



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

JOSÉ WELTON GONÇALO DE SOUSA

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DAS ESTIMATIVAS DA VERSÃO 7 DO PRODUTO
IMERG FINAL RUN BASEADO EM DADOS DE SATÉLITES PARA IDENTIFICAR
EVENTOS EXTREMOS DE CHUVA EM ESCALA DIÁRIA**

**João Pessoa
2024**

JOSÉ WELTON GONÇALO DE SOUSA

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DAS ESTIMATIVAS DA VERSÃO 7 DO PRODUTO
IMERG FINAL RUN BASEADO EM DADOS DE SATÉLITES PARA IDENTIFICAR
EVENTOS EXTREMOS DE CHUVA EM ESCALA DIÁRIA**

Monografia apresentado ao Curso de Engenharia Ambiental, do Centro de Tecnologia, da Universidade Federal da Paraíba, como requisito final para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientador(a): Prof. Dr. Victor Hugo Rabelo Coelho.

**João Pessoa
2024**

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

S725a Sousa, Jose Welton Goncalo de.

Análise do desempenho das estimativas da versão 7 do produto IMERG Final Run baseado em dados de satélites para identificar eventos extremos de chuva em escala diária / Jose Welton Goncalo de Sousa. - João Pessoa, 2024.

59 f.

Orientação: Victor Hugo Rabelo Coelho.
TCC (Graduação) - UFPB/CT.

1. Sensoriamento Remoto. 2. Eventos Extremos de Chuva. 3. IMERG. I. Coelho, Victor Hugo Rabelo. II. Título.

UFPB/BSCT

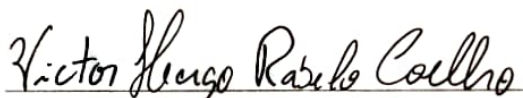
CDU 504(043.2)

FOLHA DE APROVAÇÃO

JOSÉ WELTON GONÇALO DE SOUSA

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DAS ESTIMATIVAS DA VERSÃO 7 DO PRODUTO
IMERG FINAL RUN BASEADO EM DADOS DE SATÉLITES PARA IDENTIFICAR
EVENTOS EXTREMOS DE CHUVA EM ESCALA DIÁRIA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado em 24/10/2024 perante a seguinte Comissão Julgadora:



Prof. Dr. Victor Hugo Rabelo Coelho
Departamento de Geociências do CCEN/UFPB

Aprovado

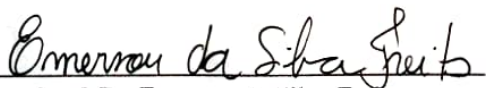
(Aprovado/Reprovado)



Prof. Dr. Alexandre Medeiros da Silva
UFPB

Aprovado

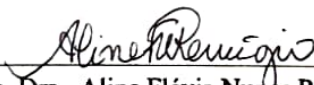
(Aprovado/Reprovado)



Prof. Dr. Emerson da Silva Freitas
IFPB

APROVADO

(Aprovado/Reprovado)



Profa. Dra. Aline Flávia Nunes Remígio Antunes
Coordenadora do Curso de Graduação em Engenharia Ambiental

Dedico este trabalho aos meus pais (José Rufino e Josefa Gonçalo) e meus irmãos (Weliton, Wedigeane e Wedjane), por todo o esforço, a dedicação e o apoio em cada momento de minha vida. Dedico também ao meu companheiro e amigo Diógenes, por estar ao meu lado neste momento importante.

AGRADECIMENTOS

Inicialmente, agradeço pela minha vida ao criador do universo. Agradeço a meus pais, José Rufino e Josefa Gonçalo, por todos os valores ensinados, por toda a sua dedicação na minha criação e por todos os exemplos que me fizeram ser o homem que sou hoje. Estendo meus agradecimentos aos meus irmãos, Weliton Gonçalo, Wedigeane Gonçalo e Wedjane Gonçalo, por todo o companheirismo, união e cuidado que tiveram e têm comigo, seu irmão caçula. Sou grato ao meu cônjuge, companheiro e amigo, Diógenes Antônio, por todo o seu amor, cuidado, carinho e dedicação para comigo e por me apoiar durante o processo de produção deste TCC, não me deixando fraquejar em nenhum momento.

Agradeço também aos meus amigos Danilo, Egilvana e Diogo, que deixei na minha cidade de origem (Ibiara - PB) que, mesmo estando ausente devido ao alto fluxo de atividades acadêmicas, sempre me apoiaram em minhas decisões. Sou grato a todas as pessoas que conheci durante a minha graduação e que se tornaram grandes amigos. Muito obrigado por todos os momentos que vivenciamos juntos Daniely Viana, Joyce Cunha, Joyce Castro, Raquel Campigotto, Ana Clara Maia, Júlia Meneses, Alaine Pereira, Kaliane dos Santos, Flávia Maria Sarmiento e muitos outros que se eu fosse citar aqui necessitaria de muitas linhas. De qualquer forma, sintam-se abraçados.

Sou grato por todas as experiências que acumulei durante minha graduação, elas foram responsáveis pelo meu crescimento pessoal e profissional. Apesar de todos empecilhos vividos até aqui, sou grato pelo homem que me tornei. Agradeço também ao meu professor e orientador Dr. Victor Hugo Rabelo Coelho, por confiar em mim para participar do seu grupo de pesquisa desde a Iniciação Científica e pela orientação deste TCC. Agradeço também a M.^a Cinthia Maria que me incentivou durante, ensinou e apoiou durante esses últimos dois anos de pesquisa.

Dito isto, deixo aqui a seguinte citação que me tocou e me fez refletir sobre tudo que vivenciei:

"É difícil ter muitas coisas importantes pra você. E, às vezes, quando você quer algo tem que abrir mão de outra coisa. No fim, o que importa é o seu coração."

Asakura, Yoh - Shaman King.

RESUMO

Eventos extremos de chuva contribuem significativamente para a ocorrência de desastres ambientais, afetando populações e causando danos substanciais, pois associados a esses eventos há ocorrência de inundações, enchentes, alagamentos e outros desastres naturais. Dessa forma, a precisão na detecção e quantificação desses eventos é crucial para a mitigação desses desastres ambientais e para a formulação de políticas públicas. Portanto, este estudo tem como objetivo avaliar o desempenho das estimativas da nova versão do IMERG (*Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM*) Final Run V07 na detecção de eventos extremos diários de chuva. A determinação do limiar dos eventos extremos de chuva se deu a partir da análise dos percentis, utilizando o 99º percentil. A avaliação foi baseada em comparações ponto-pixel com registros diários de precipitação, usando como métricas estatísticas o coeficiente de determinação (R^2), o coeficiente de correlação de concordância (pc), o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE), o erro relativo absoluto médio (MRAE), a raiz do erro quadrático médio e o viés percentual (PBIAS). Esta análise foi feita para o Brasil, utilizando dados observados de 3.119 pluviômetros de alta qualidade operados pelo Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais (CEMADEN), divididos em grupos regionais definidos com base na semelhança do regime pluviométrico, e considerando dados estimados do IMERG Final Run V07, para o período de 2014 a 2022. A análise da distribuição dos eventos extremos de chuva revelou diferentes padrões para os grupos homogêneos de precipitação. O grupo Sudeste (SE) possui o maior número de precipitações extremas registradas (14.517), enquanto o grupo Central (CEN) possui o menor número de registros (3.356), sendo o grupo Norte e Costa Sudeste (NCSE) o que apresentou maior média de chuva precipitada por evento (64,68 mm), enquanto o grupo Semiárido (SM) apresentou a menor média (31,43 mm). O grupo CNE apresentou os melhores resultados, com relação aos outros grupos, na maioria das métricas (i.e., R^2 , NSE e pc). Enquanto que a região NCSE apresentou os piores resultados em quatro das seis métricas aplicadas (i.e., NSE, pc, PBIAS e MRAE). Por fim, vale ressaltar que o IMERG Final Run V07 não apresentou resultados satisfatórios ao estimar eventos extremos de chuva em nenhum dos grupos homogêneos de precipitação analisados, o que significa que não houve melhoria expressiva em relação a esse tipo de eventos quando comparado às versões anteriores produto.

Palavras-chave: Sensoriamento Remoto, Eventos Extremos de Chuva, IMERG.

ABSTRACT

Extreme rainfall events significantly contribute to the occurrence of environmental disasters, affecting populations and causing substantial damage, as these events are associated with floods, inundations, and other natural disasters. Therefore, the accuracy in detecting and quantifying these events is crucial for mitigating these environmental disasters and formulating public policies. Thus, this study aims to evaluate the performance of the estimates of the new version of IMERG (Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM) Final Run V07 in detecting daily extreme rainfall events. The determination of the threshold of extreme rainfall events was based on the analysis of percentiles, using the 99th percentile. The evaluation was based on point-pixel comparisons with daily precipitation records, using as statistical metrics the coefficient of determination (R^2), the concordance correlation coefficient (ρ_c), the Nash-Sutcliffe efficiency coefficient (NSE), the mean absolute relative error (MRAE), the root mean square error, and the percent bias (PBIAS). This analysis was performed for Brazil, using observed data from 3,119 high-quality rain gauges operated by the National Center for Monitoring and Early Warning of Natural Disasters (CEMADEN), divided into regional groups defined based on the similarity of the rainfall regime, and considering estimated data from IMERG Final Run V07, for the period from 2014 to 2022. The analysis of the distribution of extreme rainfall events revealed different patterns for the homogeneous precipitation groups. The Southeastern group (SE) has the highest number of recorded extreme precipitations (14,517), while the Central group (CEN) has the lowest number of records (3,356), and the Northern and Southeast Coast group (NCSE) is the one that presented the highest average rainfall per event (64.68 mm), while the Semi-arid group (SM) presented the lowest average (31.43 mm). The CNE group presented the best results, in relation to the other groups, in most of the metrics (i.e., R^2 , NSE, and ρ_c). While the NCSE region presented the worst results in four of the six metrics applied (i.e., NSE, ρ_c , PBIAS, and MRAE). Finally, it is worth noting that the IMERG Final Run V07 did not present satisfactory results when estimating extreme rainfall events in any of the homogeneous precipitation groups analyzed, which means that there was no significant improvement in relation to this type of event when compared to previous versions of the product.

Keywords: Remote Sensing. Extreme Rainfall Events. IMERG.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Representação do Ciclo Hidrológico.....	17
Figura 2. Representação dos tipos de chuvas convectivas, frontais e orográficas....	20
Figura 3. Distribuição total anual do número de óbitos, pessoas afetadas e desabrigadas/desalojadas em decorrência de enchentes, enxurradas e inundações.....	24
Quadro 1. 15 Índices de Chuva fornecidos pelo ETCDMI.....	27
Figura 4. Pluviômetro modelo Ville de Paris (Centro Federal de Educação Tecnológica do Rio de Janeiro, Bloco A, em 04/07/2003).....	29
Figura 6. Representação da interação da radiação eletromagnética (REM) com os sensores orbitais.....	32
Figura 8. Mapa de localização dos postos pluviométricos do CEMADEN por A) grupos de características pluviométricas homogêneas e por B) regiões geográficas.....	36
Figura 9. Representação metodológica mostrando os pixels do produto IMERG consideradas no estudo.....	43
Quadro 2 - Métricas de performance para avaliação das estimativas do IMERG-F07..	44
Figura 7. Diagrama de aplicação da metodologia proposta.....	45
Figura 10. Distribuição dos limiares de chuva extrema por grupo de precipitação homogênea.....	47
Figura 11. grupos homogêneos de precipitação segundo Rozante et al. (2018).....	49
Figura 12. Distribuição dos valores das métricas estatísticas por grupo de precipitação homogênea.....	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Distribuição do número de postos pluviométricos de alta qualidade disponíveis por ano para cada grupo homogêneo de precipitação.....	40
Tabela 2. Distribuição da quantidade de pixel do IMERG-F07 no período de estudo.....	41
Tabela 3. Distribuição do número (N) de registros de eventos extremos, chuva média precipitada e desvio padrão por grupo de precipitação homogênea.....	48

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
2. OBJETIVOS.....	16
2.1. OBJETIVO GERAL.....	16
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
3.1. O CICLO HIDROLÓGICO E A PRECIPITAÇÃO ATMOSFÉRICA.....	17
3.1.1. O PROCESSO DE FORMAÇÃO DAS PRECIPITAÇÕES.....	18
3.1.2. OS TIPOS DE PRECIPITAÇÃO.....	19
3.2. PLUVIOMETRIA.....	21
3.3. EVENTOS EXTREMOS DE PRECIPITAÇÃO.....	23
3.3.1 DETERMINAÇÃO DOS EVENTOS EXTREMOS DE CHUVA.....	24
3.4. REDES DE MONITORAMENTO DE PRECIPITAÇÃO.....	28
3.4.1 PLUVIÔMETROS.....	28
3.4.2 SENSORIAMENTO REMOTO ORBITAL.....	31
3.4.3 PRODUTOS DE PRECIPITAÇÃO BASEADOS EM SATÉLITE.....	33
4. METODOLOGIA.....	36
4.1. ÁREA DE ESTUDO.....	36
4.1.1. GRUPOS HOMOGÊNEOS DE PRECIPITAÇÃO.....	37
4.2. FONTE DE DADOS DE PRECIPITAÇÃO.....	39
4.2.1. DADOS OBSERVADOS (PLUVIÔMETROS).....	39
4.2.2. DADOS ESTIMADOS (SATÉLITE).....	40
4.3. PROCESSAMENTO DOS DADOS.....	41
4.3.1 DETERMINAÇÃO DOS EVENTOS EXTREMOS DE CHUVA.....	41
4.3.2 MÉTODO DE COMPARAÇÃO E VALIDAÇÃO.....	42
4.4. VISÃO GERAL.....	44
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	46
5.1 ESTIMATIVA DO LIMiar DOS EVENTOS EXTREMOS DE CHUVA.....	46
5.2 ANÁLISE DO DESEMPENHO DAS ESTIMATIVAS DO IMERG-F07.....	49
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES.....	54
7. REFERÊNCIAS.....	56

1. INTRODUÇÃO

A precipitação é um componente crucial do ciclo hidrológico, influenciando uma variedade de processos ambientais (e.g., umidade do solo, evapotranspiração, recarga de aquíferos) e socioeconômicos (e.g., agropecuária, geração de energia) (Rozante *et al.*, 2018). Além disso, a avaliação dos dados de precipitação desempenha um papel importante em grandes centros urbanos, sendo relevante na gestão de recursos hídricos, previsão de inundações e tomada de decisões em sistemas de alerta operacional (Freitas *et al.*, 2020). Ademais, com as mudanças climáticas, grandes alterações na magnitude e variabilidade das precipitações vêm ocorrendo, levando a impactos significativos em regiões de todo o mundo (IPCC, 2024, Panthou *et al.*, 2018). Diante desse cenário, estima-se que a frequência e intensidade de precipitações extremas tendem a aumentar, ocasionando enchentes mais frequentes e intensas (IPCC, 2024).

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2024) define eventos extremos de precipitação como fenômenos atmosféricos que ocorrem raramente em uma determinada região. Os eventos extremos de chuva contribuem significativamente para a ocorrência de desastres ambientais, afetando populações e causando danos substanciais (Palharini *et al.*, 2021), pois associados a esses eventos há ocorrência de inundações, enchentes, alagamentos, deslizamentos de terra, impactos na saúde pública e interrupções de serviços essenciais (Simões *et al.*, 2021; IPCC, 2024). Dessa forma, quantificar e compreender a variação dos eventos de precipitação é considerada uma ferramenta fundamental para a gestão e os estudos nos campos hidrológico e ecológico (Molina-Sanchis *et al.*, 2016). No entanto, a estimativa desse parâmetro é complexa devido à sua alta variabilidade espacial e temporal (Ovando *et al.*, 2021).

Os dados de precipitação podem ser adquiridos por meio de três formas principais: (1) medições *in situ* utilizando pluviômetros analógicos e digitais; (2) estimativas com base em radares meteorológicos terrestres; e (3) estimativas a partir de sensoriamento remoto (SR) orbital (Li *et al.*, 2017; Lemos, 2022).

No Brasil, o Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais (CEMADEN) tem implementado gradualmente, desde 2011, uma rede de monitoramento de precipitação em escala sub-horária, composta atualmente por

cerca de 3.500 pluviômetros automatizados distribuídos em todo o país (Meira *et al.*, 2022). No entanto, devido à alta variabilidade espaço-temporal dos eventos de precipitação, é necessária uma densa rede de monitoramento (Chen *et al.*, 2016). Contudo, em um país continental e em desenvolvimento como o Brasil, essas observações são frequentemente limitadas em termos de densidade da rede e problemas de manutenção. Embora os radares meteorológicos possam superar as limitações de cobertura espacial (raio de até 300 km), a obtenção desses dados é afetada pela atenuação do feixe e pela necessidade de alta potência. Portanto, os dados de SR orbital, obtidos por meio de sensores a bordo de satélites, têm sido cada vez mais utilizados para obter conjuntos de dados de precipitação (Hong *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2020).

Os dados de precipitação obtidos por satélites apresentam várias vantagens em comparação a outras formas de obtenção, oferecendo uma cobertura espacial ampla, continuidade temporal, uniformidade e custos mais baixos. Geralmente, esses dados de SR são baseados na combinação de faixas espectrais das micro-ondas e do infravermelho (Hong *et al.*, 2019). Alguns produtos de precipitação baseados em SR também incorporam medições de campo, como redes de pluviômetros, para melhorar as estimativas de precipitação (Kidd e Levizzani, 2011). Um amplo conjunto de produtos de precipitação baseados em dados de SR orbital está atualmente disponível gratuitamente (e.g., *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM), *Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM* (IMERG), *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation With Station Data* (CHIRPS), e *Precipitation Estimation From Remotely Sensed Information Using Artificial Neural Networks-Climate Data Record* (PERSIANN)). Esses produtos apresentam características distintas em termos de resolução espacial (4,5~278 metros), resolução temporal (30 minutos a mensal), área de cobertura (continental até global) e latência (15 minutos a anual) (Beck *et al.*, 2017; Ramos Filho *et al.*, 2022).

No entanto, os produtos de precipitação baseados em dados de satélite ainda apresentam imprecisão em suas estimativas. Assim, vários estudos têm avaliado a precisão dos dados de precipitação baseados em satélite em diferentes escalas espaciais e temporais, comparando-os com medições *in situ* (e.g., Beck *et al.*, 2019; Freitas *et al.*, 2020; Ramos Filho *et al.*, 2022). Além disso, diversos estudos também avaliaram o desempenho de produtos de precipitação baseados em dados de

satélite em variadas aplicações hidrológicas, como gestão de recursos hídricos, monitoramento de águas subterrâneas, monitoramento de perigos e modelagem de fluxo (e.g., Ranghetti *et al.*, 2018, Singh e Saravanan, 2020; Parker *et al.*, 2021; Almagro *et al.*, 2021). Alguns outros vêm sendo focados na análise do desempenho dos produtos de precipitação baseados em satélite na identificação de eventos extremos em várias regiões do Brasil (e.g., Rodrigues *et al.*, 2018; Cavalcante *et al.*, 2020; Palharini *et al.*, 2021, 2022).

Esses estudos mostram que os dados de precipitação baseados em satélites nem sempre são capazes de identificar esses eventos com precisão, pois dependem da região, da intensidade da chuva, do tipo de nuvem e da escala temporal utilizada. Por exemplo, Ramos Filho *et al.* (2022) identificaram que todos os 14 produtos de precipitação baseados em dados de satélites analisados, dentre eles as três fases (*Early Run*, *Late Run* e *Final Run*) da versão 06 do IMERG, subestimaram bastante os eventos extremos de chuva capazes de provocar inundações no estado de São Paulo. Portanto, antes de utilizar dados de precipitação por SR em estudos hidrológicos, é recomendável realizar uma avaliação regional ou local de seu desempenho para quantificar e reduzir as incertezas associadas (XU, 2020).

Em 2023, o grupo de pesquisadores da NASA (Agência Nacional Espacial Americana), atualizou o algoritmo do IMERG para a versão 07, mantendo as mesmas características operacionais (i.e., Resolução espacial, Resolução temporal etc.) que seu predecessor (IMERG v06). Porém, esta nova versão recebeu uma ampla gama de melhorias, muitas delas em resposta aos feedbacks sobre a versão 06. Segundo Huffman *et al.* (2023), algumas dessas melhorias são:

1. Calibração de Sensores: Calibração usando a faixa completa dos imageadores *GPM Microwave Imager* (GMI) e *TRMM Microwave Imager* (TMI), e as recuperações mais estreitas de dados de temperatura de brilho de micro-ondas. Essa melhoria proporciona maior precisão nas estimativas de precipitação do IMERG. Além disso, a versão 07 continua a intercalibração de todos os satélites de constelação com imageadores TMI/GMI, utilizando a técnica de histograma oceânico e terrestre introduzida na versão 06.
2. Vetores de Movimento: O IMERG V07 modifica a fonte do vetor de movimento de uma única variável, vapor de água total (TQV), para uma estrutura de três

variáveis: precipitação (PRECTOT), água líquida precipitável total (TQL) e TQV. Essa mudança melhora a detecção dos movimentos dos sistemas de precipitação, especialmente perto da orografia.

3. *Scheme for the Histogram Adjustment of Ranked Precipitation Estimates in the Neighborhood* (SHARPEN): Foi introduzido na versão 07 do IMERG o Ajuste de Histograma de Estimativas de Precipitação Classificadas na Vizinhança (SHARPEN) foi desenvolvido com o intuito de reduzir a distorção na distribuição da taxa de precipitação que surge da média de múltiplas estimativas de precipitação em uma estrutura Euleriana, o que contribui para estimativas de precipitação mais precisas.

Huffman *et al.*, 2023 sugerem que as estimativas de precipitação produzidas por essa nova versão apresentaram, de modo geral, uma melhoria significativa em vários aspectos, como a capacidade de identificar eventos de precipitação, a redução de erros (sistemáticos e aleatórios), e melhor desempenho em áreas como regiões montanhosas, costeiras e superfícies congeladas. Além disso, a nova versão mostrou maior consistência nos dados de estimativa, especialmente com relação aos valores extremos, e melhor capacidade de estimar a precipitação em áreas onde há poucas ou nenhuma medição, a exemplo dos oceanos .

Desta forma, é evidente que a precisão na detecção e quantificação de eventos extremos de precipitação é crucial para a mitigação de desastres ambientais e para a formulação de políticas públicas eficazes. Além disso, a melhoria contínua dos produtos de precipitação baseados em satélite, como o IMERG, é essencial para fornecer dados confiáveis que possam ser utilizados em diversas áreas, incluindo a agricultura, o monitoramento de desastres ambientais, a gestão de recursos hídricos e o planejamento urbano. Portanto, este estudo busca responder a seguinte questão científica: A nova versão (V07) do produto IMERG é capaz de identificar os eventos extremos de precipitação?

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GERAL

Avaliar o desempenho das estimativas da versão 07 do produto de precipitação baseado em satélite IMERG *Final Run* na identificação de eventos extremos diários de chuva.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Este estudo tem como objetivos específicos:

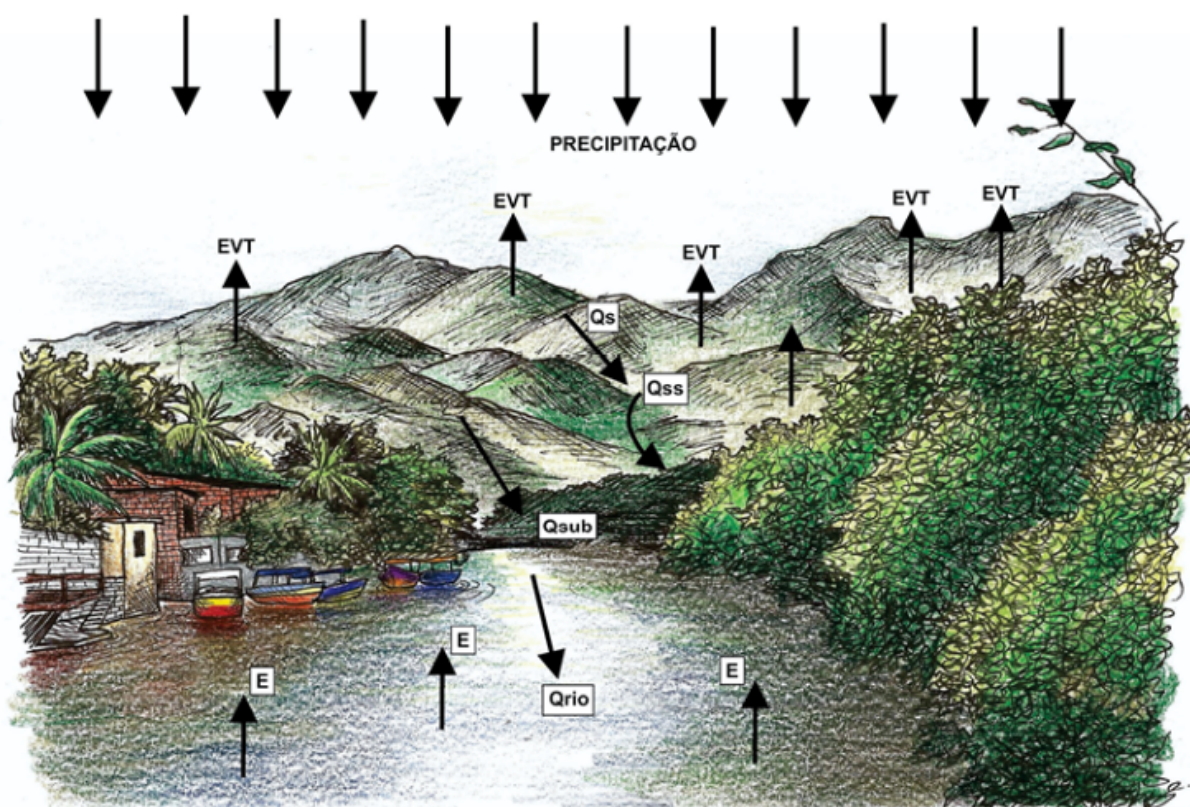
- Definir o limiar que caracteriza os eventos extremos de precipitação na série de dados de precipitação da rede de monitoramento do CEMADEN;
- Identificar os eventos de precipitação extrema na série de dados dos pluviômetros da rede de monitoramento do CEMADEN, utilizados para validar os dados de satélite;
- Analisar as incertezas das estimativas entre os dados estimados (i.e., SR) e observados (i.e., pluviômetros).

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. O CICLO HIDROLÓGICO E A PRECIPITAÇÃO ATMOSFÉRICA

O ciclo hidrológico é um fenômeno complexo, de escala global, que envolve a circulação fechada de água entre a atmosfera e a superfície terrestre. Esse fenômeno é potencializado pela ação da radiação eletromagnética (energia solar), gravidade e movimento das massas de ar, devido à rotação do planeta (Figura 1). O ciclo hidrológico é composto de processos contínuos e dinâmicos, os principais e amplamente estudados são: Precipitação; Escoamento; Infiltração (armazenamento); Evaporação; e Evapotranspiração, que inclui a transpiração da vegetação (Pimentel, 2015).

Figura 1. Representação do Ciclo Hidrológico.



Fonte: Pimentel, 2015. E - evaporação; EVT - evapotranspiração; Qs - Escoamento superficial. Qss - escoamento subsuperficial; Qsub - escoamento subterrâneo.

A precipitação é um dos componentes do ciclo hidrológico mais estudados por especialistas da Climatologia, da Meteorologia, da Hidrologia, dos Recursos Hídricos, entre outros, sendo definida como toda água proveniente do vapor d'água, presente na atmosfera, depositada na superfície terrestre de alguma forma, como

chuva, granizo, neve, geada etc (Pinto *et al.*,1976). No Brasil, a forma de precipitação mais comum é a chuva (Tucci, 1997).

3.1.1. O PROCESSO DE FORMAÇÃO DAS PRECIPITAÇÕES

A atmosfera terrestre pode ser considerada como um sistema de transporte e de distribuição água, bem como um vasto reservatório desse componente na forma de vapor, o que possibilita a ocorrência de precipitações. A origem das precipitações está ligada ao crescimento das gotículas de nuvem que ocorre quando certas condições são alcançadas. Evidentemente, existem nuvens que não produzem chuvas, o que destaca a necessidade de processos intrínsecos que desencadeiam a precipitação (Pinto *et al.*,1976; Tucci, 1997).

A ascensão das massas de ar está diretamente ligada ao processo de formação da precipitação e pode ocorrer devido a fatores como convecção térmica, relevo e ação frontal de massas. A ascensão do ar provoca um resfriamento que pode fazer com que o ar atinja seu ponto de saturação. A medida que o ar na atmosfera se resfria, sua capacidade de retenção de vapor de água é reduzida gradativamente, o que leva a sua condensação na forma de gotículas de água que são mantidas em suspensão, como nuvens ou nevoeiros (Pinto *et al.*,1976; Pimentel, 2015).

As nuvens são aerossóis compostos pela mistura de ar, vapor de água e gotículas em estado líquido ou sólido com diâmetros que variam entre 0,01 mm e 0,03 mm, espaçadas entre si com 1 mm de distância, em média. O ar presente nas nuvens se encontra em estado próximo ao de saturação e, por vezes, supersaturado. As nuvens permanecem em suspensão na atmosfera devido ao efeito de turbulência do meio e/ou às massas de ar ascendente que se contrapõe a força gravitacional (Tucci, 1997).

Para que ocorra uma precipitação, é necessário que as gotículas de águas nas nuvens tenham peso e tamanho suficientes para que a força da gravidade supere os movimentos ascendentes das massas de ar no meio atmosférico. Esse crescimento das gotículas de água se dá devido ao fenômeno de aglutinação a partir de partículas presentes na atmosfera, sendo essas de origem argilosa, orgânica (pólen), químicas e sais marinhos, denominadas núcleos de condensação. Os

núcleos mais ativos são partículas de sal, advinda do mar, cristais de gelo e produtos derivados da combustão compostos por ácido nítrico e sulfúrico (Tucci, 1997).

3.1.2. OS TIPOS DE PRECIPITAÇÃO

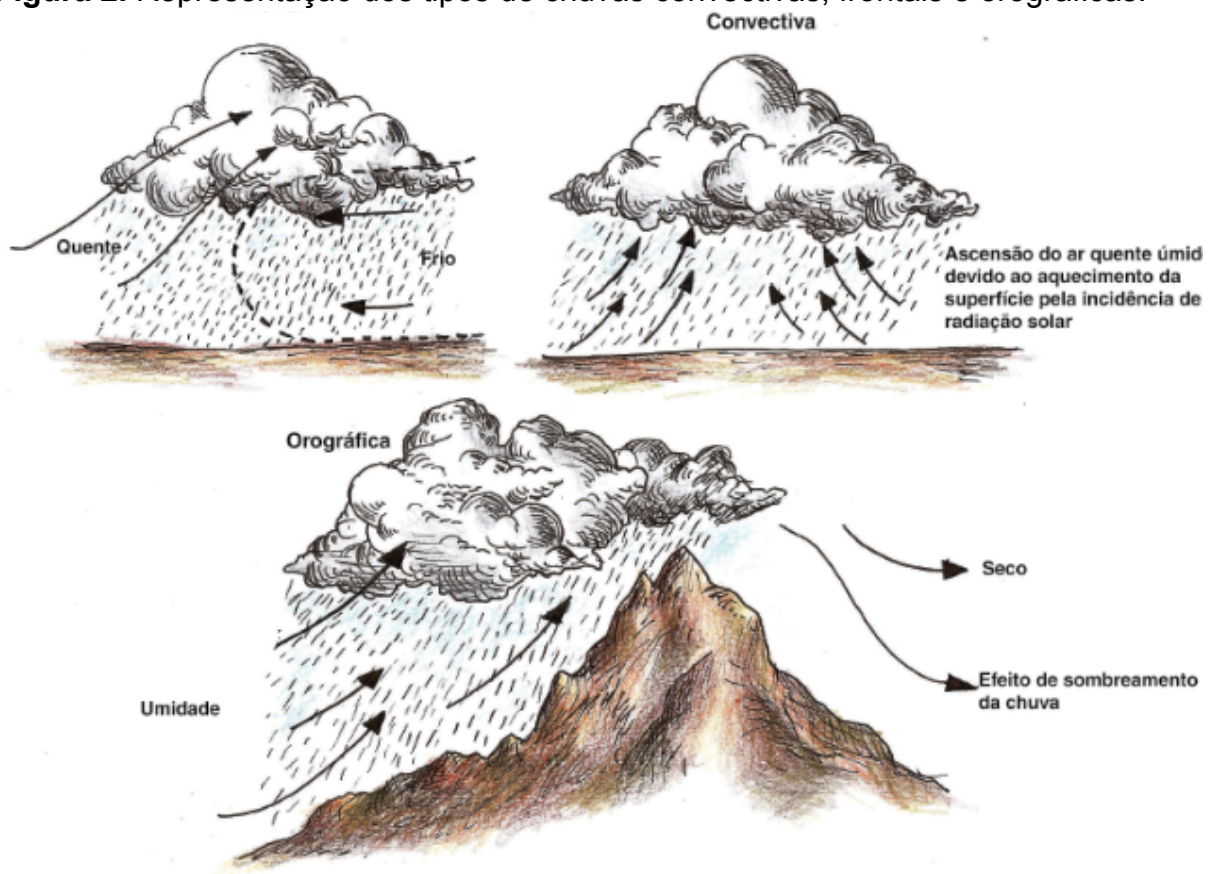
De acordo com o mecanismo responsável pela ascensão da massa de ar úmido, as precipitações podem ser classificadas em:

- **Convectivas:** São provocadas pela ascensão da massa de ar devido à diferença de temperatura na camada vizinha da atmosfera (Pinto *et al.*, 1976). O ar se expande ao ser aquecido pela radiação eletromagnética, tornando-se mais leve que as camadas de ar ao seu entorno. Com menor densidade, o ar aquecido tende a ascender, por convecção, carregando umidade e potencializando a precipitação (Pimentel, 2015). Conhecidas como tempestades ou trovoadas, as chuvas convectivas se caracterizam por grandes intensidades e pequenas durações, restringindo-se a pequenas áreas, podendo causar inundações em pequenas bacias hidrográficas. Essas chuvas ocorrem em áreas equatoriais, onde os ventos são mais fracos e o movimento das massas de ar é praticamente vertical, entretanto, pode ocorrer em zonas temperadas devido ao verão (Pinto *et al.*, 1976; Tucci, 1997)).
- **Frontais:** São provocadas devido ao encontro de massas de ar quentes com massas de ar frias. Nas zonas de convergência atmosférica, o ar quente e úmido é abruptamente impulsionado para cima, resultando na condensação do vapor de água, de modo a produzir chuvas (Tucci, 1997). A zona de contato entre as duas massas de ar é denominada de frente, enquanto a precipitação resultante é denominada frontal. Os sistemas frontais podem ser quentes (frente quente) ou frios (frente fria), associados à baixa pressão ou alta pressão (Pimentel, 2015). Essas chuvas ocorrem com grande duração e intensidade média, em vastas áreas, podendo vir acompanhada de ventos fortes com circulação ciclônica (Tucci, 1997).
- **Orográficas:** Ocorrem quando o ar quente e úmido, geralmente vindo do oceano em direção ao interior do continente, é forçado a transpor uma barreira montanhosa. Durante esse processo, a massa de ar ascendente

resfria adiabaticamente, aliado a menores pressão e temperatura devido à altitude, ocasionando a condensação do vapor de água (Tucci, 1997; Pimentel, 2015). Quando a massa de ar supera a barreira montanhosa, projeta-se a sombra pluviométrica, que resulta em áreas secas ou semi-áridas, devido ao ar seco, já que a umidade foi descarregada na costa oposta. As chuvas orográficas são caracterizadas por ocorrerem em pequenas áreas, com baixa intensidade e grande duração (Tucci, 1997).

Entender os processos e o tipo de chuva do qual um evento de precipitação se origina é importante para a tomada de decisões e para a gestão dos recursos hídricos. Do ponto de vista da engenharia, os tipos de chuva frontal e orográfica interessam aos projetos de grandes obras hidrelétricas, controle de cheias e navegação, enquanto que as chuvas convectivas interessam às obras em pequenas bacias, como o dimensionamento de obras de drenagem urbana (Pinto *et al.*, 1976).

Figura 2. Representação dos tipos de chuvas convectivas, frontais e orográficas.



Fonte: Adaptado de Pimentel (2015) apud Ward e Elliot (1995).

Ademais, diversos tipos de precipitações ocorrem na natureza (Tucci, 1997), são elas:

- Chuvisco (neblina ou garoa): precipitação de baixa intensidade e muito fina;
- Chuva: é a ocorrência de precipitação na forma líquida. A chuva congelada é a precipitação constituída por gotas d' água sobrearrefecidas que, ao atingirem o solo, congelam.
- Neve: é a precipitação que ocorre na forma de cristais de gelo que se aglomeram em flocos.
- Saraiva: é a precipitação sob a forma de bolas ou pedras de gelo arredondadas com diâmetro de cerca de 5 mm.
- Granizo: é a precipitação sob a forma de pedras de gelo com diâmetro ≥ 5 mm.
- Orvalho: formado pela condensação do vapor d'água da atmosfera em objetos próximos ao solo durante horas com ausência do vento e aumento da umidade do ar.
- Geada: Semelhante a formação de orvalhos, entretanto ocorre em temperaturas abaixo de 0°C.

3.2. PLUVIOMETRIA

As chuvas são o principal “motor” do ciclo hidrológico, sendo possivelmente uma das variáveis climatológicas mais significativas. Destaca-se no estudo da água, do calor e das quantidades de momento, além de ser crucial em pesquisas que envolvem o cálculo do “balanço” (transporte e conservação) de gases atmosféricos em escalas regionais e globais (Pimentel, 2015). Devido à sua importância dentro dos estudos hidrológicos, faz-se necessário entender as características associadas a esses eventos de precipitação. As grandezas que caracterizam uma chuva são: altura pluviométrica, duração, intensidade e frequência.

A quantidade de chuva em um evento é medida em termos de altura pluviométrica, que representa a precipitação acumulada sobre uma superfície plana e impermeável (Pinto *et al.*, 1976), distribuída de maneira uniforme dentro de uma determinada área de influência na bacia hidrográfica (Pimentel, 2015). Em outras palavras, é a média da espessura da lâmina de água precipitada em uma área específica, assumindo que a água da chuva não infiltre, evapore ou escoe para fora

dos limites da região. A medida mais comum da altura pluviométrica é o milímetro (mm), que corresponde à quantidade de chuva equivalente a um litro por metro quadrado de área (Tucci, 1997).

A altura pluviométrica, quando analisada isoladamente e sem a associação a outras grandezas, possui menor significação. Por exemplo, 100 mm de chuva em uma hora pode ser considerado um volume elevado, mas essa mesma quantidade seria insignificante se distribuída ao longo de um ano. Portanto, é essencial considerar outras grandezas associadas às quantidades precipitadas, como a duração do evento, ou seja, o intervalo de tempo durante o qual ocorre a precipitação (Pimentel, 2015).

Ao relacionar a quantidade de chuva precipitada em uma determinada área com a duração do evento de precipitação, obtém-se a intensidade, que é calculada pela Equação 1, sendo geralmente expressa em milímetros por hora (mm/h) ou milímetros por minuto (mm/min). Embora a intensidade de uma precipitação varie ao longo do tempo, para fins de estudos hidrológicos, são definidos intervalos de tempo nos quais essa intensidade é considerada constante (Tucci, 1997).

$$intensidade = \frac{Precipitação}{Duração} \quad (\text{Equação 1})$$

A análise das precipitações envolve a consideração de sua frequência e tempo de recorrência (Tr), também denominado tempo de retorno, conceitos fundamentais para entender a probabilidade de ocorrência de eventos críticos. Segundo Pimentel (2015), a frequência de precipitações é determinada pelo número de vezes que um evento específico ocorre ou é superado, sendo que a série histórica pode ser classificada conforme a duração dos eventos para calcular a repetição de certas precipitações. Quanto mais frequente for um evento, maior será sua probabilidade de ocorrência, enquanto eventos raros apresentam menor probabilidade. Complementando essa visão, Tucci (1993) define Tr como o número médio de anos em que se espera que um determinado valor de precipitação seja igualado ou superado uma vez, com a probabilidade anual de ocorrência de eventos extremos. Por exemplo, uma precipitação com 1% de probabilidade anual corresponde a um Tr de 100 anos. Na análise de precipitações extremas mínimas, Tr deve ser interpretado como o inverso da probabilidade de não-excedência.

3.3. EVENTOS EXTREMOS DE PRECIPITAÇÃO

Os eventos extremos de chuvas são fenômenos atmosféricos que possuem baixa probabilidade de ocorrência, e que quando acontecem, a quantidade de chuva precipitada supera a quantidade esperada (Rodrigues *et al.*, 2018; Simões *et al.*, 2021; Lima e Armond, 2022; IPCC, 2024). Precipitações extremas possuem intensidade e duração tais que determinam sua severidade e impactos. Os eventos de alta intensidade são caracterizados por uma grande quantidade de chuva em um curto período de tempo, por outro lado, a duração pode variar de algumas horas a vários dias, sendo que eventos de longa duração mesmo com intensidades moderadas também apresentam riscos (Souza *et al.*, 2020; Ramos Filho *et al.*, 2022).

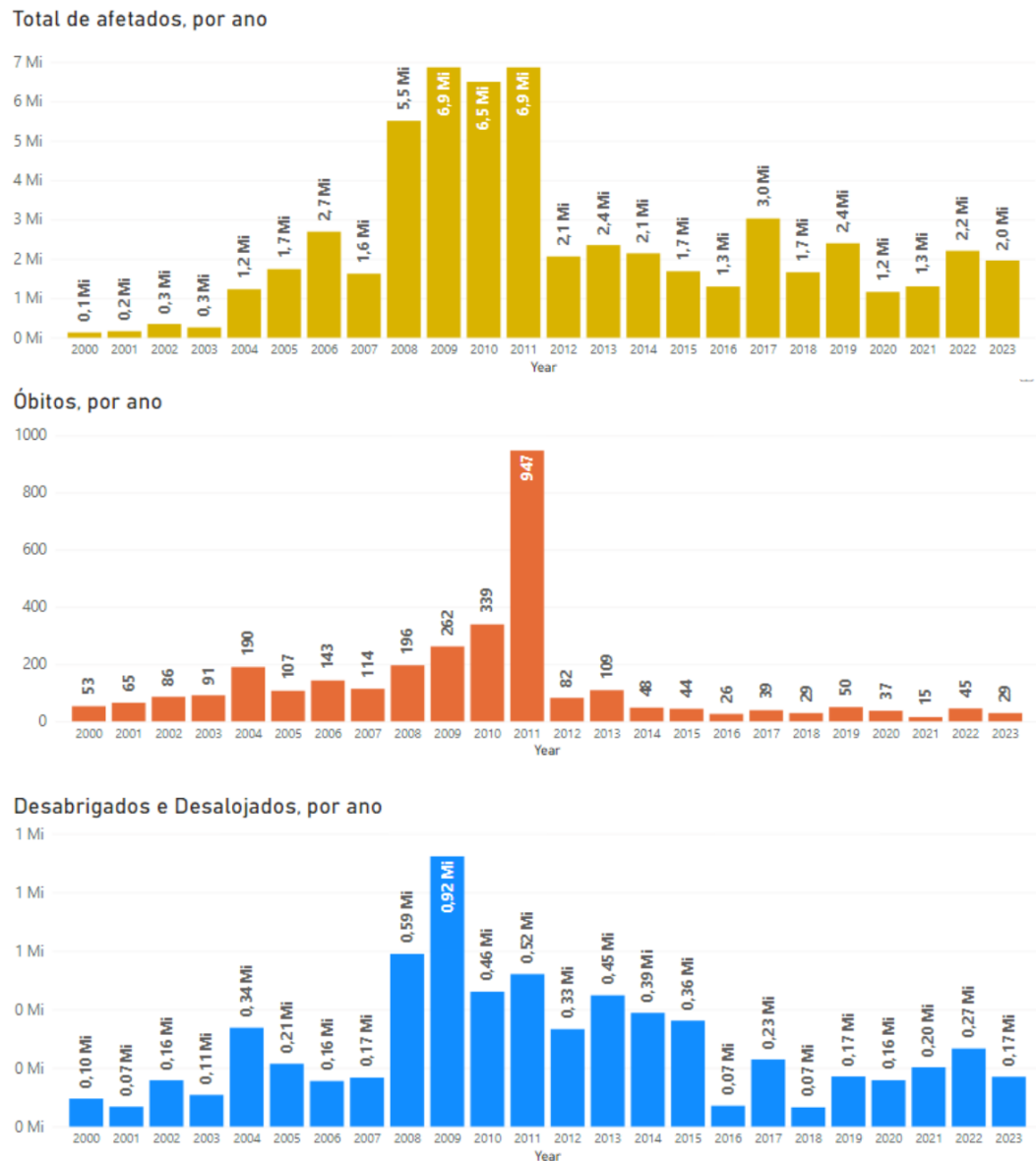
Os eventos extremos de chuva desempenham um papel crucial na ocorrência de desastres ambientais, impactando significativamente as populações e causando danos substanciais (Palharini *et al.*, 2021). Esses eventos estão frequentemente associados às inundações, às enchentes, aos alagamentos, aos deslizamentos de terra, aos impactos na saúde pública e às interrupções de serviços essenciais (Simões *et al.*, 2021; IPCC, 2024).

Segundo o Atlas Nacional de Desastres no Brasil (2024), entre o período de 2000 e 2023 foram registradas 17.153 ocorrências de inundações, enxurradas, enchentes e movimentos de massa (deslizamento de terra). Cerca de 57 milhões de pessoas foram afetadas pela ocorrência desses desastres, totalizando 3.146 óbitos (Figura 3), 6,66 milhões de desabrigados e desalojados, e cerca de 621 mil feridos e enfermos. Durante esse período, o prejuízo acumulado é de cerca de R\$ 90,63 bilhões de reais, enquanto os danos totais estão estimados em R\$ 90,73 bilhões de reais.

Vale ressaltar que a relação entre relevo, vegetação e eventos extremos de chuva é significativa, pois as características topográficas de uma determinada região podem influenciar os padrões de precipitação e a gravidade dos desastres ambientais (Souza *et al.*, 2020). As chuvas extremas estão frequentemente associadas aos efeitos orográficos, onde o ar carregado de umidade é forçado a subir sobre as montanhas, resultando em intensa precipitação nas áreas mais baixas (Pinto *et al.*, 1976; Tucci, 1997; Pimentel, 2015). Desta forma, a

vulnerabilidade de uma região, influenciada por seu relevo e vegetação, é essencial para determinar se chuvas extremas resultarão em desastres, pois áreas mais suscetíveis têm maior probabilidade de sofrer danos socioeconômicos significativos.

Figura 3. Distribuição total anual do número de óbitos, pessoas afetadas e desabrigadas/desalojadas em decorrência de enchentes, enxurradas e inundações.



Fonte: adaptado de Atlas Nacional de Desastres no Brasil (2024).

3.3.1 DETERMINAÇÃO DOS EVENTOS EXTREMOS DE CHUVA

A análise dos eventos extremos de chuva é de suma importância devido aos impactos socioeconômicos e ambientais que esses eventos acarretam. Existem diversos fatores que contribuem para a identificação de um evento extremo.

Portanto, não é surpreendente que não haja unanimidade na comunidade científica sobre a definição de evento extremo. A intensidade desses eventos varia conforme sua ocorrência em diferentes localidades, assim como a interpretação de alguns pesquisadores ao definir um evento como extremo (Monteiro e Zanella, 2023).

Os eventos de precipitação extrema podem ser determinados com base em inúmeras técnicas estatísticas, como a metodologia dos máximos de precipitação, desvios quartílicos, técnica dos quantis e índice de anomalia de chuva (IAC), inclusive técnicas mais simples, como o desvio padrão da série histórica (Monteiro e Zanella, 2023). Além disso, é comum encontrar na literatura científica diversos trabalhos que delimitam eventos de chuva sem o estabelecimento, aparentemente, de critérios objetivos e/ou estatísticos, como é sugerido por Monteiro e Zanella (2023).

A metodologia dos máximos de precipitação (Silva, 2012) é uma abordagem estatística que tem como enfoque a identificação de eventos de precipitação máxima diária, que são considerados extremos devido ao seu potencial de causar impactos substanciais. Essa metodologia é aplicada desconsiderando precipitações abaixo de 50 mm/dia em uma série histórica, além disso, ela permite categorizar em quatro níveis os eventos extremos de chuva. A título de exemplo, a metodologia dos máximos de precipitação foi aplicada por Monteiro e Zanella (2017) na determinação dos eventos de precipitação extrema nas cidades de Crato, Fortaleza e Sobral, todas no Ceará. Para Monteiro e Zanella (2023), apesar dessa metodologia operacional demonstrar considerável eficácia e, atualmente, seja uma das técnicas estatísticas que representa com mais precisão uma análise dos extremos diários em vários cenários, ela contém certos aspectos que justificam adaptação e análise mais aprofundadas, particularmente ao desconsiderar os totais de precipitação abaixo de 50 mm/dia, já que, para os autores, nenhum valor de precipitação deve ser excluído da análise.

A técnica de percentis é outro método estatístico utilizado para determinar os limites acima dos quais os eventos de chuva são considerados extremos. Essa técnica se baseia na ordenação dos dados de precipitação e na identificação do valor que corresponde a um determinado percentil da distribuição. No geral, são considerados um total diário de precipitação maior do que o percentil de 90% da

série histórica de uma determinada região (Rodrigues *et al.*, 2018; Simões *et al.*, 2021; Lima e Armond, 2022). Dessa forma, o valor do percentil pode ser arbitrado de acordo com a especificidade do estudo, como é o caso de Palharini *et al.* (2021, 2022), que determinaram como extremos os eventos de chuva acima de 99% (percentil 99), e Rodrigues *et al.* (2018), que consideraram eventos acima de 95% (percentil 95). Vale ressaltar que o *Expert Team on Climate Change Detection Monitoring and Indices* (ETCCDMI) recomenda a utilização do parâmetro percentil 99%, representando assim 1% das precipitações mais significativas, considerando a série de dados utilizada (Monteiro e Zanella, 2023). Ademais, o ETCCDMI define um conjunto de índices climáticos (Quadro 1) para monitorar e detectar mudanças climáticas, incluindo diversos índices relacionados a extremos de precipitação (Kalr *et al.*, 1999). Esses índices são comumente usados em estudos científicos para determinar os eventos extremos de chuva (e.g., Cavalcante *et al.*, 2020; Xavier *et al.*, 2021; Santos *et al.*, 2022).

Ademais, metodologias como o Índice de Anomalia de Chuva (IAC) e a Distribuição de Probabilidade de Valores Extremos Genérico (GEV) aparecem na literatura sendo utilizados na determinação de eventos extremos (e.g., Santos *et al.*, 2022 ; Souza *et al.*, 2020., respectivamente). O IAC (em inglês, *Rainfall Anomaly Index*) avalia a frequência de anos secos e chuvosos, bem como a intensidade desses eventos. Desenvolvido por Rooy (1965), ele inclui um método de classificação para categorizar as magnitudes das anomalias de precipitação, tanto positivas quanto negativas. A GEV, por sua vez, é uma família de distribuições contínuas de probabilidade (Gumbel, Fréchet e Weibull) usada na teoria de valores extremos, sendo utilizada para modelar o comportamento de máximos (ou mínimos) de conjuntos de dados, como a precipitação máxima em um período de tempo ou a maior vazão de um rio (Fisher e Tippett, 1928).

Quadro 1. 15 Índices de Chuva fornecidos pelo ETCDMI.

Símbolo	Descrição
nP	Número de dias com $R \geq 1\text{mm}$
Rx1day	Precipitação máxima em 1 dia
SDII	Índice simples de intensidade de precipitação: intensidade média diária de precipitação dos dias com $R \geq 1\text{mm}$
Rx5days	Precipitação máxima em 5 dias consecutivos
R10mm	Contagem de dias com $R \geq 10\text{ mm}$
R20mm	Contagem de dias com $R \geq 20\text{ mm}$
R50mm	Contagem de dias com $R \geq 50\text{ mm}$
CDD	Duração máxima de período seco: número máximo de dias consecutivos com $R < 1\text{mm}$
CWD	Duração máxima de período úmido: número máximo de dias consecutivos com $R \geq 1\text{mm}$
R95p	Precipitação total quando $R > 95^\circ$ percentil dos dias com $R \geq 1\text{mm}$
R99p	Precipitação total quando $R > 99^\circ$ percentil dos dias com $R \geq 1\text{mm}$
R95pad	Precipitação total quando $R > 95^\circ$ percentil de todos os dias
R99pad	Precipitação total quando $R > 99^\circ$ percentil de todos os dias
PRCPTOT	Precipitação total anual
RTop4	Soma da precipitação dos 4 dias com maior R

Fonte: Adaptado de Cavalcante *et al.*, (2020); Xavier *et al.*, (2021); Santos *et al.*, (2022). R: Chuva precipitada. Nota: São 27 o número de índices fornecidos pelo ETCDMI.

Diante da necessidade de obter determinações dos valores extremos de chuva mais precisas, Monteiro e Zanella (2023) propuseram uma nova metodologia estatística operacional, denominada Metodologia Estatística dos Eventos Extremos de Precipitação (M3EP), para categorizar eventos diários de precipitação extrema em diferentes localidades brasileiras, utilizando longas séries históricas de dados pluviométricos. A metodologia, embasada a partir da metodologia dos máximos de precipitação e da técnica dos quantis, considera todos os acumulados diários de precipitação, incluindo os insignificantes, e utiliza a mediana e o desvio padrão para definir três classes de intensidade de chuva extrema. Vale ressaltar, que métodos empíricos também podem ser utilizados na determinação das precipitações extremas, como mostra o estudo de Ramos Filho *et al.* (2022).

3.4. REDES DE MONITORAMENTO DE PRECIPITAÇÃO

A precipitação é possivelmente uma das variáveis climatológicas mais importantes (Pimentel, 2015). Dessa forma, quantificar e compreender a variação dos eventos de precipitação é considerado uma ferramenta fundamental para a gestão e os estudos nos campos hidrológico e ecológico (Molina-Sanchis *et al.*, 2016), bem como para obras de Engenharia, afinal dados históricos e confiáveis de precipitação permitem ao projetista considerar e mitigar os riscos existentes na execução da obra e fornecer a escolha da melhor alternativa custo-benefício, considerando adequadamente o desempenho técnico e as questões de segurança da intervenção antrópica correspondente (Souza *et al.*, 2020).

No entanto, medir com precisão a quantidade de chuva não é uma tarefa simples. Para Ovando *et al.* (2021), a estimativa desse parâmetro é complexa devido à sua alta variabilidade espacial e temporal. De fato, as precipitações não são uniformes espacialmente e apresentam incertezas nas previsões em escalas menores de espaço e tempo, principalmente devido à dinâmica envolvida em algumas formações (Pimentel, 2015).

Entretanto, apesar de a medição de chuva e os aparelhos utilizados serem relativamente simples, obter dados de boa qualidade é uma tarefa desafiadora. Para Tucci (1997), é necessário possuir conhecimento dos métodos de aquisição, das características do aparelho e do local de instalação, e da personalidade do operador antes de realizar qualquer análise ou tratamento dos dados.

Os dados de precipitação podem ser adquiridos, principalmente, por meio de três formas: (1) medições *in situ*, utilizando pluviômetros analógicos e digitais; (2) estimativas com base em radares meteorológicos terrestres; e (3) estimativas a partir de sensoriamento remoto (Li *et al.*, 2017; Lemos, 2022). Esse trabalho restringiu-se em contemplar a primeira e a terceira forma de aquisição de dados pluviométricos.

3.4.1 PLUVIÔMETROS

O pluviômetro mais tradicional no Brasil é o modelo conhecido como “Ville de Paris” (Figura 4). Esse equipamento é feito de material metálico e, geralmente, é fixado em um mourão de madeira, com a superfície de coleta posicionada a 1,50 m

do solo. Possui um registro na extremidade inferior que permite o escoamento da água acumulada, possibilitando a medição da altura milimétrica em uma proveta graduada associada ao aparelho. A superfície de coleta tem uma área de 400cm² e é equipada internamente com uma tela que impede que folhas ou outros materiais bloqueiem a saída do aparelho (Pimentel, 2015).

As leituras feitas pelo observador do pluviômetro, geralmente em intervalos de 24 horas, são anotadas em cadernetas próprias e enviadas à agência responsável pela rede pluviométrica no final de cada mês. Essas leituras normalmente se referem ao total de precipitação acumulada das 7 horas da manhã do dia anterior até às 7 horas da manhã do dia da leitura. Os pluviogramas obtidos nos pluviômetros fornecem o total de precipitação acumulada ao longo do tempo e são indispensáveis para o estudo de chuvas de curta duração (Pinto *et al.*, 1976). Por outro lado, o que diferencia o pluviômetro analógico do digital (pluviógrafo) é o registro automático dos dados, o que dispensa a presença de um observador de pluviômetro (Tucci, 1997).

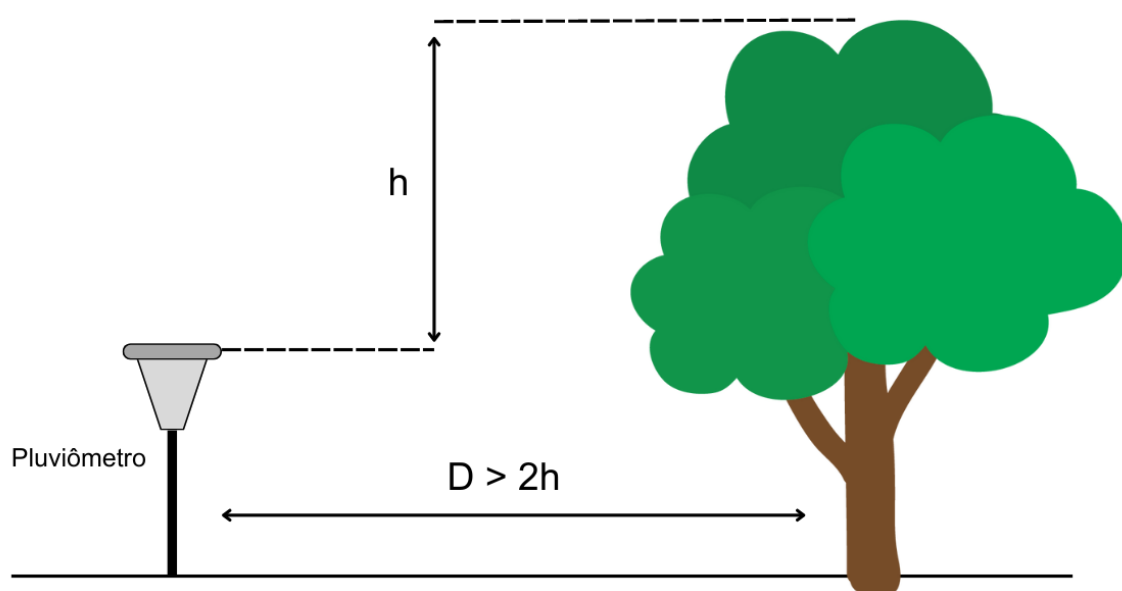
Figura 4. Pluviômetro modelo Ville de Paris (Centro Federal de Educação Tecnológica do Rio de Janeiro, Bloco A, em 04/07/2003).



Fonte: adaptado de Pimentel (2015).

Existem diversas normas que determinam como os pluviômetros devem ser instalados (Tucci, 1997). Ao instalar um pluviômetro, é crucial garantir que não haja obstáculos (i.e., proximidade ou sombreamento das copas das árvores e edificações) que possam interferir na coleta da precipitação (Pimentel, 2015). No geral, convencionou-se que o pluviômetro deve ser instalado a uma altura média (h) entre 1 m e 1,5 m acima da superfície do solo, respeitando-se uma distância mínima de duas vezes a altura da barreira em relação ao nível de captação do pluviômetro ($D > 2h$), como mostrado na Figura 5 (Tucci, 1997; Pimentel, 2015).

Figura 5. Representação convencional da instalação do pluviômetro.



Fonte: Autor (2024)

No Brasil, várias agências são responsáveis pela manutenção das redes pluviométricas. Entre elas, destacam-se a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e o Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN). Em nível estadual, também existem órgãos específicos para essa função.

O CEMADEN é uma unidade de pesquisa vinculada ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) do Brasil. Sua principal missão é monitorar ameaças naturais em áreas de risco e emitir alertas antecipados para prevenir desastres

naturais, como enchentes, deslizamentos de terra e secas. Além do monitoramento, o CEMADEN realiza pesquisas e desenvolve tecnologias para melhorar seus sistemas de alerta, com o objetivo de reduzir o número de vítimas e os prejuízos materiais causados por desastres naturais. A medição da precipitação é feita através de pluviômetros digitais (pluviógrafo), os dados são registrados, em escala intradiária, a cada 30 minutos (Brasil 2024). O CEMADEN tem implementado gradualmente, desde 2011, uma rede de monitoramento de precipitação em escala sub-horária, composta atualmente por cerca de 3.500 pluviômetros automatizados distribuídos em todo o país (Meira *et al.*, 2022).

No Brasil, o último estudo nacionalmente conduzido e reconhecido sobre chuvas intensas data da década de 1980 (Souza *et al.*, 2020 apud. Pfafstetter, 1982), utilizando apenas 98 estações pluviométricas *in situ*, sendo ainda uma referência para a engenharia brasileira. Vale destacar que há uma significativa falta de conhecimento sobre as características das chuvas no território brasileiro. Uma provável causa dessa escassez é o fato de o país ter uma área muito extensa, o que dificulta a coleta de dados pluviométricos (Souza *et al.*, 2020). Contudo, em um país continental e em desenvolvimento como o Brasil, essas observações também são frequentemente limitadas em termos de densidade da rede e problemas de manutenção. Ademais, devido à alta variabilidade espaço-temporal dos eventos de precipitação, é necessária uma densa rede de monitoramento (Chen *et al.*, 2016).

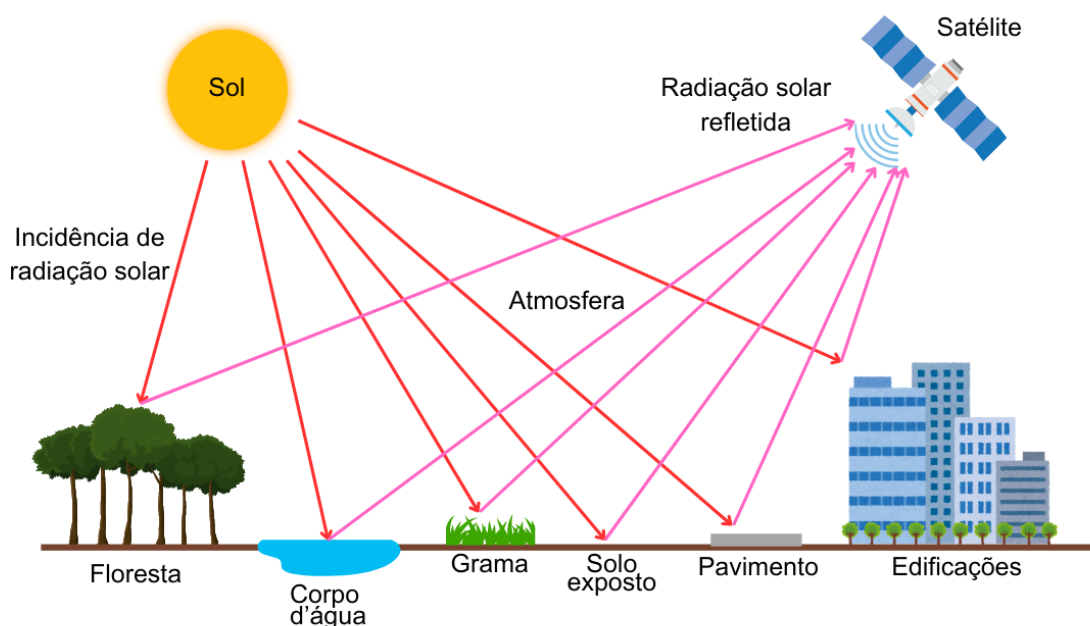
3.4.2 SENSORIAMENTO REMOTO ORBITAL

O sensoriamento remoto é uma ciência que permite obter informações sobre objetos ou áreas à distância, sem contato físico, por meio da detecção e medição da radiação eletromagnética (REM). Essa técnica se baseia na interação da REM com os materiais terrestres (alvo), como vegetação, solo exposto, edificações etc., capturando as diferentes respostas espectrais para gerar imagens e dados, através de sensores que captam comprimentos de ondas específicos (Machado e Quintanilha, 2008; Menezes e Almeida, 2012).

Os elementos fundamentais do sensoriamento remoto incluem a fonte de REM, geralmente o Sol, mas também a Terra para sensores termais e de micro-ondas passivos, e antenas de micro-ondas em sistemas de radar ativo. O alvo

refere-se ao objeto ou área da superfície terrestre a ser estudado, como vegetação, água, solo ou construções, cada um com características físico-químicas que influenciam a interação com a REM (Novo *et al.*, 2001). O sensor (i.e., fotográfico; eletro-óptico; LIDAR; e radar) é o instrumento que coleta e registra a REM refletida ou emitida pelo alvo, com diversos tipos de sensores que variam em resolução espacial, espectral e radiométrica (Machado e Quintanilha, 2008; Novo *et al.*, 2001). Após a coleta, os dados são processados e analisados para extrair informações relevantes, incluindo correção de distorções, realce de características, classificação de alvos e modelagem ambiental.

Figura 6. Representação da interação da radiação eletromagnética (REM) com os sensores orbitais.



Fonte: Autor (2024).

O sensoriamento remoto tem ampla aplicação em diversas áreas. No monitoramento ambiental, é utilizado para detectar desmatamento, incêndios florestais, poluição hídrica, erosão e outros impactos ambientais. No gerenciamento de recursos naturais, auxilia no mapeamento de áreas agrícolas, monitoramento de culturas, estimativa de produtividade, gestão florestal e de recursos hídricos. Em urbanismo e planejamento, é empregado no mapeamento de áreas urbanas, monitoramento do crescimento urbano, planejamento de infraestrutura e gestão de desastres. Na geologia, é utilizado para mapeamento geológico, exploração mineral

e monitoramento de desastres ambientais como terremotos e vulcões (Machado e Quintanilha, 2008; Menezes e Almeida, 2012).

3.4.3 PRODUTOS DE PRECIPITAÇÃO BASEADOS EM SATÉLITE

Os dados de precipitação obtidos por satélites oferecem diversas vantagens em relação a outros métodos, como ampla cobertura espacial, continuidade temporal, uniformidade e baixo custo de obtenção. Normalmente, esses dados são baseados na combinação de faixas espectrais de micro-ondas e infravermelho (Hong *et al.*, 2019). Alguns produtos de precipitação por sensoriamento remoto também utilizam medições de campo, como redes de pluviômetros, para aprimorar as estimativas (Kidd e Levizzani, 2011).

A avaliação de diferentes conjuntos de dados de precipitação tem sido um tema recorrente na literatura científica, com o objetivo de aprimorar a precisão e a utilidade desses dados para diversas aplicações hidrológicas e climáticas. Beck *et al.* (2019) conduziram uma análise abrangente de 26 conjuntos de dados de precipitação diários e subdiários nos Estados Unidos, utilizando a métrica de eficiência Kling-Gupta (KGE) para avaliar o desempenho desses conjuntos. Os autores destacaram que o MSWEP V2.2 apresentou o melhor desempenho entre os conjuntos de dados corrigidos por pluviômetros, sublinhando a importância das correções diárias e da consideração dos horários de relatório dos pluviômetros. Curiosamente, alguns conjuntos de dados não corrigidos, como o ERA5-HRES, superaram os corrigidos, refletindo avanços significativos na modelagem do sistema terrestre.

Complementando essa análise, Freitas *et al.* (2020) focaram no desempenho do produto IMERG *Final Run* versão 06B (V06B) na captura de eventos de precipitação subdiária no Brasil. A comparação entre as estimativas de satélite e os dados de 1757 pluviômetros subdiários revelou que o IMERG pode estimar corretamente a profundidade da precipitação subdiária, especialmente na região sul do país. No entanto, o produto apresentou grandes superestimativas e subestimativas para as propriedades de duração e intensidade da precipitação, respectivamente.

Ademais, Ramos Filho et al. (2022) avaliaram a qualidade de produtos de precipitação baseados em satélite para identificar eventos extremos de chuva e criar limiares de precipitação para alertas de inundação no estado de São Paulo, Brasil. A análise de oito produtos não corrigidos e seis corrigidos por pluviômetros mostrou que todos tendem a subestimar significativamente os eventos extremos de chuva, especialmente em escalas subdiárias. Os melhores resultados foram obtidos por produtos não corrigidos como PDIR-Now e GPM + SM2RAIN, considerando precipitação acumulada de 10 dias. Além disso, foram observadas subestimações significativas nos limiares de precipitação dos produtos baseados em satélite. Os melhores resultados foram alcançados pelo CHIRP V2.0 (sem correção) e pelo IMERG Final Run (corrigido), considerando uma margem de tolerância de 20%. Apesar das subestimações, os autores ressaltam que os produtos baseados em satélite podem ser uma fonte alternativa valiosa de dados em regiões com baixa densidade de pluviômetros.

Esses estudos, ao serem analisados em conjunto, evidenciam a complexidade e os desafios na avaliação e utilização de dados de precipitação. Enquanto Beck et al. (2019) destacam a importância das correções diárias e os avanços na modelagem, Freitas et al. (2020) e Ramos Filho et al. (2022) evidenciam as limitações e potencialidades dos produtos de precipitação baseados em satélite para diferentes contextos regionais e temporais.

Como vários conjuntos de dados de precipitação baseada em satélite estão disponíveis com diferenças marcantes, a avaliação desses dados é um aspecto fundamental para apoiar a escolha do produto de precipitação mais adequado para uma determinada pesquisa ou aplicação operacional (Cavalcante et al., 2020). No contexto de mudanças climáticas, avaliar e entender os eventos extremos de chuva é crucial por causa dos impactos socioeconômicos e ambientais que eles causam.

Os estudos de Cavalcante et al. (2020) e Palharini et al. (2021, 2022) convergem na análise da eficácia dos produtos de precipitação baseados em satélite para diferentes regiões do Brasil, destacando tanto suas potencialidades quanto suas limitações. Cavalcante et al. (2020) observaram que, embora o CHIRPS forneça estimativas mensais de precipitação semelhantes às obtidas por pluviômetros, ele tende a subestimar os valores durante os meses mais chuvosos e

para índices de precipitação extrema. Essa subestimação é particularmente evidente na Amazônia ocidental durante a estação chuvosa.

Palharini *et al.* (2021) complementam essa análise ao avaliar o desempenho de diferentes produtos de precipitação por satélite, como o GSMAP e o 3B42RT v7.0, em detectar chuvas extremas em várias regiões do Brasil. Eles identificaram que o GSMAP, ajustado com dados de pluviômetros, apresentou melhor desempenho nas regiões sul e norte, enquanto o 3B42RT v7.0 foi mais eficaz na região nordeste. No entanto, Palharini *et al.* (2022), ao avaliarem diferentes produtos de precipitação (i.e. CHIRP v2.0; PERSIANN-CDR; GSMAP-NRT; entre outros), destacam que apesar de os produtos de satélite identificarem eventos de chuva extrema, há uma tendência de superestimação na região sul e subestimação em outras regiões em outras regiões do Brasil, refletindo as limitações dos métodos de estimativa de precipitação por satélite.

Rodrigues *et al.* (2019) e Santos *et al.* (2022) reforçam essas observações ao avaliar a capacidade dos produtos TRMM 3B42 V7 e IMERG, respectivamente, em estimar eventos de precipitação extrema. Rodrigues *et al.* (2019) apontam que, na região Nordeste do Brasil, as estimativas diárias de precipitação do TRMM são estatisticamente semelhantes às observadas por pluviômetros, exceto na costa leste, onde há uma subestimação associada a nuvens quentes. Santos *et al.* (2022) observaram que a maioria dos índices de precipitação extrema (ETCCDMI) foram bem representados pelo IMERG, exceto o índice de intensidade de precipitação simples (SDII), devido à sua dependência do valor exato da precipitação diária.

Souza *et al.* (2020) e Xavier *et al.* (2020) ampliam a discussão ao investigar a frequência e as tendências de eventos de chuva extrema em bacias hidrográficas específicas. Souza *et al.* (2020) analisaram a bacia do rio Madeira e observaram variações significativas na precipitação máxima diária, influenciadas pelo fenômeno El Niño/La Niña. Xavier *et al.* (2020) avaliaram diferentes produtos de precipitação na bacia do rio Mearim, concluindo que o CHIRPS e o PERSIANN-CDR são os mais adequados para estimar a precipitação diária média mensal, enquanto o PERSIANN-CDR é o melhor para extremos diários em escala mensal.

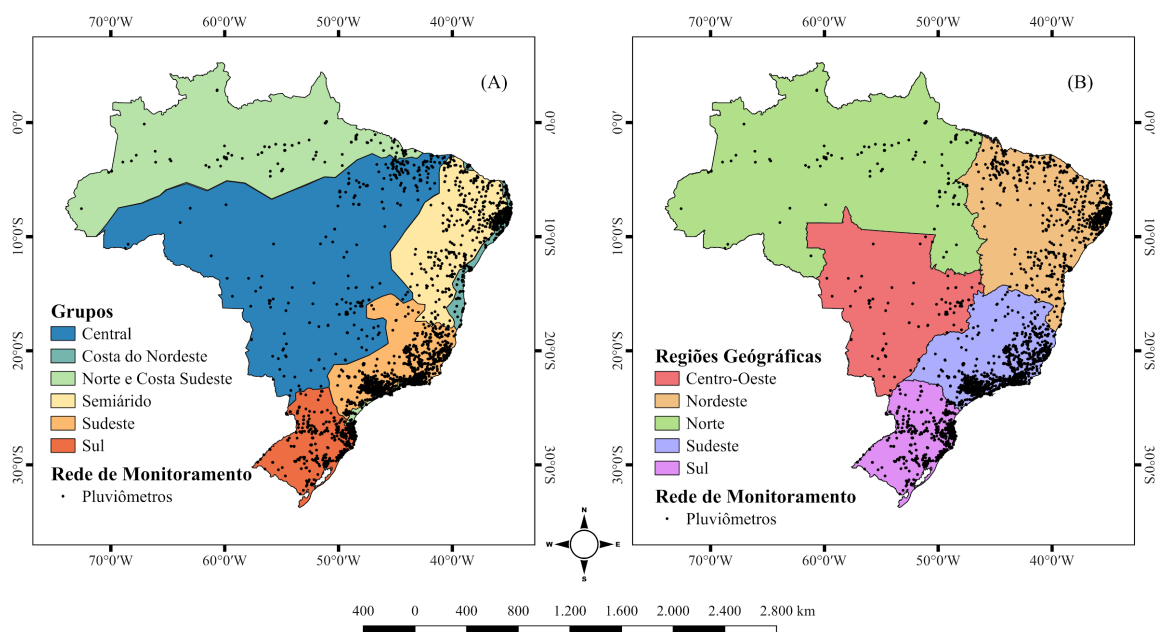
No geral, os estudos convergem ao destacar as limitações e potencialidades dos produtos de precipitação por satélite, evidenciando assim a necessidade de ajustes relacionados às características regionais, bem como a importância de considerar as propriedades climáticas específicas de cada região para melhorar a precisão das estimativas de precipitação extrema. Seguindo esta mesma premissa este estudo se concentra em analisar o desempenho do produto de precipitação IMERG *Final Run* V07 na detecção de eventos extremos de chuva.

4. METODOLOGIA

4.1. ÁREA DE ESTUDO

Esse estudo compreende a extensão territorial de todo o Brasil (Fig. 1), englobando uma área de aproximadamente 8,5 milhões de km², posicionada entre os paralelos 05,267°N e 33,750°S e os meridianos de 34,783° e 73,983°O. O Brasil está dividido em cinco regiões geográficas (Norte, Nordeste, Centro-Oeste, Sudeste e Sul), das quais possuem diversidade de cobertura vegetal e climática. O país possui três variações climáticas, seguindo a classificação de Köppen: Tropical (A), Semiárido (B) e Subtropical Úmida (C), além de suas subdivisões. A temperatura média anual do ar varia de < 10 °C a > 26 °C.

Figura 8. Mapa de localização dos postos pluviométricos do CEMADEN por A) grupos de características pluviométricas homogêneas e por B) regiões geográficas.



Fonte: Autor, 2024.

A precipitação média anual no Brasil varia de 387 mm a mais de 3.000 mm. Além disso, a distribuição média mensal da precipitação também apresenta variações significativas (ALVARES *et al.*, 2013). De acordo com Freitas (2019) e Reboita *et al.* (2010), o Brasil apresenta uma grande variedade de regimes pluviométricos, que podem variar até mesmo dentro de um mesmo estado da Federação. Essa diversidade é resultado da extensão territorial do país, das diferentes formas de relevo e, conseqüentemente, da atuação de vários sistemas atmosféricos (Lemos, 2022).

4.1.1. GRUPOS HOMOGÊNEOS DE PRECIPITAÇÃO

Levando em consideração a alta variabilidade de regimes pluviométricos e visando facilitar a compreensão dos dados analisados, a área de estudo foi dividida em grupos que possuem características pluviométricas homogêneas, seguindo a metodologia apresentada por Lemos (2022), denominados: Norte e costa sudeste, Central, Sul, Sudeste, Costa do Nordeste e Semiárido (Fig. 1A). Segundo o autor, as características dos grupos são descritas como:

Central (CEN): estende-se da região central do Brasil até parte do sul da Amazônia, sendo o grupo com a maior área. A precipitação média anual nesta região é de cerca de 1.500 mm, com um número de eventos de chuva variando de 50 (para eventos com duração mínima de 1440 minutos) a 145 (para eventos com duração mínima de 30 minutos). A principal característica deste grupo é a intensidade das chuvas, que é sempre maior do que nas outras regiões definidas. O volume médio por evento é elevado para eventos de curta duração. A duração dos eventos de chuva nesta região é curta em comparação com outros grupos, e o tempo seco, ou período sem chuva durante a ocorrência do evento, também é baixo. As chuvas nesta região são concentradas em um curto período do ano.

Costa do Nordeste (CNE): inclui a extensão do litoral leste da região Nordeste do Brasil e a área ao redor da cidade de Fortaleza - CE, com uma precipitação média anual de cerca de 1.500 mm. Este grupo é caracterizado principalmente pelo grande número de eventos de chuva de curta duração e baixa intensidade, resultado principalmente da brisa marítima. Em termos de duração, devido ao elevado tempo seco entre os eventos, indicando que a chuva é muito fragmentada, é possível observar dois cenários: 1) para eventos de curta duração, as durações dos eventos

são pequenas; e 2) para eventos de longa duração, os pequenos intervalos entre os eventos não são suficientes para separá-los em eventos distintos, deixando a duração total do evento muito elevada.

Norte e a Costa Sudeste (CNSE): são as regiões mais úmidas do país. A precipitação média anual nessas áreas é de 2.000 mm, podendo ultrapassar 3.000 mm em alguns locais. Os eventos de chuva são frequentes e duradouros, com intensidade moderada em comparação com outros grupos. O tempo seco é maior que a duração total do evento para eventos de curta duração, indicando que as chuvas normalmente não são contínuas. No entanto, para eventos de longa duração, o tempo seco é menor que a duração, indicando maior continuidade da chuva. Embora as características das chuvas nas duas regiões sejam semelhantes, os mecanismos de formação são diferentes. Isso significa que as chuvas nessas áreas são semelhantes em termos de quantidade e duração, mas elas são causadas por diferentes fenômenos meteorológicos.

Semiárido (SM): inclui o interior do Nordeste e se estende até o norte de Minas Gerais, sendo a região mais seca do Brasil, com uma precipitação média anual de cerca de 630 mm. Essa região também tem o menor número de eventos de chuva anuais e a menor média de lâmina d'água por evento chuvoso. Considerando eventos de longa duração, a duração das chuvas nesta região também é a menor entre os grupos estudados. Devido ao fato de que o período chuvoso é concentrado em um curto intervalo de tempo, a intensidade das chuvas é consequentemente elevada, sendo a segunda maior intensidade entre os grupos e, como consequência, um dos menores tempos secos, resultado das chuvas concentradas.

Sudeste (SE): inclui partes dos estados de Minas Gerais, São Paulo, Rio de Janeiro e Paraná, com precipitação média anual de 1.300 mm. O número de eventos de chuva varia de 48 (para eventos com duração mínima de 24 horas) a 140 (para eventos com duração mínima de 30 minutos), sendo superior apenas ao Semiárido. As chuvas nesta região tendem a ter uma duração mais longa e uma intensidade mediana. O tempo seco entre os eventos não é elevado, indicando que os eventos de chuva tendem a ser relativamente contínuos.

Sul (S): caracterizada por uma precipitação anual de cerca de 1.700 mm, distribuída em eventos de chuva longos e com grande volume de água. A

intensidade das chuvas nessa região é geralmente baixa em comparação com outros grupos. Para eventos de longa duração (i.e., duração superior a 720 minutos), a relação entre a duração e o tempo seco indica que as chuvas são mais contínuas e de intensidade moderada em relação aos demais grupos.

4.2. FONTE DE DADOS DE PRECIPITAÇÃO

4.2.1. DADOS OBSERVADOS (PLUVIÔMETROS)

Os dados de campo foram obtidos utilizando uma rede de postos pluviométricos do CEMADEN, cuja instalação e operação iniciou em 2013. Atualmente, a rede do CEMADEN é composta por mais de três mil pluviômetros, que registram a precipitação em escala sub-horária, a cada 10 minutos, durante sua ocorrência, e em escala horária, a cada 60 minutos, quando não há precipitação. Neste caso, é registrado o valor 0 (zero) no banco de dados (Lemos, 2022). Esses pluviômetros estão distribuídos por todo território nacional (Fig. 8), mas essa distribuição é bastante desigual, com a maior parte concentrada ao longo do litoral brasileiro (Freitas *et al.*, 2020).

No entanto, a alta disponibilidade de estações pluviométricas nem sempre está correlacionada com a quantidade e qualidade dos dados, pois algumas destas estações podem exibir inconsistências ou falta de registros devido às falhas. Portanto, a detecção e remoção de estações consideradas "ruins" é um aspecto crucial. Assim, foram utilizados neste estudo dados de pluviômetros que passaram por um controle de qualidade, de modo a detectar possíveis inconsistências pluviométricas e selecionar dados de alta qualidade. O controle de qualidade dos dados de precipitação, em escala sub-horária, foi feito com base em aplicação de análise visual e procedimentos automáticos, denominado *Automatic quality control procedures* (A-QCP), os mesmos realizados nos estudos de Freitas *et al.* (2020), Meira *et al.* (2022) e Ramos Filho *et al.* (2022). Esse controle consiste em duas etapas principais, são elas: 1) Testes de único pluviômetro - cada série temporal anual do pluviômetro é examinada independentemente, passando por procedimentos para avaliar possíveis falhas do equipamento por meio de diversos testes (i.e., longos períodos sem chuva, longos períodos com dados ausentes), com o intuito de reduzir os erros.; 2) Testes de múltiplos pluviômetros - realiza-se uma análise de vizinhos mais próximos por meio da detecção de outliers espaciais

usando o Índice Local de Moran. Os pluviômetros identificados como outliers espaciais são classificados como de baixa qualidade (Meira *et al.*, 2022).

Foram avaliados nove anos disponíveis de dados (2014 a 2022), contabilizando, para este período, 3.119 postos pluviométricos de alta qualidade estudados. Vale ressaltar que a quantidade de postos de alta qualidade disponíveis para o estudo varia em cada grupo, por ano, como visto na Tabela 1.

Tabela 1. Distribuição do número de postos pluviométricos de alta qualidade disponíveis por ano para cada grupo homogêneo de precipitação.

Grupo	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Central (CEN)	0	14	150	95	112	84	126	167	156
Costa Nordeste (CNE)	32	101	116	149	173	152	158	165	134
Norte-Costa Sudeste (NCSE)	73	70	114	143	168	129	133	132	126
Semiárido (SM)	16	43	64	67	262	158	137	102	103
Sudeste (SE)	221	393	520	452	446	472	504	521	557
Sul (S)	26	100	215	187	269	221	273	263	210
Total	368	721	1179	1093	1430	1216	1331	1350	1286

Fonte: Autor 2024.

4.2.2. DADOS ESTIMADOS (SATÉLITE)

A escolha do produto IMERG Final Run V07 (IMERG-F07) se deu por a nova versão apontar melhorias com relação à sua versão anterior. Os dados de precipitação diária foram obtidos através da plataforma *GES DISC* (<https://disc.gsfc.nasa.gov/>), da Agência Nacional Espacial Americana (NASA), em formato nc4, para a extensão territorial do Brasil. Para este estudo foi utilizada a faixa dos produtos intitulada “*Precipitation*”.

O IMERG (Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM) é um algoritmo desenvolvido pela NASA como parte da missão GPM (Global Precipitation Measurement). O IMERG combina informações de diversos satélites, nas faixas de micro-ondas e infravermelho, e estações meteorológicas para gerar estimativas globais de precipitação com alta resolução espacial (11 metros) e temporal, tendo dados de precipitação disponíveis no período de 2000 aos dias atuais. O IMERG oferece três fases distintas para suas estimativas de precipitação: *Early Run*, *Late Run* e *Final Run*. Cada fase é caracterizada por sua latência (30 minutos a 3,5 meses), conjuntos de dados de entrada e metodologias de processamento (Huffman

et al., 2024). Para este estudo, foram utilizados estudos da fase *Final Run* do IMERG (IMERG-F07), que possui latência de cerca de 3,5 meses após o mês de observação, além disso incorpora dados de pluviômetros mensais para proporcionar uma estimativa mais precisa.

A quantidade de pixels utilizados na análise varia de acordo com a quantidade de pluviômetros com dados de alta qualidade disponíveis para cada ano do período de estudo. Essa distribuição é apresentada na tabela 2.

Tabela 2. Distribuição da quantidade de pixel do IMERG-F07 no período de estudo.

Pluviômetro por Pixel	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	(2014 - 2022)
	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	NP	Média NP
1	107	285	609	555	866	752	817	836	793	624,4
2	50	96	109	121	143	128	121	119	120	111,9
3	23	34	56	44	47	25	45	36	34	38,2
4	10	11	22	13	17	16	16	18	11	14,9
5	1	11	5	9	6	6	7	9	11	7,2
6	1	6	7	5	3	5	4	2	2	3,9
7	1	1	3	3	2	1	2	4	4	2,3
8	2	0	1	2	2	1	1	3	1	1,4
9	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0,1
10	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0,2
11	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0,1
12	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1
13	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0,1
Total	197	445	813	753	1086	934	1013	1027	977	805,0

Fonte: Autor, 2024. NP: número de pixels.

4.3. PROCESSAMENTO DOS DADOS

4.3.1 DETERMINAÇÃO DOS EVENTOS EXTREMOS DE CHUVA

A determinação do limiar dos eventos extremos de chuva se deu a partir da análise dos percentis para série de dados disponível para cada pluviômetro. É importante destacar que a quantidade de estações pluviométricas de alta qualidade varia conforme o ano e o grupo de precipitação homogênea, por isso o tamanho da série de dados diários de precipitação de alta qualidade também varia para cada .

A metodologia de análise de percentis é uma técnica estatística usada para entender a distribuição de um conjunto de dados. Essa metodologia envolve classificar os dados de precipitação em ordem crescente e identificar o valor correspondente a um percentil específico da distribuição. Entretanto, antes de obter o valor correspondente é necessário identificar qual posição do conjunto de dados ele ocupa. A posição equivalente a um determinado percentil pode ser obtida através da equação 2, onde p é o valor do percentil desejado.

$$Posição = \frac{p}{100} (n + 1) \quad (\text{Equação 2})$$

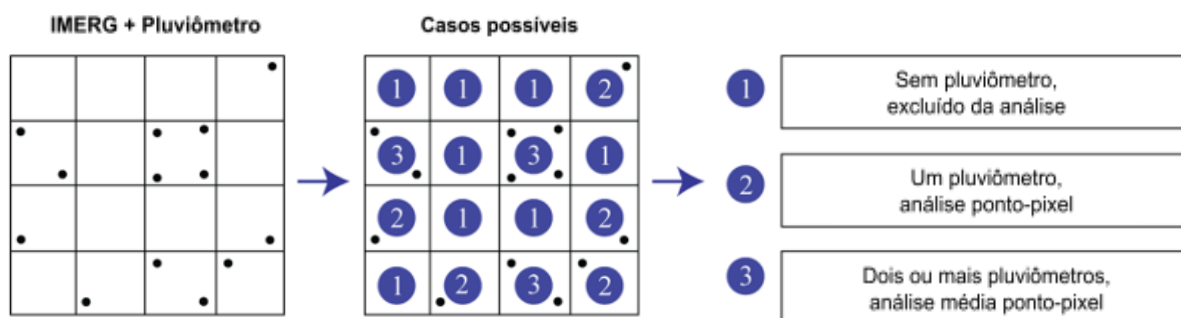
Geralmente, considera-se um total diário de precipitação que exceda o percentil de 90% da série histórica de uma região específica como evento extremo de chuva (Rodrigues *et al.*, 2018; Simões *et al.*, 2021; Lima e Armond, 2022). Por exemplo, os percentis 95 e 99 são frequentemente usados para definir chuvas extremas (e.g., Rodrigues *et al.*, 2018; Palharini *et al.*, 2021, 2022, respectivamente). Para este estudo, a exemplo de Palharini *et al.* (2021, 2022), foi escolhido o percentil 99.

Os limites de precipitação extrema foram estabelecidos para as séries históricas de cada pluviômetro de alta qualidade incluído na base de dados deste estudo. Esses limites foram calculados utilizando o módulo “*percentile*” da biblioteca Numpy, com o objetivo de otimizar o processo devido ao grande volume de dados.

4.3.2 MÉTODO DE COMPARAÇÃO E VALIDAÇÃO

A comparação entre os dados do IMERG Final Run V07 e dos pluviômetros do CEMADEN foi feita utilizando uma abordagem em pares. Quando havia apenas um pluviômetro disponível dentro do pixel do IMERG-F07, foi realizada uma análise ponto-pixel, que consiste em comparar o valor do pixel diretamente com o valor registrado no pluviômetro. No entanto, para pixels da grade do IMERG-F07 que continham mais de um pluviômetro, foi considerado o valor da média ponto-pixel, ou seja, foi realizada a média dos dados diários de chuva dos pluviômetros e posteriormente realizada a comparação da média com o valor do pixel. Os pixels que não tinham nenhum pluviômetro dentro foram excluídos das análises (Freitas *et al.*, 2020).

Figura 9. Representação metodológica mostrando os pixels do produto IMERG considerados no estudo.



Fonte: adaptado de Freitas *et al.* (2020).

A performance foi avaliada com base em seis métricas estatísticas (Quadro 2), que caracterizam a semelhança entre os dados de campo e os dados de satélite. O coeficiente de determinação (R^2) representa a qualidade da tendência linear entre os dados observados e simulados, variando de 0 a 1; valores altos indicam melhor desempenho do modelo. O coeficiente de correlação de concordância (pc) é uma medida que avalia o quão bem os dados bivariados se enquadram na linha 1:1. pc mede tanto a precisão quanto a exatidão, variando de -1 a 1 semelhante ao coeficiente de correlação de Pearson, com perfeito acordo positivo em 1 (Lin, 1989; Akoglu, 2018). O coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) indica a precisão da saída do modelo em comparação com a média dos dados referidos, sendo $NSE = 1$ é o valor ótimo (Nash e Sutcliffe, 1970).

O Erro relativo absoluto médio (MRAE) é uma métrica utilizada para avaliar a precisão de modelos de previsão. Ele mede a média da diferença relativa absoluta entre os valores previstos pelo modelo e os valores observados. Em geral, quanto menor o MRAE, melhor é o desempenho do modelo, pois isso indica que as previsões estão mais próximas dos valores observados. O viés percentual (PBIAS) mede a diferença relativa média entre os valores observados e estimados, com um valor ótimo de 0 (Gupta *et al.*, 1999). O erro quadrático médio (RMSE) é comumente utilizado para expressar a precisão dos resultados, com a vantagem de apresentar valores de erro nas mesmas unidades da variável analisada; valores ótimos são próximos de zero (Hallak e Pereira Filho, 2011).

Para a aplicação das métricas estatísticas de desempenho, foram levados em consideração os dados diários de precipitação extrema para cada grupo durante o

período de estudo (2014-2022). As métricas foram calculadas para os pluviômetros inseridos em cada região e, posteriormente, foi realizada a média dos valores obtidos para a região. Isso permitiu analisar a variabilidade espacial dos produtos analisados.

Quadro 2 - Métricas de performance para avaliação das estimativas do IMERG-F07.

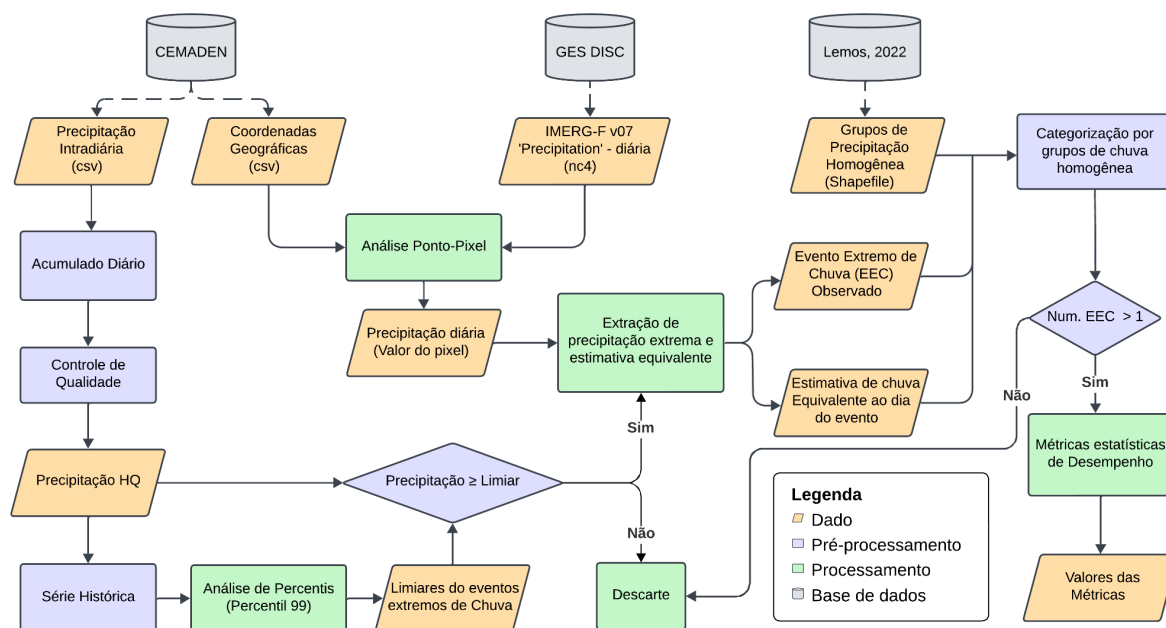
Métrica	Equação	Intervalo (Valor ótimo)
Coefficiente de determinação (R^2)	$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})(E_i - \bar{E})^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2 \sum_{i=1}^N (E_i - \bar{E})^2}$	[0, 1] (1)
Coefficiente de correlação de concordância (ρ_c)	$\rho_c = \frac{2 \sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})(E_i - \bar{E})}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2 + \sum_{i=1}^N (E_i - \bar{E})^2 + (N-1)(O_i - E_i)^2}$	[-1, 1] (1)
Coefficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE)	$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (E_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}$	$(-\infty, 1]$ (1)
Erro relativo absoluto médio (MRAE)	$MRAE = \frac{100}{N} \left \frac{E_i - O_i}{O_i} \right $	$[0, \infty)$ (0)
Viés Percentual (PBIAS)	$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^N (E_i - O_i) \cdot 100}{\sum_{i=1}^N (O_i)}$	$(-\infty, +\infty)$ (0)
Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE)	$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (E_i - O_i)^2}{N}}$	$[0, +\infty)$ (0)

Fonte: Autor, 2024. N - tamanho amostral; O - valor observado; E - valor estimado; $\bar{O}$ - média observada; $\bar{E}$ - média estimada.

4.4. VISÃO GERAL

A metodologia proposta neste estudo se deu em duas etapas (Figura 7). A primeira etapa se refere a determinação dos limiares de precipitação extrema a partir da série de dados de precipitação de 3.119 pluviômetros pertencentes à rede de monitoramento do CEMADEN, disponíveis para o período de 2014 a 2022. Para isso, definiu-se como método a análise de percentis, que consiste em encontrar o valor correspondente a um determinado percentil nos dados avaliados. Para este estudo, optou-se por utilizar o percentil 99, como sugere Palharini *et al.* (2021, 2022).

Figura 7. Diagrama de aplicação da metodologia proposta.



Fonte: Autor (2024)

A segunda etapa consistiu na aplicação de métricas estatísticas para avaliar o desempenho das estimativas de precipitação do IMERG-F07. Nessa etapa, foram utilizados os valores de precipitação registrados *in situ*, que superam ou são iguais ao limiar, estimados através da análise de percentil, para cada pluviômetro (aqui definidos como eventos de chuva extrema) e as estimativas do IMERG equivalente ao dia de ocorrência das chuvas extremas. Seis métricas foram utilizadas no processo, são elas: Coeficiente de determinação (R^2); Coeficiente de correlação de concordância (ρ_c); Coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE); Erro relativo absoluto médio (MRAE); Viés Percentual (PBIAS); e Raiz do Erro Quadrático Médio (RMSE).

É importante destacar que foram realizados alguns tratamentos nos dados durante o decorrer da aplicação da metodologia. Foi realizado o controle de qualidade, definindo quais são os pluviômetros que contém inconsistências e/ou falha nos dados e eliminando-os da análise, em cada ano do período de estudo.

Para realizar a análise de percentis, foi necessário organizar a série de dados de precipitação de cada um dos postos pluviométricos e, posteriormente, ordená-los em ordem crescente. Um filtro foi aplicado em cada série, onde os valores de chuva abaixo do limiar encontrado para o pluviômetro foram descartados. Outro filtro foi

aplicado nos dados de eventos de chuva extrema para verificar a quantidade de eventos presentes na série. Só prosseguiram na análise aqueles pluviômetros que registraram duas ou mais ocorrência de chuva extrema, isso porque algumas métricas necessitam de pelo menos dois pares de dados para serem aplicadas (i.e., R2, NSE). Os dados de chuva referentes a eventos extremos de precipitação foram categorizados de acordo com os grupos homogêneos de precipitação ao qual o pluviômetro está inserido em seu perímetro.

As etapas que incluem a organização e tabulação dos dados, determinação dos eventos de chuva, aplicação das métricas estatísticas e representação gráfica dos dados foram realizadas através de rotinas de computador escritas com linguagem de programação *Python 3.10.12*, executadas no ambiente de notebook Jupyter, na plataforma Google Colab (<https://colab.research.google.com/>). Para o processamento dos dados, foram utilizadas as bibliotecas *Pandas 2.2.2* e *NumPy 1.26.0*, enquanto a biblioteca *Matplotlib 3.9.2* foi utilizada para a representação gráfica dos dados. A produção de mapas foi realizada através do Sistema de Informação Geográfica (SIG) *Qgis 3.34.7 'Prizren'*.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

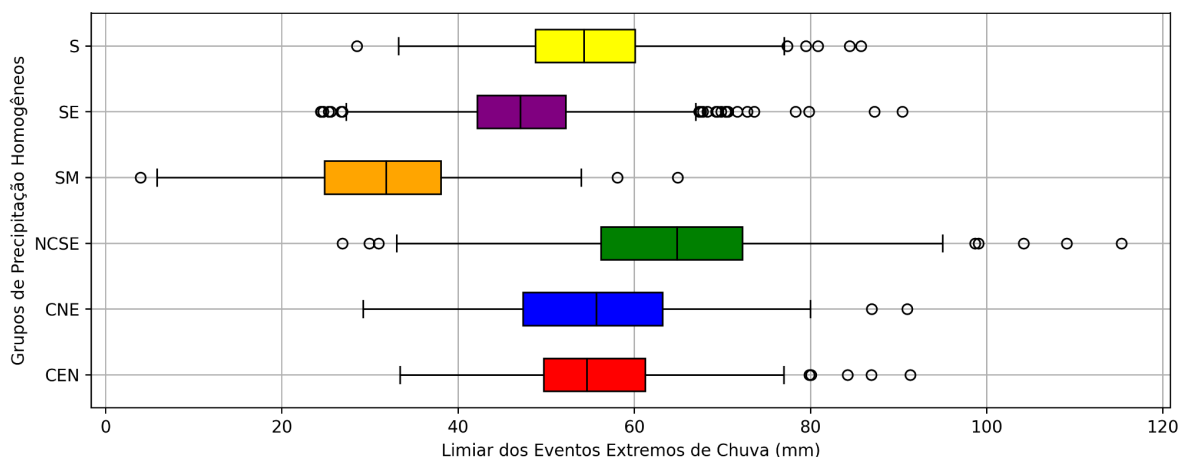
5.1 ESTIMATIVA DO LIMIAR DOS EVENTOS EXTREMOS DE CHUVA

A estimativa dos limiares para eventos extremos de chuva foi realizada por meio da análise do percentil 99 dos dados diários de precipitação de 3.119 estações pluviométricas classificadas como de alta qualidade. É importante destacar que a qualidade de um posto pluviométrico pode variar ao longo do tempo, o que implica em diferentes extensões das séries históricas disponíveis para cada estação. Essa variabilidade temporal na qualidade dos dados foi considerada na análise.

A análise da distribuição dos eventos extremos de chuva revelou diferentes padrões para os grupos estudados (Figura 10). O grupo SM apresentou a menor mediana, indicando que, em geral, os eventos extremos de chuva nessa região são menos intensos. Em contrapartida, o grupo NCSE se destacou com a maior mediana, com grande amplitude interquartílica, sugerindo eventos extremos de chuva mais intensos e mais variáveis. Os grupos CNE, CEN, SE e S apresentaram

medianas intermediárias, com o grupo CNE mostrando maior variabilidade entre eles, indicando a ocorrência de eventos extremos de alta intensidade neste grupo.

Figura 10. Distribuição dos limiares de chuva extrema por grupo de precipitação homogênea.



Fonte: Autor (2024). CEN - Central; CNE - Costa Nordeste; NCSE - Norte e Costa Sudeste; SM - Semiárido; S - Sul.

Vale ressaltar que a presença de outliers em vários grupos indica que há eventos de chuva extrema que são significativamente diferentes da maioria dos dados, sendo o grupo SE o que mais apresentou outliers. A distribuição dos limiares obtidos após a análise dos percentis, no que diz respeito à média pluviométrica dos eventos, pode ser observada na Tabela 3.

Para o período de estudo de 2014 a 2022, considerando o tamanho da série de dados de precipitação disponível de cada pluviômetro, foram registrados mais de 36 mil eventos extremos de chuva para todo o país. O grupo SE possui o maior número de precipitações extremas registradas (14.517), enquanto o grupo CEN possui o menor número de registros (3.356). Esses valores refletem a densidade da rede de monitoramento para cada região, sendo a região englobada pelo grupo SE a que mais possui postos pluviométricos de alta qualidade para o período, enquanto o grupo CEN possui a menor quantidade, conforme apresentado na Tabela 1.

No que diz respeito às médias pluviométricas destes eventos, o grupo NCSE apresenta a maior média (64,68 mm), indicando que, em média, os valores desse grupo são mais altos comparados aos outros grupos. O grupo SM tem a menor média (31,43 mm). O grupo NCSE também tem o maior desvio padrão (13,80 mm),

sugerindo maior variabilidade nos dados desse grupo. Já o grupo SE tem o menor desvio padrão (8,16 mm), indicando menor variabilidade. Esses resultados estão em conformidade com os padrões de pluviosidade regional descritos por Lemos (2022), que apontam para maiores valores de precipitação no grupo NCSE e menores no grupo SM.

Tabela 3. Distribuição do número (N) de registros de eventos extremos, chuva média precipitada e desvio padrão por grupo de precipitação homogênea.

Grupos	N Registros	Média (mm)	Desv. padrão (mm)
CEN	3356	55.85	9.35
CNE	4246	55.16	10.73
NCSE	3945	64.68	13.80
SM	3530	31.43	9.61
SE	14517	47.18	8.16
S	6560	54.77	8.48
Total	36154		

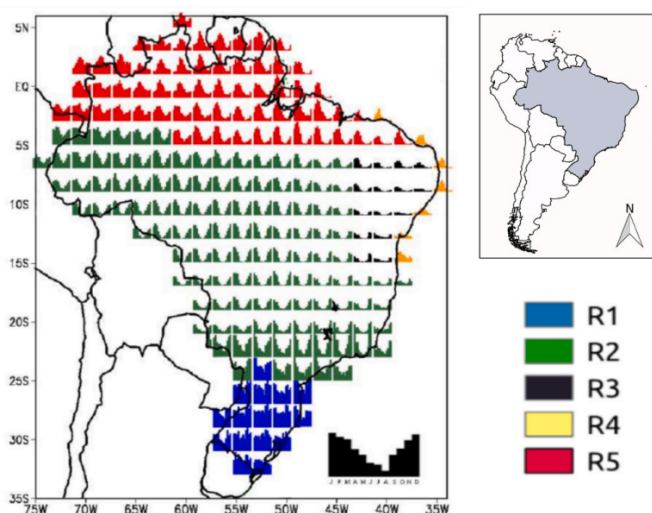
Fonte: Autor (2024)

Palharini *et al.* (2021) reportou um padrão similar na determinação dos limiares de eventos extremos utilizando a análise de percentis. Em seu trabalho, os autores dividiram o território do Brasil em grupos homogêneos de precipitação seguindo a metodologia proposta por Rozante *et al.* (2018) (Figura 11). A pesquisa revelou que cada região apresentou uma faixa única de valores máximos de precipitação, sendo elas: R1 = 100 mm/dia; R2 = 85 mm/dia; R3 = 70 mm/dia; R4 = 50 mm/dia; e R5 = 100 mm/dia.

Vale ressaltar que as regiões (grupos) de precipitações homogêneas definidas no escopo desta pesquisa diferem das utilizadas por Palharini *et al.* (2021). Entretanto, em termos de comparação, os valores obtidos neste estudo estão significativamente abaixo, com exceção da região referente à costa do nordeste, i.e., R4 no estudo de Palharini *et al.* (2021) e CEN neste estudo. Esta diferença pode ser atribuída ao fato de que os autores interpolaram os dados para uma grade regular de 1° x 1° utilizando a média simples, isso foi feito visando garantir consistência nas resoluções espacial e temporal para comparações com os dados de satélite. Outro fator relevante pode estar na alta variabilidade dos tamanhos das séries de dados de precipitação analisadas neste estudo. Palharini *et al.* (2021) utilizaram dados de

chuva provenientes do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), para os anos de 2012 a 2016. Como o INPE coleta informações de diversas agências, como o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), a Agência Nacional de Águas (ANA), a Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), o Instituto Agrônômico (IAC), o Sistema Meteorológico do Paraná (SIMEPAR), entre outras (Palharini *et al.*, 2021 apud Costa *et al.*, 2017), os dados utilizados podem representar melhor os regimes de chuva em microescala, afinal uma rede de monitoramento mais densa captura a variabilidade espacial da precipitação com mais precisão (Santos *et al.*, 2022).

Figura 11. grupos homogêneos de precipitação segundo Rozante *et al.* (2018).

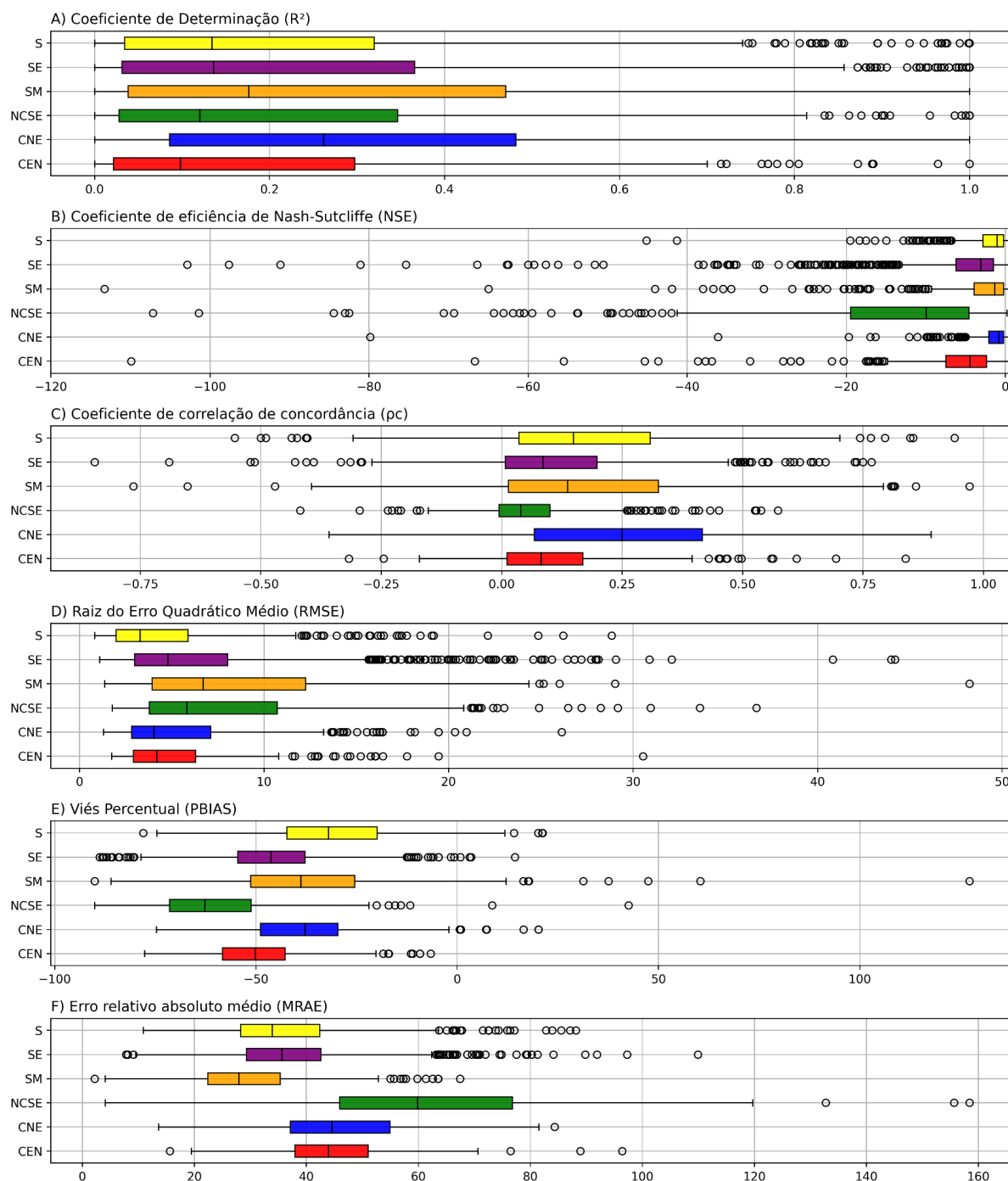


Fonte: Adaptado de Palharini *et al.* (2021) apud. Rozante *et al.* (2018).

5.2 ANÁLISE DO DESEMPENHO DAS ESTIMATIVAS DO IMERG-F07

A aplicação das métricas estatísticas foi feita com base nos dados diários de chuva extrema (chuva registrada acima do limiar de eventos extremos definidos anteriormente) observados por 3.100 pluviômetros da rede do CEMADEN e das estimativas apresentadas pelo IMERG-F07 para o respectivo dia. A retirada de 19 postos pluviométricos da análise foi motivada pela quantidade de eventos extremos registrados na série de dados de precipitação desses pluviômetros ser igual a 1. Este ajuste na quantidade de pluviômetros analisados foi necessária pois algumas métricas (i.e., R2, NSE) necessitam de ao menos dois pares de pontos disponíveis para a aplicação. Os resultados obtidos estão apresentados na Figura 12.

Figura 12. Distribuição dos valores das métricas estatísticas por grupo de precipitação homogênea.



Fonte: Autor 2024.

No que diz respeito ao desempenho do IMERG-F07, constata-se, na Figura 12A, que nenhum dos grupos analisados apresentaram valores razoáveis de R^2 , sugerindo que o IMERG-F07 não consegue capturar uma boa parte da variabilidade da precipitação nesta região. Para as regiões CEN, NCSE e SM, os valores obtidos foram mais variáveis, indicando que o produto pode não ser tão eficaz ao explicar a

variabilidade dos eventos de precipitação extrema nessas áreas, especialmente durante eventos extremos. Observa-se também que os grupos CNE e SM não apresentam outliers, isso significa que todos os pontos de dados estão relativamente próximos uns dos outros e seguem um padrão consistente, proporcionando maior confiabilidade nas análises.

Nos resultados obtidos na métrica NSE (Figura 12B), o grupo CNE apresentou o melhor desempenho, quando comparado aos outros grupos, obtendo valores próximos de 0. As demais regiões apresentaram resultados mais heterogêneos, indicando que o IMERG-F07 pode superestimar ou subestimar a precipitação a depender da localidade dentro do grupo de precipitação homogênea. Vale destacar que todos os grupos apresentaram muitos valores discrepantes dos conjuntos de dados principais (outliers), o que indica que o IMERG-F07 está apresentando desvios significativos em relação às observações em diversos pontos de dados. Desta forma, para que fosse possível representar os resultados, foi fixado um intervalo no eixo (-120 a 1), de modo que a análise da métrica foi possível.

O pc (Figura 12C) apresentou resultados razoavelmente positivos, indicando que, de modo geral, o IMERG-F07 consegue capturar a tendência da precipitação extrema observada. No entanto, os valores variaram bastante entre os grupos, com melhores resultados observados nas regiões S e CNE. Destaca-se o grupo CNE, onde o conjunto de valores apresentados são mais homogêneos (ausência de outliers), que apresentou valores de pc relativamente altos em comparação com outras regiões, indicando que nessa região o produto pode ser mais confiável para estimar eventos extremos de chuva.

No que diz respeito ao RMSE (Figura 12D), foram apresentados valores mais elevados nos Grupos CEN, NCSE e SM, indicando que o modelo tende a cometer erros maiores nessas regiões. Em contrapartida, nas regiões CNE, SE e S, os valores RMSE foram menores, o que sugere um melhor desempenho do IMERG-F07, ou seja, as estimativas do produto se ajustam melhor aos dados observados nestas regiões. É importante ressaltar a presença de outliers em todos os grupos. Esses valores de RMSE indicam que as estimativas do IMERG-F07 foram maiores do que o esperado para a maioria dos eventos extremos observados.

Através da métrica PBIAS (Figura 12E), foi avaliado a tendência (viés) que o IMERG-F07 tem de superestimar ou subestimar os valores observados de precipitação extrema. O PBIAS apresentou valores variados entre os grupos analisados, indicando que o IMERG-F07 pode tanto superestimar quanto subestimar a precipitação, dependendo da região e do período analisado. Entretanto, de modo geral, todos os grupos apresentaram tendência de subestimar a precipitação observada, sendo o grupo NCSE aquele que apresentou maior tendência de subestimativa, enquanto o grupo S apresentou o menor viés.

Por fim, o MRAE (Figura 12F) apresentou resultados semelhantes ao RMSE, no que diz respeito aos grupos CEN e NCSE, com valores de erro relativo mais elevados, indicando que o IMERG-F07 apresentou maior dificuldade em estimar a precipitação extrema observada. Em incremento, o grupo CNE também apresentou o mesmo comportamento. Os menores valores de MRAE, foram observados no grupo SM.

De acordo com a análise das métricas estatísticas realizadas neste estudo, o IMERG Final Run V07, de modo geral, não teve bom desempenho ao estimar eventos extremos de chuva em nenhum dos grupos homogêneos de precipitação analisados. Entretanto, é importante destacar que o CNE apresentou os melhores resultados, com relação aos outros grupos, na maioria das métricas (i.e., R², NSE e pc). Resultados como este, em que os produtos de precipitação baseado em satélite apresentam bons ou ruins desempenho dependem de diversos fatores (i.e., região, sistemas meteorológicos e a escala temporal), são comumente reportados na literatura científica.

Um ponto importante destacado por Palharini *et al.* (2021) é que os produtos de precipitação baseados em satélite foram inicialmente concebidos para monitorar uma ampla gama de precipitação global, sem considerar as características de cada região. Como consequência, seu desempenho na estimativa de eventos extremos pode ser inconsistente. Por exemplo, Palharini *et al.* (2022) observaram que na região sul do Brasil, os produtos de satélite tendem a superestimar a precipitação extrema, enquanto em outras regiões, a subestimação é comumente observada. Esse comportamento dos produtos de precipitação com base em dados de SR evidencia a necessidade de que os algoritmos dos produtos de precipitação sejam

ajustados para as características específicas de cada região, como, por exemplo, o COSCH (Combined Scheme Approach), por exemplo, que foi desenvolvido especificamente para a América do Sul e apresentou melhor desempenho para diversas regiões do Brasil. Esses resultados destacam a incerteza enfrentada pelos analistas ao avaliar extremos de precipitação na região em uma escala diária (Palharini *et al.* 2022).

A influência de diferentes sistemas meteorológicos também é um fator crucial no que diz respeito à precisão das estimativas dos produtos de precipitação baseados em satélite. Rodrigues *et al.* (2018) destacam que na costa leste do Nordeste brasileiro, a presença de nuvens quentes, comuns nesta região, afeta a qualidade das estimativas de precipitação. As nuvens quentes, por possuírem características microfísicas diferentes, podem prejudicar a detecção da REM realizada por sensores de satélite. Santos *et al.* (2022) corroboram essa observação, indicando que o índice SDII, que se baseia no valor exato da precipitação diária, apresentou baixa correlação (0.2) com os dados de pluviômetros na região leste do semiárido brasileiro, possivelmente devido à influência das nuvens quentes.

A escala temporal também é um fator que impacta a precisão das estimativas. Rodrigues *et al.* (2018) demonstram que o TMPA 3B42 V7 não apresentou boas estimativas para eventos extremos de precipitação diária. No entanto, ao analisar a precipitação acumulada em dois dias, a qualidade das estimativas melhorou consideravelmente. O mesmo padrão foi observado por Santos *et al.* (2022), que sugere que a análise de eventos extremos de chuva baseados em acumulados de precipitação pode ser mais confiável do que a análise de eventos diários isolados.

Vale ressaltar que a quantidade de postos de qualidade disponíveis para cada grupo avaliado, em cada ano, pode ter influência nos resultados observados neste estudo. Freitas *et al.* (2020) evidenciaram que a quantidade de postos limitados no grupo que engloba a região da floresta Amazônica dificultou uma avaliação mais precisa da capacidade do IMERG *Final Run* v06 em detectar eventos de chuva e suas propriedades. Outros fatores considerados são a distribuição desses postos, uma vez que o país possui características pluviométricas distintas em níveis de microescala, e a dispersão dos postos pode influenciar nos resultados. Esta observação é corroborada por Gadelha *et al.* (2019), que perceberam que as regiões

que possuem uma baixa densidade de postos pluviométricos podem ser uma fonte de grandes desvios, erros e vieses na avaliação de produtos de chuva baseados em satélites.

Ademais, Ramos Filho *et al.* (2022) alegaram que, apesar das limitações, os produtos de precipitação baseados em satélite podem ser uma ferramenta valiosa em regiões com baixa densidade de pluviômetros. Os autores também afirmaram que em áreas com redes de pluviômetros densas, com dados de precipitação em escala sub-diária, os dados registrados por pluviômetros continuam sendo a fonte de informação mais precisa para caracterizar eventos de chuva extrema que desencadeiam inundações.

Esses estudos convergem ao identificar a necessidade de melhoria dos algoritmos dos produtos de precipitação baseados em satélites na detecção da complexidade dos eventos de chuva extrema. A integração de dados regionais, como topografia e tipo de vegetação, bem como o desenvolvimento de algoritmos específicos para melhor detecção de eventos extremos de chuva, são essenciais para aumentar a confiabilidade das estimativas (Palharine *et al.*, 2022; Souza *et al.*, 2020). A combinação de dados de diferentes sensores, como infravermelho e microondas, também é importante para a melhoria dos produtos de precipitação com base em dados de satélite na detecção e quantificação de eventos de chuva extrema (Ramos Filho *et al.*, 2022).

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

Os resultados obtidos neste estudo contribuíram diretamente para alcançar o objetivo principal, que foi avaliar o desempenho do recém lançado produto de precipitação baseado em dados orbitais de SR, IMERG Final Run V07. As estimativas geradas por esses produtos foram comparadas aos dados obtidos pela rede de pluviômetros do CEMADEN, que foram cuidadosamente selecionados e organizados. A análise desses dados permitiu uma avaliação da performance deste produto de precipitação.

Com relação à estimativa dos limiares de eventos de chuva extrema, a partir da análise de percentis, o grupo SE registrou o maior número de eventos extremos de chuva(14517), enquanto o grupo CEN teve o menor número de registros (3356).

O grupo NCSE apresentou a maior média pluviométrica (64.68 mm/dia) e o maior desvio padrão (13.80 mm/dia), indicando maior variabilidade nos dados. Em contrapartida, o grupo SM teve a menor média (31.43 mm/dia) e o grupo SE o menor desvio padrão (8.16 mm/dia).

De modo geral, o IMERG *Final Run* V07 não apresentou bom desempenho ao estimar os eventos extremos de chuva registrados pela rede de monitoramento do CEMADEN, como foi observado nos resultados das métricas estatísticas. Desta forma, conclui-se que embora o IMERG-F07 tenha mostrado algumas melhorias, como sugerem Huffman *et al.* (2023), ainda não apresentou resultados satisfatórios para detectar eventos extremos em nenhuma das regiões

Ressalta-se que a variabilidade no desempenho do IMERG-F07 pode ser atribuída a diversos fatores, como características regionais, sistemas meteorológicos e a escala temporal das análises. É importante destacar que a análise realizada por este estudo foi feita em uma escala diária. Entretanto, análises de produtos de sensoriamento remoto em escalas temporais mensais e anuais podem fornecer tendências mais confiáveis. Contudo, apesar de permitir uma abrangência de escala espacial e temporal, os dados estimados por produtos de satélite não possuem a alta precisão de um pluviômetro.

Por fim, em consonância com diversos autores (e.g., Souza *et al.*, 2020; Palharini *et al.*, 2021, 2022; Ramos Filho *et al.*, 2022), ressalta-se a necessidade de algoritmos ajustados para características específicas de cada região, bem como a integração de dados regionais e a combinação de diferentes sensores para melhorar a detecção e quantificação de eventos extremos de chuva. Destaca-se, ainda, a importância de estudos que avaliam o desempenho de produtos de precipitação baseados em dados de satélite, já que através da comparação com dados obtidos em campo é possível identificar os produtos mais confiáveis em termos de precisão espacial e temporal. A identificação de produtos confiáveis de precipitação baseados em satélite permite o estudo de regiões onde não há disponibilidade de dados, bem como para o preenchimento de falhas ou lacunas nas séries históricas.

7. REFERÊNCIAS

- AKOGLU, H. User's guide to correlation coefficients. **Turkish journal of emergency medicine**, v. 18, n. 3, p. 91–93, 2018.
- ALMAGRO, A.; OLIVEIRA, P. T. S.; BROCCA, L. Assessment of bottom-up satellite rainfall products on estimating river discharge and hydrologic signatures in Brazilian catchments. **Journal of hydrology**, v. 603, n. 126897, 2021.
- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- BECK, H. E. et al. Global-scale evaluation of 22 precipitation datasets using gauge observations and hydrological modeling. **Hydrology and earth system sciences**, v. 21, n. 12, p. 6201–6217, 2017.
- BECK, H. E. et al. Daily evaluation of 26 precipitation datasets using Stage-IV gauge-radar data for the CONUS. **Hydrology and earth system sciences**, v. 23, n. 1, p. 207–224, 2019.
- BRASIL. Atlas Nacional de Desastres no Brasil. **Mapa Interativo**. Disponível em: <https://atlasdigital.mdr.gov.br/paginas/mapa-interativo.xhtml>. Acesso em: 25 set. 2024.
- BRASIL. Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais. Disponível em: <https://www.gov.br/cemaden/pt-br>. Acesso em: 25 set. 2024.
- CAVALCANTE, R. B. L. et al. Evaluation of extreme rainfall indices from CHIRPS precipitation estimates over the Brazilian Amazonia. **Atmospheric research**, v. 238, n. 104879, p. 104879, 2020.
- CHEN, F.; LI, X. Evaluation of IMERG and TRMM 3B43 monthly precipitation products over Mainland China. **Remote sensing**, v. 8, n. 6, p. 472, 2016.
- FISHER, R. A.; TIPPETT, L. H. C. Limiting forms of the frequency distribution of the largest or smallest member of a sample. **Mathematical proceedings of the Cambridge Philosophical Society**, v. 24, n. 2, p. 180–190, 1928.
- FREITAS, E. S. **Avaliação do uso do IMERG (Intrgrated Multi-Satellite Retrievals for GPM) para determinação de eventos chuvosos e suas propriedades no brasil: uma análise na escala subdiária**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba. 2019. <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/18947>
- FREITAS, E. S. et al. The performance of the IMERG satellite-based product in identifying sub-daily rainfall events and their properties. **Journal of hydrology**, v. 589, n. 125128, p. 125128, 2020.
- GADELHA, A. N. et al. Grid box-level evaluation of IMERG over Brazil at various space and time scales. **Atmospheric research**, v. 218, p. 231–244, 2019.
- GORELICK, N. et al. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. **Remote sensing of environment**, v. 202, p. 18–27, 2017.

GUPTA, H. V.; SOROOSHIAN, S.; YAPO, P. O. Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration. **Journal of hydrologic engineering**, v. 4, n. 2, p. 135–143, 1999.

HALLAK, R.; PEREIRA FILHO, A. J. Metodologia para análise de desempenho de simulações de sistemas convectivos na região metropolitana de São Paulo com o modelo ARPS: sensibilidade a variações com os esquemas de advecção e assimilação de dados. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, n. 4, p. 591–608, 2011.

HONG, Y. et al. Remote sensing precipitation: Sensors, retrievals, validations, and applications. Em: **Observation and Measurement of Ecohydrological Processes**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2019. p. 107–128.

HUFFMAN, G. J. *et al.* **Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD): NASA Global Precipitation Measurement (GPM) Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM (IMERG) Version 07**. Greenbelt, MD: NASA/GSFC, 2023. Disponível em: <https://gpm.nasa.gov/resources/images/gpm-constellation-overpass-times>. Acesso em: 28 ago. 2024.

IPCC. **Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change**. 2024. Disponível em <<https://www.ipcc.ch/report/ar5/syr/>> Acesso em: 20 set 2024.

KIDD, C.; LEVIZZANI, V. Status of satellite precipitation retrievals. **Hydrology and earth system sciences**, v. 15, n. 4, p. 1109–1116, 2011.

LE MOS, F. C. **Caracterização espaço-temporal da precipitação nas escalas sub-horária e subdiária no Brasil. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal da Paraíba**. Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental. 59 p. João Pessoa-PB. 2022. Disponível em: <<https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/23139>>. Acesso em: 26 ago. 2024.

LI, N. et al. Statistical assessment and hydrological utility of the latest multi-satellite precipitation analysis IMERG in Ganjiang River basin. **Atmospheric research**, v. 183, p. 212–223, 2017.

LIN, L. I. A concordance correlation coefficient to evaluate reproducibility. **Biometrics**, v. 45, n. 1, p. 255–268, 1989.

MACHADO, C. A. S.; QUINTANILHA, J. A. **Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e Geoposicionamento: Uma Aplicação Urbana**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Transportes, 2008. Apostila Teórica 1: Sensoriamento Remoto

MEIRA, M. A. et al. Quality control procedures for sub-hourly rainfall data: An investigation in different spatio-temporal scales in Brazil. **Journal of hydrology**, v. 613, n. 128358, p. 128358, 2022.

MENEZES, P. R.; ALMEIDA, T. DE (Org.). **Introdução ao Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto**. Brasília: Universidade de Brasília, 2012.

MOLINA-SANCHIS, I. et al. Rainfall timing and runoff: The influence of the criterion for rain event separation. **Journal of Hydrology and Hydromechanics**, v. 64, n. 3, p. 226–236, 2016.

MONTEIRO, J. B.; ZANELLA, M. E. A metodologia dos máximos de precipitação aplicada ao estudo de eventos extremos diários nos municípios de Crato, Fortaleza e Sobral-CE. **GeoTextos**, v. 13, n. 2, 2017.

MONTEIRO, J. B.; ZANELLA, M. E. A metodologia estatística dos eventos extremos de precipitação: uma proposta autoral para análise de episódios pluviométricos diários. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 32, p. 494–516, 2023.

MOURA RAMOS FILHO, G. et al. Regional-scale evaluation of 14 satellite-based precipitation products in characterising extreme events and delineating rainfall thresholds for flood hazards. **Atmospheric research**, v. 276, n. 106259, p. 106259, 2022.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. **Journal of hydrology**, v. 10, n. 3, p. 282–290, 1970.

NOVO, E. M. L. de M.; PONZONI, F. J. **Introdução ao Sensoriamento Remoto**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2001

OVANDO, G. et al. Precipitation estimations based on remote sensing compared with data from weather stations over agricultural region of Argentina pampas. **Remote Sensing Applications Society and Environment**, v. 23, n. 100589, p. 100589, 2021.

PALHARINI, R. S. A. et al. Assessment of extreme rainfall estimates from satellite-based: Regional analysis. **Remote Sensing Applications Society and Environment**, v. 23, n. 100603, p. 100603, 2021.

PALHARINI, R. S. A. et al. Analysis of extreme rainfall and natural disasters events using satellite precipitation products in different regions of Brazil. **Atmosphere**, v. 13, n. 10, p. 1680, 2022.

PANTHOU, G. et al. Rainfall intensification in tropical semi-arid regions: the Sahelian case. **Environmental research letters**, v. 13, n. 6, 2018.

PARKER, A. L. et al. Applications of satellite radar imagery for hazard monitoring: Insights from Australia. **Remote sensing**, v. 13, n. 8, p. 1422, 2021.

PINTO, N. L. de S.; HOLTZ, A.C. T.; MARTINS, J. A.; et al. **Hidrologia básica**. São Paulo: Editora Blucher, 1976. E-book. ISBN 9788521217886. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521217886/>. Acesso em: 14 set. 2024.

PIMENTEL, L. **Hidrologia - Engenharia e Meio Ambiente**. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2015. E-book. ISBN 9788595155510. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788595155510/>. Acesso em: 14 set. 2024.

RANGHETTI, L. et al. Assessment of water management changes in the Italian rice paddies from 2000 to 2016 using satellite data: A contribution to Agro-ecological studies. **Remote sensing**, v. 10, n. 3, p. 416, 2018.

ROOY, M.P.V.A. **Rainfall anomaly index independente of time and space**. Notes. Weather. Bureau of South Africa, v.14. 1965.

ROZANTE, J. R. et al. Evaluation of TRMM/GPM blended daily products over Brazil. **Remote sensing**, v. 10, n. 6, p. 882, 2018.

SANTOS, A. L. M. et al. Evaluation of extreme precipitation indices in Brazil's semiarid region from satellite data. **Atmosphere**, v. 13, n. 10, p. 1598, 2022.

SILVA, C. A. **Os desastres pluviométricos nas grandes e médias cidades do Paraná - 1980-2010**. 2012. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

SINGH, L.; SARAVANAN, S. Satellite-derived GRACE groundwater storage variation in complex aquifer system in India. **Sustainable water resources management**, v. 6, n. 3, 2020.

SOUZA, V. A. S. et al. Extreme rainfall events in Amazonia: The Madeira river basin. **Remote Sensing Applications Society and Environment**, v. 18, 2020.

TUCCI, Carlos E. M. Hidrologia: ciência e aplicação. 2.ed. Porto Alegre: UFRGS, 1997. 943p. (Coleção ABRH de Recursos Hídricos v. 4)

XAVIER, A. C. F. et al. Evaluation of satellite-derived products for the daily average and extreme rainfall in the Mearim River Drainage Basin (Maranhão, Brazil). **Remote sensing**, v. 13, n. 21, p. 4393, 2021.

XU, L. et al. Improving global monthly and daily precipitation estimation by fusing gauge observations, remote sensing, and reanalysis data sets. **Water resources research**, v. 56, n. 3, 2020.

ZHANG, G. et al. Remote-sensing precipitation and temperature evaluation using soil and water assessment tool with multiobjective calibration in the Shiyang River Basin, Northwest China. **Journal of hydrology**, v. 590, 2020.