Revista Brasileira de Climatologia
Brazilian Journal of Climatology

OPEN ACCESS

ISSN 2237-8642

VARIABILIDADE DO POTENCIAL EROSIVO DAS CHUVAS EM ÁREA SERRANA: UMA ANÁLISE DE TENDÊNCIA E PONTO DE MUDANÇA DA EROSIVIDADE DAS CHUVAS EM PETRÓPOLIS, RIO DE JANEIRO, ENTRE OS ANOS DE 1940-2022

Variability of Rainfall Erosive Potential in Mountainous Areas: A Trend and Change Point Analysis of Rainfall Erosivity in Petrópolis, Rio de Janeiro, from 1940 to 2022

Variabilidad del Potencial Erosivo de las Lluvias en Áreas Montañosas: Un Análisis de Tendencia y Punto de Cambio de la Erosividad de las Lluvias en Petrópolis, Río de Janeiro, entre 1940 y 2022

Camila de Moraes Gomes Tavares
Universidade Federal do Rio de Janeiro
camila.tardeli.tavares@gmail.com

Núbia Beray Armond
Universidade de Indiana - Bloomington (EUA)
nubia.beray@igeo.ufrj.br

Cássia de Castro Martins Ferreira
Universidade Federal de Juiz de Fora
cassia.castro@ufjf.br

Antônio José Teixeira Guerra
Universidade Federal do Rio de Janeiro
antoniotguerra@gmail.com

Resumo: O potencial erosivo das chuvas é uma variável crítica para a compreensão dos impactos ambientais, sobretudo em áreas de relevo complexo. Este estudo analisou as tendências e pontos de mudança da erosividade das chuvas no município de Petrópolis, localizado na região serrana do estado

do Rio de Janeiro. A erosividade foi calculada pelo índice EI30, derivado do Índice de Fournier Modificado (MFI), e os testes não paramétricos de Mann-Kendall e Pettitt foram aplicados para identificar tendências e pontos de mudança nas séries históricas. Os resultados indicaram tendências positivas de aumento do potencial erosivo em três das cinco estações, especialmente nos meses de maio, junho, setembro e novembro. As maiores mudanças ocorreram nas áreas a sotavento, contrariando a expectativa de maior impacto nas áreas a barlavento.

Palavras-chave: Energia cinética da chuva. Variabilidade pluviométrica. Relevo. Eventos Extremos

Abstract: The erosive potential of rainfall is a critical variable for understanding environmental impacts, especially in areas with complex terrain. This study analyzed trends and points of change in rainfall erosivity in the municipality of Petrópolis, located in the mountainous region of the state of Rio de Janeiro. Erosivity was calculated using the EI30 index, derived from the Modified Fournier Index (MFI), and the nonparametric Mann-Kendall and Pettitt tests were applied to identify trends and points of change in the historical series. The results indicated positive trends of increased erosive potential in three of the five stations, especially in the months of May, June, September, and November. The greatest changes occurred in the leeward areas, contrary to the expectation of greater impact in the windward areas.

Keywords: Rainfall kinetic energy. Rainfall variability. Relief. Extreme events.

Resumen: El potencial erosivo de las lluvias es una variable crítica para comprender los impactos ambientales, especialmente en áreas de relieve complejo. Este estudio analizó las tendencias y los puntos de cambio de la erosividad de las lluvias en el municipio de Petrópolis, ubicado en la región montañosa del estado de Río de Janeiro. La erosividad se calculó mediante el índice EI30, derivado del Índice de Fournier Modificado (MFI), y se aplicaron las pruebas no paramétricas de Mann-Kendall y Pettitt para identificar tendencias y puntos de cambio en las series históricas. Los resultados indicaron tendencias positivas de aumento del potencial erosivo en tres de las cinco estaciones, especialmente en los meses de mayo, junio, septiembre y noviembre. Los mayores cambios se produjeron en las zonas de sotavento, contrariamente a lo que se esperaba, que era un mayor impacto en las zonas de barlovento.

Palabras clave: Energía cinética de la lluvia. Variabilidad pluviométrica. Relieve. Eventos extremos.

Submetido em: 04/02/2025
Aceito para publicação em: 25/11/2025
Publicado em: 03/12/2025

1. INTRODUÇÃO

O potencial erosivo das chuvas refere-se à capacidade da precipitação de degradar e transportar o solo por meio do escoamento superficial, resultado da combinação entre sua intensidade e duração, bem como da capacidade do solo de resistir à erosão, considerando características físicas, mecânicas, morfológicas e o tipo de uso. Assim, esse potencial depende diretamente das características climáticas de cada localidade (Silva et al., 2022; Neves e Di Lollo, 2022; Back, Justen e Guadagnin, 2023).

Nas áreas tropicais, a erosão pluvial é um dos principais fatores de degradação ambiental, influenciada pelo volume e intensidade das precipitações, especialmente em regiões de topografia complexa, cobertura vegetal escassa e uso intensivo do solo – quadro, esse, potencialmente agravado pelas mudanças climáticas (Neves e Di Lollo, 2022; Riquetti et al., 2023; Eekhout e Vente, 2022).

A região Sudeste do Brasil caracteriza-se pela ocorrência de eventos extremos mais frequentes durante o verão austral (Reboita et al., 2010; Kuroki et al., 2022). Sua topografia varia entre planaltos, onde predomina o clima tropical de altitude, e planícies, com predominância do clima tropical, marcado por temperaturas elevadas e verões chuvosos (Kuroki et al., 2022). Dada a dinâmica climática e a complexidade orográfica da região, municípios localizados em áreas serranas assumem relevância no contexto das alterações nos padrões pluviométricos e da ocorrência de eventos extremos associados à erosão dos solos.

O município de Petrópolis, na região serrana do Rio de Janeiro, possui um histórico de eventos extremos, intensificados pelo efeito orográfico, que aumenta a turbulência do ar durante a passagem de correntes perturbadas (Nimer, 1972). Embora estudos tenham abordado a variabilidade pluviométrica e seu potencial erosivo em diferentes regiões do Brasil, incluindo o estado do Rio de Janeiro (Oliveira e Prado, 2023; Trindade et al., 2016; Gonçalves et al., 2006; Souza et. al., 2022), ainda são escassas investigações sobre tendências e pontos de mudança do potencial erosivo em áreas de relevo complexo, como Petrópolis.

Diante da complexidade dessa área e das potenciais mudanças nos padrões de precipitação associadas às alterações climáticas, este estudo busca preencher essa lacuna ao analisar as tendências, os pontos de mudança e a variabilidade da erosividade das chuvas em cinco estações pluviométricas. O estudo responde à seguinte questão: como as variações nos

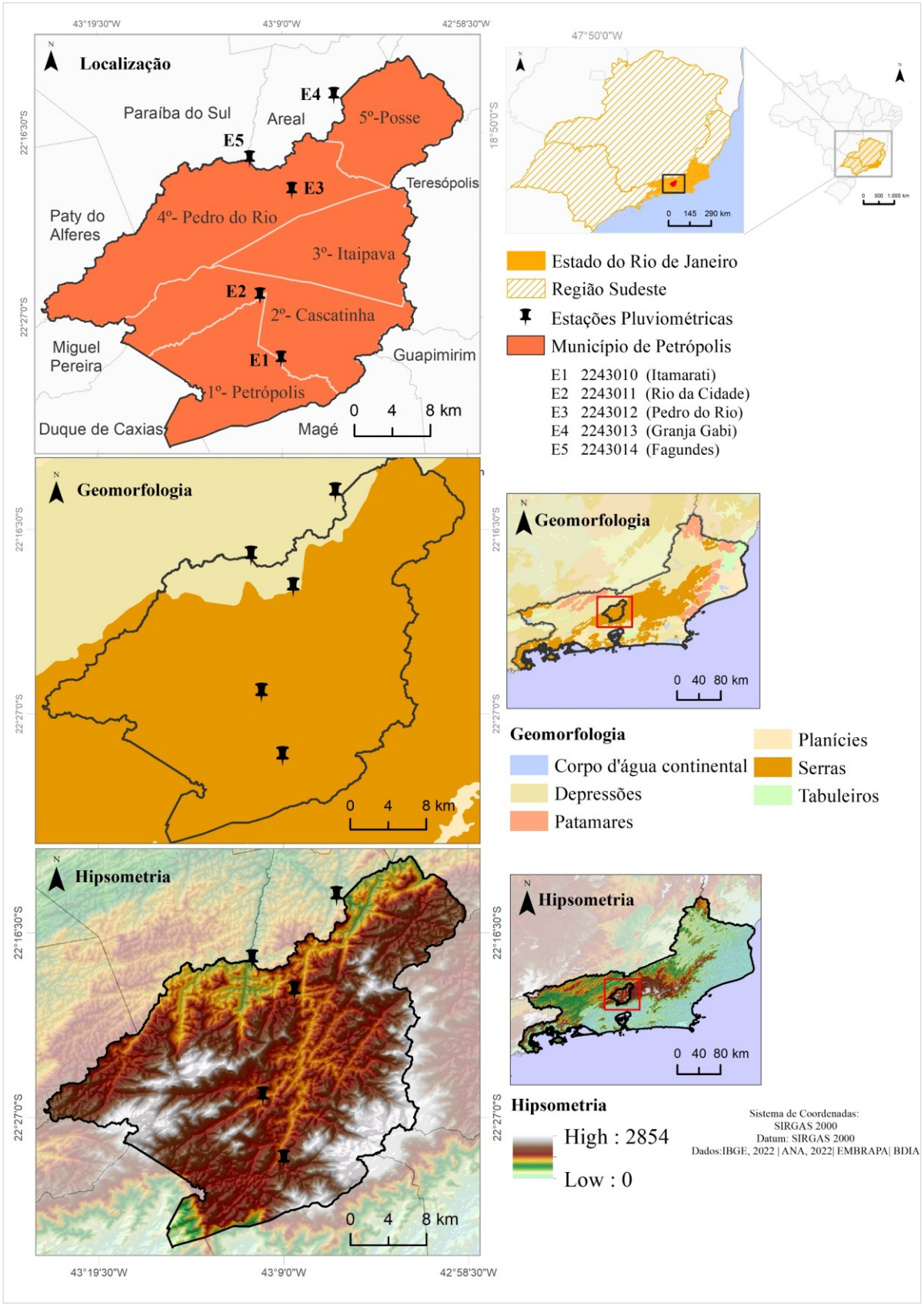
padrões pluviométricos, identificadas por tendências e pontos de mudança, influenciam o potencial erosivo das chuvas no município de Petrópolis?

2. METODOLOGIA

2.1. Área de Estudo

A área de estudo está situada na região Sudeste do Brasil, no estado do Rio de Janeiro (Figura 1). O município de Petrópolis integra a Região de Serra, pertencente à Serra do Mar, com altitudes que variam de 84 m a 2.221 m em relação ao nível do mar (Figura 1).

Figura 1 – Localização e caracterização do município de Petrópolis (RJ)**.**



Fonte: Elaboração própria (2024).

A localização de Petrópolis, aliada ao seu relevo acidentado característico da região Sudeste, que apresenta um dos maiores contrastes geomorfológicos do Brasil (Nimer, 1972), influencia diretamente a distribuição e a concentração das precipitações. As vertentes voltadas para leste e sudeste tendem a ser mais úmidas, enquanto as orientadas para oeste e norte são mais secas (Sant'Anna Neto, 2005).

O município conta com cinco estações pluviométricas monitoradas pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), que são representativas da distribuição das chuvas na região. O Quadro 1 apresenta informações detalhadas sobre cada estação, destacando que as estações E4 e E5 estão localizadas fora do perímetro municipal, mas próximas às divisas com os municípios de Areal e Paraíba do Sul, respectivamente.

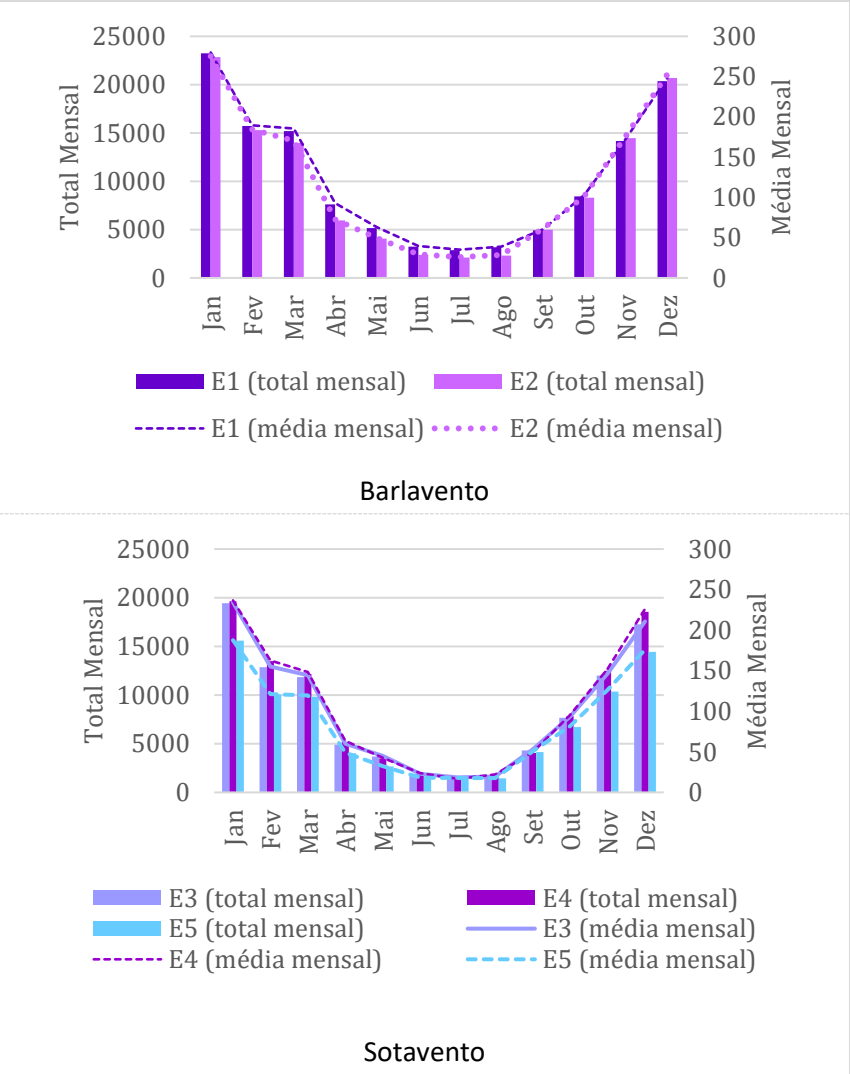
Quadro 1- Caracterização das estações pluviométricas da Agência Nacional de Águas (ANA)

Estação	Código ANA	Nome	Latitude	Longitude	Altitude
E1	2243010	Itamarati	-22,49	-43,15	1085
E2	2243011	Rio da Cidade	-22,43	-43,17	704
E3	2243012	Pedro do Rio	-22,33	-43,14	645
E4	2243013	Granja Gabi	-22,24	-43,10	450
E5	2243014	Fagundes	-22,30	-43,18	460

Fonte: Elaboração própria (2024)

As estações E1 e E2 estão localizadas nas áreas de maior altitude em relação às demais. Essas áreas correspondem ao barlavento, considerando os sistemas atmosféricos cuja orientação vai do quadrante sudeste (SE) ao noroeste (NW), no sentido oceano-continente. Nessa configuração, as vertentes atlânticas, influenciadas pelo relevo, podem registrar totais anuais de chuva superiores a 4.000 mm em anos excepcionalmente chuvosos (Sant'Anna Neto, 2005). A Figura 2 apresenta os gráficos dos totais e médias mensais de precipitação para as estações situadas em áreas de barlavento e sotavento.

Figura 2 – Total e média mensal das chuvas nas estações pluviométricas a barlavento e sotavento.



Fonte: Elaboração própria (2024)

As áreas representadas pelas estações E1 e E2 apresentam os maiores totais e médias mensais de precipitação em todos os meses do ano, em comparação com as estações localizadas em áreas de sotavento (E3, E4 e E5).

De acordo com Tavares e Ferreira (2020), as estações localizadas em áreas de maior altimetria registram os maiores totais pluviométricos, especialmente devido à ocorrência de eventos extremos de chuva. Além disso, os sistemas frontais intensificam a concentração de precipitação nas áreas de barlavento do município.

Os principais sistemas atmosféricos responsáveis pelas chuvas na área incluem a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), as Frentes Frias (FF), os Jatos de Baixos Níveis (JBNs), as Linhas de Instabilidade (LI) e as convecções locais (Coelho e Nunes, 2020; ; Lima e Armond,

2022; Reboita et al., 2010; Reboita et al., 2022). Destaca-se também a Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS), que contribui para o transporte de umidade nos baixos níveis troposféricos, do oceano para o continente, favorecendo a formação de chuvas orográficas (Sant'Anna Neto, 2005).

2.2. Procedimentos Metodológicos

O presente trabalho foi desenvolvido em seis etapas.

A primeira etapa consistiu no levantamento dos dados diários de chuva por meio do *software* Hidro (https://www.snirh.gov.br/hidroweb/download). Foram utilizadas cinco estações pluviométricas da ANA (Tabela 1, Figura 1), com dados compreendidos entre 1940 e fevereiro de 2022. As estações apresentavam, respectivamente, os seguintes percentuais de falha: 0,2% (E1); 0,4% (E2); 0,2% (E3); 0,3% (E4) e 3,4% (E5).

Em seguida, foi feito o preenchimento de falhas de acordo com Tavares et al. (2025). Para as estações E1 e E4, utilizou-se a média aritmética entre os dados das demais estações disponíveis, enquanto, para as estações E2, E3 e E5, foi aplicado o método da Razão Normal.

Os dados foram homogeneizados pelo método de Wang (2008a, 2008b) utilizando o pacote RHtests_dlyPrcp (RHTest) no software R, que detecta e corrige mudanças artificiais em séries diárias de chuva sem necessidade de uma estação de referência (Wang, 2013).

Baseado no algoritmo transPMFred, o método integra a transformação de Box-Cox ao algoritmo PMFred, permitindo a identificação de ruídos e a homogeneização dos dados mesmo na presença de tendência linear (Wang, 2008a; Wang, 2013; Oscar Jr., 2019). Os algoritmos PMTred e PMFred contabilizam a autocorrelação de primeira ordem para detectar pontos de mudança, refinando a análise com testes estatísticos subsequentes.

A quarta etapa consistiu na aplicação do índice de erosividade mensal (EI30) com base no Índice de Fournier Modificado (MFI) (Equações 1 e 2, respectivamente), onde Pm representa a média mensal (mm) e Pa a média anual total (mm).

(1) $$MFI = \left(\frac{Pm^2}{Pa}\right)$$

(2) $$\mathrm{EI}\,(30) = 121{,}385 * (\mathrm{MFI_m})^{0{,}7982}$$

A classificação dos valores do EI_{30} baseou-se no trabalho de Santos Neto e Christofaro (2019), que, por sua vez, tomaram como referência Carvalho (2008) e os intervalos destacados no Quadro 2. Para os dados mensais, foi adotada uma adaptação das metodologias de Santos (2008) e Borges, Ezezinos e Vieira (2020). O procedimento foi executado tanto para totais mensais históricos e totais mensais anuais, e foram aplicados no *software* Excel e *RStudio*.

Quadro 2- Classificação do fator de Erosividade da chuva (R) por intensidade.

Classe de Erosividade	**EI_{30}**	
	Erosividade (MJ mm há$^{-1}$ Ano^{-1})	Erosividade (MJ mm há$^{-1}$ Mês^{-1})
Fraca	$EI_{30} \leq 2452$	$EI_{30} \leq 245$
Média	$2452 < EI_{30} \leq 4905$	$245 < EI_{30} \leq 490$
Média-Forte	$4905 < EI_{30} \leq 7357$	$490 < EI_{30} \leq 735$
Forte	$7357 < EI_{30} \leq 9810$	$735 < EI_{30} \leq 981$
Muito Forte	$EI_{30} > 9810$	$EI_{30} > 981$

Fonte: adaptado de Santos Neto e Christofaro (2019); Santos (2008) e Borges, Ezezinos e Vieira (2020)

A quinta etapa do trabalho envolveu a detecção de tendências por meio do teste não paramétrico de Mann-Kendall, utilizando o *software* Past. Esse teste de hipóteses verifica a existência de tendência estatisticamente significativa na série, considerando um nível de confiança pré-definido (α) (Segura e Rocha, 2024).

O valor de α está associado à probabilidade de cometer erro ao rejeitar a hipótese H_o quando esta é verdadeira (Segura e Rocha, 2024). Valores positivos do teste de Mann-Kendall (MK) indicam tendência positiva, enquanto valores negativos apontam para tendência negativa. Já os valores de Z refletem a força da tendência identificada. Para um nível de confiança de α=5%, os resultados são estatisticamente significativos quando o p-valor é ≤0,05,

H_0 : hipótese nula onde o conjunto de dados não apresenta tendência

H_1 : hipótese alternativa quando existe tendência significativamente estatística.

Após a identificação das tendências, foi utilizado o teste não paramétrico de Pettitt. Ele é uma adaptação do teste de Mann-Whitney, projetado para identificar mudanças em séries temporais (Gois et al., 2020; Teramoto, 2024).

O teste de Pettitt apresenta duas hipóteses: a hipótese nula (H_o), que indica a inexistência de pontos de mudança, e a hipótese alternativa (H_1), que sugere a presença de alterações na série temporal (Teramoto, 2024). Esse método busca avaliar se duas amostras, X_1,..., X_t e X_{t+1},..., X_T, pertencem à mesma população. Assim, para cada valor de t, variando entre 1 e T, calcula-se o número de vezes que um valor da segunda amostra é maior que os valores da primeira amostra (Equação 3).

$$(3) \quad U_{t,N} = U_{t,N} + j = 1 \sum_{j=1}^{N} sgn(X_t - X_i)$$

Sendo que

$$sgn = (x)\begin{Bmatrix} +1 & x > 0 \\ 0 & x = 0 \\ -1 & x < 0 \end{Bmatrix}$$

O máximo valor de U_t,N, indica o ponto de mudança na série e pode ser obtido pela equação 4:

$$(4) \quad k(t) = máx_{1 \leq t \geq N} \left| U_{t,N} \right|$$

Logo, a significância é determinada pela equação 5:

$$(5) \quad P = 2e^{\left\{\frac{-6(K_N)^2}{(N^3+N^2)}\right\}}$$

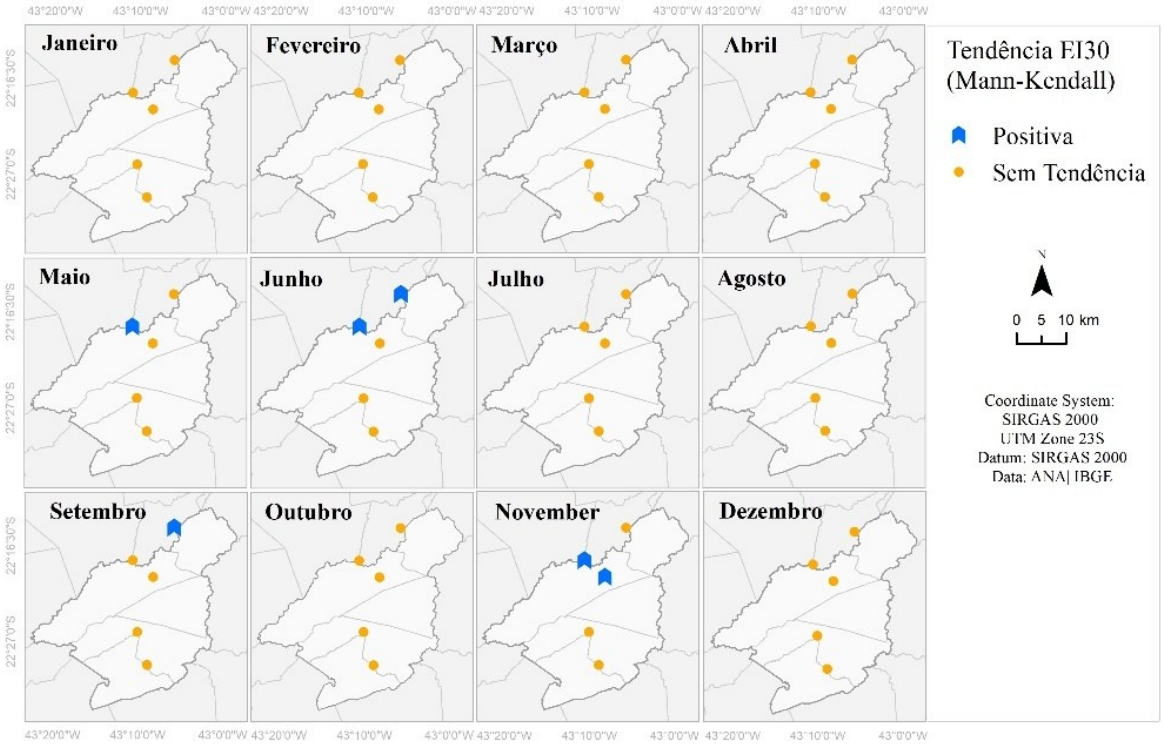
Assim, o valor de $\mathrm{k}(t)$ representa o ponto de alteração da série, enquanto o p-valor indica a significância estatística. Para α=5%, consideram-se estatisticamente significativos os valores de p ≤0,05.

O teste de Pettitt foi aplicado no *software* RStudio, utilizando o pacote *trend* e a função *pettitt.test* e para os gráficos foi feito uso do pacote *ggplot2*.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 3 apresenta a distribuição espacial das tendências mensais identificadas. Não foram observadas tendências de redução do EI30 em nenhum dos meses analisados nas estações estudadas.

Figura 3 – Distribuição espacial das tendências mensais de EI_{30} por posto pluviométrico



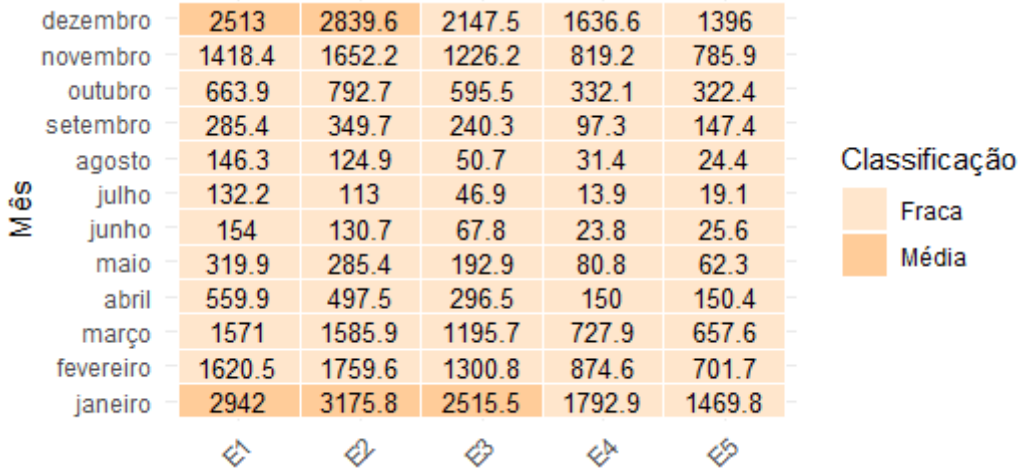
Fonte: Elaboração própria (2024).

Os meses de maio, junho, setembro e novembro apresentaram tendência de aumento do EI30. Vale destacar que as estações localizadas a barlavento não apresentaram tendências significativas, enquanto as estações a sotavento registraram aumento. Isso sugere que o padrão de chuvas nas áreas a sotavento possa estar em processo de mudança, favorecendo maior potencial de erosividade das chuvas nessas áreas. A região a barlavento corresponde a área do município da entrada de sistemas frontais, que corresponde a um dos principais sistemas atmosféricos produtores de tipos de tempo associados à precipitação pluviométrica, além da atuação da ZCAS, que também pode contribuir para o aumento das chuvas na região (Nimer, 1972; Sant'Anna Neto, 2005). Ainda segundo Sant'Anna Neto (2005), o alinhamento das serras no sentido norte-sul facilita a incursão de sistemas frontais e atua como barreira ao avanço das correntes de leste. Além disso, observa-se que, dos quatro meses com tendência de aumento, dois correspondem à estação seca. Esse fato pode indicar um possível aumento das chuvas no período seco nas estações analisadas.

A Figura 4 apresenta os valores de EI30 e suas classificações para as médias mensais históricas. A erosividade variou de fraca a média, com os maiores valores registrados nos

meses mais chuvosos (dezembro e janeiro) e nas estações de maior altimetria (E1 e E2). A estação E3 também apresentou valores médios de EI30 em janeiro. Os valores mais elevados de erosividade das chuvas nos meses de dezembro e janeiro se deve ao fato de serem correspondente a estação chuvosa. Esse mesmo padrão foi observado por Neves e Di Lollo (2022) ao estudarem a erosividade das chuvas no município de São Paulo. Os meses com os maiores valores de erosividade, segundo os autores foram dezembro, janeiro e fevereiro, sendo esses meses os mais chuvosos e apresentando totais pluviométricos elevados em detrimento do efeito orográfico sobre as chuvas na região.

Figura 4 – Distribuição mensal e classificação dos valores de EI_{30} mensais históricos.



Fonte: Elaboração própria (2024)

Os resultados corroboram com Gonçalves et al. (2006), que identificaram a Região Serrana como a área de maior potencial erosivo no estado do Rio de Janeiro. Observou-se que as estações em altitudes mais elevadas registraram os maiores valores de erosividade, enquanto esses valores diminuíram à medida que se afastavam dos pontos mais altos da Serra.

Fenta et. al. (2024) destaca que o potencial erosivo está relacionado tanto à magnitude da erosividade das chuvas, quanto a época do ano que ocorre a máxima erosividade. Considerando os resultados obtidos, a maior erosividade corresponde aos meses mais chuvosos (dezembro e janeiro) para a região a sotaventos. Esses resultados corroboram, parcialmente com os autores citados, que apontam os meses de janeiro e fevereiro como os meses de máxima erosividade em grande parte da América do Sul, incluindo a área de estudo.

Trindade et al. (2016), ao analisarem a erosividade em todo o território nacional com base nas oito bacias hidrográficas (Amazonas, Tocantins, Atlântico – trecho Norte/Nordeste, São Francisco, Atlântico – trecho Leste, Paraná, Uruguai e Atlântico – trecho Sudeste), identificaram que os valores de erosividade na bacia correspondente à área de estudo foram inferiores aos registrados na estação de maior altimetria (E1) durante os meses de janeiro, fevereiro, março, abril, outubro, novembro e dezembro. Em suma, a estação localizada à barlavento apresentou maiores valores de EI30 na estação chuvosa, do que os observados para toda a bacia hidrográfica Atlântico – trecho Leste. Nos demais meses e nas outras estações pluviométricas, os valores de EI30 foram menores ou próximos aos encontrados pelos autores.

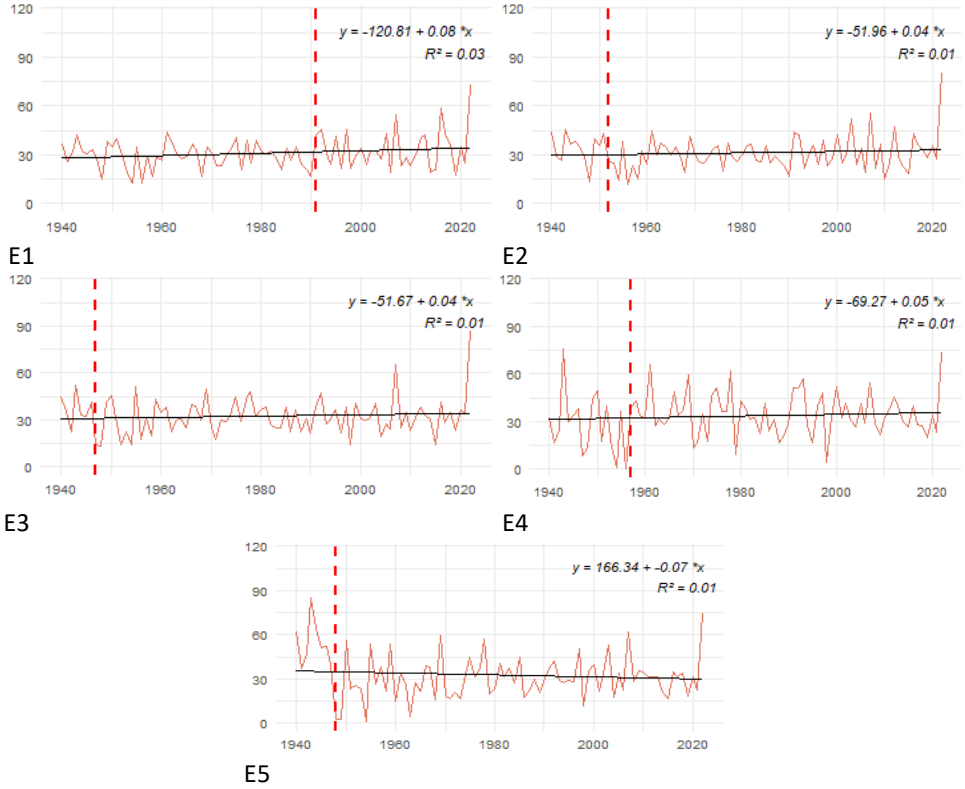
A tabela 1 e a Figura 5 apresentam os valores dos testes Mann-Kendall (MK) e Pettitt para o mês de janeiro. Em todas as estações pluviométricas, a erosividade máxima esteve abaixo de 120 MJ mm ha^{-1} $mês^{-1}$. Quanto aos resultados do teste MK, nenhuma das estações apresentou tendência estatisticamente significativa.

Tabela 1- Resultados dos testes não paramétricos Mann-Kendall e Pettitt para os postos pluviométricos para o mês de janeiro. (*) resultados com significância estatística.

Janeiro		Erosividade				
		E1	**E2**	**E3**	**E4**	**E5**
MK	**Z**	0,61	-0,40	0,02	0,35	-0,60
	p-valor	0,52	0,69	0,98	0,72	0,55
Pettitt	**K**	51	12	7	17	8
	Ano	1990	1951	1946	1956	1947
	p-valor	0,89	0,81	1	0,91	0,19

Fonte: Elaboração própria (2024)

Figura 5 – Gráfico de tendência e ponto de mudança da série de EI_{30} para o mês de janeiro.



Fonte: Elaboração própria (2024)

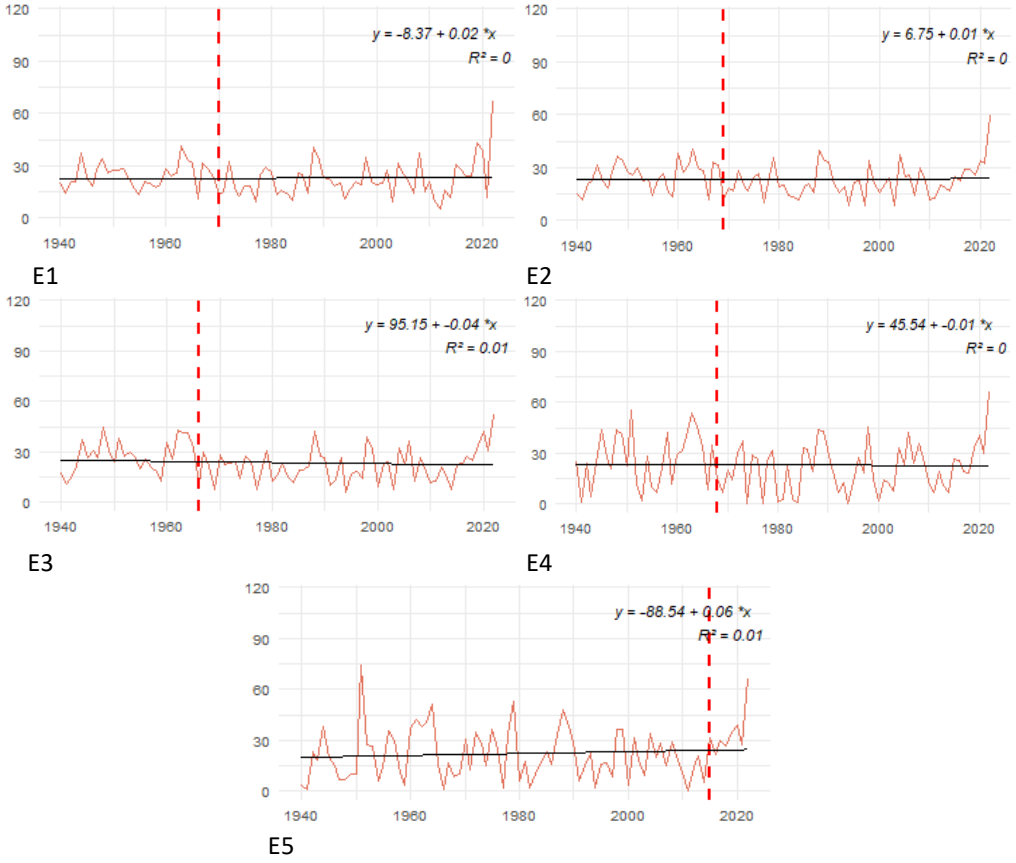
Fevereiro não apresentou significância estatística em nenhum dos testes aplicados (Tabela 2, Figura 6). Os valores de EI30 permaneceram abaixo de 245 MJ mm ha^{-1} $mês^{-1}$, classificando a erosividade como fraca. Os pontos de mudança ocorreram entre 1965 (E3) e 1969 (E1) nas estações E1 e E4, enquanto a estação E5 apresentou a mudança mais recente, em 2014.

Tabela 2- Resultados dos testes não paramétricos Mann-Kendall e Pettitt para os postos pluviométricos para o mês de fevereiro. (*) resultados com significância estatística.

Fevereiro		Erosividade				
		E1	**E2**	**E3**	**E4**	**E5**
MK	**Z**	-0,47	-0,13	-1,03	-0,15	1,16
	p-valor	0,64	0,89	0,30	0,88	0,24
Pettitt	**K**	30	29	26	28	75
	Ano	1969	1968	1965	1967	2014
	p-valor	0,43	0,37	0,10	0,70	0,71

Fonte: Elaboração própria (2024)

Figura 6 – Gráfico de tendência e ponto de mudança da série de EI_{30} para o mês de fevereiro.



Fonte: Elaboração própria (2024)

O mês de março apresentou o mesmo padrão de não significância nos dois testes aplicados (Tabela 3, Figura 7). Os pontos de mudança ocorreram na década de 1960 para as estações E1 a E4, enquanto a estação E5 registrou mudança em 1981, todavia, sem significância estatística. Todos os valores foram classificados como de erosividade fraca.

Tabela 3- Resultados dos testes não paramétricos Mann-Kendall e Pettitt para os postos pluviométricos para o mês de março. (*) resultados com significância estatística.

Março		Erosividade				
		E1	**E2**	**E3**	**E4**	**E5**
MK	**Z**	-1,05	-0,88	-0,33	0,26	1,40
	p-valor	0,29	0,38	0,74	0,80	0,16
Pettitt	**K**	22	22	28	21	42
	Ano	1961	1961	1967	1960	1981
	p-valor	0,1	0,12	0,47	0,56	0,22

Fonte: Elaboração própria (2024)

Figura 7 – Gráfico de tendência e ponto de mudança da série de EI_{30} para o mês de março.



Fonte: Elaboração própria (2024)

Abril não apresentou significância estatística nos testes de Mann-Kendall e Pettitt (Tabela 4, Figura 8). Os pontos de mudança ocorreram em anos próximos nas estações E3 (1979), E4 (1978) e E5 (1978), todavia, não apresentaram significância estatística.

Quanto à intensidade do EI30, E1, E2 e E3 registraram valores abaixo de 30 MJ mm ha^{-1} $mês^{-1}$, enquanto E4 apresentou um pico de 59,12 MJ mm ha^{-1} $mês^{-1}$ e E5, de 33,37 MJ

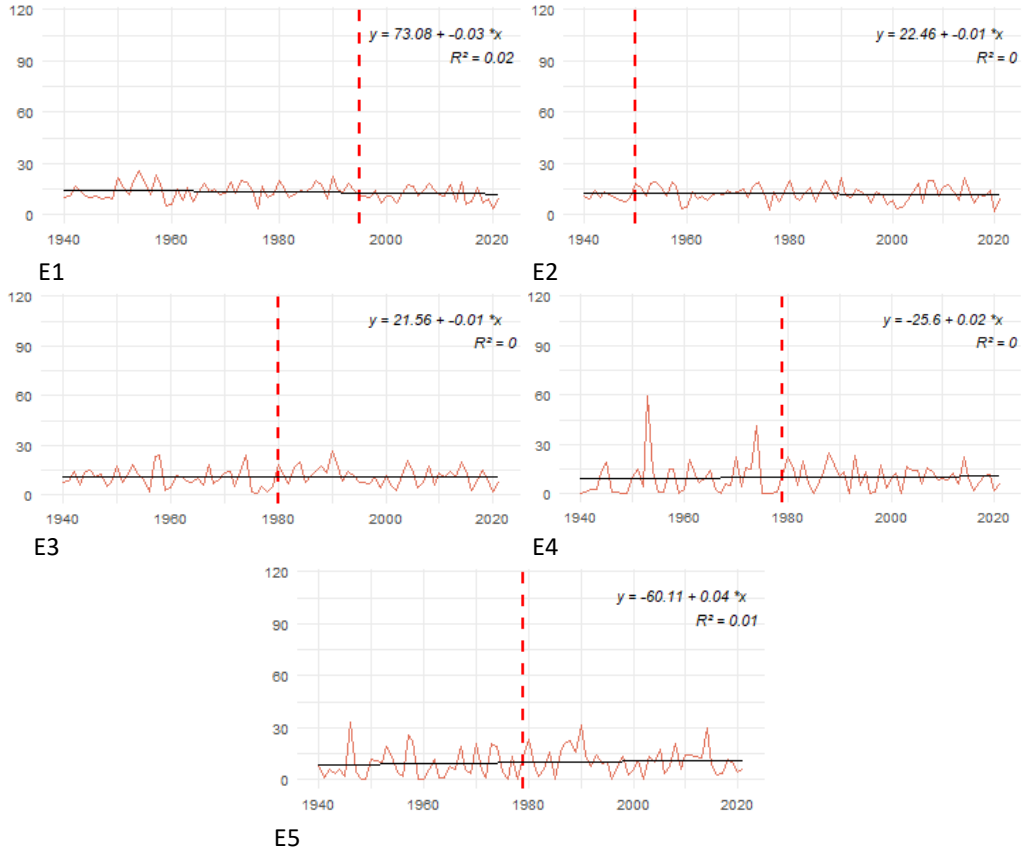
mm ha^{-1} $mês^{-1}$. Apesar desses valores elevados, a erosividade foi classificada como fraca ao longo de toda a série.

Tabela 4- Resultados dos testes não paramétricos Mann-Kendall e Pettitt para os postos pluviométricos para o mês de abril. (*) resultados com significância estatística.

Abril		Erosividade				
		E1	**E2**	**E3**	**E4**	**E5**
MK	**Z**	-1,11	-0,08	-0,15	1,09	1,13
	p-valor	0,27	0,94	0,88	0,28	0,26
Pettitt	**K**	55	10	40	39	39
	Ano	1994	1949	1979	1978	1978
	p-valor	0,21	1	1	0,48	0,31

Fonte: Elaboração própria (2024)

Figura 8 – Gráfico de tendência e ponto de mudança da série de EI_{30} para o mês de abril.



Fonte: Elaboração própria (2024)

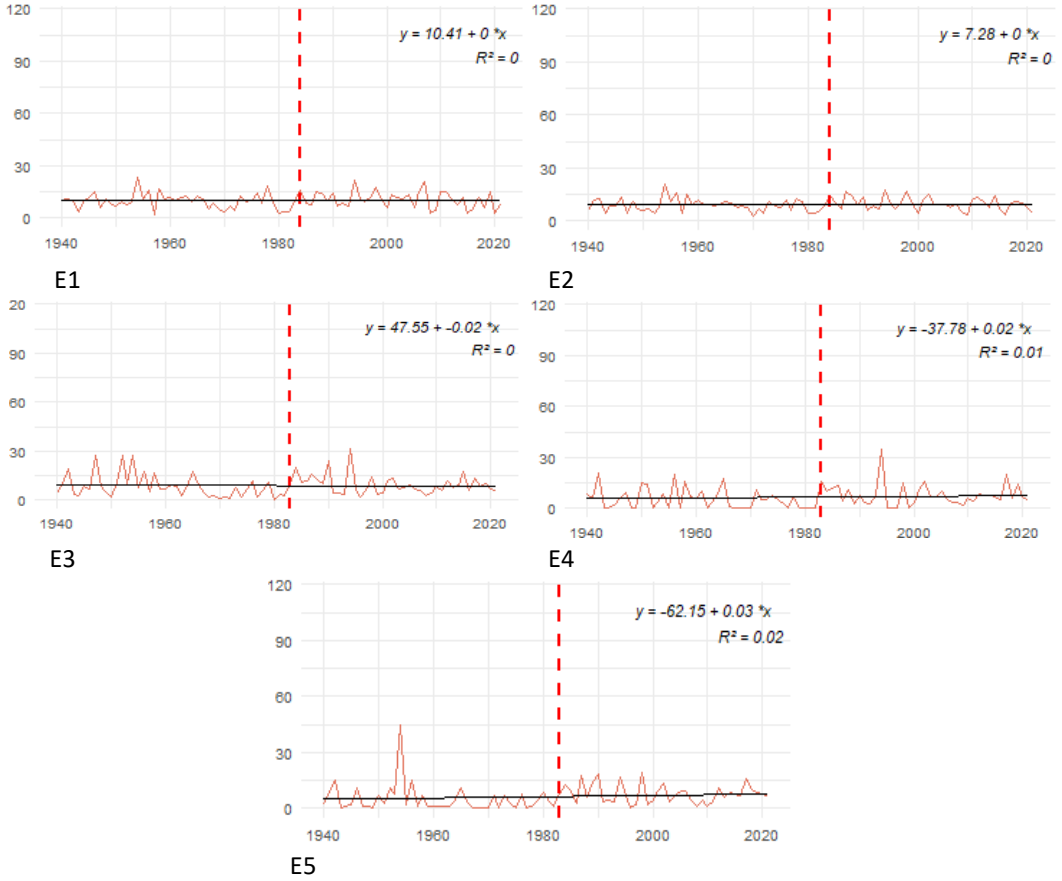
Maio apresentou uma tendência estatisticamente significativa de aumento do EI30 na estação E5 (Tabela 5, Figura 9). O teste de Pettitt também apontou um ponto de mudança nessa estação em 1982.

Tabela 5- Resultados dos testes não paramétricos Mann-Kendall e Pettitt para os postos pluviométricos para o mês de maio. (*) resultados com significância estatística.

Maio		Erosividade				
		E1	**E2**	**E3**	**E4**	**E5**
MK	**Z**	0,05	0,18	0,14	0,94	2,63
	p-valor	0,96	0,85	0,89	0,35	0,01*
Pettitt	**K**	44	44	37	43	43
	Ano	1983	1983	1976	1982	1982
	p-valor	1	0,92	0,47	0,27	0,00

Fonte: Elaboração própria (2024)

Figura 9 – Gráfico de tendência e ponto de mudança da série de EI_{30} para o mês de maio.



Fonte: Elaboração própria (2024)

Junho apresentou uma tendência significativa de aumento do EI30 nas estações E4 e E5, ambas com alta força de tendência (Tabela 6, Figura 10). Quanto aos pontos de mudança, apenas a estação E4 teve significância estatística. No entanto, E3, E4 e E5 registraram mudanças em 2003, enquanto E2 o ponto de mudança foi em 2002, sugerindo possíveis modificações no padrão de variabilidade das chuvas a partir desses anos.

Enquanto as estações de barlavento mostraram uma tendência não significativa de redução do EI30 (E1 e E2), as de sotavento apresentaram um aumento estatisticamente

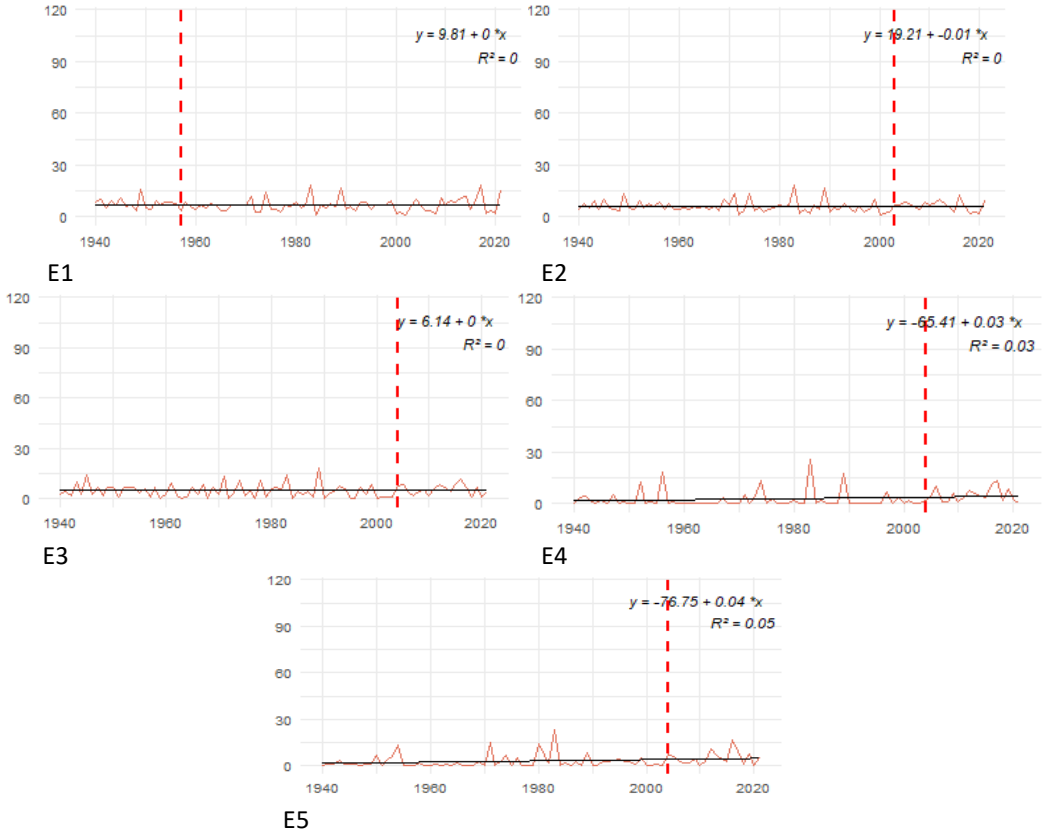
significativo (E4 e E5). Apesar dessas variações, a erosividade foi classificada como fraca para o mês de junho.

Tabela 6- Resultados dos testes não paramétricos Mann-Kendall e Pettitt para os postos pluviométricos para o mês de junho. (*) resultados com significância estatística.

Junho		Erosividade				
		E1	**E2**	**E3**	**E4**	**E5**
MK	**Z**	-0,65	-0,31	0,03	2,03	1,98
	p-valor	0,52	0,75	0,97	0,04*	0,05*
Pettitt	**K**	17	63	64	64	64
	Ano	1956	2002	2003	2003	2003
	p-valor	0,76	1	1	0,01*	0,10

Fonte: Elaboração própria (2024)

Figura 10 – Gráfico de tendência e ponto de mudança da série de EI_{30} para o mês de junho.



Fonte: Elaboração própria (2024)

Julho não apresentou tendência significativa em nenhum dos postos pluviométricos analisados (Tabela 7, Figura 11). No entanto, o teste de Pettitt indicou significância estatística na estação E4, com um ponto de mudança em 2003, semelhante ao observado em junho, sugerindo possível alteração no padrão das chuvas nos meses mais secos.

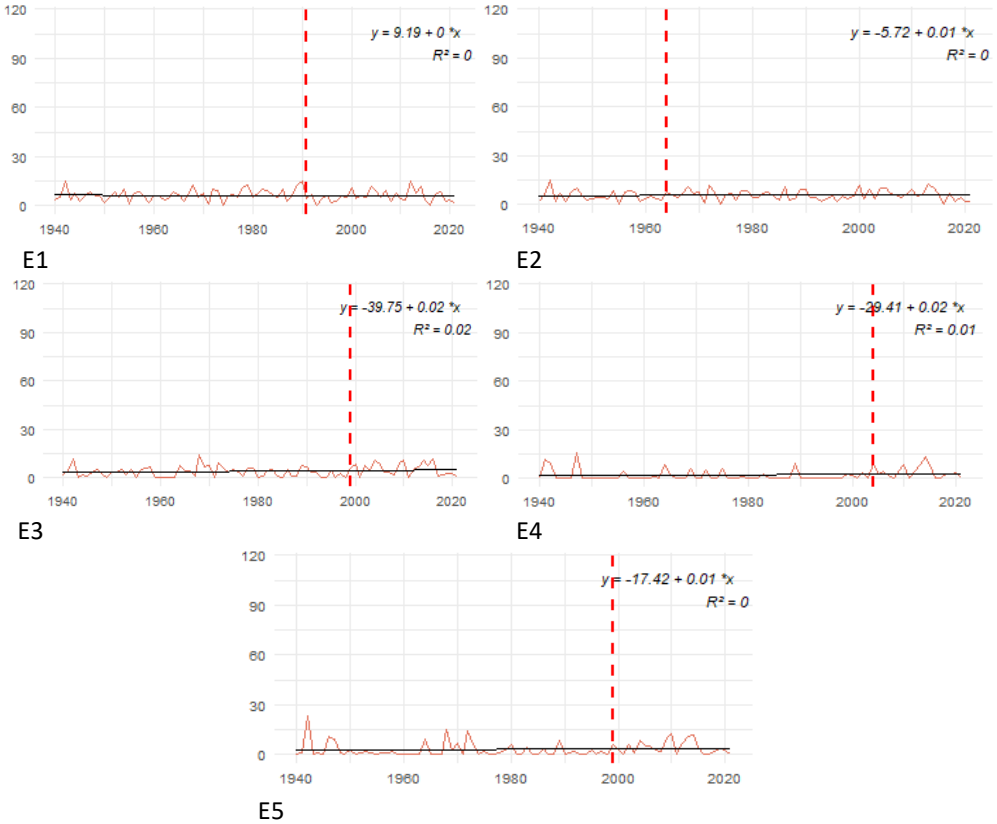
Todos os anos apresentaram valores de EI30 classificados como de baixa erosividade, com o maior registro de 23,41 MJ mm ha^{-1} mês^{-1} em 1942, na estação E5.

Tabela 7- Resultados dos testes não paramétricos Mann-Kendall e Pettitt para os postos pluviométricos para o mês de julho. (*) resultados com significância estatística.

Julho		Erosividade				
		E1	**E2**	**E3**	**E4**	**E5**
MK	**Z**	-0,26	0,55	1,43	1,60	0,91
	p-valor	0,79	0,58	0,15	0,11	0,36
Pettitt	**K**	51	24	59	64	59
	Ano	1990	1963	1998	2003	1998
	p-valor	0,72	0,83	0,23	0,02*	0,22

Fonte: Elaboração própria (2024)

Figura 11 – Gráfico de tendência e ponto de mudança da série de EI$_{30}$ para o mês de julho.



Fonte: Elaboração própria (2024)

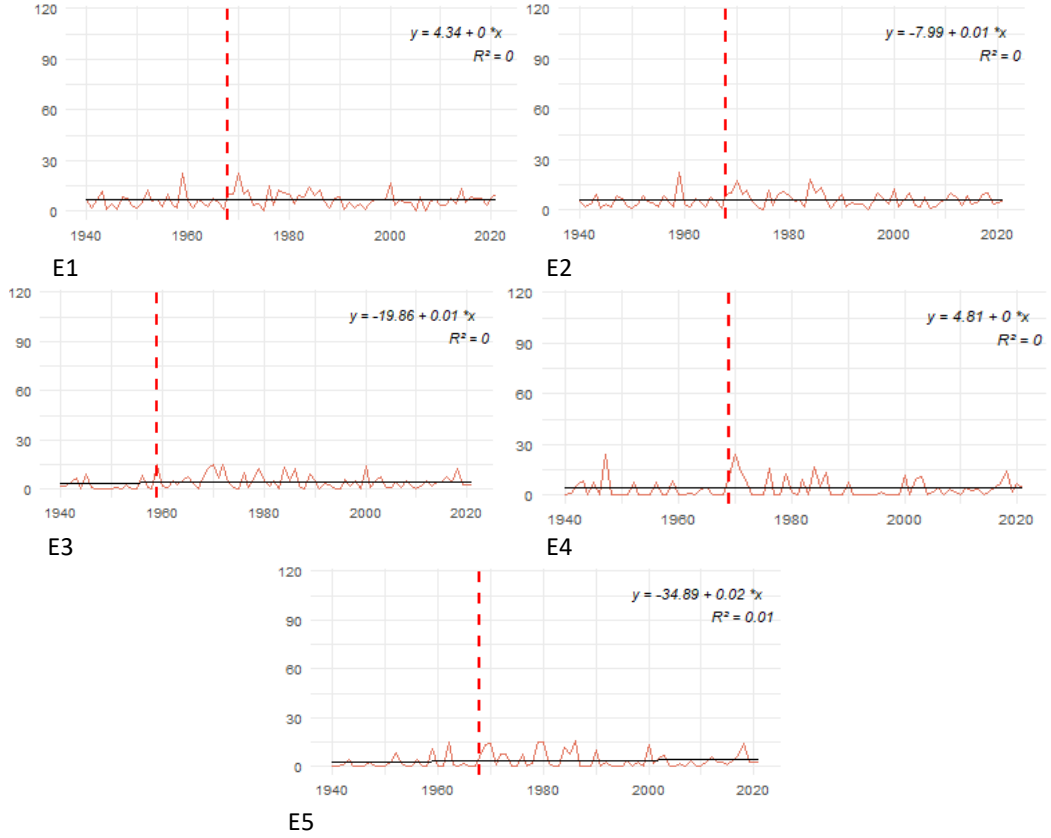
O mês de agosto não apresentou significância estatística em nenhum dos dois testes aplicados às cinco estações (Tabela 8, Figura 12). O maior valor de EI30 registrado foi de 23,86 MJ mm ha^{-1} mês^{-1}, em 1970, na estação E4. Assim, todos os anos para o mês de agosto apresentaram erosividade classificada como fraca.

Tabela 8- Resultados dos testes não paramétricos Mann-Kendall e Pettitt para os postos pluviométricos para o mês de agosto. (*) resultados com significância estatística.

Agosto		Erosividade				
		E1	**E2**	**E3**	**E4**	**E5**
MK	**Z**	0,47	0,88	1,28	1,24	1,37
	p-valor	0,64	0,38	0,20	0,21	0,17
Pettitt	**K**	28	28	19	29	28
	Ano	1967	1967	1958	1968	1967
	p-valor	0,54	0,35	0,08	0,46	0,41

Fonte: Elaboração própria (2024)

Figura 12 – Gráfico de tendência e ponto de mudança da série de EI_{30} para o mês de agosto.



Fonte: Elaboração própria (2024)

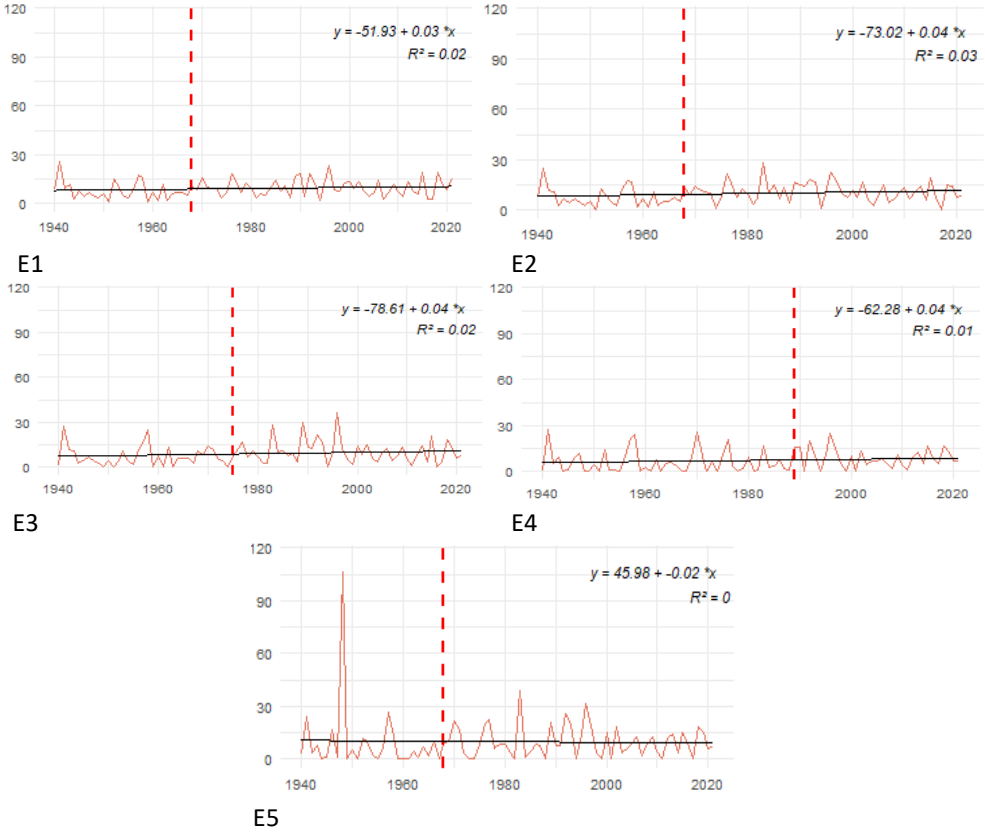
Setembro apresentou uma tendência significativa de aumento do EI30 na estação E4 (Z=2,03) (Tabela 9, Figura 13). Nas demais estações, não houve significância estatística, assim como no teste de Pettitt. Apesar da classificação de fraca erosividade, os valores de EI30 superaram os dos meses da estação seca, apesar de setembro não ser um período chuvoso na área de estudo. O maior valor, 106,12 MJ mm ha^{-1} $mês^{-1}$, foi registrado em 1948 na estação E5, destacando-se como o pico mais pronunciado no gráfico.

Tabela 9- Resultados dos testes não paramétricos Mann-Kendall e Pettitt para os postos pluviométricos para o mês de setembro. (*) resultados com significância estatística.

Setembro		Erosividade				
		E1	**E2**	**E3**	**E4**	**E5**
MK	**Z**	1,44	1,91	1,73	2,03	1,35
	p-valor	0,15	0,06	0,08	0,04*	0,18
Pettitt	**K**	28	28	35	49	28
	Ano	1967	1967	1974	1988	1967
	p-valor	0,20	0,35	0,12	0,15	0,42

Fonte: Elaboração própria (2024)

Figura 13 – Gráfico de tendência e ponto de mudança da série de EI_{30} para o mês de setembro.



Fonte: Elaboração própria (2024)

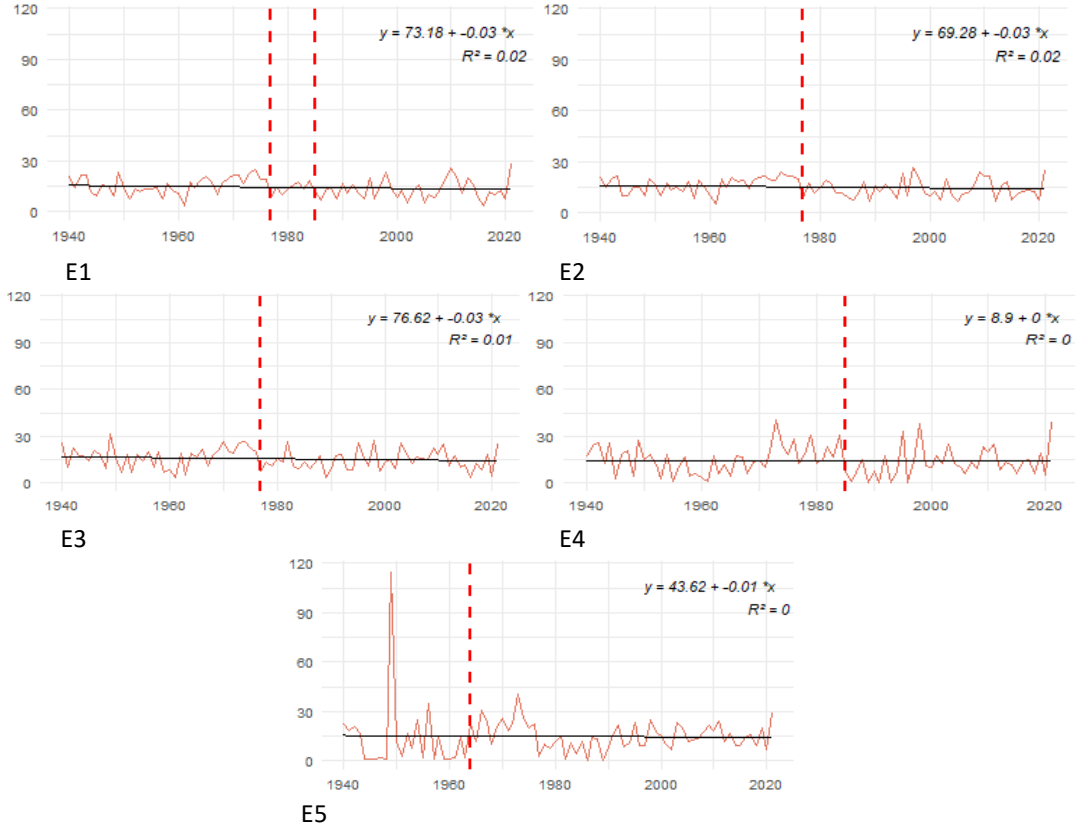
O mês de outubro não apresentou significância estatística em nenhum dos testes aplicados (Tabela10, Figura 14). Os anos de 1976 e 1984 foram os principais pontos de mudança identificados no mês. O maior valor de EI30 no mês foi de 114,51 MJ mm ha^{-1} $mês^{-1}$, registrado em 1949 na estação E5.

Tabela 10- Resultados dos testes não paramétricos Mann-Kendall e Pettitt para os postos pluviométricos para o mês de outubro. (*) resultados com significância estatística.

Outubro		Erosividade				
		E1	**E2**	**E3**	**E4**	**E5**
MK	**Z**	-1,48	-1,23	-1,05	-0,31	1,02
	p-valor	0,14	0,22	0,29	0,75	0,31
Pettitt	**K**	37/45	37	37	45	24
	Ano	1976/1984	1976	1976	1984	1963
	p-valor	0,12	0,12	0,24	0,60	0,29

Fonte: Elaboração própria (2024)

Figura 14 – Gráfico de tendência e ponto de mudança da série de EI_{30} para o mês de outubro.



Fonte: Elaboração própria (2024)

Novembro apresentou uma tendência estatisticamente significativa de aumento do EI30 nas estações E3 e E5, com elevada força de tendência (Z=2,39 e Z=2,63, respectivamente) (Tabela 11, Figura 14). O teste de Pettitt também indicou pontos de mudança nesses postos, em 1994 (E3) e 1991 (E5).

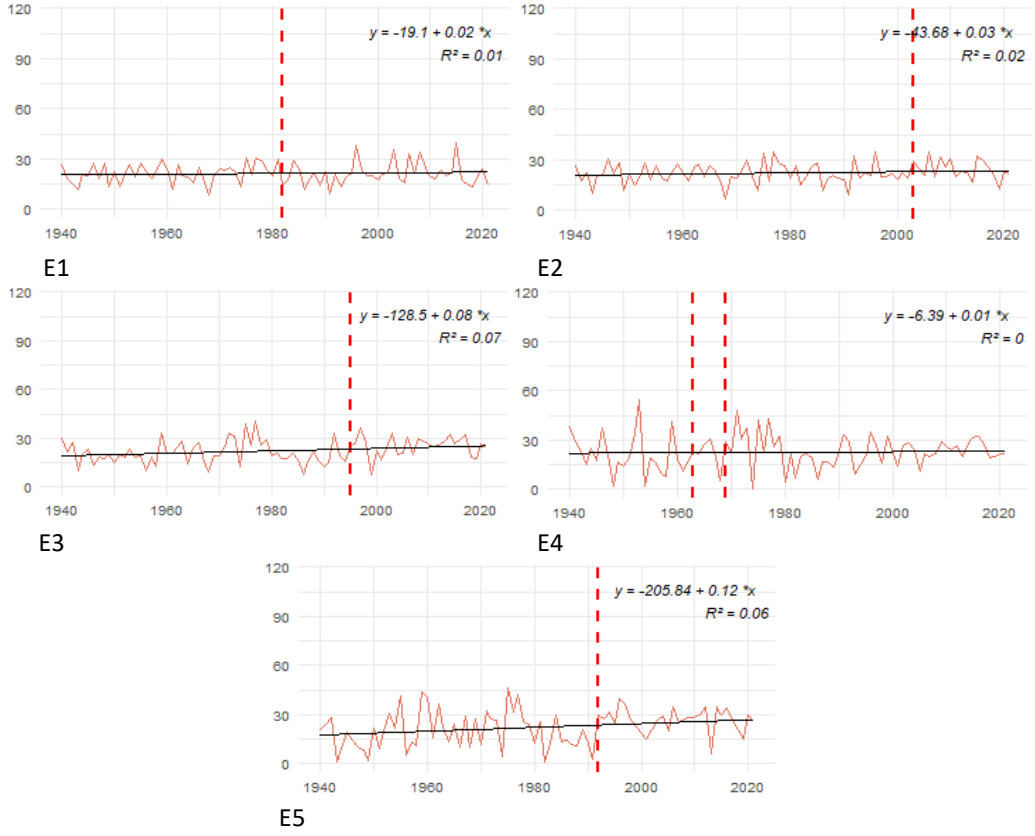
Apesar de novembro já integrar o período chuvoso, o maior valor de EI30 registrado foi 54,15 MJ mm ha^{-1} $mês^{-1}$, em 1953, na estação E4.

Tabela 11- Resultados dos testes não paramétricos Mann-Kendall e Pettitt para os postos pluviométricos para o mês de novembro. (*) resultados com significância estatística.

Novembro		Erosividade				
		E1	**E2**	**E3**	**E4**	**E5**
MK	**Z**	-0,03	1,07	2,39	0,80	2,63
	p-valor	0,97	0,28	0,02*	0,42	0,01*
Pettitt	**K**	42	63	55	23/29	52
	Ano	1981	2002	1994	1962/1968	1991
	p-valor	1	0,54	0,03*	0,88	0,02*

Fonte: Elaboração própria (2024)

Figura 14 – Gráfico de tendência e ponto de mudança da série de EI_{30} para o mês de novembro.



Fonte: Elaboração própria (2024)

Dezembro não apresentou significância estatística em nenhum dos testes aplicados (Tabela 12, Figura 15). Embora não tenham sido identificadas tendências significativas, as estações E4 e E5 registraram as maiores variações de EI30, com amplitudes de 73,4 e 72,2 MJ mm ha^{-1} $mês^{-1}$, respectivamente.

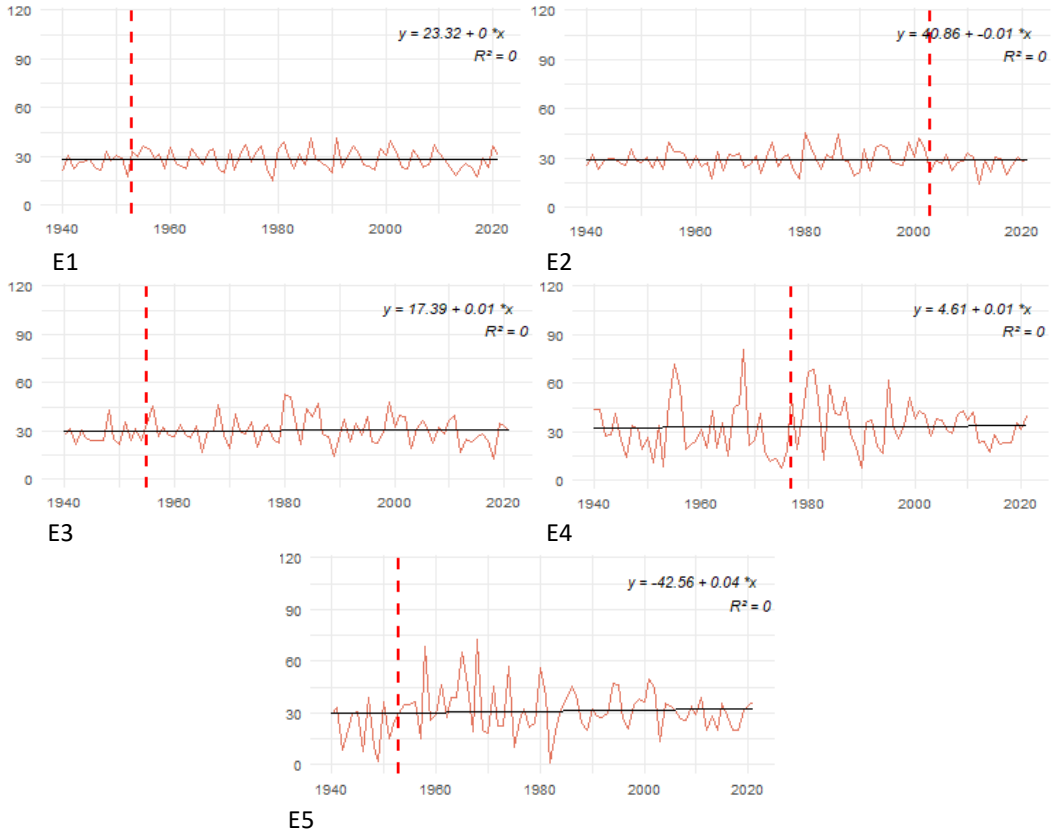
O maior valor de EI30 foi 80,0 MJ mm ha^{-1} $mês^{-1}$, registrado na estação E4 em 1968. Apesar disso, todas as cinco estações classificaram a erosividade como fraca ao longo da série.

Tabela 12- Resultados dos testes não paramétricos Mann-Kendall e Pettitt para os postos pluviométricos para o mês de dezembro. (*) resultados com significância estatística.

Dezembro		Erosividade				
		E1	**E2**	**E3**	**E4**	**E5**
MK	**Z**	0,21	-0,25	0,53	0,18	0,78
	p-valor	0,84	0,80	0,60	0,85	0,44
Pettitt	**K**	13	63	15	37	13
	Ano	1952	2002	1954	1976	1952
	p-valor	0,94	0,69	0,96	0,47	0,52

Fonte: Elaboração própria (2024)

Figura 15 – Gráfico de tendência e ponto de mudança da série de EI_{30} para o mês de dezembro.



Fonte: Elaboração própria (2024)

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise dos resultados revelou que as variações no padrão das chuvas em Petrópolis influenciam o potencial erosivo em três das cinco estações pluviométricas avaliadas. Os principais meses com mudanças nos dados foram maio, junho, setembro e novembro, sendo este último o único dentro da estação chuvosa. Essa influência pode estar associada às mudanças na variabilidade das chuvas, sobretudo considerando o cenário das mudanças climáticas globais. Isso indica, portanto, a necessidade de destrinchar as análises

pluviométricas para identificação das mudanças nos padrões de chuva que, por conseguinte, reverberam na erosividade pluviométrica.

Todas as tendências significativas identificadas foram positivas, sugerindo um aumento do potencial erosivo na área estudada, logo, é possível que no município esteja ocorrendo mudanças nos padrões da chuva deflagrando mudanças no padrão do potencial erosivo. Além disso, embora mudanças mais expressivas fossem esperadas nas estações de barlavento, devido aos maiores acumulados de chuva, as alterações ocorreram principalmente na porção sotavento (estações E3, E4 e E5).

Quanto aos pontos de mudança nas séries históricas, não foram identificados padrões específicos. Em janeiro, os pontos de mudança ocorreram no início da série analisada. Em fevereiro e março, a década de 1960 destacou-se, com pontos de mudança em quatro das cinco estações. Em abril, essas mudanças concentraram-se nos anos de 1978 e 1979, enquanto, em maio, predominaram na década de 1980, especialmente em 1982 e 1983.

Nos meses seguintes, junho apresentou maior número de pontos de mudança em 2002 e 2003, enquanto julho destacou-se na década de 1990, nos anos de 1990 e 1998. Em agosto e setembro, os pontos concentraram-se na década de 1960, nos anos de 1967 e 1968, respectivamente. Em outubro, as décadas de 1970 e 1980 foram mais representativas, com pontos em 1976 e 1984.

Por fim, dezembro apresentou maior variabilidade nos anos de mudança, abrangendo as décadas de 1960, 1980, 1990 e 2000, com destaque para os anos de 1952 e 1954.

Os resultados deste estudo contribuem significativamente para a compreensão do potencial erosivo em áreas de relevo complexo, especialmente ao analisar tendências e pontos de mudança dessa variável em Petrópolis. Isso se faz, sobretudo, a partir da compreensão de a partir de quando se verifica mudanças na intensidade das chuvas e quais as perspectivas futuras, uma vez que, conhecer essa dinâmica permite implementar medidas de mitigação. Além disso, a caracterização temporal da erosividade contribuiu para definição dos períodos (meses) de elaboração dessas medidas e dos períodos em que as medidas já devam estar implementadas, uma vez que, a precipitação é um dos elementos da erosividade, mas não o único. À vista disso, as medias de manejo do solo, formas de uso e ocupação, práticas vegetacionais e afins devem ser consideradas nesse contexto. Estudos futuros podem aprofundar essa análise explorando a relação entre padrões de uso e cobertura da terra e o

potencial erosivo, auxiliando na identificação de áreas prioritárias de alto risco.

REFERÊNCIAS

BACK, A. J.; JUSTEN, J. G. K.; GUADAGNIN, C. A. Caracterização da agressividade e erosividade das chuvas em Ituporanga, Santa Catarina. **Agropecuária Catarinense**, Florianópolis, v.36, n.3, 2023.

BORGES, F. R. F.; EZEZINOS, K. E.; VIEIRA, E. M. A erosividade da chuva nos municípios mineiros da bacia do rio Doce, por meio do programa computacional netErosividade MG. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 11, e55791110126, 2020.

CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia prática**. 2.ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2008. 599p

COELHO, L. A. F.; NUNES, A. B Eventos Recentes de Chuva Intensa na Cidade do Rio de Janeiro: Análise Sinótica. **Revista Brasileira de Geografia Física** v.13, n. 03, p. 994-1012, 2020.

EEKHOUT, J. P. C.; VENTE, J. Global impact of climate change on soil erosion and potential for adaptation through soil conservation. **Earth-Science Reviews,** 226, 103921, 2022.

Fenta, A. A., Tsunekawa, A., Haregeweyn, N., Yasuda, H., Tsubo, M., Borrelli, P., Kawai, T., Belay, A. S., Ebabu, K., Berihun, M. L., Sultan, D., Setargie, T. A., Elnashar, A., Arshad, A., & Panagos, P. (2024). *An integrated modeling approach for estimating monthly global rainfall erosivity*. **Scientific Reports, 14**, Article 8167. https://doi.org/10.1038/s41598-024-59019-1

GONÇALVES, F. A.; SILVA, D. D.; PRUSKI, F. F.; CARVALHO, D. F.; CRUZ, E. S. Índices e espacialização da erosividade das chuvas para o Estado do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira Engenharia Agrícola Ambiental**, v.10, n.2, p.269–276, 2006.

GOIS, G.; OLIVEIRA- JÚNIOR, J. F.; PIVA, R. F. P. S.; FREITAS, W. K.; TERASSI, P. M. B.; SOBRAL, B. S. /variabilidade pluviométrica, indicadores de seca e a aplicação do índice SPI para a região do Médio Vale Paraíba do Sul no estado do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Climatologia**, vol. 27, 2020. ISSN:2237-8642 (Eletrônica).

KUROKI, Larissa Yumi; RAMOS DE SOUSA, Aline; GOMES CALADO, Gabrielle; NUNES CALADO, Bianca; CARDOSO, Andrea; CLEOFÉ VALVERDE BRAMBILA, Maria. A vulnerabilidade social da região Sudeste do Brasil frente à variabilidade climática. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 31, n. 18, p. 671-695, 2022. DOI: 10.55761/abclima.v31i18.15903

LIMA, S. S.; ARMOND, N. B. Chuvas na Região Metropolitana do Rio de Janeiro: caracterização, eventos extremos e tendências. **Sociedade & Natureza**, v. 34, p. e64770, 2022.

NEVES, M. P.; DI LOLLO, J. A. Erosividade da Chuva no Município de São Pedro - SP: Análise entre 1960-2020. **Sociedade & Natureza**, v.34 e64608, 2022.

NIMER, E. Climatologia da Região Sudeste do Brasil: Introdução à climatologia dinâmica. **Revista Brasileira de Geografia**, Rio de Janeiro, 34 (1): 3-48 jan/ mar, 1972.

OLIVEIRA, F. S.; PRADO, R. B. Erosividade da chuva no Brasil. Embrapa Solos – **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**, 286, 2023.

OSCAR JÚNIOR, A. C. Homogeneização de dados pluviométricos diários: uma contribuição metodológica. **Geo UERJ**, n.34, e, 40957 2019.

REBOITA, M. S.; GAN, M. A.; ROCHA, R. P.; AMBRIZZI, T. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.25, n.2, 185 - 204, 2010.

REBOITA, M. S.; TEODORO, T. A.; FERREIRA, G. W. S.; SOUZA, C. A. Ciclo de vida do sistema de monção da América do Sul: clima presente e futuro. **Revista Brasileira de Geografia Física** v.15, n.01, pp. 343-358, 2022.

RIQUETTI, N. B.; MELLO, C. R.; LEANDRO, D.; GUZMAN, J. A. Climate change projections of soil erosion in South America in the XXI century. **Geoderma,** 33, e00657, 2023.

SANT'ANNA NETO, J. L. Decálogo da climatologia do sudeste brasileiro. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 1, nº1, 2005.

SANTOS NETO, J. R.; CHRISTOFARO, C. Erosividade da chuva na bacia hidrográfica do rio Araçuaí- MG. **Boletim de Geografia**, Maringá, v. 37, n. 3, p. 40-50, 2019.

SANTOS, C. N**. El Niño, La Niña e a erosividade das chuvas no Estado do Rio Grande do Sul.** Tese de doutorado em Agranomia da Universidade Federal de Pelotas. Pelotas, 2008.

SEGURA, C. S.; ROCHA, R. P.; Tendências e variabilidade climática de frentes frias e precipitação na região metropolitana de São Paulo. **Revista Brasileira de Climatologia**, Dourados, MS, v. 34, jan. / jun. 2024.

SILVA, A. M. Rainfall erosivity map for Brazil. **Catena**, 57: 251 – 259, 2004.

SILVA, R. K.; RIBEIRO, G. N.; FRANCISCO, P. R. M.; MEDEIROS, P. C.; SILVA, A. M.; ROCHA, L. C. A. Mapeamento e análise da erosividade da chuva na sub-bacia do Alto Paraíba (Paraíba). **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, v.10, n.2. 013-025 (2022).

SOUSA TEIXEIRA, D. B. de; CECÍLIO, R. A.; MOREIRA, M. C.; PIRES, G. F.; FILHO, E. I. F. Recent advancements in rainfall erosivity assessment in Brazil: a review. ***Catena***, v. 219, p. 106572, 2022.

TAVARES, C. M. G.; FERREIRA, C. C. M. A relação entre a orografia e os eventos extremos de precipitação para o município de Petrópolis-RJ**. *Revista Brasileira de Climatologia***, v. 26, 2020. DOI: 10.5380/abclima.v26i0.71123.

TAVARES, C. M. G.; ARMOND, N. B.; FERREIRA, C. C. M.; GUERRA, A. J. T. Filling gaps of daily precipitation data at rain gauges in a tropical mountainous region: a case study of the municipality of Petrópolis, RJ, Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 156, n. 178, 2025. DOI: https://doi.org/10.1007/s00704-025-05397-z

TERAMOTO, A. S. **Efeito das Mudanças Climáticas e alterações do uso e ocupação do solo sobre as vazões de bacia hidrográfica da Serra da Mantiqueira, UGRHI-1(SP)**. Dissertação (mestrado) em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Sorocaba, 2024.

TRINDADE, A. L. F.; OLIVEIRA, P. T. S.; ANACHE, J. A. A.; WENDLAND, E. Variabilidade espacial da erosividade das chuvas no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** v.51, n.12, p.1918-1928, dez. 2016. DOI: 10.1590/S0100-204X2016001200002

Wang, X. L. and Y. Feng, published online August 2013: RHtests_dlyPrcp User Manual. Climate Research Division, Atmospheric Science and Technology Directorate, Science and Technology Branch, Environment Canada. 17 pp.

Wang, X. L., 2008a: Accounting for autocorrelation in detecting mean-shifts in climate data series using the penalized maximal t or F test. J. **Appl. Meteor. Climatol**., 47, 2423-2444.

WANG, X. L., 2008b: Penalized maximal F-test for detecting undocumented mean-shifts without trend-change. J. **Atmos. Oceanic tech**., 25 (No. 3), 368-384. DOI:10.1175/2007/JTECHA982.1.