

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

ANÁLISE DE EVENTOS EXTREMOS DE PRECIPITAÇÃO NO LITORAL CENTRAL E NORTE DE SÃO PAULO ENTRE 2014 E 2024

Beatriz Silva Fernandes¹ ; Breylla Campos Carvalho² ; Áurea Maria Ciotti³

Abstract: In recent decades, the intensification of extreme precipitation events in Brazil has caused significant socio-environmental impacts. On the São Paulo coast, in February 2023, at the city of São Sebastião, a catastrophic event highlighted the need for detailed analyses of these phenomena. This study investigated the frequency and intensity of extreme precipitation events occurring between 2014 and 2024, based on rainfall data from Cemaden, focusing on the central and northern coastal regions of São Paulo state. Different methodological approaches were applied: hourly and daily analyses, with and without the inclusion of dry periods, and an evaluation based on the start and end of events. The results showed that the inclusion or exclusion of dry periods significantly affects both percentiles and event frequency. For example, the 99,9 hourly percentile increased from 19,96 mm (with dry periods) to 41,88 mm (without dry periods), highlighting the impact of including zero values in the analysis. Using the start and end of events, it was possible to identify high-magnitude episodes not captured by daily analyses, such as volumes exceeding 600 mm in less than 24 hours. It can thus be concluded that precipitation studies must consider both the intensity and temporal distribution of events to enable more accurate assessments of risk-prone areas. Furthermore, the appropriate methodological choice, aligned with the specific area and objectives of each study, contributes to the development of more effective prevention and response policies.

Resumo: Nas últimas décadas, a intensificação de eventos de precipitação extrema no Brasil tem gerado impactos socioambientais relevantes. No litoral paulista, episódios recentes, como os de fevereiro de 2023 em São Sebastião, evidenciam a necessidade de análises detalhadas desses fenômenos. Dessa maneira, este estudo investigou a frequência e intensidade de eventos extremos de precipitação entre 2014 e 2024, com base em dados pluviométricos do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden), focando no litoral central e norte do estado de São Paulo. Foram aplicadas diferentes abordagens metodológicas: análise horária e diária, com e sem inclusão de períodos secos, e avaliação baseada no início e fim dos eventos. Os resultados demonstraram que a consideração ou exclusão de períodos secos afeta significativamente os percentis e a frequência dos eventos. Por exemplo, o percentil 99,9 horário aumentou de 19,96 mm (com períodos secos) para 41,88 mm (sem períodos secos), destacando o impacto da inclusão de zeros na análise. Baseando-se no início e fim dos eventos, foi possível identificar episódios de alta magnitude não capturados pelas análises diárias, como volumes superiores a 600 mm em menos de 24h. Assim, pode-se concluir que é fundamental que os estudos de precipitação considerem tanto a intensidade, quanto a distribuição temporal dos eventos, para uma avaliação mais precisa dos

¹) Programa de Pós Graduação em Biodiversidade e Ecologia Marinha e Costeira, Universidade Federal de São Paulo, Instituto do Mar, Santos - SP, beatriz.fernandes28@unifesp.br

²) Instituto do Mar, Universidade Federal de São Paulo, Santos - SP; Centro de Biologia Marinha, Universidade de São Paulo, São Sebastião - SP, breylla.carvalho@unifesp.br

³) Centro de Biologia Marinha, Universidade de São Paulo, São Sebastião - SP, ciotti@usp.br

locais de risco, com a escolha metodológica adequada, alinhada à área e aos objetivos individuais de cada pesquisa, contribuindo para políticas de prevenção e resposta mais eficazes.

Palavras-Chave – precipitação extrema; chuvas intensas, litoral paulista

INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, os eventos de precipitação extrema têm sido objeto de crescente atenção, devido aos seus impactos sociais, ambientais e econômicos, como a ocorrência de deslizamentos de terra, enchentes e deslocamento de pessoas (Mantovani *et al.* 2025; Marengo *et al.* 2020, 2024). Diversos estudos recentes têm analisado e quantificado tais eventos, como Kendon *et al.* (2018), que realizaram simulações indicando uma tendência de aumento na frequência de eventos extremos de curta duração no Reino Unido. O estudo também sugere o crescimento de eventos extremos diários, enfatizando a importância da análise de dados em diferentes resoluções temporais.

No Brasil, a ocorrência de chuvas intensas tem se tornado evidente, como demonstrado pela inundação ocorrida em 2024 nos arredores de Porto Alegre, no estado do Rio Grande do Sul, quando foram registrados acumulados de precipitação acima de 500 mm no mês de maio e níveis da água da enchente atingindo 535 cm, resultante de condições climáticas altamente instáveis, um corredor de umidade Amazônico a leste dos Andes intensificando a precipitação e um bloqueio atmosférico por conta de uma onda de calor na região central do país (Mantovani *et al.* 2025).

A região sudeste brasileira tem os meses de verão marcados por grandes volumes de chuva. No entanto, eventos de intensidade excepcional têm sido registrados. Entre os anos de 2015 a 2019, foram contabilizados cerca de 1.373 eventos de precipitação extremas (neste caso, definidos como aqueles com taxas superiores a 50 mm/hora), como o ocorrido em fevereiro de 2022 no município de Petrópolis, no Rio de Janeiro, onde foi registrado um volume de 258 mm em apenas três horas (Alcântara *et al.* 2023). Dentre estes eventos, 730 foram registrados somente no estado de São Paulo (EM-DAT 2019, Marengo *et al.* 2023).

Outro evento notável ocorreu em fevereiro de 2023, quando o município de São Sebastião, no litoral norte paulista, registrou 626 mm de precipitação em apenas 24 horas, sendo resultado de uma combinação de fatores meteorológicos, como a presença de uma frente fria estacionária sobre a região, o transporte de umidade proveniente do Oceano Atlântico e a interação com a Serra do Mar, que amplificou a precipitação por efeito orográfico (Marengo *et al.* 2023).

Existem diversas abordagens metodológicas para a análise de extremos de precipitação, como o método de *block maxima* (BM), que considera os picos anuais dentro de intervalos de tempo fixos, e o método de *peak over threshold* (POT), que avalia eventos que ultrapassam um determinado limiar (Zakaria *et al.* 2017). Além disso, diferentes resoluções temporais, como as escalas horária, diária, a cada seis horas, 15 minutos, 24 horas com janelas móveis, entre outras, que permitem capturar características complementares dos eventos extremos. A análise horária, ou sub-horária, é essencial para compreender a intensidade e duração de precipitações de curta duração, enquanto a aplicação de janelas móveis de 24 horas oferece uma visão mais abrangente dos acumulados em períodos contínuos (Barbero *et al.* 2019; Myhre *et al.* 2019).

Além disso, a interpretação dos dados também varia conforme os critérios adotados por diferentes instituições. Por exemplo, a Defesa Civil do Estado de São Paulo, considera as classes de chuva fraca (0,1 a 10 mm/h), fraco-moderada (10 a 20 mm/h), moderada (20 a 30 mm/h), moderado forte (30 - 40 mm/h) e forte (>40 mm/h), ou o Sistema de Meteorologia do Paraná (Simepar) que

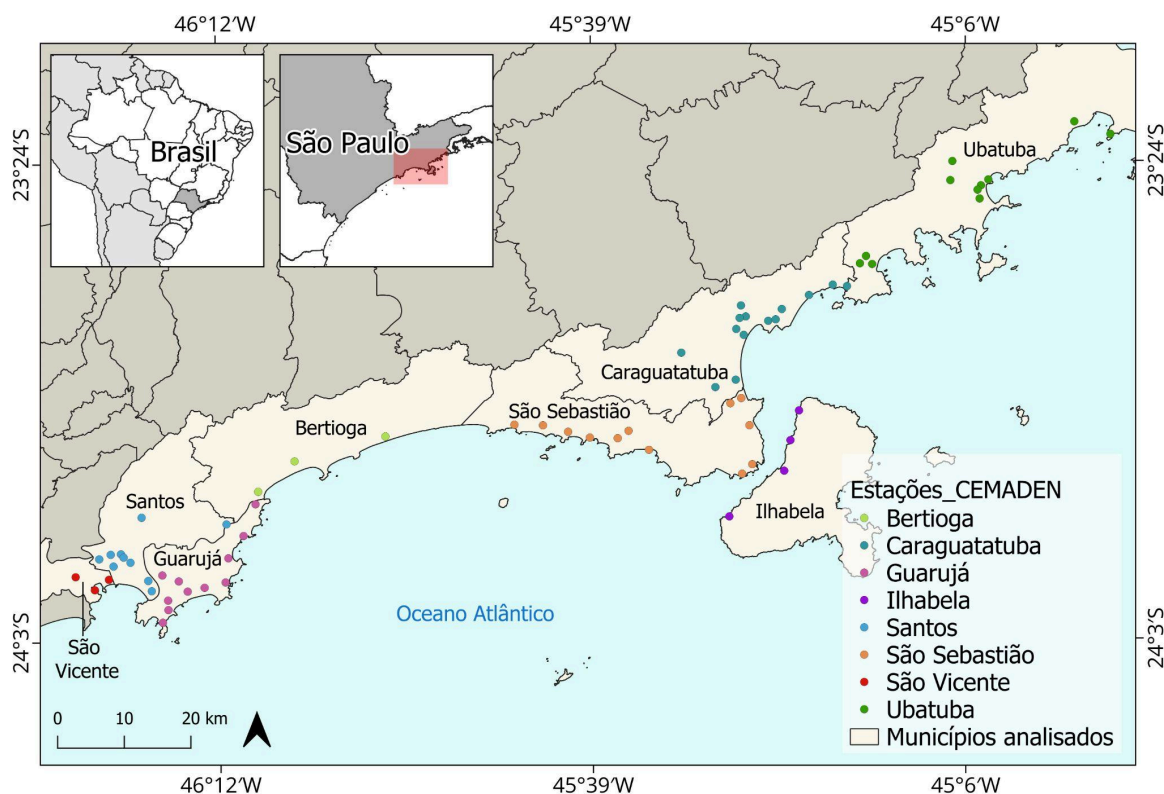
adota uma escala baseada em intervalos de 6 horas, considerando eventos com precipitação superior a 50 mm neste período como extremos. Já de acordo com IMD (2017), eventos de precipitação extrema são definidos como aqueles com acumulado igual ou superior a 244,5 mm em um dia.

Diante desse contexto, o presente estudo teve como objetivo analisar a frequência e a intensidade de eventos extremos de precipitação entre os anos de 2014 e 2024 com base na série histórica de dados de pluviômetros do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden), focando nas regiões do litoral central e norte do estado de São Paulo. Foram empregadas três diferentes abordagens metodológicas, sendo estas análise diária e horária, considerando dias com chuva e depois inserindo os dias secos, a fim de compreender a dinâmica e os padrões desses eventos na região, bem como a interferência das duas abordagens, além da análise de eventos extremos considerando o início e o fim de um episódio de chuva. A compreensão desses eventos mostra-se fundamental para o planejamento urbano e a gestão de desastres, especialmente em áreas com alta densidade populacional e infraestrutura limitada, como ocorre na área de estudo, principalmente levando em consideração o aumento na frequência e intensidade de eventos extremos no estado de São Paulo (Zilli *et al.* 2017).

MATERIAIS E MÉTODOS

A primeira etapa deste estudo envolveu a compilação dos dados pluviométricos das estações localizadas no Litoral Central e Norte do estado de São Paulo (Figura 1), fornecidos pelo Cemaden, abrangendo o período de 2014 a 2024. Os dados de precipitação são coletados em intervalos de 10 minutos quando há ocorrência de chuva, e em períodos sem precipitação o sistema transmite um acumulado de 0 milímetro a cada 60 minutos (Cemaden, [S.d.]).

Figura 1 – Área de análise contendo a indicação das estações pluviométricas do Cemaden utilizadas neste estudo.



Após a compilação dessa série histórica, foi realizada uma filtragem preliminar dos dados no programa RStudio, com o objetivo de eliminar valores inconsistentes e garantir a qualidade das análises subsequentes. Para isso, aplicaram-se um conjunto de regras de filtragem baseadas no comportamento temporal dos dados, com as seguintes condições: (1) remoção de picos isolados (valores elevados) entre valores iguais a zero; (2) exclusão de valores anômalos, como acumulados superiores a 500 mm/h ou ≥ 50 mm em 10 minutos, que representavam dados irregulares; (3) eliminação de sequências de valores constantes por longos períodos; e (5) valores ausentes (Durre *et al.* 2010; Meek e Hatfield, 1994). Ainda, a estação “Pereque2”, situada no município do Guarujá, foi removida das análises, por apresentar valores excessivamente elevados em um curto período de tempo, culminando em erros nos resultados.

Após a filtragem, os dados foram agregados em diferentes abordagens. A primeira consistiu na análise horária, sendo subdivida em análise horária com exclusão de períodos sem chuva (precipitação = 0mm) e considerando todos os dados disponíveis (utilizando períodos sem chuva). A segunda, consistiu na análise diária (com período considerado entre 00h00 e 23h00 de um único dia), havendo também a categorização com duas análises distintas, considerando somente dias em que houve precipitação e outra considerando também os dias secos. Dessa maneira, pode-se haver a comparação dos dados nas diferentes situações e entender suas implicações, visto que o uso de apenas dias com chuva pode levar a interpretações equivocadas, especialmente quando há mudanças na frequência de dias chuvosos, assim, análises baseadas em percentis utilizando a série de dados completa pode ser mais robustas para avaliar mudanças em eventos extremos de precipitação (Schär *et al.* 2016).

Para a análise destes dados, foram calculados os percentis de 50, 70, 95, 99 e 99,9 (P50, P70, P95, P99 e P99,9) para cada escala - horária, diária, com e sem os dias secos, resultando em PH, PH_{chuva}, PD e PD_{chuva} (detalhes na Tabela 1). A partir deles, foram determinadas as frequências médias mensais de ocorrência dos eventos e seus intervalos médios estimados entre ocorrências, sendo considerada a média entre todas as estações analisadas.

Tabela 1 – Cenários de análise dos dados após filtragem de valores inconsistentes.

Sigla	Descrição
PH	Análise horária incluindo períodos sem chuva
PH _{chuva}	Análise horária considerando somente os dias com chuva
PD	Análise diária incluindo períodos sem chuva
PD _{chuva}	Análise diária considerando somente os dias com chuva

Por fim, foram analisados os eventos de precipitação considerando seu início e fim, ou seja, o evento teve seu início considerado quando as estações registraram valores acima de 0 mm e o fim quando os pluviômetros voltam a marcar precipitação igual a 0, permitindo a análise da ocorrência dos eventos com precipitação acima de 244,5mm em um período de 24 horas (IMD, 2017).

RESULTADOS

A análise dos percentis da precipitação horária e diária mostrou padrões variados de frequência e recorrência dos eventos, dependendo da inclusão ou não dos períodos secos. Considerando a precipitação horária, incluindo os períodos secos, os percentis de 95%, 99% e 99,9% corresponderam a 0,99 mm, 4,72 mm e 19,96 mm, respectivamente (Tabela 2). A frequência de eventos com precipitação \geq P50 ou P70 foi bastante elevada (583,86 vezes/mês), com intervalo

médio de apenas 0,1 dias (tendo em consideração seu resultado igual a zero), já o P99,99 registrou frequência de apenas 0,54 vezes/mês e intervalo médio de 56 dias (Tabela 3).

Tabela 2 – Resultados obtidos para cada um dos percentis calculados para as análises de precipitação (mm) horárias e diárias.

	Percentis				
	50%	70%	95%	99%	99,90%
PH	0,00	0,00	0,99	4,72	19,96
PH_{chuva}	0,59	1,19	6,09	16,54	41,88
PD	0,00	2,19	28,45	67,14	155,00
PD_{chuva}	3,80	9,87	43,52	89,16	177,46

Nota: Descrição das siglas na Tabela 1.

Tabela 3 – Resultados obtidos para a frequência média por mês e intervalo médio em dias para cada um dos percentis calculados para as análises horárias, diárias, com e sem considerar os períodos secos.

		Percentil	Frequência (média/mês)	Intervalo médio (dias)
PH	≥ P50		583,86	0,10
	≥ P70		583,86	0,10
	≥ P95		27,98	1,10
	≥ P99		5,61	5,40
	≥ P99,9		0,54	56,00
PH_{chuva}	≥ P50		41,35	0,70
	≥ P70		24,76	1,20
	≥ P95		4,13	7,40
	≥ P99		0,80	38,20
	≥ P99,9		0,08	404,10
PD	≥ P50		25,50	1,20
	≥ P70		7,22	4,20
	≥ P95		1,22	24,90
	≥ P99		0,25	123,40
	≥ P99,9		0,02	1453,30
PD_{chuva}	≥ P50		6,12	5,00
	≥ P70		3,67	8,30
	≥ P95		0,62	49,30
	≥ P99		0,12	255,20
	≥ P99,9		0,01	2745,30

Nota: Descrição das siglas na Tabela 1.

Para a precipitação horária considerando apenas registros > 0 mm, o valor do percentil 50% foi de 0,59 mm, o de 70% de 1,19 mm, enquanto os percentis mais extremos (95%, 99% e 99,9%) corresponderam a 6,09 mm, 16,54 mm e 41,88 mm, respectivamente. A frequência média mensal de eventos com precipitação igual ou superior ao percentil 50% foi de 41,35 vezes/mês, com um intervalo médio entre eventos de 0,7 dias. Eventos mais intensos, acima do percentil 99, ocorreram,

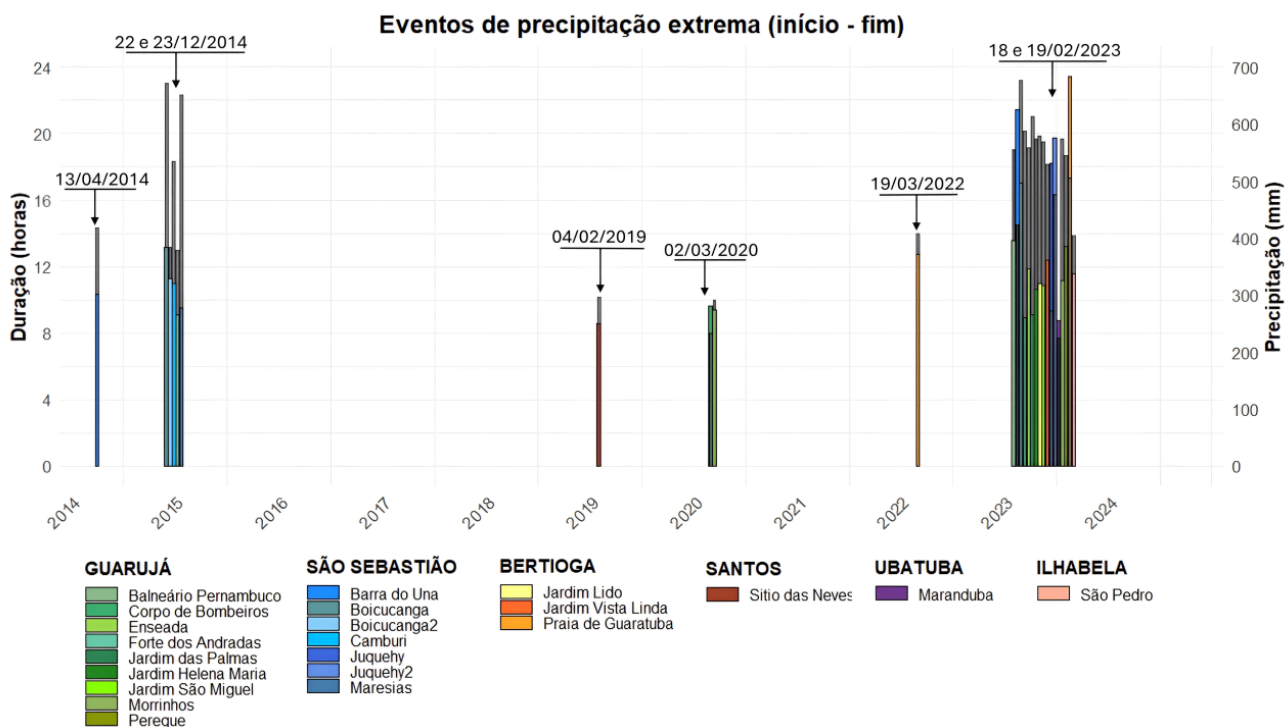
em média, 0,80 vezes por mês, com um intervalo médio de 38,2 dias. Para os eventos mais extremos ($\geq P99,9$), a frequência diminuiu para 0,08 vezes/mês, com intervalo médio de 404,1 dias.

Com relação a análise diária, incluindo os dias secos, os percentis 95%, 99% e 99,9% atingiram 28,46 mm, 67,14 mm e 155,01 mm, respectivamente. Eventos com precipitação $\geq P95$ ocorreram, em média, 1,22 vezes/mês, com intervalo de 24,9 dias, enquanto os eventos $\geq P99,9$ apresentaram frequência de 0,02 vezes/mês, com intervalo médio de 1.453,3 dias (aproximadamente 4 anos).

Já para a precipitação diária considerando apenas dias em que houve chuva (valores acima de 0 mm), os percentis foram mais elevados, com $P50 = 3,80$ mm e $P99,9 = 177,46$ mm. A frequência de eventos $\geq P50$ foi de 6,12 vezes/mês, enquanto eventos $\geq P99,9$ foram bastante raros, ocorrendo em média 0,01 vezes/mês, com intervalo estimado de 2.745,3 dias (aproximadamente 7 anos e meio).

Por fim, a análise para o período entre o início e o fim de um evento de precipitação, considerando apenas acima de 244,5 mm em até 24 horas (Figura 2), nota-se que o evento de maior precipitação foi registrado na estação Praia de Guaratuba, em Bertioga, atingindo 682 mm em pouco mais de 17 horas, e o segundo maior evento foi em Barra do Una, município, com mais de 624 mm em 14,5 h. Porém, o de maior magnitude foi o registrado em Juquehy, São Sebastião, com mais de 531 mm em apenas 9h20min. Além disso, nota-se que alguns eventos de menor magnitude ocorreram em 2014, outros quatro entre 2019 e 2022, com todos os outros registros ocorrendo durante um evento extremo de precipitação que ocorreu entre os dias 18 e 19 de fevereiro de 2023, sendo registrado em diversas estações pluviométricas da área de análise.

Figura 2 – Análise da precipitação considerando o início e fim dos eventos extremos em 24h, considerando as estações de cada um dos municípios de análise (colunas coloridas) e a duração dos eventos (colunas cinzas).



DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A análise dos percentis mostrou variações significativas na frequência e intensidade das precipitações, dependendo da escala temporal adotada e o critério de inclusão, ou não, de períodos secos. Na escala horária, considerando todos os registros, o P99,9 foi de 19,96 mm, com recorrência média de 56 dias. Quando excluídos os períodos secos e consideradas apenas as horas com registro de precipitação, esse valor subiu para 41,88 mm, com retorno médio de 404 dias, destacando como a inclusão de zeros pode reduzir os valores extremos.

Estes resultados vão de acordo com as observações feitas por Schär *et al.* (2016), que alertam para as limitações do uso de percentis considerando somente os períodos com precipitação, visto que, a depender da variação na frequência de ocorrência da chuva ao longo do tempo, esses percentis podem gerar interpretações equivocadas. Por exemplo, em cenários de redução no número de dias chuvosos, os percentis calculados com base apenas nesses dias passam a considerar um número menor de eventos, o que pode distorcer a interpretação dos extremos, indicando aumento da intensidade, quando na verdade apenas choveu menos dias, mas com chuvas mais concentradas.

Além disso, Alexander *et al.* (2019) reforçam que a amostra utilizada para o cálculo dos percentis afeta diretamente os resultados, visto que os percentis calculados apenas com base em dias chuvosos (≥ 1 mm) podem refletir tanto alterações na frequência dos dias de chuva quanto mudanças na intensidade, dificultando a correta interpretação das tendências. Por outro lado, quando os percentis são calculados a partir de todos os registros (incluindo os dias secos), o tamanho da amostra permanece constante, permitindo que as alterações observadas sejam correlacionadas às variações na intensidade da precipitação.

Já a abordagem considerando o início e o fim dos eventos permitiu captar episódios de maior magnitude fora do período fixo de 24 horas, como o ocorrido entre 18 e 19 de fevereiro de 2023, associado a múltiplos fatores, como o aquecimento anômalo das águas superficiais no Atlântico Sul subtropical e a influência orográfica da Serra do Mar (Marengo *et al.* 2024). Esta análise inicial evidencia a diferença entre o uso de um período fixo diário e de janelas móveis de 24h para análise da precipitação, já que tais eventos não foram registrados com a análise diária (PD ou PD_{chuva}), visto que os eventos ocorreram em dois dias consecutivos, o que leva a dois valores diários menores devido a “divisão” da chuva nestes períodos (Guerreiro *et al.* 2024).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados apresentados evidenciam a importância de se considerar diferentes abordagens na análise da precipitação, especialmente em relação ao critério de inclusão de períodos secos. A variação nos valores dos percentis e nas frequências de ocorrência mostra que a escolha do método pode influenciar diretamente a interpretação dos dados, principalmente em estudos voltados para eventos extremos.

Além disso, a análise baseada no início e fim dos eventos permitiu identificar episódios de precipitação extrema que não seriam plenamente captados por métodos convencionais que utilizam janelas fixas de 24 horas. Isso reforça a necessidade de incorporar abordagens mais flexíveis para compreender melhor a magnitude real dos eventos, como no caso do evento de fevereiro de 2023.

Portanto, é fundamental que os estudos de caracterização e monitoramento da precipitação, adotem metodologias que considerem não apenas a intensidade, mas também a distribuição temporal dos eventos. Tal abordagem é essencial para evitar interpretações equivocadas e aprimorar a avaliação dos riscos associados a eventos extremos. Além disso, a escolha da metodologia — com

base na área de análise local e os objetivos da pesquisa — permite obter resultados mais pertinentes, contribuindo diretamente para o desenvolvimento de políticas mais eficazes de prevenção e resposta a desastres naturais, particularmente em áreas urbanas densamente ocupadas.

Por fim, em estudos futuros devem ser realizadas análises em séries temporais mais longas e incorporando outras metodologias mais abrangentes, como o uso de janelas móveis de 24h, além da comparação da precipitação ano a ano.

REFERÊNCIAS

ALCÂNTARA, Enner *et al.* Deadly disasters in southeastern South America: flash floods and landslides of February 2022 in Petrópolis, Rio de Janeiro. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 23, n. 3, p. 1157–1175, 21 mar. 2023.

ALEXANDER, Lisa V. *et al.* On the use of indices to study extreme precipitation on sub-daily and daily timescales. *Environmental Research Letters*, v. 14, n. 12, p. 125008, dez. 2019.

BARBERO, Renaud *et al.* A synthesis of hourly and daily precipitation extremes in different climatic regions. *Weather and Climate Extremes*, v. 26, p. 100219, 1 dez. 2019.

Cemaden. Pluviômetros Automáticos – Cemaden. , [S.d.]. Disponível em: <<http://www2.cemaden.gov.br/pluviometros-automatico/>>.

DURRE, Imke *et al.* Comprehensive Automated Quality Assurance of Daily Surface Observations. 1 ago. 2010.

EM-DAT. *The international disaster database*. (2019). *Natural disasters: Brazil: country profile*. Disponível em: <http://emdat.be/countryprofile/index.html>. Citado em: Marengo *et al.* 2023.

GUERREIRO, Selma B. *et al.* Unravelling the complex interplay between daily and sub-daily rainfall extremes in different climates. *Weather and Climate Extremes*, v. 46, p. 100735, 1 dez. 2024.

IMD. Glossary. India Meteorological Department, 2017. Disponível em: <<https://www.imdpune.gov.in/Reports/glossary.pdf>>

KENDON, Elizabeth J.; BLENKINSOP, Stephen; FOWLER, Hayley J. When Will We Detect Changes in Short-Duration Precipitation Extremes? 1 abr. 2018.

MANTOVANI, José Roberto *et al.* Unprecedented flooding in Porto Alegre Metropolitan Region (Southern Brazil) in May 2024: Causes, risks, and impacts. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 160, p. 105533, 1 jul. 2025.

MARENGO, Jose A. *et al.* Changing Trends in Rainfall Extremes in the Metropolitan Area of São Paulo: Causes and Impacts. *Frontiers in Climate*, v. 2, 7 ago. 2020.

MARENGO, Jose A. *et al.* Heavy rainfall associated with floods in southeastern Brazil in November–December 2021. *Natural Hazards*, v. 116, n. 3, p. 3617–3644, 1 abr. 2023.

MARENGO, Jose A. *et al.* Heavy rains and hydrogeological disasters on February 18th–19th, 2023,

in the city of São Sebastião, São Paulo, Brazil: from meteorological causes to early warnings. *Natural Hazards*, v. 120, n. 8, p. 7997–8024, 1 jun. 2024.

MEEK, D. W.; HATFIELD, J. L. Data quality checking for single station meteorological databases. *Agricultural and Forest Meteorology, New Visions and New Perspectives in Agricultural Meteorology/Climatology and Modeling*. v. 69, n. 1, p. 85–109, 1 jun. 1994.

MYHRE, G. *et al.* Frequency of extreme precipitation increases extensively with event rareness under global warming. *Scientific Reports*, v. 9, n. 1, p. 16063, 5 nov. 2019.

SCHÄR, Christoph *et al.* Percentile indices for assessing changes in heavy precipitation events. *Climatic Change*, v. 137, n. 1, p. 201–216, 1 jul. 2016.

ZAKARIA, Roslinazairimah; AHMAD RADI, Noor Fadhilah; SATARI, Siti Zanariah. Extraction method of extreme rainfall data. *Journal of Physics: Conference Series*, v. 890, n. 1, p. 012154, set. 2017.

ZILLI, Marcia T. *et al.* A comprehensive analysis of trends in extreme precipitation over southeastern coast of Brazil. *International Journal of Climatology*, v. 37, n. 5, p. 2269–2279, 2017.