



# Revista Brasileira de Geografia Física

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



## Estimativa de precipitação provida do radar meteorológico: análise de desempenho entre estações pluviométricas *versus* Z-R de Marshall e Z-R específica local

Geiza Thamirys Correia Gomes<sup>1</sup>, Vera Núbia Carvalho de Farias<sup>2</sup>, Clebson Carvalho de Farias<sup>3</sup>, Carlos Ruberto Fragoso Júnior<sup>4</sup>, José Almir Cirilo<sup>5</sup>, Maria Luciene Dias de Melo<sup>6</sup>, Kleymeron Pereira Lins<sup>7</sup>, Marcelo Queiroz de Assis Oliveira<sup>8</sup>, Micaela Costa Viana<sup>9</sup>, Luan Anderson Lima de Araújo<sup>10</sup>

<sup>1</sup>Doutoranda em Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Pernambuco, geiza.tcgomes@ufpe.br (<https://orcid.org/0009-0009-4247-5649>), <sup>2</sup>Doutoranda em Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Pernambuco, vera.nubia@ufpe.br (<https://orcid.org/0000-0001-6223-0942>); <sup>3</sup>Membro do projeto REALPE, clebson2007.farias@gmail.com, (<https://orcid.org/0009-0005-9504-9230>); <sup>4</sup>Docente do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas, ruberto@ctec.ufal.br, (<https://orcid.org/0000-0002-5853-6030>); <sup>5</sup>Docente da Universidade Federal de Pernambuco, jose.cirilo@ufpe.br, (<https://orcid.org/0000-0002-8672-0898>); <sup>6</sup>Docente do Instituto de Ciências Atmosféricas da Universidade Federal de Alagoas, maria.melo@icat.ufal.br, (<https://orcid.org/0000-0001-8388-4240>); <sup>7</sup>Membro do SIRMAL, kleymeron@icat.ufal.br, (<https://orcid.org/0000-0003-0667-5511>); <sup>8</sup>Membro do SIRMAL, marcelo@radar.ufal.br, (<https://orcid.org/0000-0003-4770-1704>); <sup>9</sup>Discente do Instituto de Ciências Atmosféricas da Universidade Federal de Alagoas, micaela.viana@icat.ufal.br, (<https://orcid.org/0009-0005-6178-0834>); <sup>10</sup>Discente do Instituto de Ciências Atmosféricas da Universidade Federal de Alagoas, luan.araujo@icat.ufal.br, (0009-0002-9569-270X);

Artigo recebido em 13/05/2025 e aceito em 03/02/2026

### RESUMO

Pesquisas científicas apontam uma tendência de falha no registro do radar meteorológico quando comparado à chuva observada nas estações pluviométricas. No entanto, através deste trabalho são explorados fatores relevantes, onde o principal deles é a compreensão de que a estimativa de precipitação pelo radar meteorológico e a medição direta dos pluviômetros possuem metodologias distintas. Defende-se a necessidade de conhecimento aprofundado nos predicados, possibilidades do radar e dos seus produtos, principalmente aqueles com aplicação hidrológica. Faz-se necessária a escolha coerente do tipo de produto, a definição do alcance e feixe, ângulo de elevação da antena, resolução espacial e temporal, aplicação de filtro para correção de ecos do terreno e a seleção da relação Z-R. O viés radar-estação será diretamente afetado por esta composição. No presente estudo, foram avaliados os produtos hidrológicos gerados pelo Rainbow<sup>®</sup>5, empregando a dupla polarização e Z-R específica/local, a fim de aprimorar a estimativa de chuva provida do radar meteorológico com o objetivo de refinar este dado de entrada para modelos chuva-vazão. O presente trabalho busca reportar a necessidade de explorar as infinitas possibilidades de métodos para o processamento de dados do radar meteorológico, tornando-os cada vez mais próximos aos observados nas estações pluviométricas. Além de, realizar a validação dos dados do radar para uma bacia de clima tropical/semiárido, que apresenta frequentes eventos de cheia, fazendo uso de distintas metodologias para conversão da refletividade no produto chuva.

Palavras-Chave: relação Z-R, dupla polarização, variáveis polarimétricas.

## Estimation of Precipitation from Weather Radar: Performance Analysis between Rain Gauges versus Marshall's Z-R and Local Specific Z-R

### ABSTRACT

Scientific research points to a tendency for meteorological radar recording to fail when compared to rainfall observed at rain gauge stations. However, this study explores relevant factors, the main one being the understanding that rainfall estimation by meteorological radar and direct measurement by rain gauges have different methodologies. It is argued that there is a need for in-depth knowledge of the predicates and possibilities of radar and its products, especially those with hydrological application. It is necessary to choose the type of product coherently, define the range and beam, antenna

elevation angle, spatial and temporal resolution, apply a filter to correct echoes from the terrain and select the Z-R ratio. The radar-station bias will be directly affected by this composition. In the present study, the hydrological products generated by Rainbow®5 were evaluated, using dual polarization and specific/local Z-R, in order to improve rainfall estimation from meteorological radar with the objective of refining this input data for rainfall-runoff models. This paper aims to report the need to explore the infinite possibilities of methods for processing meteorological radar data, making them increasingly closer to those observed at rain gauge stations. In addition, to validate radar data for a tropical/semi-arid climate basin, which presents frequent flood events, using different methodologies to convert reflectivity into the rainfall product.

Keywords: Z-R relationship, dual polarization, polarimetric variables.

## Introdução

A precipitação é reconhecida como uma das principais fontes de incerteza em modelos hidrológicos, em razão de sua elevada variabilidade espacial e temporal. Dessa forma, a medição e a estimativa espacial da precipitação com alta precisão são essenciais para a simulação confiável e a previsão de variáveis hidrológicas, especialmente a vazão dos rios (Bertoncini & Pomeroy, 2025).

Os pluviômetros e os radares meteorológicos são os instrumentos mais utilizados para a coleta de dados de chuva. Embora ambos apresentem pontos fortes — com os pluviômetros oferecendo medidas diretas no solo e os radares fornecendo cobertura ampla com elevada resolução espaço-temporal — cada um é impactado por erros e incertezas que limitam sua capacidade de fornecer estimativas de precipitação com a qualidade desejada. De acordo com Rosenhoover et al., (2025), as medições por radar podem ser afetadas por vieses e erros dependentes do algoritmo de estimativa e das características microfísicas da chuva, ao passo que observações de pluviômetros têm limitações inerentes à sua natureza pontual e à representação espacial da chuva; essas incertezas são comumente tratadas integrando dados de pluviômetros e radar para melhorar as estimativas de precipitação.

Schulz, Niemann e Mietzel (2025) destacam que as redes clássicas de pluviômetros são muito esparsas para capturar com precisão a alta variabilidade espacial e temporal da precipitação. Devido à má distribuição, quantidade reduzida e por caracterizarem a chuva apenas localmente, a chuva estimada por radar destaca-se como uma ferramenta poderosa para obter dados precisos e contínuos em uma área ampla (Gourley et al., 2010). Pois, de forma remota consegue-se dados com grande resolução espacial e temporal.

A chuva provida de radar meteorológico pode ser utilizada como entrada em modelos hidrológicos, permitindo uma representação mais precisa dos padrões espaciais e temporais da precipitação em toda a bacia hidrográfica. Estudos recentes mostram que produtos de precipitação

derivados de radares meteorológicos podem ser empregados diretamente como entrada em modelos como o HEC-HMS, melhorando a simulação de hidrogramas e o desempenho na previsão de cheias quando comparados com abordagens baseadas apenas em pluviômetros. (Li et al., 2024)

Além disso, a chuva de radar também oferece a vantagem de fornecer dados em tempo real, permitindo uma resposta mais rápida e eficaz a eventos extremos, como chuvas intensas e enchentes repentinas (Zanchetta & Coulibaly, 2020). Isso é especialmente importante para a gestão de riscos e a tomada de decisões em tempo hábil.

As medidas de precipitação com radar baseiam-se na quantidade de energia refletida pela chuva que retorna ao radar. A potência de retorno está diretamente relacionada com o espectro de gotas no volume iluminado pelo radar e, por isso, há necessidade do conhecimento sobre a distribuição do tamanho de gota (Miguel & Rennó, 2020). O que pode ser conseguido a partir de disdrômetros ou estimados com dados de radares de dupla polarização.

Kim, Kwon e Kim (2021), discutem a calibração da equação Z-R de forma específica para cada região ou tipo de evento, de modo a melhorar a acurácia das estimativas de precipitação, pois os coeficientes empíricos dessa relação variam conforme as condições climáticas locais, características microfísicas da chuva e a distribuição espacial das observações.

Estudos recentes sobre *Quantitative Precipitation Estimation* (QPE) com radares polarimétricos enfatizam que esses sistemas, ao capturarem informações detalhadas sobre os hidrometeoros em diferentes níveis do volume de observação, contribuem de maneira significativa para caracterizar fenômenos meteorológicos e melhorar a representação de eventos de chuva. (Zhang et al., 2025)

A equação de Marshall-Palmer é empregada em todos os radares da Selex, ou seja, os mesmos que são gerenciados pelo Cemaden. No entanto, alguns estudos mostraram que o uso direto da equação de Marshall-Palmer em toda uma bacia é

geralmente afetado por erros sistemáticos na medição do radar devido à falta de representação adequada da relação Z-R (Biggs & Atkinson, 2011), (Bárdossy & Pegram, 2017), (Kim; Kwon; Lima, 2018). Uma das principais causas da alta variabilidade temporal e espacial na relação Z-R é a variabilidade na Distribuição do Tamanho das Gotas (DTG), a topografia, as condições atmosféricas, os tipos de precipitação e outros fatores contribuem para as variações na DTG, o que leva a mudanças na relação Z-R (Barszcz & Kaznowska, 2025). A relação Z-R é mais representativa da climatologia local e das características do radar (Rendon et al., 2010). A relação entre refletividade (Z) e taxa de precipitação (R), conhecida como relação Z-R, é influenciada pela distribuição do tamanho das gotas de chuva e pelas condições climáticas e geográficas locais, de modo que sua parametrização tende a ser mais representativa quando ajustada à climatologia regional e às características específicas do radar utilizado. Essa variabilidade espaço-temporal dos parâmetros da relação Z-R evidencia a necessidade de calibrar essa equação conforme as condições locais para melhorar a precisão das estimativas de precipitação por radar. (Barszcz, Stańczyk & Brandyk, 2023).

De modo semelhante ao observado por Huff (1967), pesquisas contemporâneas mostram que a precisão das estimativas de chuva obtidas através da relação Z-R tende a se deteriorar com o aumento da distância entre o radar e o alvo da medição, devido a fatores como bloqueio de feixe e subestimação de eventos intensos, e que a aplicação de rotinas de controle de qualidade e interpolação pode reduzir esses erros e melhorar a acurácia das estimativas de precipitação. (Qiu et al., 2025)

Pode-se atribuir as incertezas na estimativa da precipitação por radar a três principais fontes: a amostra da distribuição do tamanho de gotas (DTG); área de integração e tempo de integração.

Estudos recentes mostram que os coeficientes da relação Z-R variam de forma significativa ao longo do espaço e do tempo, sendo necessária a calibração da relação para contextos regionais ou intervalos específicos de distância a fim de reduzir erros sistemáticos nas estimativas de precipitação derivadas de radar. (Kim; Kwon; Kim, 2021).

A QPE baseada em radar também apresenta diversos desafios, incluindo a descalibração ou deterioração dos componentes do radar, atenuação do sinal, propagação anômala, bloqueio do feixe,

efeitos da banda brilhante e erros na distribuição do tamanho das gotas (Qiu et. al., 2025).

O radar é uma ferramenta de estimativa quantitativa de precipitação com excelente resolução espacial e temporal, capaz de fornecer informações contínuas sobre a distribuição de chuva em grandes áreas. Contudo, a cobertura do radar pode ser inconsistente de lugar para lugar e de tempestade para tempestade devido a limitações como bloqueios do feixe, atenuação do sinal e interferências geográficas. Mesmo os pluviômetros, que são medições baseadas no solo, estão sujeitos a erros e não conseguem resolver adequadamente o detalhe espacial dos padrões de precipitação, especialmente em regiões com redes pontuais e dispersas, enquanto as estimativas de chuva por radar conseguem representar melhor a variabilidade espacial da precipitação quando integradas a métodos complementares (Osman & Tahir, 2024).

É relevante a compreensão de que a estimativa de precipitação pelo radar meteorológico e o registro dos pluviômetros possuem metodologias distintas. Para uma mesma região (Figura 1), o radar estima a precipitação média em um volume, enquanto a estimativa dos pluviômetros se dá pela média dos registros de chuva em um ponto, representativo de uma determinada área. Influências como o vento e a localização da chuva também estão associados às possíveis diferenças entre os valores registrados no radar meteorológico versus pluviômetros.

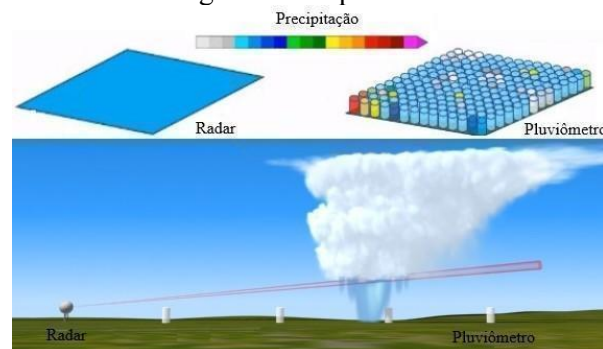


Figura 1 – Estimativa quantitativa de precipitação, radar meteorológico versus pluviômetro. Fonte: Adaptado de Comet, 2024.

Outra questão de destaque é o tempo para a varredura completa, a Figura 2 ilustra que enquanto na imagem da esquerda o pluviômetro está registrando chuva, o radar está realizando a varredura em outro local. Já na ilustração da direita tanto radar quanto pluviômetro estão realizando registros no mesmo local, no entanto, a altura de elevação do radar não possibilitou o registro da chuva no ponto de instalação do pluviômetro.

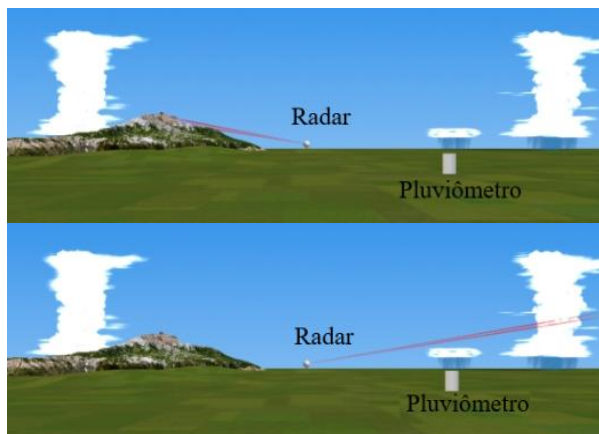


Figura 2 – Varredura do radar e o impacto no registro da precipitação observada no pluviômetro. Fonte: Adaptado de Comet, 2024.

O vento pode fazer com que a precipitação caia em um determinado ângulo em relação à vertical, não sendo registrada pelo instrumento. Além disso, o próprio medidor pode representar um obstáculo ao fluxo. Isso resulta em padrões de vento alterados perto do medidor. Os efeitos do vento irão variar dependendo da fase e tamanho do hidrometeoro. Há um grande envelope de incerteza devido à variabilidade no tamanho das gotas, à estabilidade do vento e à localização do medidor. Aqui estão alguns pontos principais a serem lembrados. As melhores medições em condições de vento serão em situações com grandes gotas de chuva, medidores próximos ao nível do solo e medidores protegidos. As medições mais fracas ocorrerão com pequenas gotas de chuva e garoa e quando os medidores estiverem diretamente expostos ao vento.

Diante do exposto, o trabalho visa analisar e avaliar quantitativamente a precipitação estimada pelo radar meteorológico através de dados de precipitação observada, a partir de pluviômetros, na área de cobertura do radar, que compreende a bacia hidrográfica do rio Mundaú. Para a precipitação provinda do radar meteorológico foram utilizadas as relações Z-R específica (local) para Alagoas desenvolvidas por (R. S. Tenório et al., 2012), e a equação desenvolvida para os EUA por (Marshall & Palmer, 1948).

## Material e métodos

### Área e período de estudo

A bacia hidrográfica do rio Mundaú (BHRM) está localizada entre os estados de Alagoas e Pernambuco (Nordeste do Brasil), geograficamente, está entre as latitudes  $9^{\circ}36'$  e  $8^{\circ}52'$  Sul e longitudes  $36^{\circ}42'$  e  $35^{\circ}48'$  Oeste. A BHRM (Figura 3) abrange uma área de aproximadamente  $4.105 \text{ km}^2$ , na qual estão inseridos 36 municípios (Fragoso Júnior et al., 2010).

Foi analisado o evento chuvoso no período de 20 a 28 de maio do ano 2017, por ser um período causador de enchentes na BHRM e pela disponibilidade dos dados do radar meteorológico, permitindo o processamento de dados através do software Selex's Rainbow® 5.

Segundo dados da Defesa Civil de Alagoas e da Codecipe (Coordenadoria de Defesa Civil de Pernambuco), ao todo 31 municípios foram afetados pelas enchentes causadas pelas chuvas nos dois Estados. Notícias de 29 de maio de 2017, indicaram que em Pernambuco, foram 35 mil pessoas desalojadas e 15 cidades em estado de calamidade, todas localizadas nas regiões do Agreste e Zona da Mata Sul do Estado. Já Alagoas possuía 1.688 famílias desabrigadas e desalojadas e 16 municípios afetados pelas enchentes. A Defesa Civil de Alagoas contabilizava uma média de três pessoas por família, o que totaliza 5.064 pessoas atingidas (Gama & Madeiro, 2017).

De acordo com a síntese climática de maio de 2017, divulgada pela Agência Pernambucana de Águas e Clima (APAC), a análise dos sistemas meteorológicos que causaram as chuvas em maio/2017 em Pernambuco indicou que as chuvas que aconteceram em Pernambuco foram ocasionadas pela junção de alguns sistemas meteorológicos que atuaram ao mesmo tempo.

As chuvas ocorridas durante o evento, nos municípios do Agreste e Zona da Mata Sul, resultaram na emissão de 26 (vinte e seis) avisos hidrológicos de cota de alerta e inundação (APAC, 2017).



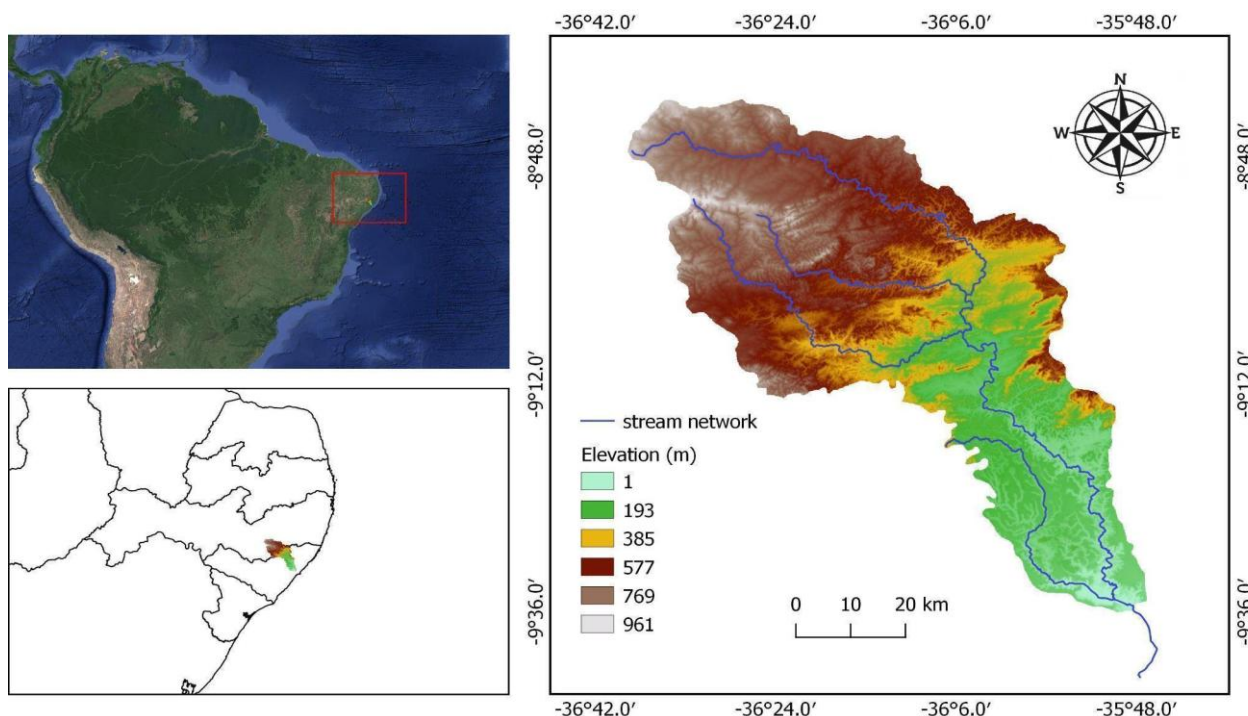


Figura 3 – Localização da Bacia Hidrográfica do rio Mundaú (BHRM).

#### Dados do radar meteorológico

Foram obtidos dados *Constant Altitude Plan Position Indicator* (CAPPI) de 3 km a partir do produto *Surface Rainfall Intensity* (SRI), do radar meteorológico da Universidade Federal de Alagoas (UFAL). O radar é fabricado pela empresa Selex-SE, que possui dupla polarização, opera na Banda S, Doppler, pulsado com feixe de micro-ondas de largura de 1°, possui resolução espacial de 250 m e raio de varredura de 250 km. O equipamento é mantido pelo Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais (CEMADEN).

Segundo Verdelho et al. (2024), o radar meteorológico mede a energia retroespalhada pelos hidrometeoros em termos de refletividade ( $Z$ ), a qual pode ser convertida em taxa de precipitação ( $R$ , em  $\text{mm h}^{-1}$ ) por meio de uma relação empírica:

$$Z = aR^b \quad (1)$$

Onde  $Z$  é o fator de refletividade do radar,  $R$  é a taxa de precipitação ( $\text{mm/h}$ ) e,  $a$  e  $b$  constantes numéricas dependentes das características da chuva e do ambiente.  $Z$  é comumente expresso em  $\text{mm}^6/\text{mm}^3$  ou em decibéis (dBZ), sendo:

$$Z(\text{dBZ}) = 10 \log Z(\text{mm}^6/\text{m}^3) \quad (2)$$

Embora haja uma forte correlação entre a

refletividade do radar ( $Z$ ) e a taxa de precipitação ( $R$ ), isso não implica que a refletividade seja exatamente igual à quantidade de chuva no solo, uma vez que a relação  $Z$ - $R$  é uma aproximação empírica sujeita a incertezas e variações conforme as características microfísicas da chuva e as condições meteorológicas específicas de cada evento ou região (Dzwonkowski, 2025).

Os valores de  $a$  e  $b$  calculados de  $Z$  e  $R$ , variam significativamente, pois dependem da origem e tipo das precipitações, da distribuição das gotas de chuva e seu tamanho, localização geográfica, condições meteorológicas, dentre outras (Emidio & Calheiros, 2009).

Os coeficientes empíricos da equação  $Z$ - $R$  incorporam erros e incertezas associadas às características climatológicas, distribuição das chuvas, das estações pluviométricas, porque a  $Z$ - $R$  é calibrada usando dados observados, então é influenciada pela precisão e densidade da rede (Chumchean et al., 2006) e duração do tempo de chuva (Suk et al., 2013).

Uma abordagem de relação  $Z$ - $R$  fixa, como a relação Marshall-Palmer, para um ano inteiro e para diferentes estações pode ser problemática nos casos em que a relação varia espacial e temporalmente ao longo de uma região (T. J. Kim et al., 2021).

No presente estudo, são empregadas a relação  $Z$ - $R$  específica (local/regional) de Alagoas (R. S. Tenório et al., 2012), e a equação

desenvolvida para os EUA (Marshall & Palmer, 1948), ambas desenvolvidas para chuva mista, i. e., as equações foram calibradas a partir de eventos com chuva estratiforme e convectiva, conforme apresentadas na Tabela 2. Além de serem utilizadas as variáveis polarimétricas geradas pelo radar, como refletividade diferencial (ZDR) e deslocamento de fase diferencial (KDP).

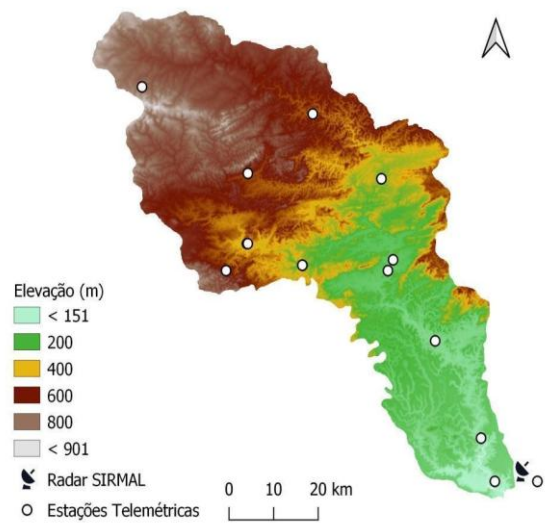
**Tabela 2.** Relações Z-R empregadas.

| Relação Z-R        | Origem                   | Desenvolvida para |
|--------------------|--------------------------|-------------------|
| $Z = 200 R^{1,6}$  | Marshall & Palmer (1948) | EUA               |
| $Z = 167 R^{1,26}$ | Tenório et al. (2010)    | Alagoas, BR       |

#### *Estações telemétricas*

Para fins de comparação com os dados provenientes do radar meteorológico, foram utilizados dados de precipitação em escala horária

de estações (Tabela 1) gerenciadas pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) e pelo Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN).



**Figura 4** – Localização das estações.

**Tabela 1.** Estações.

| Código     | Latitude | Longitude  | Município          | Estado | Responsável |
|------------|----------|------------|--------------------|--------|-------------|
| 270430215A | -9,5665  | -35,79703  | Maceió             | AL     | Cemaden     |
| 270890701A | -9,574   | -35,824    | Satuba             | AL     | Cemaden     |
| 39770000   | -9,489   | -35,852214 | Rio Largo          | AL     | ANA         |
| 270550701A | -9,311   | -35,946    | Murici             | AL     | Cemaden     |
| 39745000   | -9,1832  | -36,042622 | União dos Palmares | AL     | ANA         |
| 270810501A | -9,17    | -36,217    | Santana do Mundaú  | AL     | Cemaden     |
| 39700000   | -9,1678  | -36,2175   | Santana do Mundaú  | AL     | ANA         |
| 39720000   | -9,0117  | -36,055862 | São José da Laje   | AL     | ANA         |
| 260470001C | -9,1789  | -36,373361 | Correntes          | PE     | Cemaden     |
| 39689000   | -9,1309  | -36,330756 | Correntes          | PE     | ANA         |
| 260470001A | -9,128   | -36,329    | Correntes          | PE     | Cemaden     |
| 39715000   | -9,0048  | -36,328864 | Palmeirina         | PE     | ANA         |
| 39575000   | -8,89    | -36,196146 | Canhotinho         | PE     | ANA         |

### Quantificação da chuva

O volume de chuva é medido através do somatório da precipitação em cada dia do evento.

A diferença de volume é medida através da diferença entre o volume total observado na estação e aquele que é registrado pelo radar meteorológico. Está associada às diferenças nas intensidades dos dados obtidos pelo radar e pelos

pluviômetros.

Foram calculados coeficiente de determinação ( $R^2$ ), raiz do erro quadrático médio (RMSE), o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) (Nash & Sutcliffe, 1970) e Percent Bias (Pbias) (Vrugt et al., 2009). Estas métricas são métricas amplamente utilizadas na literatura para quantificar o desempenho de modelos hidrológicos ao comparar valores simulados com observados (Mekonnen & Getu, 2025; Kim et al., 2026).

|                                      | Estatística                                                                                                                                                                                                                              | Valor Ideal |
|--------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| <b>Coeficiente de correlação</b>     | $r^2 = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (P_{obs_i} - \underline{P_{obs}})(P_{est_i} - \underline{P_{est}})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (P_{obs_i} - \underline{P_{obs}})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_{est_i} - \underline{P_{est}})^2}} \right] \quad (3)$ | 1           |
| <b>Tendência Percentual</b>          | $PBIAS = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (P_{est_i} - P_{obs_i}) * 100}{\sum_{i=1}^n (P_{obs_i})} \right] \quad (4)$                                                                                                                           | 0           |
| <b>Raiz do Erro Quadrático Médio</b> | $RMSE = \frac{1}{n} \left[ \sum_{i=1}^n (P_{obs_i} - P_{est_i})^2 \right]^{0.5} \quad (5)$                                                                                                                                               | 0           |
| <b>Eficiência de Nash-Sutcliffe</b>  | $NS = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (P_{obs} - P_{est})^2}{\sum_{i=1}^n (P_{obs} - \underline{P_{obs}})^2} \right] \quad (6)$                                                                                                                | 1           |

**Tabela 3** – Estatísticas adotadas.

Onde  $P_{obs_i}$  é a precipitação observada na estação (mm);  $P_{est_i}$  é a precipitação estimada pelo radar (mm);  $\underline{P_{obs}}$  corresponde a média das precipitações observadas (mm);  $\underline{P_{est}}$  denota a média das precipitações estimadas pelo radar (mm); e  $n$  é o número de valores da amostra.

### Ocorrência de chuva

Compara-se a chuva medida pela estação pluviométrica com o registro do radar. A tabela de contingência (Tabela 4), contém a frequência dos possíveis registros para as quatro combinações de concordância entre os dados estimados por radar e observações de superfície (pluviômetros). Os

possíveis registros são classificados de acordo com as possíveis combinações:

- ✓ **correto positivo (a):** quando o radar e o pluviômetro registram a ocorrência;
- ✓ **falso alarme (b):** quando o radar registra a ocorrência de chuva, em discordância com o pluviômetro;
- ✓ **falha (c):** quando o radar não registra a ocorrência de chuva, em discordância com o pluviômetro;
- ✓ **correto negativo (d):** quando o radar e o pluviômetro não registram a ocorrência de chuva.

**Tabela 4.** Tabela de contingência utilizada para o cálculo das estatísticas de ocorrência.

|                       |     | Observações da superfície |         | Total               |
|-----------------------|-----|---------------------------|---------|---------------------|
|                       |     | Sim                       | Não     |                     |
| Estimativas por radar | Sim | $a$                       | $b$     | $a + b$             |
|                       | Não | $c$                       | $d$     | $c + d$             |
| Total                 |     | $a + c$                   | $b + d$ | $n = a + b + c + d$ |

• **Probabilidade de detecção (POD)**

A taxa de acerto ou probabilidade de detecção (POD, do inglês *Probability of Detection*) representa a fração de dados observados que foram corretamente identificados pela estimativa de chuva por radar, sendo representado pela relação abaixo:

$$POD = \frac{a}{a+c} \quad (7)$$

Com isso, o valor de POD varia entre 0 e 1, e para uma perfeita detecção o valor de POD deve ser igual a 1.

• **Razão de falso alarme (FAR)**

A razão de falso alarme (FAR, do inglês *False Alarm Ratio*) representa a fração de dados observados sem chuva que não foram corretamente identificados pela estimativa de chuva por radar, ou seja, o radar detecta chuva, porém o dado observado em superfície não. Sendo representado pela relação abaixo:

$$FAR = \frac{b}{a+b} \quad (8)$$

Com isso, o valor de FAR varia entre 0 e 1, obtendo-se valor igual à 0 para uma perfeita estimativa.

Todas as métricas de quantificação e detecção, foram selecionadas considerando-se trabalhos com objetivos consoantes ao presente (Dawson et al., 2010); (Zambrano-Bigiarini et al., 2017); (Baez-Villanueva et al., 2018).

**Resultados**

*Validação da chuva estimada por radar meteorológico com dados de estações telemétricas*

A Figura 5 apresenta a distribuição espacial, interpolada a partir das estações, das taxas de precipitação acumulada para os oito (08) dias de evento, estimadas pelo radar utilizando as relações Z-R propostas por (Marshall & Palmer, 1948; S. R. Tenório et al., 2010) e dados pontuais (representados por círculos) obtidos pelas estações pluviométricas, respectivamente. A comparação desses mapas revela que as taxas de precipitação estimadas pelo radar, com ambas as relações ZR, apresentaram valores inferiores ao total precipitado registrado pelos pluviômetros pontualmente. No entanto, nota-se que a relação Tenório (2010) apresentou valores superiores em comparação com a relação Z-R de Marshall e Palmer.



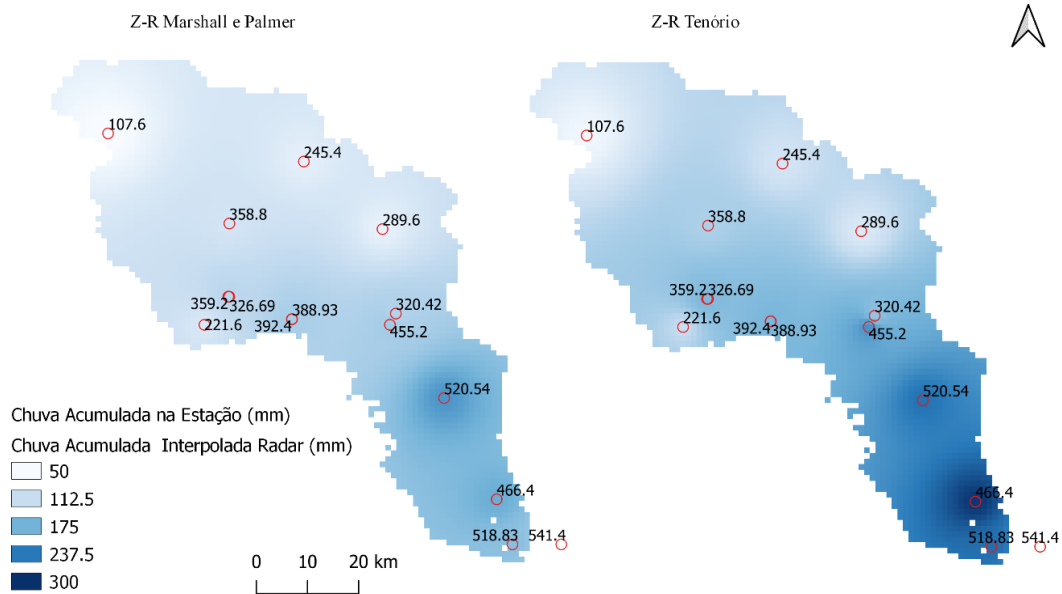


Figura 5. Chuva registrada nas estações *versus* chuva interpolada no radar.

A Figura 6, ilustra o acumulado total da precipitação para os oito (08) dias de evento em cada estação comparado aos dados do radar com as diferentes relações Z-R, e evidencia que a estimativa do radar, tanto pela Z-R de Marshall quanto Tenório exibem valores menores que os registrados pelos pluviômetros.

A relação local de Tenório (2010) em média, subestima os valores registrados, para cada estação em 51%, enquanto Marshall (1948) em média subestima em 64%. Esses resultados corroboram os de (Cabral et al., 2016) que

identificaram a subestimativa de cerca de 60%, por parte do radar de Alagoas, fazendo uso da relação de Marshall. E os resultados de (Brandes, 1975), que estudou uma bacia de 3000 km<sup>2</sup> em Oklahoma nos Estados Unidos.

No entanto, vale salientar que aqui, está sendo considerado uma média horizontal de 3 x 3 pontos do radar, para análise do CAPPI de 3 km, e comparando com o dado pontual de superfície do pluviômetro. Outra questão é a altura que está o feixe do radar, dependendo da distância dos pluviômetros.

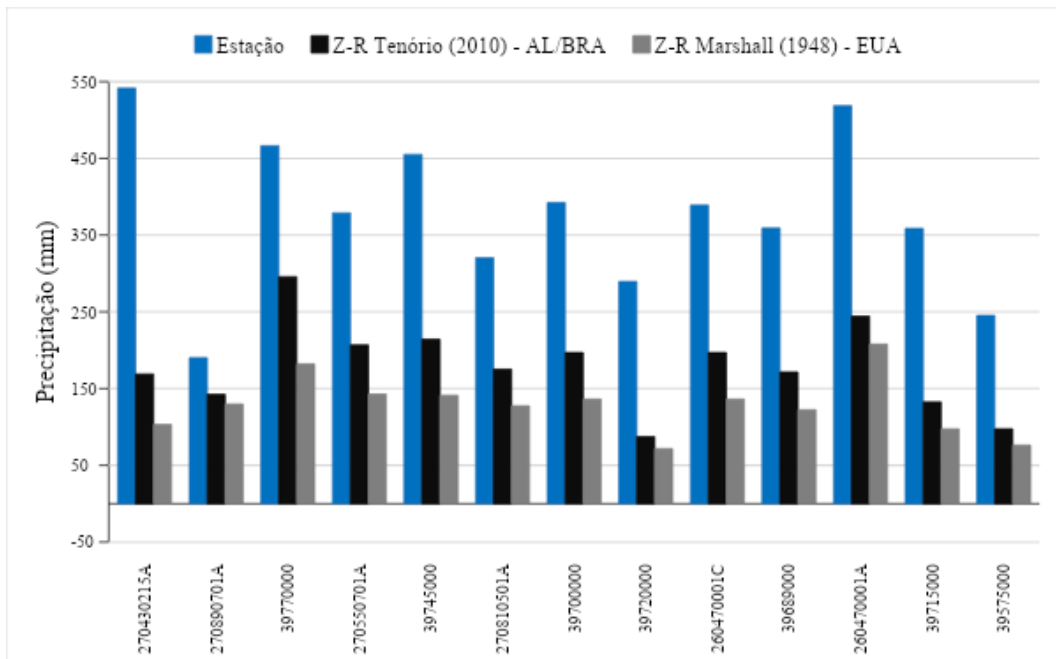


Figura 6 – Chuva acumulada nas estações *versus* chuva registrada pelo radar.

Para analisar as diferenças entre os dados de radar (usando MP e Tenório) e os registrados nos pluviômetros, durante todo o período do evento em análise, analisar-se-ão os gráficos a seguir (Figura 7), onde a curva em azul representa os dados observados em superfície, ou seja, registrados pelas estações, em preto e cinza são representadas a chuva obtida pelas equações de Tenório e Marshall, respectivamente.

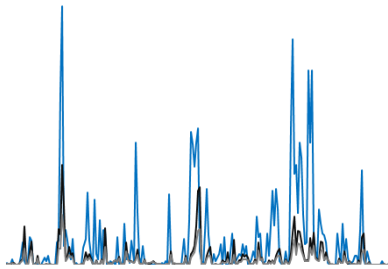
De modo geral, verifica-se que os dados do

radar usando a relação Z-R do Tenório estão mais próximos dos dados observados, comparados aos estimados a partir de Marshall e Palmer. Evidenciando que o uso de uma relação Z-R local é mais apropriado.

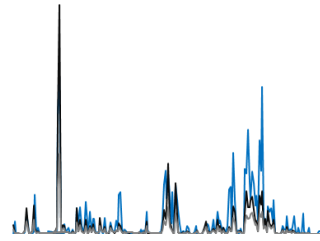
Outras questões analisadas, foram quanto a intensidade do evento sobre a Bacia, durante todo período, e as diferenças entre os valores da precipitação do radar e das estações, quando observada a distância entre as estações e o radar.

| Estação           | R <sup>2</sup> (ideal: 1) |          | PBIAS (ideal: 0) |          | RMSE (ideal: 0) |          | NSE (ideal: 1) |          |
|-------------------|---------------------------|----------|------------------|----------|-----------------|----------|----------------|----------|
|                   | Tenório                   | Marshall | Tenório          | Marshall | Tenório         | Marshall | Tenório        | Marshall |
| <b>270430215A</b> | 0,31                      | 0,34     | 68,8             | 80,97    | 1,43            | 4,23     | 0,11           | -0,04    |
| <b>270890701A</b> | 0,62                      | 0,72     | 47,74            | 69,57    | 3,05            | 3,81     | 0,56           | 0,32     |
| <b>39770000</b>   | 0,39                      | 0,43     | 32,66            | 60,92    | 3,08            | 3,45     | 0,35           | 0,19     |
| <b>270550701A</b> | 0,36                      | 0,39     | 31,58            | 60,02    | 3,11            | 2,56     | -0,33          | 0,1      |
| <b>39745000</b>   | 0,6                       | 0,6      | 51,32            | 68,98    | 2,83            | 3,44     | 0,47           | 0,21     |
| <b>270810501A</b> | 0,17                      | 0,2      | 47,94            | 64,98    | 2,68            | 2,69     | 0              | 0        |
| <b>39700000</b>   | 0,49                      | 0,53     | 48,4             | 65,29    | 2,18            | 2,5      | 0,39           | 0,19     |
| <b>39720000</b>   | 0,55                      | 0,6      | 69,38            | 75,3     | 2,06            | 2,22     | 0,22           | 0,1      |
| <b>260470001C</b> | 0,98                      | 0,98     | 24,61            | 29,95    | 2,14            | 2,14     | 0,33           | 0,27     |
| <b>39689000</b>   | 0,74                      | 0,97     | 52,28            | 65,95    | 1,68            | 2,07     | 0,5            | 0,25     |
| <b>260470001A</b> | 0,62                      | 0,72     | 46,11            | -62,34   | 1,53            | 1,83     | 0,5            | 0,28     |
| <b>39715000</b>   | 0,67                      | 0,7      | 62,9             | 72,9     | 2,09            | 2,41     | 0,37           | 0,16     |
| <b>39575000</b>   | 0,84                      | 0,84     | 60,32            | 69       | 1,51            | 1,77     | 0,47           | 0,27     |

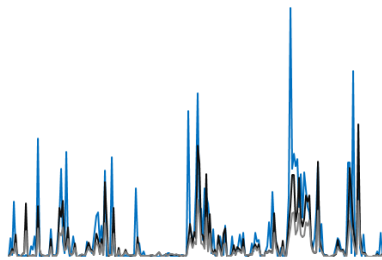
270430215A - Maceió (CEMADEN)



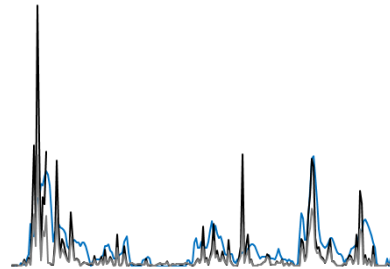
270890701A - Satuba (CEMADEN)



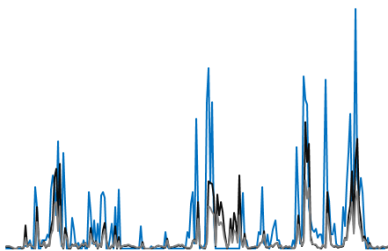
39770000 - Rio Largo (ANA)



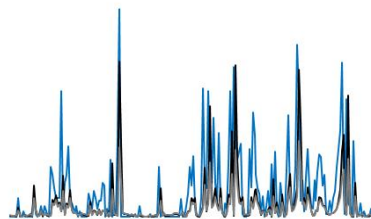
270550701A - Murici (CEMADEN)



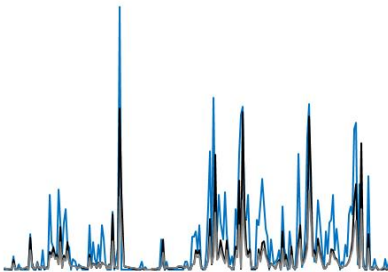
39745000 - União dos Palmares (ANA)



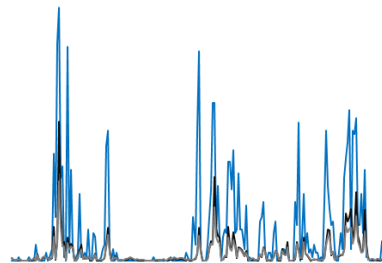
270810501A - Santana do Mundaú



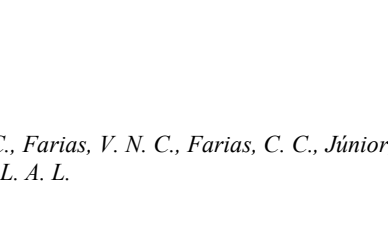
39700000 - Santana do Mundaú (ANA)



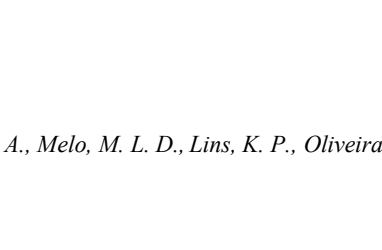
39720000 – São José da Laje (ANA)



260470001C - Correntes (CEMADEN)



39689000 - Correntes (ANA)



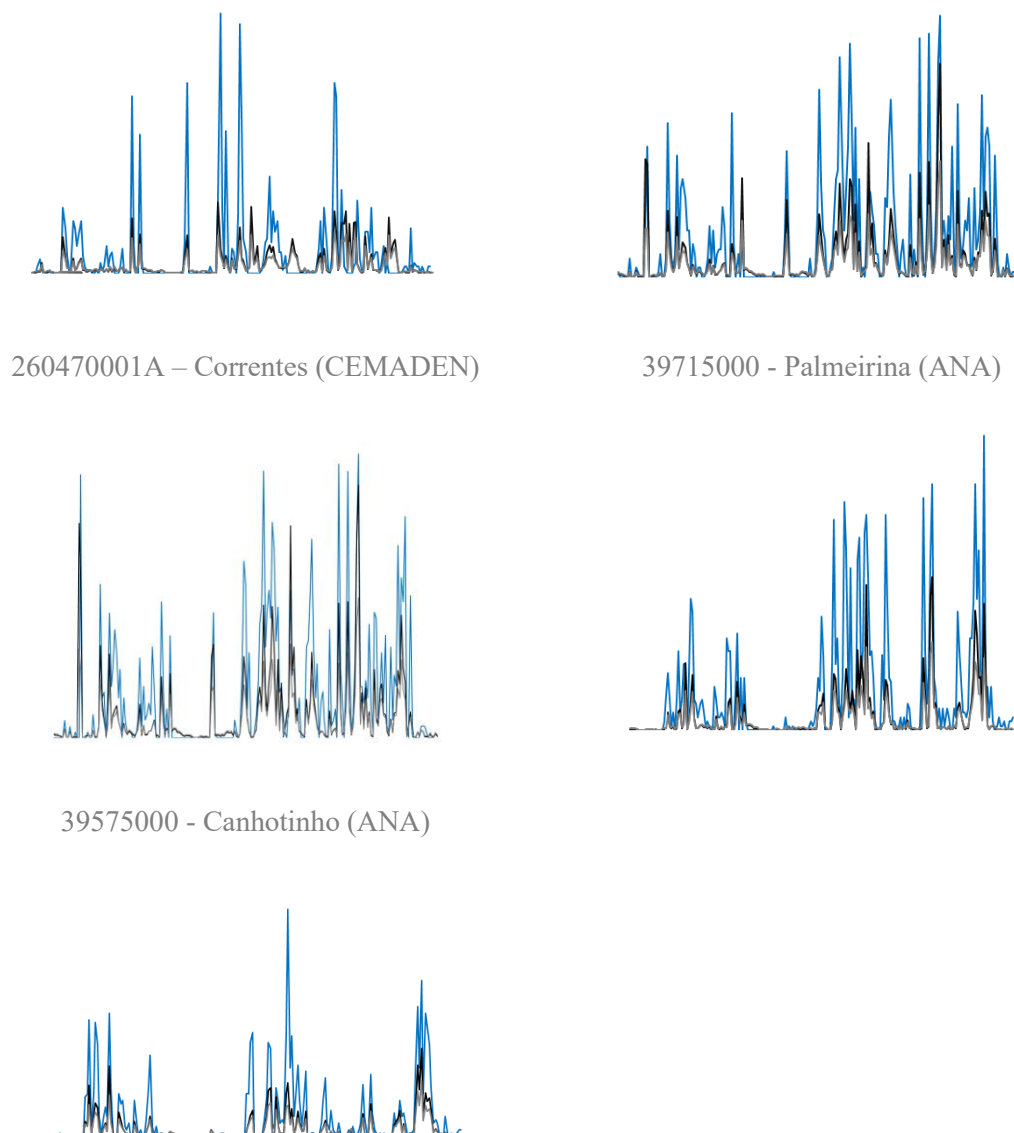


Figura 7 – Pluviogramas - estação *versus* radar.

Acerca do  $r^2$ , discretamente, apresenta maiores valores para Marshall e à medida que a distância do radar aumenta. Contrapondo alguns trabalhos que sugerem um melhor desempenho do radar diante da proximidade radar-estação, os melhores resultados foram para as estações de Pernambuco, distantes do radar de Alagoas. Ao observar os valores de precipitação nas estações, não houve constatação significativa de volume que justifique o resultado. Se faz necessária a verificação do desempenho com base na topografia, como pode ser visto na Figura 4, Pernambuco possui maior elevação comparado à Alagoas.

Conforme aludido por (Huff, 1967), por melhor que seja a relação determinada com base

em um posto pluviométrico, à medida que se caminha no sentido do afastamento deste posto, a precisão da relação Z-R é reduzida. Essa equação será tão mais representativa acerca chuva que cai sobre uma área, quanto mais postos essa área possuir, i.e., quanto mais densa for a rede de postos pluviométricos. Outra questão destacada pelo autor é que, à medida que o radar distância do local de interesse, maior é o impacto negativo na qualidade dos registros da chuva, através do fator de refletividade.

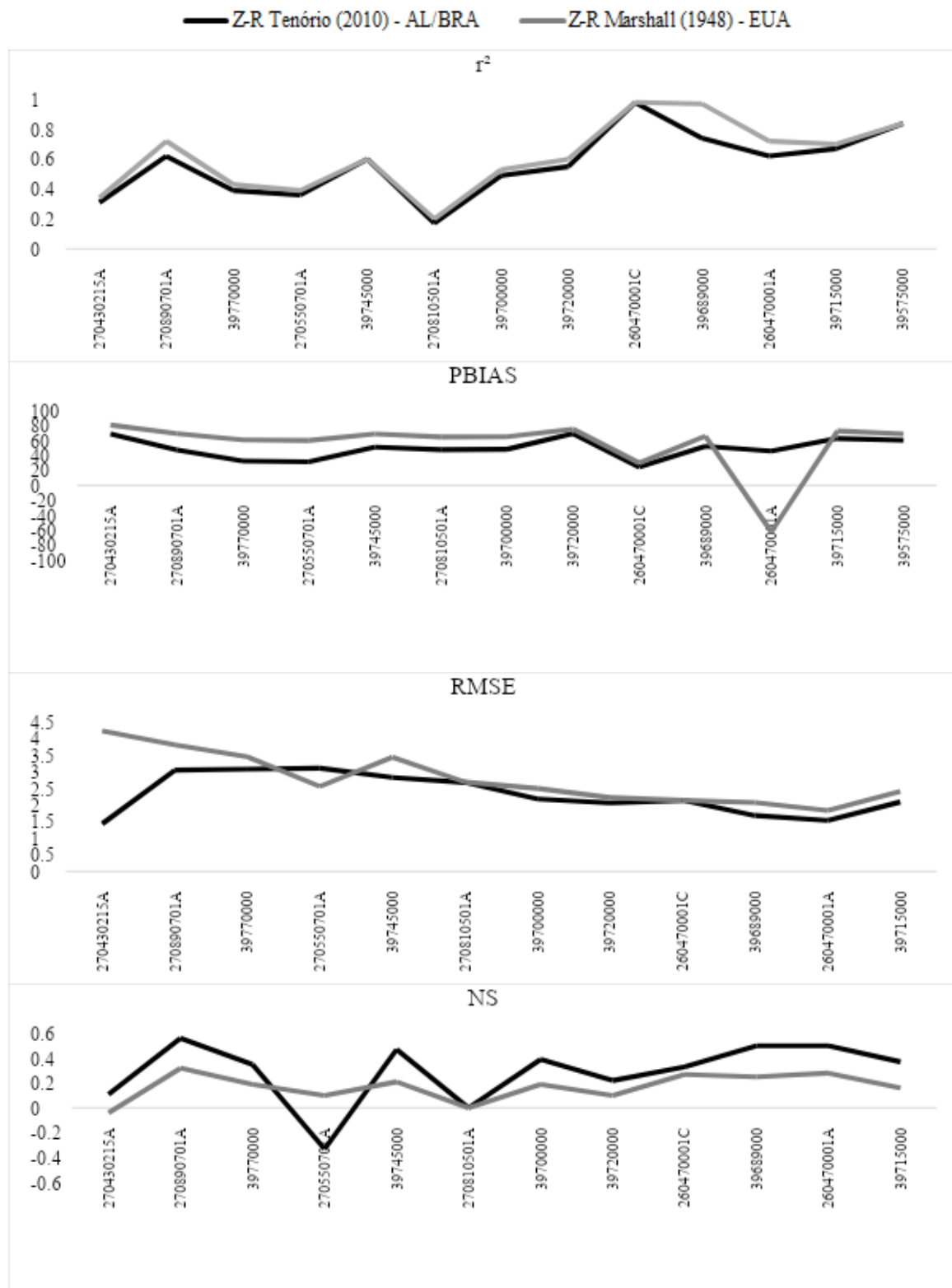


Figura 8 – Estatísticas de quantificação.

Realizando uma análise mais detalhada para a estação Correntes (260470001A) -por ser

uma das estações com melhor resultado- foram comparados os valores de chuva.



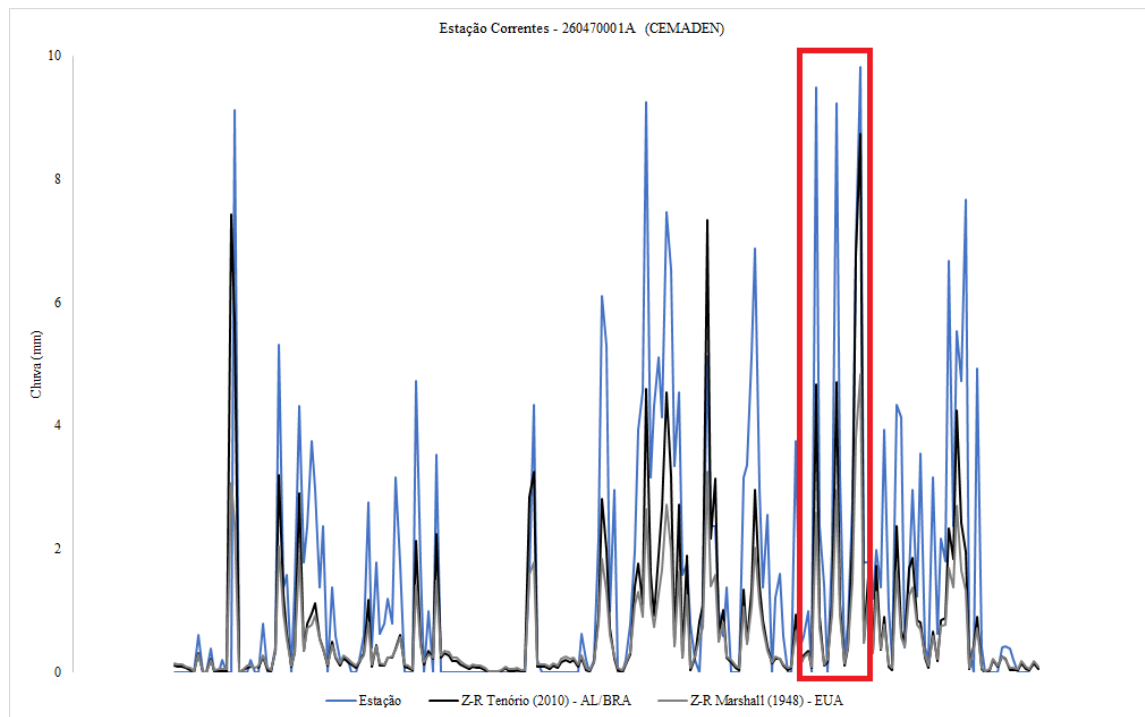


Figura 9. Destaque para a estação Correntes.

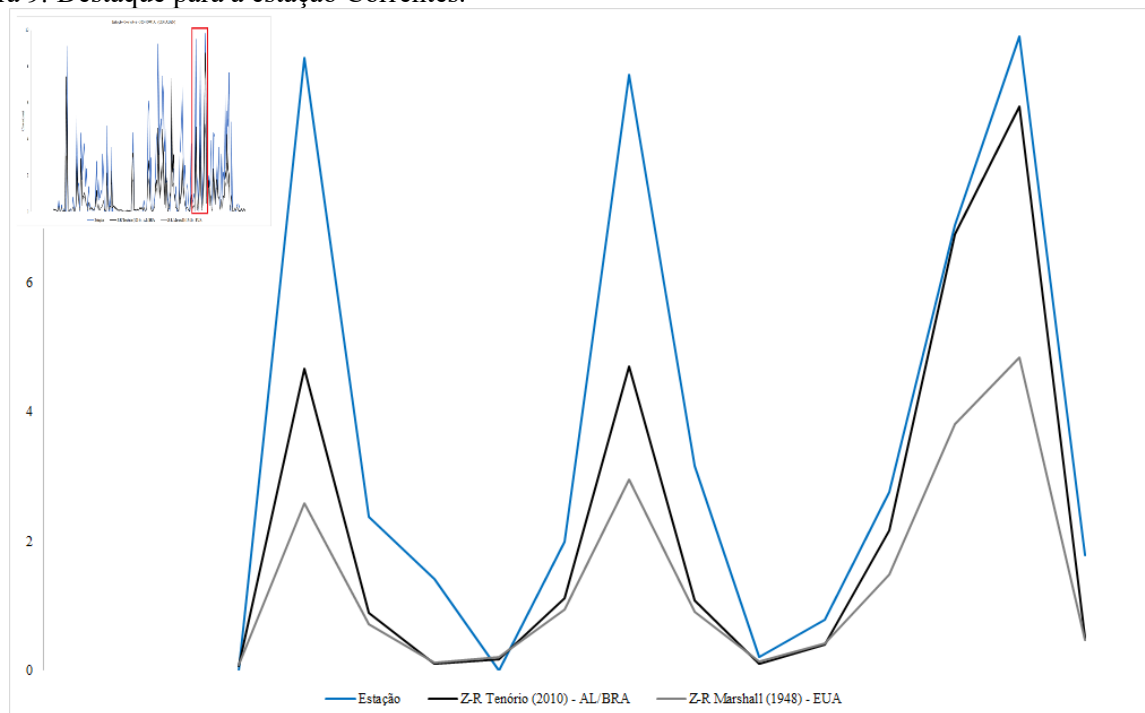


Figura 10 – Comparativo estação *versus* radar, detalhamento.

Obteve-se um coeficiente superior a 80% para ambas as relações Z-R. Acerca do PBIAS, que avalia a tendência dos valores estimados pelo radar em relação aos observados (estações), a Z-R de Alagoas apresentou valor positivo de 36,92, enquanto a relação desenvolvida para os EUA apresentou valor negativo de 60,55, indicando que a equação de Marshall possui maior subestimativa

da chuva observada na estação telemétrica. Na estação 26047001A, observa-se um PBIAS fortemente negativo (próximo de -80% a -90%), indicando forte superestimação nesse local e comportamento discrepante em relação ao padrão geral, carecendo de investigação específica (dados observados, falha local do modelo, problemas de escala ou parametrização)..

**Tabela 6.** Estatísticas de quantificação.

| Estação           | R <sup>2</sup> (ideal: 1) |          | PBIAS (ideal: 0) |          | RMSE (ideal: 0) |          | NSE (ideal: 1) |          |
|-------------------|---------------------------|----------|------------------|----------|-----------------|----------|----------------|----------|
|                   | Tenório                   | Marshall | Tenório          | Marshall | Tenório         | Marshall | Tenório        | Marshall |
| <b>260470001A</b> | 0,84                      | 0,85     | 36,92            | -60,55   | 0,51            | 0,79     | 0,98           | 0,95     |

As Figura 11 e Figura 12, apresentam os valores da comparação entre as precipitações estimadas pelo radar e as diferentes estações consideradas no estudo, para as estatísticas de probabilidade de detecção (POD) e razão de falso alarme (FAR).

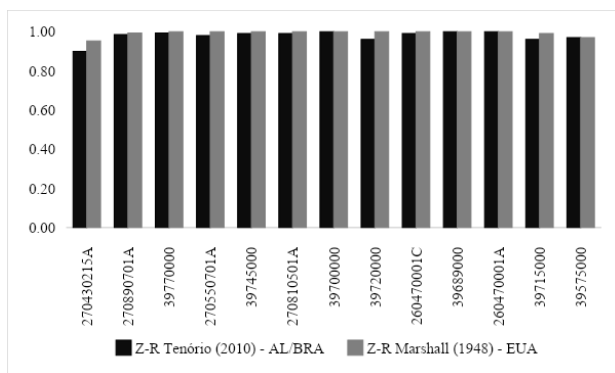


Figura 11. Probabilidade de Detecção (POD).

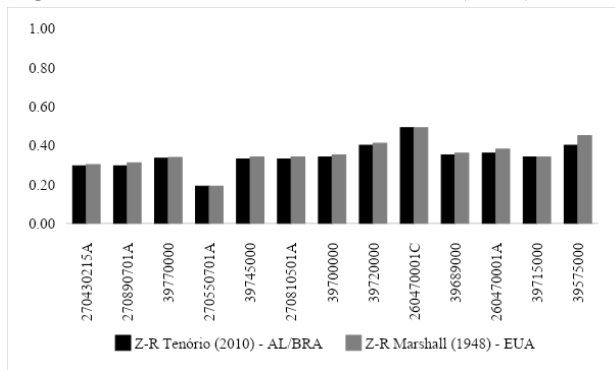


Figura 12. Razão de Falso Alarme (FAR).

É relevante aplicar as estatísticas de detecção para entendimento do radar em relação às estações pluviométricas, no entanto, comparar o desempenho entre as duas Z-R não traz análises significativas, tendo em vista que, o dado bruto é o mesmo, logo, haverá mudanças acerca do volume e não no registro.

Sobre a POD, observou-se que, com uma discreta diferença, a relação de Marshall demonstrou um desempenho superior. Todas as estações apresentaram POD superiores a 95% para as duas Z-R aplicadas.

Ao analisar a FAR, com exceção da

estação 270890701A, as estações apresentaram um FAR abaixo de 35% (onde atribui-se valor igual à 0 para uma perfeita estimativa).

É importante ressaltar que tanto a POD quanto a FAR, são influenciadas pelos diferentes mecanismos de medição entre o radar e as estações. Enquanto o radar estima a precipitação média em um volume, a estação obtém a média dos registros de chuva em um ponto específico, representativo da área em estudo.

Lakshmi, Kir e Fang (2025) analisaram a acurácia de dados de precipitação e a detecção de eventos extremos para avaliação de risco de inundação. De acordo com o trabalho, a capacidade de detecção varia significativamente dependendo da escala temporal:

Em estudos mencionados anteriormente, é discutida a degradação da precisão das estimativas de radar à medida que a distância entre o local de interesse para quantificar a chuva e o radar aumenta. No entanto, no presente estudo, não foi observada uma relação direta entre o desempenho das estimativas de precipitação por radar e a distância entre as estações meteorológicas e o radar. É importante destacar, no entanto, que devido ao número limitado de estações nesse estudo, não se pode descartar completamente a possibilidade de existência dessa relação.

Overeem et al. (2025) avaliam o produto de precipitação radar ajustado por pluviômetros e comparam acumulações radar vs pluviômetros, discutindo o viés sistemático/degradação de precisão espacial. Já Hartanto et al. (2024) apresentam um estudo específico que compara estimativas de chuva de radar com pluviômetros em diferentes distâncias, usando estações automáticas relatadas para avaliar estimativas radar versus pluviômetros.

## Conclusão

Neste estudo, foi verificado o desempenho do radar com a Z-R específica/local de características gerais (estratiforme/convectiva), sugere-se a investigação com o uso da Z-R

específica local para precipitações convectivas. No estudo Tenório (2010) foram apresentadas outras relações Z-R para Alagoas.

O principal ponto de ampliação para uma análise mais robusta se dará através da avaliação de outros eventos com as mesmas características sinóticas, a fim de identificar o comportamento das relações Z-R.

Outro fator relevante é usar uma rede de estações pluviométricas mais densa e com boa distribuição espacial a fim de avaliar o comportamento com relação à elevação.

No presente trabalho, não foram explorados diferentes tipos de processamento dos dados brutos, a exemplo do emprego dos produtos hidrológicos disponibilizados pelo software do radar. Recomenda-se que seja realizado o processamento empregando a metodologia Dual Polarization Surface Rainfall Intensity (DPSRI), pois a dupla polarização por si só já traz ganhos.

O estudo de Voormansik et. al. (2021) com radares meteorológicos de dupla polarização indica que a incorporação de variáveis polarimétricas melhora a acurácia das estimativas em comparação com produtos baseados exclusivamente na refletividade horizontal. Relações de chuva  $R(Z)$ ,  $R(KDP)$ ,  $R(KDP, ZDR)$ ,  $R(Z, ZDR)$  que combinam refletividade horizontal com variáveis polarimétricas, apresentam desempenho superior às estimativas baseadas unicamente na refletividade, refletindo melhorias significativas na captura das propriedades microfísicas da chuva e na redução dos erros de precipitação estimada (Voormansik et. al., 2021).

Dinh et al., (2023), aplicam abordagens modernas (incluindo variáveis e *frameworks* dinâmicos de Z-R) e compara a performance com métodos tradicionais, ressaltando a importância de lidar com incertezas associadas à variabilidade espacial e temporal da chuva. Já Voormansik et. al. (2021) comparam produtos de QPE baseados em radar polarimétrico ( $R(ZH, KDP)$ ) com medições de pluviômetros, demonstrando como a combinação de variáveis melhora a estimativa e reduz incertezas quando aplicada a séries longas de dados.

Acerca da metodologia para transformar os dados brutos (variáveis polarimétricas) no produto chuva, existem infinitas possibilidades que vão desde a Z-R empregada, polarização simples ou dupla, até o ângulo e altura de elevação do feixe do radar. Recomenda-se que, para o mesmo evento sejam empregados diferentes tipos de processamento a fim de avaliar o desempenho deles.

Recomenda-se ainda, a atualização das Z-R desenvolvidas para Alagoas, tendo em vista que elas foram concebidas em 2010, e que, atualmente tem-se outras características climáticas e uma nova rede pluviométrica.

### Agradecimentos

Ao Sistema de Radar Meteorológico de Alagoas (SIRMAL), pela permissão de uso do *Software* Selex's Rainbow® 5 para o processamento dos dados do radar meteorológico.

Os autores agradecem, ainda, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento do Projeto de Pesquisa Rede Alagoas-Pernambuco de monitoramento e alerta de inundações urbanas – REALPE, sob número 406550/2022-0, como também pela Bolsa Modalidade - Categoria: SET-F, concedida ao terceiro autor.

### Referências

- APAC, A. P. de Á. e C. (2017). Boletim do Clima - Síntese Climática. Em Nº 5 - Maio de 2017. [www.apac.pe.gov.br](http://www.apac.pe.gov.br)
- Baez-Villanueva, O. M., Zambrano-Bigiarini, M., Ribbe, L., Nauditt, A., Giraldo-Osorio, J. D., & Thinh, N. X. (2018). Temporal and spatial evaluation of satellite rainfall estimates over different regions in Latin-America. *Atmospheric Research*, 213, 34–50. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.05.011>
- Bárdossy, A., & Pegram, G. (2017). Combination of radar and daily precipitation data to estimate meaningful sub-daily point precipitation extremes. *Journal of Hydrology*, 544, 397–406. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.11.039>
- Barszcz, Mariusz Paweł; Stańczyk, Tomasz; Brandyk, Andrzej. Zależności ZR dla różnych typów opadów jako narzędzie do radarowego szacowania wielkości opadów. *Polish Geographical Review/Przegląd Geograficzny*, v. 95, n. 2, 2023.
- Barszcz, Mariusz Paweł; Kaznowska, Ewa. Z-R Relationships for Different Precipitation Types and Events from Parsivel Disdrometer

- Data in Warsaw, Poland. Remote Sensing, v. 17, n. 13, p. 2271, 2025.
- Bertoncini, André; Pomeroy, John W. Quantificação da incerteza espaço-temporal e altitudinal da rede de pluviômetros nas Montanhas Rochosas Canadenses. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 29, n. 4, p. 983-1000, 2025.
- Biggs, E. M., & Atkinson, P. M. (2011). A comparison of gauge and radar precipitation data for simulating an extreme hydrological event in the Severn Uplands, UK. *Hydrological Processes*, 25(5), 795–810. <https://doi.org/10.1002/hyp.7869>
- Brandes, E. A. (1975). Optimizing rainfall estimates with the aid of radar. *Journal of Applied Meteorology*.
- Cabral, S. L. ;, Sakuragi, J. ;, & Silveira, C. S. (2016). Incertezas e erros na estimativa de vazões usando modelagem hidrológica e precipitação por RADAR. *Revista Ambiente & Água*.
- Calheiros, R. V., & Zawadzki, I. (1986). Reflectivity-Rain Rate Relationships for Radar Hydrology in Brazil. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 26, 118–132.
- Chumchean, S., Seed, A., & Sharma, A. (2006). Correcting of real-time radar rainfall bias using a Kalman filtering approach. *Journal of Hydrology*, 317(1), 123–137. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.05.013>
- Dawson, C. W., Abrahart, R. J., & See, L. M. (2010). HydroTest: Further development of a web resource for the standardised assessment of hydrological models. *Environmental Modelling & Software*, 25(11), 1481–1482. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2009.01.001>
- Dinh, Thi-Linh et al. A new approach for quantitative precipitation estimation from radar reflectivity using a gated recurrent unit network. *Journal of Hydrology*, v. 624, p. 129887, 2023.
- Dzwonkowski, Karol et al. Analysis of Precipitation Totals Based on Radar and Rain Gauge Data. *Remote Sensing*, v. 17, n. 13, p. 2157, 2025.
- Emidio, Z. P. O., & Calheiros, R. V. (2009). Quantificação da chuva com dados de radar meteorológico em áreas cultivadas, através de três relações Z-R. XVI Congresso Brasileiro de Agrometeorologia.
- Fragoso Júnior, C. R., Pedrosa, V. A., & Souza, V. C. (2010). Reflexões Sobre a Cheia de Junho de 2010 nas Bacias do Rio Mundaú e Paraíba. XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 1–20. [http://www.abrh.org.br/SGCv3/UserFiles/Su/marios/d8ce71c0999a0385cf67e71a3561c7ee\\_09ac740e158cfc1b4f319171ee670537.pdf](http://www.abrh.org.br/SGCv3/UserFiles/Su/marios/d8ce71c0999a0385cf67e71a3561c7ee_09ac740e158cfc1b4f319171ee670537.pdf)
- Gama, A., & Madeiro, C. (2017). Chuvas deixam mais de 40 mil desalojados e 31 cidades afetadas em AL e PE.
- Gourley, J. J., Giangrande, S. E., Hong, Y., Flamig, Z. L., Schuur, T., & Vrugt, J. A. (2010). Impacts of Polarimetric Radar Observations on Hydrologic Simulation. *Journal of Hydrometeorology*, 11(3), 781–796. <https://doi.org/https://doi.org/10.1175/2010JHM1218.1>
- Hartanto et al. Spatial evaluation rainfall estimation on weather radar using Marshall-Palmer reflectivity-rainfall rate in Banten. *Journal of Water and Land Development*, n. 62, p. 193-200, 2024.
- Huff, F. A. (1967). The adjustment of radar estimates of storm mean rainfall with rain gage data. *Em Journal of Applied Meteorology* (Vol. 6, p. 52–56).
- Kim, T. J., Kwon, H. H., & Kim, K. B. (2021). Calibration of the reflectivity-rainfall rate (Z-R) relationship using long-term radar reflectivity factor over the entire South Korea region in a Bayesian perspective. *Journal of Hydrology*, 593. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125790>
- Kim, Tae-Jeong; Kwon, Hyun-Han & Lima, C. (2018). A Bayesian partial pooling approach

- to mean field bias correction of weather radar rainfall estimates: Application to Osungsan weather radar in South Korea. *Journal of Hydrology*, 565, 14–26. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.07.082>
- Kim, Tae-Jeong; Kwon, Hyun-Han; Kim, Kue Bum. Calibration of the reflectivity-rainfall rate (ZR) relationship using long-term radar reflectivity factor over the entire South Korea region in a Bayesian perspective. *Journal of Hydrology*, v. 593, p. 125790, 2021.
- Kim, Deokhwan et al. Multi-Model Comparison of Hydrologic Simulation Performance Using DWAT, PRMS, and TANK Models. *Water*, v. 18, n. 2, p. 145, 2026.
- Lakshmi, Venkataraman; Kir, Elif Gulen; Fang, Bin. Precipitation data accuracy and extreme rainfall detection for flood risk analysis in the Akçay Sub-Basin. *Remote Sensing*, v. 17, n. 18, p. 3199, 2025.
- Li, Jianzhu et al. Flood forecasting based on radar precipitation nowcasting using U-net and its improved models. *Journal of Hydrology*, v. 632, p. 130871, 2024.
- Marshall, J. S., & Palmer, W. M. (1948). The distribution of raindrops with size. *Em Journal of Meteorology* (Vol. 5, p. 165–166). [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1948\)005<0165:TDORWS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1948)005<0165:TDORWS>2.0.CO;2)
- Mekonnen, Elias Fiseha; Getu, Gebremariam Adane. Hydrological parameter sensitivity analysis for water evaluation and planning model calibration in the Borkena River Sub-basin. *Discover Water*, v. 5, n. 1, p. 45, 2025.
- Miguel, B. H., & Rennó, C. D. (2020). Validation of precipitation estimates by weather radar data in a river basin in the central region of São Paulo state, Brazil. *Anuario do Instituto de Geociencias*, 43(2), 325–339. [https://doi.org/10.11137/2020\\_2\\_325\\_339](https://doi.org/10.11137/2020_2_325_339)
- Nash, J. E., & Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I—A discussion of principles. *Journal of hydrology*, 10, 282–290.
- Osman, Noor Shazwani; Tahir, Wardah. Radar Quantitative Precipitation Estimation (QPE) Calibration Methods: A Systematic Literature Review. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, v. 14, n. 5, p. 16185–16192, 2024.
- Overeem, Aart et al. The Dutch real-time gauge-adjusted radar precipitation product. *Earth System Science Data Discussions*, v. 2025, p. 1–39, 2025.
- Qiu, Xiaobin et al. Quality control of the composite radar quantitative precipitation estimation product for Great Britain. *Journal of Hydrology*, p. 134755, 2025.
- Rendon, S., Vieux, B., & Pathak, C. (2010). Estimation of regionally specific Z-R relationships for radar-based hydrologic prediction. In *Proceedings of the World Environmental and Water Resources Congress*, 2, 4668–4680. [https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1061/41114\(371\)474](https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1061/41114(371)474)
- Rosenhoover, Marshall et al. Improving Doppler Radar Precipitation Prediction with Citizen Science Rain Gauges and Deep Learning. *Sensors (Basel, Switzerland)*, v. 25, n. 12, p. 3719, 2025.
- Schulz, Karen; Niemann, Andre; Mietzel, Thorsten. Framework for data-driven modelling in an imbalanced data distribution scenario: towards semi-automated data correction for classical and low-cost precipitation sensor data. *Digital Water*, v. 3, n. 1, p. 2577427, 2025.
- Suk, M.-K., Chang, K.-H., Cha, J.-W., & Kim, K.-E. (2013). Operational Real-Time Adjustment of Radar Rainfall Estimation over the South Korea Region. *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 91(4), 545–554. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2013-409>
- Tenório, R. S., Moraes, M. cristina da silva, & Sauvageot, H. (2012). Raindrop size distribution and radar parameters in coastal tropical rain systems of northeastern Brazil. *Journal of Applied Meteorology and*

- Climatology, 51(11), 1960–1970. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-11-0121.1>
- Tenório, S. R., Moraes, M. C. . S., & Kwon, B. H. (2010). Raindrop Distribution in the Eastern Coast of Northeastern Brazil Using Disdrometer Data. 254, 415–426. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862010000400001>
- Voormansik, Tanel et al. Evaluation of the dual-polarization weather radar quantitative precipitation estimation using long-term datasets. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 25, n. 3, p. 1245-1258, 2021.
- Verdelho, Fernanda F. et al. Quantitative precipitation estimation using weather radar data and machine learning algorithms for the southern region of Brazil. *Remote Sensing*, v. 16, n. 11, p. 1971, 2024.
- Vrugt, J. A., ter Braak, C. J. F., Gupta, H. V., & Robinson, B. A. (2009). Equifinality of formal (DREAM) and informal (GLUE) Bayesian approaches in hydrologic modeling? *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 23(7), 1011–1026. <https://doi.org/10.1007/s00477-008-0274-y>
- Zhang, Zhe et al. Dual-Polarization Radar Quantitative Precipitation Estimation (QPE): Principles, Operations, and Challenges. *Remote Sensing*, v. 17, n. 21, p. 3619, 2025.
- Zambrano-Bigiarini, M., Nauditt, A., Birkel, C., Verbist, K., & Ribbe, L. (2017). Temporal and spatial evaluation of satellite-based rainfall estimates across the complex topographical and climatic gradients of Chile. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(2), 1295–1320. <https://doi.org/10.5194/hess-21-1295-2017>
- Zanchetta, A. D. L., & Coulibaly, P. (2020). Recent advances in real-time pluvial flash flood forecasting. *Em Water (Switzerland)* (Vol. 12, Número 2). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/w12020570>