



ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

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



Chuva Urbana no Município do Rio de Janeiro Via Técnicas Estatísticas

Vânia Ferreira Alves¹, Carlos Rodrigues Pereira¹, Luís Felipe Francisco Ferreira da Silva^{1,2}, José Francisco de Oliveira Júnior^{1,3}, Ricardo Victor Rodrigues Barbosa⁴, William Max de Oliveira Romão^{3,5}, Silvania Donato da Silva⁶

¹Programa de Engenharia de Biossistemas (PGEB) da Universidade Federal Fluminense (UFF), Niterói, Rio de Janeiro – Brasil. E-mail: vanialvesf@gmail.com; ² Prof. Dr. do PGEB/UFF, Niterói, Rio de Janeiro – Brasil. E-mail: crpereira@id.uff.br; ³ Mestrando do PGEB/UFF, Niterói, Rio de Janeiro – Brasil. E-mail: luisphelpis@outlook.com; ⁴ Prof. Dr. do Laboratório de Meteorologia Aplicada e Meio Ambiente – LAMMA, Instituto de Ciências Atmosféricas (ICAT), Universidade Federal de Alagoas (UFAL), Maceió, Alagoas - Brasil. E-mail: jose.junior@icat.ufal.br; ⁵ Prof. Dr. do Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo (PPGAU) da Universidade Federal de Alagoas (UFAL), Maceió, Alagoas – Brasil. E-mail: rvictor@fau.ufal.br; ⁶ Meteorologista no Sistema de Tecnologia e Monitoramento Ambiental do Paraná (SIMEPAR) – Curitiba, Paraná – Brasil. E-mail: william.romao@icat.ufal.br; Mestre em Meteorologia da Universidade Federal de Alagoas (UFAL), Maceió, Alagoas - Brasil. E-mail: silvaniadonatodasilva@gmail.com

Artigo recebido em 23/05/2024 e aceito em 24/01/2025

RESUMO

O objetivo do estudo foi analisar as características das chuvas diárias em um ambiente urbano via técnicas estatísticas no município do Rio de Janeiro (MRJ). No estudo foram usadas 28 estações pluviométricas no período de 1997 a 2016. A série temporal foi submetida às estatísticas descritiva, exploratória (boxplot), multivariada (análise de agrupamento – AA) e teste não paramétrico de Mann-Kendall (MK). A técnica AA, baseada na distância euclidiana com o agrupamento hierárquico de Ward, identificou quatro grupos homogêneos (G1, G2, G3 e G4) no MRJ. A posição geográfica, topografia e altitude revelaram influências significativas nos índices pluviométricos, com diferenças nos níveis de chuva entre áreas próximas ao Oceano Atlântico, Baía de Guanabara e à Floresta da Tijuca, ao contrário de estudos anteriores. As chuvas máximas anuais foram influenciadas pelos Sistemas Frontais (SF), Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e, principalmente pelas fases de El Niño e La Niña, variando de acordo com cada grupo homogêneo. Os meses de dezembro a março, com os maiores registros pluviométricos e os meses de julho a outubro com os menores totais de chuva. Com base no teste MK constatou-se que não houve tendência de crescimento na chuva diária. O estudo contribui para caracterização das chuvas diárias no MRJ nos aspectos de gestão de recursos hídricos, qualidade do ar e planejamento urbano.

Palavras-chave: clima urbano, chuva diária, ENOS, variabilidade climática, sistemas meteorológicos.

Urban Rainfall in the City of Rio de Janeiro Via Statistical Techniques

ABSTRACT

The aim of this study was to analyze the characteristics of daily rainfall in an urban environment using statistical techniques in the municipality of Rio de Janeiro (MRJ). The study used 28 rainfall stations from 1997 to 2016. The time series was subjected to descriptive, exploratory (boxplot), multivariate (cluster analysis – CA) statistics and the nonparametric Mann-Kendall (MK) test. The CA technique, based on Euclidean distance with Ward's hierarchical clustering, identified four homogeneous groups (G1, G2, G3 and G4) in MRJ. Geographic position, topography and altitude revealed significant influences on rainfall indices, with differences in rainfall levels between areas close to the Atlantic Ocean, Guanabara Bay and the Tijuca Forest, contrary to previous studies. The maximum annual rainfall was influenced by the Frontal Systems (FS), South Atlantic Convergence Zone (SACZ) and, mainly, by the El Niño and La Niña phases, varying according to each homogeneous group. The months from December to March had the highest rainfall records and the months from July to October had the lowest rainfall totals. Based on the MK test, it was found that there was no upward trend in daily rainfall. The study contributes to the characterization of daily rainfall in the MRJ in the aspects of water resource management, air quality and urban planning.

Keywords: urban climate, daily rainfall, ENSO, climate variability, meteorological systems.

Introdução

A intensificação das chuvas urbanas extremas impõe desafios crescentes ao planejamento das cidades, evidenciando a urgência de estratégias integradas de mitigação e adaptação climática (Hemmati, Kornhuber & Kruczkiewicz, 2022; Elsharqawy, Elbarmelgy & Elmalt, 2022). Nesse cenário, os planos de ações climáticas urbanas que integrem infraestrutura resiliente e gestão de riscos são essenciais para reduzir os impactos sociais, econômicos e ambientais resultantes de eventos extremos em áreas densamente urbanizadas (Aboagye & Sharifi, 2023).

As chuvas urbanas são intensificadas pela estrutura física das cidades e suas dinâmicas, pelos processos termodinâmicos (instabilidade atmosférica e nuvens), mecânicos (zonas de confluência) e químicos (processo de coalescência e aumento de aerossóis) que contribuem para a ocorrência de chuvas extremas em ambientes urbanos (Sahoo et al., 2020; Wang et al., 2021; Oliveira-Júnior et al., 2022).

Os eventos extremos climáticos podem ser definidos como aqueles que ocorrem fora dos limites esperados ou normais para uma determinada região ou época do ano, com potencial para causar impactos significativos na sociedade e no meio ambiente (Seneviratne et al., 2021). Esses eventos podem ser caracterizados pelos seguintes fenômenos: enchentes, inundações, secas, ondas de calor, tempestades, furacões, entre outros (Swain et al., 2020; Clarke et al., 2022).

O Estado do Rio de Janeiro (ERJ) é localizado em uma região de transição entre as massas de ar tropical e polar, o que resulta em alta variabilidade climática ao longo do ano e assim interfere na distribuição espaço-temporal da chuva no ERJ (Sobral et al., 2020; Lima e Armond, 2022; Lopes et al., 2022).

O ERJ é influenciado por sistemas meteorológicos em multiescala, desde os Sistemas Frontais (SF), Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), circulações de brisas, seguido pelos processos convectivos associados à formação e intensificação da Ilha de Calor Urbano (ICU), que se acentuam no verão e primavera (Lima et al., 2021; Gois e Oliveira-Júnior, 2021; Mendes et al., 2022).

O município do Rio de Janeiro (MRJ) possui três maciços costeiros, denominados de Pedra Branca, Tijuca e Gericinó que influenciam a dinâmica da chuva (Coelho e Nunes, 2020). O MRJ possui altos índices pluviométricos anuais, entre 1200 e 1500 mm. Esses índices elevados aliados às ocupações irregulares podem aumentar a vulnerabilidade da população a deslizamentos de

terra e outros desastres naturais (Terassi et al., 2020; Lima e Armond, 2022).

As chuvas intensas juntamente com topografia complexa fazem do MRJ uma região susceptível à erosão natural e aos deslizamentos de massas, o que auxilia na perda de cobertura vegetal e ocorrência de enchentes em vários pontos do município, que enfrenta problemas de drenagem das águas desde a sua origem (Regueira e Wanderley, 2022; Silva et al., 2024).

O MRJ enfrenta, desde sua fundação, a ocorrência frequente de chuvas intensas, fenômeno que se intensifica em decorrência de fatores climáticos regionais, como os sistemas frontais (SF), a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), as circulações de brisas e as chuvas convectivas. Esses eventos extremos têm como principais consequências as enchentes, inundações, erosões e deslizamentos de massa (Coelho & Nunes, 2020; Terassi et al., 2020).

O crescimento urbano do MRJ, acompanhado de processos antrópicos, tem contribuído para agravar esse cenário. A crescente impermeabilização do solo, a dificuldade de drenagem, a escassez de áreas verdes e o uso inadequado do solo são fatores que intensificam a vulnerabilidade da cidade frente às chuvas extremas (Silva et al., 2024). A relação entre o aumento da urbanização e a intensificação das chuvas extremas no MRJ foi observado, destacando o impacto das ações humanas no agravamento das condições climáticas adversas (Coelho & Nunes, 2020).

As mudanças climáticas têm ocorrido no MRJ, particularmente um aumento na intensidade e na frequência das chuvas, devido elevação na temperatura máxima do ar a uma taxa superior do que a temperatura mínima em $0,05^{\circ}\text{C.ano}^{-1}$. Mudanças nos padrões de vento, da circulação de brisas, desde brisa terrestre-marítima até brisa de baía, e no transporte de umidade para a cidade, são tendências que podem estar relacionadas às mudanças na frequência e duração dos SF (Sobral et al., 2020; Lopes et al., 2022).

Recentemente, Universidade de Columbia instalou no Rio de Janeiro um centro de pesquisa sobre mudanças climáticas, em virtude de ser uma cidade litorânea e vulnerável elevação do mar e com uma população em situação de risco climático, principalmente a extensão das mudanças nas taxas de chuva no MRJ ainda é pouco estudada (Regueira e Wanderley, 2022).

Neste contexto, as chuvas extremas em áreas urbanas, podem causar graves impactos na saúde da população, promovendo doenças de veiculação hídrica, tais como, dengue, leptospirose entre outros, e na dinâmica cotidiana dos mesmos,

por meio dos acidentes e traumas, via inundações, podem provocar mortalidade por afogamento, deslizamentos de terra e desabamentos de prédios (Sobral et al., 2020; Lima et al., 2021).

Estudos sobre tendência e variabilidade espacial da chuva em ambiente urbano se faz necessários, visto que há uma tendência de aumento de chuvas extremas (Lima e Armond, 2022; Regueira e Wanderley, 2022), particularmente em região com alto adensamento populacional, como o Sudeste do Brasil (SEB) (Holender e Santos, 2023), seguido da identificação de regiões com maior ou menores registros de chuva, principalmente o MRJ.

Neste contexto, o objetivo deste estudo avaliar foi analisar as características das chuvas diárias em um ambiente urbano via técnicas estatísticas no MRJ.

Material e Métodos

Área de Estudo

O MRJ, capital do ERJ (Figura 1), situada na região SEB, ocupa uma área de 1182,3 km² com uma população estimada em mais de seis milhões de pessoas (IBGE, 2023).

O MRJ possui um clima tropical (quente e úmido), com temperatura média do ar entre 20°C e 27°C. No MRJ existem duas grandes florestas urbanas: i) Tijuca e ii) Pedra Branca (Coelho e Nunes, 2020). O MRJ possui 169 bairros

distribuídos por uma área de 1.224,46 km² com 106 km de praias oceânicas e interiores (IBGE, 2023).

Dados Pluviométricos do Sistema Alerta – RJ

Os dados pluviométricos foram obtidos do Sistema Alerta-RJ (<https://alertario.rio.rj.gov.br/>) do período de 1997-2016 no intervalo de 24 horas. Os dados correspondem a 33 estações pluviométricas espalhadas no MRJ (Terassi et al., 2020), sendo usadas no estudo apenas 28 estações, pois 5 estações (Alto da Boa Vista, Av. Brasil/Mendanha, Tijuca/Muda, Est. Grajaú/Jacarepaguá e Barra/Barrinha) apresentavam falhas na série temporal.

Todos os dados foram submetidos à análise descritiva, exploratória, multivariada e o teste de Mann-Kendall (MK). Na Tabela 1 são exibidas as coordenadas geográficas (longitude e latitude, °) e altitude (m) de cada estação pluviométrica do MRJ.

Dados de ENOS

No estudo foi usado o Oceanic Niño Index - ONI. O ONI é usado para identificar os eventos de El Niño (fase quente), La Niña (fase fria) e Neutra do ENOS no oceano Pacífico Tropical. Para cada evento categorizado como fraco, moderado, forte ou muito forte, o ONI deve ter um valor igual ou maior que o limite por pelo menos 3 períodos consecutivos de 3 meses da Temperatura Superficial do Mar (TSM) superior a 0,5°C (National Weather Service - NOAA, 2024).

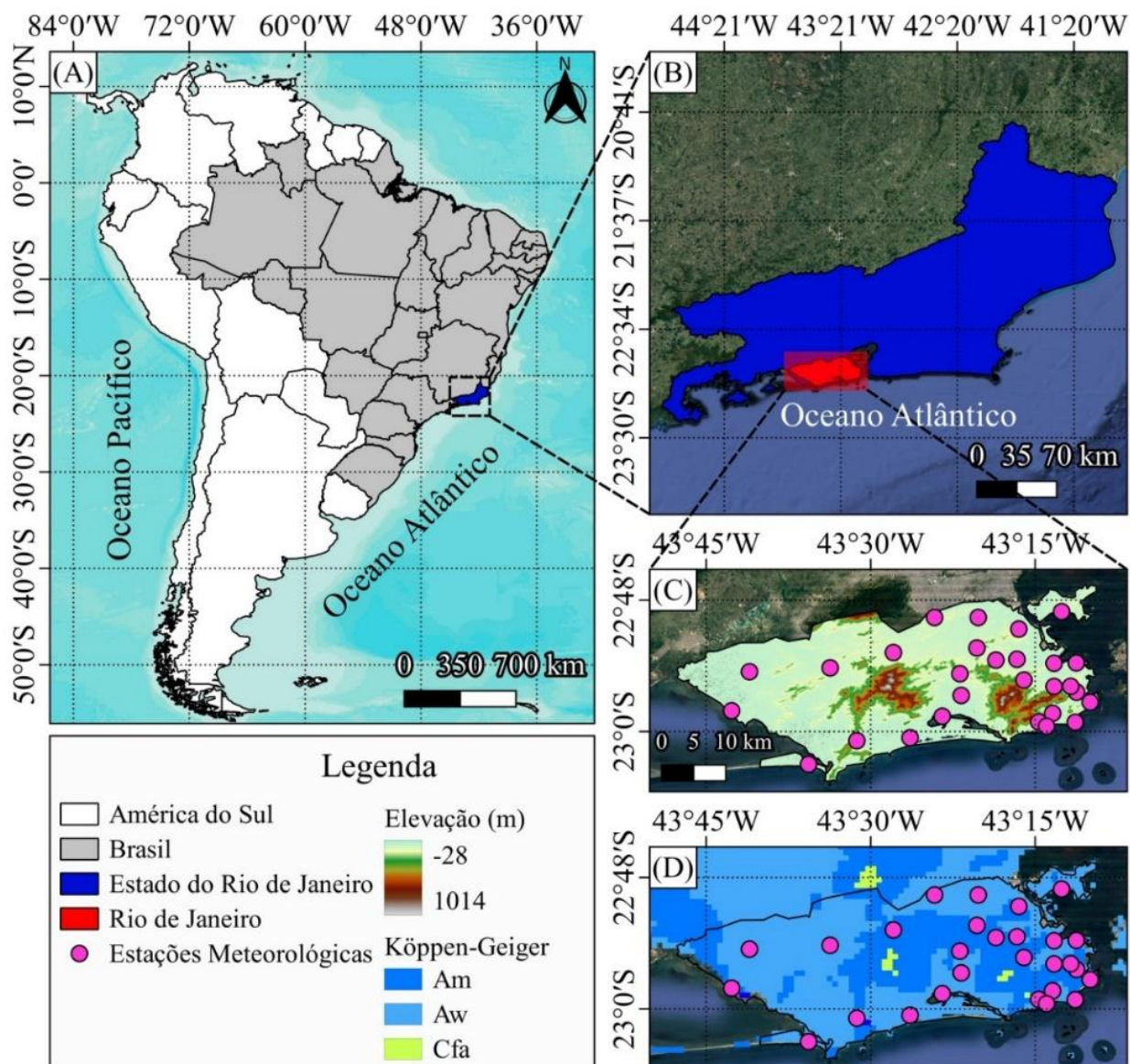


Figura 1. Localização da área de estudo na América do Sul (A), Estado do Rio de Janeiro (B), modelo digital de elevação (MDE, m) – (C) e as estações pluviométricas no MRJ (D).

Tabela 1. Estações Pluviométricas correspondente aos identificadores (ID), coordenadas geográficas (latitude e longitude, °) e altitude (m), respectivamente.

ID	Estação	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (m)
1	Anchieta	-22,82694°	-43,40333°	50
2	Bangu	-22,88028°	-43,46583°	15
3	Jacarepaguá/Cidade de Deus	-22,94556°	-43,36278°	15
4	Campo Grande	-22,90361°	-43,56194°	30
5	Copacabana	-22,98639°	-43,18944°	90
6	Grota Funda	-23,01444°	-43,52139°	11
7	Grande Méier	-22,89056°	-43,27806°	25
8	Grajaú	-22,92222°	-43,26750°	80
9	Guaratiba	-23,05028°	-43,59472°	0
10	Ilha do Governador	-22,81806°	-43,21028°	0

11	Irajá	-22,82694°	-43,33694°	20
12	Jardim Botânico	-22,97278°	-43,22389°	0
13	Laranjeiras	-22,94056°	-43,18750°	60
14	Madureira	-22,87333°	-43,33889°	45
15	Penha	-22,84444°	-43,27528°	111
16	Piedade	-22,89182°	-43,31005°	50
17	Recreio dos Bandeirantes	-23,01000°	-43,44056°	10
18	Barra/Riocentro	-22,97721°	-43,39155°	0
19	Rocinha	-22,98583°	-43,24500°	160
20	Saúde	-22,89606°	-43,18786°	15
21	São Cristóvão	-22,89667°	-43,22167°	25
22	Sepetiba	-22,96889°	-43,71167°	62
23	Santa Teresa	-22,93167°	-43,19639°	170
24	Santa Cruz	-22,90944°	-43,68444°	15
25	Tijuca	-22,93194°	-43,22167°	340
26	Jacarepaguá/Tanque	-22,91250°	-43,36472°	73
27	Urca	-22,95583°	-43,16667°	90
28	Vidigal	-22,99250°	-43,23306°	85
29	Alto da Boa Vista	-22,96583°	-43,27833°	355
30	Av. Brasil/Mendanha	-22,85694°	-43,54111°	30
31	Tijuca/Muda	-22,93278°	-43,24333°	31
32	Est. Grajaú/Jacarepaguá	-22,92556°	-43,31583°	105
33	Barra/Barrinha	-23,00849°	-43,29965°	7

Estatística Aplicada

Na descritiva foram avaliadas as medidas de tendência central (média e mediana, em mm), medidas de dispersão (desvio padrão – DP, em mm), variância da amostra, curtose (coeficiente de assimetria - CA), agrupamento de dados (intervalo, soma, maior e menor e o coeficiente de variação (CV, %), contagem), ambas as métricas estimadas com intervalo de confiança de 95%.

Na análise exploratória foram analisados via gráficos boxplot para avaliar as informações de localização, dispersão, assimetria, comprimento da cauda e medidas discrepantes (*outliers*).

Para avaliar se uma série de dados possui tendência temporal estatisticamente significativa foi usado no estudo o teste de MK. O teste não paramétrico de MK utiliza o teste de significância sobre o valor de Kendall's tau, onde a variável x é o tempo (t).

O teste de MK é análogo à análise de regressão e é bastante indicado como um teste para

verificar se os valores da série temporal tendem a aumentar ou a diminuir com o tempo.

Para a execução do teste de MK, nenhuma suposição quanto à normalidade dos dados é requerida, porém, não deve existir correlação serial entre dados. Este teste se caracteriza por ter o objetivo de determinar se o valor central na distribuição dos dados da série temporal muda ao longo do tempo (Gois et al., 2020; Gois e Oliveira-Júnior, 2021).

A hipótese nula (H_0) para este teste é que não há tendência, e a hipótese alternativa (H_1) é que há uma tendência no teste bilateral ou que há uma tendência ascendente (ou tendência descendente) no teste unilateral. Para a série temporal $x_1, \dots, x_n$, o teste MK é dado pela Eq. (1):

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

A variância da função *sign* é definida pela Eq. (2):

$$var = \frac{1}{18} [n(n-1)(2n+5) - \sum_t (f_t - 1)(2ft + 5)] \quad (2)$$

em que, t varia ao longo do conjunto de classificações empatadas e f_t é a frequência que a classificação t aparece. O teste MK usa a seguinte estatística dada pela Eq. (3):

$$z = \begin{cases} (s-1)/se & s > 0 \\ 0 & s = 0 \\ (s+1)/se & s < 0 \end{cases} \quad (3)$$

em que, $se = a$ a raiz quadrada de var . Se não houver tendência monotônica (a hipótese nula), então para séries temporais com mais de 10 elementos, $z \sim N(0, 1)$, ou seja, z tem uma distribuição normal padrão.

A Análise Multivariada (AM) é uma técnica analítica que usa informações de várias fontes para obter uma completa e otimizada avaliação da série temporal. Ou seja, é uma ferramenta que encontra padrões e relações entre várias variáveis, possibilitando prever efeitos e mudanças que uma variável terá sobre a outra (Gois et al., 2020; Gois e Oliveira-Júnior, 2021).

A técnica de cluster foi utilizada com o objetivo de agrupar as estações em grupos homogêneos. Assim, para esta análise foi utilizada medida de semelhança da distância Euclidiana com o agrupamento hierárquico pelo método de agregação de Ward. O nível α de significância utilizado em todas as análises foi de 5%.

Os programas utilizados nas análises estatísticas foram usados o IBM SPSS Statistics versão 24 e o *software* ambiente R versão 4.2.1.

Resultados e discussão

Chuva diária

A Figura 2 exibe o agrupamento de quatro grupos homogêneos de chuva diária no MRJ. A medida de similaridade da distância euclidiana com o agrupamento hierárquico via método de Ward, já aplicada anteriormente ao MRJ (Terassi et al., 2020) e no ERJ (Gois et al., 2020), com resultado similar ao deste estudo.

Os grupos foram identificados pelas seguintes cores no dendrograma: verde (grupo 1 – G1), amarela (grupo 2 – G2), azul (grupo 3 – G3) e rosa (grupo 4 – G4), sendo representativa das 28 estações pluviométricas, conforme Tabela 1. Os

grupos pluviométricos formados possuem características distintas da chuva diária no MRJ.

A Figura 3 exibe a distribuição espacial dos grupos homogêneos de chuva diária no MRJ. As estações do grupo G1 e G2 estão localizadas na região Norte (N) e Oeste (W), respectivamente do MRJ. Vale ressaltar que tais áreas encontram-se distantes do litoral e dos maciços, e o efeito da continentalidade atua na dinâmica do clima, pois favorece maior variação de temperatura e menor umidade do ar a essas regiões (Coelho e Nunes, 2020; Lima e Armond, 2022).

As estações pertencentes aos grupos G3 e G4, localizados na sua maioria na região Sul do MRJ, região que favorece ao efeito da maritimidade, pois são regiões costeiras próximas ao oceano e em altitudes baixas, onde a umidade do ar é maior, o que condiciona temperaturas mais amenas e menor amplitude térmica (Terassi et al., 2020).

O grupo G1 ($4,482 \pm 2,39$ mm) é formado por 14 estações, o maior grupo homogêneo e com a menor média e maior variabilidade de precipitação. O grupo G2 ($5,137 \pm 2,06$ mm), com a segunda menor média e segundo maior desvio padrão em comparação aos demais grupos formados. O grupo G3 ($5,384 \pm 1,76$ mm), possui a segunda maior média e menor desvio padrão e o grupo G4 ($6,889 \pm 2,02$ mm), representa a menor quantidade de estações, possui a maior média de chuvas e segundo menor desvio padrão. Comparativamente as diferenças são significativas, sobretudo entre os grupos G1 e G4, que representam os grupos onde houve menor e maior chuva média em 24 horas.

Na Tabela 2, os maiores registros de chuva diária no MRJ ocorreram nos anos de 1998 e 2010, que coincidem com a ocorrência de El Niño, principalmente na categoria moderada. O El Niño é um evento climático que ocorre no Oceano Pacífico e influencia o clima em diversas regiões do mundo, incluindo a América do Sul (AS) – (Soni e Singh, 2022). Durante o El Niño, pode causar um aumento na chuva em algumas áreas do MRJ (Lucena et al., 2020; Regueira e Wanderley, 2022).

Estudo realizado por Gómez-Fontalba (2023) analisaram a influência do El Niño, Oscilação Decadal do Pacífico (ODP) e outros modos de variabilidade climática no regime de chuvas na AS. Os resultados mostraram que o El Niño influencia principalmente as regiões costeiras do Brasil, incluindo o Rio de Janeiro. Já a ODP tem maior influência nas chuvas no centro e sul do Brasil.

No entanto, é importante ressaltar que outros fatores climáticos e meteorológicos também

podem influenciar as chuvas na região, o que torna necessário continuar estudando e monitorando o clima na cidade (Lucena et al., 2020).

Na Tabela 2, verifica-se que o ano de 2010 se destacou entre os anos de maiores índices pluviométricos nos quatro grupos homogêneos, com chuvas máximas superior a 300 mm nos grupos G3 e G4. Em 2010, o MRJ enfrentou fortes

chuvas, que causaram deslizamentos de terra e mortes na região.

De acordo com Marengo et al. (2023), as chuvas intensas na região SEB, incluindo o MRJ, foram causadas pela combinação de um forte evento La Niña e a presença de uma área de baixa pressão atmosférica no Oceano Atlântico.

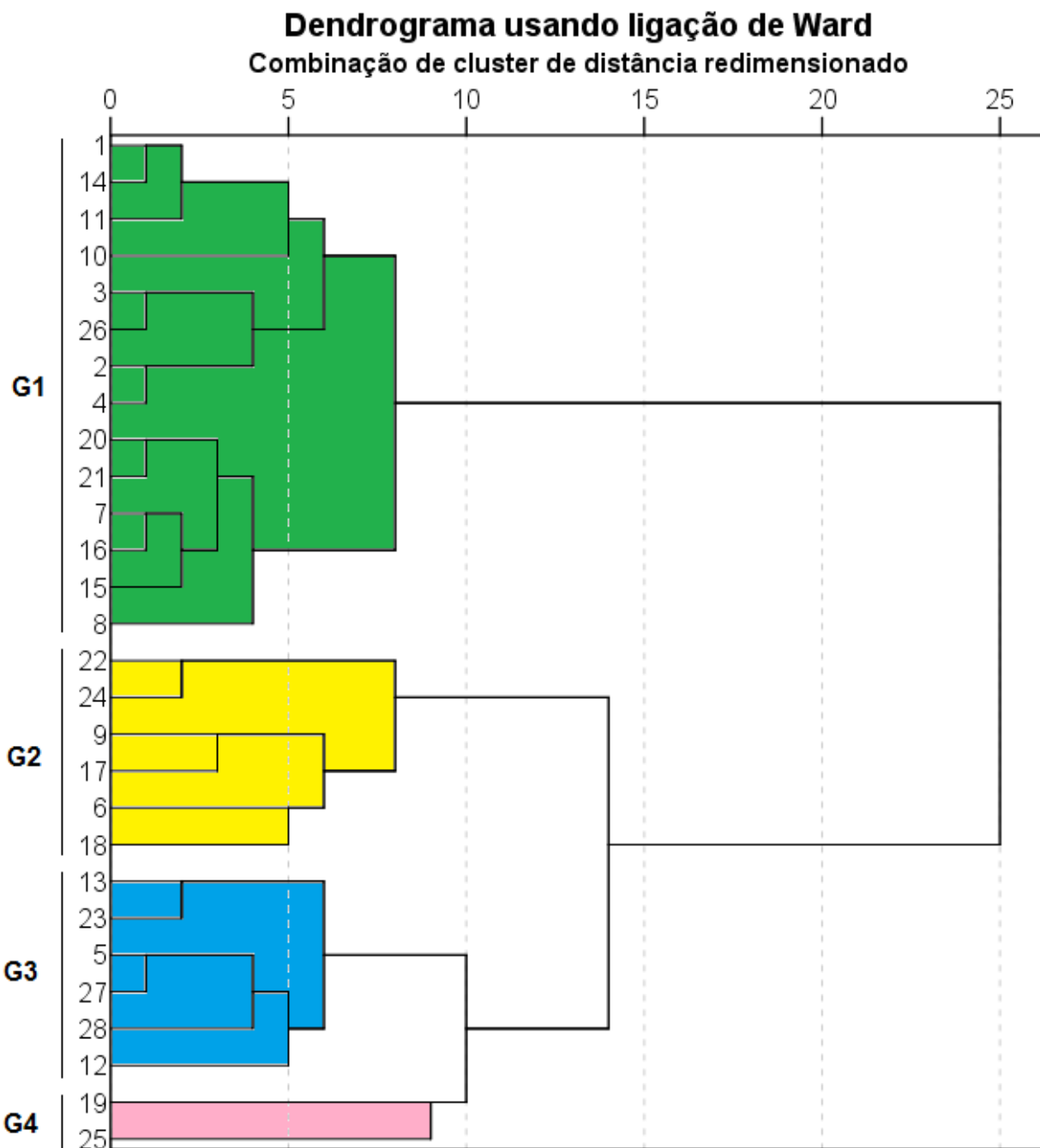


Figura 1. Dendrograma dos grupos homogêneos pluviométricos diários no MRJ.



Figura 3. Mapeamento dos grupos homogêneos de chuva diária no MRJ.

Tabela 2. Descrição das chuvas máximas diárias dos quatro grupos no período de 1997 a 2016.

Anos	Chuva máxima anual (mm)				Fases do ENOS
	Grupos				Evento/Categoria
	G1	G2	G3	G4	
1997	84,60	64,10	65,60	100,30	El Niño Forte
1998	181,50	264,20	212,00	281,90	El Niño Forte
1999	83,80	88,60	69,30	99,70	La Niña Moderada
2000	274,50	195,20	154,00	110,40	La Niña Moderada
2001	171,40	135,40	196,20	250,60	La Niña Fraca
2002	95,60	81,00	122,00	148,40	El Niño Moderado
2003	194,60	220,80	236,00	164,40	El Niño Moderado
2004	130,80	125,40	103,60	149,80	El Niño Fraco
2005	111,20	116,60	107,40	133,60	El Niño Fraco
2006	120,20	189,60	142,80	228,20	El Niño Moderado
2007	162,40	179,40	149,80	166,20	El Niño Moderado
2008	88,20	110,80	110,40	107,80	La Niña Moderada
2009	172,60	129,00	117,20	134,20	El Niño Moderado
2010	257,80	232,60	303,00	304,60	La Niña Moderada
2011	179,00	93,60	111,40	229,80	La Niña Moderada
2012	90,60	85,20	108,40	112,80	Neutro
2013	198,00	127,40	129,80	147,60	Neutro
2014	104,00	80,60	104,60	139,40	Neutro
2015	92,60	148,80	108,60	139,40	El Niño Moderado
2016	196,40	125,00	141,60	156,40	El Niño Moderado

Boxplot dos Grupos Homogêneos

A Figura 4 exibe os boxplots das chuvas máximas mensais no MRJ para os grupos homogêneos. Destaque para variabilidade dos grupos homogêneos pluviométricos diários na MRJ.

No período de estudo houve similaridades em relação à sazonalidade da chuva em todos os grupos, nos meses de dezembro a abril ocorrem as maiores precipitações, a partir de maio o regime das chuvas diminuem significativamente, lentamente depois aumenta a partir de agosto. Destaque para os primeiros meses do ano, no grupo, G1, com maior variabilidade e alta AIQ, situação contrária, com menores variabilidade e AIQ no grupo G4.

As medianas, em todos os grupos homogêneos foram similares às médias, com diminuição na chuva em maio ocasionada pela diminuição da intensidade da ZCAS, seguido da influência das circulações de brisas e índices pluviométricos baixos entre os meses de maio e setembro em decorrência da influência de sistemas de alta pressão que inibem a formação de áreas de instabilidade e de chuvas (Aparecido et al., 2020; Oliveira-Júnior et al., 2022; Marengo et al., 2023).

Com relação à variabilidade das chuvas mensais com duração de até 24 horas, destaca-se o grupo G1, com maiores outliers, sobretudo nos meses de março (274,50 mm). O mês de março é conhecidamente o período de maiores precipitações, com valor de 274,50 mm em 24 horas.

Os grupos G1 e G2 apresentaram similaridade em relação às amplitudes pluviométricas mensais, entre 30 mm a 275 mm. Os grupos G3 e G4 foram equivalentes as amplitudes pluviométricas, o que os diferenciam foram superiores e distribuídos, entre 65 mm a 304 mm.

A Figura 5 mostra os boxplots das chuvas anuais de até 24 horas de duração de 1997 até 2016. Destaque para o grupo G1 nos anos de 2000 e 2010, seguido do grupo G2 no ano de 1998 e 2006, grupo G3 em 2003 e 2010 e grupo G4 em 1998, 2001 e 2011, que apresentaram as maiores variações interquartílicas, isso indica maior variabilidade de chuvas no MRJ.

Em suma, os grupos homogêneos G2, G3 e G4 apresentam menores variabilidade e AIQ na maioria dos anos, isso indicou uma constância de níveis de chuva em torno da média interanual. Destaque para grupo G1 com maior variabilidade e amplitude interquartílica.

Segundo Lima et al. (2021), a variabilidade interanual das chuvas diárias no MRJ é influenciada pela TSM no Oceano Atlântico, que afeta a umidade disponível para formação de nuvens sobre a região (Gois et al., 2020). Já Souza et al. (2021), Correia Filho et al. (2022) e Marengo et al. (2023), reforçam em seus estudos que a TSM no Oceano Atlântico é um dos principais fatores que influenciam a variabilidade das chuvas na região SEB.

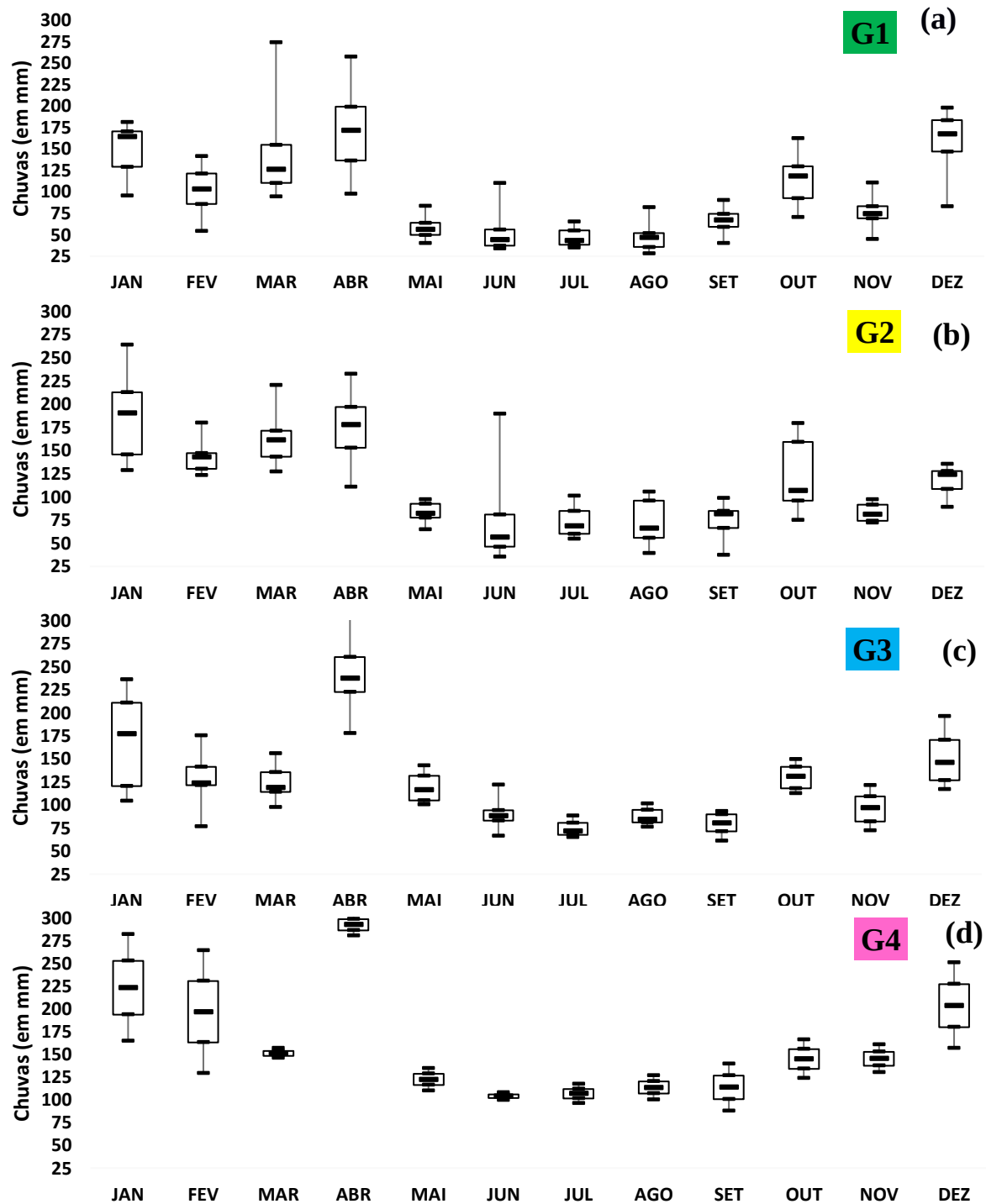


Figura 4. Boxplot da chuva máxima diária mensal (mm) no período de 1997 a 2016 para os grupos homogêneos G1 (a), G2 (b), G3 (c) e G4 (d) no MRJ.

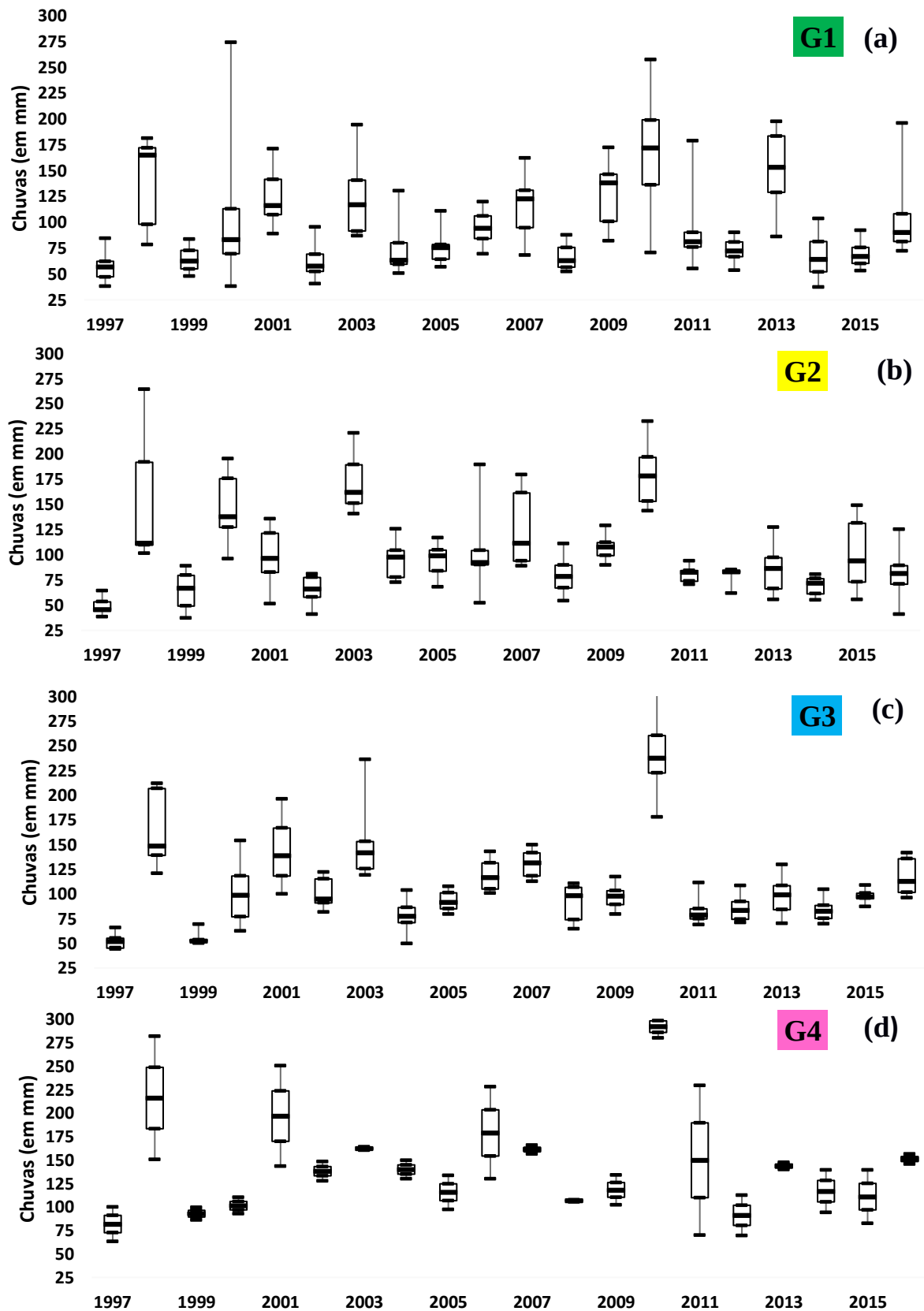


Figura 5. Boxplot da chuva máxima diária anual (mm) no período de 1997 a 2016 para os grupos homogêneos G1 (a), G2 (b), G3 (c) e G4 (d) no MRJ.

Tendência da chuva diária no MRJ

A Tabela 3 representa o teste MK aplicado aos grupos pluviométricos homogêneos diários.

Baseado no teste MK os p-valores foram superiores a 5%, isso indicou uma tendência estacionária para as chuvas diárias no MRJ. Vale ressaltar que entre

as estações pluviométricas a tendência permaneceu estacionária, não indicou uma tendência de redução ou aumento do período de estudo para os grupos e as estações.

Os estudos de tendências pluviométricas no MRJ são de grande importância para o entendimento das variações climáticas na região. Diversos estudos têm sido realizados ressaltam que a variabilidade interanual é condicionada as fases

do ENOS e a TSM do Atlântico (Luiz-Silva e Oscar-Júnior, 2022; Lima e Armond, 2022; Regueira e Wanderley, 2022).

A Figura 6 mostra os índices pluviométricos diários. Em ambos os quatro grupos homogêneos houve uma variação interanual significativa, entre as zonas Norte, Sul e Oeste do MRJ.

Tabela 3. Teste de tendência para as chuvas médias diárias dos quatro grupos durante o período de 1997 a 2016.

Grupos	Estatística S	Valor p*	Tendência
G1	10,0	0,770	Sem tendência
G2	14,0	0,673	Sem tendência
G3	-14,0	0,673	Sem tendência
G4	26,00	0,417	Sem tendência
Estações	-13.0	0,813	Sem tendência

(*) Teste de Mann-Kendall; significativo se $p < 0.050$

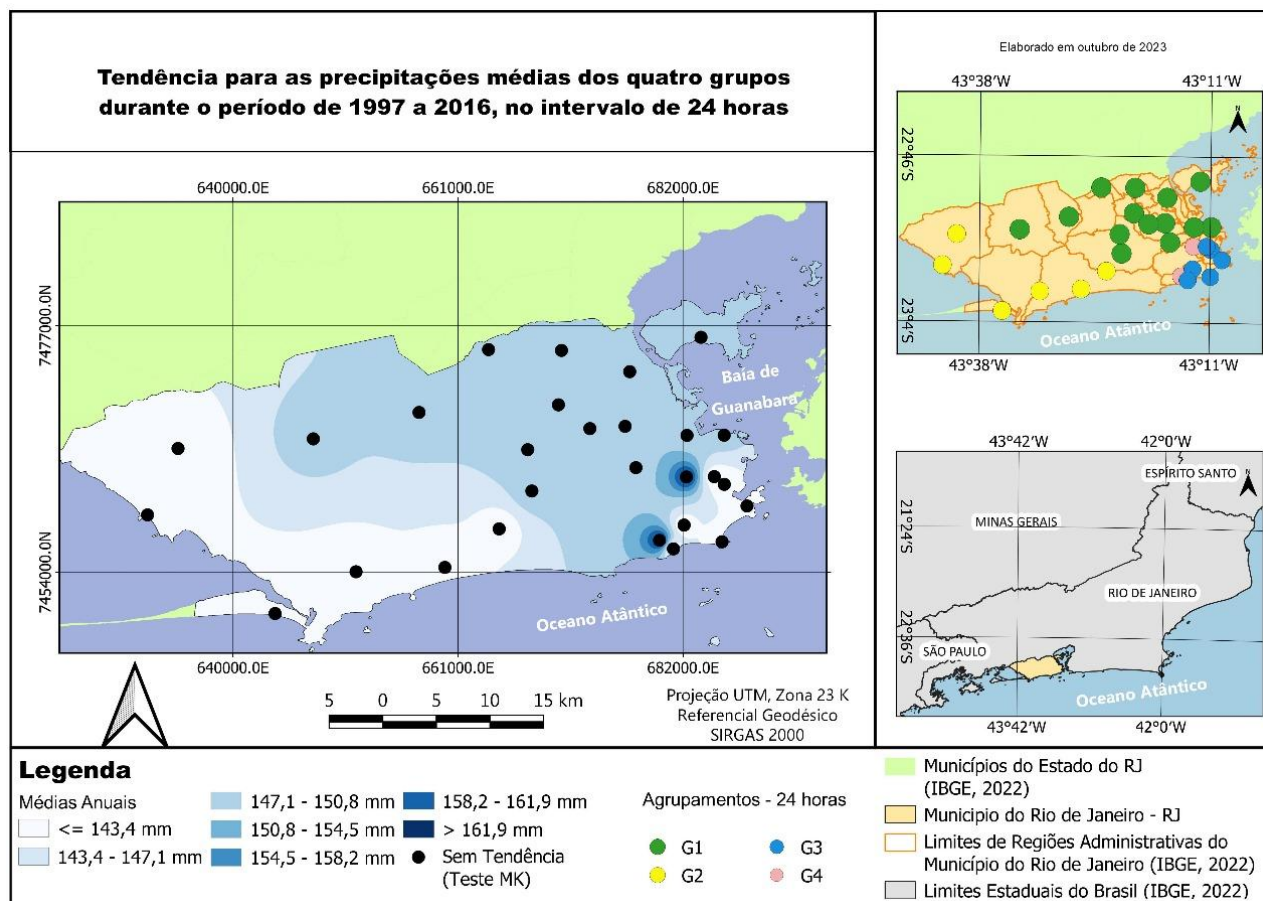


Figura 6. Distribuição espacial da chuva média diária anual dos quatros grupos homogêneos entre 1997 e 2016.

Vale ressaltar que, apesar de os resultados anteriores, Lima e Armond, (2022); Regueira e Wanderley, (2022) e Holender e Santos, (2023) apresentarem uma tendência de aumento na intensidade dos eventos de chuvas extremas, os resultados do nosso estudo indicaram que não

existe uma tendência de aumento das chuvas no MRJ no período passado entre 1997 até 2016. É importante destacar que essas discrepâncias nos resultados podem ser atribuídas a diferenças metodológicas e de período de análise dos estudos.

Conclusões

A partir do exposto, pode-se concluir que:

No MRJ há a formação de quatro grupos homogêneos pluviométricos de chuva diária. A análise das chuvas diária máximas anuais revela que cada grupo homogêneo é influenciado pelas fases de ENOS, principalmente na categoria moderada, que por sua vez interfere nos principais sistemas produtores de chuva (ZCAS e SF).

Na análise espacial, os grupos das estações localizadas na região próxima ao Oceano, com maiores índices pluviométricos, devido à posição geográfica, altitude e os efeitos de maritimidade e continentalidade, como fatores decisivos sobre a característica do clima e dos índices pluviométricos no MRJ.

Ao comparar os resultados com estudos anteriores, há diferença em relação aos acumulados de chuva entre as áreas próximas ao Oceano Atlântico, à Baía de Guanabara e à Floresta da Tijuca. Os estudos anteriores destacam diferenças nos índices pluviométricos de curta duração, ao contrário do nosso estudo, com a inexistência de diferenças significativas entre as estações. No entanto, ressalta-se que as diferenças podem ser atribuídas aos métodos estatísticos utilizados e o período de estudo.

Em relação a escala mensal destaque para abril com maior índice pluviométrico e os meses de julho a outubro com os menores registros no MRJ. O teste MK determina sem tendência da chuva diária entre 1997 e 2006 no MRJ.

É importante ressaltar que este estudo tem limitações em relação a uma série temporal atualizada, bem como a inclusão de fatores adicionais, como, mudanças de uso e ocupação do solo e características urbanas específicas de cada região. No entanto, tais recomendações irá melhorar compreensão da chuva urbana no MRJ.

Agradecimentos

Os autores agradecem aos Programas de pós-graduação: PGEB/UFF, PPGAU/UFAL, PGMET/UFAL; e ao SIMEPAR.

Referências

Aboagye, P. D., & Sharifi, A. (2023). Post-fifth assessment report urban climate planning: Lessons from 278 urban climate action plans released from 2015 to 2022. *Urban Climate*, 49. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101550>

Aparecido, L.E.D.O., Moraes, J.R.D.S.C. D., Lima, R.F.D., Torsoni, G.B., (2022). Spatial interpolation techniques to map rainfall in southeast Brazil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 37(1), 141-155. <https://doi.org/10.1590/0102-77863710015>

Clarke, B., Otto, F., Stuart-Smith, R., Harrington, L., (2022). Extreme Weather Impacts of Climate Change: an Attribution Perspective. *Environmental Research: Climate*, 1(1), 012001. <https://doi.org/10.1088/2752-5295/ac6e7d>

Coelho, L.A.F., & Nunes, A.B., (2020). Eventos Recentes de Chuva Intensa na Cidade do Rio de Janeiro: Análise Sinótica. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 13(03), 994-1012. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v13.3.p994-1012>

Correia Filho, W.L.F., de Oliveira-Júnior, J.F., da Silva Junior, C.A., Santiago, D.D.B., (2022). Influence of the El Niño–Southern Oscillation and the synoptic systems on the rainfall variability over the Brazilian Cerrado via Climate Hazard Group InfraRed Precipitation with Station data. *International Journal of Climatology*, 42(6), 3308-3322. <https://doi.org/10.1002/joc.7417>

Elsharqawy, H.R., Elbarmelgy, M.M. & Elmalt, A.E. Evolutionary urban resilience as an incremental approach to sustainability: a multifunctional pluvial flood and wastewater risk reduction framework. *J. Eng. Appl. Sci.* 69, 80 (2022). <https://doi.org/10.1186/s44147-022-00136-x>

Gois, G., & Oliveira-Júnior, J.F., (2021). Processing of Rainfall Time Series Data in the State of Rio de Janeiro. *Journal of Atmospheric Science Research*, 4(4), 19-35. <https://doi.org/10.30564/jasr.v4i4.3603>

Gois, G., Oliveira-Júnior, J.F., da Silva Junior, C.A., Sobral, B.S., Terassi, P.M.B., Leonel Junior, A.H.S., (2020). Statistical normality and homogeneity of a 71-year rainfall dataset for the state of Rio de Janeiro—Brazil. *Theoretical and Applied Climatology*, 141, 1573-1591. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03270-9>

Gómez-Fontalba, C., Flores-Aqueveque, V., Alfaro, S.C., 2023. Teleconnection between the Surface Wind of Western Patagonia and the SAM, ENSO, and PDO Modes of Variability. *Atmosphere*, 14, 608. <https://doi.org/10.3390/atmos14040608>

Hemmati, M., Kornhuber, K., & Kruczkiewicz, A. (2022). Enhanced urban adaptation efforts needed to counter rising extreme rainfall risks. *NPJ Urban Sustainability*, 2(1), 16. <https://doi.org/10.1038/s42949-022-00058-w>

Holender, B. V., & Santos, E. B. (2023). Análise de tendência dos eventos de precipitação intensa no sudeste do Brasil. *Revista Brasileira de Climatologia*, 32, 584-606. <https://doi.org/10.55761/abclima.v32i19.16411>

Lima, A.O., Lyra, G.B., Moraes, M., Oliveira-Júnior, J.F., Zeri, M., Cunha-Zeri, G., 2022.

- Extreme Rainfall Events over Rio de Janeiro State, Brazil: Characterization Using Probability Distribution Functions and Clustering Analysis. *Atmospheric Research*, 247, 1-105221. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105221>
- Lima, S. S., & Armond, N. B., (2022). Chuvas na Região Metropolitana do Rio de Janeiro: Caracterização, Eventos Extremos e Tendências. *Sociedade & Natureza*, 34, e64770. <https://doi.org/10.14393/SN-v34-2022-64770>
- Lopes, C. B., Dourado, F., de Souza, L.S., de Gois, G., Pinto, P. M. G. M., (2022). Análise da distribuição pluviométrica na Baixada Fluminense, Rio de Janeiro. *Revista Brasileira de Climatologia*, 31, 413-433. <https://doi.org/10.55761/abclima.v31i18.15225>
- Lucena, A. J.; Oliveira Júnior, J. F.; Gois, G.; Miranda, V., (2020). Eventos Intensos de El Niño e a Sua Influência nas Chuvas da Zona Oeste da Cidade do Rio de Janeiro/RJ. *Revista Brasileira de Climatologia*, 27, 93-121. <https://doi.org/10.5380/abclima.v27i0.70854>
- Luiz-Silva, W., & Oscar-Júnior, A. C., (2022). Climate extremes related with rainfall in the State of Rio de Janeiro, Brazil: a review of climatological characteristics and recorded trends. *Natural Hazards*, 114(1), 713-732. <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05409-5>
- Marengo, J. A., Seluchi, M. E., Cunha, A. P., Cuartas, L. A., Goncalves, D., Sperling, V. B., Moraes, O. L., (2023). Heavy rainfall associated with floods in southeastern Brazil in November–December 2021. *Natural Hazards*, 116(3), 3617-3644. <https://doi.org/10.1007/s11069-023-05827-z>
- Mendes, J. V., Armond, N. B., Silva, L. C. B., (2022). Ilhas de calor urbanas de superfície, ondas de calor e de frio no município do Rio de Janeiro–RJ (2015-2019). *Revista Brasileira de Climatologia*, 30, 133-155. <https://doi.org/10.55761/abclima.v30i18.14908>
- National Weather Service - NOAA, (2024). Episódios frios e quentes por temporada. [online]. Disponível em: https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php. Acesso:10 mar. 2024.
- Oliveira-Júnior, J. F., Correia Filho, W. L. F., da Silva Monteiro, L., Shah, M., Hafeez, A., de Gois, G., 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>
- Regueira, A. D. O., & Wanderley, H. S., (2022). Changes in rainfall rates and increased number of extreme rainfall events in Rio de Janeiro city. *Natural Hazards*, 114(3), 3833-3847. <https://doi.org/10.1007/s11069-022-05545-y>
- Sahoo, P. K., Dall’agnol, R., Salomão, G. N., Junior, J. S. F., Silva, M. S., Martins, G. C., Souza Filho, P.W.M., Powell, M. A., Maurity, C.W., Angelica, R.S., Costa, M.F., Siqueira, J.O., (2020). Source and background threshold values of potentially toxic elements in soils by multivariate statistics and GIS-based mapping: a high density sampling survey in the Parauapebas basin, Brazilian Amazon. *Environmental Geochemistry and Health*, 42(1), 255-282. <https://doi.org/10.1007/s10653-019-00345-z>
- Seneviratne, S.I., X. Zhang, M. Adnan, W. Badi, C. Dereczynski, A. Di Luca, S. Ghosh, I. Iskandar, J. Kossin, S. Lewis, F. Otto, I. Pinto, M. Satoh, S.M. Vicente-Serrano, M. Wehner, and B. Zhou, (2021). *Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate*. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1513–1766, doi:10.1017/9781009157896.013
- Silva, F. P., Luiz-Silva, W., Huamán-Chinchay, J. H., Almeida França, J. R. (2024). Synoptic and cloud-scale aspects related to an extreme rainfall event that occurred in April 2019 in the city of Rio de Janeiro (Brazil). *Meteorology and Atmospheric Physics*, 136(1), 6. <https://doi.org/10.1007/s00703-023-01003-x>
- Sobral, B. S., Oliveira-Júnior, J. F., Alecrim, F., Gois, G., Muniz-Júnior, J. G., Terassi, P. M. B., Zeri, M., (2020). PERSIANN-CDR based characterization and trend analysis of annual rainfall in Rio de Janeiro State, Brazil. *Atmospheric Research*, 238, 104873. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.104873>
- Soni, A., & Singh, P., (2022). A Review Paper on El Nino. *International Journal of Innovative Research in Engineering & Management*, 9(1), 269-272. <https://doi.org/10.55524/ijirem.2022.9.1.53>
- Souza, I. P., Andreoli, R. V., Kayano, M. T., Vargas, F. F., Cerón, W. L., Martins, J. A.,

- Souza, R. A. F., (2021). Seasonal precipitation variability modes over South America associated to El Niño-Southern Oscillation (ENSO) and non-ENSO components during the 1951–2016 period. *International Journal of Climatology*, 41(8), 4321-4338. <https://doi.org/10.1002/joc.7075>
- Swain, D. L., Singh, D., Touma, D., Diffenbaugh, N. S., (2020). Attributing extreme events to climate change: A new frontier in a warming world. *One Earth*, 2, 522-527. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.05.011>
- Terassi, P. M. B., Oliveira Júnior, J. F., Gois, G., Oscar Júnior, A. C., Sobral, B. S., Biffi, V. H. R.; Blanco, C. J. C., Correia Filho, W. L. F., Vijith, H., (2020). Rainfall and erosivity in the municipality of Rio de Janeiro - Brazil. *Urban Climate* 33,100637. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2020.100637>
- Wang, Z., Qi, F., Liu, L., Chen, M., Sun, D., & Nan, J. (2021). How do urban rainfall-runoff pollution control technologies develop in China? A systematic review based on bibliometric analysis and literature summary. *Science of the Total Environment*, 789, 148045. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148045>