

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL (PEC)**João Gama de Araujo Velez****Título: "Dados de radar meteorológico aplicados a uma modelagem chuva-vazão."**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Saneamento e Meio Ambiente.

Aprovada em 26/02/2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Celso Bandeira de Melo Ribeiro - Orientador e presidente da banca
Universidade Federal de Juiz de Fora

Profa. Dra. Aline Sarmiento Procópio - Membro titular interno
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Otto Corrêa Rotunno Filho - Membro titular externo
Universidade Federal do Rio de Janeiro

Juiz de Fora, 27/02/2025.



Documento assinado eletronicamente por **Celso Bandeira de Melo Ribeiro, Professor(a)**, em 27/02/2025, às 16:12, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Otto Corrêa Rotunno Filho, Usuário Externo**, em 28/02/2025, às 16:17, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Aline Sarmiento Procópio, Professor(a)**, em 28/02/2025, às 18:54, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no Portal do SEI-Uffj (www2.uffj.br/SEI) através do ícone Conferência de Documentos, informando o código verificador **2271244** e o código CRC **C9906969**.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE
FORA PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA CIVIL**

JOÃO GAMA DE ARAUJO VELEZ

**Dados de radar meteorológico aplicados a
uma modelagem chuva-vazão**

JUIZ DE FORA – MG 2025

João Gama de Araujo Velez

**Dados de radar meteorológico aplicados a
uma modelagem chuva-vazão**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Juiz de Fora, como requisito necessário à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Saneamento e Meio Ambiente. Linha de Pesquisa: Monitoramento e Gestão de Recursos Naturais.

Orientador: Prof. Dr. Celso Bandeira de Melo Ribeiro

Juiz de Fora

2025

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Velez, João.

Dados de radar meteorológico aplicados a uma modelagem chuva-vazão / João Velez. -- 2025.

105 p.

Orientador: Celso Ribeiro

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2025.

1. Radar Meteorológico. 2. Modelagem Hidrológica. 3. Precipitação. I. Ribeiro, Celso, orient. II. Título.

João Gama de Araujo Velez

**Dados de radar meteorológico aplicados a
uma modelagem chuva-vazão**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós
graduação em Engenharia Civil, da
Universidade Federal de Juiz de Fora como
requisito parcial à obtenção do grau de Mestre
em Engenharia Civil. Área de concentração:
Saneamento e Meio Ambiente

Aprovada em 26 de Janeiro de 2025

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Celso Bandeira de Melo Ribeiro - Orientador e Presidente da Banca
Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Otto Corrêa Rotunno Filho
Universidade Federal do Rio de Janeiro

Profª. Dra. Aline Sarmento Procópio
Universidade Federal de Juiz de fora

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha profunda gratidão a todas as pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização desta dissertação. Este trabalho é fruto de um esforço coletivo, e não seria possível sem o apoio, orientação e incentivo de diversos indivíduos que fizeram parte dessa jornada.

Em primeiro lugar, agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Celso Bandeira de Melo Ribeiro, pela dedicação, paciência e sabedoria ao longo de todo o processo. Sua orientação foi fundamental para o desenvolvimento deste trabalho, e sou imensamente grato por sua disponibilidade, críticas construtivas e incentivo constante.

Aos membros da banca examinadora, Prof. Dr. Otto Corrêa Rotunno Filho e Profa. Dra. Aline Sarmento Procópio, meu sincero agradecimento por aceitarem participar desta etapa tão importante e por contribuírem com suas valiosas considerações e sugestões.

Um agradecimento especial ao Prof. Dr. Marconi, Coordenador do Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, não apenas pelo suporte acadêmico, mas também pelo apoio emocional e pela alegria que sempre transmitiu, tornando os momentos desafiadores mais leves e motivadores.

Às professoras Maria Helena Gomes e Renata Pereira, do curso de Engenharia Ambiental da UFJF, meu profundo reconhecimento. À professora Maria Helena, por todo o apoio desde a graduação, e à professora Renata, pela paciência, orientação e pelos "puxões de orelha" quando necessários, que foram essenciais para o meu crescimento acadêmico e pessoal.

À UNESP (Universidade Estadual Paulista), expresse minha sincera gratidão, em especial ao IPMET (Centro de Meteorologia de Bauru), pela disponibilização dos dados de radar meteorológico utilizados nesta dissertação, os quais foram fundamentais para a realização deste trabalho.

Ao meu namorado, Cleiton Antonio dos Santos Motta, agradeço pelo apoio emocional incondicional, pela paciência e por estar ao meu lado em todos os momentos, especialmente nos mais desafiadores. Sua presença foi um dos pilares que me permitiu seguir em frente.

Agradeço também à bolsa do projeto "P&D - Previsibilidade de Bacias", em parceria com a ArcelorMittal, e à Geane, responsável pelo projeto, pelo suporte e pela oportunidade de contribuir com pesquisas tão relevantes. À Iramaia Moraes, técnica laboratorista do LAQUA/UFJF, meu carinho e gratidão por toda a assistência, paciência e apoio emocional, além de sua alegria e prestatividade, que sempre tornaram o ambiente mais agradável.

Por fim, mas não menos importante, agradeço a todos os colegas da bolsa da ArcelorMittal, com quem pude trocar ideias, resolver problemas e compartilhar experiências. Em especial, ao Matheus, pela parceria e colaboração ao longo deste percurso.

Este trabalho é dedicado a todos que, de alguma forma, contribuíram para a sua realização. Muito obrigado por fazerem parte desta jornada.

Resumo

Esta dissertação teve como objetivo principal utilizar dados do radar meteorológico de Bauru para estimar a precipitação e validar esses dados com base em estações pluviométricas selecionadas na região da bacia do rio Piracicaba. Inicialmente, os dados brutos do radar foram processados e convertidos em estimativas de precipitação, utilizando técnicas de correção e filtragem para reduzir incertezas. Em seguida, essas estimativas foram validadas por meio de comparações com dados observacionais de estações pluviométricas, utilizando índices estatísticos como o coeficiente de correlação de Pearson (r), o erro médio absoluto (MAE), a raiz do erro quadrático médio (RMSE) e o viés percentual (PBIAS). Os resultados indicaram uma boa correlação entre os dados do radar e as estações pluviométricas, com valores de r próximos a 0,85, RMSE de 12 mm/dia e PBIAS inferior a 10%, demonstrando a confiabilidade dos dados radar. Com os dados validados, procedeu-se à calibração de um modelo hidrológico para a bacia do rio Piracicaba, utilizando as estimativas de precipitação derivadas do radar como entrada. O modelo foi ajustado para simular o comportamento hidrológico da bacia, considerando variáveis como vazão e escoamento superficial. Por fim, os resultados do modelo foram comparados com os dados de precipitação do radar, avaliando-se a consistência e a eficácia da integração desses dados em estudos hidrológicos. Os resultados demonstraram que o uso de dados radar pode melhorar significativamente a precisão das estimativas de precipitação e, conseqüentemente, a qualidade das simulações hidrológicas. Além disso, a metodologia desenvolvida mostrou-se promissora para aplicações em monitoramento e previsão de eventos extremos, como cheias e secas, contribuindo para a gestão sustentável de recursos hídricos. Este trabalho reforça a importância da integração de tecnologias de sensoriamento remoto, como radares meteorológicos, em modelos hidrológicos, destacando seu potencial para aprimorar a previsibilidade e o planejamento em bacias hidrográficas.

Palavras-chave: Radar meteorológico, Modelagem hidrológica, Precipitação, Bacia do Piracicaba.

Abstract

This dissertation aimed to utilize data from the Bauru meteorological radar to estimate precipitation and validate these data based on selected rain gauge stations in the Piracicaba River basin. Initially, raw radar data were processed and converted into precipitation estimates using correction and filtering techniques to reduce uncertainties. These estimates were then validated through comparisons with observational data from rain gauge stations, employing statistical indices such as the Pearson correlation coefficient (r), mean absolute error (MAE), root mean square error (RMSE), and percent bias (PBIAS). The results indicated a strong correlation between radar data and rain gauge measurements, with r values close to 0.85, RMSE of 12 mm/day, and PBIAS below 10%, demonstrating the reliability of radar-derived precipitation. With the validated data, a hydrological model for the Piracicaba River basin was calibrated, using the radar-based precipitation estimates as input. The model was adjusted to simulate the hydrological behavior of the basin, considering variables such as flow rate and surface runoff. Finally, the model's results were compared with the radar precipitation data, evaluating the consistency and effectiveness of integrating radar data into hydrological studies. The results demonstrated that the use of radar data can significantly improve the accuracy of precipitation estimates and, consequently, the quality of hydrological simulations. Furthermore, the developed methodology proved promising for applications in monitoring and predicting extreme events, such as floods and droughts, contributing to the sustainable management of water resources. This work reinforces the importance of integrating remote sensing technologies, such as meteorological radars, into hydrological models, highlighting their potential to enhance predictability and planning in river basins.

Keywords: Meteorological radar, Hydrological modeling, Precipitation, Piracicaba Basin.

SUMÁRIO

Capítulo 1: Introdução.....	9
Capítulo 2: Revisão Bibliométrica.....	12
2.1. Metodologia.....	12
2.2. Resultados e Discussões (Análise Global).....	15
2.2.1. Análise temporal.....	15
2.2.2. Análise de coautoria: Autores.....	16
2.2.3. Análise de Citações.....	18
2.2.4. Análise de coautoria: Países.....	20
2.2.5. Análise de concorrência: Palavras chaves.....	22
2.2.6. Análise de concorrência: Temática.....	23
4.3. Resultados e Discussões (Trabalhos relacionados a modelagem).....	24
2.3.1 Análise temporal.....	25
2.3.2. Análise de coautoria: Autores.....	25
2.3.3. Análise de Citações.....	27
2.3.4. Análise de coautoria: Países.....	29
2.3.5. Análise de concorrência: Palavras chaves.....	29
2.4. Conclusões.....	31
Capítulo 3: Revisão Bibliográfica.....	33
3.1. Utilização de dados de precipitação de radares meteorológicos e suas implicações.....	33
3.2. Revisão e princípios de funcionamento dos radares meteorológicos.....	40
3.3. Revisão histórica acerca de radares meteorológicos.....	41
3.4 Princípios de funcionamento do radar.....	43
3.4.1. Princípio matemático e equação do radar.....	46
3.4.2. Interferências e Atenuações.....	50
3.4.3. Principais Produtos de Radar: O CAPPI a 3,5 km.....	52
3.4.4. Produtos de radar.....	53
3.5. Modelagem hidrológica utilizando HEC-HMS.....	54
3.5. Conclusões.....	57
Capítulo 4: Avaliação da precipitação obtida pelo radar de Bauru.....	59
4.1. Materiais e métodos.....	59
4.1.1. Avaliação estatística dos dados do radar.....	63
4.1.2. Avaliação estatística dos dados do radar.....	64
4.2. Resultados e discussões.....	65
4.2.1. Calheiros.....	66
4.2.2. Marshall Palmer.....	68
4.2.3. Jones.....	70
4.2.4. Análise conjunta das relações Z-R.....	71
4.3. Conclusões.....	74
Capítulo 5: Modelagem no HEC-HMS.....	76

5.1. Área de Estudo.....	76
5.2. Materiais e métodos.....	77
5.2.1. Tempo de Concentração.....	79
5.2.2. Método de perdas.....	80
5.2.3. Método de transformação.....	80
5.2.4. Método de Escoamento.....	82
5.2.5. Calibração.....	83
5.2.6. Preparação e entrada dos dados de radar no modelo.....	86
5.3. Resultados e Discussão.....	86
5.3.1 Parametrização do modelo HEC-HMS.....	86
5.3.2 Calibração do modelo HEC-HMS.....	87
5.3.3 Entrada de Radar no HEC-HMS.....	89
5.4. Conclusões.....	91
Capítulo 6: Conclusão.....	93
6.1 Recomendações para trabalhos futuros.....	94
6.1.1 Ampliação do Período de Análise.....	94
6.1.2 Comparações Baseadas em Eventos.....	94
6.1.3 Avaliação da Relação Z-R de Calheiros.....	94
6.1.4 Métodos de Mesclagem de Dados de Radar e Pluviômetros.....	95
6.1.5 Uso de Dados de Radar em Formato de Grade.....	95
6.1.6 Estudos em Outras Bacias e Nowcasting.....	95
6.1.7 Análise de Erros Específicos.....	95
6.1.8 Planejamento Urbano e Microdrenagem.....	96
6.1.9 Criação de um Banco Nacional de Dados de Radar.....	96
7. Referências.....	97

Capítulo 1: Introdução

A gestão eficiente dos recursos hídricos é um desafio atual em um mundo cada vez mais preocupado com a sustentabilidade ambiental e o desenvolvimento industrial. Nesse contexto, o monitoramento da vazão desempenha um papel fundamental tanto na preservação dos ecossistemas naturais quanto na garantia da operação otimizada de processos industriais e de diversas outras atividades que acompanham o desenvolvimento da sociedade. A vazão, definida como a quantidade de água que passa por uma seção específica em um determinado período de tempo, é um indicador crucial para entender e gerenciar os recursos hídricos, quer seja para abastecimento humano, irrigação agrícola, e produção de energia hidrelétrica, quer seja para o controle de cheias e inundações (Medeiros, De Lucena, 2023).

A complexidade dos sistemas hídricos, influenciada por fatores multifacetados como topografia, vegetação, atividades humanas e mudanças climáticas, demanda abordagens avançadas para compreensão e gerenciamento. Nesse contexto, os modelos hidrológicos desempenham um papel crucial. Esses modelos, baseados em princípios físicos e matemáticos, permitem simular o comportamento dos fluxos de água em diversas condições, desde o escoamento em rios e canais até a infiltração no solo e a recarga de aquíferos (Pontes, *et al.* 2015).

A utilização de softwares especializados na modelagem hidrológica oferece uma vantagem significativa, permitindo a análise e a interpretação eficiente de dados complexos, bem como a previsão de cenários futuros. A capacidade de simular diferentes condições e cenários possibilita uma tomada de decisão mais informada em relação ao gerenciamento de recursos hídricos, contribuindo para a mitigação de riscos e a otimização de investimentos em infraestrutura hídrica.

Além disso, a integração de dados provenientes de diversas fontes, como estações de monitoramento de vazão, sensores meteorológicos e imagens de radares meteorológicos, amplia a precisão e a abrangência dos modelos hidrológicos. As imagens de radares meteorológicos, em particular, fornecem informações cruciais sobre a distribuição e intensidade das precipitações em uma determinada região, em tempo real. Esses dados são essenciais para a previsão de eventos hidrológicos extremos, como enchentes e secas, permitindo a adoção de medidas preventivas e a implementação de estratégias de adaptação mais eficazes (Vanelli *et al.*, 2020).

O conhecimento das vazões dos rios é essencial tanto para a segurança hídrica quanto para o setor industrial em geral. Diversos tipos de indústrias dependem significativamente do acesso a recursos hídricos para operações fundamentais, como refrigeração de equipamentos e processos produtivos. O monitoramento preciso das vazões dos rios próximos às instalações industriais garante um suprimento estável de água para suas atividades, contribui para evitar conflitos com comunidades locais e reduz possíveis impactos ambientais. Além disso, a capacidade de realizar previsões em tempo real e de longo prazo sobre as vazões dos rios é igualmente importante. Essas previsões permitem que as indústrias planejem adequadamente suas operações, antecipem eventos climáticos extremos que possam comprometer o

abastecimento de água e adotem medidas proativas para mitigar potenciais impactos. Dessa forma, tanto o conhecimento das vazões atuais quanto a previsão de vazões futuras desempenham um papel crucial na segurança hídrica e na sustentabilidade das atividades industriais.

Assim, esta pesquisa busca identificar e descrever a contribuição das imagens de radares meteorológicos como uma ferramenta valiosa para aprimorar a precisão e a eficácia dos modelos hidrológicos, visando uma abordagem mais resiliente e adaptativa para o gerenciamento dos recursos hídricos frente aos desafios emergentes. Com esse embasamento, define-se o objetivo geral deste trabalho como a elaboração de um modelo integrado, que se utilize produtos de precipitação obtidos por radar meteorológico para a descrição quantitativa da chuva e conseqüentemente da vazão. Desse modo enumeram-se os objetivos específicos como sendo:

- Análise do estado da arte sobre o tema de radar meteorológico e identificação de estudos sobre a aplicação de radar meteorológico na modelagem hidrológica;
- análise dos dados de radar e comparação frente a outras fontes de precipitação;
- parametrização e calibração do modelo hidrológico HEC-HMS para a bacia do rio Piracicaba (SP);
- Análise dos dados, identificando deficiências e oportunidades no uso dos produtos de radar.

Justifica-se o trabalho com base no conceito de que a gestão eficiente dos recursos hídricos é essencial para garantir a segurança hídrica, especialmente em regiões onde a demanda por água é alta, como nas áreas de demanda industrial do rio Piracicaba (SP). Para atender a essa demanda e garantir o uso sustentável dos recursos hídricos, é fundamental compreender as características hidrológicas dos mananciais que abastecem essas unidades industriais. As cheias históricas ocorridas no município de Piracicaba/SP em 1983, 2011 e 2016 evidenciam a necessidade de ferramentas avançadas para monitorar e prever esses fenômenos conforme Victoria (2011), G1 (2014) e G1 (2016). Nesse contexto, a utilização de tecnologias avançadas, como imagens de radar meteorológico, pode fornecer informações valiosas para a elaboração de modelos integrados que descrevem quantitativamente a vazão e outros aspectos relevantes dos recursos hídricos.

A utilização de produtos de radar meteorológico apresenta diversas vantagens em relação aos sensores de radar de satélite, tornando-se uma ferramenta promissora para a modelagem integrada de bacias hidrográficas. Em primeiro lugar, os radares meteorológicos possuem uma resolução temporal e espacial maior do que grande parte dos sensores de satélite. Essa vantagem permite uma monitorização mais detalhada e em tempo real das condições meteorológicas e hidrológicas, possibilitando uma resposta rápida a eventos extremos, como tempestades e enchentes, que podem afetar significativamente a disponibilidade hídrica dos mananciais e insegurança hídrica.

Além disso, os radares meteorológicos são capazes de detectar e quantificar com precisão a precipitação em diferentes formas, como chuva convectiva e estratiforme, assim como identificar a intensidade e a distribuição espacial das chuvas. Essas informações são essenciais para a estimativa da vazão dos rios e córregos, pois a precipitação é o principal motor dos processos hidrológicos. Com a utilização de técnicas de modelagem, é possível relacionar as informações de precipitação obtidas pelos radares meteorológicos com a vazão dos rios, permitindo uma previsão mais precisa do comportamento hidrológico dessas áreas. Outra vantagem dos radares meteorológicos é a capacidade de cobertura contínua e operação independente de condições climáticas adversas, como nebulosidade e escuridão, que podem limitar a eficácia dos sensores de radar de satélite. Esses atributos garantem uma maior disponibilidade de dados para a modelagem hidrológica, contribuindo para uma análise mais completa e precisa dos mananciais.

Quando se contrasta com informações oriundas de estações pluviométricas, a utilização de imagens de radar meteorológico oferece várias vantagens em relação aos dados das estações, sejam telemétricas ou convencionais. Como citado anteriormente, os radares meteorológicos proporcionam uma cobertura espacial ampla e contínua, permitindo o monitoramento de precipitação em tempo real sobre grandes áreas, enquanto as estações pluviométricas fornecem dados pontuais e podem deixar lacunas significativas entre os pontos de medição. Além disso, os radares podem detectar e mapear padrões de precipitação com alta resolução temporal e espacial, o que é crucial para a previsão de eventos de precipitação intensa e a gestão de riscos de inundação. Por outro lado, as estações pluviométricas, apesar de sua precisão na medição de precipitação acumulada em pontos específicos, dependem de uma rede densa para fornecer uma visão abrangente, o que nem sempre é viável devido a limitações de infraestrutura e custos. A integração de dados de radar com informações de pluviômetros pode, portanto, fornecer uma solução robusta, combinando a precisão dos pluviômetros com a abrangência dos radares, resultando em uma melhor capacidade de monitoramento e previsão hidrológica (Miguel, 2019).

Diante das vantagens apresentadas, a utilização de imagens de radar meteorológico para a elaboração de modelos integrados de bacias hidrográficas surge como uma abordagem promissora e eficaz para a gestão dos recursos hídricos. A integração dessas tecnologias avançadas com técnicas de modelagem hidrológica e hidrodinâmica possibilitará uma melhor compreensão dos processos hidrológicos e uma gestão mais eficiente e sustentável contribuindo para o desenvolvimento econômico e social em bacias hidrográficas.

Além do supracitado, as inundações de 1983, 2011 e 2016 causaram grandes prejuízos à comunidade local, destacando a vulnerabilidade da região. Com o uso de radares meteorológicos, é possível melhorar significativamente a precisão das previsões de chuvas intensas e, conseqüentemente, das cheias. Essa melhoria nas previsões pode facilitar a implementação de estratégias de gestão de recursos hídricos mais eficazes, como a construção de infraestruturas de contenção e a elaboração de planos de evacuação, contribuindo para a resiliência da cidade frente aos desafios impostos pelas mudanças climáticas e pelo crescimento urbano desordenado.

Capítulo 2: Revisão Bibliométrica

2.1. Metodologia

Neste estudo, será utilizada a revisão Bibliométrica da literatura para produzir um panorama do conhecimento científico sobre o tema investigado, uma vez que essa abordagem sistemática permite a síntese de evidências de diferentes estudos, proporcionando uma compreensão mais abrangente do fenômeno. Segundo Botelho *et al.* (2011), são necessárias seis etapas para a realização de uma revisão bibliográfica integrativa:

- seleção do tema e seleção da questão da pesquisa.
- estabelecimento de critérios de inclusão e exclusão.
- identificação dos estudos pré-selecionados e selecionados.
- caracterização dos estudos selecionados.
- análise e interpretação dos resultados.
- apresentação da revisão e síntese do conhecimento.

Dessa forma, com base nos objetivos desta pesquisa, definiu-se a questão alvo desta revisão de literatura como sendo a empregabilidade de radares meteorológicos para o estudo de previsibilidade de vazões. Assim, os bancos de dados utilizados foram a plataforma *Web of Science*, *Scopus*, *Science Direct*, *IEEE Xplore* e *Wiley Online Library*. Os dados encontrados foram organizados e trabalhados na plataforma Rayyan e posteriormente inseridos no software VOSviewer, onde será realizado a visualização e análise dos dados referentes ao estado da arte sobre o tema. A plataforma da capes, não foi utilizada uma vez que durante o período de confecção dessa dissertação ela está sofrendo atualização de modo que não era possível exportar a o banco de dados para os formatos específicos requeridos para a realização dessa revisão bibliométrica.

O VOSviewer é uma ferramenta amplamente utilizada para a visualização de redes e análise bibliométrica, facilitando o mapeamento de ocorrências em grandes volumes de dados acadêmicos, como referências, citações, coautorias e palavras-chave. Desenvolvido por Van Eck e Waltman (2010), o software se destaca por sua eficiência na aplicação de técnicas de clusterização, permitindo a identificação de grupos de itens relacionados. Utilizando o algoritmo VOS (*Visualization of Similarities*), o VOSviewer agrupa itens com alta similaridade dentro de clusters, ao mesmo tempo que minimiza as conexões entre clusters diferentes, o que resulta em mapas visuais que evidenciam padrões e relações em redes complexas. Esse processo de agrupamento é essencial para detectar temas de pesquisa e áreas interconectadas, facilitando uma interpretação organizada e detalhada de dados bibliométricos (Van Eck & Waltman, 2010).

Na pré-seleção dos trabalhos, foram selecionadas as seguintes palavras-chaves para busca junto a "*weather radar*": "*hidrology*", "*Streamflow forecasting*", "*Flood forecasting*",

“*Hydrological monitoring*”, “*Extreme events*” e “*rainfall*” a fim de se esgotar os artigos que fazem jus ao estado da arte da utilização de radares meteorológicos para a descrição da precipitação. Essa busca foi feita em português e em inglês. Deu-se preferência a trabalhos que constem em periódicos revisados por pares de *qualis* B1 ou maior, além de, dissertações e teses de doutorados, a fim de garantir a relevância científica. Foram eliminados também da pré-seleção trabalhos em outras línguas, senão em inglês ou português.

Ainda na pré-seleção dos artigos foram considerados como macro temas relevantes: Engenharia, Ciências Ambientais, Ciências Planetárias e da Terra, Ciências sociais e Ciências computacionais. A relação final dos critérios utilizados para a realização dessa revisão de literatura está disposta no diagrama da Figura 4.1.

Ao todo foram identificados 3017 artigos na pré-seleção, de modo que após a análise de duplicatas, permaneceram 2989. Deste modo, foi definido como escopo e alvo dessa revisão, trabalhos que abordam diretamente os seguintes pontos:

- utilização dos seguintes radares meteorológicos: polimérico, radar de banda X, radar de banda C ou radar de banda S;
- geração do produto de precipitação;

Os trabalhos que não se enquadram nessas categorias seguem a regra de listagem de todos os temas identificados e descartados, apresentada na Figura 2.1.

Figura 2.1: critérios utilizados na revisão bibliométrica



Após a leitura dos resumos dos artigos, foram selecionados 422 que se adequaram aos critérios supracitados. Desse modo, as análises bibliométricas que foram realizadas no *VOSviewer* estão dispostas na tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Análises realizadas na revisão bibliométrica

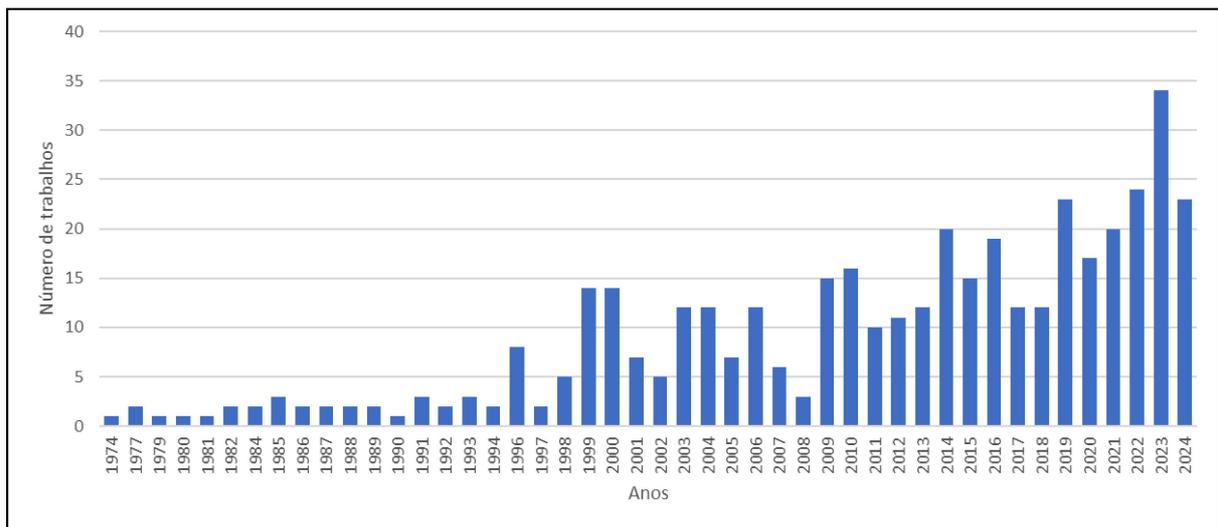
Tipo de análise	Unidade de análise	Descrição
Temporal	Ano de publicação	Número de artigos publicados por ano
Coautoria	Autores	Relação de força que ocorre quando, em síntese, dois autores são cocitados, ou seja, quando um terceiro autor os cita conjuntamente.
Coautoria	Citações	Número de vezes que o autor foi citado nos demais artigos.
Coautoria	Países	Relação de força que ocorre quando, em síntese, autores de dois países são cocitados, ou seja, quando um terceiro autor (de um terceiro país) os cita conjuntamente.
Concorrência	Palavras-chave	Relação de força e frequência entre palavras-chave.
Temática	Tema central do artigo	A ideia geral do artigo

2.2. Resultados e Discussões (Análise Global)

2.2.1. Análise temporal

Iniciando pela análise temporal dos trabalhos selecionados, verificou-se que os primeiros documentos constam do ano de 1974 com o artigo “*The use of radar in urban hydrology*” de Austin, G.L. and Austin, L.B., 17 anos depois do lançamento do WSR-57 (Weather Surveillance Radar-1957), o primeiro radar meteorológico. Porém as pesquisas e aplicações do uso de radares para a estimativa de precipitação, tiveram um crescimento expressivo ao longo dos anos, principalmente após os anos 2000, ficando ainda mais evidente nos últimos quatro anos (2020 a 2024), conforme Figura 2.2.

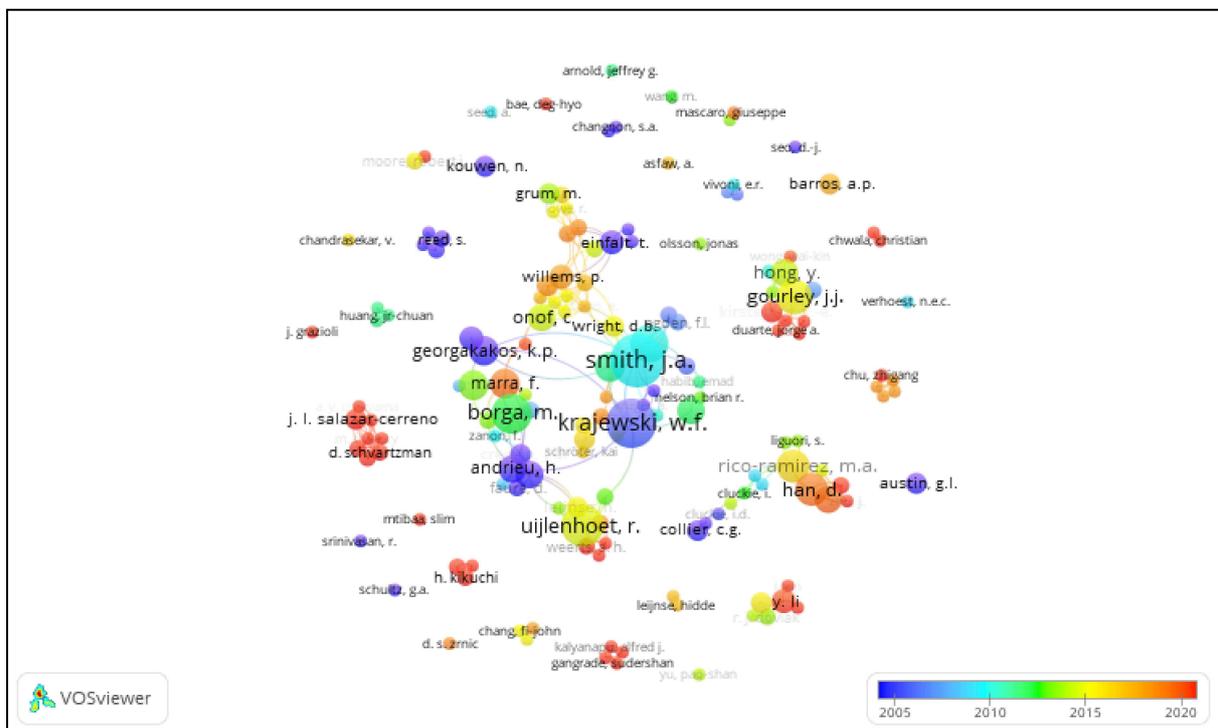
Figura 2.2: Evolução temporal das pesquisas feitas acerca dos radares meteorológicos.



2.2.2. Análise de coautoria: Autores

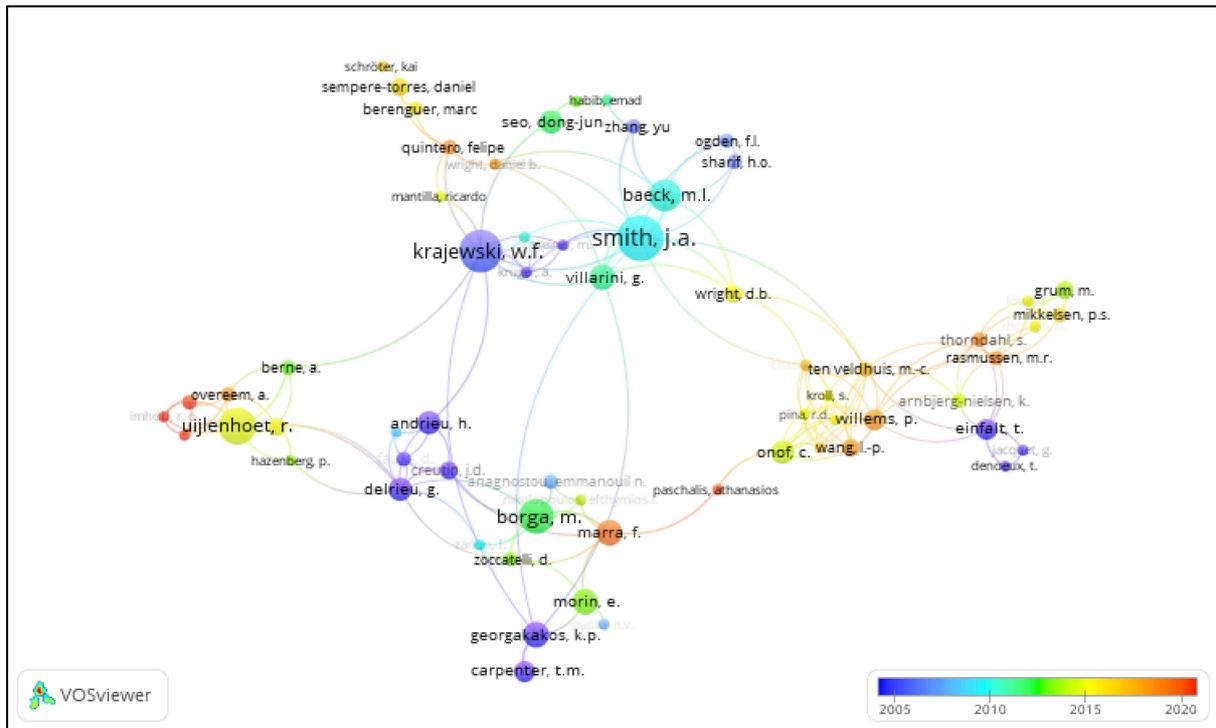
Partindo para análise de coautoria cuja unidade são os autores, foram encontrados 1358 autores de modo que apenas 156 possuíam mais de dois documentos. Esses foram agregados em 42 clusters referentes ao grau de interação entre eles. Os resultados obtidos no VOSviewer estão visíveis na Figura 2.3, onde também é possível visualizar a variação temporal das atividades dos autores. Importante salientar que o tamanho dos rótulos é proporcional a quantidade de documentos de cada autor.

Figura 2.3: Análise de autoria para todos os autores



Além disso, observa-se uma variabilidade espacial entre os autores, onde os que possuem maior conexão em termos de publicações estão posicionados mais ao centro (Figura 4.3), enquanto aqueles que publicam em grupos menores se localizam nas áreas periféricas. Ao que se tange a cerca de coautorias, a configuração da rede de conexões fica mais evidenciado na Figura 2.4.

Figura 2.4: Análise de coautoria para todos os autores



Na Figura 4.4 estão identificados 68 autores, organizados em 13 clusters de no mínimo três integrantes. Entre os autores que possuem mais conexões entre si, destacam-se: Smith, J.A. (cluster 6) com 17 conexões, Krajewski, W.F. (cluster 8) com 13 conexões, Baeck, M.L. (cluster 6) com 10 conexões, Borga, M. (cluster 2) com 9 conexões, Uijlenhoet, R. (cluster 1) com 8 conexões. Notoriamente, nota-se que apesar de estarem em agrupamentos diferentes Smith J., Krajewski W.F. e Baek M.L. possuem conexões entre si. Verifica-se também uma sucessão temporal no número de conexões de modos que se vê uma sucessão entre Krajewski, Smith, Borga e Uijlenhoet, respectivamente. Outra análise interessante a se realizar é a quantidade de documentos de cada autor. Esta relação está na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Relação dos 15 autores com mais publicações relacionadas a radares meteorológicos

Nome do autor	Número de documentos	Número de Conexões
Smith J.	17	17
Krajewski, W.F.	15	13
Uijlenhoet, R.	12	8
Borga, M.	11	9
Baek, M.L.	10	10
Gourley, J.J.	9	7
Han, D.	8	8
Rico Ramires M. A.	8	8
Georgakakos, K.P.	7	7
Marra, F.	7	7
Villarini, G.	7	7
Morin, E.	7	4
Dai, Q.	6	6
Delrieu, G.	6	5
Hong, Y.	6	5

2.2.3. Análise de Citações

Também foi realizada a investigação quanto aos artigos mais citados. Porém alguns dos repositórios utilizados não traziam essa informação consigo. Desta forma não foi possível realizar essa análise para todos os artigos, mas, dentre os contemplados, os 15 artigos que mais foram citados estão dispostos na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Relação dos 15 artigos com a utilização de radares meteorológicos mais citados

Título	Ano	Autor	Número de citações
Grouped response units for distributed hydrologic modeling	1993	Kouwen, N. and Soulis, E.D. and Pietroniro, A. and Donald, J. and Harrington, R.A.	238
Effect of bias adjustment and rain gauge data quality control on radar rainfall estimation	1999	Steiner, M. and Smith, J.A. and Burges, S.J. and Alonso, C.V. and Darden, R.W.	235
Real-time estimation of mean field bias in radar rainfall data	1999	Seo, D.-J. and Breidenbach, J.P. and Johnson, E.R.	224
Impact of spatial and temporal resolution of rainfall inputs on urban hydrodynamic modelling outputs: A multi-catchment investigation	2015	Ochoa-Rodriguez, S. and Wang, L.-P. and Gires, A. and Pina, R.D. and Reinoso-Rondinel, R. and Bruni, G. and Ichiba, A. and Gaitan, S. and Cristiano, E. and Van Assel, J. and Kroll, S. and Murlá -Tuyls, D. and Tisserand, B. and Schertzer, D. and Tchiguirinskaia, I. and Onof, C. and Willems, P. and Ten Veldhuis, M.-C.	211
Radar for hydrology: Unfulfilled promise or unrecognized potential?	2013	Berne, A. and Krajewski, W.F.	208
A distributed hydrologic model and threshold frequency-based method for flash flood forecasting at ungauged locations	2007	Reed, S. and Schaake, J. and Zhang, Z.	196
Hydrologic analysis of the Fort Collins, Colorado, flash flood of 1997	2000	Ogden, F.L. and Sharif, H.O. and Senarath, S.U.S. and Smith, J.A. and Baeck, M.L. and Richardson, J.R.	188
National threshold runoff estimation utilizing GIS in support of operational flash flood warning systems	1999	Carpenter, T.M. and Sperflage, J.A. and Georgakakos, K.P. and Sweeney, T. and Fread, D.L.	182

Towards a roadmap for use of radar rainfall data in urban drainage	2004	Einfalt, T. and Arnbjerg-Nielsen, K. and Golz, C. and Jensen, N.-E. and Quirmbach, M. and Vaes, G. and Vieux, B.	173
Radar-rainfall uncertainties: Where are we after thirty years of effort	2010	Krajewski, W.F. and Villarini, G. and Smith, J.A.	164
Weather radar rainfall data in urban hydrology	2017	Thorndahl, S. and Einfalt, T. and Willems, P. and Ellerbæk Nielsen, J. and Ten Veldhuis, M.-C. and Arnbjerg-Nielsen, K. and Rasmussen, M.R. and Molnar, P.	141
An automated brightband height detection algorithm for use with Doppler radar spectral moments	2002	White, A.B. and Gottas, D.J. and Strem, E.T. and Ralph, F.M. and Neiman, P.J.	140
Multifractal modeling of anomalous scaling laws in rainfall	1999	Deidda, R. and Benzi, R. and Siccardi, F.	137
Raindrop size distributions and radar reflectivity-rain rate relationships for radar hydrology	2001	Uijlenhoet, R.	136
Spatial patterns in thunderstorm rainfall events and their coupling with watershed hydrological response	2006	Morin, E. and Goodrich, D.C. and Maddox, R.A. and Gao, X. and Gupta, H.V. and Sorooshian, S.	132

É possível inferir pela tabela 2.3 que a maior parte dos artigos mais citados datam antes do ano de 2010, como já se era esperado, sendo que as exceções são Ochoa-Rodriguez, S. *et al.* (2015), Berne, A. and Krajewski, W.F. (2013), Thorndahl, S. *et al.* (2013). Importante salientar que pode haver erros provenientes do banco de dados ou na conversão dos formatos de citação.

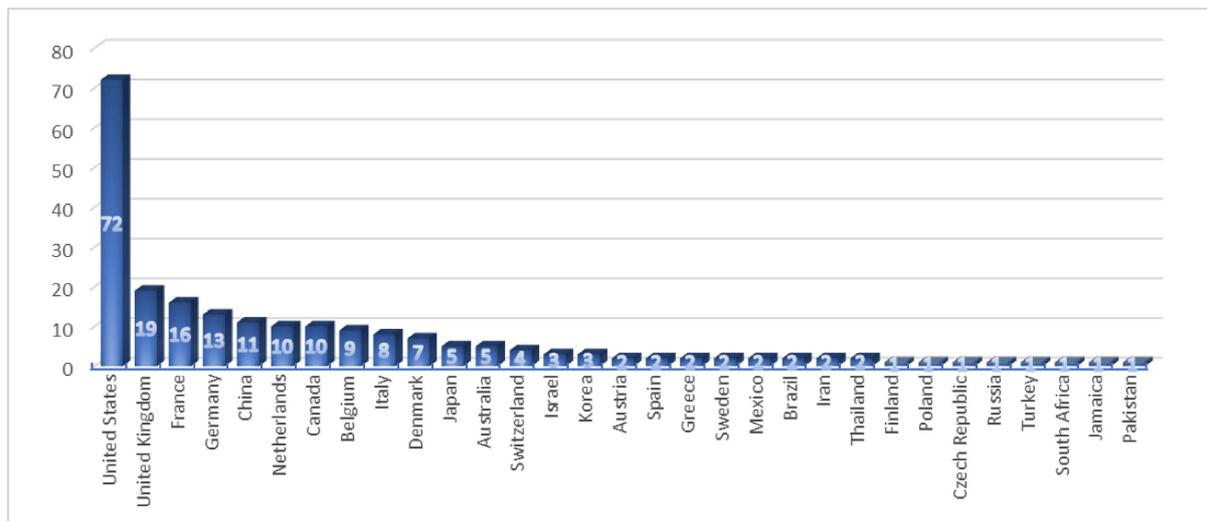
Outro fator a se levantar é a diferença na lista de nomes dos autores dos artigos mais citados com os autores que mais produzem documentos, por exemplo, estando fora desta segunda seleção Borga, M. e Gourley, J.J. Outros como Smith J., Krajewski, W.F, Uijlenhoet, R., Baek, M.L., Villarini, G. e Georgakakos, K.P. apresentam-se em ambas as listas, indicando a expertise desses autores acerca do tema.

2.2.4. Análise de coautoria: Países

Essa etapa visa localizar os países que mais produzem trabalho sobre o tema. Nessa etapa foram identificados 31 países com documentos relacionados ao tema, porém foram

identificados apenas 219 documentos. Esta discrepância se deve ao fato que nem todos os bancos de dados forneciam a informação ao país, como é o caso do Sciencedirect, comprometendo parte da análise. Mesmo assim é possível com a amostra selecionada identificar quais países desenvolvem mais pesquisas acerca do uso de radares para estimativa de precipitação. O resultado está na Figura 4.5.

Figura 2.5: Relação de países com mais publicações relacionadas a radares meteorológicos



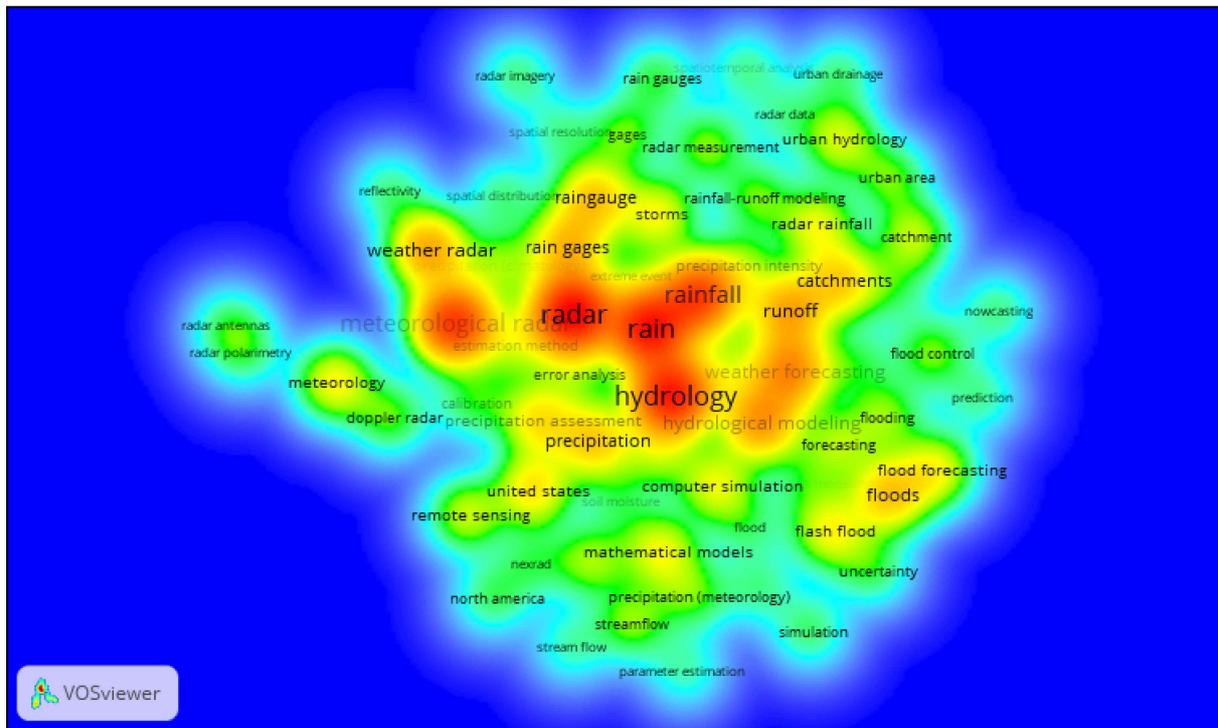
Conforme é possível visualizar os Estados Unidos é disparadamente o país com maior número de publicações, corroborando com o seu pioneirismo na área, explicado mais profundamente no item 5.2.1 (Revisão histórica acerca de radares meteorológicos). De maneira geral o resultado se encontra dentro do esperado de modo que os países que possuem redes de radar meteorológico mais consolidados como os principais destaques dessa análise. Assim, além do EUA que possui a NEXRAD (Next Generation Weather Radar), destaque para diversos países da Europa onde se opera o OPERA (Operational Programme for the Exchange of weather RADar information) sendo esta uma rede colaborativa que integra radares meteorológicos de vários países europeus. Outros dois destaques são o Japão com sua rede de radares operados pela Japan Meteorological Agency (JMA), e a Austrália com a Australian Bureau of Meteorology (BoM).

O Brasil aparece de forma tímida na lista, com cerca de dois trabalhos publicados. No entanto, é importante destacar que essa representação limitada não reflete toda a produção de pesquisa realizada no país sobre o tema. Isso se deve ao fato de que os bancos de dados utilizados não abrangem todas as publicações existentes, especialmente aquelas em periódicos nacionais ou de acesso restrito. Além disso, estudos e documentos cujo acesso não era livre não foram considerados, o que pode contribuir para a sub-representação das pesquisas brasileiras em radares meteorológicos.

2.2.5. Análise de concorrência: Palavras chaves

A análise das palavras chaves identificou 2267 palavras chaves distintas entre si, desse modo foram evidenciadas na Figura 2.6 apenas aquelas que possuíam mais de dez repetições ao longo dos trabalhos identificando, assim, 69 palavras chaves.

Figura 2.6: Mapa de densidade das palavras chaves

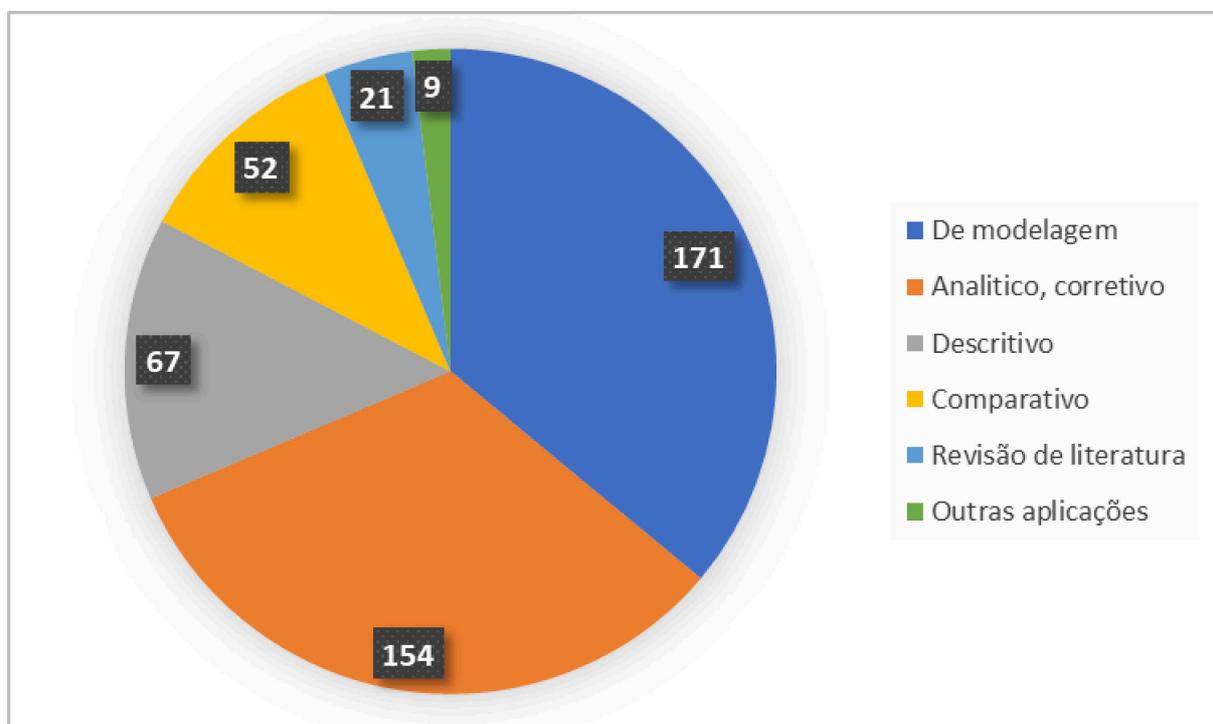


Influenciado pelas palavras chaves utilizadas na pré-seleção dos artigos, as palavras “hydrology”, “radar”, “rain”, “rainfall” e “runoff” foram, respectivamente, as mais recorrentes entre os trabalhos. Porém algumas outras palavras são igualmente interessantes, de modo a indicar a espacialidade dos estudos e os assuntos envolvidos. Identifica-se a presença significativa da palavra “north america” e “Nextrad” (sistema avançado de radares meteorológicos Doppler utilizado nos Estados Unidos) corroborando com a análise espacial feita, no qual indica os EUA como maior produtor de documentos dentro desta temática. Outras palavras recorrentes e “floods” e suas variações em conjunto com “runoff” podem indicar que tem se havido aplicações significativas de radares meteorológicos para a previsão e descrição de inundações. Em seguida, na Figura 2.7. é mostrada a rede de vínculos entre as palavras em conjunto com sua recorrência temporal.

- descritivo: descrição e caracterização de eventos de precipitação e outros fatores físicos geológicos;
- analítico, corretivo: Análise, correção e melhoria da estimativa de precipitação por radar;
- comparativo: visa comparar diferentes estimativas de precipitação com a gerada pelos radares meteorológicos;
- de modelagem: utilização dos produtos do radar na entrada ou construção de um modelo (hidrológico, computacional, hidráulico, entre outros).

Assim foram identificados os temas mais frequentes os “De modelagem” seguido pelo tema “Analítico, corretivo”. As relações estão expressas na Figura 2.8.

Figura 2.8. Gráfico das temática utilizadas no desenvolvimento de pesquisas acerca de radares meteorológicos



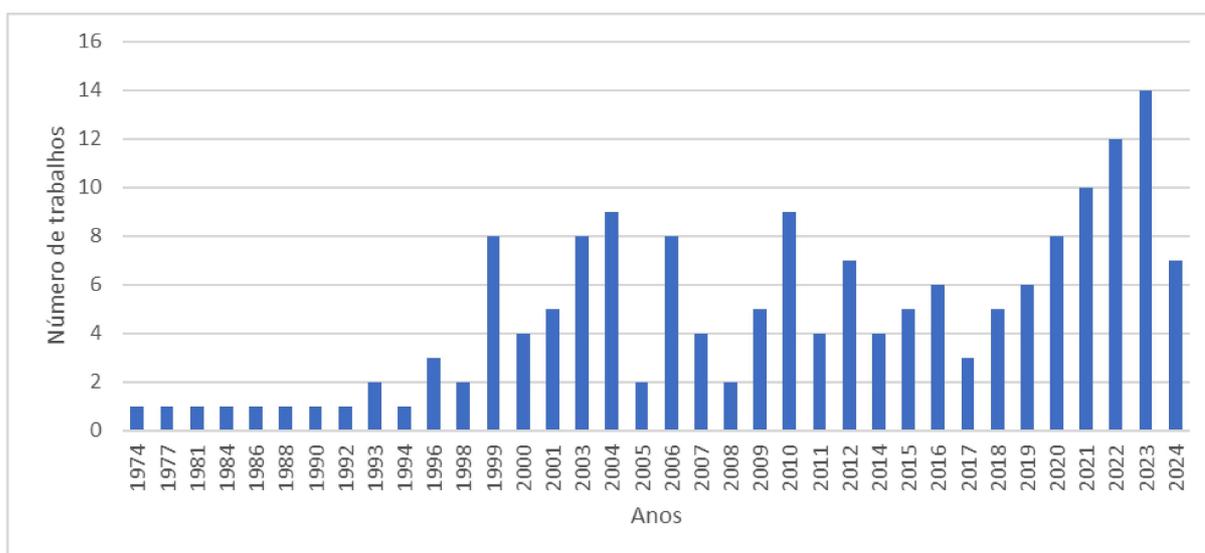
4.3. Resultados e Discussões (Trabalhos relacionados a modelagem)

Este tópico tem como objetivo aprofundar ainda mais a pesquisa, realizando uma análise bibliométrica focada nos documentos que tratam da aplicação de dados de radar na modelagem. Como mencionado anteriormente, foram identificados 171 estudos que utilizam dados de radar meteorológico para diferentes finalidades, como modelagem de cheias, escoamento superficial, dimensionamento de manchas de inundação, desenvolvimento de sistemas de alerta e sistemas de *nowcasting*. Em resumo, as pesquisas apresentam uma variedade de aplicações, mas todas têm em comum o uso dos produtos de radar como dado de entrada para alcançar outro objetivo. As análises que serão feitas são as mesmas localizadas na Tabela 4.1.

2.3.1 Análise temporal

Iniciando a análise temporal, identifica-se que o primeiro documento data de 1974 exatamente o mesmo supracitado na análise temporal global. Os resultados estão localizados na Figura 2.9.

Figura 2.9: Evolução temporal das pesquisas feitas acerca dos radares meteorológicos aplicados à modelagem.

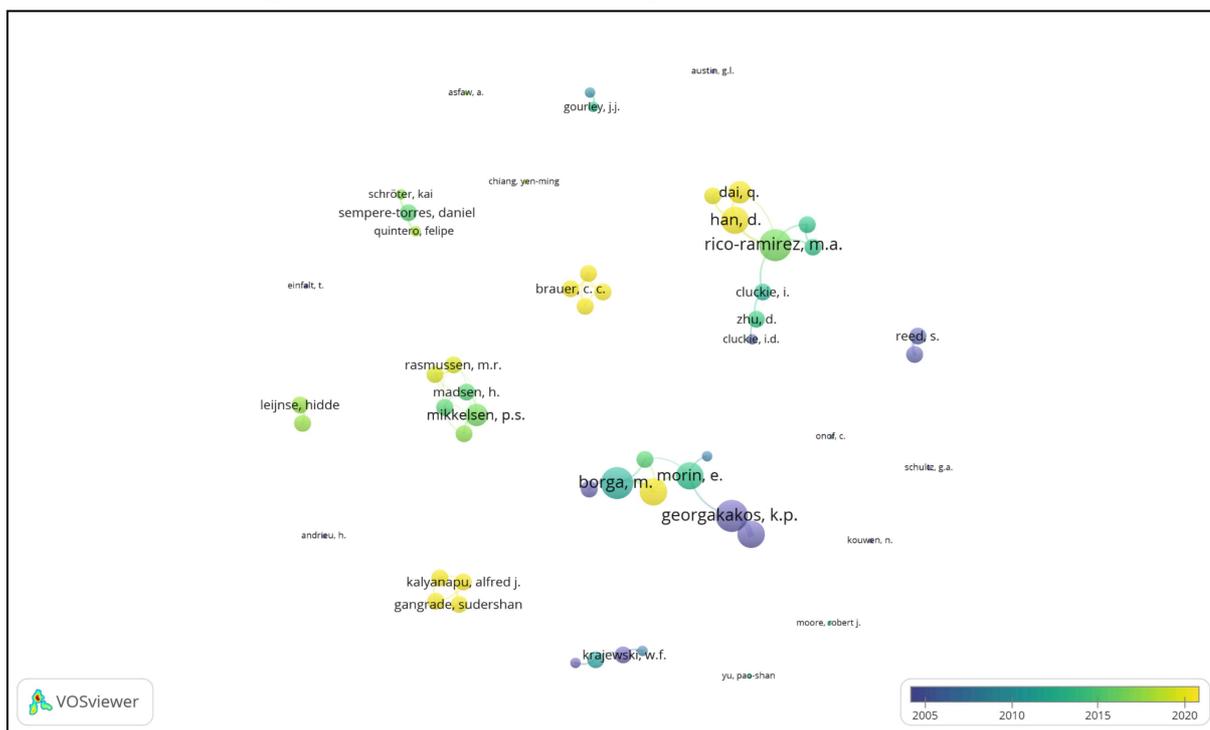


De maneira geral identifica-se um padrão e comportamento semelhante ao realizado na análise anterior, apresentando um crescimento expressivo por volta dos anos 2000, porém o grande destaque está localizado nos últimos anos sete anos, de modo a ver uma crescente de número de publicações sobre o tema. Uma das justificativas é a relevância da busca de tecnologias para descrever e prever eventos extremos, e um cenário onde as mudanças climáticas são uma realidade ostensiva nos dias atuais.

2.3.2. Análise de coautoria: Autores

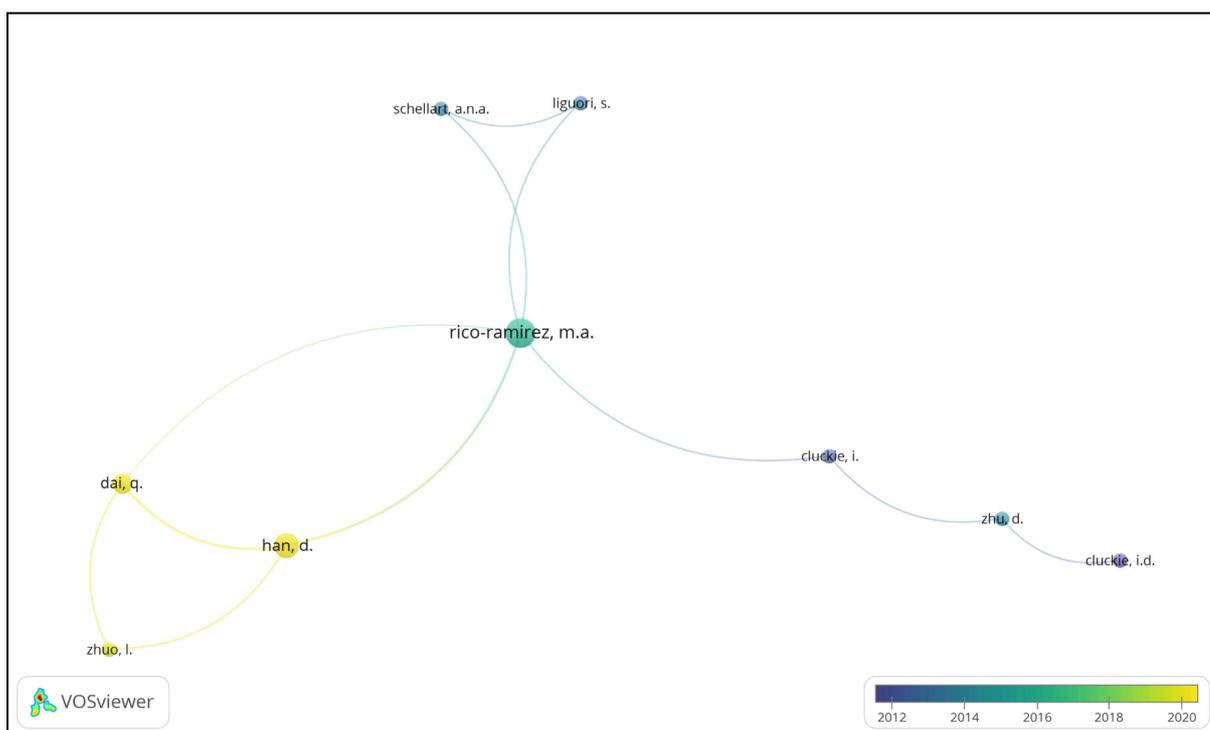
A análise de coautoria realizada identificou 606 autores, sendo que 54 destes possuíam mais de duas publicações. Foram divididos em 21 clusters com base nas ligações entre si. Os resultados obtidos no VOSviewer estão visíveis na Figura 2.10, onde também é possível visualizar a variação temporal das atividades dos autores.

Figura 2.10: Análise de autoria para todos os autores



Como é possível visualizar, os autores dentro dessa categoria possuem muito menos vínculos entre eles formando clusters mais isolados quando comparado à análise global. Porém vale ressaltar que dentro da temporalidade das publicações verifica-se uma insurgência de autores com mais publicações em anos mais recentes. A imagem acerca das coautorias está disposta na Figura 2.11.

Figura 2.11. Análise de coautoria para todos os autores



Nesse ponto, verifica-se que os trabalhos na área de aplicação para a modelagem ocorrem de maneira mais isolada, sem muitos links entre si. Sendo o de maior destaque Rico-Ramirez, professora da universidade de Bristol, com 5 conexões diretas. Em seguida a Tabela 4.4. apresenta a relação da quantidade de documentos confeccionados por cada autor.

Tabela 2.4 - Relação dos 15 autores com mais publicações relacionadas a radares meteorológicos

Nome do autor	Número de documentos	Número de Conexões
Borga, M.	6	5
Morin, E.	6	4
Georgakakos, K. P.	5	5
Rico Ramires, M. A.	5	5
Carpenter, T. M.	4	4
Han, D.	4	4
Marra, F..	4	4
Uijlenhoet, R.	4	2
Dai, Q.	3	3
Mikkelsen, P. S.	3	3

Diversos nomes se repetem da lista da análise do macrotema e outros já se omitem, como é o caso do Smith, J.; Krajewski, W.F e Baek, M.L, autores que tiveram publicações significativas acerca de Radares meteorológicos, mas não desenvolveram trabalhos na parte de modelagem.

2.3.3. Análise de Citações

Também foi realizada a investigação quanto aos artigos mais citados. E assim como supracitado alguns dos repositórios utilizados não traziam essa informação consigo, prejudicando a avaliação completa dos resultados. Desta forma não foi possível realizar essa análise para todos os artigos, mas dentre os contemplados, os 10 artigos que mais foram citados estão dispostos na Tabela 2.5.

Tabela 4.5 - Relação dos 10 artigos relacionados à radares meteorológicos mais citados

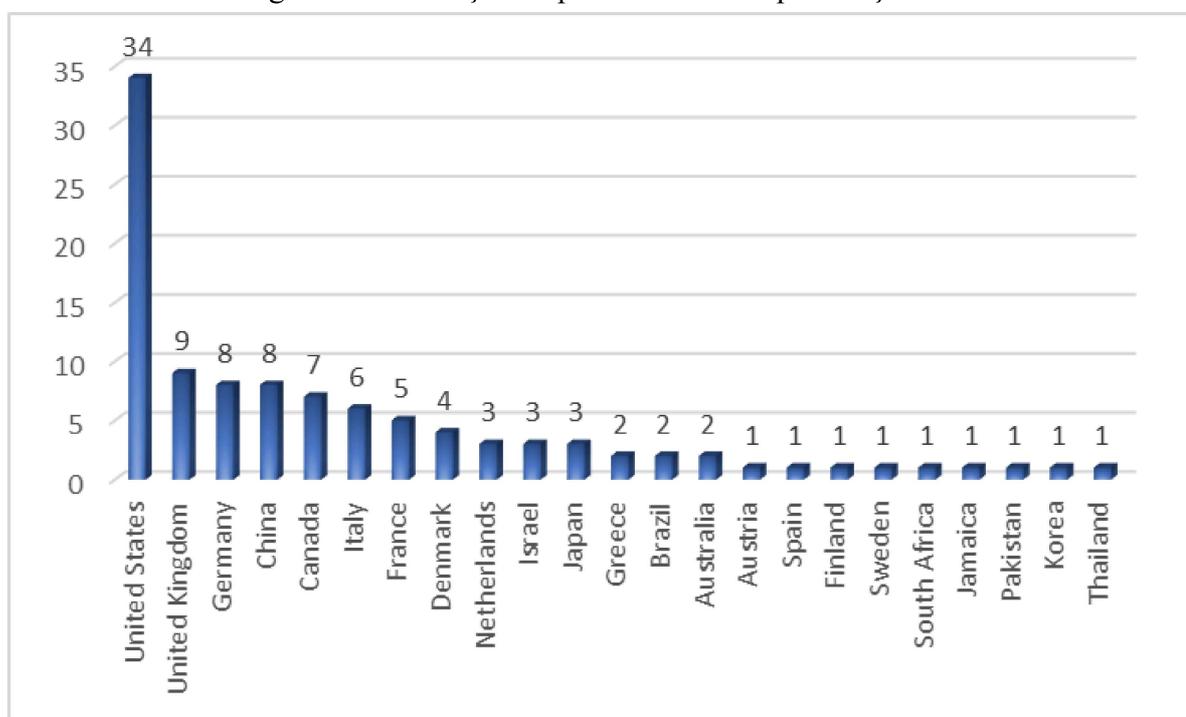
Título	Ano	Autor	Número de citações
Grouped response units for distributed hydrologic modeling	1993	Kouwen, N. and Soulis, E.D. and Pietroniro, A. and Donald, J. and Harrington, R.A.	238
A distributed hydrologic model and threshold frequency-based method for flash flood forecasting at ungauged locations	2007	Reed, S. and Schaake, J. and Zhang, Z.	235
National threshold runoff estimation utilizing GIS in support of operational flash flood warning systems	1999	Carpenter, T.M. and Sperflage, J.A. and Georgakakos, K.P. and Sweeney, T. and Fread, D.L.	182
Multifractal modeling of anomalous scaling laws in rainfall	1999	Deidda, R. and Benzi, R. and Siccardi, F.	137
Spatial patterns in thunderstorm rainfall events and their coupling with watershed hydrological response	2006	Morin, E. and Goodrich, D.C. and Maddox, R.A. and Gao, X. and Gupta, H.V. and Sorooshian, S.	132
Watflood: A micro-computer based flood forecasting system based on real-time weather radar	1988	Kouwen, N.	98
Evolution of Clark's unit graph method to spatially distributed runoff	1998	Kull, D.W. and Feldman, A.D.	97
Design of the HYREX raingauge network	2000	Moore, R.J. and Jones, D.A. and Cox, D.R. and Isham, V.S..	95
Using SWAT to model streamflow in two river basins with ground and satellite precipitation data	2009	Tobin, K.J. and Bennett, M.E.	89
Application of a distributed hydrological model and weather radar observations for flood management in the upper Tone River of Japan	2004	Yang, D. and Koike, T. and Tanizawa, H.	84

Assim como o previsto, todos os artigos mais citados datam antes de 2010. Assim como visto anteriormente, há uma diferença entre os nomes dos autores com mais publicações e aqueles que possuem os artigos mais citados. Dando destaque a Morin, E.Carpenter, T.M. e Georgakakos, K.P. que aparece em ambas as listas, demonstrando sua importância para o desenvolvimento de pesquisas no tema.

2.3.4. Análise de coautoria: Países

Analisando a distribuição espacial dos artigos foram identificados 23 países com trabalhos na área, mas assim como na análise anterior por conta da falta de informação nos bancos de dados, apenas 105 documentos. O resultado está disposto na Figura 2.12.

Figura 2.12: Relação de países com mais publicações

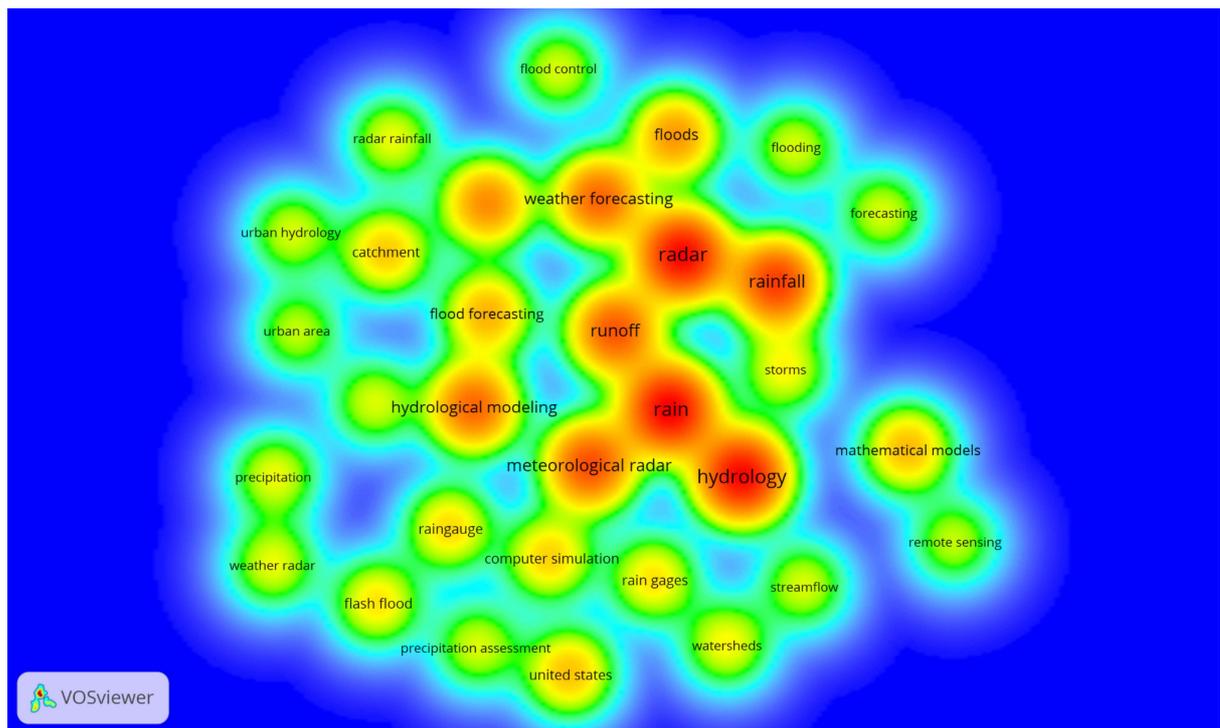


Mais uma vez, os Estados Unidos se destacam em termos de número de publicações. De modo geral, a tendência segue o padrão analisado anteriormente. Em relação ao Brasil, verificam-se dois artigos publicados na área: o de Pereira Filho, A.J. e Dos Santos, C.C. (2006) e o de Santos, L.B.L. et al. (2023).

2.3.5. Análise de concorrência: Palavras chaves

A análise identificou 1163 palavras-chave distintas. Para simplificar, a Figura 2.13. destaca apenas aquelas que ocorreram mais de dez vezes nos trabalhos, resultando em 32 palavras-chave principais. O mapa de densidade segue uma escala de cores, indo das mais frias para as mais quentes, onde o vermelho indica as palavras mais recorrentes, enquanto o azul representa as menos frequentes.

Figura 2.13: Mapa de densidade das palavras-chave



Percebe grande semelhança com a análise de palavras chaves vista anteriormente, isto se deve também aos filtros aplicados na pré-seleção, destacando palavras como “*hydrology*”, “*radar*” e “*rain*”. Importante mais uma vez salientar a palavra “*united states*” aparecendo com um certo destaque de modo a corroborar com a análise espacial feita no tópico anterior

Em seguida na Figura 2.14. é mostrada a rede de vínculos entre as palavras em conjunto com sua recorrência temporal.

sub-representação de trabalhos nacionais em bancos de dados internacionais e restrições de acesso.

A análise de palavras-chave confirmou a centralidade de temas como “*hydrology*”, “*radar*”, “*rainfall*” e “*runoff*”, além da recorrência de termos relacionados a inundações, indicando a principal aplicação dos radares meteorológicos. Palavras como “NEXRAD” e “*North America*” reforçam a predominância dos EUA na produção científica.

Ao se deparar com os resumos dos artigos foram revelados cinco macro temas principais. Onde o macro tema “De Modelagem” foi o mais frequente, destacando-se pela integração de produtos de radar com ferramentas computacionais para a previsão de cheias, mapeamento de áreas inundáveis e desenvolvimento de sistemas de alerta. Um total de 171 estudos abordaram essa temática, com crescente atenção às áreas urbanas e ao impacto de eventos extremos amplificados pelas mudanças climáticas.

Na segunda parte da revisão, voltada à integração de radares com modelagem hidrológica e hidrodinâmica, identificou-se um número crescente de estudos que combinam os dados de radar com modelos computacionais, destacando a relevância desta abordagem para a previsão de cheias e monitoramento de bacias hidrográficas.

Os autores que se dedicam à modelagem apresentaram redes de coautorias mais isoladas quando comparadas à análise global, mas verificou-se um aumento de publicações recentes, sugerindo uma evolução contínua no campo. Entre os destaques dessa categoria, autores como Morin, E., Georgakakos, K.P., e Carpenter, T.M. aparecem como referências.

A bibliometria aponta para um avanço significativo no uso de radares meteorológicos, especialmente em aplicações de modelagem hidrológica e previsão de eventos extremos. Enquanto países como os EUA continuam a liderar a produção científica, observa-se a necessidade de maior visibilidade e integração dos trabalhos brasileiros. A análise também destaca a importância crescente de técnicas como o *nowcasting* e o impacto das mudanças climáticas na priorização de estudos voltados ao controle de inundações e gestão de desastres. Autores como Smith, Krajewski e Uijlenhoet permanecem como pilares centrais do desenvolvimento científico nessa área, enquanto novas tendências emergem, ampliando os horizontes das aplicações de radar meteorológico.

Capítulo 3: Revisão Bibliográfica

Esta revisão bibliográfica tem como objetivo explorar o estado da arte sobre a aplicação de dados de radares meteorológicos na estimativa de precipitação, além de avaliar a utilização do software HEC-HMS e suas rotinas para modelagem hidrológica. Para assegurar coerência e relevância na análise, priorizou-se a seleção de trabalhos destacados na revisão bibliométrica desta dissertação, garantindo a conexão entre os estudos escolhidos e o tema abordado.

O recorte foi realizado com base em cinco artigos publicados entre 2019 e 2024, selecionados pela relevância para a pesquisa proposta nesta dissertação. Os critérios de escolha consideraram a semelhança metodológica com o trabalho desenvolvido e a contribuição significativa para o avanço da discussão. Além disso, foi dada atenção especial a estudos que explorassem aplicações do HEC-HMS em contextos similares, fortalecendo a conexão entre os conceitos discutidos e as ferramentas aplicadas.

3.1. Utilização de dados de precipitação de radares meteorológicos e suas implicações.

Começando com Dhital Kapil *et al.* (2024), onde em seu estudo objetivou comparar e avaliar a eficiência de diferentes tipos de dados de precipitação em grade na simulação de escoamento superficial (runoff) de eventos históricos de chuva. Utilizou-se de produtos de precipitação em grade baseados em radar e satélite, como NEXRAD Stage III, NCEP Stage IV, AORC (Automated Surface Observing System Rainfall Climatology) e NARR (North American Regional Reanalysis). O foco estava no uso desses dados para calibrar e validar modelos de escoamento em bacias hidrográficas, aproveitando a capacidade dos produtos de precipitação em grade para capturar variações espaciais na chuva, em contraste com os dados pontuais.

Os dados de precipitação foram inseridos no HEC-HMS e aplicados em um modelo HEC-RAS, no qual, foi utilizado a técnica de modelagem de chuva em malha (*rain-on-mesh*) onde a precipitação é calculada para cada célula da malha, considerando as perdas e roteando o excesso de precipitação rio abaixo. A calibração e validação do modelo foram realizadas utilizando dados históricos de eventos de chuva em conjunto com a aplicação de indicadores estatísticos como o Eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) e a Razão do desvio padrão das observações pelo RMSE (RSR). Foram comparados os dados simulados de escoamento com os dados observados em estações de medição de fluxo para identificar quais produtos de precipitação em grade conseguem prever mais precisamente o escoamento histórico. Para garantir um teste de hipóteses imparcial, foram considerados múltiplos eventos de tempestade, avaliando os resultados para diferentes bacias hidrográficas e abordagens de modelagem.

Os resultados da pesquisa destacam a importância da resolução espacial e da qualidade dos dados de precipitação em grade para a modelagem de escoamento superficial. Enquanto o NARR apresentou subestimativas significativas no pico e no volume total de

escoamento devido à sua resolução mais grosseira, produtos como AORC e NCEP Stage IV demonstraram maior precisão, possivelmente devido aos seus algoritmos de controle de qualidade mais sofisticados. Os modelos HEC-RAS e HEC-HMS foram eficazes em simular o escoamento superficial utilizando dados de precipitação em grade, com a calibração e validação mostrando que os produtos AORC e NCEP Stage IV conseguiram prever o escoamento de forma mais consistente em comparação aos outros produtos.

A utilização de modelos HEC-RAS e HEC-HMS para simulação de fluxo baseado em precipitação obtidas por dados de radar mostrou-se uma abordagem promissora para a modelagem de eventos de precipitação espacialmente e temporalmente variáveis. No entanto, a precisão das previsões de escoamento depende significativamente da qualidade e resolução dos dados de precipitação utilizados. Embora, no estudo, as previsões de pico do hidrograma não tenham sido captadas com precisão por todos os produtos, a forma geral e o tempo do hidrograma propagado foram consistentes com os dados observados. Estes achados ressaltam a utilidade dos modelos HEC-RAS e HEC-HMS na aplicação de produtos de radar pré-processados para a simulação de eventos hidrológicos.

Na dissertação de Miguel (2019), o objetivo foi implementar o modelo hidrológico Soil Conservation Service (SCS-CN) para estimar o escoamento superficial na bacia hidrográfica do Rio Jacaré Guaçu. A estimativa foi feita com base em dados de chuva obtidos por radar meteorológico. O estudo revelou que, apesar das melhorias no ajuste entre as estimativas do radar e os dados pluviométricos, ainda existem desafios significativos. O SCS-CN foi implementado com sucesso, mas demonstrou limitações em termos de calibração e ajuste para diferentes eventos de precipitação. Embora o radar meteorológico ofereça uma alta resolução espacial e uma visão abrangente das precipitações, sua precisão no valor acumulado de chuva ainda não alcança a dos pluviômetros, principalmente devido à necessidade de correção dos fatores de conversão Z-R. No qual maior profundidade foi alcançada em seu outro estudo (Miguel e Rennó, 2020).

Na conclusão a autora destaca que, apesar das dificuldades na utilização de estimativas de precipitação por radar meteorológico em hidrologia, essas ferramentas têm se mostrado essenciais devido à sua capacidade de fornecer uma visão abrangente das intensidades e estruturas das chuvas. O radar mede o espectro das gotas de chuva, o que representa um desafio para a precisão das estimativas, mas técnicas avançadas têm sido desenvolvidas para aprimorar sua aplicação. O método dos Polígonos de Thiessen, embora amplamente utilizado, não é o mais adequado para ajustar as estimativas do radar, que podem ser mais precisas quando integradas com dados pluviométricos, apesar de ainda haver subestimação com a relação Z-R de Marshall-Palmer.

Conclui-se que a integração dos dados de radar com informações de pluviômetros melhora a representatividade espacial das estimativas, mas a calibragem e correção continuam sendo um desafio. O modelo hidrológico SCS-CN, embora útil, não foi totalmente generalizável para todos os eventos analisados, exigindo ajustes específicos para cada situação. Fatores como a calibração inadequada dos parâmetros do modelo e a reamostragem

dos dados de entrada impactaram a precisão dos resultados. A velocidade constante utilizada no modelo para o escoamento superficial também introduziu incertezas.

Complementando o visto e realizado em sua dissertação, o estudo realizado por Miguel e Rennó (2020) na bacia do Rio Jacaré-Guaçu, no estado de São Paulo, Brasil, se comprometeu a validar as estimativas de precipitação do radar meteorológico do Centro de Meteorologia de Bauru (IPMet/UNESP) para a bacia hidrográfica. Os autores por fim destacaram essas dificuldades ao confrontar estimativas de precipitação obtidas por radar com medições diretas de pluviômetros. Os resultados revelaram que, apesar dos avanços na tecnologia de radar, a precisão das estimativas de precipitação ainda é limitada devido à natureza indireta da medição, que se baseia na detecção do espectro das gotas de chuva em vez da precipitação efetiva. A aplicação do método de otimização por mínimos quadrados, BFGS, foi eficaz para melhorar a precisão das estimativas ao selecionar as estações com maior representatividade, evidenciando que a combinação dos dados do radar com observações de pluviômetros pode superar algumas das limitações associadas à distribuição espacial desigual dos postos pluviométricos.

A análise das relações Z-R utilizadas para converter as observações de radar em estimativas de precipitação mostrou resultados diversos para cada relação. As diferenças significativas entre as estimativas do radar e as medições diretas corroboram com a dificuldade em alinhar os dados de radar com os valores reais observados pelos pluviômetros, o que implica na necessidade de um fator de correção adequado. O estudo também ressaltou a utilidade dos produtos de radar como uma ferramenta complementar no monitoramento e previsão de eventos hidrometeorológicos. Embora os sensores de radar não igualem a precisão dos pluviômetros na determinação da precipitação acumulada, eles oferecem uma resolução espacial detalhada que pode ser valiosa para a inserção em modelos e na gestão de recursos hídricos e controle de enchentes ainda mais em locais onde há escassez de dados. A pesquisa sugeriu que, apesar dos avanços, ainda há necessidade de mais investigações para aprimorar os métodos de correção e integração dos dados de radar com medições pluviométricas, garantindo assim uma representação mais fiel das condições de precipitação.

Sokol *et al.* (2021), traz um artigo diferente dos demais, sendo uma revisão de literatura que explora o papel dos radares meteorológicos na estimativa de precipitação e suas aplicações em modelagem meteorológica e hidrológica. A revisão abrange avanços tecnológicos, metodologias aplicadas para a medição de precipitação e suas comparações conforme tabela 3.1, também aponta para desafios na utilização de dados de radar para previsão de vazões e inundações. Radares meteorológicos são ferramentas essenciais para estimar a precipitação com alta resolução temporal e espacial. A integração de dados de radar com modelos hidrológicos melhora significativamente a precisão das previsões de vazões e inundações. No entanto, há limitações tecnológicas relacionadas à resolução e alcance dos radares e desafios na calibração e validação dos dados de radar para diferentes regiões e condições climáticas. Os desafios incluem a necessidade de desenvolvimento contínuo de tecnologias de radar para aumentar a precisão e cobertura e a integração de dados de radar com outras fontes de dados hidrológicos para melhorar a robustez das previsões.

Tabela 3.1: Análise das técnicas de alta resolução para medição e estimativa de precipitação

Técnica de Medição	Resolução espacial	Resolução temporal	As propriedades mais importantes para combinação
Gravação da rede de pluviômetros para combinação	Medições pontuais interpolado espacialmente	1 min – 1 h	Boa qualidade em locais onde se está localizado a estação
Rede de radares meteorológicos	0.5 – 2.0 km	5 – 15 min	Numerosos erros de medição. Boa distribuição espacial da precipitação
Satélite meteorológico Meteosat ou GOES (VIS e Canais IR)	Por volta de 4 – 6 km dependendo da latitude	5 – 15 min	Baixa resolução espacial; Medidas aproximadas. Boa reprodução da localização, das nuvens e fenômenos convectivos. Alto disponibilidade de dados.

Fonte: adaptado de Sokol *et al.* (2021)

Quando se trata acerca de precipitação medida pelo pluviômetro, o autor destaca que os mesmos são dispositivos utilizados para medições pontuais *in situ* da intensidade e duração da precipitação, acumulando a chuva continuamente ao longo do período de interesse. No entanto, a estimativa de precipitação pelos pluviômetros é limitada devido à sua distribuição esparsa, especialmente em regiões montanhosas onde a variabilidade espacial é alta. Comparações diretas entre dados de pluviômetros e radares são problemáticas devido às diferenças nas escalas de observação uma vez que em áreas urbanas, radares de curto alcance conseguem resoluções temporais de aproximadamente 1 minuto. Contudo, a resolução padrão

de cerca de 5 minutos pode negligenciar a alta variabilidade temporal da precipitação, especialmente em eventos de curta duração.

Após analisar uma série de trabalhos, é apontado que há estudos que combinam dados de pluviômetros com estimativas de radar para criar produtos de alta resolução mais precisos do que dados de pluviômetros ou radares isoladamente. No entanto, ainda existem restrições na estimativa confiável da “precipitação verdadeira” devido às diferenças na variabilidade espacial e temporal entre as medições dos pluviômetros e as estimativas do radar. Assim a revisão indica que a resolução espacial de 1 km dos radares meteorológicos é adequada para modelagem hidrodinâmica, embora alguns extremos possam ser perdidos. A resolução temporal de 5 minutos é suficiente, mas pode ser melhorada com procedimentos de acumulação que assumem uma variação linear da intensidade da precipitação entre os intervalos de tempo consecutivos.

A medição da precipitação apresenta desafios significativos, e diferentes técnicas de medição têm vantagens e desvantagens. Redes de pluviômetros, radares meteorológicos e satélites são comumente usados para estimar a precipitação. Os dados de pluviômetros são afetados por erros que exigem controle de qualidade em várias etapas do processamento dos dados. As observações de radar fornecem boa representação espacial da precipitação, mas são carregadas com uma variedade de erros provenientes de diferentes fontes. Esses erros incluem *hardware*, geometria do feixe do radar, alvos não meteorológicos, bloqueio do feixe em terrenos elevados, atenuação do sinal pela chuva e propagação anômala do feixe de radar. Assim, dados de radar, mesmo após correções, ainda contêm incertezas.

Após a leitura dessa revisão, conclui-se que apesar das limitações, os radares meteorológicos têm um enorme potencial em aplicações hidrológicas. Eles oferecem a resolução desejada para pequenas bacias, especialmente urbanizadas. A qualidade dos dados de radar é uma limitação, mas algoritmos de controle de qualidade mais eficazes estão sendo desenvolvidos com técnicas de processamento de imagem e aprendizado de máquina. Novos desafios incluem a presença de sinais RLAN que perturbam os radares e o impacto negativo das fazendas de vento. A combinação de dados de radar com outras fontes, como redes de pluviômetros, melhora a estimativa quantitativa de precipitação. Também se evidenciam os métodos de *nowcasting*, que utilizam dados atuais para previsões de curto prazo, são amplamente usados e fornecem previsões razoáveis com até 2 horas de antecedência.

Hasan *et al.* (2019) exploram a importância crucial do monitoramento de precipitação no contexto de desastres naturais como enchentes, deslizamentos de terra e fluxos de detritos com foco voltado à realidade da Malásia. Em seu artigo foram enfatizadas as características dos diferentes tipos de radares meteorológicos, focando nas bandas de frequência e métodos de análise. A banda de frequência determina o tamanho mínimo das gotas de chuva detectáveis, a resolução espacial e a atenuação do sinal. Os radares de banda X, que utilizam a técnica de polarização dual, podem detectar gotas de chuva menores e oferecem maior resolução espacial e temporal em comparação com os radares de banda C e S. Contudo, a banda X é mais suscetível à atenuação por nuvens densas e chuvas intensas. Os métodos de análise de precipitação são categorizados principalmente em dois grupos: o método Z-R, que

é empírico e baseado na relação entre refletância e intensidade de precipitação, e o método *multiphase*, que se baseia na física da onda de radar e não requer dados de monitoramento de precipitação para calibração. Hasan *et al.* concluem que a combinação de radares de banda X com análise *multiphase* usando deslocamento de fase é a mais adequada para monitoramento meteorológico, devido à sua capacidade de detectar gotas de chuva menores e fornecer alta resolução espacial e temporal sem a necessidade de calibração contínua. No entanto, para a Malásia, onde a intensidade das chuvas pode ser maior, a atenuação pode ser um problema significativo, sugerindo que a implementação de redes de monitoramento com vários radares de banda X ou a consideração de radares de banda C como alternativa sensata são estratégias viáveis a serem exploradas.

O artigo de José e Menuzzi (2019) destaca que, apesar da eficiência dos radares meteorológicos, sua precisão na estimativa de precipitação é sensível a calibrações e às dinâmicas dos sistemas naturais. Em seu estudo, eles analisaram o desempenho do radar meteorológico do Oeste (RMO) de Santa Catarina na estimativa de precipitação em diferentes escalas temporais, comparando os dados do radar com os de nove estações pluviométricas entre 6 de outubro de 2017 e 31 de janeiro de 2018. Os resultados mostraram que, para acumulados em 24 horas e 60 minutos, o radar tende a superestimar a precipitação, com um desempenho considerado "muito bom" e "mediano", respectivamente. No entanto, para estimativas de 10 minutos, os resultados foram variados e classificados como de desempenho "ruim". Essa variabilidade sugere que a calibração do RMO é essencial para melhorar sua precisão, especialmente em intervalos de tempo menores.

Os autores concluíram que o desempenho do radar meteorológico diminui à medida que o intervalo de tempo estimado se torna menor. Para os acumulados de 24 horas e 60 minutos, a superestimação da precipitação é mais pronunciada em quantidades menores. Assim, neste estudo é ressaltado a importância de ajustes regulares e precisos nos radares meteorológicos para melhorar sua confiabilidade em diferentes escalas temporais, especialmente em regiões onde a precipitação pode variar significativamente em curtos períodos.

LEE, Jung Hwan *et al.* (2020) em seu artigo intitulado “*Integrated flood forecasting and warning system against flash rainfall in the small-scaled urban stream*” apresenta um sistema integrado de previsão e alerta de inundações para chuvas intensas em córregos urbanos de pequena escala. Utilizando dados de radar meteorológico, o sistema consegue prever inundações com alta precisão e emitir alertas em tempo real. O artigo discute a metodologia de integração de dados de radar com modelos hidrológicos e hidrodinâmicos para melhorar a precisão das previsões de vazões e inundações. O sistema desenvolvido é eficiente na previsão de inundações em áreas urbanas de pequena escala, e a integração de dados de radar meteorológico melhora significativamente a precisão das previsões de vazões. O sistema permite a emissão de alertas em tempo real, proporcionando tempo suficiente para ações preventivas. No entanto, a precisão das previsões depende da qualidade e resolução dos dados de radar, e o sistema pode não ser tão eficaz em áreas com topografia complexa ou densamente vegetadas. Os desafios incluem a necessidade de infraestrutura avançada para

coleta e processamento de dados de radar e a integração de dados de diferentes fontes para melhorar a robustez das previsões da metodologia.

Já no estudo de Mattos *et al.*, (2022) os autores desenvolvem uma aplicação web de alerta de inundações para reduzir riscos de desastres em bacias urbanas tropicais. Utilizando dados de radar meteorológico, o sistema fornece previsões de vazões e inundações com alta precisão. O artigo destaca a importância de tecnologias avançadas na mitigação de desastres hidrológicos em áreas urbanas. A aplicação web desenvolvida aumenta a eficiência dos sistemas de alerta de inundações, especialmente em bacias urbanas tropicais. A utilização de dados de radar meteorológico melhora a precisão das previsões de vazões e inundações. No entanto, há dependência de infraestrutura tecnológica avançada para coleta e processamento de dados, e a necessidade de atualizações regulares para manter a precisão e relevância dos dados e modelos. Os desafios incluem a adaptação da aplicação web para diferentes regiões e condições climáticas e a integração de dados de diferentes fontes para melhorar a robustez das previsões.

A análise dos estudos supracitados revela um consenso sobre a importância e os desafios do uso de dados de radar meteorológico na estimativa de precipitação e modelagem hidrológica. Dhital Kapil *et al.* (2024) enfatizam a eficácia dos dados de precipitação em grade na simulação de escoamento superficial utilizando os modelos HEC-HMS e HEC-RAS. Os resultados indicam que produtos de precipitação como o AORC e o NCEP Stage IV fornecem estimativas mais precisas do escoamento em comparação com outros produtos devido aos seus algoritmos de controle de qualidade sofisticados. Essa conclusão ressoa com o estudo de José e Menuzzi (2019), que também destacam a necessidade de calibração regular dos radares para melhorar a precisão das estimativas de precipitação em diferentes escalas temporais.

Ambos os estudos de Miguel (2019) e Miguel e Rennó (2020) investigam a aplicabilidade do modelo hidrológico SCS-CN na bacia do Rio Jacaré Guaçu e encontram desafios semelhantes aos observados por José e Menuzzi (2019), principalmente relacionados à calibração e ajuste dos dados de radar. Ambos os estudos sugerem que, embora os dados de radar ofereçam uma alta resolução espacial, a precisão das estimativas de precipitação acumulada ainda é inferior à dos pluviômetros, devido à necessidade de correção dos fatores de conversão Z-R. Essas descobertas são apoiadas pela revisão de Sokol *et al.* (2021), que aponta as limitações tecnológicas e a necessidade de calibração contínua dos dados de radar para diferentes regiões e condições climáticas.

Hasan *et al.* (2019) exploram a eficácia das diferentes bandas de frequência dos radares meteorológicos, destacando a banda X como a mais adequada para monitoramento devido à sua alta resolução espacial e temporal, embora suscetível à atenuação por chuvas intensas. Este estudo complementa as conclusões de José e Menuzzi (2019) e Miguel e Rennó (2020), enfatizando a necessidade de tecnologias avançadas para aprimorar a precisão das estimativas de precipitação. Além disso, Lee *et al.* (2019) e Mattos *et al.* (2019) demonstram a aplicação prática dos dados de radar meteorológico na previsão de inundações em áreas urbanas, sublinhando a importância de infraestruturas avançadas para coleta e processamento

de dados, e a integração de fontes diversas para melhorar a robustez das previsões. Em suma, esses estudos coletivamente enfatizam que, apesar das limitações e desafios, os dados de radar meteorológico são essenciais para a modelagem hidrológica e a gestão de recursos hídricos, com um potencial significativo para melhorias contínuas na precisão e confiabilidade das estimativas de precipitação.

3.2. Revisão e princípios de funcionamento dos radares meteorológicos

Os radares meteorológicos são dispositivos eletrônicos que emitem pulsos de energia eletromagnética na forma de micro-ondas em direção à atmosfera utilizando-se do efeito doppler. Esses pulsos de energia interagem com as partículas presentes na atmosfera, como gotas de água e cristais de gelo, que refletem parte da energia de volta para o radar. Com base no tempo decorrido entre a emissão do pulso e o retorno do sinal refletido, é possível determinar a distância e a intensidade das precipitações. Essa informação é então processada e utilizada para gerar imagens de radar que mostram a distribuição espacial e temporal da precipitação. Eles possuem uma ampla gama de aplicações, incluindo previsão de tempo, monitoramento de tempestades, detecção de fenômenos meteorológicos severos, como tornados e granizo, e estimativa de precipitação. Essas informações são essenciais para alertar a população sobre eventos climáticos adversos e para a gestão de recursos hídricos, agricultura, aviação, entre outros setores (Sokol *et al.*, 2021)

Entre os principais produtos gerados pelos radares meteorológicos estão as imagens de refletividade, que mostram a intensidade da precipitação, e os produtos de acumulação de precipitação, que fornecem informações sobre a quantidade total de chuva em uma determinada área durante um período de tempo específico. Além disso, os radares também podem gerar produtos para identificação de fenômenos severos, como ventos fortes, e para monitoramento de sistemas convectivos de mesoescala.

Os radares meteorológicos operam em uma escala temporal que varia de minutos a horas, dependendo da frequência de atualização das imagens de radar. Quanto à escala geográfica, os radares podem cobrir áreas que variam desde algumas dezenas de quilômetros até centenas de quilômetros, dependendo da potência e alcance do equipamento. No Brasil, os principais órgãos responsáveis pela operação e manutenção dos radares meteorológicos são o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e o Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN). Esses órgãos são responsáveis por uma rede de radares distribuídos por todo o país, que fornecem informações meteorológicas essenciais para a população e para a tomada de decisões em situações de risco (Inpe, 2023).

No Brasil, os principais órgãos responsáveis pela operação e manutenção dos radares meteorológicos são o INMET, CEMADEN, o Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), o Instituto de Pesquisas Meteorológicas (IPMET) e o Centro Gestor e Operacional do Sistema de Proteção da Amazônia (CENSIPAM). Esses órgãos são responsáveis por uma rede de radares distribuídos por todo o país, que fornecem informações meteorológicas essenciais para a população e para a tomada de decisões em situações de risco.

A escolha pelo uso de radares meteorológicos em vez de outras fontes de dados de precipitação busca atender à crescente necessidade de tecnologias que ofereçam maior segurança e densidade de informações sobre a precipitação. Os radares meteorológicos, em estudos hidrológicos, fornecem uma cobertura espacial significativamente mais ampla que as estações pluviométricas convencionais, permitindo um monitoramento detalhado e contínuo de grandes áreas geográficas. Como observado por Smith *et al.* (2007), a capacidade dos radares de captar a precipitação de forma distribuída os torna essenciais para avaliar a variabilidade das chuvas, especialmente em locais onde a rede de pluviômetros é esparsa. Em países de grandes dimensões, como o Brasil, essa vantagem é ainda mais evidente. A instalação de uma rede densa de estações pluviométricas, necessária para garantir uma cobertura representativa, apresenta desafios logísticos e financeiros consideráveis. Em contrapartida, os radares meteorológicos oferecem uma visão integrada e em tempo real da precipitação em um raio de centenas de quilômetros, facilitando a criação de modelos hidrológicos mais robustos e possibilitando previsões mais eficazes de eventos extremos.

Ochoa-Rodriguez *et al.* (2015) reitera o supracitado evidenciando, em seu trabalho que em regiões urbanas, a resolução espacial e temporal dos dados de radar também impacta significativamente sua aplicação. Esses autores avaliaram o efeito da resolução de entrada em modelos hidrodinâmicos urbanos e identificaram que uma baixa resolução temporal e espacial compromete a representação da precipitação e, conseqüentemente, dos picos de escoamento em áreas densas. Essa questão é crítica em ambientes urbanos, onde a resposta hidrológica depende da precisão dos dados em escala fina para representar corretamente o escoamento de águas pluviais.

A precisão dos produtos de radar, que incluem dados de refletividade e velocidade das gotas de precipitação, permite que esses dispositivos capturem com mais eficácia as complexas dinâmicas atmosféricas. Krajewski e Villarini (2010) destacam a importância dos radares meteorológicos para a hidrologia urbana e rural, uma vez que suas leituras contínuas viabilizam a detecção de eventos intensos de precipitação, como tempestades convectivas, que ocorrem em escalas espaciais e temporais muitas vezes não detectadas pelas estações pluviométricas. Adicionalmente, Berne e Krajewski (2013) discutem o uso de dados de radar na modelagem hidrológica e no planejamento de infraestruturas de controle de cheias, ressaltando que a integração desses dados em modelos preditivos possibilita uma resposta mais ágil e eficiente a eventos de inundação. Essa capacidade de antecipação é essencial para a gestão dos recursos hídricos em um país com diferentes regimes pluviométricos, como o Brasil, onde a variabilidade espacial e temporal da chuva pode impactar gravemente áreas urbanas e rurais.

3.3. Revisão histórica acerca de radares meteorológicos

O radar, cujo nome é uma sigla em inglês para Radio Detection and Ranging, foi originalmente criado para fins militares, com o objetivo principal de localizar aeronaves e embarcações inimigas por meio da reflexão de ondas de rádio emitidas por uma estação transmissora. Contudo, durante a Segunda Guerra Mundial, operadores militares observaram que os sinais de radar eram ocasionalmente perturbados por interferências que, ao serem

investigadas, revelaram-se reflexos de partículas de chuva e outros tipos de precipitação atmosférica. Embora inicialmente vistas como ruído indesejado, essas reflexões meteorológicas foram o primeiro indício de que a tecnologia poderia ser aplicada no monitoramento de eventos climáticos (Atlas et al., 1973).

Após o fim da guerra, pesquisadores passaram a adaptar os radares militares para o estudo da atmosfera, estabelecendo as bases para o uso meteorológico formal da tecnologia. Na década de 1940, cientistas do Reino Unido e dos Estados Unidos realizaram experimentos pioneiros. Um exemplo relevante foi a Marinha dos EUA, que ajustou radares de curto alcance para observar tempestades tropicais e sistemas de chuva, sinalizando uma transição do radar como ferramenta militar para seu emprego na meteorologia (Doviak e Zrníc, 2006).

Já na década de 1950, o aumento da severidade dos fenômenos meteorológicos, como furacões e tornados, especialmente nos Estados Unidos, impulsionou a demanda por tecnologias mais avançadas para o monitoramento do tempo. Em 1957, foi lançado o WSR-57 (Weather Surveillance Radar-1957), o primeiro radar concebido especificamente para uso meteorológico. Esse equipamento foi um marco importante, pois permitiu, pela primeira vez, o monitoramento contínuo e em tempo real de precipitações e tempestades severas (Wood e Brown, 2013).

Operando com a tecnologia de radar de pulso, o WSR-57 emitia feixes de micro-ondas que eram refletidos pelas gotículas de água e outras partículas presentes nas nuvens. A intensidade dos sinais refletidos, ou seja, a refletividade, permitia mapear a localização e a intensidade das precipitações. No entanto, esse sistema apresentava limitações, pois não conseguia captar o movimento das partículas atmosféricas, o que impedia previsões mais detalhadas sobre ventos fortes e tornados (Doviak e Zrníc, 2006).

Na década de 1970, a introdução da tecnologia Doppler revolucionou o radar meteorológico, aumentando drasticamente sua precisão. Com o efeito Doppler, os radares passaram a ser capazes de medir a velocidade radial das partículas em relação ao radar, permitindo identificar se elas estavam se aproximando ou se afastando. Dessa forma, os radares Doppler não apenas mapearam a precipitação, mas também forneciam informações valiosas sobre os ventos e a circulação atmosférica, fatores cruciais para a identificação de eventos meteorológicos perigosos, como tornados (Wood e Brown, 2013).

O uso do radar Doppler se popularizou na década de 1980, com a introdução do WSR-88D (Weather Surveillance Radar-1988 Doppler) nos Estados Unidos. Este sistema trouxe melhorias significativas na detecção de fenômenos meteorológicos severos, possibilitando previsões mais precisas e rápidas respostas em situações de emergência. O WSR-88D também oferecia a capacidade de gerar imagens tridimensionais das tempestades, proporcionando uma compreensão mais profunda da estrutura interna desses sistemas (Atlas et al., 1973).

Nos anos 2000, os radares meteorológicos passaram por outro grande avanço com a adoção da dupla polarização. Diferentemente dos radares tradicionais, que emitem sinais apenas na direção horizontal, os radares de dupla polarização emitem em duas direções —

horizontal e vertical. Essa inovação permite distinguir entre diferentes tipos de precipitação, como chuva, neve, granizo, e até mesmo identificar detritos suspensos em tornados, oferecendo uma análise mais detalhada dos hidrometeoros e suas características (Doviak e Zrníć, 2006).

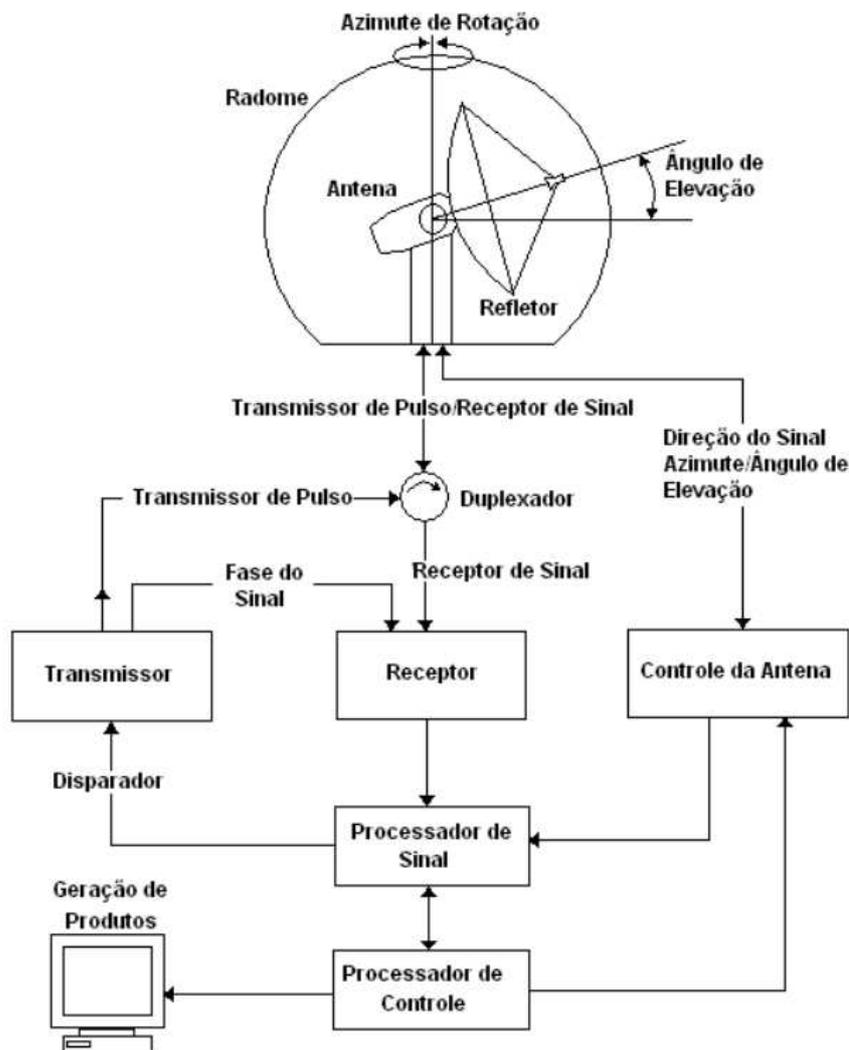
3.4 Princípios de funcionamento do radar

O radar meteorológico opera com a emissão e recepção de ondas eletromagnéticas, tipicamente nas faixas de frequência de micro-ondas (300 MHz a 300 GHz). Essas ondas interagem com alvos atmosféricos, como gotas de chuva, neve e granizo, e parte da energia é refletida de volta ao radar. A frequência mais comum utilizada em radares meteorológicos está entre 2,7 a 3 GHz (banda S), 5,4 a 5,9 GHz (banda C) e 9 a 10 GHz (banda X). Radares de alta frequência (como o X-band) detectam partículas menores, mas possuem menor alcance devido à maior atenuação do sinal em precipitações intensas. Já os radares de baixa frequência (como o S-band) têm maior alcance e são comumente usados para monitorar tempestades severas, como ciclones tropicais, sendo amplamente utilizados nos Estados Unidos. O C-band, de frequência intermediária, oferece um equilíbrio entre alcance e custo (Battan, 1962).

O funcionamento de um radar convencional baseia-se na emissão de pulsos eletromagnéticos por um transmissor, que envia esses sinais à antena através de um duplexer, responsável pelo chaveamento entre transmissão e recepção. A antena direciona as ondas para a atmosfera, onde elas interagem com alvos meteorológicos, como nuvens e precipitação. Parte da energia dessas ondas é retroespalhada de volta à antena, com menor intensidade, e redirecionada pelo duplexer ao receptor. A distância até os alvos é calculada com base no tempo de retorno do sinal, e a intensidade da precipitação é determinada pela diferença entre a energia transmitida e a recebida. A resolução dos dados de radar depende da duração dos pulsos e da média dos retornos de múltiplos pulsos emitidos para a mesma área, garantindo precisão nas medições (Probert-Jones, 1962). O esquema de funcionamento do radar é mostrado na Figura 3.1.

Figura 3.1. Diagrama básico de um radar doppler

Fonte: Queiroz 2009



Os pulsos de radar têm uma duração (ou comprimento) que influencia a resolução espacial das medições. Pulsos mais curtos oferecem maior resolução, mas com menor potência de retorno, o que limita o alcance efetivo. As ondas eletromagnéticas têm propriedades fundamentais que influenciam a interação com as partículas atmosféricas, incluindo comprimento de onda (λ), frequência (f), e a relação entre essas grandezas é dada pela equação abaixo. Onde λ é o comprimento de onda (m), c é a velocidade da luz (m/s) e f é a frequência da onda seguinte a fórmula 3.1.

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (3.1)$$

Além da detecção de precipitação, muitos radares meteorológicos são equipados com capacidade Doppler, que mede a velocidade radial das partículas em movimento (vento). O efeito Doppler é a mudança na frequência da onda refletida devido ao movimento relativo das partículas em relação ao radar. A equação Doppler para a velocidade radial é dada pela equação X. Onde v_r é a velocidade radial, Δf é o desvio Doppler (diferença entre a frequência emitida e recebida), f_0 é a frequência central da onda emitida, conforme fórmula 3.2

$$v_r = \frac{\Delta f}{2f_0} c \quad (3.2)$$

O tempo entre a emissão e a recepção do sinal é da ordem de microssegundos e permite a determinação da distância dos alvos atmosféricos. O radar pulsado, como o utilizado em Bauru (modelo EEC DWR-88S, banda S), alterna entre os momentos em que emite e aqueles em que recebe os ecos de retorno. Esses pulsos são transmitidos em intervalos controlados por uma frequência de repetição de pulso (PRF), que em radares Doppler varia de 700 a 3000 Hz, permitindo também a detecção da velocidade de deslocamento dos alvos, além de sua localização.

Além da frequência e do comprimento do pulso, outro fator importante é a polarização do sinal de radar. A maioria dos radares convencionais usa uma única polarização horizontal (radar de polarização simples), mas os radares polarimétricos, que estão se tornando mais populares, transmitem e recebem sinais tanto na polarização horizontal quanto na vertical. Essa tecnologia permite obter mais informações sobre os hidrometeoros (gotas de chuva), melhorando a precisão das estimativas de chuva.

A maioria das antenas utilizadas em radares é direcional, concentrando a energia em uma direção específica. Antenas que irradiam igualmente em todas as direções são denominadas isotrópicas. De acordo com a teoria das antenas, o ganho de uma antena é determinado pela relação entre sua área efetiva (A_{ef}) e o comprimento de onda da radiação transmitida, conforme a equação 3.3.

$$G = \frac{4\pi A_{ef}}{\lambda^2} \quad (3.3)$$

O ganho representa a capacidade da antena de concentrar a potência no lóbulo principal, onde mais de 90% da energia irradiada está focada. No entanto, parte dessa energia é dispersa nos lóbulos laterais, que se formam devido às limitações físicas e construtivas da antena. Esses lóbulos laterais resultam em ecos de retorno indesejados, que são interpretados como ruído, afetando a precisão dos dados capturados.

A largura do feixe principal, onde se concentra metade da potência total transmitida, pode ser calculada em função do comprimento de onda transmitido (λ) e do diâmetro da antena (D_a), no caso de uma antena parabólica circular com foco iluminado (Doviak e Zrnić, 2006). As equações que descrevem essa relação são a 3.4 e a 3.5:

$$\theta_0^g = \frac{72,76\lambda}{D_a} \text{ (Ângulos em graus)} \quad (3.4)$$

$$\theta_0^r = \frac{1,27\lambda}{D_a} \text{ (Ângulos em Radianos)} \quad (3.5)$$

Nessas equações, θ_0^g e θ_0^r representam os ângulos de abertura do feixe, formando um cone onde metade da potência transmitida está concentrada.

Já o volume iluminado (V_i) pelo radar refere-se ao espaço tridimensional que o feixe de micro-ondas cobre ao interagir com a atmosfera. Esse volume aumenta com o quadrado da

distância do radar, e representa a capacidade de resolução volumétrica do radar. Ou seja, se dois ou mais alvos estiverem dentro desse volume, eles serão detectados como um único alvo, resultando em um único eco (Rinehart, 1997). A equação para calcular o volume iluminado é dada pela equação 3.6:

$$V_i = \frac{\pi(r^2)\theta_0\phi_0h}{8\ln 2} \quad (3.6)$$

Na equação, θ_0 e ϕ_0 correspondem aos ângulos de abertura do feixe, medidos a -3 dB na horizontal e vertical, respectivamente. O volume iluminado aumenta à medida que o pulso se afasta do radar, influenciando a precisão da detecção dos alvos atmosféricos.

A largura do pulso (h) está relacionada à duração (τ) do pulso transmitido e à velocidade da luz (c), conforme a Equação 3.7:

$$h = \frac{c\tau}{2} \quad (3.7)$$

Essa largura define a máxima resolução espacial do radar, ou seja, a menor distância que o radar consegue discernir entre dois alvos distintos. Quanto maior o tempo de duração do pulso, maior será a largura do pulso e, conseqüentemente, menor a resolução espacial. O volume iluminado é, portanto, um fator determinante na precisão da detecção de alvos e na qualidade dos dados de precipitação fornecidos pelo radar.

3.4.1. Princípio matemático e equação do radar

O princípio matemático dos radares meteorológicos baseia-se na interação de ondas eletromagnéticas com as partículas suspensas na atmosfera, conhecidas como hidrometeoros. Essas partículas, quando iluminadas pelo radar, retro espalham a energia recebida, e a intensidade do sinal refletido fornece informações sobre a taxa de precipitação. O cálculo do sinal de retorno utiliza a equação do Radar, que relaciona a potência retroespalhada com a refletividade volumétrica das partículas dentro do volume amostrado.

Seguinte Probert-Jones (1962) a equação básica do radar meteorológico descreve a relação entre a potência do sinal recebido e a refletividade dos alvos. Para um radar meteorológico simplificado, a equação do radar é descrita na 3.8.

$$Pr = \frac{Pt*G^2*\lambda^2*\sigma}{(4\pi)^3r^4} \quad (3.8)$$

Onde Pr é a potência recebida (W), Pt é a potência transmitida (W), G é o Ganho da antena, λ é comprimento de onda (m), σ é a Seção transversal efetiva de espalhamento (m^2), o $(4\pi)^3$ fator geométrico e o r^4 é a quarta potência da distância (m^4).

Para se entender como se deduz essa equação é necessário entender alguns outros conceitos como a Densidade de Potência Transmitida (St). A densidade de potência representa a energia transmitida pelo radar, distribuída sobre a área de uma esfera de raio r . Ela é expressa pela potência transmitida Pt multiplicada pelo ganho da antena G e dividida pela área da esfera (Battan, 1962). conforme equação 3.9.

$$St = \frac{Pt^*G}{4\pi r^2} \quad (3.9)$$

Cada partícula intercepta parte da densidade de potência transmitida, retroespalhada-a de volta ao radar. A quantidade de energia refletida é proporcional à seção transversal de retroespalhamento σ de cada partícula uma vez que o tamanho físico do alvo não corresponde necessariamente ao tamanho medido pelo radar, resultando na expressão 3.10.

$$Ps = St * \sigma = \frac{Pt^*G*\sigma}{4\pi r^2} \quad (3.10)$$

Onde σ representa a seção transversal de retroespalhamento, uma medida da quantidade de energia que cada partícula dispersa de volta ao radar, sendo fundamental para a análise da refletividade (Doviak & Zrnić, 2006).

A antena do radar tem uma área efetiva (A_e) que capta a energia retroespalhada. Essa área depende do ganho da antena G e do comprimento de onda λ , e é expressa por.

$$A_e = \frac{G\lambda^2}{4\pi} \quad (3.11)$$

A potência total recebida pelo radar (P_r) é o produto da densidade de potência retroespalhada (P_s) e a área efetiva da antena (A_e). Substituindo P_s e A_e na expressão, temos a relação 6.12.

$$Pr = Ps * A_e = \frac{Pt^*G*\sigma}{4\pi r^2} * \frac{G\lambda^2}{4\pi} \quad (3.12)$$

Quando consideramos o fator de refletividade volumétrica Z , que é proporcional à soma das seções de retroespalhamento de todas as partículas em um volume, substituímos σ por Z e dividimos o efeito da distância de ida e volta ao radar, resultando na equação 3.13.

$$Pr = \frac{Pt^*G^2*\lambda^2*Z*|K|^2}{(4\pi)^3*r^4} \quad (3.13)$$

A meteorologia quantitativa de radar repousa sobre a premissa, estabelecida muito cedo, de que a refletividade do radar (η), de qualquer região dada da atmosfera é proporcional à soma das seções transversais de retrodispersão, das partículas dentro dela. onde $|K|^2$ é um fator dielétrico, X é o comprimento de onda do radar, e D denota o diâmetro de um dispersor individual 5.15, 5.16 e 5.17.

A seção transversal de espalhamento é produzida pelo efeito integrado de todos os hidrometeoros dentro do volume iluminado pelo feixe de microondas. Então, pode-se deduzir σ a partir da contribuição individual de cada hidrometeoro. Ao considerarmos o volume iluminado pelo pulso temos a relação 3.14:

$$\sigma = \frac{\sum_i \sigma_i}{V} = \frac{\pi^5 |K|^2}{\lambda^4} * \frac{\sum_i D_i^6}{V} \quad (3.14)$$

Onde η é coeficiente de refletividade volumétrica (em m^2/m^3) e D_i o diâmetro de cada gota e i é a i -ésima gota presente no volume iluminado. Assim a secção transversal de espalhamento é produzida pelo efeito integrado de todos os hidrometeoros dentro do volume iluminado pelo feixe de microondas. Então, pode-se deduzir σ a partir da contribuição individual de cada hidrometeoro. Esse valor é conhecido como Refletividade Radar (Z) e é expresso em mm^6m^{-3} podendo variar desde valores próximos de $0,001 mm^6m^{-3}$ (névoa úmida) até $36.000.000 mm^6m^{-3}$ (granizo grande ~ 5 a 10 cm) (De queiroz, 2009).

$$\eta \simeq \sum_i \sigma_i \quad (3.15)$$

$$Z = \sum_{i=1}^N D_i^6 \quad (3.16)$$

$$\eta \simeq \frac{|K|^2}{\lambda^4} \sum_i D_i^6 = \frac{|K|^2}{\lambda^4} Z \quad (3.17)$$

O radar meteorológico opera no regime de dispersão de Rayleigh, aplicável quando as partículas são muito menores que o comprimento de onda do radar ($d \ll \lambda$), como é o caso das gotas de chuva para frequências meteorológicas usuais. Nessas condições, o espalhamento da onda eletromagnética depende da sexta potência do diâmetro da partícula, o que significa que o fator de refletividade volumétrica (Z) é proporcional ao número e ao tamanho das partículas dentro de um volume.

O $|K|^2$ é o módulo ao quadrado da constante dielétrica das partículas, um valor que varia dependendo do material e que, para a água, é essencial na determinação da refletividade. Ele é definido pela expressão 3.18.

$$K = \frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \quad (3.18)$$

O valor de K depende do material, da temperatura e do comprimento de onda do radar. A maior dependência está relacionada com o material. Em geral, para radares meteorológicos este coeficiente é $|K|^2 = 0,93$ para a água líquida, e $|K|^2 = 0,197$ para o gelo.

Devido a grande variação dos valores de Z utiliza-se Z em escala logarítmica como unidade de dBZ isto é, número de decibéis relativos a refletividade de $1 mm^6m^{-3}$ para o espectro acima mencionado tem-se uma variação de -30 a $76,5$ dBZ..

$$dBZ = 10 \log_{10}(z) \quad (3.19)$$

Para se obter a medida indireta da chuva, Atlas *et al.* (1973), afirma que o radar recebe uma determinada densidade de potência refletida pelos alvos de chuva denominado refletividade. Esta refletividade possui uma relação física com o espectro de gotas observado. A partir deste espectro pode-se determinar uma relação entre a refletividade do radar e a taxa de precipitação correspondente. Assim a refletividade efetiva pode ser encontrada pela expressão 3.20.

$$Z_e = \int_0^{\infty} N(D_i) D_i^6 dD_i \quad (3.20)$$

Onde N é o número de gotas de um determinado diâmetro D_i , em mm. Resolvendo a integral nós obtemos a equação 5.16.

Atlas *et al.* (1973) desenvolveram uma abordagem inovadora para calcular a taxa de precipitação, fundamentando-se em uma compreensão aprofundada das dinâmicas de queda das gotas de chuva. A equação que expressa essa taxa é representada pela expressão 3.21.

$$R = \int_0^{\infty} \frac{\pi D_i^3}{6} N(D_i) w_t(D_i) dD_i \quad (3.21)$$

Onde R é a taxa de precipitação e w_t é a velocidade terminal da gota, expressa em metros por segundo (m/s). Para determinar a velocidade terminal de uma gota com um diâmetro específico D_i , Atlas *et al.* introduziram a seguinte relação 3.22.

$$w_t(D_i) = 9.65 - 10.3 \exp(-0.6 D_i) \quad (3.22)$$

Essa equação demonstra que a velocidade terminal das gotas diminui à medida que o diâmetro aumenta, um conceito crucial para a previsão de eventos de precipitação. O raciocínio por trás dessa abordagem foi fundamentado em experimentos empíricos e análises detalhadas, que levaram os autores a entender a relação complexa entre o tamanho das gotas de chuva e a velocidade com que elas caem. Além disso, Atlas *et al.* notaram que, ao conhecer a distribuição do tamanho das gotas e a respectiva velocidade de queda, é possível aplicar o fator de refletividade do radar, Z_e (medido em mm^6/m^3), para calcular a taxa de precipitação. Essa relação é conhecida como relação Z-R expressa popularmente pela expressão 3.23.

$$Z_e = aR^b \quad (3.23)$$

Onde o 'a' e o 'b' são coeficientes que dependem do tamanho e distribuição do espectro de gotas na atmosfera, muitas vezes definidos de forma empírica para a atribuição de determinado tipo de chuva. Miguel (2018), em seu trabalho, lista uma série de valores de 'a' e de 'b' encontrados por diversos autores, conforme Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Algumas relações empíricas entre o fator de refletividade Z_e (mm^6m^{-3}) e a intensidade da precipitação R (mm.h^{-1}).

Relação Z-R	a	b	tipo de precipitação
Marshall & Palmer (1948)	200	1.6	Homogêneas e estratiformes
Blanchard (1953)	31	1.37	Orográficas
Jones (1956)	486	1.37	Convectivas
Joss Walvogel (1967)	230	1.4	Médias
Joss Walvogel (1967)	400	1.3	Processos convectivos intensos
Joss Walvogel (1967)	100	1.4	Processos frontais - Gotas muito pequenas
Smith <i>et al.</i> (1975)	155	1.88	Convectivas - Presença de granizo
Sekhon & Srivastava (1970)	1780	2.21	Neve
Calheiros <i>et al.</i> (1987)	32	1.65	Região do radar de Bauru
Moraes (2003)	176.5	1.29	Região do radar de Maceió

A emissão do pulso pode se dar em uma potência elevada da ordem de 10^6 watts, dependendo da sua aplicação, porém o sinal recebido sofre com várias atenuações retornando com uma potência na ordem de 10^{-13} watts. Por conta disso, introduz a medida de potência por decibéis (db) (Barbosa, 2000).

$$P(\text{dB}) = 10 * \text{Log}\left(\frac{P_i}{P_0}\right) \quad (3.24)$$

3.4.2. Interferências e Atenuações

Medidas realizadas com radar meteorológico para estimativas de precipitação enfrentam várias fontes de erro devido às limitações físicas, operacionais e ambientais do sistema. A dispersão do feixe radar, por exemplo, é um problema destacado por Krajewski e Villarini (2010), que explicam como o feixe se expande com o aumento da distância do radar, iluminando volumes maiores de atmosfera e, conseqüentemente, diluindo a refletividade. Esse efeito reduz a resolução espacial e prejudica a capacidade de capturar variações locais de intensidade da chuva, levando a subestimativas ou superestimativas da precipitação.

Outro fator importante é o impacto do perfil vertical de refletividade (VPR), que descreve a variação da refletividade em função da altura na coluna atmosférica. Andrieu et al. (1997) ressaltaram que o VPR influencia diretamente as estimativas de precipitação ao solo,

principalmente em regiões montanhosas ou com mudanças significativas na fase dos hidrometeoros, como a presença da banda brilhante. Esse fenômeno ocorre nas proximidades da linha de congelamento, onde o derretimento de partículas de gelo gera reflexões intensas que podem ser erroneamente interpretadas como chuva mais forte na superfície. Correções para o VPR geralmente utilizam modelos que levam em conta a atenuação e a distribuição vertical dos hidrometeoros, ajustando a refletividade medida em altitudes elevadas. De acordo com os autores, a equação de correção para o VPR pode ser simplificada como a expressão 3.25.

$$Z(h) = Z_0 * e^{-\beta h} \quad (3.25)$$

Onde Z_0 é a refletividade no nível do solo, e β é o coeficiente de decaimento vertical, ajustado empiricamente com base em observações locais. A derivação desse perfil assume que a precipitação decai exponencialmente em camadas superiores devido à evaporação ou derretimento. Correções adequadas para o VPR são indispensáveis, especialmente em áreas montanhosas, onde o radar frequentemente detecta precipitação acima da linha de congelamento.

A atenuação do sinal é outro desafio crítico. A absorção e o espalhamento por partículas de precipitação, além da presença de gases atmosféricos, reduz a potência recebida pelo radar. A intensidade dessa atenuação é modelada pela equação da Lei de Beer, conforme discutido por Doviak e Zrníc (2006). Essa relação evidencia que, em bandas de frequência mais altas (como X e C), os efeitos de absorção e espalhamento são ainda mais significativos. Doviak e Zrníc (2006) e Sokol *et al.* (2020) ressaltaram que tais perdas não apenas afetam as estimativas de precipitação, mas também introduzem um viés negativo que deve ser corrigido por meio de algoritmos específicos.

A interação entre o volume iluminado e a seção de retroespalhamento dos hidrometeoros também impacta a precisão das medições. O volume iluminado aumenta com a distância devido à abertura angular do feixe, resultando em medições de refletividade média que podem mascarar variações importantes. Além disso, a seção de retroespalhamento depende das características físicas dos hidrometeoros, como tamanho, forma e composição. Partículas irregulares como neve e granizo introduzem maior variabilidade nas medições (Doviak & Zrníc, 2006).

Ecos de terreno, ou clutter, representam outra fonte significativa de erro, especialmente em áreas montanhosas ou urbanas densas. Esses ecos, resultantes da reflexão do feixe radar em superfícies sólidas, aparecem como falsos sinais de precipitação. Thorndahl *et al.* (2017) destacaram que métodos como filtragem Doppler, mapas digitais de terreno e técnicas de polarimetria (baseadas em parâmetros como ZDR e ρ_{HV}) têm sido eficazes para minimizar o clutter, embora sua eliminação completa ainda seja um desafio. Esses métodos, no entanto, requerem processamento computacional intenso e dependem de configurações precisas dos radares.

Além disso, interferências externas, como sinais de redes de rádio (RLANs) que operam na mesma faixa de frequência de radares em banda C, geram ruído nos dados. Thorndahl *et al.* (2017) também identificaram que tais interferências comprometem a detecção precisa da precipitação, exigindo desenvolvimento contínuo de algoritmos para separação de ruído e eco meteorológico.

Por fim, a integração de dados de radar com medições de pluviômetros é uma estratégia comum para melhorar a acurácia das estimativas de precipitação como apontado por diversos autores. No entanto, a qualidade dos dados pluviométricos e a densidade da rede influenciam diretamente a eficácia dessa integração. Dados inconsistentes podem amplificar erros nas estimativas, especialmente em eventos intensos de chuva. A utilização de radares polarimétricos e redes de alta densidade tem mostrado avanços significativos na redução de incertezas, mas as limitações inerentes aos sistemas de radar e às condições atmosféricas ainda representam desafios consideráveis.

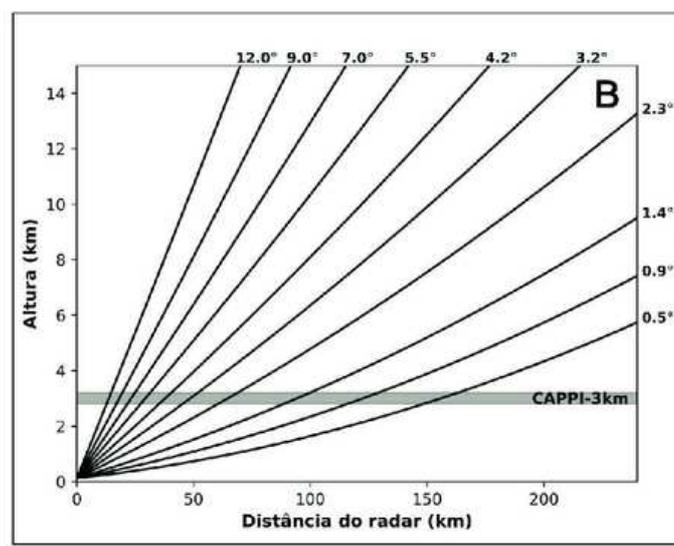
3.4.3. Principais Produtos de Radar: O CAPPI a 3,5 km

O radar meteorológico oferece diversos produtos derivados de suas medições, sendo o CAPPI (Constant Altitude Plan Position Indicator) um dos mais relevantes. O CAPPI é um produto gerado a partir da interpolação de dados de refletividade obtidos em diferentes ângulos de inclinação do radar, ajustando-os para uma altitude fixa. A escolha da altitude de 3,5 km é amplamente utilizada em estudos hidrológicos e meteorológicos, pois corresponde à faixa ideal para captar eventos de precipitação, equilibrando os efeitos de precipitação na superfície e a atenuação devido ao deslocamento vertical das partículas no perfil atmosférico. Essa altitude evita as interferências próximas ao solo, como ecos de terreno (*ground clutter*), e reduz os efeitos de precipitação congelada, como o bright band (Atlas *et al.*, 1973).

A precisão do CAPPI depende diretamente da abertura angular do feixe do radar, que influencia a resolução espacial dos dados. Uma abertura angular estreita permite maior detalhamento horizontal e vertical, essencial para detectar com precisão a estrutura das tempestades e a distribuição da precipitação. Por outro lado, aberturas angulares maiores podem gerar interpolações menos precisas, reduzindo a confiabilidade do produto. Isso pode ser visto na Figura 3.2 que demonstra os efeitos de curvatura da terra junto com o ângulo de abertura no feixe do radar na captura e definição da altitude de captura.

Figura 3.2: Relação distância de detecção do radar e altura

Fonte: Coelho *et al.* (2020)



O CAPPI a 3,5 km, portanto, é amplamente reconhecido como uma ferramenta crucial para a análise de eventos de precipitação em função de sua capacidade de fornecer uma visão uniforme e abrangente da refletividade em uma altitude constante.

3.4.4. Produtos de radar

As estações pluviométricas são amplamente utilizadas para medir a precipitação em pontos específicos. Essas medições são feitas através da coleta direta de água da chuva e são conhecidas por serem relativamente precisas e de baixo custo. Contudo, os pluviômetros também apresentam erros, que podem ser divididos em dois grandes grupos: erros instrumentais e erros de amostragem espacial (Ochoa-Rodriguez, *et al.*, 2019). Os erros instrumentais incluem, por exemplo, perdas por evaporação, respingos de água e deformações causadas pelo vento, podendo subestimar a quantidade real de precipitação. Esses erros variam entre 2% e 10%, dependendo das condições locais, como a velocidade do vento. Além disso, os pluviômetros de balde basculante, amplamente utilizados, podem perder água durante o movimento de basculação, o que pode levar a erros de até 20% em precipitações intensas, embora parte desse erro possa ser corrigido com calibrações dinâmicas (Molini *et al.*, 2005).

Por outro lado, há também os erros de amostragem espacial, que decorrem do fato de os pluviômetros medirem a precipitação em um ponto específico, o que pode não representar adequadamente a distribuição espacial da chuva numa área maior. Isso torna as medições por pluviômetros menos representativas em casos de eventos pluviométricos heterogêneos, como tempestades localizadas.

Os radares meteorológicos, por sua vez, medem a precipitação de forma indireta, através do envio de pulsos de radiação eletromagnética que são refletidos pelas gotas de chuva. Esses sistemas têm a vantagem de fornecer medições instantâneas e volumétricas,

cobrindo grandes áreas, o que é particularmente útil para monitorar tempestades em tempo real. Contudo, as medições por radar estão sujeitas a uma série de erros, devido à sua natureza indireta.

Um dos principais erros associados aos radares é o erro de medição do sinal de retorno, que pode ser causado por fatores como o bloqueio do feixe, o alargamento do feixe à medida que a distância do radar aumenta e a presença de ecos não meteorológicos, como edifícios ou montanhas. Além disso, os erros de conversão de refletividade para taxa de precipitação também são significativos, já que essa conversão é baseada em uma relação empírica ($Z-R$), que não consegue representar adequadamente a distribuição de tamanho das gotas de chuva, especialmente em eventos extremos. Tecnologias mais recentes, como os radares polarimétricos, ajudam a mitigar alguns desses erros ao fornecer informações mais detalhadas sobre a precipitação, permitindo uma estimativa mais precisa, sobretudo em chuvas intensas (Ochoa-Rodriguez, *et al.*, 2019).

Tanto os pluviômetros quanto os radares meteorológicos possuem erros intrínsecos, sendo que os primeiros estão mais sujeitos a erros relacionados à medição pontual e às condições locais, enquanto os radares sofrem com a incerteza associada à medição indireta e à conversão dos dados. Por isso, muitas vezes, as medições de pluviômetros são usadas como referência para calibrar e corrigir os dados de radar, melhorando a acurácia das estimativas de precipitação em larga escala.

3.5. Modelagem hidrológica utilizando HEC-HMS

O HEC-HMS é amplamente utilizado em estudos de hidrologia e recursos hídricos, incluindo a previsão de vazões em rios, a análise de cheias, a gestão de recursos hídricos, o planejamento de barragens e o dimensionamento de estruturas hidráulicas. Além disso, o modelo também é empregado em estudos de impactos ambientais, como a avaliação de mudanças no uso do solo e de projetos de recuperação de bacias hidrográficas.

Entre os principais produtos gerados pelo HEC-HMS estão as curvas de vazão, que mostram a relação entre a precipitação e o escoamento em um determinado ponto da bacia hidrográfica ao longo do tempo. Além disso, o modelo também gera informações sobre volumes de escoamento, tempo de concentração, hidrogramas de cheia e outros parâmetros hidrológicos importantes para a análise de eventos de precipitação (USACE, 2023).

Uma das principais limitações do HEC-HMS é a necessidade de dados precisos e representativos da bacia hidrográfica, incluindo dados de precipitação, uso do solo e características do solo, o que nem sempre está disponível, principalmente em áreas remotas. Além disso, o modelo pode apresentar dificuldades em simular eventos extremos e em bacias com características muito complexas, como fortes gradientes de altitude e cobertura vegetal heterogênea. Por outro lado, o HEC-HMS apresenta várias vantagens, como a flexibilidade para representar diferentes processos hidrológicos, a interface amigável que facilita a entrada e análise de dados e a possibilidade de calibração e validação do modelo com base em dados

observados. Além disso, o modelo é amplamente reconhecido e utilizado pela comunidade científica e técnica, o que facilita a troca de informações e a replicabilidade dos estudos.

Em áreas urbanas, o estudo de Cruz *et al.* (2023) investigou a eficiência das medidas de controle de enchentes no distrito Audi-União, em Curitiba, utilizando os modelos HEC-HMS e HEC-RAS. O estudo destacou que a construção de canais de desvio e o uso de reservatórios conseguiram reduzir significativamente a área de inundação e as vazões de pico. Contudo, o trabalho também evidenciou a importância da integração de medidas estruturais e não estruturais, como a criação de áreas de proteção ambiental e a realocação de famílias, para garantir a proteção das áreas mais vulneráveis. Em um contexto urbano, como o apresentado por Cruz *et al.* (2023), o HEC-HMS demonstrou ser uma ferramenta eficaz, mas dependente de dados de alta qualidade, como o uso do solo atualizado e informações sobre as características da bacia. A precisão das simulações no modelo pode ser comprometida na ausência de dados específicos e detalhados, como o uso de rede de drenagem e padrões de impermeabilização.

O estudo de Paul *et al.* (2021) revisou modelos hidrológicos em escalas globais, continentais e nacionais, destacando a importância da escolha adequada de modelos para diferentes contextos e características de bacias hidrográficas. A análise mostrou que, para países em desenvolvimento, é crucial selecionar modelos que se adaptem às condições locais e que integrem diferentes resoluções espaciais e temporais para representar de forma precisa os processos hidrológicos. De acordo com a pesquisa, a escolha do modelo adequado deve considerar a disponibilidade de dados, a complexidade do modelo e as limitações de parametrização. No caso de bacias urbanas e regiões com dados escassos, como o estudo de Cruz *et al.* (2023), a integração de ferramentas GIS pode aprimorar a modelagem, possibilitando uma melhor representação das características físicas da área e dos processos hidrológicos.

Além disso, o uso de dados de radar meteorológico, como sugerido por Paul *et al.* (2021), pode melhorar a representatividade espacial da precipitação e, conseqüentemente, a precisão das simulações no HEC-HMS, especialmente em regiões onde os dados de precipitação são limitados. Esses dados de radar são cruciais para simulações mais precisas, especialmente em bacias grandes e áreas com heterogeneidade espacial, como observado por Cruz *et al.* (2023). A utilização de dados de radar permite capturar com maior detalhe a distribuição da precipitação, algo essencial para a melhoria do desempenho do modelo em escalas maiores, como proposto por Paul *et al.* (2021).

No artigo de Lin, *et al.* (2022) é apresentado um sistema protótipo web para simulação e previsão de inundações baseado no modelo HEC-HMS. O sistema visa facilitar o acesso à modelagem hidrológica para usuários não especialistas, permitindo a simulação de cenários de inundação e a tomada de decisões mais eficazes para a gestão de recursos hídricos e mitigação de desastres. de modo que o sistema visa, ao se integrar com o HEC-HMS torna sua interface mais amigável facilitando a entrada de parâmetros.

O estudo discute a utilização do modelo HEC-HMS em ambiente web para simulação e previsão de enchentes. No entanto, é apontado que este sistema pode ser adaptado para sistemas de apoio à decisão dedicados à gestão integrada de recursos hídricos, conservação de água e solo, gestão de reservatórios, investigação dos efeitos das mudanças climáticas, entre outros. Nesse caso, o HEC-HMS pode facilmente integrar ferramentas e plataformas existentes, como SWAT-CUP e SWATShare, ampliando as opções de colaboração e pesquisa em hidrologia. Por exemplo, quando vinculado ao SWATShare, pode trazer este como um ambiente colaborativo para pesquisa e educação em hidrologia para a comunidade do modelo HEC-HMS.

O estudo de Urbani, Graciosa, & Valverde, (2023) em torno do córrego Ipiranga-SP apresentou manchas de inundação de diferentes períodos de retorno (TRs) utilizando vazões de projeto obtidas com parâmetros de simulação calibrados a partir de dados observados. Foi identificado que áreas residenciais de baixa renda são mais impactadas por eventos de inundação, destacando a necessidade de mitigação dos danos nessas regiões. Além disso, o estudo complementou resultados anteriores ao simular a inundação do córrego do Ipiranga com o HEC-HMS, fornecendo uma nova abordagem metodológica para o mapeamento de risco de inundação. No entanto, o trabalho encontrou limitações devido à baixa disponibilidade de dados observados para calibração das manchas de inundação e à dificuldade em determinar a classe social dos imóveis afetados. Para trabalhos futuros, destaca-se a importância de acesso amplo a dados observados de chuva e vazão para melhorar a precisão das simulações e formular soluções mais eficazes para áreas suscetíveis à inundação.

O desempenho do HEC-HMS tem sido eficiente em diversas aplicações hidrológicas, mas sua precisão depende da qualidade dos dados de entrada. Nesse sentido, o uso de radares meteorológicos para fornecer dados de precipitação tem se mostrado promissor, oferecendo informações com alta resolução espacial e temporal. Estudos como os de Lin *et al.* (2022) e Urbani *et al.* (2023) demonstram que a integração de dados de radar melhora significativamente as simulações no HEC-HMS, especialmente em eventos extremos de chuva e regiões com pouca disponibilidade de dados observados. A utilização de produtos de radar permite mapear áreas de precipitação com maior precisão, capturando de forma detalhada a distribuição espacial e intensidade dos eventos, o que é fundamental para melhorar a calibração e a validação do modelo.

Como evidenciado no estudo sobre o córrego Ipiranga, o uso de dados de radar meteorológico pode aprimorar a modelagem de vazões de projeto e o mapeamento de áreas de risco, superando limitações associadas aos dados pluviométricos tradicionais. Em regiões remotas ou de difícil acesso, esses avanços possibilitam previsões mais confiáveis, aumentando a capacidade de resposta a eventos hidrológicos críticos. Assim, a integração de dados de radar ao HEC-HMS representa uma solução estratégica para aprimorar a precisão e a eficiência das análises hidrológicas.

A literatura aponta desafios persistentes no uso de radar meteorológico para a estimativa de precipitação, como a necessidade de calibração dos fatores de conversão Z-R e

a atenuação em frequências específicas, que podem comprometer a precisão das estimativas. No entanto, os avanços tecnológicos, juntamente com a integração com ferramentas GIS e mesclagem com dados dos pluviômetros existentes, têm mostrado resultados promissores. Essas inovações permitem o detalhamento de parâmetros de entrada, melhorando a modelagem hidrológica. Estudos como os de Lin *et al.* (2022) e Urbani *et al.* (2023) demonstram que o uso de produtos de radar meteorológico aprimora significativamente a representação de eventos extremos de chuva, viabilizando simulações mais robustas, especialmente em regiões com escassez de dados observacionais. Lin *et al.* (2022) evidenciam como a calibração contínua dos dados de radar tem o potencial de aumentar a confiabilidade das previsões de precipitação, enquanto Urbani *et al.* (2023) destacam a importância da integração do radar com sistemas de modelagem para melhorar a previsão de vazões e a gestão de recursos hídricos.

O potencial do radar meteorológico na hidrologia vai além de superar as limitações dos dados pluviométricos tradicionais. Ele não só permite uma melhor previsão de inundações e o mapeamento de áreas de risco, mas também aprimora a modelagem de vazões de projeto, como demonstrado em várias aplicações práticas em áreas urbanas e grandes bacias. A combinação de dados de radar com modelos hidrológicos como o HEC-HMS é particularmente eficaz para simulações em tempo real, proporcionando uma visão mais detalhada e precisa dos eventos hidrológicos. Como discutido por Lin *et al.* (2022), a utilização de dados de radar pode melhorar a qualidade das previsões e reduzir os erros associados a modelos que dependem exclusivamente de dados pluviométricos. Portanto, a integração de dados de radar meteorológico ao HEC-HMS não apenas amplia a capacidade do modelo em diferentes contextos, mas também representa um avanço significativo na gestão de recursos hídricos e na mitigação de desastres, posicionando-se como uma ferramenta essencial para enfrentar os desafios hidrológicos contemporâneos.

3.5. Conclusões

A literatura aponta desafios persistentes no uso de radar meteorológico para a estimativa de precipitação, como a necessidade de calibração dos fatores de conversão Z-R e a atenuação em frequências específicas, que podem comprometer a precisão das estimativas. No entanto, os avanços tecnológicos, juntamente com a integração com ferramentas GIS e mesclagem com dados dos pluviômetros existentes, têm mostrado resultados promissores. Essas inovações permitem o detalhamento de parâmetros de entrada, melhorando a modelagem hidrológica. Estudos como os de Lin *et al.* (2022) e Urbani *et al.* (2023) demonstram que o uso de produtos de radar meteorológico aprimora significativamente a representação de eventos extremos de chuva, viabilizando simulações mais robustas, especialmente em regiões com escassez de dados observacionais. Lin *et al.* (2022) evidenciam como a calibração contínua dos dados de radar tem o potencial de aumentar a confiabilidade das previsões de precipitação, enquanto Urbani *et al.* (2023) destacam a importância da integração do radar com sistemas de modelagem para melhorar a previsão de vazões e a gestão de recursos hídricos.

O potencial do radar meteorológico na hidrologia vai além de superar as limitações dos dados pluviométricos tradicionais. Ele não só permite uma melhor previsão de inundações e o mapeamento de áreas de risco, mas também aprimora a modelagem de vazões de projeto, como demonstrado em várias aplicações práticas em áreas urbanas e grandes bacias. A combinação de dados de radar com modelos hidrológicos como o HEC-HMS é particularmente eficaz para simulações em tempo real, proporcionando uma visão mais detalhada e precisa dos eventos hidrológicos. Como discutido por Lin *et al.* (2022), a utilização de dados de radar pode melhorar a qualidade das previsões e reduzir os erros associados a modelos que dependem exclusivamente de dados pluviométricos. Portanto, a integração de dados de radar meteorológico ao HEC-HMS não apenas amplia a capacidade do modelo em diferentes contextos, mas também representa um avanço significativo na gestão de recursos hídricos e na mitigação de desastres, posicionando-se como uma ferramenta essencial para enfrentar os desafios hidrológicos contemporâneos.

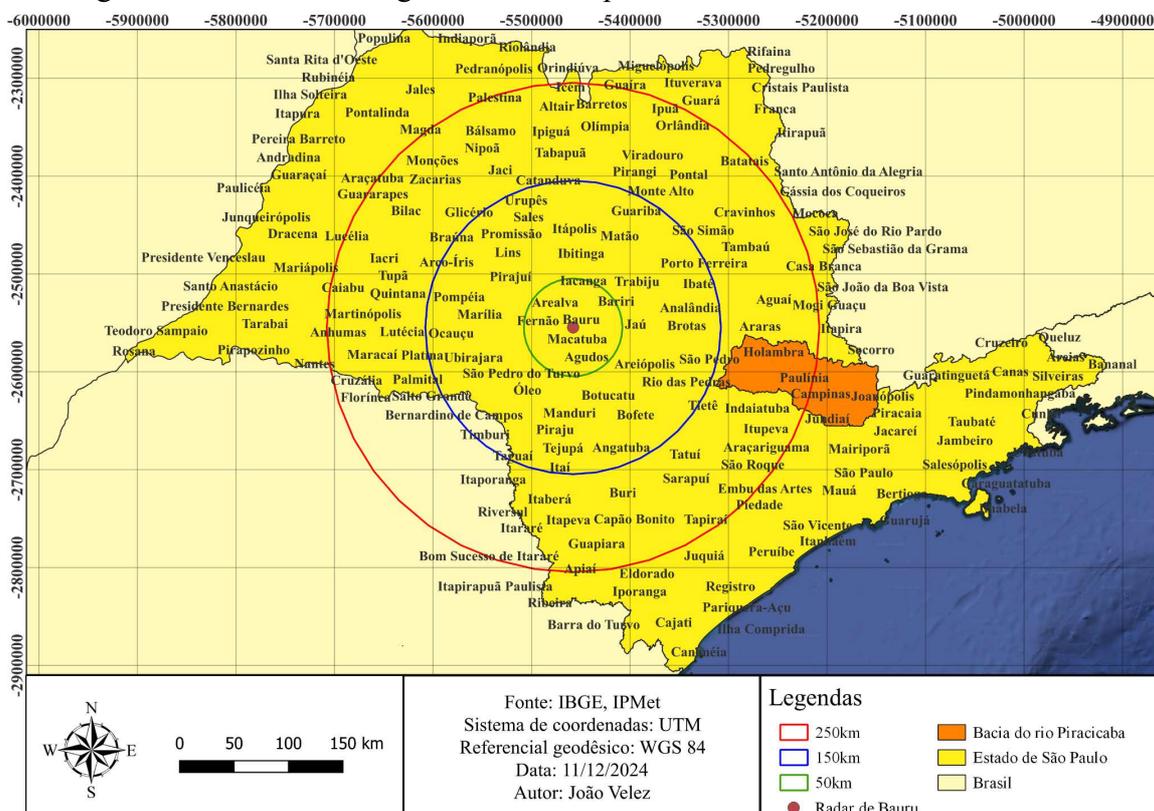
Capítulo 4: Avaliação da precipitação obtida pelo radar de Bauru

Neste capítulo será realizada a obtenção e tratamento dos dados do radar de Bauru assim como a análise espacial das precipitações assim como a adequação de três relações Z-R para uma breve série histórica de três meses de dados.

4.1. Materiais e métodos

Os dados de precipitação foram obtidos pelo radar meteorológico de Bauru, modelo EEC DWR-88S, operando na banda S com tecnologia Doppler, foram utilizados para a comparação com as estações pluviométricas. Este radar pertence ao Instituto de Pesquisas Meteorológicas (IPMET) e está localizado nas coordenadas 22° 21' 36" de latitude sul e 49° 01' 48" de longitude oeste, a uma altitude de 624 metros. Próximo a ele, encontram-se duas serras com altitudes superiores a 1000 metros: a Serra de Botucatu, situada a cerca de 80 km a sudeste do radar, e a Serra de São Pedro, a aproximadamente 100 km a leste. O CAPPI (Constant Altitude Plan Position Indicator) gerado pelo radar de Bauru é obtido após uma varredura completa da antena, que cobre 15 elevações definidas, considerando uma altura padrão de 3,5 km. Nesse nível, os dados captados pelo radar já estão livres da interferência de ecos provenientes do terreno. Atualmente, as medições são realizadas em intervalos de 7,5 minutos, permitindo a quantificação da precipitação em um raio de 240 km. A imagem de abrangência do alcance do radar está disponível na Figura 4.1.

Figura 4.1. Raio de abrangência do radar para os raios de 50km 150km e 250km



Foram trabalhadas um total de 9.354 imagens de radar, captadas com uma resolução temporal de 7,5 minutos, o que permitiu uma análise detalhada da dinâmica temporal da precipitação. A resolução espacial das imagens é de 1 km x 1 km, garantindo uma boa representação espacial dos padrões de chuva na região. Essas imagens foram processadas e comparadas diretamente com os dados das estações pluviométricas nos pontos exatos de localização das estações, sem considerar médias espaciais ou centróides de sub-bacias. Além disso, as imagens do radar de Bauru são geradas em formato digital, permitindo a extração precisa dos valores de precipitação para cada pixel correspondente às estações pluviométricas.

Para a verificação e validação dos dados obtidos pelo radar de Bauru para o CAPPI 3,5 km, foi realizada uma análise comparativa entre os produtos de precipitação gerados pelo radar e as medições das estações pluviométricas localizadas dentro do seu raio de cobertura, conforme o estudo de Smith *et al.* (2007). Além disso, será conduzida uma análise espacial semelhante à realizada por Creutin *et al.* (1997). O período de análise abrange os dias 6 a 31 de janeiro de 2016, durante o qual, segundo registros climáticos e notícias locais, ocorreram chuvas de grande intensidade, gerando uma cheia histórica na região. Para esse período, serão aplicadas três equações Z-R: a de Marshall-Palmer, a de Jones e a de Calheiros, esta última desenvolvida especificamente para o radar de Bauru, incorporando efeitos da distância ao radar e outras características particulares. As relações foram escolhidas com base no tipo de chuva identificado no evento, que tem maior probabilidade de ser convectiva devido ao período do ano e à intensidade observada. A relação de Marshall-Palmer foi selecionada por ser a mais utilizada em estudos de precipitação, enquanto a relação de Calheiros foi adotada por ter sido desenvolvida especificamente para o radar em questão. Essa abordagem permite uma comparação interessante com o trabalho de Miguel, que também avaliou o desempenho de diferentes relações Z-R em condições semelhantes.

As análises serão realizadas com dados de 15 estações pluviométricas, distribuídas em três faixas de distância: 50 km, 150 km e 250 km. Foi dada preferência a estações operadas pelo INMET, mas, devido à ausência de dados ou à falta de estações, foram incluídas estações do CEMADEN. As estações selecionadas e suas características estão descritas na Tabela 4.1.

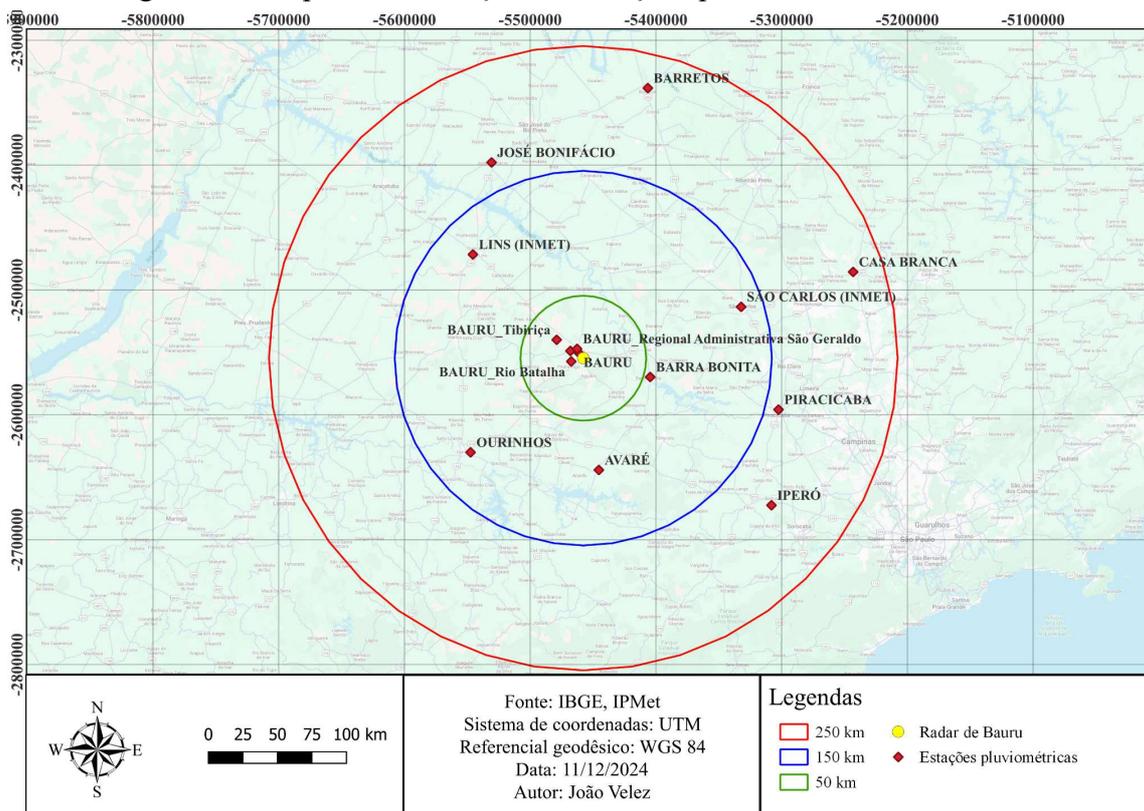
Tabela 4.1: Estações selecionadas dentro dos raios definidos para a comparação com os dados de precipitação oriundos de radar meteorológico

Código da estação	Nome da estação	Operador	Lat.	Long.	Raio (km)
A705	BAURU	INMET	-22.3580	-49.0289	50
2249115	BAURU_Jardim Eldorado	CEMADEN	-22.3100	-49.1200	50
2249116	BAURU_Rio Batalha	CEMADEN	-22.3800	-49.1140	50
2249119	BAURU_Tibiriça	CEMADEN	-22.2360	-49.2180	50

2249120	BAURU_Regional Administrativa São Geraldo	CEMADEN	-22.2961	-49.0723	50
A711	SÃO CARLOS	INMET	-21.9803	-47.8839	150
A725	AVARÉ	INMET	-23.1017	-48.9411	150
A716	OURINHOS	INMET	-23.0006	-49.8433	150
A727	LINS	INMET	-21.6661	-49.7347	150
A741	BARRA BONITA	INMET	-22.4711	-48.5575	150
A735	JOSE BONIFACIO	INMET	-21.0856	-49.9203	250
A748	BARRETOS	INMET	-20.5592	-48.5450	250
A713	IPERÓ	INMET	-23.4261	-47.5856	250
A738	CASA BRANCA	INMET	-21.7805	-47.0753	250
2247036	PIRACICABA	CEMADEN /DAAE-SP	-22.7333	-47.6500	250

As estações pluviométricas foram selecionadas de arbitrária, com base na disponibilidade de dados, visando abranger diferentes regiões dentro do raio de atuação e garantir uma representatividade espacial mais abrangente nos resultados. A única exceção foram as estações localizadas no raio de 50 km, pois, devido à baixa disponibilidade de estações, todas estão situadas no município de Bauru, SP. O mapa contendo a localização de cada estação está disposta na Figura 4.2.

Figura 4.2. Mapa de localização das estações pluviométricas selecionadas



Para organizar e extrair os dados das imagens fornecidas pelo IPMet, que estavam no formato .gis, foi desenvolvido um código em Python utilizando o ambiente Google Colab disponível no anexo 1. Esse código permitiu, com base nas coordenadas de cada estação, obter os dados de refletividade para o ponto específico e, em seguida, realizar a conversão de dBZ para uma escala linear e por fim, converter esses valores para precipitação, de acordo com a equação Z-R selecionada e pela equação 6.1. A escolha do Google Colab facilitou o processo, pois oferece um ambiente de fácil acesso, que dispensa configurações complexas e possibilita a execução do código em servidores remotos, otimizando o tempo de processamento e a análise de grandes volumes de dados. Nele também foi aplicada a conversão de mm/h dada pela relação Z-R para a precipitação acumulada entre os intervalos de medições por meio da expressão 4.1 e 4.2.

$$R = \left(\frac{Z}{a}\right)^{\frac{1}{b}} \quad (4.1)$$

$$\text{Precipitação acumulada} = \text{Precipitação em mm/h} * \frac{\Delta t}{60} \quad (4.2)$$

No caso do radar trabalhado o delta tempo é igual a 7,5 minutos, o intervalo entre uma medição e outra. O código também resulta na precipitação acumulada dentro daquela hora, facilitando a comparação com os dados das estações.

4.1.1. Avaliação estatística dos dados do radar

Para avaliar a precisão dos dados de precipitação obtidos por radar, comparando-os com os valores medidos por estações pluviométricas, utilizo três índices estatísticos amplamente reconhecidos: o Coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE), o coeficiente de correlação linear (r) e o Percentual de Erro Médio Ponderado (PBIAS). Esses índices permitem uma análise criteriosa da capacidade dos dados de radar em representar fielmente os registros pluviométricos, seguindo as diretrizes de avaliação de modelos hidrológicos propostas por Moriasi *et al.* (2007) e outras referências, como Gupta *et al.* (2009), que realçam a importância desses métodos na validação de modelos de simulação em estudos hidrológicos.

O Coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) avalia a precisão da simulação ao comparar a variabilidade dos dados simulados com a variabilidade dos dados observados, sendo ideal para medir a acurácia de previsões hidrológicas. Esse índice varia de $-\infty$ a 1; quanto mais próximo de 1, melhor o desempenho do modelo em capturar a dinâmica dos dados observados, enquanto valores negativos indicam que o uso da média dos valores observados superaria a estimativa dada pelo modelo. A fórmula do NSE é expressa pela equação 4.3 abaixo, onde O_i representa cada valor observado, P_i o valor estimado pelo radar e O^- a média dos valores observados ao longo das n observações (Nash; Sutcliffe, 1970).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O^-)^2} \quad (4.3)$$

O Coeficiente de Correlação Linear (r) mede a correlação entre os dados observados e os dados simulados, variando de -1 a 1, com valores mais próximos de 1 indicando uma correlação positiva forte e uma representação mais fiel das tendências nos dados observados. Esse índice é útil para observar o alinhamento entre as variações de precipitação estimadas pelo radar e as registradas pelas estações, essencial para verificar se o radar consegue captar o comportamento sazonal e espacial da precipitação. A fórmula é dada pela equação 4.4. Onde P^- representa a média dos valores estimados, e O^- , a média dos valores observados (Pearson, 1896).

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - O^-) (P_i - P^-)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - O^-)^2 (P_i - P^-)^2}} \quad (4.4)$$

Por fim, o Percentual de Erro Médio Ponderado (PBIAS) calcula o viés percentual médio entre os dados simulados e observados, com a finalidade de identificar se há uma tendência à superestimação ou subestimação dos valores de precipitação pelo radar. Valores de PBIAS próximos a 0 indicam precisão na simulação, enquanto valores positivos revelam tendência à superestimação e valores negativos indicam subestimação sistemática. A fórmula do PBIAS é 4.5 (Gupta ; Sorooshian, 1999).

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{\sum_{i=1}^n O_i} * 100 \quad (4.5)$$

Estes índices fornecem uma visão detalhada e comparativa da qualidade dos dados de radar frente aos registros pluviométricos, ajudando a avaliar a validade e confiabilidade dos dados de radar para modelagem hidrológica. Dessa forma, fundamentam-se na análise estabelecida por Moriasi *et al.* (2007) e também em trabalhos como o de Gupta *et al.* (2009), que reforçam o papel desses índices na validação de modelos de bacias hidrográficas.

4.1.2. Avaliação estatística dos dados do radar

Para avaliar a precisão dos dados de precipitação obtidos por radar, comparando-os com os valores medidos por estações pluviométricas, utilizo três índices estatísticos amplamente reconhecidos: o Coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE), o coeficiente de correlação linear (r) e o Percentual de Erro Médio Ponderado (PBIAS). Esses índices permitem uma análise criteriosa da capacidade dos dados de radar em representar fielmente os registros pluviométricos, seguindo as diretrizes de avaliação de modelos hidrológicos propostas por Moriasi *et al.* (2007) e outras referências, como Gupta *et al.* (2009), que realçam a importância desses métodos na validação de modelos de simulação em estudos hidrológicos.

O Coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) avalia a precisão da simulação ao comparar a variabilidade dos dados simulados com a variabilidade dos dados observados, sendo ideal para medir a acurácia de previsões hidrológicas. Esse índice varia de $-\infty$ a 1; quanto mais próximo de 1, melhor o desempenho do modelo em capturar a dinâmica dos dados observados, enquanto valores negativos indicam que o uso da média dos valores observados superaria a estimativa dada pelo modelo. A fórmula do NSE é expressa pela equação 4.6 abaixo, onde O_i representa cada valor observado, P_i o valor estimado pelo radar e O^- a média dos valores observados ao longo das n observações (Nash; Sutcliffe, 1970).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O^-)^2} \quad (4.6)$$

O Coeficiente de Correlação Linear (r) mede a correlação entre os dados observados e os dados simulados, variando de -1 a 1, com valores mais próximos de 1 indicando uma correlação positiva forte e uma representação mais fiel das tendências nos dados observados. Esse índice é útil para observar o alinhamento entre as variações de precipitação estimadas pelo radar e as registradas pelas estações, essencial para verificar se o radar consegue captar o comportamento sazonal e espacial da precipitação. A fórmula é dada pela equação 4.7. Onde P^- representa a média dos valores estimados, e O^- , a média dos valores observados (Pearson, 1896).

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \underline{O}) (P_i - \underline{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \underline{O})^2 (P_i - \underline{P})^2}} \quad (4.7)$$

Por fim, o Percentual de Erro Médio Ponderado (PBIAS) calcula o viés percentual médio entre os dados simulados e observados, com a finalidade de identificar se há uma tendência à superestimação ou subestimação dos valores de precipitação pelo radar. Valores de PBIAS próximos a 0 indicam precisão na simulação, enquanto valores positivos revelam tendência à superestimação e valores negativos indicam subestimação sistemática. A fórmula do PBIAS é 4.8 (Gupta ; Sorooshian, 1999).

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)}{\sum_{i=1}^n O_i} * 100 \quad (4.8)$$

Estes índices fornecem uma visão detalhada e comparativa da qualidade dos dados de radar frente aos registros pluviométricos, ajudando a avaliar a validade e confiabilidade dos dados de radar para modelagem hidrológica. Dessa forma, fundamentam-se na análise estabelecida por Moriasi *et al.* (2007) e também em trabalhos como o de Gupta *et al.* (2009), que reforçam o papel desses índices na validação de modelos de bacias hidrográficas.

4.2. Resultados e discussões

Os dados de precipitação obtidos por radar foram comparados diretamente com os dados das estações pluviométricas correspondentes, utilizando como referência o ponto exato onde cada estação está localizada. Isso significa que, para cada estação pluviométrica, foi considerado o valor do pixel da imagem de radar que coincide geograficamente com a localização da estação. Não foram utilizadas médias de pixels em um raio ao redor das estações, nem os centróides das sub-bacias. Os dados de radar e das estações foram emparelhados temporalmente, ou seja, para cada registro de precipitação medido pela estação, foi comparado o valor correspondente registrado pelo radar no mesmo instante (no caso para mesma hora). Essa abordagem permitiu uma comparação direta e precisa entre as duas fontes de dados.

Para avaliar a qualidade dos dados de radar em relação às medições das estações pluviométricas, foram calculados índices estatísticos, como o NSE (Nash-Sutcliffe Efficiency), o PBias (Viés Percentual) e o Coeficiente de Correlação (R). O NSE mede a eficiência do modelo de radar em relação às observações das estações, enquanto o PBias indica se há tendência de superestimar ou subestimar a precipitação. Já o Coeficiente de Correlação avalia a relação linear entre os dados de radar e os dados das estações. Esses índices foram calculados para cada uma das relações Z-R selecionadas, que relacionam a reflectividade do radar com a taxa de precipitação.

Além da comparação ponto a ponto, os dados também foram agrupados de acordo com a distância do radar (50 km, 150 km e 250 km) para avaliar se a precisão dos dados de

radar varia com a distância. Para isso, foram "empilhados" os dados de todas as estações que estavam dentro de cada raio de distância, permitindo uma análise do comportamento e da precisão do radar em diferentes faixas. Com base nos resultados dos índices estatísticos, foi discutido qual relação Z-R apresentou o melhor desempenho para o radar em estudo. Essa relação foi então selecionada para integrar o modelo hidrológico criado no HEC-HMS, com o objetivo de melhorar a precisão das estimativas de precipitação e, conseqüentemente, das simulações hidrológicas.

4.2.1. Calheiros

A tabela 4.2 apresenta os resultados estatísticos obtidos para cada estação selecionada.

Tabela 4.2 - Resultados dos parâmetros estatísticos para relação de Calheiros

Código da estação	Nome da estação	Raio (Km)	r	NSE	PBias
A705	BAURU	50	-	-0.2143	-100
2249115	BAURU_Jardim Eldorado	50	0.7984	0.6357	-57.6927
2249116	BAURU_Rio Batalha	50	0.7013	0.5804	-65.6889
2249119	BAURU_Tibiriça	50	0.7751	0.7400	-56.5941
2249120	BAURU_Regional Administrativa São Geraldo	50	0.8484	0.6843	-57.5940
A711	SÃO CARLOS	150	0.8883	0.8003	-56.6944
A725	AVARÉ	150	0.7644	0.7460	-49.2249
A716	OURINHOS	150	0.2934	0.1363	-63.3743
A727	LINS	150	0.8366	0.7827	-47.2750
A741	BARRA BONITA	150	0.7220	0.5900	-56.7126
A735	JOSE BONIFACIO	250	0.8879	0.6895	-56.7630
A748	BARRETOS	250	0.7787	0.5359	-71.4606
A713	IPERÓ	250	0.8826	0.8336	-66.0510
A738	CASA BRANCA	250	0.5420	0.4533	-58.4631
2247036	PIRACICABA	250	0.6270	0.5439	-42.2516

Os resultados obtidos na análise do desempenho do radar meteorológico de Bauru, comparados aos registros das estações pluviométricas, mostram variações significativas nos índices estatísticos (r, NSE e PBIAS) em função da distância do radar e das características

locais de cada estação. Um dos fatores que contribuem para os resultados observados no raio de 50 km é o efeito de cone cego. Essa limitação ocorre porque, nas proximidades do radar, o feixe eletromagnético é emitido em um ângulo de elevação que impossibilita a detecção de precipitação próxima à superfície. Isso explica, por exemplo, os baixos valores de NSE e a ausência de dados correlacionados na estação de "BAURU" (NSE = - 0.2143; PBIAS = 100%), evidenciando que, em muitos casos, o radar não detectou chuvas que ocorreram de fato. Adicionalmente, mesmo onde houve detecção, como em "BAURU Jardim Eldorado", os valores de PBIAS negativamente elevados (-57.69%) indicam uma subestimação sistemática dos valores de precipitação.

De maneira geral, as estações localizadas no raio de 150 km apresentaram os melhores índices, demonstrando que essa faixa de distância é ideal para o radar de Bauru. As estações de São Carlos ($r = 0.8883$, NSE = 0.8003, PBIAS = 56.69) e Lins ($r = 0.8366$, NSE = 0.7827, PBIAS = 47.27) destacaram-se por registrar alta correlação entre os dados de radar e os pluviométricos, indicando que, na maioria das vezes, quando choveu nos pluviômetros, o radar também registrou precipitação.

Por outro lado, no raio de 250 km, os resultados foram mistos. Algumas estações, como "IPERÓ" ($r=0.8366$, NSE=0.8336, PBIAS=66.01), apresentaram excelente desempenho, apesar da maior distância. Isso pode estar relacionado a condições topográficas favoráveis e à ausência de interferências significativas, como ecos de terreno. No entanto, outras estações no mesmo raio, como "PIRACICABA" ($r=0.6270$, NSE=0.5439, PBIAS=42.25), tiveram desempenho inferior, com menor correlação e moderada subestimação da precipitação. Apesar disso, os índices registrados em Piracicaba ainda são suficientes para a aplicação do radar em modelagens hidrológicas regionais, uma vez que os padrões de precipitação foram adequadamente captados ($r > 0.5$, NSE > 0,5).

Os piores resultados foram observados na estação de Ourinhos, onde o NSE foi o menor observado (0.1363), indicando uma discrepância acentuada entre os dados de radar e pluviométricos. Além disso, o valor de $r = 0.2934$ refletem uma baixa correlação, sugerindo que o radar frequentemente não registrou precipitações detectadas pelos pluviômetros ou vice-versa. Essa inconsistência pode ser explicada por ecos de terreno e clutter na região, que interferem na qualidade do sinal radar, além de possíveis efeitos de atenuação associados à maior distância.

Em termos gerais, a análise combinada dos índices estatísticos revela que, enquanto o acompanhamento das chuvas foi satisfatório em várias regiões, a magnitude da precipitação apresentou maior variabilidade, com casos de subestimação e superestimação (indicadas pelos altos valores PBias). Esse comportamento é comum em análises radar-pluviômetro e pode ser atribuído a fatores como calibração inadequada da relação Z-R ou à presença de partículas grandes ou de alta refletividade, que intensificam os valores estimados de precipitação (Smith *et al.*, 2007). A faixa de 150 km confirmou-se como a mais representativa, enquanto os extremos de distância (50 km e 250 km) requerem maior cuidado na interpretação dos dados.

Segundo Creutin *et al.* (1988), valores elevados de PBIAS refletem uma divergência na magnitude da precipitação acumulada, o que pode comprometer a aplicabilidade dos dados de radar para modelagens hidrológicas precisas, especialmente em regiões onde a superestimação afeta a previsão de vazões. Contudo, mesmo com PBIAS elevados, a detecção da ocorrência de chuvas pelo radar foi satisfatória, o que pode ser útil para a identificação de eventos extremos e tendências regionais de precipitação, ressaltando a necessidade de ajustes regionais para melhorar a precisão dos resultados.

4.2.2. Marshall Palmer

A tabela 4.3 apresenta os resultados estatísticos obtidos para cada estação selecionada com os dados calculados pela relação de Marshall-Palmer e o gráfico de dispersão está alocado na figura 4.3.

Tabela 4.3 -Resultados dos parâmetros estatísticos para relação de Marshall & Palmer

Código da estação	Nome da estação	Raio (Km)	r	NSE	PBias
A705	BAURU	50	-	-0.2142	-100.0000
2249115	BAURU_Jardim Eldorado	50	0.7974	0.2881	-84.5546
2249116	BAURU_Rio Batalha	50	0.6855	0.2500	-87.4589
2249119	BAURU_Tibiriça	50	0.7689	0.3738	-83.9847
2249120	BAURU_Regional Administrativa São Geraldo	50	0.8519	0.3144	-84.4895
A711	SÃO CARLOS	150	0.8857	0.3578	-84.2696
A725	AVARÉ	150	0.7653	0.3675	-81.6029
A716	OURINHOS	150	0.4471	0.1352	-86.6089
A727	LINS	150	0.8378	0.3995	-80.6635
A741	BARRA BONITA	150	0.7183	0.2657	-84.1285
A735	JOSE BONIFACIO	250	0.8918	0.3134	-84.3551
A748	BARRETOS	250	0.7763	0.1531	-89.7612
A713	IPERÓ	250	0.8828	0.4500	-87.5287
A738	CASA BRANCA	250	0.3014	0.0695	-84.7619
2247036	PIRACICABA	250	0.6174	0.4647	-78.6515

Os resultados obtidos na análise do desempenho do radar meteorológico de Bauru, utilizando a relação Z-R de Marshall-Palmer, comparados aos registros das estações pluviométricas, mostram variações significativas nos índices estatísticos (r , NSE e PBIAS) em função da distância do radar e das características locais de cada estação. A análise revela que os valores de correlação linear (r) são similares aos obtidos com a relação de Calheiros, o que já era esperado, uma vez que a fonte dos dados é a mesma, mudando apenas os parâmetros a e b da relação Z-R. A diferença entre as duas relações influencia principalmente a magnitude das estimativas de precipitação.

Os resultados do Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) foram significativamente inferiores aos encontrados pela relação de Calheiros. Este fato evidencia que a relação Z-R de Marshall-Palmer não foi tão eficaz em reproduzir o comportamento da precipitação nas estações avaliadas. As estações com os piores índices NSE são a de "BAURU" (NSE = -0.2142), Ourinhos (NSE = 0.1352) e Casa Branca (NSE = 0.695). Por outro lado, as melhores performances foram observadas no raio de 250 km, destacando as estações "PIRACICABA" (NSE = 0.4647) e "IPERÓ" (NSE = 0.4500). Ao contrário do encontrado anteriormente na relação de Calheiros. Porém no raio de 250 km, tivemos de forma geral comportamento misto, com destaque negativo para "CASA BRANCA" (NSE = 0.0695) e "BARRETOS" (NSE = 0.1531), o menor valor no longo alcance, e resultados intermediários para "JOSÉ BONIFÁCIO" (NSE = 0.3134). De maneira geral, todos os resultados para o NSE deram insatisfatórios, sendo menores que 0.5.

Os valores de PBIAS foram negativamente elevados em quase todas as estações, indicando uma forte tendência do radar em subestimar os dados de precipitação em comparação com os pluviômetros. Essa subestimação foi mais intensa nos extremos de distância. No raio de 50 km valores de PBIAS elevados, como em "BAURU Rio Batalha" (87.45%), sugerem que o radar enfrenta dificuldades relacionadas ao volume iluminado e ao efeito de cone cego próximo ao emissor. Já no raio de 250 km: valores igualmente altos de PBIAS, como em "BARRETOS" (89.76%), podem ser atribuídos aos efeitos de atenuação do sinal, comuns em distâncias maiores devido à interferência atmosférica e de outros hidrometeoros. Essas inconsistências refletem limitações físicas do radar, que afetam a qualidade da estimativa de precipitação tanto em distâncias curtas quanto em longas.

A relação Z-R de Marshall-Palmer não apresentou resultados satisfatórios para a estimativa de precipitação quando comparada aos pluviômetros, principalmente nos índices NSE e PBIAS. Embora os valores de correlação linear (r) tenham sido próximos aos observados com a relação de Calheiros, os erros sistemáticos de subestimação e a baixa eficiência NSE comprometem a confiabilidade dos dados.

Os piores resultados foram encontrados no raio de 50 km, onde o efeito do cone iluminado é limitado podendo trazer alterações nos resultados, e no raio de 250 km, onde os efeitos de atenuação e a interferência atmosférica prejudicam a qualidade dos dados. O raio de 150 km continua sendo o mais representativo para o radar de Bauru, apresentando os melhores índices estatísticos e o menor PBIAS.

4.2.3. Jones

A tabela 4.4 apresenta os resultados estatísticos obtidos para cada estação selecionada com os dados calculados pela relação de Jones.

Tabela 4.4 - Resultados dos parâmetros estatísticos para relação de Jones

Código da estação	Nome da estação	Raio (Km)	r	NSE	PBias
A705	BAURU	50	-	-0.2142	-100.0000
2249115	BAURU_Jardim Eldorado	50	0.7787	0.1889	-90.9627
2249116	BAURU_Rio Batalha	50	0.5841	0.1408	-92.5327
2249119	BAURU_Tibiriça	50	0.7275	0.2673	-89.9742
2249120	BAURU_Regional Administrativa São Geraldo	50	0.8613	0.2082	-90.8507
A711	SÃO CARLOS	150	0.8623	0.1837	-91.1313
A725	AVARÉ	150	0.7665	0.2049	-89.7768
A716	OURINHOS	150	0.3433	0.0489	-92.0997
A727	LINS	150	0.8360	0.2756	-88.4658
A741	BARRA BONITA	150	0.6904	0.1688	-90.4710
A735	JOSE BONIFACIO	250	0.9094	0.1836	-91.4225
A748	BARRETOS	250	0.7532	0.0099	-94.6465
A713	IPERÓ	250	0.8788	0.3448	-92.4310
A738	CASA BRANCA	250	0.5184	0.1525	-90.9012
2247036	PIRACICABA	250	0.5667	0.3359	-86.5710

Os resultados obtidos na análise do desempenho do radar meteorológico de Bauru, utilizando a relação Z-R de Jones comparados aos registros das estações pluviométricas, mostram variações nos índices estatísticos que, de maneira geral, corroboram com os observados anteriormente. Os resultados ficaram bem próximos aos encontrados pela relação de Marshall-Palmer, destacando-se algumas particularidades.

A análise revela que os valores de correlação linear (r) obtidos com a relação de Jones foram, em sua maioria, similares aos das outras relações, mas apresentaram ligeira variação. Em locais onde os valores de r já eram elevados, como BAURU Regional Administrativa São Geraldo (r = 0.8613) e JOSÉ BONIFÁCIO (r = 0.9094), os resultados com a relação de Jones

mostraram-se levemente superiores. Em regiões onde os valores eram baixos, como OURINHOS (150 km) e CASA BRANCA (250 km), os resultados foram ligeiramente menores. Essa variação é esperada, pois a relação de Jones tende a acompanhar as características já apresentadas pelas demais relações, sendo influenciada pelos mesmos fatores, como distância do radar, características convectivas das chuvas e efeitos atmosféricos.

Os valores de NSE continuaram insatisfatórios, com a maioria das estações apresentando índices abaixo de 0.5, o que reflete a dificuldade da relação em reproduzir os valores medidos pelos pluviômetros. Ainda assim, os resultados não destoaram significativamente daqueles obtidos pela relação de Marshall-Palmer. As piores performances foram as da região de BARRETOS (NSE = 0.0099) e de OURINHOS (NSE = 0.0489). Já as melhores performances evidenciadas em estações como a de LINS (NSE = 0.2756), IPERÓ (NSE = 0.3448) e PIRACICABA (NSE = 0.3359), apesar de ainda não atingirem valores satisfatórios.

No raio de 250 km, o comportamento misturado também se manteve, com IPERÓ e PIRACICABA apresentando os melhores resultados, enquanto estações como BARRETOS (NSE = 0.0099) e CASA BRANCA (NSE = 0.1525) demonstraram baixos desempenhos.

Os valores de PBIAS foram semelhantes aos das outras relações, reforçando a tendência de subestimação das estimativas de precipitação pelo radar em comparação aos pluviômetros. Os resultados obtidos com a relação Z-R de Jones apresentaram padrões consistentes com as observações anteriores, confirmando a robustez das análises. Apesar de os valores de r terem mostrado variações leves (ligeiramente superiores onde já eram altos e levemente inferiores onde já eram baixos), os índices NSE e PBIAS mantiveram-se insatisfatórios e próximos aos obtidos com Marshall-Palmer. O raio de 150 km novamente se destaca como a faixa com os desempenhos mais estáveis, embora ainda com resultados abaixo do ideal, enquanto os extremos de distância (50 km e 250 km) apresentaram os maiores desafios de precisão.

4.2.4. Análise conjunta das relações Z-R

A fim de realizar a análise conjunta de todos os dados para as 3 equações, foram empilhadas precipitações observadas e obtidas pela refletividade do radar para cada um dos raios e para cada uma das relações Z-R selecionadas. Para esse processo foram desconsiderados os pontos de maior divergência como “BAURU”, “OURINHOS” e “CASA BRANCA”. Os resultados estão dispostos na Figura 7.1.

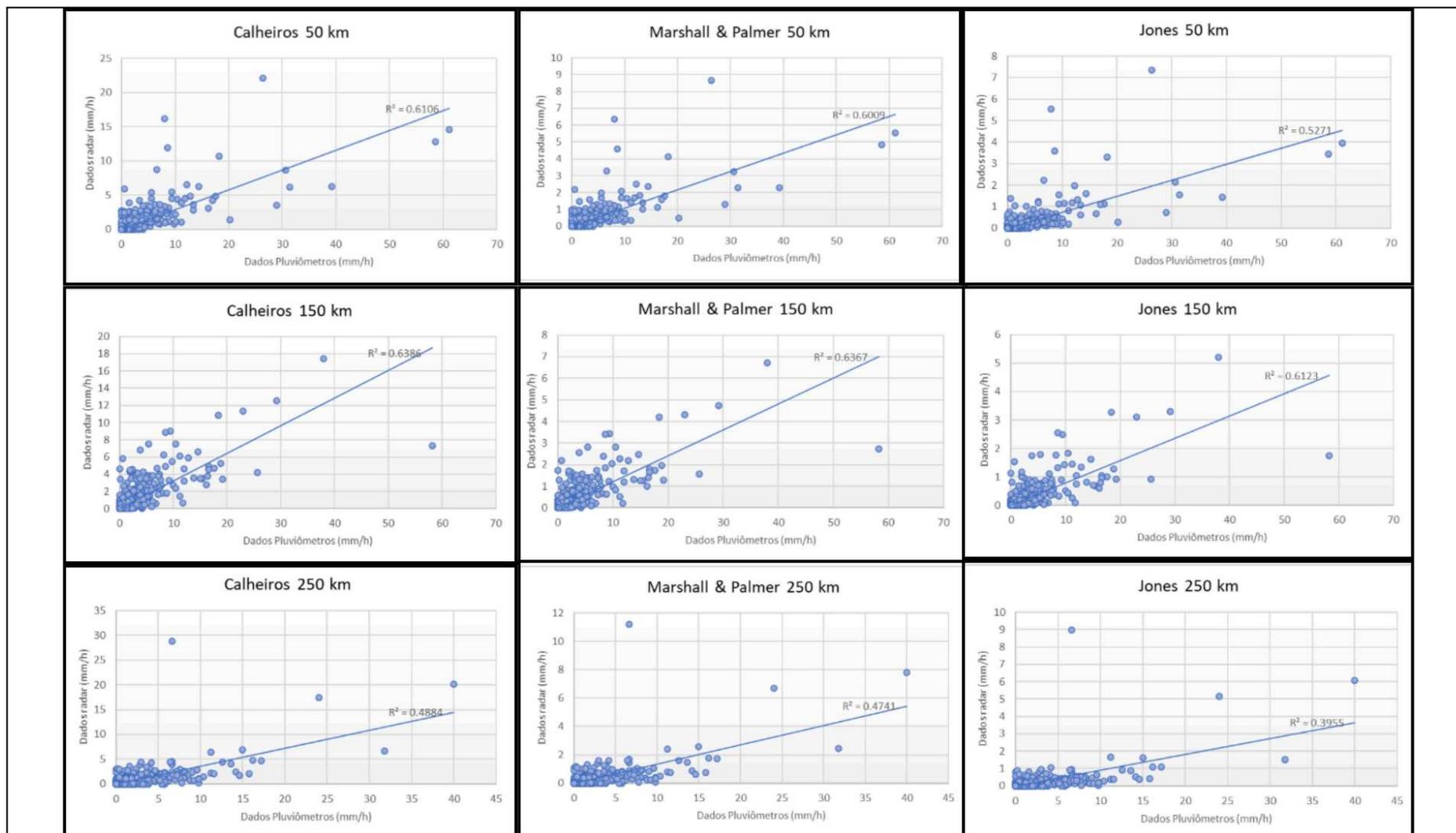
De maneira geral, observa-se um comportamento similar para todas as relações analisadas, o que pode ser atribuído ao fato de que o coeficiente de correlação linear (r) avalia apenas a aderência e a correlação linear entre os dados, sem capturar com precisão as variações de intensidade e magnitude da precipitação. Além disso, os parâmetros "a" e "b" das relações Z-R exerceram maior influência na magnitude das precipitações, uma vez que a fonte dos dados é a mesma e não houve diferenciação significativa no comportamento dos dados em curtos intervalos temporais. Um aspecto relevante é que os melhores resultados

foram obtidos no raio de 150 km, corroborando os achados apresentados anteriormente, seguido pelo raio de 50 km. Por outro lado, no raio de 250 km, observou-se uma piora significativa, sugerindo maior atenuação do sinal do radar e perda de precisão associada ao aumento da distância.

Ao comparar esses resultados com o estudo de Miguel e Rennó (2020), percebe-se uma diferença importante tanto nos coeficientes estatísticos quanto no período de análise. Enquanto no presente estudo foram utilizados dados de apenas um mês (janeiro de 2016), marcado por eventos de precipitação extrema, o trabalho de Miguel e Rennó analisou um período mais extenso (2013), que apresentou precipitações mais moderadas e esperadas. Essa diferença temporal pode explicar, em parte, os resultados menos satisfatórios obtidos no presente estudo, uma vez que a análise de um período extremo tende a aumentar a dispersão dos dados e dificultar o ajuste das relações Z-R. Para confirmar essa hipótese, seria necessário realizar uma análise histórica das séries de precipitação, comparando a distribuição e a intensidade dos eventos ao longo dos anos.

No estudo de Miguel e Rennó, os coeficientes de determinação (R^2) encontrados foram bastante próximos entre as relações testadas. A relação de Marshall-Palmer apresentou o maior R^2 (79,46%), enquanto Calheiros e Jones obtiveram valores de 79,14% e 78,04%, respectivamente. O desvio padrão (S) variou entre 2,41 mm (Calheiros) e 4,27 mm (Jones), enquanto o erro quadrático médio (REQM) ficou em torno de 23,44 mm (Marshall-Palmer) e 25,06 mm (Jones). Quanto ao bias, observou-se uma superestimação de 3,25 mm para a relação de Calheiros, conforme também relatado por Emídio e Antônio (2007) e Emídio (2008), enquanto as relações de Jones e Marshall-Palmer apresentaram uma leve subestimação (-0,26 mm e -0,16 mm, respectivamente). Esses resultados indicam que, embora a relação de Calheiros tenha se mostrado a que melhor se ajustou nos dois estudos, há uma tendência histórica de superestimar os valores de precipitação.

Figura 4.3 Gráfico de dispersão para as relações de Calheiros, Marshall & Palmer e de Jones, para os raios de 50,150 e 250 km



É importante destacar que, no presente estudo, a relação de Calheiros também se destacou, apresentando melhores desempenhos em comparação às demais. No entanto, é necessário ponderar que a relação de Calheiros foi desenvolvida em 1987, e, considerando o cenário atual de mudanças climáticas, seus parâmetros podem não mais refletir com precisão as condições atmosféricas e pluviométricas contemporâneas. Assim, torna-se essencial realizar uma revisão e calibração destes valores, visando uma maior representatividade das estimativas de precipitação no contexto das alterações globais do clima.

Ademais, uma limitação importante do estudo de Miguel e Rennó reside na dependência das análises realizadas do coeficiente de correlação linear (R^2) para a validação dos resultados. Embora o R^2 seja amplamente utilizado, ele não capta adequadamente a magnitude e a variabilidade das precipitações, o que pode ser especialmente problemático em eventos extremos, como os registrados no presente estudo. Além disso, no trabalho de Miguel e Rennó, os pontos de coleta estavam relativamente próximos, por se localizarem em uma mesma bacia hidrográfica, o que reduziu a variabilidade espacial e tornou as fontes de erro mais homogêneas, facilitando a aproximação dos resultados entre as diferentes relações Z-R. Em contraste, no presente estudo, os dados foram analisados em diferentes raios (50 km, 150 km e 250 km) e regiões distintas, o que resultou em uma mudança nas fontes principais de erro para cada ponto analisado. Esse fator contribuiu para uma maior dispersão dos resultados, evidenciando as dificuldades de ajuste das relações Z-R em cenários espacialmente heterogêneos.

O uso de métricas complementares, como o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) e o PBIAS, seria fundamental para avaliar a capacidade das relações Z-R de representar tanto os volumes acumulados quanto a dispersão dos dados, fornecendo uma visão mais robusta do desempenho dessas relações em diferentes contextos.

Por fim, observa-se que, enquanto o estudo de Miguel e Rennó apresentou resultados mais homogêneos devido à amplitude temporal e à proximidade espacial das amostras dentro de uma mesma bacia hidrográfica, o presente estudo, limitado a um período curto com chuvas de intensidade histórica, evidenciou as dificuldades na aplicação das relações Z-R em eventos extremos e em regiões espacialmente mais diversas. Além disso, a análise em diferentes raios demonstrou que o erro associado às estimativas de precipitação tende a variar conforme a distância e as características locais de cada ponto, tornando a variabilidade espacial um fator determinante. Esses resultados reforçam a importância de considerar a variabilidade temporal e espacial das precipitações, bem como a necessidade de calibração local e contínua das relações Z-R, especialmente em cenários influenciados por mudanças climáticas.

4.3. Conclusões

Os resultados da análise do radar meteorológico de Bauru para o CAPPI de 3,5 km evidenciam o potencial desta tecnologia em aplicações hidrológicas, especialmente na modelagem de bacias e na previsão de eventos extremos. Os dados de radar mostraram boa aderência aos registros pluviométricos, particularmente em um raio de 150 km, onde os

índices estatísticos (r , NSE e PBIAS) foram mais satisfatórios, indicando uma faixa ideal de operação para o radar de Bauru. Entretanto, foram identificadas limitações importantes relacionadas ao efeito de cone cego, atenuação do sinal em longas distâncias e interferências de clutter e ecos de terreno, que comprometeram o desempenho em alguns pontos de análise.

As relações Z-R testadas, especialmente a de Calheiros, demonstraram um bom ajuste aos dados locais, corroborando sua relevância para a região. No entanto, ressalta-se a necessidade de revisar e atualizar os parâmetros dessa relação, considerando as mudanças climáticas e as condições atmosféricas contemporâneas, o que pode melhorar a representatividade das estimativas de precipitação. Além disso, a comparação com o produto IMERG reforça a superioridade dos radares meteorológicos em captar variabilidades espaciais e temporais locais, destacando a importância desses sensores para modelagem hidrológica de alta precisão.

Apesar das limitações observadas, como a superestimação e subestimação sistemática em alguns pontos e faixas de distância, os dados do radar de Bauru foram suficientemente precisos para aplicações hidrológicas regionais. O desempenho pode ser inferior em períodos de precipitação extrema também sugere a necessidade de ampliar as séries históricas analisadas e considerar diferentes regimes de chuva para um entendimento mais abrangente.

Assim, para avançar no uso de radares meteorológicos na hidrologia, é necessário ampliar e aprofundar as investigações em diversas áreas-chave. A extensão das séries temporais é um primeiro passo fundamental, permitindo a avaliação do desempenho das relações Z-R em uma variedade de regimes de precipitação e eventos climáticos, o que pode aprimorar a calibração dos modelos, especialmente em condições meteorológicas extremas, como chuvas convectivas intensas, e moderadas, como chuvas frontais e estratiformes.

Além disso, a revisão e atualização das relações Z-R é crucial. A adaptação desses parâmetros, com base nas mudanças climáticas e nos avanços tecnológicos, deve incluir o ajuste das relações históricas, como a de Calheiros, para refletir as condições atmosféricas atuais. A análise isolada das fontes de erro, como o cone cego, clutter, atenuação e ecos de terreno, também merece atenção, pois permite aplicar correções específicas e melhorar a precisão dos dados radar.

Por fim, com base nos estudo de Ochoa-Rodriguez *et al.* (2019) e nos resultados mostrados, sugere-se que a integração de diferentes fontes de dados, como radar, pluviômetros e satélites, pode mitigar limitações individuais e gerar produtos de precipitação mais robustos. Com isso, a aplicação dessas metodologias em modelos hidrológicos regionais, como o HEC-HMS, possibilitará a validação das melhorias nos modelos, aprimorando as previsões de vazão e inundações. Essas estratégias, ao melhorar a qualidade dos dados de radar, reforçam sua importância no monitoramento hidrológico, especialmente diante das mudanças climáticas e do aumento da frequência de eventos extremos.

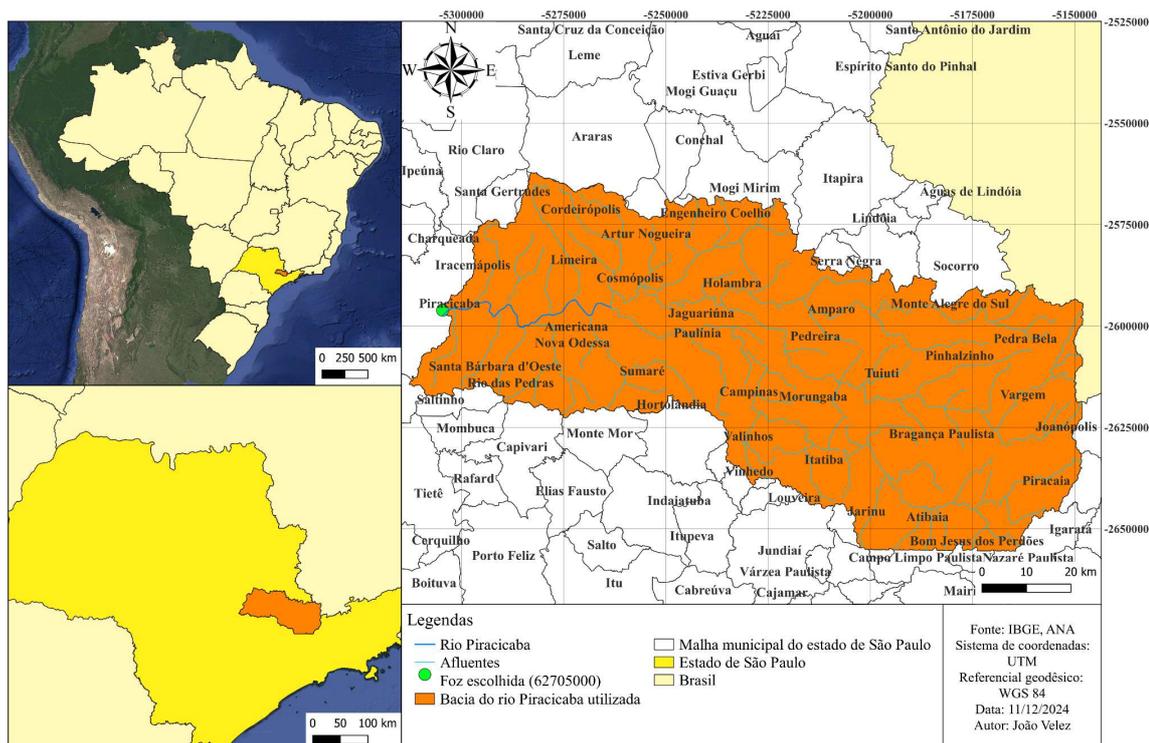
Capítulo 5: Modelagem no HEC-HMS

Neste capítulo será montado um modelo hidrológico utilizando do software HEC-HMS, após devida calibração, fará-se um estudo comparativo do desempenho das precipitações oriundas das estações pluviométricas com as obtidas por meio da reflectância do radar.

5.1. Área de Estudo

A bacia do rio Piracicaba representa uma importante fonte de água tanto para a cidade que carrega seu nome quanto para a indústria local, como é o caso das indústrias metalúrgicas, possui sua nascente na divisa entre São Paulo e Minas Gerais, na Serra da Mantiqueira, e percorre uma extensão considerável antes de desaguar no rio Tietê conforme figura 6.1. Sua bacia abrange cerca de 14.178 km², sendo a maior parte (11.020 km²) na região centro-oeste de São Paulo e o restante na região sudoeste de Minas Gerais, abrangendo 47 municípios paulistas e 4 mineiros, com uma população total estimada em 5.418.961 habitantes. Segundo dados do Plano de Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiá (2020), os principais cursos de água nessa bacia incluem os rios Atibaia, Atibainha, Cachoeira, Camanducaia, Capivari, Corumbataí, Jaguari, Jundiá e, é claro, o próprio rio Piracicaba. Além disso, destacam-se os principais reservatórios da região, como a Usina de Barra Bonita (no rio Piracicaba), o Salto Grande (no rio Atibaia), Jacaré e Jaguari (no rio Jacaré), Atibainha (no rio Atibainha) e Cachoeira (no Rio Cachoeira), sendo os últimos quatro integrantes do Sistema Produtor Cantareira.

Figura 5.1: Mapa de Localização da bacia do rio Piracicaba



O clima na região é predominantemente tropical, com uma estação chuvosa entre outubro e março e uma estação seca entre abril e setembro. A precipitação média anual varia entre 1.200 mm e 1.600 mm, influenciada pela topografia e pela presença de massas de ar úmidas provenientes do Oceano Atlântico (INMET, 2020). O regime hidrológico do rio Piracicaba é fortemente influenciado pelo regime pluviométrico da região. A vazão média anual do rio é de aproximadamente 200 m³/s, com variações sazonais significativas. Durante a estação chuvosa, os níveis de água aumentam substancialmente, enquanto na estação seca, a vazão diminui, muitas vezes causando escassez de água (DAEE, 2019).

Sua geologia é diversificada, com predominância de rochas sedimentares e basálticas. Os solos variam de latossolos vermelhos a argissolos e neossolos quartzarênicos, influenciando diretamente a capacidade de infiltração e retenção de água (IPT, 2018). Já sua topografia é diversificada, com altitudes que variam de 500 metros a mais de 1.800 metros nas áreas serranas.

A água da bacia do rio Piracicaba é utilizada para múltiplos propósitos, incluindo abastecimento público, irrigação, uso industrial, como o caso da indústria siderúrgica, e geração de energia hidrelétrica. A gestão dos recursos hídricos é fundamental para equilibrar esses diferentes usos e garantir a sustentabilidade da bacia (ANA, 2019).

5.2. Materiais e métodos

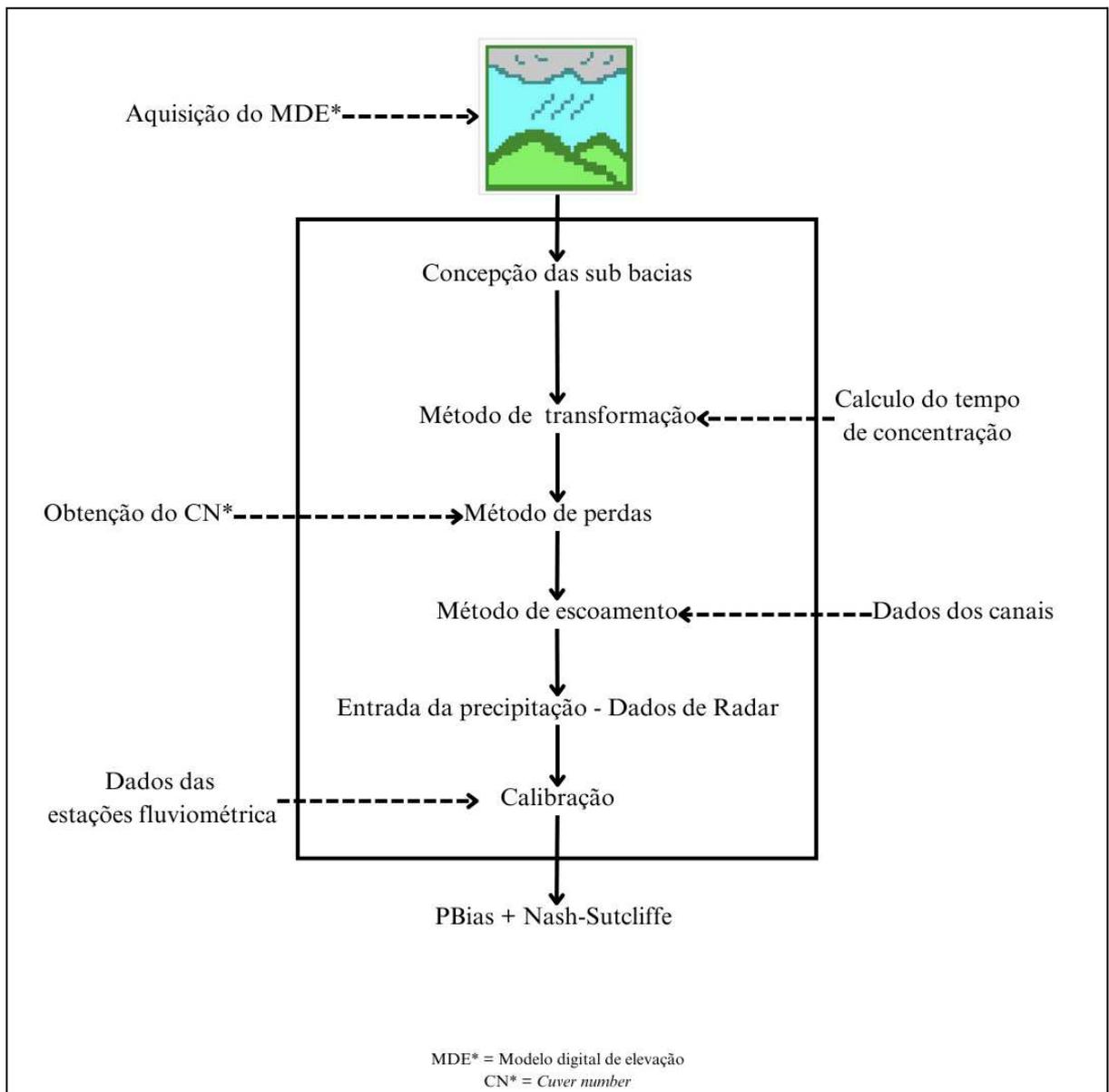
O HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System) é um software desenvolvido pelo US Army Corps of Engineers para modelagem hidrológica. Ele é usado para simular o ciclo hidrológico em uma bacia hidrográfica, incluindo processos como

precipitação, escoamento superficial, infiltração, evaporação e transpiração das plantas. (USACE - U.S. *Army Corps of Engineers*, 2010).

Um modelo hidrológico feito no HEC-HMS é baseado em processos físicos que simula a transformação de precipitação em escoamento em uma bacia hidrográfica. O modelo opera em etapas, começando com a definição das características físicas da bacia, como área, uso do solo, tipo de solo, declividade, entre outros. Em seguida, são inseridos os dados de precipitação, que podem ser observados ou estimados por meio de radar meteorológico ou modelos numéricos de previsão do tempo. O HEC-HMS então calcula o escoamento superficial, subterrâneo e total, considerando os processos de interceptação, infiltração, escoamento superficial direto e base, entre outros.

O sistema criado no HEC-HMS que analisará a bacia supracitada será utilizado para parametrizar a bacia hidrográfica do rio Piracicaba e avaliar os efeitos da precipitação obtida por radar na vazão escoada em determinada seção de rio. Para fins de modelagem utilizando radar meteorológicos, será estudada unicamente a parte integrante da bacia que está dentro do raio de atuação do Radar de Bauru. A metodologia para a construção do modelo está descrita na Figura 6.4.

Figura 5.2: Fluxograma dos processos no HEC-HMS



5.2.1. Tempo de Concentração

A definição do tempo de concentração é conceituada como o intervalo temporal necessário para que uma gotícula de água que atinge o ponto mais distante de uma bacia hidrográfica alcance seu exutório mediante escoamento em superfície e subsuperfície. Esta medida sugere que todo o território da bacia hidrográfica contribui para a vazão total que eventualmente atinge o ponto de descarga (Tucci, 2001).

Na definição dos tempos de concentração das sub-bacias da bacia do rio Piracicaba foi utilizado a equação de *Corps of Engineers* descrito por Mopu (1959), de modo que os parâmetros de entrada da fórmula foram calculados pelo próprio software HEC-HMS. Onde o L é o comprimento do talvegue principal em quilômetros e o S é a declividade do talvegue da bacia em m/m. Foi escolhido esse método tendo em base o estudo de Silveira (2005) e nas descrições de Mopu, descritas em seu livro, no qual define-se como adequada a utilização do

método nas condições: para bacias rurais e em áreas menores que 12000 Km², declividades menores que 14% e comprimentos menores que 257 Km. A fórmula de *Corps of Engineers* está expressa na equação 5.1.

$$T_c(H) = 0,191 * L^{0,76} * S^{-0,19} \quad (5.1)$$

5.2.2. Método de perdas

Para se calcular a quantidade de água que escoar e infiltra no solo, foi utilizado o método *Curve-Number* (CN). Desenvolvido pelo Soil Conservation Service (SCS) dos Estados Unidos na década de 1950, o CN é um parâmetro simplificado que reflete a capacidade de infiltração do solo, sendo determinado pela combinação de diferentes tipos de solo e usos na área em estudo. Para estimar o valor do CN, é crucial analisar como ocorre o escoamento superficial, levando em conta o tipo de solo e a cobertura vegetal da região (Soil Conservation Service, 1986).

Para sua estimativa, o presente trabalho foi utilizado como base os dados matriciais disponibilizados no estudo de Jaafar, Ahmad e Beyrouthy (2019), nas quais as informações foram utilizadas para adquirir o CN II médio para cada bacia hidrográfica. Esses dados foram fundamentais para a realização da análise e forneceram informações importantes para a compreensão dos processos hidrológicos nessas regiões.

Por outro lado, as perdas iniciais na bacia estão associadas à fração de água sujeita à interceptação e à infiltração que ocorre antes do início do evento. Tal parâmetro refere-se à quantidade inicial de água que é considerada perdida ou não disponível para o escoamento. O valor comum é de 0,2.S é frequentemente utilizado como uma estimativa para representar essa perda inicial. Essa abstração inicial pode incluir a evaporação, a infiltração no solo e outras perdas que ocorrem antes de a água começar a escoar superficialmente ou a se acumular nas bacias hidrográficas.

5.2.3. Método de transformação

Para a determinação do hidrograma de escoamento na bacia, pelo método da convolução, optou-se pelo uso do Hidrograma Unitário Sintético do Soil Conservation Service (SCS). O método de transformação de chuva em escoamento por meio do hidrograma Unitário Sintético do Soil Conservation Service é amplamente utilizado na modelagem hidrológica, principalmente em bacias hidrográficas que possuem dados limitados ou ausência de monitoramento direto de hidrogramas. Este método foi desenvolvido a partir de análises estatísticas de hidrogramas unitários gerados com base em dados observados de chuva e escoamento em pequenas bacias hidrográficas localizadas nos Estados Unidos. Ele oferece uma forma padronizada e prática de descrever a resposta hidrológica de uma bacia, sendo particularmente adequado para estudos em regiões onde os dados disponíveis são insuficientes para a aplicação de modelos mais detalhados (Soil Conservation Service, 1986. 164 p).

O Hidrograma Unitário Sintético do SCS descreve a variação do escoamento ao longo do tempo por meio de uma curva que apresenta um formato padronizado, definido principalmente pelo pico de vazão e pelo tempo até o pico. Esses dois parâmetros são determinados a partir de características da bacia hidrográfica, como a área de drenagem, o tempo de concentração e a intensidade da chuva efetiva.

O funcionamento do método pode ser descrito em etapas principais. A primeira delas é a definição do tempo até o pico, também chamado de tempo ao pico. Este parâmetro é calculado somando-se o tempo de concentração da bacia, que representa o tempo necessário para que a água da chuva percorra toda a extensão da bacia até o exultório, com metade do intervalo de tempo da chuva efetiva. Este intervalo corresponde ao período em que a precipitação está efetivamente contribuindo para o escoamento superficial. A fórmula utilizada para calcular o tempo ao pico é dada pela equação abaixo, em que: T_p é o tempo ao pico, em horas; T_c é o tempo de concentração da bacia, também em horas; Δt é o intervalo de tempo da chuva efetiva, em horas (Williams *et al.* 2012).

$$T_p = T_c + \frac{\Delta t}{2} \quad (5.2)$$

Após determinar o tempo ao pico, o próximo passo é calcular a vazão de pico do hidrograma. Esse cálculo considera a área da bacia hidrográfica e a precipitação efetiva, que corresponde à fração da chuva total que contribui diretamente para o escoamento. A fórmula utilizada é 5.3.:

$$Q_{peak} = \frac{2.08 * A * P_{eff}}{T_p} \quad (5.3)$$

Em que Q_{peak} é a vazão de pico, em metros cúbicos por segundo (m^3/s); A é a área da bacia, em quilômetros quadrados (km^2); P_{eff} é a precipitação efetiva, em milímetros (mm); T_p é o tempo ao pico, em horas. Com esses parâmetros calculados, é possível construir o hidrograma unitário sintético, utilizando uma curva padronizada baseada em frações do tempo total e das vazões acumuladas definidas pelo SCS. Essa padronização permite uma aplicação consistente do método em diferentes bacias hidrográficas, independentemente de suas características específicas (Williams *et al.* 2012).

Entre as vantagens do método SCS, destacam-se sua simplicidade e praticidade, que facilitam sua aplicação em estudos preliminares e em bacias com informações hidrológicas limitadas (Tassew *et al.*, 2013). Além disso, por ser baseado em observações reais, ele reflete padrões típicos de resposta hidrológica encontrados em diversas regiões. Apesar de suas vantagens, o método apresenta algumas limitações. Por ser uma abordagem generalizada, ele pode não capturar características específicas de uma bacia hidrográfica, como sua geomorfologia única ou particularidades do uso e ocupação do solo. Além disso, sua precisão depende de estimativas corretas de parâmetros empíricos, como o tempo de concentração e a precipitação efetiva. Outra limitação importante é que o método pode simplificar excessivamente a dinâmica do escoamento em bacias muito extensas ou com alta complexidade geomorfológica (Ponce e Hawkins, 1996).

5.2.4. Método de Escoamento

O método de Muskingum é amplamente utilizado na modelagem hidrológica para a propagação do escoamento em canais e rios devido à sua simplicidade e flexibilidade. Baseado na equação da continuidade, ele relaciona o armazenamento de água em um trecho do canal com as vazões de entrada e saída, utilizando os parâmetros K e X. O parâmetro K representa o tempo de viagem do escoamento em um trecho do rio, enquanto X indica o grau de peso entre a vazão de entrada e a de saída no armazenamento. Essa parametrização permite um ajuste fino do método para diferentes condições hidráulicas e geomorfológicas, tornando-o ideal para calibração em modelos como o HEC-HMS (Muskingum, 1968).

No caso deste estudo, o método de Muskingum foi preferido devido à sua capacidade de reduzir a intensidade dos picos de vazão e representar adequadamente o achatamento da onda de cheia, em maior conformidade com os dados observados, quando comparado ao método de Muskingum-Cunge (Kunge; Muskingum, 1970). Apesar de este último incorporar ajustes hidráulicos baseados em parâmetros físicos, sua aplicação pode ser limitada em situações onde a calibração exige maior flexibilidade nos parâmetros K e X, como observado aqui.

Essa escolha é corroborada por trabalhos como o de Kumar *et al.* (2011), que demonstraram a eficácia do método de Muskingum na calibração hidrológica no HEC-HMS para eventos de cheias em grandes bacias hidrográficas, e por Singh & Woolhiser (2002), que exploraram o uso do método em diferentes cenários hidrológicos, destacando sua simplicidade e robustez. Além disso, o manual do HEC-HMS (USACE, 2010) também descreve detalhadamente as aplicações e vantagens do método, reforçando sua confiabilidade e ampla aceitação na modelagem hidrológica.

O método de Muskingum é baseado na equação de continuidade e em uma relação linear entre o armazenamento, a vazão de entrada (I), e a vazão de saída (O) em um trecho do rio. Matematicamente, o método pode ser descrito pela equação 5.4:

$$S = K[XI + (1 - X)Q] \quad (5.4)$$

Onde: S é armazenamento no trecho do rio; K é constante de tempo ou tempo de propagação da onda de cheia no trecho; X é fator de peso, que varia de 0 a 0,5, indicando o peso relativo das vazões de entrada e saída.

A equação de continuidade é usada para atualizar os valores de S, I, e Q ao longo do tempo, resultando na fórmula de diferença finita (5.5):

$$Q_{t+1} = C1I_{t+1} + C2I_t + C3Q_t \quad (5.5)$$

Onde: C1, C2, C3 são coeficientes calculados a partir de K, X, e o intervalo de tempo (Δt); Q_{t+1} Q_t : Vazões de saída nos tempos t+1 e t, respectivamente; I_{t+1} I_t : Vazões de entrada nos tempos t+1 e t, respectivamente.

$$C1 = \frac{\Delta t - 2KX}{2K(1-X) + \Delta t} \quad (5.6)$$

$$C2 = \frac{\Delta t + 2KX}{2K(1-X) + \Delta t} \quad (5.7)$$

$$C3 = \frac{2K(1-X) - \Delta t}{2K(1-X) + \Delta t} \quad (5.8)$$

Para garantir estabilidade e realismo no modelo, os valores de X e K devem atender às seguintes condições onde o parâmetro X deve estar no intervalo $0 \leq X \leq 0,50$. Quando $X=0,5$, considera-se propagação totalmente linear, enquanto $X=0$ representa armazenamento puro. Outro parâmetro para ser respeitado é que o intervalo de tempo Δt deve ser menor ou igual a $2K(1-X)$ para evitar instabilidades numéricas. Essa condição assegura que o método represente adequadamente a propagação da onda de cheia.

5.2.5. Calibração

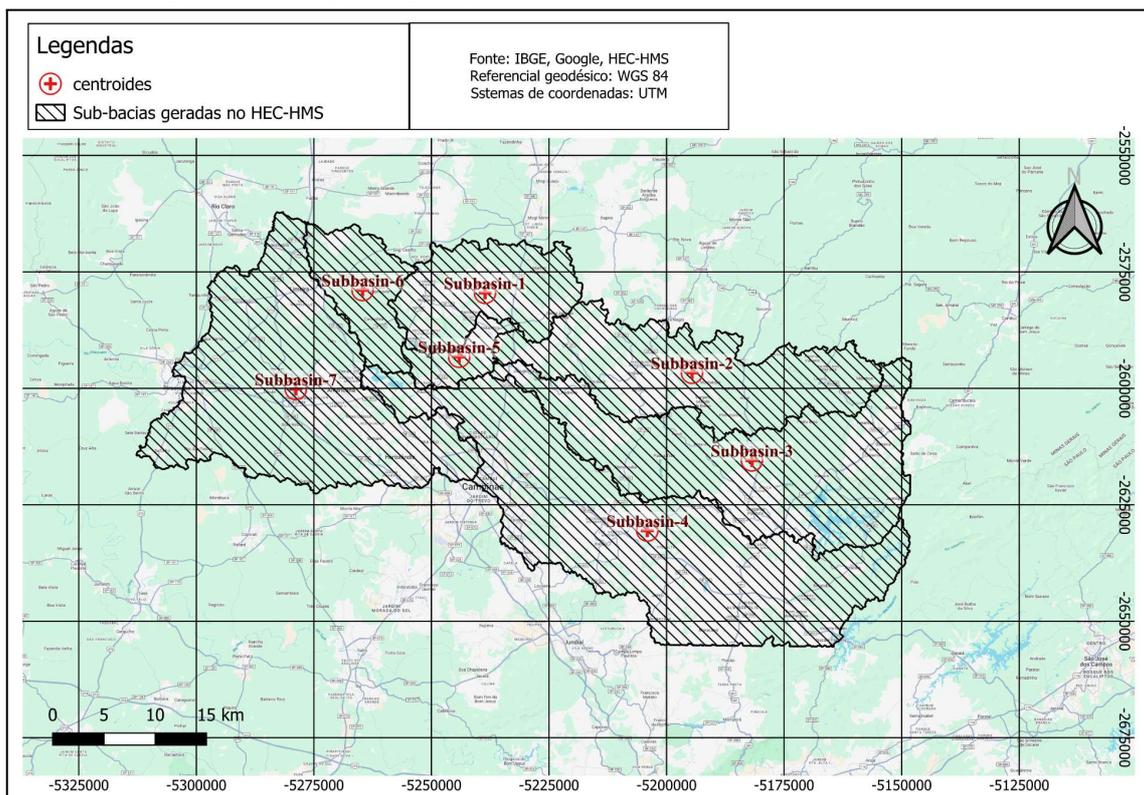
A etapa de calibração desempenha um papel crucial na garantia da precisão e confiabilidade das representações e das previsões realizadas pelo programa HEC-HMS. Ao ajustar os parâmetros do modelo para que suas saídas se aproximem o máximo possível das vazões observadas, a calibração permite que o modelo represente com maior fidelidade o comportamento hidrológico da bacia estudada. Isso é fundamental para garantir que as previsões de vazão geradas pelo modelo sejam úteis para a tomada de decisões em uma variedade de contextos, como gerenciamento de recursos hídricos, planejamento de infraestrutura e prevenção de desastres naturais. Além disso, a calibração proporciona insights valiosos sobre a dinâmica hidrológica da bacia, ajudando os usuários a entender melhor os processos que influenciam o escoamento de água.

A calibração do modelo se dará para os dados de entrada de precipitação, pelas estações pluviométricas, e da vazão observados pela estação fluviométrica telemétrica situadas na bacia do rio Piracicaba conforme tabela 5.1 e posicionados conforme Figura 6.5. Os dados das estações pluviométricas são de escala horária, já os da estação fluviométrica é de 15 em 15 minutos. O período observado será de 10 de janeiro de 2016 a 23 de janeiro de 2016 a fim de pegar a cheia histórica que atingiu o município entre os dias 12 a 20 de janeiro de 2011. Nota-se que será utilizado um intervalo de 2 dias antes do evento de cheia para o aquecimento a fim de treinar o modelo para o início da verificação. Durante essa etapa serão revistos os parâmetros de entrada com o intuito de conferir melhor adequação dos resultados dos dados gerados e observados.

Tabela 5.1 - Estações Pluviométricas utilizadas para a calibração o modelo hidrológico gerado no HEC-HMS

Nome da estação	Código	Tipo
UHE BARRA BONITA PIRACICABA	62705000	Fluviométrica
UHE BARRA BONITA PIRACICABA	2247233	Pluviométrica
Artur Nogueira _ Carolina	2247238	Pluviométrica
Bragança Paulista _ Jardim Cedro	2246219	Pluviométrica
Atibaia _ Estrada da Usina	2346472	Pluviométrica
Amparo _ ETE	2246213	Pluviométrica

Figura 5.3: Mapa da posição das sub bacias utilizadas no HEC-HMS



A calibração utilizou o Índice de Eficiência do Ajuste Nash-Sutcliffe (NSE), que é uma estatística normalizada que avalia a magnitude relativa da variância residual (ruído) em comparação com a variância da série observada (informação). Além disso, foi utilizado o Índice de Tendência Percentual (PBIAS), que mede a tendência média do valor calculado ser maior ou menor do que o valor observado. O NSE igual a 1 indica um ajuste perfeito, enquanto um valor igual a zero significa que as previsões são tão precisas quanto a média das observações. Quando o valor do NSE é negativo, os resultados são insatisfatórios, sendo mais adequado prever a média das observações. Os valores de referência para ambos os indicadores estão descritos na Tabela 5.2 (MORIASI et al., 2007).

Tabela 5.2. - Classificação de ajuste dos indicadores estatísticos NSE e Pbias para intervalo diário seguinte Moriasi (2007)

	NSE	PBias
Muito bom	>0.75	<10
Bom	de 0.75 a 0.65	de 10 a 15
Satisfatório	de 0.65 a 0.5	de 15 a 25
Insatisfatório	<0	>25

5.2.6. Preparação e entrada dos dados de radar no modelo

Com o objetivo de analisar a aplicação dos dados de radar em simulações hidrológicas no HEC-HMS, foi desenvolvido um código em Python (Anexo 2) que converte a refletância em precipitação e calcula a média para o centróide de um conjunto de sub-bacias fornecido como entrada. Em seguida, os dados são inseridos no modelo HEC-HMS, que já havia sido previamente calibrado.

5.3. Resultados e Discussão

5.3.1 Parametrização do modelo HEC-HMS

A modelagem hidrológica do trecho a montante da bacia do Rio Piracicaba foi desenvolvida utilizando o software HEC-HMS. O processo teve início com a obtenção de um Modelo Digital de Elevação (MDE) da região, derivado do sensor ALOS-PALSAR (Advanced Land Observing Satellite - Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar). Este sensor utiliza radar de abertura sintética na banda L, que oferece alta penetração em áreas cobertas por vegetação, permitindo uma representação precisa da topografia. O MDE obtido apresentou resolução espacial de 12,5 metros, garantindo detalhamento suficiente para as análises hidrológicas.

A partir do MDE, foram identificadas as depressões naturais e corrigidas as inconsistências topográficas para garantir um fluxo de escoamento contínuo. Em seguida, o fluxo de escoamento foi modelado, resultando na delimitação das áreas de contribuição hidrológica. Com base nesse processamento, foram geradas 7 sub-bacias hidrográficas, cada uma representando uma unidade de análise independente dentro do modelo.

As características físicas de cada sub-bacia, como área, declividade média e comprimento do canal principal, foram calculadas automaticamente pelo HEC-HMS a partir do MDE processado. Essas informações foram essenciais para a definição dos parâmetros utilizados nos métodos de perda, transformação e roteamento. As metodologias aplicadas foram:

- **Método de Perdas:** Para estimar as perdas por infiltração, foi utilizado o método do Curve Number (CN), baseado nas características do uso e ocupação do solo, tipo de solo e condições de umidade inicial das sub-bacias.
- **Método de Transformação:** O hidrograma de escoamento direto foi calculado utilizando o método do Hidrograma Unitário Sintético (HUS) do SCS, devido à sua simplicidade e aplicabilidade em bacias com características semelhantes às da região estudada.
- **Método de Roteamento:** Inicialmente, tentou-se aplicar o método de Muskingum-Cunge, conhecido por considerar as características geométricas e hidráulicas do canal. Contudo, esse método resultou em picos muito acentuados e quedas abruptas de vazão, que não refletiam o comportamento hidrológico observado na bacia, especialmente o achatamento típico das ondas de cheia na região. Por esse motivo, optou-se pelo método de Muskingum, que demonstrou maior adequação à calibração, reproduzindo melhor o comportamento observado na bacia.

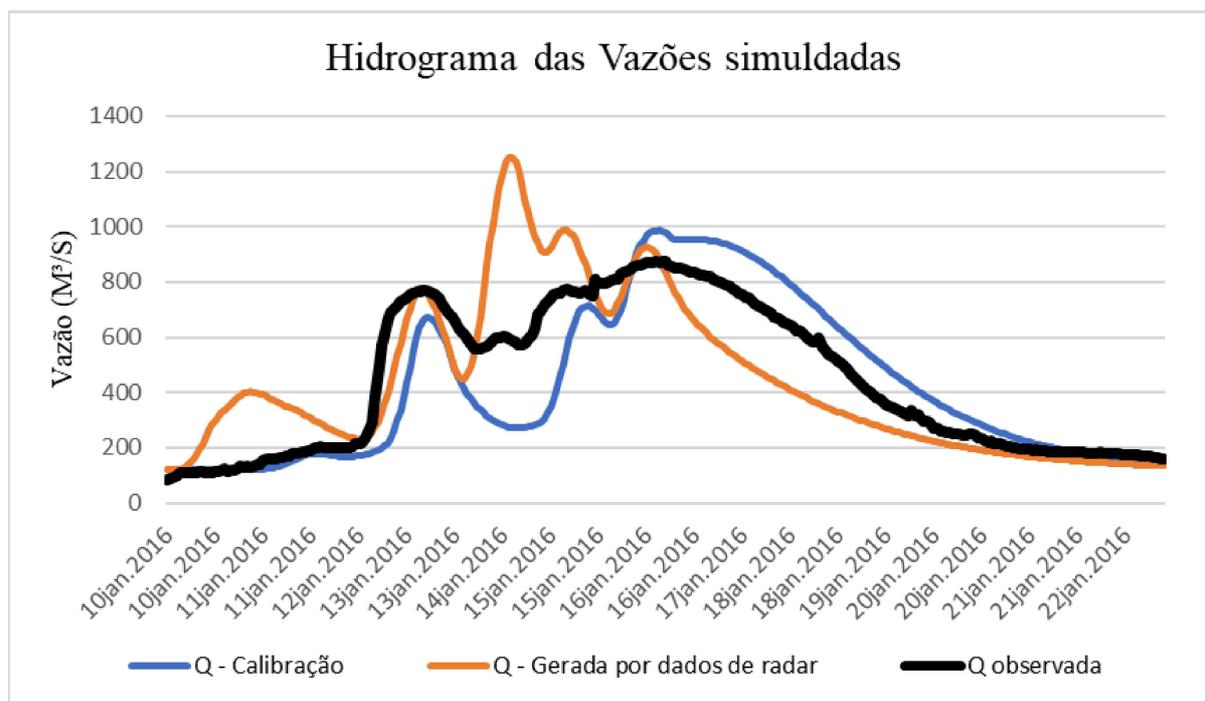
Para cada sub-bacia, foram inseridas as séries históricas de precipitação das estações pluviométricas selecionadas. Essas estações foram escolhidas estrategicamente para garantir que os dados refletissem as condições pluviométricas específicas de cada área de contribuição.

5.3.2 Calibração do modelo HEC-HMS

A calibração do modelo foi realizada utilizando dados de vazão da estação fluviométrica telemétrica localizada no exutório do trecho a montante da bacia. A calibração teve como objetivo ajustar os parâmetros do modelo para reproduzir adequadamente os hidrogramas observados, minimizando os erros nas estimativas de vazão. Os resultados obtidos a partir dessa modelagem serão apresentados a seguir, por meio do Hidrograma da Figura 5.4 com destaque para a eficiência dos métodos aplicados e a comparação entre os hidrogramas observados e simulados e também traz os resultados simulados com a entrada da precipitação oriunda das imagens de radar e calculadas a partir da relação Z-R de Calheiros.

Figura 5.4: Hidrograma gerado na calibração para a estação fluviométrica: UHE BARRA BONITA PIRACICABA (62705000); e da vazão gerada pela entrada da precipitação oriunda

dos dados de radar



A calibração do modelo hidrológico no HEC-HMS foi avaliada utilizando três parâmetros estatísticos principais: o Coeficiente NSE, o erro percentual de viés PBIAS e o erro quadrático médio RMSE normalizado pelo desvio padrão (STD DEV).

Na calibração (entrada com dados de pluviômetros) o NSE apresentou um valor de 0,728. Assim, o modelo demonstrou uma performance satisfatória, indicando que 72,8% da variabilidade observada nos dados de vazão foi explicada pelo modelo. Esse valor sugere que, apesar das limitações, o modelo tem uma boa capacidade de reproduzir o comportamento da onda de cheia, ajustando-se razoavelmente bem às variáveis observadas. Já o valor de Pbias igual a -3,58% sugere que o modelo tem uma leve tendência a subestimar os valores de vazão, com uma diferença média de cerca de 3,58% para menos. Este viés negativo não é necessariamente problemático, pois está dentro de uma margem aceitável, especialmente considerando as limitações dos dados e a complexidade da modelagem hidrológica.

Apesar dos parâmetros estatísticos satisfatórios, observou-se um atraso na onda de cheia simulada, com uma defasagem temporal de aproximadamente 8 horas em alguns trechos da bacia. Esse atraso é característico de modelos hidrológicos, especialmente em regiões com comportamento hidrológico mais complexo.

Mesmo com esse atraso, o modelo conseguiu capturar o pico de cheia, e o achatamento da curva na diminuição natural da vazão foi bem representado. A diferença máxima entre os picos de vazão foi de aproximadamente 100 m³/s, o que indica que, apesar da defasagem, o modelo conseguiu acompanhar adequadamente a evolução da cheia, especialmente nas fases de pico e de atenuação.

O evento de pico de cheia ocorreu no dia 16 de janeiro de 2016, às 11 horas, e o modelo conseguiu acompanhar a dinâmica da cheia até esse momento, apesar da diferença temporal entre a simulação e os dados observados. Isso indica que, embora o modelo tenha

mostrado um desempenho adequado para a maioria dos aspectos da dinâmica da cheia, o atraso temporal pode ser atribuído a características físicas da bacia e ao comportamento da precipitação, que, como será discutido a seguir, foi influenciado pela cobertura espacial das chuvas.

É importante ressaltar que as chuvas de entrada a calibração do modelo foram obtidas por meio de dados de estações pluviométricas, as quais têm uma limitação espacial. Esse fator pode ter impactado a precisão das chuvas utilizadas na modelagem, especialmente considerando o tipo de precipitação convectiva típica do verão, que geralmente tem curta duração e abrangência espacial limitada. As chuvas convectivas são, por natureza, mais localizadas e intensas, e a cobertura espacial das estações pluviométricas pode não ter capturado todas as variações espaciais dessas chuvas. Este fator pode ter gerado uma subestimação ou erro na representação temporal e espacial da precipitação, o que impactou diretamente na modelagem da onda de cheia. Em eventos de chuvas convectivas, a distribuição espacial da precipitação é um dos maiores desafios para modelos hidrológicos, uma vez que áreas não cobertas por pluviômetros podem sofrer variações significativas na intensidade das chuvas.

No estudo de Dhital *et al.* (2024), a calibração do modelo hidrológico HEC-HMS foi realizada utilizando produtos de precipitação baseados em radar, obtidos por diversas fontes, incluindo NEXRAD, AORC e NCEP Stage IV. Os parâmetros de calibração, como o Coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) e a razão erro quadrático médio/desvio padrão das observações (RSR), foram usados para avaliar a precisão do modelo. O NSE foi comparado para diferentes tempestades de calibração e validação, com o objetivo de determinar o ajuste do modelo em relação aos dados observados de vazão. Embora as comparações envolvessem diversos produtos de precipitação, o foco aqui será comparar a calibração utilizando dados de estações pluviométricas, similar à abordagem realizada no estudo da bacia do rio Piracicaba.

5.3.3 Entrada de Radar no HEC-HMS

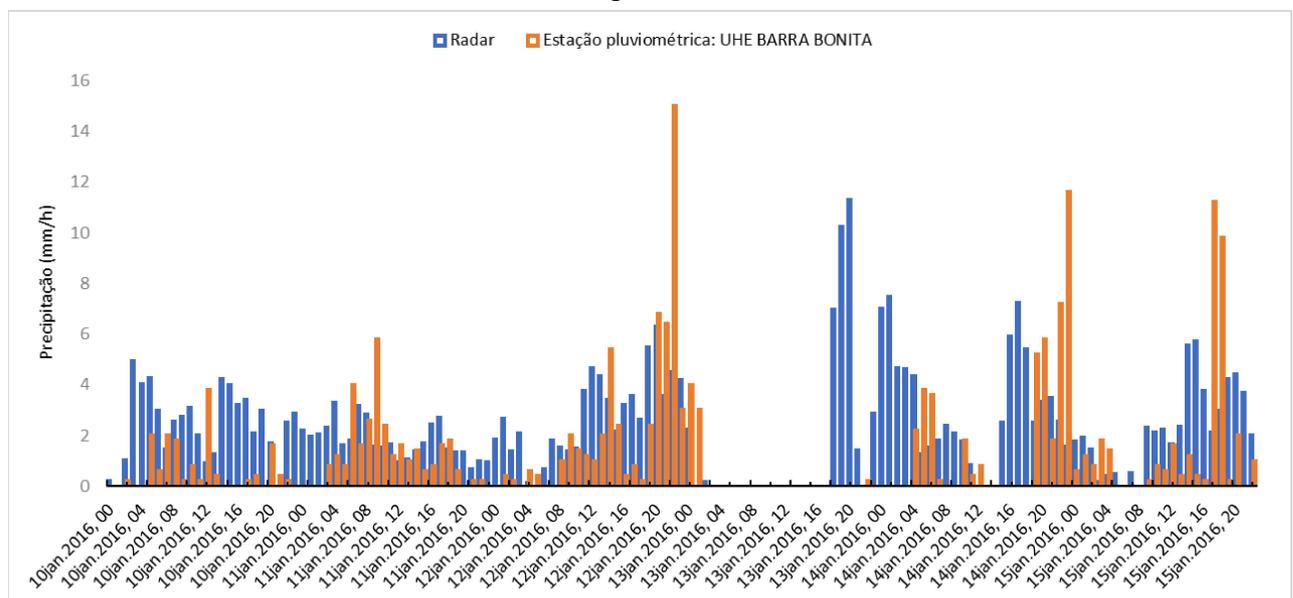
Inicialmente, tentou-se inserir os dados de radar por meio da grade, mas, devido a problemas na preparação dos dados para entrada no programa do HEC-HMS, optou-se por uma abordagem mais simplificada, utilizando as precipitações médias de cada sub-bacia. Embora essa solução tenha perdido parte da principal vantagem do radar, como sua alta resolução espacial e ampla cobertura, ela se mostrou satisfatória, embora não ideal, para a entrada dos dados no modelo.

Os resultados obtidos com os dados de radar apresentaram um NSE de 0,532, PBIAS de -9,17% e RMS de 0,7. Esses resultados são inferiores aos encontrados com os dados de pluviômetros, o que é, de certa forma, esperado, uma vez que o modelo foi calibrado para se ajustar especificamente aos dados de pluviômetros. Embora os valores de calibração tenham sido ajustados para as condições desses dados, os picos de vazão resultantes da entrada dos dados de radar se mostraram mais acentuados, sendo melhor captados pelo radar, o que pode ser interpretado como uma sensibilidade maior do modelo a eventos de precipitação. Contudo, a proporção dos picos ficou distorcida, com o modelo indicando picos de vazão significativamente maiores ou menores do que os observados. Por exemplo, em situações em que se esperava um pico de vazão pequeno, o modelo indicou um aumento considerável, com

a vazão chegando a quase o dobro da registrada pela estação fluviométrica, e o inverso também ocorreu em outros picos. Uma possível explicação para esses resultados pode ser que o radar está sendo afetado por interferências de outros hidrometeoros, como gotas de nuvem ou granizo (gelo suspenso), o que pode resultar na superestimação da precipitação em certas situações. Essas interferências podem fazer com que o radar antecipe eventos de chuva, o que, por sua vez, pode causar uma previsão de pico de vazão mais acentuada e uma rápida diminuição das vazões, não refletindo com precisão o comportamento real da bacia. Outra possível explicação é a própria perda da resolução espacial decorrente da escolha do método.

Com base na Figura 5.5, observa-se uma tendência à subestimação da precipitação na sub-bacia onde está localizada a foz. Mesmo ao integrar a precipitação média de toda a sub-bacia, o resultado apresentou uma diminuição do volume de chuva, o que impactou diretamente as vazões simuladas. Uma hipótese para esse comportamento é que a média calculada para a sub-bacia tenha sido amortecida por valores extremos de precipitação, ou seja, eventos intensos de chuva em pontos localizados podem ter sido diluídos ao longo da integração espacial dos dados, suavizando o valor médio final. Esse fenômeno é especialmente relevante em bacias com grande variabilidade espacial, onde picos de precipitação tendem a ocorrer em pontos isolados, possivelmente nas proximidades do pluviômetro, enquanto o radar capta uma estimativa generalizada e suavizada da precipitação sobre a área.

Figura 5.5: Gráfico de barra comparativo entre as duas fontes de precipitação para a sub-bacia onde está presente o exutório.



Além disso, as discrepâncias entre os valores observados e simulados também podem ser explicadas pela capacidade limitada do radar de capturar adequadamente pequenos eventos de precipitação devido a interferências, como gotas de nuvem ou granizo, discutidas anteriormente. Em contrapartida, os picos de vazão mais acentuados captados pelo radar sugerem uma sensibilidade maior desse tipo de dado a eventos extremos de chuva, mas essa sensibilidade pode levar a superestimação em certas situações.

Assim identifica-se outro fator relevante em que o ponto de medição está localizado na borda do raio do radar, dentro do raio de 250 km, o que pode comprometer a qualidade dos dados de precipitação. Conforme discutido no capítulo anterior, as correlações estatísticas para essa região indicaram medições medianas, sugerindo que pequenas precipitações podem ser atenuadas por interferências de outros hidrometeoros ou fontes externas, não sendo captadas de forma eficaz pelo radar. Isso pode resultar no aumento do erro dos dados de precipitação e justificar a discrepância observada nas vazões de pico. A combinação desses fatores pode explicar a variação nas simulações, com picos de vazão mais pronunciados ou mais atenuados em relação aos dados observados, além de um decaimento acelerado da vazão máxima. Apesar dessas limitações, os dados de radar demonstraram um bom potencial para a modelagem hidrológica, especialmente em áreas onde a cobertura de dados pluviométricos é escassa. Contudo, a sensibilidade do radar a diferentes hidrometeoros e a sua posição na borda do raio de cobertura indicam que melhorias podem ser necessárias para uma utilização mais precisa na calibração de modelos hidrológicos.

Formulando uma hipótese para descrever o evento, pode-se sugerir que, durante o período analisado, ocorreram chuvas intensas e concentradas em regiões específicas da sub-bacia, provavelmente nas proximidades das estações pluviométricas, enquanto o radar, ao integrar os dados em uma escala espacial mais ampla, suavizou esses valores. Esse amortecimento evita que a precipitação atinja seu pico máximo, distorcendo assim a resposta hidrológica esperada. A discrepância entre os dados observados e simulados reforça a importância de considerar eventos extremos localizados, que tendem a ser subestimados pelo radar, especialmente em cenários de variabilidade espacial elevada.

5.4. Conclusões

A calibração do modelo, realizada com dados de vazão da estação fluviométrica localizada no exutório da bacia, apresentou valores estatísticos positivos. Apesar do desempenho geral satisfatório, foi identificada uma defasagem temporal de aproximadamente 8 horas na onda de cheia simulada em relação aos dados observados. Esse atraso pode ser atribuído a limitações típicas dos modelos hidrológicos e às características físicas da bacia, como a variabilidade espacial e temporal das chuvas, principalmente em eventos convectivos intensos e localizados.

A comparação entre dados pluviométricos e de radar destacou pontos importantes. Os dados de pluviômetros apresentaram melhor ajuste para a calibração, devido à sua precisão temporal pontual, enquanto os dados de radar, embora tenham captado picos de vazão mais acentuados, apresentaram distorções. O NSE de 0,532 e o PBIAS de -9,17% obtidos com dados de radar foram inferiores aos dos pluviômetros, o que reforça a necessidade de aperfeiçoar o uso do radar, especialmente em áreas próximas às bordas do raio de cobertura (250 km), onde interferências e atenuações podem comprometer a qualidade dos dados.

No geral, os resultados sugerem que o amortecimento da precipitação integrada pelo radar em escala espacial mais ampla suavizou os valores de pico das chuvas, impactando diretamente a simulação hidrológica. A combinação de fatores como variabilidade espacial

elevada, interferências hidrometeorológicas e localização dos pontos de medição afeta a precisão dos picos de vazão simulados.

Ainda assim, os dados de radar mostraram bom potencial para a modelagem hidrológica, especialmente em regiões com cobertura pluviométrica limitada. Para futuros estudos, recomenda-se o uso combinado de dados de radar e pluviômetros, além de técnicas de correção de radar, visando minimizar as discrepâncias e melhorar a representação dos eventos de precipitação convectiva e suas respostas hidrológicas.

Capítulo 6: Conclusão

Este estudo avaliou o potencial do radar meteorológico de Bauru (CAPPI 3,5 km) na modelagem hidrológica da bacia do rio Piracicaba, integrando seus dados ao modelo HEC-HMS. Os resultados indicaram que, apesar das limitações inerentes à tecnologia de radar, sua aplicação mostra-se promissora para aprimorar a previsão de cheias, especialmente em regiões com escassa cobertura de pluviômetros. A calibração do modelo com dados pluviométricos resultou em desempenho satisfatório, com NSE de 0,728 e PBIAS de -3,58%, refletindo capacidade de explicar 72,8% da variabilidade observada na vazão, porém com leve tendência à subestimação. Quando alimentado com dados de radar, o modelo apresentou desempenho inferior (NSE de 0,532; PBIAS de -9,17%), evidenciando desafios na representação de eventos extremos e na integração espacial da precipitação.

A subestimação sistemática foi observada tanto na vazão de base quanto nos picos hidrológicos, com diferenças máximas de até 100 m³/s entre simulações e observações. Essa discrepância foi atribuída à suavização espacial da precipitação pelo radar, que diluiu valores extremos localizados. Por outro lado, em situações pontuais, o radar superestimou picos de vazão (até o dobro do observado), possivelmente devido a interferências de hidrometeoros como granizo ou à antecipação de eventos. A defasagem temporal de 8 horas na onda de cheia simulada destacou limitações operacionais do modelo, associadas à variabilidade espacial das chuvas convectivas e às características físicas da bacia.

O radar demonstrou maior precisão em um raio de 150 km, com índices estatísticos mais robustos (NSE > 0.7 e PBIAS superiores), validando sua aplicação em escalas regionais. Entretanto, em distâncias maiores (250 km), houve degradação significativa no desempenho, causada por atenuação do sinal, interferências (clutter, ecos de terreno) e o efeito cone cego. As relações Z-R testadas, principalmente a de Calheiros, ajustaram-se bem aos dados locais, mas exigem revisão contínua para incorporar mudanças climáticas e condições atmosféricas contemporâneas.

A comparação entre radar e pluviômetros revelou trade-offs claros: enquanto os pluviômetros oferecem maior precisão pontual, o radar captura melhor a variabilidade espacial das chuvas, sendo vital para bacias extensas ou com baixa densidade de estações. Contudo, a sensibilidade do radar a interferências e sua dependência de calibração local limitam sua confiabilidade em eventos extremos. A integração de múltiplas fontes de dados (radar, pluviômetros, satélites) surge como estratégia-chave para mitigar essas limitações, conforme sugerido por estudos internacionais.

Este estudo reforça o papel dos radares como complemento aos pluviômetros, destacando seu potencial para melhorar a previsão de cheias e a gestão adaptativa de recursos hídricos. Apesar dos desafios técnicos, como superestimação pontual e subestimação sistemática, os resultados validam a tecnologia para aplicações hidrológicas regionais. Investimentos em redes de radar no Brasil, alinhados a exemplos globais como o NEXRAD, são urgentes para enfrentar os crescentes extremos climáticos. A combinação de avanços

tecnológicos, integração de dados multisensores e modelos hidrológicos aprimorados pavimentará o caminho para sistemas de alerta mais precisos, contribuindo para a construção de infraestruturas hídricas resilientes e sustentáveis.

6.1 Recomendações para trabalhos futuros

A presente dissertação enfrentou desafios significativos na obtenção e no processamento de dados meteorológicos provenientes de radares do IPMet/UNESP. A dificuldade de comunicação, somada ao tempo necessário para a preparação dos dados – que frequentemente variava entre duas a três semanas –, dificultou o progresso da pesquisa. Além disso, o processamento dessas informações, que envolvia arquivos volumosos e a conversão de imagens em matrizes para manipulação e análise, demandou infraestrutura computacional robusta e tempo substancial. Essa realidade evidenciou a necessidade de simplificação no acesso e no tratamento de dados de radar meteorológico no Brasil. Com base nas limitações encontradas e nos avanços identificados, apresentam-se a seguir recomendações para futuros trabalhos que possam ampliar e aprofundar o uso de dados de radar na hidrologia.

6.1.1 Ampliação do Período de Análise

Recomenda-se realizar novas análises utilizando um conjunto maior de dados que cubra um período superior a um ano. Essa abordagem permitiria avaliar tendências sazonais e interanuais de precipitação, o que enriqueceria a compreensão do comportamento climático e sua influência nos modelos hidrológicos. Uma base temporal mais extensa pode fornecer resultados mais robustos, aumentando a confiabilidade das análises e a representatividade dos resultados para diferentes condições hidrológicas e meteorológicas.

6.1.2 Comparações Baseadas em Eventos

Outra recomendação importante é refazer as comparações entre dados de radar e pluviômetros com foco em eventos específicos, especialmente aqueles com características contrastantes, como chuvas convectivas, frontais e orográficas. Isso possibilitaria avaliar a aderência das relações Z-R (relação entre refletividade e taxa de precipitação) a diferentes tipos de precipitação. Tal análise poderia identificar ajustes necessários nas relações Z-R atualmente empregadas, aumentando a precisão das estimativas de chuva para cada tipo de evento.

6.1.3 Avaliação da Relação Z-R de Calheiros

Dada a influência das mudanças climáticas nas características atmosféricas e, conseqüentemente, na estrutura das precipitações, recomenda-se a reavaliação da relação Z-R proposta por Calheiros e Zawadzki (1987). A relação, desenvolvida especificamente para o Brasil, pode não capturar alterações atmosféricas recentes, como mudanças na distribuição de partículas de chuva ou no teor de umidade do ar. Estudos que considerem cenários climáticos atualizados poderiam contribuir para ajustes ou até para o desenvolvimento de novas relações Z-R adaptadas às condições climáticas contemporâneas.

6.1.4 Métodos de Mesclagem de Dados de Radar e Pluviômetros

Promover estudos de mesclagem de dados de radar e pluviômetros, como descrito por Ochoa-Rodriguez *et al.* (2019), é essencial para aprimorar estimativas de precipitação. Os métodos de mesclagem são divididos em três categorias principais:

1. Ajuste de viés do radar (MFB e ajustes locais): Esses métodos corrigem as estimativas de radar, ajustando-as com base em dados de pluviômetros. São úteis para melhorar a precisão geral do radar, especialmente em regiões onde os erros sistemáticos são evidentes.
2. Interpolação utilizando associação espacial do radar (KED e Krigagem com correção de erro): Esses métodos utilizam a informação espacial do radar como um suporte adicional para interpolação dos dados pluviométricos, combinando as vantagens de ambos os sensores.
3. Integração de radar e pluviômetros (métodos Bayesianos – BAY e CoKrigagem): Esses métodos combinam informações de radar e pluviômetros de forma probabilística, minimizando incertezas e maximizando a acurácia das estimativas.

A aplicação desses métodos em estudos futuros pode incluir testes sob diferentes condições climáticas e configurações de infraestrutura (densidade de pluviômetros e qualidade dos dados de radar). A combinação dos métodos com avanços tecnológicos, como o uso de radares polarimétricos, também deve ser explorada.

6.1.5 Uso de Dados de Radar em Formato de Grade

Para maximizar o uso da vantagem da resolução espacial dos dados de radar, recomenda-se sua aplicação em formato de grade (*gridded data*). Além disso, sugerem-se estudos em regiões onde os erros de estimativa sejam reduzidos, como em bacias com características fisiográficas adequadas. Nesse contexto, destaca-se a necessidade de aplicações em bacias com menor interferência de obstáculos físicos, como a bacia de Piracicaba ou outras regiões de estudo com maior aderência.

6.1.6 Estudos em Outras Bacias e Nowcasting

Recomenda-se a realização de estudos em bacias que apresentam características favoráveis para avaliação, como as localizadas nos municípios de São Carlos, José Bonifácio e Iperó. Essas áreas podem servir como referência para explorar ao máximo as vantagens dos dados de radar em modelagens hidrológicas. Adicionalmente, sugere-se a inclusão de métodos de **nowcasting** para prever cheias futuras, aproveitando a alta resolução temporal dos dados de radar.

6.1.7 Análise de Erros Específicos

Propõe-se a investigação do desempenho de radares meteorológicos em relação a tipos específicos de erros, como: Eco de terreno, atenuação do sinal por hidrometeoros, erros

associados à curvatura da Terra, Largura do feixe do radar. Estudos direcionados podem ajudar a identificar e mitigar as principais limitações na aplicação prática dos dados de radar.

6.1.8 Planejamento Urbano e Microdrenagem

Outro campo promissor é a aplicação de dados de radar para descrever o comportamento da chuva ao longo de períodos curtos (1-2 horas), substituindo métodos indiretos, como curvas IDF ou blocos alternados. A criação de uma metodologia específica para isso pode auxiliar no planejamento de projetos de microdrenagem urbana, oferecendo dados de maior resolução e precisão.

6.1.9 Criação de um Banco Nacional de Dados de Radar

Por fim, ressalta-se a necessidade da criação de um banco nacional de dados de radar, similar ao HydroWeb (ANA) ou aos bancos do INPE. A centralização e disponibilização dos dados reduziria custos e facilitaria o acesso, promovendo avanços acadêmicos e tecnológicos. Essa iniciativa seria um marco no uso de radares meteorológicos no Brasil, incentivando estudos mais aprofundados e de maior abrangência.

7. Referências

ANA - Agência Nacional de Águas. Relatório de Conjuntura dos Recursos Hídricos no Brasil. 2019. Disponível em: <https://www.ana.gov.br>. Acesso em: 17 abr. 2024.

ATLAS, D.; SRIVASTAVA, R. C.; SEKHON, R. S. Doppler radar characteristics of precipitation vertical incidence. **Reviews of Geophysics and Space Physics**, v. 2, p. 1-35, 1973.

BATTAN, L. J. Radar observes the weather. Garden City: Doubleday and Co., 1962.

BERNE, Alexis; KRAJEWSKI, Witold F. Radar for hydrology: Unfulfilled promise or unrecognized potential? **Advances in Water Resources**, v. 51, p. 357-366, 2013.

BOTELHO, Louise Lira Roedel; DE ALMEIDA CUNHA, Cristiano Castro; MACEDO, Marcelo. O método da revisão integrativa nos estudos organizacionais. **Gestão e Sociedade**, v. 5, n. 11, p. 121-136, 2011.

BRINGI, V. N. Polarimetric Doppler weather radar: principles and applications. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.

CARPENTER, T. M. et al. National threshold runoff estimation utilizing GIS in support of operational flash flood warning systems. **Journal of Hydrology**, v. 224, n. 1-2, p. 21-44, 1999.

CARVALHO, Paula Roberta Souza et al. Modelagem hidrológica na sub-bacia do rio Paraíba utilizando o modelo SMAP.

CAVALCANTE, Livia Teixeira Canuto; OLIVEIRA, Adélia Augusta Souto de. Métodos de revisão bibliográfica nos estudos científicos. **Psicol. Rev.** (Belo Horizonte), v. 26, n. 1, p. 83-102, abr. 2020. Disponível em: http://pepsic.bvsalud.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1677-11682020000100006&lng=pt&nrm=iso. Acesso em: 23 jan. 2024.

CHOW, Ven Te. Open Channel Hydraulics. 1. ed. New York: McGraw-Hill, 1959.

COELHO, W. F.; CALVETTI, L.; BENETI, Cesar; MELLO, Paulo. Observational study of two squall lines using reflectivity proxies. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, v. 43, p. 71-84, 30 mar. 2020. DOI: 10.11137/2020_1_71_84.

CONFORTO, Edivandro Carlos; AMARAL, Daniel Capaldo; SILVA, S. L. da. Roteiro para revisão bibliográfica sistemática: aplicação no desenvolvimento de produtos e gerenciamento de projetos. **Trabalho apresentado**, v. 8, 2011.

CREUTIN, J. D.; DELRIEU, G.; LEBEL, Thierry. Rain measurement by raingage-radar combination: a geostatistical approach. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 5, n. 1, p. 102-115, 1988.

CREUTIN, J. D.; ANDRIEU, H.; FAURE, D. Use of a weather radar for the hydrology of a mountainous area. Part II: radar measurement validation. **Journal of Hydrology**, v. 193, n. 1-4, p. 26-44, 1997.

CRUZ, Letícia Giese de Andrade et al. Hydrologic and hydraulic modeling to assess the efficiency of structural flood control measures: case study of Audi-União District in the city of Curitiba, Brazil. **Revista Ambiente & Água**, v. 18, p. e2894, 2023.

CUNGE, J. A. On the subject of a flood propagation computation method (Muskingum method). **Journal of Hydraulic Research**, v. 7, n. 2, p. 205-230, 1969.

DAEE - Departamento de Águas e Energia Elétrica. Boletim Hidrometeorológico do Estado de São Paulo. 2019. Disponível em: <http://www.dae.sp.gov.br>. Acesso em: 17 abr. 2024.

DE BRITO MEDEIROS, Katharine Taveira; DE LUCENA, Mycarla Míria Araújo. Gestão dos recursos hídricos: uma revisão sob a perspectiva dos objetivos do desenvolvimento sustentável. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 12, n. 1, p. e12549-e12549, 2023.

DE QUEIROZ, Antônio Paulo. Monitoramento e previsão imediata de tempestades severas usando dados de radar. 2009.

DEIDDA, Roberto; BENZI, Roberto; SICCARDI, Franco. Multifractal modeling of anomalous scaling laws in rainfall. **Water Resources Research**, v. 35, n. 6, p. 1853-1867, 1999.

DHITAL, Kapil et al. Application of Pre-Processed Radar-Based Gridded Precipitation Using Streamlined Workflow of HEC-HMS and HEC-RAS. In: **World Environmental and Water Resources Congress 2024**. p. 43-56.

DOVIK, R. J.; ZRNIC, D. S. **Doppler Radar and Weather Observations**. 2. ed. Academic Press, 2006.

EINFALT, Thomas et al. Towards a roadmap for use of radar rainfall data in urban drainage. **Journal of Hydrology**, v. 299, n. 3-4, p. 186-202, 2004.

G1 PIRACICABA E REGIÃO. Homem é arrastado pelas águas durante temporal em Piracicaba. **G1**, 11 nov. 2016. Disponível em: <https://g1.globo.com/sp/piracicaba-regiao/noticia/2016/11/homem-e-arrastado-pelas-aguas-durante-temporal-em-piracicaba.html>. Acesso em: 23 jul. 2024.

G1 PIRACICABA E REGIÃO. Nível do Rio Piracicaba em janeiro atinge extremos em 2011 e 2014. 1 fev. 2014. Disponível em: <URL do artigo>. Acesso em: 8 jun. 2024.

GUPTA, Hoshin V. et al. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. **Journal of Hydrology**, v. 377, n. 1-2, p. 80-91, 2009.

GUPTA, H. V.; SOROOSHIAN, S.; YAPO, P. O. Status of automatic calibration for hydrologic models: comparison with multicriteria methods. *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 4, n. 2, p. 155–163, 1999. DOI: 10.1061/(ASCE)1084-0699(1999)4:2(155).

HASAN, Nooradilla Abu; GOTO, Masa; MIYAMOTO, Kuniaki. A review of weather radar system for rainfall induced disaster preparedness. *Int J Innov Technol Explor Eng*, v. 8, n. 7, p. 268-77, 2019.

HASS MIGUEL, Bárbara; DALELES RENNÓ, Camilo. Validação de Estimativas de Precipitação por Radar Meteorológico em uma Bacia Hidrológica na Região Central do Estado de São Paulo, Brasil. *Anuário do Instituto de Geociências*, v. 43, n. 2, 2020.

HUFFMAN, G. J. et al. GPM IMERG Final Precipitation L3 1 month 0.1 degree x 0.1 degree V06. Greenbelt, MD: Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC), 2019. DOI: 10.5067/GPM/IMERG/3B-MONTH/06.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Base Cartográfica Contínua do Brasil - 1:250.000. 2018. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 17 abr. 2024.

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. Normais Climatológicas do Brasil 1981-2010. 2020. Disponível em: <https://www.inmet.gov.br>. Acesso em: 17 abr. 2024.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC). Disponível em: <http://www.cptec.inpe.br/>. Acesso em: 17 abr. 2024.

IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas. Geologia e Recursos Minerais do Estado de São Paulo. 2018. Disponível em: <https://www.ipt.br>. Acesso em: 17 abr. 2024.

JAAFAR, H. H.; AHMAD, F. A.; EL BEYROUTHY, N. G. GCN250, new global gridded curve numbers for hydrologic modeling and design. *Scientific Data*, v. 6, n. 1, p. 1-12, 2019. DOI: 10.1038/s41597-019-0155-x.

JOSÉ, Murilo Fretta; MINUZZI, Rosandro Boligon. Desempenho na estimativa de precipitação pelo radar meteorológico do oeste de Santa Catarina. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 12, n. 6, p. 2249-2258, 2019.

KOUWEN, Nicholas. WATFLOOD: A micro-computer based flood forecasting system based on real-time weather radar. *Canadian Water Resources Journal*, v. 13, n. 1, p. 62-77, 1988.

KRAJEWSKI, Witold F.; VILLARINI, Gabriele; SMITH, James A. Radar-rainfall uncertainties: Where are we after thirty years of effort? *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 91, n. 1, p. 87-94, 2010.

KULL, Daniel W.; FELDMAN, Arlen D. Evolution of Clark's unit graph method to spatially distributed runoff. *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 3, n. 1, p. 9-19, 1998.

KUMAR, D. Nagesh; BALIARSINGH, Falguni; RAJU, K. Srinivasa. Extended Muskingum method for flood routing. **Journal of Hydro-environment Research**, v. 5, n. 2, p. 127-135, 2011.

KUNGE, J.; MUSKINGUM, R. *Hydrologic prediction of river flow with a generalized flood routing model.* Water Resources Research, v. 6, n. 4, p. 1145-1155, 1970. DOI: 10.1029/WR006i004p01145.

LEE, Jung Hwan et al. Integrated flood forecasting and warning system against flash rainfall in the small-scaled urban stream. **Atmosphere**, v. 11, n. 9, p. 971, 2020.

LIN, Qiaoying et al. Web-based prototype system for flood simulation and forecasting based on the HEC-HMS model. **Environmental Modelling & Software**, v. 158, p. 105541, 2022.

MATTOS, Tiago Souza et al. Towards reducing flood risk disasters in a tropical urban basin by the development of flood alert web application. **Environmental Modelling & Software**, v. 151, p. 105367, 2022.

MIGUEL, Bárbara Hass; RENNÓ, Camilo Daleles. Uso de dados de radar meteorológico em modelo hidrológico SCS-CN para a estimativa de escoamento superficial. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 72, n. 3, p. 501-516, 2020.

MOLINI, A.; LANZA, L. G.; LA BARBERA, P. The impact of tipping-bucket raingauge measurement errors on design rainfall for urban-scale applications. **Hydrological Processes**, v. 19, n. 5, p. 1073–1088, 2005. DOI: 10.1002/hyp.5646.

MORASI, D. N. et al. Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007.

MORIN, Efrat et al. Spatial patterns in thunderstorm rainfall events and their coupling with watershed hydrological response. **Advances in Water Resources**, v. 29, n. 6, p. 843-860, 2006.

MOORE, R. J. et al. Design of the HYREX raingauge network. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 4, p. 521–530, 2000. DOI: 10.5194/hess-4-521-2000.

MOPU TECNOLOGIA CARRETERAS. Cálculo hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales. Textos de la Direccion General de Carreteras, n. 12, Espanha, 124 p., 1987.

MUSKINGUM, R. *Flood control and reservoir design.* 1. ed. New York: Wiley, 1968. 468 p.

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. DOI: 10.1016/0022-1694(70)90255-6.

OCHOA-RODRIGUEZ, Susana et al. Impact of spatial and temporal resolution of rainfall inputs on urban hydrodynamic modelling outputs: A multi-catchment investigation. **Journal of Hydrology**, v. 531, p. 389-407, 2015.

OCHOA-RODRIGUEZ, S. et al. A review of radar-rain gauge data merging methods and their potential for urban hydrological applications. **Water Resources Research**, v. 55, n. 8, p. 6356-6391, 2019.

OGDEN, F. L. et al. Hydrologic analysis of the Fort Collins, Colorado, flash flood of 1997. **Journal of Hydrology**, v. 228, n. 1-2, p. 82-100, 2000.

PAUL, Pranesh Kumar et al. Selecting hydrological models for developing countries: Perspective of global, continental, and country scale models over catchment scale models. **Journal of Hydrology**, v. 600, p. 126561, 2021.

PEREIRA FILHO, Augusto José; DOS SANTOS, Cláudia Cristina. Modeling a densely urbanized watershed with an artificial neural network, weather radar and telemetric data. **Journal of Hydrology**, v. 317, n. 1-2, p. 31-48, 2006.

PEARSON, K. Mathematical contributions to the theory of evolution. II. Skew variation in homogenous material. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, v. 187, p. 253-318, 1896. DOI: 10.1098/rsta.1896.0007.

PONCE, V. M.; YEVJEVICH, V. Muskingum-Cunge method with variable parameters. **Journal of the Hydraulics Division**, v. 104, n. 12, p. 1663-1667, 1978.

PONTES, Paulo Rógenes Monteiro et al. Modelagem hidrológica e hidráulica de grande escala com propagação inercial de vazões. **RBRH: Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 20, n. 4, p. 888-904, out./dez. 2015.

PROBERT-JONES, J. R. The radar equation in meteorology. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 88, n. 378, p. 485-495, 1962.

RABELO, Davi Rodrigues; DA SILVA SANTOS, Marcos Ronielly; DE SOUSA FILHO, Mario Rodrigues Pinto. Análise comparativa dos dados pluviométricos de satélite e de superfície em bacia hidrográfica semiárida. **Revista Brasileira de Sensoriamento Remoto**, v. 3, n. 1, 2022.

REED, Seann; SCHAAKE, John; ZHANG, Ziya. A distributed hydrologic model and threshold frequency-based method for flash flood forecasting at ungauged locations. **Journal of Hydrology**, v. 337, n. 3-4, p. 402-420, 2007.

RINEHART, R. E. Radar for meteorologists. Nevada: Rinerhart Publishing, 1997.

SANTOS, Leonardo BL et al. A Neural Network-Based Hydrological Model for Very High-Resolution Forecasting Using Weather Radar Data. **Eng**, v. 4, n. 3, p. 1787-1796, 2023.

SCHOENER, G.; STONE, M. C.; THOMAS, C. Comparison of seven simple loss models for runoff prediction at the plot, hillslope and catchment scale in the semiarid southwestern U.S. **Journal of Hydrology**, v. 598, p. 126490, 2021.

SEO, D.-J.; BREIDENBACH, J. P.; JOHNSON, E. R. Real-time estimation of mean field bias in radar rainfall data. **Journal of Hydrology**, v. 223, n. 3-4, p. 131-147, 1999.

SILVEIRA, André Luiz Lopes da. Desempenho de fórmulas de tempo de concentração em bacias urbanas e rurais. **RBRH: Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, n. 1, p. 5-23, jan./mar. 2005.

SINGH, Vijay P.; WOOLHISER, David A. Mathematical modeling of watershed hydrology. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 7, n. 4, p. 270-292, 2002.

SMITH, James A. et al. Radar rainfall estimation for flash flood forecasting in small urban watersheds. **Advances in Water Resources**, v. 30, n. 10, p. 2087-2097, 2007.

SOIL CONSERVATION SERVICE. *Urban hydrology for small watersheds*. 2. ed. Technical Release 55. Washington, D.C.: U.S. Department of Agriculture, 1986. 164 p.

SOKOL, Zbyněk et al. The role of weather radar in rainfall estimation and its application in meteorological and hydrological modelling—A review. **Remote Sensing**, v. 13, n. 3, p. 351, 2021.

STEINER, Matthias et al. Effect of bias adjustment and rain gauge data quality control on radar rainfall estimation. **Water Resources Research**, v. 35, n. 8, p. 2487-2503, 1999.

TASSEW, Bitew G.; BELETE, Mulugeta A.; MIEGEL, K. Application of HEC-HMS model for flow simulation in the Lake Tana basin: The case of Gilgel Abay catchment, upper Blue Nile basin, Ethiopia. **Hydrology**, v. 6, n. 1, p. 21, 2019.

THORND AHL, Søren et al. Weather radar rainfall data in urban hydrology. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 21, n. 3, p. 1359-1380, 2017.

TOBIN, Kenneth J.; BENNETT, Marvin E. Using SWAT to Model Streamflow in Two River Basins With Ground and Satellite Precipitation Data. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, v. 45, n. 1, p. 253-271, 2009.

TUCCI, C. E. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS: ABRH, 2001.

UIJLENHOET, Remko. Raindrop size distributions and radar reflectivity–rain rate relationships for radar hydrology. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 5, n. 4, p. 615-628, 2001.

URBANI, Gustavo Lopes; GRACIOSA, Melissa Cristina Pereira; BRAMBILA, Maria Cleofé Valverde. Delimitação de manchas de inundação na bacia do córrego do Ipiranga, São

Paulo–SP, Brasil, com modelagem hidrológico-hidráulica utilizando HEC-HMS/HEC-RAS. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, v. 20, 2023.

USACE - U.S. Army Corps of Engineers. HEC-HMS Technical Reference Manual. Disponível em: <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/hmsdocs/hmstrm>. Acesso em: 20 mar. 2023.

USACE - U.S. Army Corps of Engineers. HEC-HMS. River Analysis System. User's Manual (version 3.5). Hydrologic Engineering Center, Davis, 2010.

VAN ECK, N. J.; WALTMAN, L. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. **Scientometrics**, v. 84, n. 2, p. 523–538, 2010.

VANELLI, Franciele Maria; FAN, Fernando Mainardi; KOBIYAMA, Masato. Panorama geral sobre dados hidrológicos com ênfase em eventos hidrológicos extremos. **REGA: Revista de Gestão del Água de América Latina**, v. 17, p. e24, 2020.

PONCE, Victor M.; HAWKINS, Richard H. Runoff curve number: Has it reached maturity? **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 1, n. 1, p. 11-19, 1996.

VICTORIA, Ronaldo. Enchentes seguem padrões estatísticos. **USP ESALQ ACESSORIA DE COMUNICAÇÃO**, 8 jan. 2011. Disponível em: <URL do documento em PDF>. Acesso em: 8 jun. 2024.

WHITTEMORE, R.; KNAFL, K. The integrative review: updated methodology. **Journal of Advanced Nursing**, v. 52, n. 5, p. 546-553, dez. 2005.

WHITE, Allen B. et al. An automated brightband height detection algorithm for use with Doppler radar spectral moments. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v. 19, n. 5, p. 687-697, 2002.

WILLIAMS, J. R. et al. Evolution of the SCS runoff curve number method and its application to continuous runoff simulation. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 17, n. 11, p. 1221-1229, 2012.

WOOD, V. T.; BROWN, R. A. Applications of Weather Radar in Operational Meteorology. **Meteorological Applications**, 2013.

XAVIER, A. C. et al. New improved Brazilian daily weather gridded data (1961–2020). **International Journal of Climatology**, v. 42, n. 16, p. 8390-8404, 2022. DOI: 10.1002/joc.7731.

YANG, Dawen; KOIKE, Toshio; TANIZAWA, Hiroshi. Application of a distributed hydrological model and weather radar observations for flood management in the upper Tone River of Japan. **Hydrological Processes**, v. 18, n. 16, p. 3119-3132, 2004.