



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbge>



Aplicação do Método Análise de Tendência Inovadora (ITA) para detecção de tendências da precipitação anual e sazonal na Região Metropolitana do Recife

Jonas Onis Pessoa¹, Anderson Matheus de Sousa Lima², Jocimar Coutinho Rodrigues Junior¹, Ester Milena dos Santos¹, Jonatan Onis Pessoa³, Leidjane Maria Maciel de Oliveira⁴, Sylvana Melo dos Santos⁴, Anderson Luiz Ribeiro de Paiva⁴

¹Doutorandos do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil - PPGE (Recursos Hídricos), Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, Avenida da Arquitetura, s/n, Cidade Universitária, Recife, PE, CEP: 50740-550, jonas.pessoa@ufpe.br (autor correspondente), jocimar.junior@ufpe.br, esthermillena22@gmail.com. ²Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental - PPGECA (Recursos Hídricos), Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, Rua Aprígio Veloso, 882, Bairro Universitário, Campina Grande, PB, CEP: 58429-900, anderson.m.sousa@estudante.ufcg.edu.br. ³Mestre em Saneamento Ambiental, BR 230, KM 7, S/N, Zona Rural, Humaitá - AM, 6980-000, jonatan.pessoa@ifam.edu.br. ⁴Professores do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental - DECIV/UFPE, docentes do PPGE/UFPE, Av. da Arquitetura, s/n - Cidade Universitária, Recife - PE, 50740-550. (81) 2126- 8200. leidjane.oliveira@ufpe.br, sylvana.melo@ufpe.br, anderson.paiva@ufpe.br.

Artigo recebido em 10/08/2023 e aceito em 06/12/2023

RESUMO

A análise de tendências de chuvas é de suma importância para a gestão dos recursos hídricos e de riscos associados a eventos hidrológicos extremos (secas e enchentes), sobretudo em áreas urbanas densamente povoadas. Neste sentido, o presente estudo teve como objetivo principal aplicar o método inovador ITA e os métodos tradicionais Mann-Kendall (MK) e Sen's Slope (SS), ao nível de significância de 5%, para detectar tendências na precipitação anual e sazonal de quatro postos da Região Metropolitana do Recife (RMR), no período de 1991 a 2020. Na escala anual, os dois tipos de métodos identificaram tendências crescentes e decrescentes, mas quase todas estatisticamente insignificantes. Em contraste, para a precipitação sazonal, o MK e o ITA mostraram, respectivamente, tendências significativas em 15 (93,75%) e 16 (100%) séries temporais. No verão, inverno e primavera observou-se tendências decrescentes, e no outono notou-se tendência crescente, o que pode potencializar os riscos de deslizamentos e enchentes na transição outono-inverno na RMR. O ITA mostrou-se confiável e robusto para a detecção de tendências, visto que o mesmo foi capaz de identificar todas as tendências significativas apontadas pelo MK, além de revelar outras ocultas pelo método tradicional. A abordagem inovadora possibilitou investigar tendências em diferentes categorias de chuva (baixa, média e alta), fornecendo informações úteis quanto às secas (baixa precipitação) e enchentes (alta precipitação). Ademais, como vantagens em relação aos testes clássicos, o ITA independe de autocorrelação, normalidade e comprimento dos dados, cujos benefícios têm propiciado o crescente interesse e o uso do ITA no mundo.

Palavras-chave: Mudanças climáticas, Urbanização, Pernambuco, Mann-Kendall.

Application of the Innovative Trend Analysis (ITA) Method for detecting trends in annual and seasonal rainfall in the Metropolitan Region of Recife

ABSTRACT

The analysis of rainfall trends is extremely important for the water resources and risks management associated with extreme hydrological events (such as droughts and floods), especially in densely populated urban areas. Thus, the main objective of this study was to apply the innovative ITA method and the traditional Mann-Kendall (MK) and Sen's Slope (SS) methods, at the significance level of 5%, to detect trends in annual and seasonal precipitation at four stations in the Metropolitan Region of Recife (MRR), from 1991 to 2020. On an annual scale, the two types of methods identified increasing and decreasing trends, but almost all were statistically insignificant. In contrast, for seasonal precipitation, MK and ITA showed, respectively, significant trends in 15 (93.75%) and 16 (100%) time series. In summer, winter, and spring, decreasing trends were observed, and in autumn, an increasing trend was noted, which may increase the risks of landslides and floods during the autumn-winter transition in MRR. ITA proved to be reliable and robust for trend detecting, as it was able to identify all the significant trends indicated by MK, as well as reveal others hidden by the traditional method. The innovative approach allowed investigating trends in different categories of rainfall (low, medium, and high), providing useful information regarding droughts (low rainfall) and floods (high rainfall). Also, as advantages over classical tests, ITA is independent of autocorrelation, normality and data length, whose benefits have led to the growing interest and use of ITA worldwide.

Keywords: Climate changes, urbanization, Pernambuco, Mann-Kendall.

Introdução

Ao longo dos anos, as mudanças climáticas intensificam eventos extremos que impactam diversas áreas urbanas. Prevê-se que até 2050 dois terços da população mundial viverão nessas áreas (ONU, 2018). Locais em que eventos como ondas de calor, fortes precipitações, secas e ciclones tropicais ocorrem com maior frequência desde 1950, resultando em perdas econômicas, interrupção de serviços públicos, danos em infraestrutura e impactos negativos no bem-estar da população (IPCC, 2023).

Essa tendência de avanço da urbanização ocorre em uma configuração territorial e populacional que a interação de vulnerabilidade, exposição e perigo aumentam os riscos da ocorrência de graves desastres. Um exemplo é a recorrência desses efeitos no Brasil, em que fatores climáticos e geofísicos das ocupações urbanas favorecem desastres associados a deslizamentos de terra e inundações, estimando-se que cerca de 9 em cada 100 habitantes vivem sob esse risco (Alvalá et al., 2019).

Em algumas capitais do Nordeste brasileiro a ocupação residencial de áreas de encostas e de várzeas, junto a recorrência de eventos de precipitação extrema, agravam os efeitos desses desastres (Oliveira e Lima, 2019; Costa et al., 2020), mesmo não havendo tendência de aumento de precipitações anuais (da Silva Monteiro et al., 2022; Oliveira-Júnior et al., 2022). O Estado de Pernambuco apresenta uma grande variabilidade de distribuição espacial e temporal de chuvas, especificamente na Região Metropolitana do Recife (RMR). Por localizar-se na Zona da Mata litorânea, a RMR apresenta um clima caracterizado como tropical úmido, marcado por forte gradiente pluviométrico anual de oeste a leste, de 700 a 1500 mm, e estação chuvosa entre maio e julho, com tendência de mudança no regime de chuvas para distribuição mais regular e períodos secos mais curtos (Alvares et al., 2013; Araújo et al., 2023).

De maneira mais específica, a RMR também apresenta a maior densidade populacional e urbana do Estado. A capital Recife apresenta a quinta maior concentração urbana do país, cerca de 3.783.101 habitantes, além disso, 11 dos 14 municípios da RMR apresentaram crescimento populacional expressivo entre o censo de 2010 e 2022 (IBGE, 2022). Essa alta densidade urbana com habitações em áreas de risco, morros e encostas, junto a precipitações pontuais cada vez mais intensas, favorecem a ocorrência de desastres. Uma situação grave foi o que ocorreu no mês de maio de 2022, em que a precipitação acumulada de 5 dias desse mês (551 mm) superou a climatologia em 150 mm, o que resultou na decretação de

estados de emergência nos 14 municípios que integram a RMR, em que se contabilizou cerca de 119.223 pessoas impactadas no Estado (Marengo et al., 2023).

Tendo em vista a complexidade da situação e da possibilidade de ocorrência com efeitos graves, a implementação de soluções não é fácil dada os múltiplos aspectos associados ao problema. No campo associado a estudos de precipitação, podem ser utilizadas as análises nas variações de padrões e possíveis tendências, em escalas temporais e espaciais, da série histórica, de modo a auxiliar a coordenação de ações. Comumente, empregam-se métodos tradicionais como o teste não-paramétricos de Mann-Kendall para qualificar as tendências, e o estimador Sen's Slope para quantificar a magnitude dessas tendências.

Globalmente, Shigute et al. (2023) avaliaram tendências de precipitação e temperatura para a gestão de águas agrícolas entre 1975 e 2018, dadas algumas características das culturas. Diante dos eventos de monções em Punjab, na Índia, Kumar et al. (2021) observaram tendências crescentes para precipitações anuais analisando dados de 1981 a 2020. Alguns estudos vêm sendo desenvolvidos no Estado de Pernambuco como o de Bezerra et al. (2022), que avaliaram tendências com Mann-Kendall para índices de vegetação, observando uma redução significativa no período de 2000 a 2019 para a região litorânea. Já Bezerra et al. (2021) apontaram decréscimos de precipitação para a zona litorânea na ordem de 204 mm não significativos utilizando Mann-Kendall e Sen's Slope com dados de 1987 e 2019.

A aplicação dos métodos tradicionais restringe-se ao cumprimento de alguns pressupostos como a independência e a normalidade das séries temporais (Wang et al., 2020). Diante da realidade brasileira de séries históricas de precipitações curtas e com muitas falhas, o emprego dos métodos tradicionais pode não ser consistente quanto a análise das suposições, sendo uma das alternativas e associação que agrega informações a utilização do método de Análise de Tendência Inovadora (ITA, na sigla em inglês, *Innovative Trend Analysis*).

Dentre as vantagens do ITA pode-se pontuar sua simplicidade, intuitividade, empregado independentemente das hipóteses de distribuição e permissão da inspeção sobre a existência de subcategorias de baixos, médios e alto de precipitações (Dong et al., 2020). Nesse contexto, Cui et al. (2017) e Wang et al. (2020) analisaram tendências de precipitação e temperatura anuais, mínimas, máximas e médias para 12 estações meteorológicas na bacia de Yangtze na China.

Phuong et al. (2022) notaram subgrupos de tendência significativamente crescentes da média, mínimas e máximas precipitações para a região no Vietnã. Na avaliação de Chowdari et al. (2023), observaram-se tendências significativas com o ITA para os dados anuais e sazonais o que não foi verificado com os métodos tradicionais.

Posto a possibilidade da análise de tendência subsidiar ações que minimizem as consequências das precipitações intensas em áreas urbanas, este estudo visa avaliar a variabilidade e tendências da precipitação na RMR, por meio da associação da aplicação dos métodos tradicionais de Mann-Kendall (MK) e Sen's Slope (SS) e o método de Análise de Tendência Inovadora (ITA), para identificar tendências na precipitação anual e sazonal em quatro postos da RMR, com dados de precipitação no período de 1991 a 2020.

Metodologia

Área de estudo

O objeto de estudo é a RMR, localizada no Estado de Pernambuco (Figura 1). Essa região é

uma das importantes áreas administrativas do Estado, sendo instituída pela Lei Complementar nº 382, de 9 de janeiro de 2018 (Pernambuco, 2018). Além da capital Recife, essa área abrange 13 municípios pernambucanos: Abreu e Lima, Araçoiaba, Cabo de Santo Agostinho, Camaragibe, Igarassu, Ilha de Itamaracá, Ipojuca, Itapissuma, Jaboatão dos Guararapes, Moreno, Olinda, Paulista e São Lourenço da Mata (Figura 1).

Ademais, a RMR possui área de 2.714,87 km² e cerca de 3.686.442 habitantes, com densidade demográfica de 1.357,87 hab/km² (IBGE, 2022). Além disso, insere-se em um bioma de Mata Atlântica, caracterizado por precipitações anuais acima de 1.000 mm e por ambientes costeiros e litorâneos que vêm sendo ameaçados pelas pressões antrópicas de usos e ocupação (IBGE, 2019). A Figura 2 apresenta os dados de uso e ocupação do solo na região para os anos de 1990, 2005 e 2020, onde é possível observar uma redução das áreas destinadas a agropecuária, em torno de 27,69%, e um aumento de cerca de 39,18% nas áreas de florestas naturais e de 170,59% na urbanização.

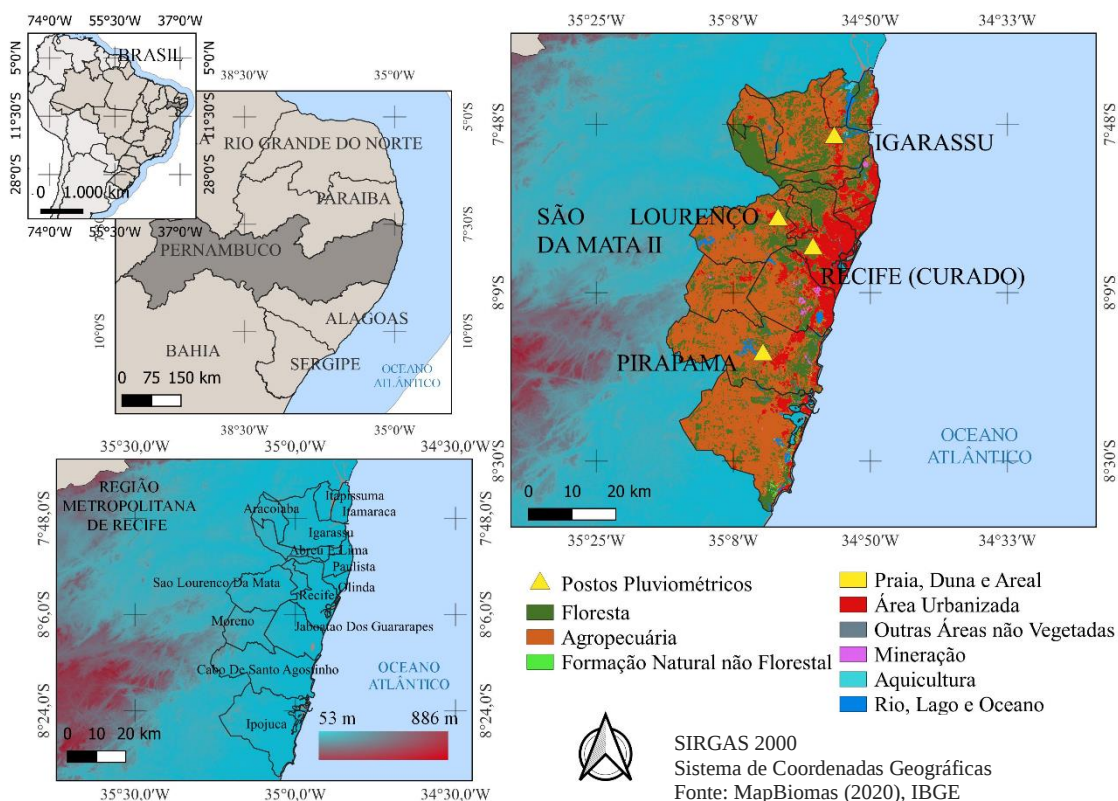


Figura 1. Objeto de estudo e localização dos postos pluviométricos para aquisição da série de precipitação.

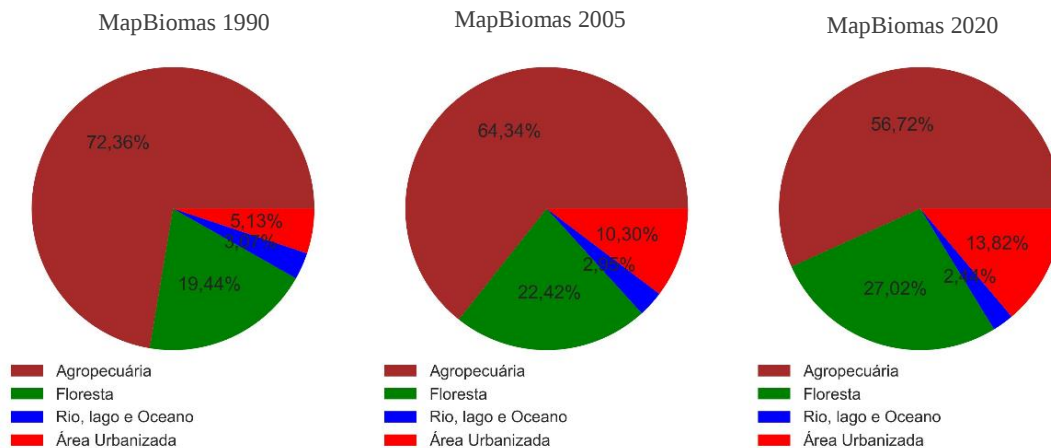


Figura 2. Percentual de uso e ocupação do solo ao longo dos anos na RMR.

O processo de pressão urbana sob os recursos ambientais na RMR foi conduzido em dois movimentos a expansão de um núcleo central que se irradia pelos eixos de ligação centro e periferia, levando após a expansão de núcleos secundários (IPEA, 2015). Com a ocupação de áreas de várzeas e encostas propensas a inundações e deslizamentos, a investigação de tendências anuais e sazonais nas séries de precipitações pode auxiliar na condução da gestão das águas e ocupação dessas localidades.

Variabilidade e tendências da precipitação

Neste estudo, analisaram-se tendências em séries temporais de precipitação anual e sazonal, no

período de 1991 a 2020, observadas em quatro postos na RMR (Tabela 1). Os principais critérios para a escolha desses postos foram a disponibilidade de, no mínimo, 30 anos de dados, em período comum entre os postos consultados na APAC (2023), INMET (2023) e ANA (2023), e o menor percentual de falhas. Na análise de tendências de precipitação sazonal, os dados foram organizados em estações, conforme descrito em Bezerra et al. (2021) e Aragão e Duarte (2023), sendo: verão (dezembro, janeiro e fevereiro - DJF), outono (março, abril e maio - MAM), inverno (junho, julho e agosto - JJA) e primavera (setembro, outubro, e novembro - SON).

Tabela 1. Dados dos postos pluviométricos utilizados.

Código	Posto	Município	Lat.	Long.	Elevação (mm)	Falhas (%)	Fonte
100	Igarassu	Igarassu	-7,8281	-34,9150	31,0	1,36	APAC
82900	Recife (Curado)	Recife	-8,0592	-34,9592	11,3	0,83	INMET
835048	São Lourenço da Mata II	São Lourenço da Mata	-7,9986	-35,0319	70,0	1,36	ANA
835138	Pirapama	Cabo de Santo Agostinho	-8,2792	-35,0633	30,0	2,69	ANA

Fonte: Autores.

Para examinar a variabilidade da precipitação, foram determinados os valores mínimo, máximo, média, mediana, desvio-padrão e coeficiente de variação, os quais foram apresentados na forma de tabelas e/ou gráficos. Na análise de tendências, foco principal da presente pesquisa, dois métodos tradicionais, os testes não paramétricos de Mann-Kendall – MK e o estimador de Inclinação de Sen – SS (*Sen's Slope*), foram empregados para verificar a validade do método de Análise de Tendência Inovadora – ITA (),

desenvolvido por Sen (2012). Os testes não paramétricos de MK e SS foram executados usando o pacote “Trend” do *software* de acesso aberto R (versão 4.2.2.). Já para a Análise de Tendência Inovadora, a manipulação e processamento dos dados foram desenvolvidos em linguagem Python (versão 3.10.2.). Em todos os testes estatísticos adotou-se o nível de significância (α) de 5% de probabilidade.

Métodos para análise de tendências de precipitação

Análise de Tendência Inovadora – ITA

O método ITA consiste inicialmente na divisão de uma série temporal em duas metades, com duas subséries classificadas distintamente e em ordem crescente. No sistema de plano cartesiano, a primeira subsérie (x) é plotada no eixo X e a segunda subsérie (y), no eixo Y (Figura 3). A dispersão dos dados deve ser comparada com a linha 1:1 (45°), sendo que a tendência é crescente

se os pontos ficam acima da linha 1:1 e, decrescente quando ficam abaixo. Se os pontos de dados estiverem postos concentrados na linha reta 1:1 (isto é, as duas subséries forem análogas), então não existe tendência (Sen, 2012; Dong et al., 2020). A linha tracejada preta, paralela à linha contínua 1:1, é chamada de linha de dados, com o centroide (x, y) nesta linha. A diferença vertical entre a linha de dados e a linha 1:1 tem relação com a inclinação da tendência que a variável dependente possui (Sen, 2017).

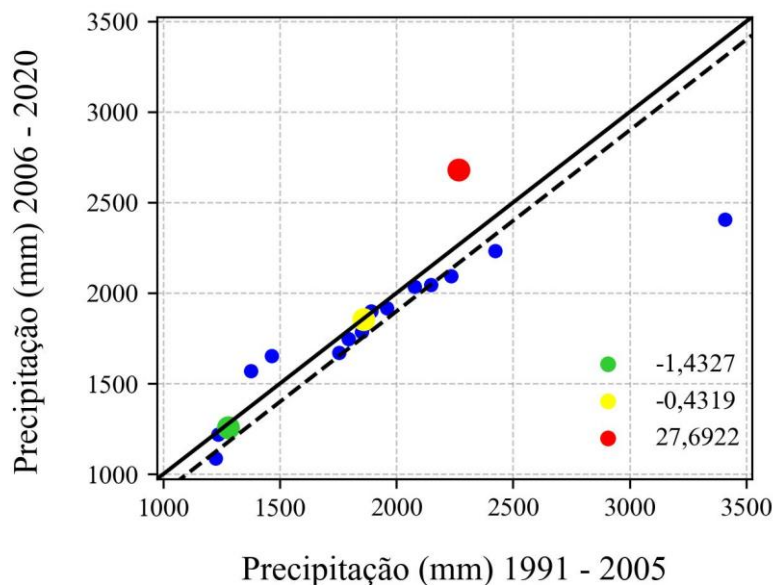


Figura 3. Ilustração do método de análise de tendências inovadora (ITA). A linha sólida é a linha sem tendência 45° (1:1) e a linha tracejada é estimada a partir dos dados. Os pontos azuis representam os dados de precipitação. Os pontos verde, amarelo e vermelho denotam os pontos centrais médios das categorias baixa, média e alta, respectivamente. Fonte: Autores.

Como uma de suas grandes vantagens, o ITA viabiliza que sejam detectadas tendências nas classes baixa, média e alta, por meio da posição dos pontos de dados. Assim sendo, a precipitação foi dividida em três categorias baseadas em percentis (Wu e Qian, 2017; Dong et al., 2020), sendo: baixa (< 20°), média (20° - 80°) e alta (> 80°). Essa categorização permite realizar inferências importantes, como por exemplo, baixa precipitação para seca e alta precipitação para inundações.

A inclinação da tendência em linha reta (s) plotado pelo ITA pode ser determinada a partir da Equação 1.

$$s = \frac{2(\bar{y}_2 - \bar{y}_1)}{n} \quad (1)$$

em que, $\bar{y}_1$ é a média aritmética da primeira subsérie e $\bar{y}_2$ é a média aritmética da segunda subsérie; n é a quantidade de pontos de dados; s é

a inclinação da tendência, ou seja, quando o seu valor for positivo, a série temporal apresenta uma tendência crescente, mas caso tenha valor negativo, a tendência é decrescente.

Para analisar a significância da tendência estimada pelo ITA, compara-se a inclinação s com o intervalo de confiança, determinado com base no desvio padrão da inclinação de amostragem e na correlação dos dados. Sempre que a inclinação s da série se encontrar dentro dos limites de confiança (CLs), aceita-se a hipótese nula H_0 - não há tendência significativa. Caso contrário, rejeita-se a hipótese nula e aceita a hipótese alternativa H_a - há tendência significativa. A obtenção dos limites de confiança da inclinação utiliza uma Função de Densidade de Probabilidade – PDF gaussiana, com média zero e desvio padrão, sendo determinados pela Equação 2.

$$CL_{(1-\alpha)} = 0 \pm s_{cri} \times \sigma_s \quad (2)$$

em que, α é o nível de significância (neste trabalho, $\alpha = 5\%$ foi adotado para avaliar a significância das tendências) e s_{cri} é o CL de uma PDF normal padrão com média zero e desvio padrão. Já o σ_s é calculado pela Equação 3.

$$\sigma_s = \frac{2\sqrt{2}}{n\sqrt{n}} \sigma \sqrt{1 - \rho_{\bar{y}_1\bar{y}_2}} \quad (3)$$

em que, $\rho_{\bar{y}_1\bar{y}_2}$ é o coeficiente de correlação entre os dois valores médios em processos estocásticos, e é determinado pela Equação 4.

$$\rho_{\bar{y}_1\bar{y}_2} = \frac{E(\bar{y}_1 \bar{y}_2) - E(\bar{y}_1)E(\bar{y}_2)}{\sigma_{y_1}\sigma_{y_2}} \quad (4)$$

Teste de Mann-Kendall

O teste não-paramétrico de Mann-Kendall é muito utilizado para avaliar a significância das tendências em séries temporais meteorológicas no mundo. A vantagem desse método está na possibilidade de abordar não-normalidades, como valores ausentes ou dados incomuns (Ullah et al., 2019; Dong et al., 2020). A estatística do teste de tendência Z é estimado pelas Equações 5, 6, 7 e 8.

$$Z = \begin{cases} \frac{S - 1}{\sqrt{Var(S)}}; & \text{para } S > 0 \\ 0; & \text{para } S = 0 \\ \frac{S + 1}{\sqrt{Var(S)}}; & \text{para } S < 0 \end{cases} \quad (5)$$

onde:

$$Var(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (6)$$

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n Sinal(X_j - X_k) \quad (7)$$

$$Sinal(X_j - X_k) = \begin{cases} +1; & \text{para } (X_j - X_k) > 0 \\ 0; & \text{para } (X_j - X_k) = 0 \\ -1; & \text{para } (X_j - X_k) < 0 \end{cases} \quad (8)$$

em que, n representa o comprimento da série temporal $X_1, \dots, X_n$, sendo X_j e X_k os valores dos dados nos anos j e k . Um valor de Z positivo

(negativo) corresponde a uma tendência crescente (decrescente); caso o valor absoluto de Z seja maior que $Z_{1-\alpha/2}$, mostra-se que há uma tendência significativa. Neste estudo, o valor de $Z_{1-\alpha/2} = \pm 1,96$ (ao nível de 95%) foi empregado para avaliar a significância das tendências.

Teste de Sen's slope

O teste de Sen's Slope foi desenvolvido por Sen (1968) e comumente utilizado com o objetivo de estimar a magnitude da tendência em séries de dados meteorológicos a partir de um estimador de inclinação β definido pela Equação 9 (Ahmad et al., 2023).

$$\beta_i = \text{mediana} \left(\frac{X_j - X_k}{j - k} \right) \forall (k \leq j) \quad (9)$$

A inclinação de Sen (β), para os valores n , tanto pares, quanto ímpares, pode ser calculada por meio das Equações 10 e 11, respectivamente.

$$\beta_{med} = \beta_{[(n+1)/2]}; \text{ se } n \text{ for par} \quad (10)$$

$$\beta_{med} = \frac{1}{2} (\beta_{[n/2]} + \beta_{[(n+2)/2]}); \text{ se } n \text{ for ímpar} \quad (11)$$

em que, X_j e X_k são referentes aos valores de dados nos momentos j e k ($j > k$), respectivamente. Os valores de β_i positivos (negativos) correspondem às tendências crescentes (decrescentes) ao longo do tempo.

Resultados e Discussão

Variabilidade da precipitação

Para o período de 1991 a 2020, observa-se uma flutuação expressiva da precipitação anual total nos quatro postos da RMR, com valores oscilando entre 988,4 e 3435,9 mm, e média de aproximadamente 1900 mm (Figura 4). Em 2000 e 2011, categorizados como anos de ocorrência de La Niña forte, foram constatados os volumes mais acentuados de chuva da série temporal. Em contraste, o ano mais seco (1998) pode ser possivelmente explicado, dentre outros fatores, pela atuação do fenômeno El Niño de intensidade muito forte. Esses resultados são consistentes com outros autores que estudaram a variabilidade da precipitação em Pernambuco e outras partes do Nordeste brasileiro (Souza et al., 1999; Girão et al., 2006; Rodrigues et al., 2017; Guedes e Silva, 2020, Silva et al., 2022).

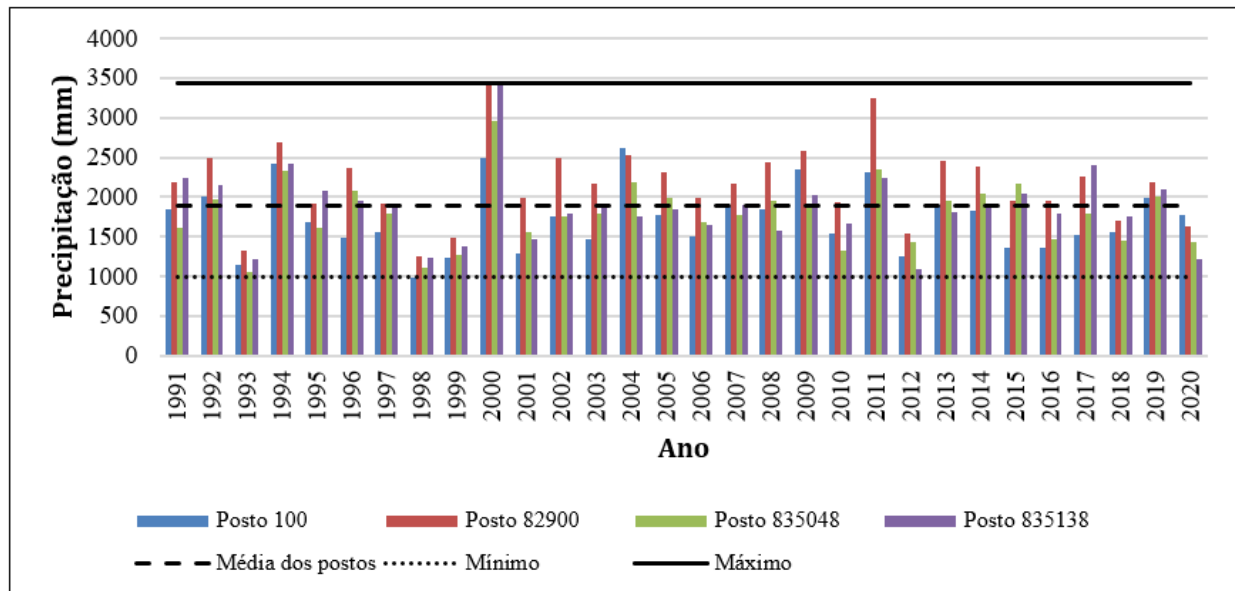


Figura 4. Precipitação anual (1991-2020) dos postos utilizados na área de estudo. Fonte: Autores.
Legenda: 100: Igarassu; 82900: Recife (Curado); 835048: São Lourenço da Mata II; 835138: Pirapama.

Na Tabela 2 têm-se as estatísticas descritivas da precipitação anual acumulada e mensal total. Em ambas as escalas de tempo, o posto Recife (Curado) apresentou a maior pluviosidade média, mediana e máxima, com grande dispersão dos dados indicada pelo desvio-padrão. Como esperado, o coeficiente de variação (CV) da chuva anual foi inferior ao da chuva mensal. Segundo Silva et al. (2003), os valores

mais elevados dos CV das precipitações mensais, comparativamente às anuais, ocorre por essa última ser a somatória de toda a precipitação do ano.

Assim, meses relativamente secos em determinados anos são compensados por precipitações de meses chuvosos e, no total, os valores finais anuais são mais uniformes do que os valores de precipitação intra-anuais.

Tabela 2. Estatística descritiva da precipitação total anual (mm) e mensal (mm) em postos da RMR, no período de 1991 a 2020.

Período	Posto	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	DP	CV
Anual	Igarassu (Posto 100)	988,40	2622,90	1726,64	1724,55	407,21	0,24
	Recife (Curado) (Posto 82900)	1249,70	3435,90	2165,08	2177,80	485,47	0,22
	São Lourenço da Mata II (Posto 835048)	1057,50	2966,50	1793,00	1792,70	395,42	0,22
	Pirapama (Posto 835138)	1089,00	3408,80	1862,48	1853,20	445,30	0,24
Mensal	Igarassu (Posto 100)	0,00	609,40	143,89	109,65	126,83	0,88
	Recife (Curado) (Posto 82900)	4,50	755,70	180,42	140,75	151,26	0,84
	São Lourenço da Mata II (Posto 835048)	0,00	610,70	149,42	113,35	124,63	0,83
	Pirapama (Posto 835138)	0,00	623,70	155,21	116,75	139,40	0,90

Fonte: Autores.

Legenda: DP (desvio-padrão); CV (coeficiente de variação).

A partir da Figura 5, nota-se que nos postos analisados, os meses de maio, junho e julho constituem o trimestre de maior volume pluviométrico, com pico em junho. Já o trimestre

com menor volume de precipitação é composto pelos meses de outubro, novembro e dezembro, cujas observações estão de acordo com Marengo et al. (2023).

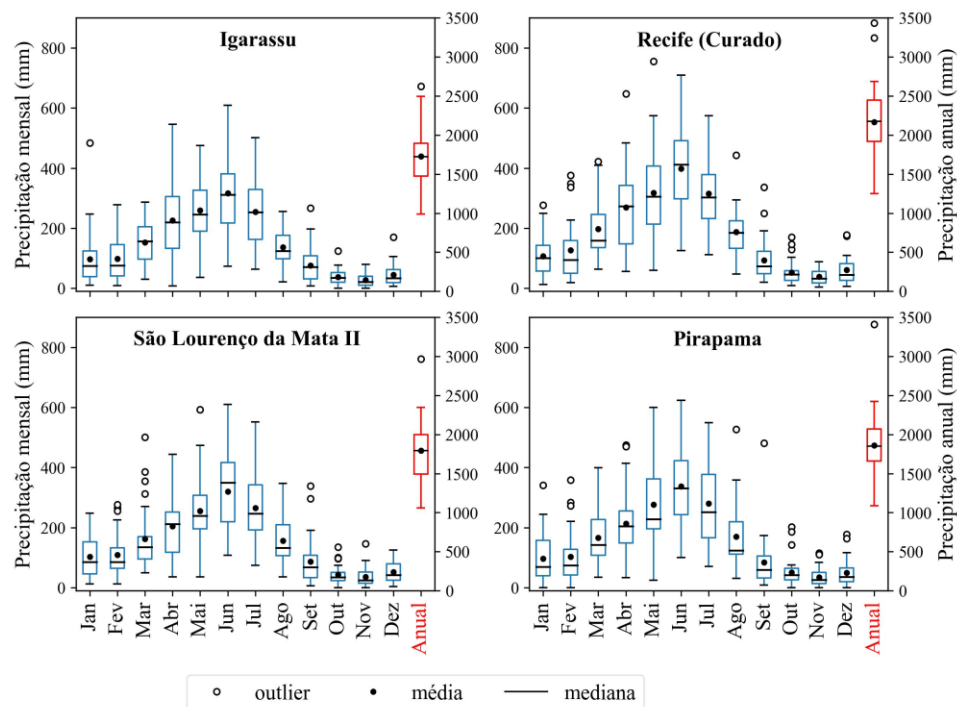


Figura 5. Gráfico *boxplot* da precipitação total mensal e total anual (1991-2020) nos postos pluviométricos na RMR. Fonte: Autores.

Legenda: 100: Igarassu; 82900: Recife (Curado); 835048: São Lourenço da Mata II; 835138: Pirapama.

Sazonalmente, o inverno (JJA) e a primavera (SON) representam, respectivamente, as estações mais úmidas e secas da área de estudo (Tabela 3 e Figura 6), corroborando com Araújo et al. (2023), que realizaram uma análise da sazonalidade das chuvas em Pernambuco. De modo geral, nas estações chuvosas (outono e inverno) os coeficientes de variação foram

menores em comparação com os coeficientes de variação nas estações mais secas, verão e primavera (Tabela 3). Comportamento similar também foi reportado por Rodrigues et al. (2023) ao avaliarem a precipitação pluviométrica mensal e anual e períodos de seca no município de Guarabira-PB, entre os anos de 1994 a 2020.

Tabela 3. Estatística descritiva da precipitação sazonal (mm) em postos da RMR, no período de 1991 a 2020.

Período	Posto	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	DP	CV
Verão	Igarassu (Posto 100)	6,60	484,40	80,07	58,80	74,87	0,94
	Recife (Curado) (Posto 82900)	6,50	376,10	98,63	81,95	78,03	0,79
	São Lourenço da Mata II (Posto 835048)	4,30	276,80	87,79	75,10	63,67	0,73
	Pirapama (Posto 835138)	0,00	358,90	83,19	58,60	77,98	0,94
Outono	Igarassu (Posto 100)	7,90	546,10	212,69	211,35	114,81	0,54
	Recife (Curado) (Posto 82900)	55,80	755,70	261,01	232,40	138,91	0,53
	São Lourenço da Mata II (Posto 835048)	35,50	592,63	207,69	192,65	113,22	0,55
	Pirapama (Posto 835138)	24,30	600,00	218,79	198,05	125,70	0,57
Inverno	Igarassu (Posto 100)	21,80	609,40	235,60	212,65	130,38	0,55
	Recife (Curado) (Posto 82900)	46,80	709,00	300,38	280,55	147,03	0,49
	São Lourenço da Mata II (Posto 835048)	36,10	610,70	246,72	225,35	129,03	0,52
	Pirapama (Posto 835138)	30,50	623,70	262,29	243,55	146,32	0,56
Primavera	Igarassu (Posto 100)	0,00	267,20	47,20	35,70	44,64	0,95
	Recife (Curado) (Posto 82900)	4,50	336,10	61,67	49,65	53,26	0,86
	São Lourenço da Mata II (Posto 835048)	0,00	339,10	55,48	35,35	55,93	1,01
	Pirapama (Posto 835138)	0,00	481,10	56,55	38,70	63,33	1,12

Fonte: Autores.

Legenda: DP (desvio-padrão); CV (coeficiente de variação).

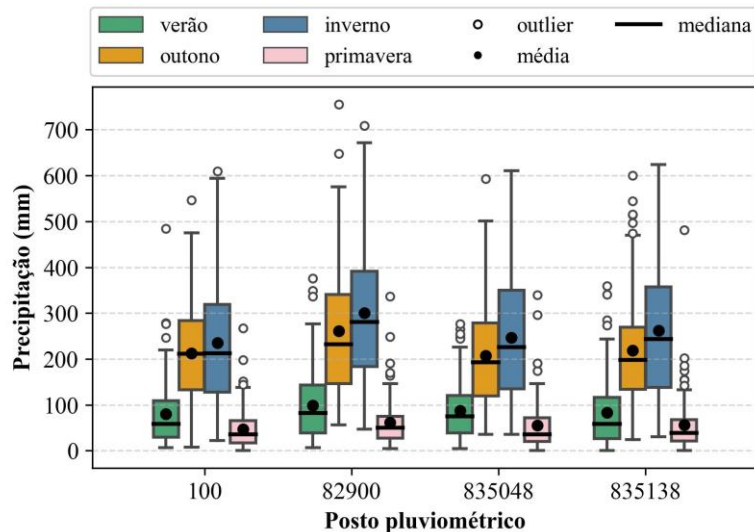


Figura 6. Gráfico *boxplot* da precipitação sazonal (1991-2020) em postos pluviométricos na RMR. Fonte: Autores.

Legenda: 100: Igarassu; 82900: Recife (Curado); 835048: São Lourenço da Mata II; 835138: Pirapama.

Tendência da precipitação anual

Na Tabela 4 estão apresentados os resultados dos testes de MK e SS aplicados aos acumulados de precipitação anual nos postos pluviométricos na RMR, no período de 1991 a 2020. Com base nesta tabela, constata-se que nenhum posto exibiu tendência significativa, visto que os resultados do p-valor foram superiores ao

nível de significância ($\alpha = 0,05$) adotado no presente estudo. Essa ausência de tendência significativa pode estar relacionada à grande variabilidade da precipitação anual, que registrou valores baixos e elevados com certa alternância no período de monitoramento (Tabela 2 e Figura 4).

Tabela 4. Resultados dos testes de Mann-Kendall e Inclinação de Sen, ao nível de significância de 0,05, para precipitação total anual (1991-2020) dos postos pluviométricos na RMR.

Posto	Teste Mann-Kendall			Teste Sen's Slope	
	Z	p-valor	Tendência	Inclinação (mm/ano)	
Igarassu (Posto 100)	0,606	0,544	NS	3,337	NS
Recife (Curado) (Posto 82900)	-0,392	0,694	NS	-3,400	NS
São Lourenço da Mata II (Posto 835048)	0,285	0,775	NS	1,950	NS
Pirapama (Posto 835138)	-0,535	0,592	NS	-4,963	NS

Fonte: Autores.

Legenda: NS (não significativa).

O teste de SS evidenciou magnitudes negativas acima de 3 mm/ano para as estações pluviométricas de Recife (Curado) e Pirapama, enquanto magnitudes positivas superiores a 1,90 mm/ano foram detectadas nas estações de Igarassu e São Lourenço da Mata II (Tabela 4). Contudo, como foram aceitas a hipótese nula ($p\text{-valor} > 0,05$) em todos os postos, nenhuma dessas magnitudes é significativa. Tais resultados, dos testes de MK e SS, estão em consonância com estudos anteriores. Silva Júnior et al. (2020), Bezerra et al. (2021) e

Silva et al. (2022), por exemplo, empregaram metodologias similares e não identificaram tendência estatisticamente significativa em séries anuais de precipitação em postos na RMR, além de outras áreas do Estado de Pernambuco.

A partir da Figura 7 é possível visualizar a distribuição espacial dos resultados dos testes convencionais MK e SS discutidos anteriormente. A cor azul representa as tendências e magnitudes crescentes (positivas) e as demais cores as tendências e magnitudes decrescentes (negativas).

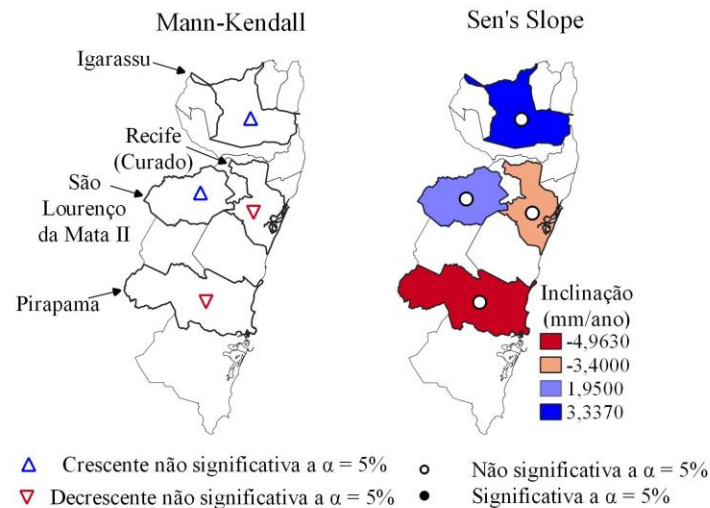


Figura 7. Distribuição espacial dos resultados dos testes convencionais MK e SS, para precipitação total anual (1991-2020), nos postos pluviométricos na RMR. Fonte: Autores.

Na Tabela 5, Figuras 8 e 9, são mostradas as tendências de chuvas anuais de cada posto, obtidas pelo método ITA. Com exceção do posto Pirapama, todos os demais apresentaram tendências estatisticamente insignificantes para a precipitação anual, uma vez que seus valores de inclinação s se mantiveram dentro dos intervalos de confiança (Tabela 5). Tendência de aumento (não

significativa) foi notada apenas para a estação pluviométrica de Igarassu. Para os outros postos foram observadas tendências de diminuição da chuva anual, sobretudo na estação de Pirapama, com inclinação s de -6,72 mm/ano (Tabela 5) e maioria dos pontos de dispersão (ponto azul) concentrados abaixo da linha 1:1 (Figura 9).

Tabela 5. Estatísticas da Análise de Tendência Inovadora (ITA), para precipitação total anual de postos pluviométricos (1991-2020) na RMR.

Posto	Inclinação S	Σ	$\rho_{Y1.Y2}$	σ_s	IC
Igarassu (Posto 100)	0,8700	407,20	0,9738	1,133	$\pm 2,221$
Recife (Curado) (Posto 82900)	-0,5500	485,47	0,9831	1,083	$\pm 2,123$
São Lourenço da Mata II (Posto 835048)	-1,6200	395,41	0,9545	1,450	$\pm 2,842$
Pirapama (Posto 835138)	-6,7200*	445,30	0,9063	2,345	$\pm 4,596$

Legenda: σ (desvio-padrão da série); $\rho_{Y1.Y2}$ (correlação entre as duas metades da série); σ_s (desvio da inclinação); IC (intervalo de confiança); * Estatisticamente significativa a $\alpha = 5\%$ (Z crítico = $\pm 1,96$).

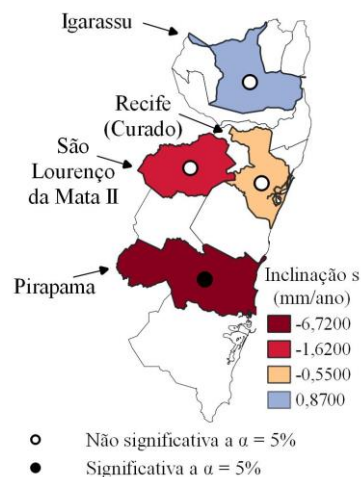


Figura 8. Distribuição espacial dos resultados da inclinação s identificadas pelo método ITA, para precipitação total anual (1991-2020) nos postos pluviométricos na RMR

Legenda: 100: Igarassu; 82900: Recife (Curado); 835048: São Lourenço da Mata II; 835138: Pirapama.

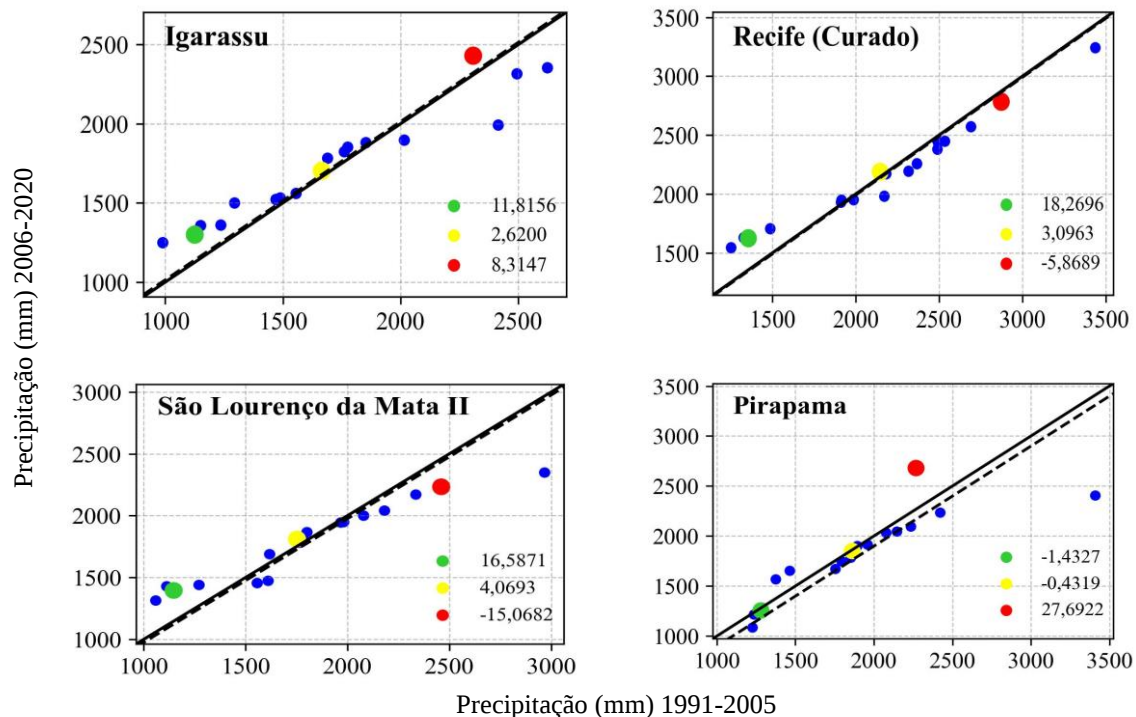


Figura 9. Resultados da Análise de Tendência Inovadora (ITA) para a precipitação total anual (1991 a 2020) em postos pluviométricos na RMR. A linha sólida é a linha sem tendência 45° (1:1) e a linha tracejada é a linha de dados. Os pontos azuis representam os dados de precipitação. Os pontos verde, amarelo e vermelho denotam os pontos centrais médios das categorias baixa, média e alta, respectivamente.

Legenda: 100: Igarassu; 82900: Recife (Curado); 835048: São Lourenço da Mata II; 835138: Pirapama.

No que concerne às três categorias de precipitação (Figura 9), os pontos verde, amarelo e vermelho denotam, respectivamente, os pontos centrais médios (centroides) de baixa, média e alta pluviosidade. Analisando a Figura 9 e a Tabela 6, a categoria “baixas” chuvas na RMR (exceto Pirapama) mostraram tendências crescentes significativas, com inclinação s entre 11,82 a 18,27 mm/ano. Evidenciando que, ao considerar apenas valores de baixa precipitação, as localidades onde estão inseridos os postos de Igarassu, Recife (Curado) e São Lourenço da Mata II demonstram maiores preocupações relacionadas a ampliação dos valores baixos de precipitação.

Em relação à categoria “alta” precipitação, tendência de diminuição significativa foram percebidas para os postos de Recife (Curado) e São Lourenço da Mata II, e tendências de aumento significativas nos postos de Igarassu e Pirapama (Tabela 6 e Figura 9). Portanto, as perspectivas de ocorrências de cheias são mais acentuadas nestes dois últimos postos, especialmente em Pirapama, que apresentou o maior valor de inclinação s (27,69 mm/ano). Para a categoria “média” de chuva, predominaram tendências crescente significativas, exceto para a estação pluviométrica de Pirapama.

No total, três dos quatro postos (São Lourenço da Mata II, Recife (Curado) e Pirapama) apresentaram tendências não monotônicas, ou seja, composição de diferentes tendências (crescente e decrescente) na série temporal (Figura 9). Em contraste, no posto Igarassu foi detectado exclusivamente tendência monotônica de aumento (categorias baixa, média e alta de chuva com tendência crescente), indicando, como já comentado, que articulações voltadas paralelamente ao controle de enchentes e secas devem ser fortalecidas.

De modo semelhante ao verificado no posto Igarassu, Pessoa et al. (2022), ao investigarem possíveis tendências na precipitação total anual em dez postos pluviométricos na bacia do rio Capibaribe, entre 1988 e 2019, reportaram que três postos apresentaram tendências crescentes tanto para valores baixos (seca) quanto para valores de pico (inundação) de precipitação pelo método ITA. Nesse sentido, os autores afirmam que tal fato ilustra bem os desafios e a necessidade de medidas adaptativas de regiões em busca de segurança hídrica frente às mudanças climáticas.

Diante dos resultados apresentados, e considerando que a RMR é bastante susceptível a eventos hidrológicos extremos (Marengo et al.,

2023), cabe inferir que a possibilidade do método ITA, em um único processo, estimar e apresentar graficamente tendências de diferentes categorias de precipitação pode contribuir na gestão eficiente dos recursos hídricos e na mitigação dos riscos associados a secas e enchentes na região. Além da avaliação abrangente do ITA em *clusters* distintos de chuva, o fato do mesmo não exigir independência serial de séries temporais e não apresentar restrições de comprimento dos dados, representa diferenças e vantagens do método inovador em relação aos métodos MK e SS (Sen, 2017; Chowdari et al., 2023).

A Tabela 6 apresenta um comparativo das tendências para a chuva anual pelos métodos tradicionais (MK e SS) e o método inovador ITA. Em geral, observa-se que os métodos clássicos (MK e SS) e o ITA apresentaram resultados de tendências similares para precipitação anual analisadas, porém o emergente método foi mais sensível na detecção de tendências. Esses achados são consistentes com outros autores, como Harka et al. (2021), os quais verificaram que o método ITA foi mais robusto e identificou tendências monotônicas e não monotônicas de chuvas ocultadas pelo MK, na bacia do alto rio Upper Wabe Shebelle, na Etiópia.

Tabela 6. Comparação dos resultados dos métodos MK e ITA, ao nível de significância de 0,05, para séries de precipitação total anual (1991-2020), nos postos pluviométricos na RMR.

Posto	MK	ITA			
	Série inteira	Série inteira	Baixa	Média	Alta
Igarassu (Posto 100)	Não	Não	Sim (+)	Sim (+)	Sim (+)
Recife (Curado) (Posto 82900)	Não	Não	Sim (+)	Sim (+)	Sim (-)
São Lourenço da Mata II (Posto 835048)	Não	Não	Sim (+)	Sim (+)	Sim (-)
Pirapama (Posto 835138)	Não	Sim (-)	Sim (-)	Não	Sim (+)

Legenda: “Sim” (±) aumento ou diminuição significativa e “Não” tendências não significativas a nível de significância de 5%.

Tendência sazonal da precipitação

Além da escala anual, as tendências de precipitação foram avaliadas considerando os acumulados de chuva correspondente às estações

do ano: verão (DJF), outono (MAM), inverno (JJA) e primavera (SON).

As tendências de precipitação sazonal apontadas pelos métodos MK e SS são apresentadas na Tabela 7, Figuras 10 e 11.

Tabela 7. Resultados dos testes de MK e SS, ao nível de significância de 0,05, para precipitação sazonal (1991-2020), em postos pluviométricos na RMR.

Posto	Período	Teste Mann-Kendall			Teste Sen's Slope
		Z	p-valor	Tendência	Inclinação (mm/ano)
Igarassu (Posto 100)	Verão	-2,509*	0,012	Decrescente	-0,4500*
	Outono	3,248*	1,16E-03	Crescente	1,5300*
	Inverno	-5,485*	4,11E-08	Decrescente	-2,6110*
	Primavera	-3,980	6,88E-05	Decrescente	-0,51000*
Recife (Curado) (Posto 82900)	Verão	-2,150*	0,031	Decrescente	-0,5130*
	Outono	3,007*	2,63E-03	Crescente	1,6100*
	Inverno	-5,642*	1,67E-08	Decrescente	-3,4110*
	Primavera	-4,077*	4,54E-05	Decrescente	-0,5570*
São Lourenço da Mata II (Posto 835048)	Verão	-2,485*	0,013	Decrescente	-0,5330*
	Outono	3,568*	3,59E-04	Crescente	1,5820*
	Inverno	-5,001*	5,69E-07	Decrescente	-2,5480*
	Primavera	-3,760*	1,69E-04	Decrescente	-0,5130*
Pirapama (Posto 835138)	Verão	-1,659	0,097	NS	-0,3790
	Outono	3,216*	1,30E-03	Crescente	1,4520*
	Inverno	-5,015*	5,29 E-07	Decrescente	-2,7250*
	Primavera	-3,467*	5,25E-04	Decrescente	-0,5100*

Legenda: * Estatisticamente significativa a $\alpha = 5\%$; NS (não significativa).

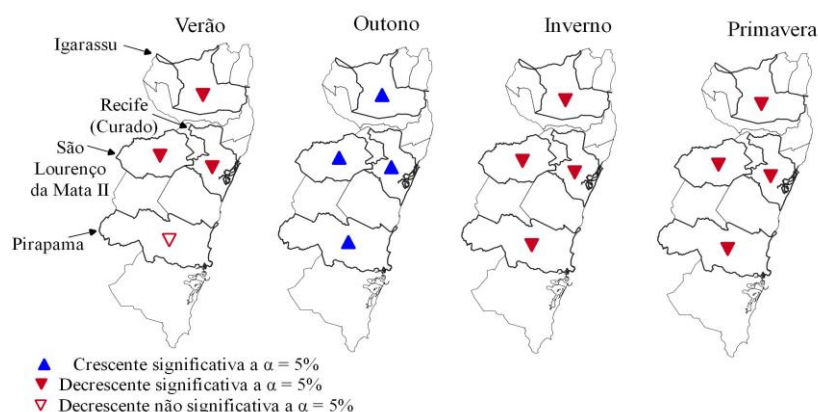


Figura 10. Distribuição espacial dos resultados do teste de MK, ao nível de significância de 0,05, para precipitação sazonal (1991-2020), nos postos pluviométricos na RMR.

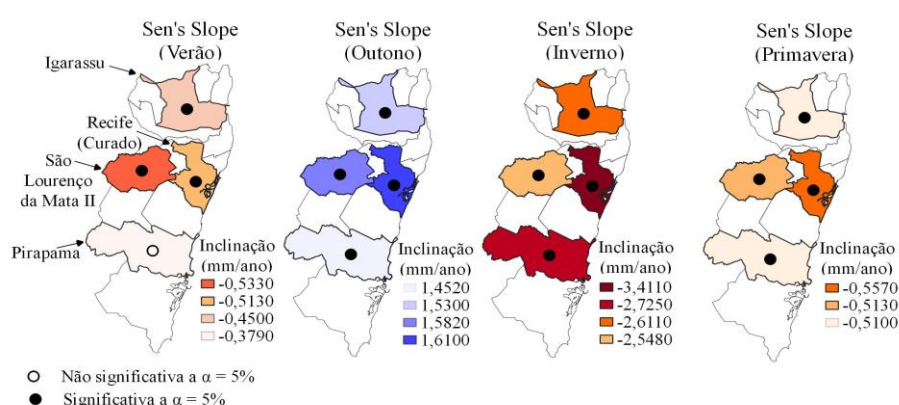


Figura 11. Distribuição espacial dos resultados do teste de SS, ao nível de significância de 0,05, para precipitação sazonal (1991-2020), nos postos pluviométricos na RMR.

Observa-se que no verão, inverno e primavera foram detectadas tendências de diminuição significativas (exceto no posto Pirapama), com magnitudes variando entre -0,3790 mm/ano a -3,4110 mm/ano (Figura 11). Em contrapartida, no outono foi verificada tendência crescente significativa, e a magnitude oscilou entre 1,4520 mm/ano (Pirapama) a 1,6100 mm/ano (Recife (Curado)).

Assim sendo, na transição outono-inverno, é esperado um eventual aumento de riscos de deslizamentos e enchentes na RMR, a exemplo do notado no final de maio de 2022, visto que o incremento de chuvas concentrado no inverno, e consequente aumento da umidade do solo neste período do ano, pode impactar a estação mais chuvosa, o inverno.

É válido mencionar que Recife é considerada uma das cidades do mundo mais vulneráveis às mudanças climáticas (PBMCI, 2016), e que possui capacidade limitada para lidar com os extremos climáticos (Marengo et al., 2023). Desta forma, é crucial implementar, no Recife e demais áreas da RMR, medidas estruturais e não estruturais, especialmente em áreas de risco (áreas de encostas e morros densamente povoados), de modo a evitar tragédias semelhantes às observadas em meados de 2022.

Os resultados do método ITA (Tabela 8 e Figuras 12 a 16) confirmam as tendências da precipitação sazonal, evidenciadas pelos testes MK e SS. Ou seja, tendências decrescentes significativas para o verão (mas sem exceção), inverno e primavera, e tendências crescentes para o outono nos postos da RMR.

Tabela 8. Resultados das estatísticas de análise de tendência inovadora (ITA) (inclinação s) de precipitação sazonal, de postos pluviométricos (1991-2020) na RMR.

Posto	Verão	Outono	Inverno	Primavera
Igarassu (Posto 100)	-0,8300*	2,0400*	-2,4900*	-0,7700*
Recife (Curado) (Posto 82900)	-0,6500*	2,2300*	-2,9600*	-0,8600*
São Lourenço da Mata II (Posto 835048)	-0,7800*	1,5200*	-2,5000*	-0,8300*
Pirapama (Posto 835138)	-0,7400*	1,8400*	-2,5100*	-0,7000*

Legenda: σ (desvio-padrão da série); * Estatisticamente significativa a $\alpha = 5\%$ (Z crítico = $\pm 1,96$).

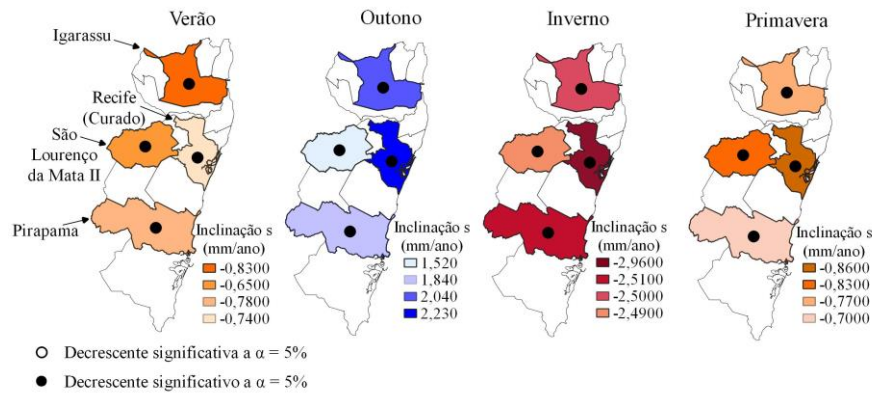


Figura 12. Distribuição espacial dos resultados da inclinação s , identificadas pelo método ITA, ao nível de significância de 0,05, para precipitação sazonal (1991-2020), nos postos pluviométricos na RMR

Na Tabela 8, as tendências de diminuição (aumento) de chuva podem ser constatadas pelo sinal negativo (positivo) das inclinações s , respectivamente. Já nas Figuras 13 a 16, as tendências decrescentes (crescentes) podem ser facilmente identificadas ao notar a linha tracejada

bem como os pontos de dispersão (ponto azul), a maioria, posicionados abaixo (acima) da linha 1:1, respectivamente. Seguindo essas mesmas interpretações, é possível analisar as tendências para os diferentes *clusters* de chuvas (baixa, média e alta), dispostas nas Figuras 13 a 16.

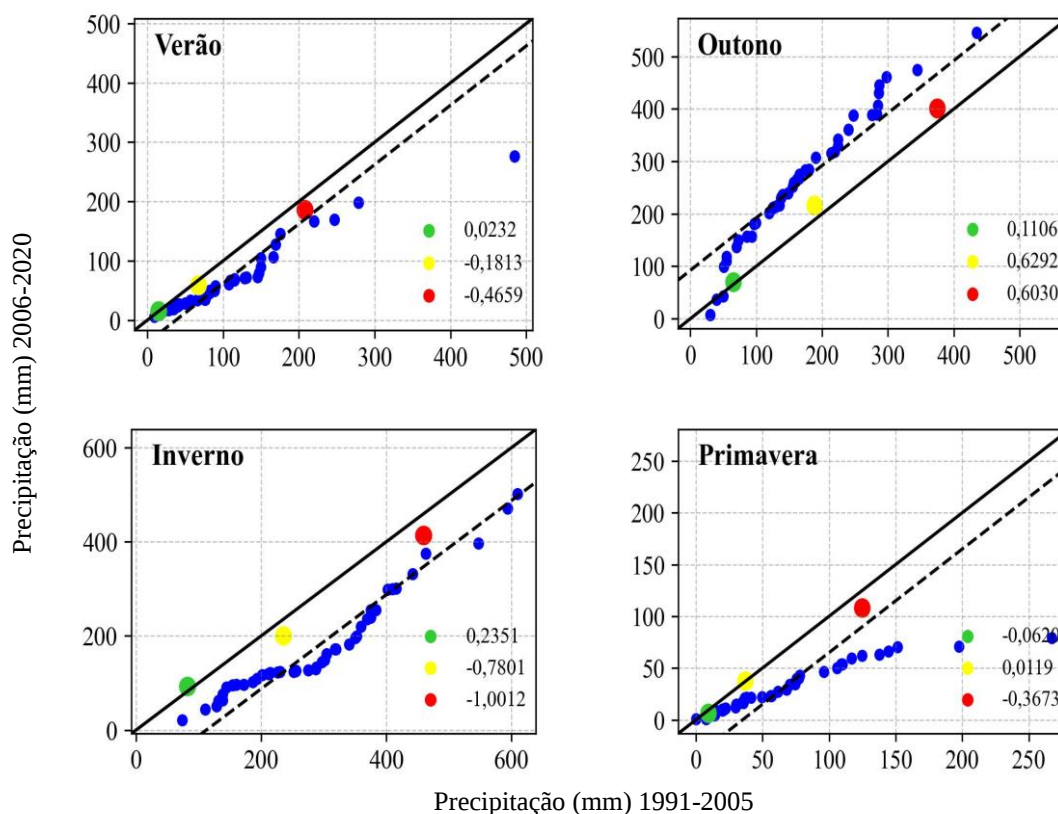


Figura 13. Resultados da análise de tendência inovadora (ITA) para a precipitação sazonal (1991 a 2020), no posto pluviométrico 100 (Igarassu) na RMR

Legenda: A linha sólida é a linha sem tendência 45° (1:1) e a linha tracejada é a linha de dados. Os pontos azuis representam os dados de precipitação. Os pontos verde, amarelo e vermelho denotam os pontos centrais médios das categorias baixa, média e alta, respectivamente.

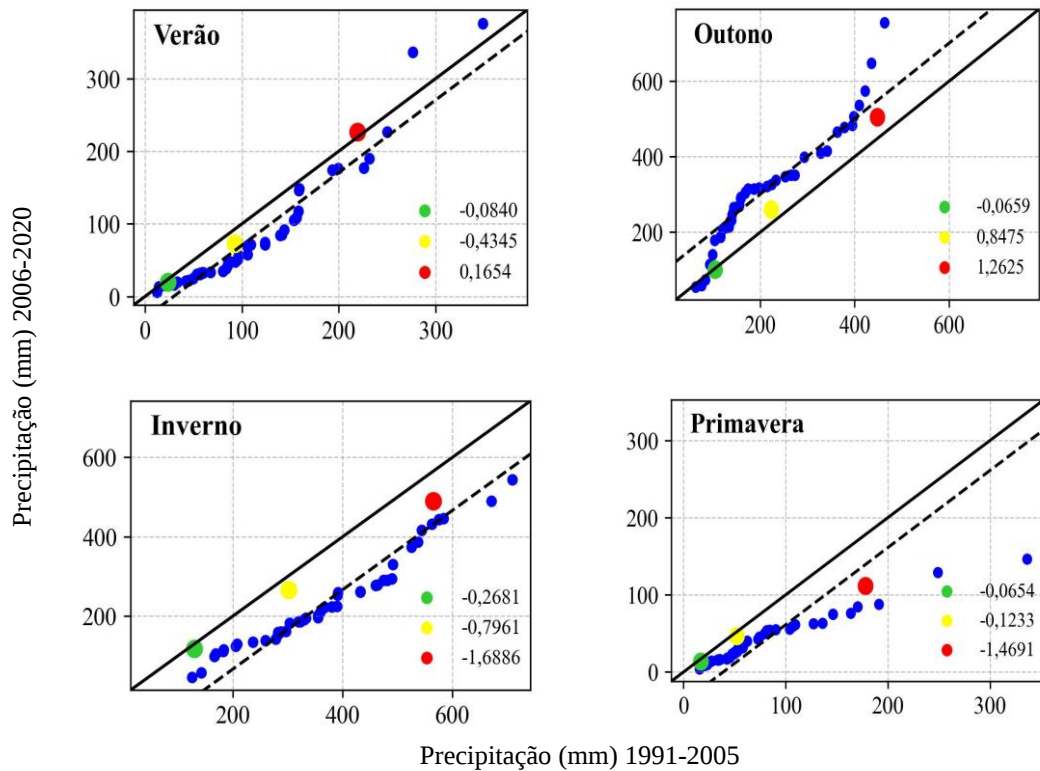


Figura 14. Resultados da análise de tendência inovadora (ITA) para a precipitação sazonal (1991 a 2020), no posto pluviométrico 82900 (Recife (Curado)), na RMR.

Legenda: A linha sólida é a linha sem tendência 45° (1:1) e a linha tracejada é a linha de dados. Os pontos azuis representam os dados de precipitação. Os pontos verde, amarelo e vermelho denotam os pontos centrais médios das categorias baixa, média e alta, respectivamente.

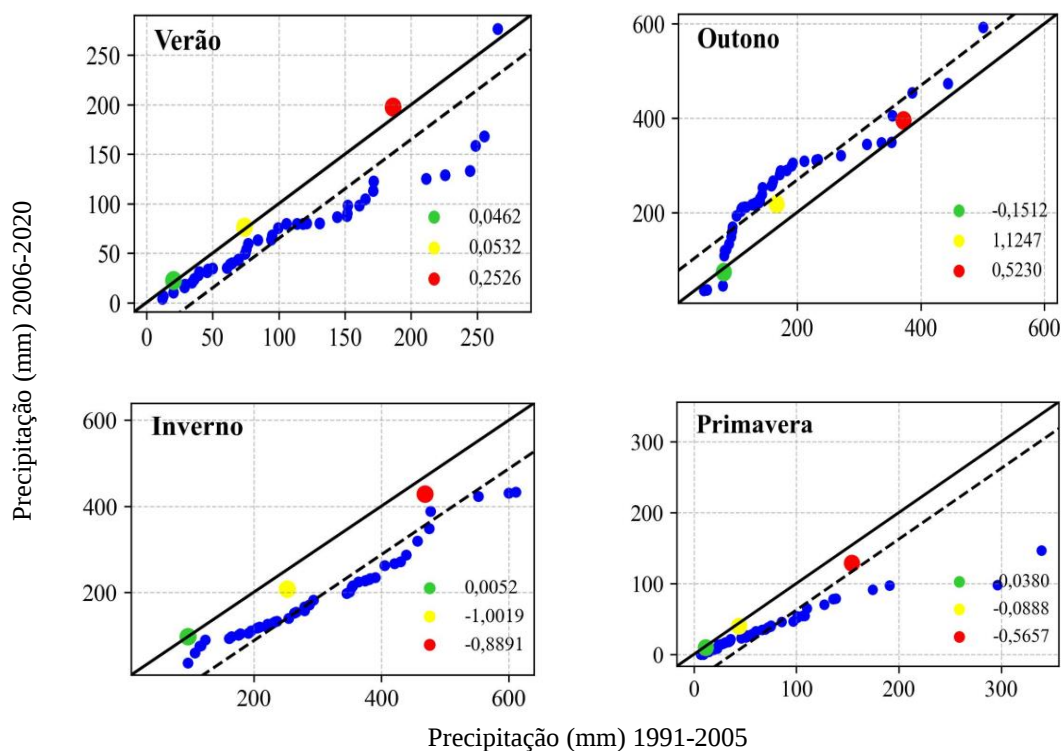


Figura 15. Resultados da análise de tendência inovadora (ITA) para a precipitação sazonal (1991 a 2020), no posto pluviométrico 83504 (São Lourenço da Mata II), na RMR

Legenda: A linha sólida é a linha sem tendência 45° (1:1) e a linha tracejada é a linha de dados. Os pontos azuis representam os dados de precipitação. Os pontos verde, amarelo e vermelho denotam os pontos centrais médios das categorias baixa, média e alta, respectivamente.

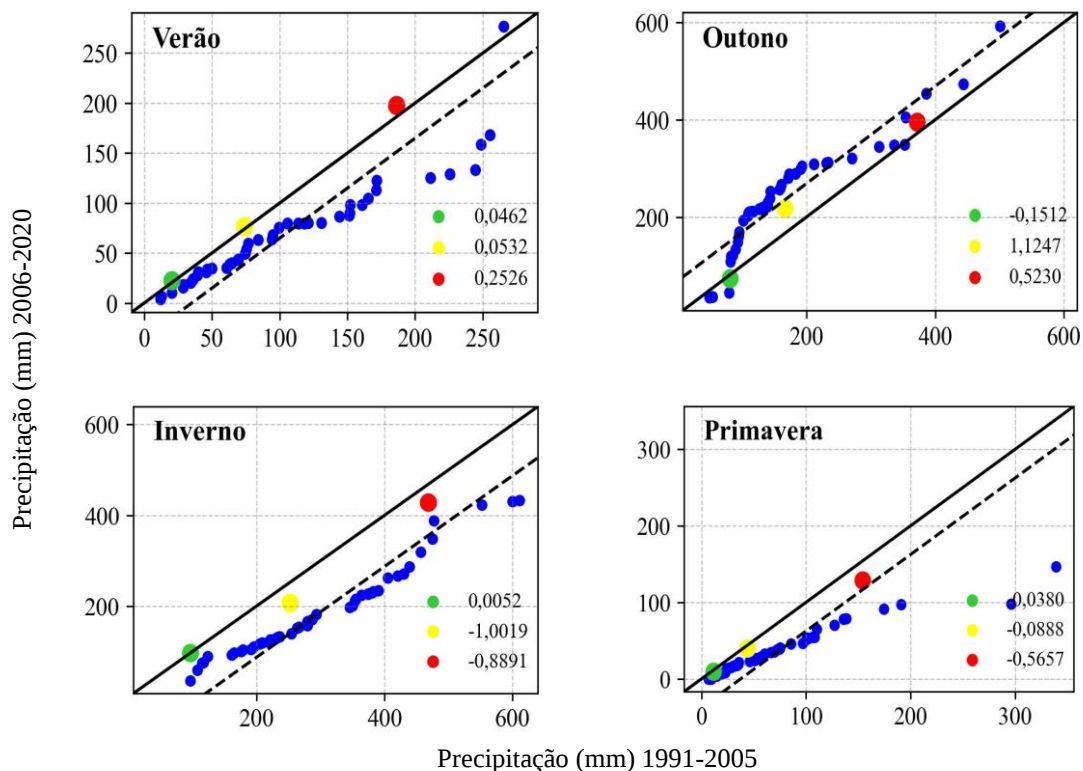


Figura 16. Resultados da análise de tendência inovadora (ITA) para a precipitação sazonal (1991 a 2020), no posto pluviométrico 835138 (Pirapama), na RMR.

Legenda: A linha sólida é a linha sem tendência 45° (1:1) e a linha tracejada é a linha de dados. Os pontos azuis representam os dados de precipitação. Os pontos verde, amarelo e vermelho denotam os pontos centrais médios das categorias baixa, média e alta, respectivamente.

Excetuando a precipitação “média” da primavera no posto Igarassu e a precipitação “baixa” do inverno em São Lourenço da Mata II, todas as demais séries sazonais apresentaram tendência significativa. No verão, as chuvas “baixas” e “altas” são dominadas por tendências positivas, enquanto tendências negativas predominam na categoria chuva “média”. Para o outono, tendências de redução são notadas para a categoria chuvas “baixas” (exceto Igarassu), e tendências de aumento para precipitação “média” e “alta” pluviosidade. No inverno, somente a categoria chuva “baixa” apresentou, majoritariamente, tendências crescentes, sendo verificadas tendências decrescentes para as precipitações “média” e “alta”. Na primavera, todas as categorias de chuva indicaram tendências negativas.

Deve-se notar que em todos os postos foram detectadas tendências não monotônicas em ao menos três das quatro estações do ano (Figuras 13 a 16). Tal fato evidencia a relevância do emprego de métodos, como o ITA, que permitem investigar tendências em diferentes categorias de precipitação. É importante observar também que as

tendências de aumento para a categoria “alta” precipitação foram, em geral, muito superiores às tendências de aumento para a categoria “baixa” precipitação, sugerindo mais possibilidade de enchentes do que de secas na RMR. Essa informação pode ser bastante útil para gestores e tomadores de decisão da área de recursos hídricos, sobretudo no que diz respeito à definição de investimentos prioritários.

Na Tabela 9 tem-se um resumo das tendências de chuvas sazonais identificadas pelos MK, SS e ITA, sendo possível verificar forte convergência dos resultados dos métodos tradicionais e o método inovador. Ressalta-se que o ITA foi capaz de identificar todas as tendências significativas apontadas pelo MK. Adicionalmente, o emergente método (ITA) identificou tendência significativa na precipitação de verão do posto Pirapama, ocultada no teste MK. Na Tabela 9 observa-se também as tendências dos diferentes *clusters* de precipitação estimados pelos ITA.

Tabela 9. Comparação dos resultados dos métodos MK e ITA, ao nível de significância de 0,05, para séries de precipitação sazonal (1991-2020), nos postos pluviométricos na RMR.

Posto	Período	MK	ITA			
		Série inteira	Série inteira	Baixa	Média	Alta
Igarassu (Posto 100)	Verão	Sim (-)	Sim (-)	Sim (+)	Sim (-)	Sim (-)
	Outono	Sim (+)	Sim (+)	Sim (+)	Sim (+)	Sim (+)
	Inverno	Sim (-)	Sim (-)	Sim (+)	Sim (-)	Sim (-)
	Primavera	Sim (-)	Sim (-)	Sim (-)	Não	Sim (-)
Recife (Curado) (Posto 82900)	Verão	Sim (-)	Sim (-)	Sim (-)	Sim (-)	Sim (+)
	Outono	Sim (+)	Sim (+)	Sim (-)	Sim (+)	Sim (+)
	Inverno	Sim (-)	Sim (-)	Sim (-)	Sim (-)	Sim (-)
	Primavera	Sim (-)	Sim (-)	Sim (-)	Sim (-)	Sim (-)
São Lourenço da Mata II (Posto 835048)	Verão	Sim (-)	Sim (-)	Sim (+)	Sim (+)	Sim (+)
	Outono	Sim (+)	Sim (+)	Sim (-)	Sim (+)	Sim (+)
	Inverno	Sim (-)	Sim (-)	Não	Sim (-)	Sim (-)
	Primavera	Sim (-)	Sim (-)	Sim (-)	Sim (-)	Sim (-)
Pirapama (Posto 835138)	Verão	Não	Sim (-)	Sim (+)	Sim (-)	Sim (+)
	Outono	Sim (+)	Sim (+)	Sim (-)	Sim (+)	Sim (+)
	Inverno	Sim (-)	Sim (-)	Sim (+)	Sim (-)	Sim (-)
	Primavera	Sim (-)	Sim (-)	Sim (-)	Sim (-)	Sim (-)

Fonte: Autores.

Legenda: “Sim” (±) indica aumento ou diminuição significativa e “Não” indica tendências não significativas a um nível de significância de 5%.

Conforme supracitado, o método inovador fornece diversas vantagens comparativamente aos métodos tradicionais de análise de tendências. Nesse sentido, vários pesquisadores, internacionalmente, têm cada vez mais empregado e proposto aprimoramentos para o método original ITA (Dong et al., 2020; Wang et al. 2020; Chowdari et al., 2023). No Brasil, o ITA ainda é pouco difundido, o que dificulta comparações com a literatura internacional e limita o entendimento sobre tendências de variáveis hidrometeorológicas no país. Nesse cenário, seria interessante que futuros trabalhos nacionais avancem nessa linha de pesquisa a fim de propiciar melhor conhecimento da realidade brasileira, especialmente no contexto das mudanças climáticas e de recorrentes eventos extremos no Brasil, como na RMR.

Conclusões

No presente estudo foram aplicados o método inovador ITA e os métodos tradicionais MK e SS, ao nível de significância de 5%, para detectar tendências na precipitação anual e sazonal de quatro postos da RMR, com dados do período de 1991 a 2020. Na escala anual, os dois tipos de métodos identificaram tendências crescentes e decrescentes, mas quase todas estatisticamente insignificantes. O oposto foi notado para a precipitação sazonal, quando o MK e o ITA identificaram, respectivamente, tendências significativas em 15 (93,75%) e 16 (100%) séries temporais. No verão, inverno e primavera observaram-se tendências decrescentes, e no

outono foi notada tendência crescente, o que pode potencializar os riscos de deslizamentos e enchentes na transição outono-inverno na RMR.

O ITA mostrou-se confiável e robusto para a detecção de tendências, visto que o mesmo foi capaz de identificar todas as tendências significativas apontadas pelo MK, além de revelar outras ocultadas pelo método tradicional. A abordagem inovadora possibilitou investigar tendências em diferentes categorias de chuva (baixa, média e alta), fornecendo informações úteis quanto às secas (baixa precipitação) e enchentes (alta precipitação). Além disso, como vantagens em relação aos testes clássicos, o ITA independe de autocorrelação, normalidade e comprimento dos dados. Nesse sentido, em consonância com a literatura internacional, espera-se que os estudos nacionais também considerem o uso do método ITA na análise de tendências de variáveis hidrometeorológicas. E, desta forma, permita um melhor conhecimento da realidade brasileira, especialmente no contexto das mudanças climáticas e de recorrentes eventos extremos no Brasil, como na RMR.

Agradecimentos

Os Autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e à Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco,

pela concessão da bolsa de estudo de doutorado ao primeiro autor, segundo autor, terceiro autor (CAPES, 88887.814388/2023-00) e quarto autor (FACEPE, IBPG-1279-3.01/22). Os autores também agradecem à FACEPE pelo apoio ao projeto de pesquisa (APQ-1535-3.01/22).

Referências

- Ahmad, I.; Li, W.; Zhang, F. (2023) Spatiotemporal dynamics of annual, seasonal, and extreme temperature over upper Indus basin. *Theoretical and Applied Climatology* 151, 1399–1418.
<https://doi.org/10.1007/s00704-022-04310-2>
- Alvalá, R.C. S.; Dias, M.C. A.; Saito, S.M.; Stenner, C.; Franco, C.; Amadeu, P.; Ribeiro, J.; Santana, R.A.S.M.; Nobre, C.A. (2019) Mapping characteristics of at-risk population to disasters in the context of Brazilian early warning system. *International Journal of Disaster Risk Reduction* 41, 101326.
<https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2019.101326>
- Alvares, C.A.; Stape, J.L.; Sentelhas, P.C.; Moraes Gonçalves, J.L.; Sparovek, G. (2013). Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift* 22, 711–728.
<https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. (2023) Séries históricas de estações. Disponível em:
<https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>. Acesso em: 02 jun. 2023.
- APAC. Agência Pernambucana de Águas e Clima. (2023) Monitoramento pluviométrico. Disponível em:
<http://old.apac.pe.gov.br/meteorologia/monitoramento-pluvio.php>. Acesso em: 02 jun. 2023.
- Aragão, M. L.; Duarte, C. C. (2023). Dinâmica climática, eventos extremos e impactos associados no município do Jaboatão dos Guararapes, Pernambuco, Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física* 16, 818-836.
<https://doi.org/10.1007/s00704-023-04462-9>
- Araújo, L. S.; Silva, A.S.A.; Menezes, R.S. C.; Stosic, B.; Stosic, T. (2023) Analysis of rainfall seasonality in Pernambuco, Brazil. *Theoretical and Applied Climatology* 153, 137–154.
<https://doi.org/10.1007/s00704-023-04462-9>
- Bezerra, A.C.; Costa, S.A.T.; Silva, J.L.B.; Araújo, A.M.Q.; Moura, G.B.A.; Lopes, P. M.O.; Nascimento, C.R. (2021) Annual rainfall in Pernambuco, Brazil: Regionalities, regimes, and time trends. *Revista Brasileira de Meteorologia* 36, 403–414.
<https://doi.org/10.1590/0102-77863630129>
- Bezerra, A.C.; Silva, J.L.B.; Moura, G.B.A.; Lopes, P.M.O.; Nascimento, C.R.; Ribeiro, E. P.; Galvêncio, J.D.; Silva, M.V. (2022) Dynamics of land cover and land use in Pernambuco (Brazil): Spatio-temporal variability and temporal trends of biophysical parameters. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 25, 100677.
<https://doi.org/10.1016/J.RSASE.2021.100677>
- Chowdary, K.; Deb Barma, S.; Bhat, N.; Girisha, R.; Gouda, K.C.; Mahesha, A. (2023) Trends of seasonal and annual rainfall of semi-arid districts of Karnataka, India: application of innovative trend analysis approach. *Theoretical and Applied Climatology* 152, 241–264.
<https://doi.org/10.1007/s00704-023-04400-9>
- Costa, R.L.; Macedo Mello Baptista, G.; Gomes, H.B.; Silva, F.D.S.; Rocha Júnior, R.L.; de Salvador, M.A.; Herdies, D. L. (2020) Analysis of climate extremes indices over northeast Brazil from 1961 to 2014. *Weather and Climate Extremes* 28, 100254.
<https://doi.org/10.1016/j.wace.2020.100254>
- Cui, L.; Wang, L.; Lai, Z.; Tian, Q.; Liu, W.; Li, J. (2017) Innovative trend analysis of annual and seasonal air temperature and rainfall in the Yangtze River Basin, China during 1960–2015. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 164, 48–59.
<https://doi.org/10.1016/J.JASTP.2017.08.001>
- Silva, L.M.; Oliveira Júnior, J.F. de; Ghaffar, B.; Tariq, A.; Qin, S.; Mumtaz, F.; Correia Filho, W.L.F.; Shah, M.; Jardim, A.M. R.F.; Silva, M.V.; Santiago, D.B.; Barros, H.G.; Mendes, D.; Abreu, M.C.; Souza, A.; Pimentel, L.C.G.; da Silva, J.L.B.; Aslam, M.; Kuriqi, A. (2022) Rainfall in the Urban Area and Its Impact on Climatology and Population Growth. *Atmosphere* 13, 1610.
<https://doi.org/10.3390/atmos13101610>
- Dong, Z.; Jia, W.; Sarukkalghe, R.; Fu, G.; Meng, Q.; Wang, Q. (2020) Innovative Trend Analysis of Air Temperature and Precipitation in the Jinsha River Basin, China. *Water*, 12, 3293.
- Girão, O.; Corrêa, A.C.B.; Guerra, A.J.T. (2006) Influência da climatologia rítmica sobre áreas de risco: O caso da região metropolitana do Recife para os anos de 2000 e 2001. *Revista de Geografia* 23, 03–40.
- Guedes, R.V.S.; Silva, T.L.V. (2020) Análise descritiva da precipitação, temperatura, umidade e tendências climáticas no Recife – PE. *Revista Brasileira de Geografia Física* 13, 3234–3253.
<https://doi.org/10.26848/rbgf.v13.07.p3234-3253>
- Harka A.E.; Jilo N.B.; Behulu, F. (2021) Spatial-temporal rainfall trend and variability assessment in the Upper Wabe Shebelle River

- Basin, Ethiopia: application of innovative trend analysis method. *Journal of Hydrology: Region Studies* 37, 100915.
<https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100915>
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2019) *Biomass and Coastal System of Brazil*. Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv101676.pdf>. Acesso em: 05 jul. 2023.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2022) *Census of Brazil 2022*. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/22827-censo-demografico-2022.html?edicao=35938>. Acesso em: 05 jul. 2023.
- INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. (2023) *Bank of meteorological data*. Disponível em: <https://bdmep.inmet.gov.br/>. Acesso em: 02 jun 2023.
- IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023) *Summary for Policymaker*. In: The Core Writing Team, Hoesung Lee, & José Romero (Eds.), *Climate Change 2023: Synthesis Report. A Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. (2015) *Report of Research Governance Metropolitan in Brazil. Characterization and Comparison of Governance Metropolitan in Brazil: arrangements of metropolitan management* (Componente 1). Região Metropolitana do Recife. Disponível em: <https://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/5168>. Acesso em: 05 jul. 2023.
- Kumar, A.; Giri, R.K.; Taloor, A.K.; Singh, A.K. (2021) Rainfall trend, variability and changes over the state of Punjab, India 1981–2020: A geospatial approach. *Remote Sensing Applications: Society and Environment* 23, 100595.
<https://doi.org/10.1016/J.RSASE.2021.100595>
- Marengo, J.A.; Alcantara, E.; Cunha, A.P.; Seluchi, M.; Nobre, C.A.; Dolif, G.; Goncalves, D.; Assis Dias, M.; Cuartas, L.A.; Bender, F.; Ramos, A.M.; Mantovani, J. R.; Alvalá, R.C.; Moraes, O.L. (2023) Flash floods and landslides in the city of Recife, Northeast Brazil after heavy rain on May 25–28, 2022: Causes, impacts, and disaster preparedness. *Weather and Climate Extremes* 39, 100545.
<https://doi.org/10.1016/j.wace.2022.100545>
- Oliveira, D.H.M.C.; Lima, K.C. (2019) What is the return period of intense rainfall events in the capital cities of the northeast region of Brazil?. *Atmospheric Science Letters* 20, p. n/a.
<https://doi.org/10.1002/asl.934>
- Oliveira Júnior, J.F.; Correia Filho, W.L.F.; Monteiro, L. S.; Shah, M.; Hafeez, A.; Gois, G. de; Lyra, G.B.; Carvalho, M.A.; Santiago, D.B.; Souza, A.; Mendes, D.; Souza Costa, C.E.A.; Blanco, C.J.C.; Zeri, M.; Pimentel, L. C. G.; Jamjareegulgarn, P.; Silva, E.B. (2022) Urban rainfall in the Capitals of Brazil: Variability, trend, and wavelet analysis. *Atmospheric Research* 267, 105984.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105984>
- ONU - Organização das Nações Unidas. (2018) *The World's Cities in 2018. The World's Cities in 2018 - Data Booklet (ST/ESA/ SER.A/417)*. Disponível em: https://www.un.org/en/development/desa/population/publications/pdf/urbanization/the_worlds_cities_in_2018_data_booklet.pdf. Acesso em: 10 jul. 2023.
- PBMC - Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. (2016) *Impacto, vulnerabilidade e adaptação das cidades costeiras brasileiras às mudanças climáticas: Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas*. Rio de Janeiro-RJ. Disponível em: https://ppgoceano.paginas.ufsc.br/files/2017/06/Relatorio_DOIS_v1_04.06.17.pdf. Acesso em: 10 jul. 2023.
- Pernambuco. (2018) *Lei Complementar nº 382, de 9 de janeiro de 2018. Governo do Estado de Pernambuco. Dispõe sobre a Região Metropolitana do Recife – RMR. Recife-PE*.
- Pessoa, J.O.; Paiva, A.L.R.; Lima, A.M.S.; Paiva, A.C.; Pessoa, J.O. (2022) *Use of an innovative trend analysis methodology for precipitation total annual in the basin of the Rio Capibaribe*. In: XVI Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 15º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Portuguesa. Anais. Caruaru-PE.
- Phuong, D.N.D.; Huyen, N.T.; Liem, N.D.; Hong, N.T.; Cuong, D.K.; Loi, N.K. (2022) On the use of an innovative trend analysis methodology for temporal trend identification in extreme rainfall indices over the Central Highlands, Vietnam. *Theoretical and Applied Climatology* 147, 835–852.
<https://doi.org/10.1007/s00704-021-03842-3>
- Rodrigues, L.O.; Souza, W.M.; Costa, V.S.O.; Pereira, M.L.T. (2017) *Influência dos eventos de El Niño e La Niña no regime de precipitação do Agreste de Pernambuco*. *Revista Brasileira de Geografia Física* 10, 1995-2009.
<https://doi.org/10.26848/rbgf.v16.1.p134-14410.26848/rbgf.v10.6.p1995-2009>

- Rodrigues, E.L.; Farias, N.T.; Lopes, F.C.; Sousa, F.A.S. (2023) Análise da precipitação pluviométrica mensal e anual e dos períodos de seca no município de Guarabira-PB. *Revista Brasileira de Geografia Física* 16, 134-144. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v16.1.p134-144>
- Sen, P.K. (1968) Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association* 63, 1379-1389.
- Sen, Z. (2012) Innovative Trend Analysis Methodology. *Journal of Hydrologic Engineering* 17, 1042-1046. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.000055](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.000055)
- Sen, Z. (2017) Innovative trend significance test and applications. *Theoretical and Applied Climatology* 127, 939-947. <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1681-x>
- Shigute, M.; Alamirew, T.; Abebe, A.; Ndehedehe, C.E.; Kassahun, H.T. (2023) Analysis of rainfall and temperature variability for agricultural water management in the upper Genale river basin, Ethiopia. *Scientific African*, 20, e01635. <https://doi.org/10.1016/J.SCIAF.2023.01635>
- Silva, T.R.B.F.; Santos, C.A.C.; Silva, D.J.F.; Santos, C.A.G.; Silva, R.M.; Brito, J.I.B. (2022) Climate Indices-Based Analysis of Rainfall Spatiotemporal Variability in Pernambuco State, Brazil. *Water* 14, 2190. <https://doi.org/10.3390/w1414219>
- Silva, J.W.; Guimaraes, E.C.; Tavares, M. (2003) Variabilidade temporal da precipitação mensal e anual na estação climatológica de Uberaba-MG. *Ciência e Agrotecnologia* 27, 665-674. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542003000300023>
- Silva Junior, M.A.B.; Fonseca Neto, G.C.; Cabral, J.J.S.P. (2020) Análise estatística para detecção de tendências em séries temporais de temperatura e precipitação no Recife-PE. *Revista de Geografia (Recife)* 37, 222-240. <https://doi.org/10.51359/2238-6211.2020.239373>
- Souza, I.A.; Lacerda, F.F.; Aragão, J.O.R.; Moura, G.B.; Ferreira, M.A.; Ferreira, F.F.; Silva, C.L. (1999) Influência do El Niño no comportamento pluviométrico do Estado de Pernambuco durante o ano de 1998. In: XI Congresso Brasileiro de Agrometeorologia e II Reunião Latino-Americana de Agrometeorologia CD ROM. Anais. Florianópolis – SC.
- Ullah, S.; You, Q.; Ali, A.; Ullah, W.; Jan, M.A.; Zhang, Y.; Xie, W.; Xie, X. (2019) Observed changes in maximum and minimum temperatures over China- Pakistan economic corridor during 1980–2016. *Atmospheric Research* 216, 37–51. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.09.020>
- Wang, Y.; Xu, Y.; Tabari, H.; Wang, J.; Wang, Q.; Song, S.; Hu, Z. (2020) Innovative trend analysis of annual and seasonal rainfall in the Yangtze River Delta, eastern China. *Atmospheric Research* 231, 104673. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.104673>
- Wu, H.; Qian, H. (2017) Innovative trend analysis of annual and seasonal rainfall and extreme values in Shaanxi, China, since the 1950s. *International Journal of Climatology* 37, 2582–2592. <https://doi.org/10.1002/joc.4866>