **Journal of the American Statistical Association**, v. 63, n. 324, p. 1379–1389, 1968. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>. Acesso em: 25 maio 2025.

SERINALDI, F.; KILSBY, C. G. The importance of prewhitening in change point analysis under persistence. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 30, n. 2, p. 763–777, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00477-015-1041-5>. Acesso em: 14 maio 2025.

SHAHFAHAD; BINDAJAM, A. A. *et al.* Analysing diurnal temperature range and extreme temperature events over Delhi and Mumbai mega cities. **Natural Hazards**, v. 120, n. 10, p. 9267–9295, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11069-023-06077-9>. Acesso em: 22 maio 2025.

SONG, B.; PARK, K. Temperature trend analysis associated with land-cover changes using time-series data (1980–2019) from 38 weather stations in South Korea. **Sustainable Cities and Society**, v. 65, p. 102615, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11069-023-06077-9>. Acesso em: 24 maio 2025.

THAM, S. *et al.* Indoor temperature and health: a global systematic review. **Public Health**, v. 179, p. 9–17, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.puhe.2019.09.005>. Acesso em: 25 maio 2025.

VERMA, S.; PRASAD, A. D.; VERMA, M. K. Trends of Rainfall and Temperature over Chhattisgarh During 1901-2010. In: **Advanced Modelling and Innovations in Water Resources Engineering**. RAO, C. M.; PATRA, K. C.; JHAJHARIA, D.; KUMARI, S. (eds.). Lecture Notes in Civil Engineering, vol. 176. Springer, 2022. p. 3-19. Disponível em: [https://doi.org/10.1007/978-981-16-4629-4\\_1](https://doi.org/10.1007/978-981-16-4629-4_1). Acesso em: 12 maio 2025.

VICTORIA, R. L. *et al.* Surface Air Temperature Variations in the Amazon Region and Its Borders during This Century. **Journal of Climate**, v. 11, n. 5, p. 1105–1110, 1998. Disponível em: [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1998\)011<1105:SATVIT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1998)011<1105:SATVIT>2.0.CO;2). Acesso em: 27 maio 2025.

YUE, S.; PILON, P.; CAVADIAS, G. Power of the Mann–Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series. **Journal of Hydrology**, v. 259, n. 1-4, p. 254–271, 2002. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00594-7](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00594-7). Acesso em: 12 mar. 2025.

ZARENISTANAK, M.; DHORDE, A. G.; KRIPALANII, R. H. Trend analysis and change point detection of annual and seasonal precipitation and temperature series over southwest Iran. **Journal of Earth System Science**, v. 123, n. 2, p. 281–295, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s12040-013-0395-7>. Acesso em: 25 maio 2025.