

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS NATURAIS E EXATAS
DEPARTAMENTO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE GEOGRAFIA BACHARELADO

Eduardo Cunha do Amaral

**VALIDAÇÃO ESTATÍSTICA DOS DADOS DE PRECIPITAÇÃO
ORIUNDOS DO PRODUTO CHIRPS PARA A BACIA HIDROGRÁFICA
DO RIO SANTA MARIA- RS**

Santa Maria, RS
2023

Eduardo Cunha do Amaral

**VALIDAÇÃO ESTATÍSTICA DOS DADOS DE PRECIPITAÇÃO
ORIUNDOS DO PRODUTO CHIRPS PARA A BACIA HIDROGRÁFICA
DO RIO SANTA MARIA- RS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Geografia Bacharelado da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) como requisito parcial para obtenção do título de **Bacharel em Geografia**.

Orientador: Prof. Dr. Romario Trentin
Co Orientadora: Profa. Dra.Carina Petsch

Santa Maria, RS
2023

Eduardo Cunha do Amaral

**VALIDAÇÃO ESTATÍSTICA DOS DADOS DE PRECIPITAÇÃO
ORIUNDOS DO PRODUTO CHIRPS PARA A BACIA HIDROGRÁFICA
DO RIO SANTA MARIA- RS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Geografia Bacharelado da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM) como requisito parcial para obtenção do título de **Bacharel em Geografia**.

Aprovado em 19 de dezembro de 2023



**Romario Trentin, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)**



**Carina Petsch, Dra. (UFSM)
(Coorientadora)**



Anderson Augusto Volpato Scoti, Dr. (UFSM)

_____ por videoconferência _____
Fábio de Oliveira Sanches, Dr. (UFJF)

Santa Maria, RS
2023

AMARAL, E.C.

Validação estatística dos dados de precipitação oriundos do produto CHIRPS para a bacia hidrográfica do Rio Santa Maria/RS Eduardo Cunha do Amaral - 2023.

61 f.; 30 cm

Orientador: Dr. Romario Trentin

Coorientadora: Dra. Carina Petsch

Trabalho de Graduação (Geografia Bacharelado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Naturais e Exatas, Departamento de Geociências, Curso de Geografia – Bacharelado, RS, 2023.

1. Validação 2. CHIRPS 3. Dados de Precipitação 4. Densidade de Cobertura.

I. Petsch, Carina II. Robaina, Luís Eduardo de Souza III. Título.

Eu, Eduardo Cunha do Amaral, declaro para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Graduação) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.



Atribuição-Não Comercial 3.0 Brasil (CC BY-NC 3.0 BR)

À minha família, que foi a base fundamental neste trajeto, dedico este trabalho. Aos meus pais, que desde cedo me transmitiram o valor da educação e, com paciência e amor, mostraram que o esforço não conhece limites. Aos meus queridos tios, agradeço pelo apoio incondicional.

Ao povo brasileiro, reconheço o seu papel crucial na sustentação do ensino público de qualidade. Esta pesquisa é uma forma de retribuir o investimento que foi feito em mim, refletindo o compromisso com a sociedade que me rodeia.

Assim, dedico este trabalho a todos que possam se beneficiar com os resultados obtidos.

AGRADECIMENTOS

À Dra. Carina Petsch, minha orientadora, com quem tive a honra de trabalhar em projetos por mais de dois anos e contando. Sua orientação, amizade e constante disposição foram fundamentais para o desenvolvimento de experiências relevantes em minha formação. Sem minha inclusão no projeto em 2021, talvez os meus caminhos no curso teriam sido diferentes.

Ao Dr. Fábio Sanches, pela enorme disposição em passar horas no Meet comigo e com a Professora Carina para a discussão de artigos, instrução de novos métodos e tudo o que sempre se dispôs.

Ao Dr. Anderson Scotti e ao Dr. Romario Trentin pela companhia nos inúmeros trabalhos de campo ao longo do curso e pela parceria.

Aos demais professores do Departamento de Geociências que fogem a regra em questão da proximidade e compreensão com os alunos, prezando pelo tratamento de igual para igual.

À Universidade Federal de Santa Maria, pela excelência no ensino no interior do estado.

*À Kathiane, minha namorada, por me acompanhar de perto nessa trajetória.
Te amo!*

RESUMO

VALIDAÇÃO ESTATÍSTICA DOS DADOS DE PRECIPITAÇÃO ORIUNDOS DO PRODUTO CHIRPS PARA A BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SANTA MARIA- RS

AUTOR: Eduardo Cunha do Amaral
ORIENTADOR: Prof. Dr. Romario Trentin
COORIENTADORA: Profa. Dra. Carina Petsch

A Bacia Hidrográfica do Rio Santa Maria (BHRSM) é amplamente estudada devido aos processos erosivos ligados a formações geológicas com rochas friáveis, além do efeito de eventos de precipitação que contribuem para a desagregação e transporte de material sedimentar. Ademais a bacia hidrográfica possui eventos de inundação, também ligados a eventos de precipitação. Diante disso, os dados associados à precipitação pluviométrica são fundamentais para desenvolver pesquisas na BHRSM. Este estudo tem como objetivo validar os dados de precipitação pluviométrica obtidos pelo *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station* (CHIRPS) a partir de dados das Estações Meteorológicas (EM) para a BHRSM, localizada no estado do Rio Grande do Sul, Brasil. A avaliação da precisão desses conjuntos de dados de reanálise é crucial devido à escassez de EM na região. Os dados referentes ao CHIRPS foram obtidos no *Google Earth Engine* e os dados das EM foram baixados do Portal Hidroweb, para o período entre 1986-2022. A escolha das EM foi baseada em um levantamento do número de estações funcionando na área de estudo, período disponível de dados e menor número de dados ausentes. Ainda assim, foi utilizada a técnica de correlação para o preenchimento das falhas nos dados de precipitação das sete EM. Utilizaram-se métricas estatísticas, como o Coeficiente de Determinação (R^2), Erro Médio Absoluto (EMA), Erro Relativo Médio (ERM), e Raiz do Erro Médio Quadrático (REQM) para analisar a concordância entre os conjuntos de dados. A espacialização dos dados de precipitação foi realizada no QGIS, usando técnicas de interpolação. No que se refere aos resultados, observou-se uma evolução significativa na cobertura e distribuição temporal das estações meteorológicas na BHRSM durante a última década, porém, ainda se destaca a necessidade de uma cobertura mais uniforme justificando a necessidade de validar dados provenientes de reanálise. Os resultados revelaram oscilações mensais dos coeficientes de determinação (R^2) entre 0,60 e 0,83, com meses de março, julho, outubro e novembro apresentando valores mais elevados, indicando uma conexão mais robusta entre os dados meteorológicos das estações e o CHIRPS. Apesar dos dados do CHIRPS superestimarem a precipitação na BHRSM, estatisticamente houve uma associação moderada a forte entre os conjuntos de dados, ressaltando uma tendência consistente ao longo do ano. Portanto, os dados CHIRPS são adequados para representar a sequência histórica de precipitação para a BHRSM. Os resultados desta pesquisa fornecem subsídios para a gestão hídrica, entendimento dos impactos da precipitação na região, oferecendo suporte para futuros estudos que visem à utilização dos dados pluviométricos.

Palavras-chave: CHIRPS. Estação meteorológica. Análise espacial. Climatologia.

ABSTRACT

STATISTICAL VALIDATION OF CHIRPS PRECIPITATION DATA FOR THE SANTA MARIA RIVER WATERSHED, RS

AUTHOR: Eduardo Cunha do Amaral
ADVISOR: Romario Trentin
COADVISOR: Profa. Dra. Carina Petsch

The Santa Maria River Basin (BHRSM) is widely studied due to erosion processes linked to geological formations with friable rocks, in addition to the effect of precipitation events that contribute to the disintegration and transport of sedimentary material. Furthermore, the river basin has flood events, also linked to precipitation events. Therefore, data associated with rainfall is essential for developing research in BHRSM. This study aims to validate rainfall data obtained by the Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station (CHIRPS) from data from Meteorological Stations (EM) for BHRSM, located in the state of Rio Grande do Sul, Brazil. Assessing the accuracy of these reanalysis datasets is crucial due to the scarcity of EM in the region. The data relating to CHIRPS were obtained from Google Earth Engine and the MS data were downloaded from the Hidroweb Portal, for the period between 1986-2022. The choice of EM was based on a survey of the number of stations operating in the study area, available data period and lowest number of missing data. Even so, the correlation technique was used to fill in the gaps in the precipitation data from the seven EM. Statistical metrics were used, such as the Coefficient of Determination (R^2), Mean Absolute Error (EMA), Mean Relative Error (ERM), and Root Mean Square Error (REQM) to analyze the agreement between the data sets. The spatialization of precipitation data was carried out in QGIS, using interpolation techniques. Regarding the results, a significant evolution was observed in the coverage and temporal distribution of meteorological stations in BHRSM during the last decade, however, the need for more uniform coverage still stands out, justifying the need to validate data from reanalysis. The results revealed monthly fluctuations in the coefficients of determination (R^2) between 0.60 and 0.83, with months such as March, July, October and November presenting higher values, indicating a more robust connection between meteorological data from the stations and CHIRPS. Although CHIRPS data overestimates precipitation in the BHRSM, statistically there was a moderate to strong association between the data sets, highlighting a consistent trend throughout the year. Therefore, CHIRPS data are suitable to represent the historical precipitation sequence for the BHRSM. The results of this research provide support for water management, understanding the impacts of precipitation in the region, offering support for future studies aimed at using rainfall data.

Keywords: CHIRPS. Weather station. Spatial analysis. Climatology.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.2 OBJETIVOS	12
1.2.1 Objetivo geral	12
1.2.2 Objetivos específicos.....	12
2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	13
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
3.1 ESTUDO DO CLIMA: UMA BREVE EVOLUÇÃO HISTÓRICA.....	16
3.2 AQUISIÇÃO DE DADOS METEOROLÓGICOS: REDES DE OBSERVAÇÃO E ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS NO BRASIL.....	22
3.2.1 Redes de observação.....	22
3.2.2 Estações e observações meteorológicas no brasil.....	26
3.3 CHIRPS.....	29
4 MATERIAIS E MÉTODOS	31
4.1 INVENTÁRIO E ANÁLISE ESPACIAL DE ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS ...	31
4.1.1 Dados pluviométricos de estações meteorológicas convencionais	32
4.1.2 Preenchimento de falhas.....	33
4.2 DADOS PLUVIOMÉTRICOS DE REANÁLISE - PRODUTO CHIRPS	34
4.3 PROCEDIMENTOS ESTATÍSTICOS DE VALIDAÇÃO.....	35
4.4 ESPACIALIZAÇÃO E APRESENTAÇÃO DOS DADOS EM MAPAS	37
5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	38
5.1 COBERTURA ESPACIAL DA REDE DE ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS	38
5.2 VALIDAÇÃO ESTATÍSTICA ENTRE OS DADOS ESTIMADOS PELO CHIRPS E OS OBSERVADOS PELAS EM.	43
5.3 ESPACIALIZAÇÃO DOS DADOS DE PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA ANUAL E MENSAL DO PRODUTO CHIRPS E DE ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS DO PERÍODO 1986-2022	49
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	54
7 REFERÊNCIAS	55

1 INTRODUÇÃO

A precipitação pluviométrica desempenha um papel primordial na regulação dos fluxos de energia e massa que influenciam o clima e os sistemas terrestres (PENDERGRASS, KNUTTI, LEHNER, 2017). A observação e mensuração das variações temporais e espaciais da precipitação são essenciais para compreender os ciclos globais de energia e água, assim como para analisar os processos hidrológicos e dinâmicas presentes nas bacias hidrográficas (EBERT, JANOWIAK, KIDD, 2007; GOODRICH *et al.* 2008; ZHAN *et al.* 2015; ADLER *et al.* 2017). Os estudos relacionados à variabilidade da precipitação são realizados para compreender os padrões de distribuição das chuvas ao longo do ano e a probabilidade de ocorrer secas e excessos de chuva, podendo ser analisada com métodos da estatística simples ou índices climáticos (BACK, SÔNEGO, PEREIRA, 2020; OTHMAN e ABIDA, 2022; RODRIGUES, SOUSA, LOPES, 2022).

As séries temporais de dados de precipitação são fundamentais para uma variedade de estudos, incluindo análises de desastres naturais (GETIRANA *et al.* 2020; GUAN *et al.* 2023; MARENGO *et al.* 2020), erosão do solo (MASROOR *et al.* 2022; PANAGOS *et al.* 2017; PETSCH *et al.* 2022a), produção agrícola (AMARE *et al.* 2018; CROST *et al.* 2018; RAHMAN *et al.* 2017), entre outros. No entanto, a obtenção de medições precisas de precipitação em diferentes escalas de estudo é desafiadora devido à variabilidade espaço-temporal em pequena escala, juntamente com a constante falta de cobertura temporal e espacial nas redes de observações meteorológicas, especialmente em países de vasta extensão territorial, como o Brasil.

O uso de redes de pluviômetros, até algumas décadas atrás, forneceu a principal fonte de medições de precipitação relativamente precisas (FEIDAS, 2010). Recentemente, a utilização de dados de precipitação obtidos por satélite tem se destacado como uma alternativa valiosa, pois apresentam uma cobertura quase global, alta resolução, amostragem frequente e fácil acesso (FUNK, PETERSON, LANDSFELD, 2015; TANG *et al.* 2015; NOGUEIRA, MOREIRA e VOLPATO, 2018; IPCC, 2023). Contudo, ressalta-se que a utilização de bases de dados obtidos por reanálise só pode ocorrer se as estimativas de precipitação forem semelhantes à variabilidade espacial e temporal observada nos pluviômetros (RIVERA, MARIANETTI e HINRICHS, 2018).

Desde o final do século XX, vários conjuntos de dados de precipitação baseados em satélites têm sido empregados. Alguns são exclusivamente oriundos de dados de satélite, como CMORPH (JOYCE *et al.* 2004) e GSMaP (OKAMOTO *et al.* 2005), enquanto outros são combinações de observações *in situ*, reanálises e dados de satélite, como CMAP (XIE; ARKIN, 1997), TRMM 3B43 (HUFFMAN *et al.* 2007), PERSIANN-CDR (ASHOURI *et al.* 2015), CHIRPS (FUNK *et al.* 2015) e GPCP V2.3 (ADLER *et al.* 2018). Estudos visando validar os dados CHIRPS (*Climate Hazard Group InfraRed Precipitation with Station data*) para o Brasil foram encontrados, por exemplo, para todo o país (COSTA *et al.* 2021), para a região Nordeste (PAREDES-TREJO, BARBOSA e LAKSHMI, 2017; SOARES *et al.* 2021), para a bacia hidrográfica do rio Amazonas (PACA *et al.* 2020), para Minas Gerais (NOGUEIRA, MOREIRA e VOLPATO, 2018) e para Rondônia (MU, BIGGS e SHEN, 2021).

Apesar de haver pesquisas para a validação dos dados do produto CHIRPS em várias regiões do Brasil, não foram encontrados estudos com esse propósito para o estado do Rio Grande do Sul. Dessa forma, a validação se torna crucial ao considerar a escassez de estações meteorológicas convencionais na região sudoeste do estado, onde está localizada a Bacia Hidrográfica do Rio Santa Maria (BHRSM).

Essa validação não apenas oferece suporte para que outros pesquisadores possam utilizar esses dados no Rio Grande do Sul e na região do Cone Sul, mas também possibilita a utilização de dados de precipitação em uma escala mais ampla e precisa. Esta precisão é fundamental para analisar o impacto das chuvas na erosão do solo, bem como para compreender eventos extremos de precipitação e inundações, questões amplamente documentadas e presentes na BHRSM (RADEMANN, TRENTIN e ROBAINA, 2018; PETSCH *et al.* 2022; CABRAL, NUMMER e BATEIRA, 2020; PETSCH, AMARAL e SANCHES, 2023).

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

A pesquisa tem como objetivo geral validar os dados de precipitação pluviométrica diária do CHIRPS com os dados observados de estações meteorológicas para o período de 1986-2022 para a BHRSM.

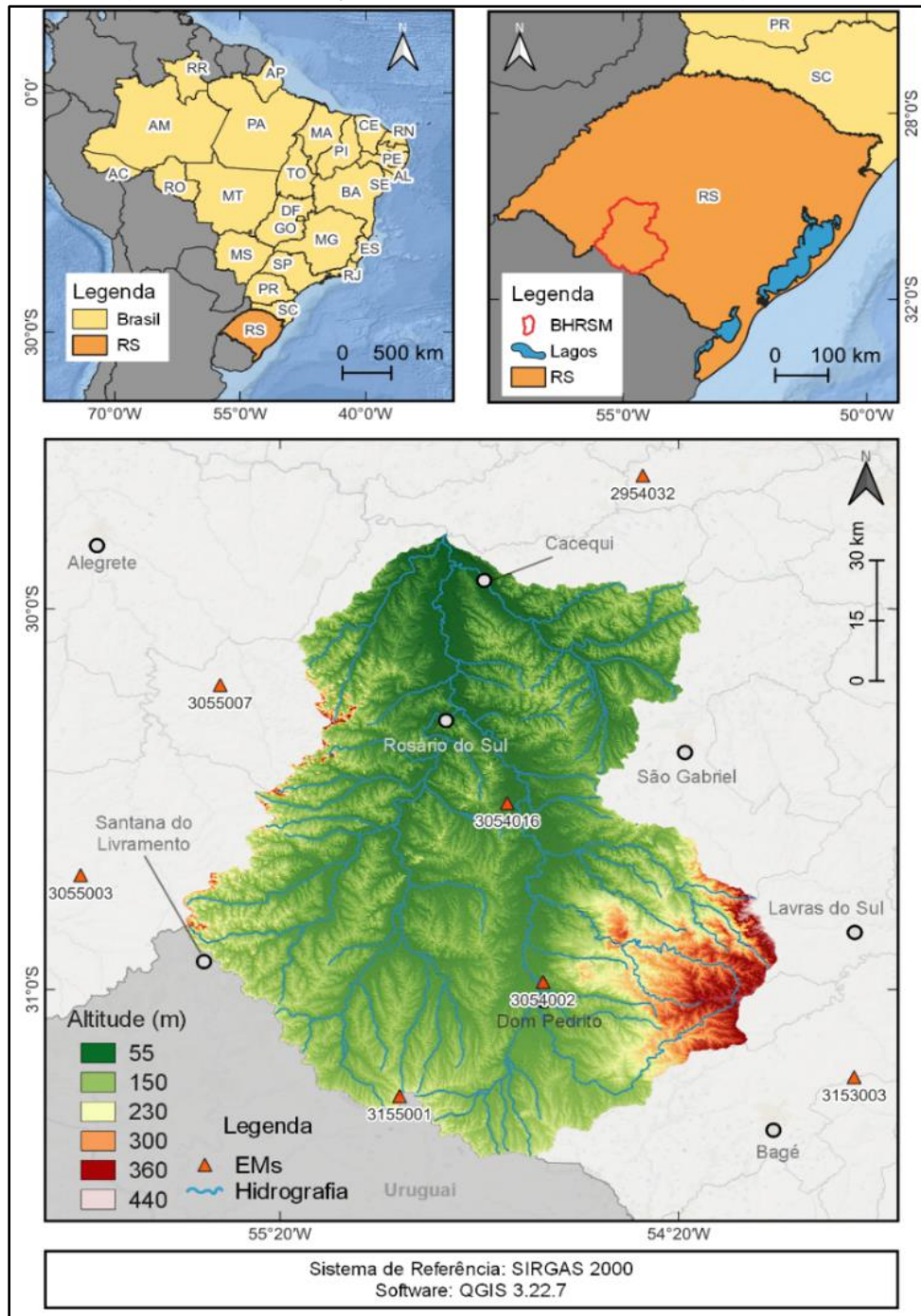
1.2.2 Objetivos específicos

- a) Identificar e espacializar as estações meteorológicas operantes na BHRSM e avaliar a distribuição espacial das mesmas;
- b) Aplicar métodos de correlação e validação estatística entre os dados CHIRPS e estações meteorológicas;
- c) Espacializar os dados de precipitação pluviométrica anual e mensal do produto CHIRPS e de estações meteorológicas do período 1986-2022.

2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A BHRSM apresenta uma área de 15.740 km² e localiza-se no sudoeste do Rio Grande do Sul entre as coordenadas geográficas 29°47' a 31°36' de latitude Sul e 54°00' a 55°32' de longitude Oeste (Figura 1).

Figura 1: Localização da BHRSM, no sudoeste gaúcho.



Fonte: Autor (2023).

Seis municípios são drenados pela BHRSM, sendo eles: Dom Pedrito (94% da área do município inserida na bacia), Rosário do Sul (70%), Cacequi (49%), Lavras do Sul (47%), São Gabriel (47%) e Santana do Livramento (44%). O mapa hipsométrico indica que as altitudes variam entre 55 e 442 metros, sendo que as menores altitudes estão relacionadas às planícies dos rios que drenam a BHRSM, e as maiores estão associadas à borda Oeste do Planalto Sul-Rio-Grandense.

As principais litologias presentes na bacia hidrográfica são rochas sedimentares da Bacia do Paraná, na região sudeste da BHRSM encontram-se rochas do Complexo Santa Maria-Chico, datadas do Proterozóico (WILDNER *et al.* 2006). Segundo Streck *et al.* (2008), os Argissolos e Planossolos predominam, porém também são encontrados Neossolos, Chernossolos, Luvisolos e Gleissolos. Quanto à geomorfologia, a área de estudo abrange três províncias geomorfológicas: Planalto da Campanha, Depressão Central Gaúcha e Planalto Sul-Rio-Grandense (IBGE, 1986).

Destaca-se a extensa pesquisa dos processos erosivos presentes na bacia hidrográfica, os quais estão especialmente associados às Formações Pirambóia e Sanga do Cabral devido à fragilidade das rochas dessas formações (ROBAINA *et al.* 2015; RADEMANN *et al.* 2018; CABRAL *et al.* 2020; PETSCH *et al.* 2022a) somada à erosividade das chuvas (PETSCH *et al.* 2022b). Essas formações se distinguem por possuírem solos bem desenvolvidos, compostos principalmente por uma textura arenosa e notável espessura, porém com teores reduzidos de argila. Essa composição tem um papel significativo na desagregação da estrutura do solo (ROBAINA *et al.* 2015; SCCOTI, 2017).

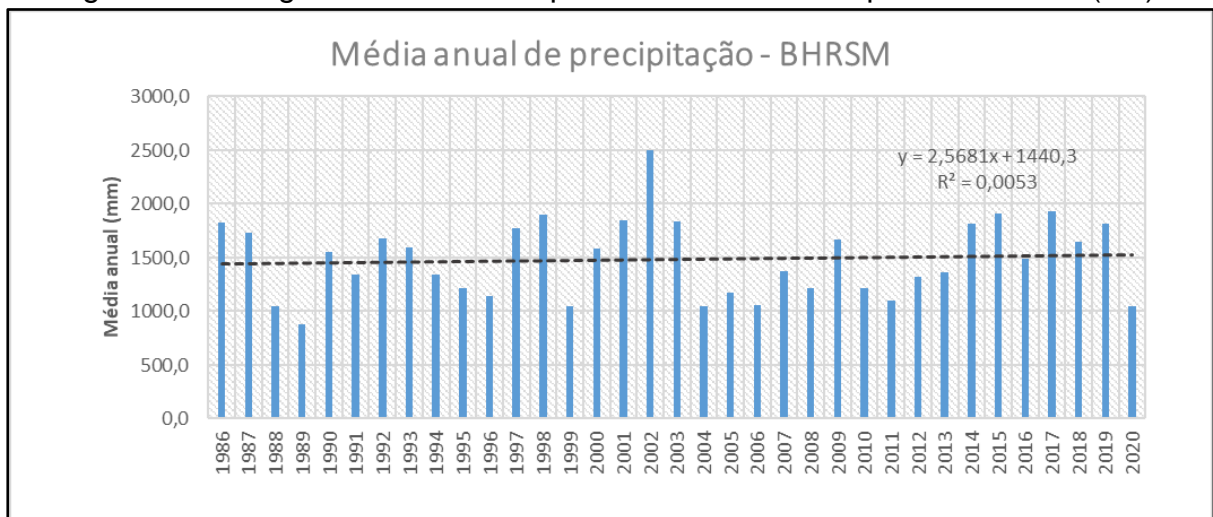
Segundo Petsch *et al.* (2022c), no que diz respeito ao uso do solo, a vegetação campestre é predominante na BHRSM, porém, apresentando redução ao longo do tempo. Em 1990, cobria 66% da bacia hidrográfica, enquanto em 2020, abrangia apenas 49%. Notavelmente, o cultivo de soja foi a atividade que mais se expandiu, apresentando 2719% de aumento de área de cultivo entre 1990 e 2020.

Segundo Rossato (2011), às tipologias climáticas referentes a área de estudo são “Subtropical I (a) - pouco úmido” com precipitações entre 1200-1500 mm/ano e com temperatura média anual de 17°C a 20°C, e “Subtropical II - medianamente úmido com variação longitudinal das temperaturas médias”, com precipitações de 1500-1700 mm/ano e temperatura média anual entre 17°C e 20°C. Destaca-se que o canal do rio

Santa Maria se encontra na área de transição entre as duas tipologias climáticas (PETSCH, AMARAL, SANCHES, 2023).

Para a BHRSM, o menor valor de precipitação média anual registrado foi de 874,6 mm no ano de 1989 e o maior foi de 2496,8 mm para o ano de 2002 (Figura 2). Quanto à precipitação média, em nove anos foi menor que 1200 mm; nove anos entre 1200-1500 mm; seis anos entre 1500-1700 mm e 11 anos maior que 1700 mm. Uma pequena tendência de aumento de precipitação para o período de 1986-2020 foi registrada.

Figura 2: Pluviograma das médias pluviométricas anuais para a BHRSM (RS).



Adaptado de Petsch, Amaral e Sanches (2023).

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 ESTUDO DO CLIMA: UMA BREVE EVOLUÇÃO HISTÓRICA

Grande parte das sociedades antigas tinham a agricultura e a caça como suas principais atividades de subsistência. Dessa forma, o modo de vida dessas sociedades era fortemente dependente das condições climáticas. A necessidade de prever como o tempo iria se comportar fez os indivíduos olharem para o alto e buscarem a identificação de padrões da natureza que indicassem as condições futuras do tempo. Após, o conhecimento empírico era passado de geração em geração, assumindo a forma de provérbios e outras figuras de linguagem que facilitavam a troca de informações (FRISINGER, 1983).

Frisinger (1983) divide a história da meteorologia em três fases: “a fase da especulação” (600 a.C. – 1600 d.C.), “o surgimento da meteorologia científica” (1600 d.C - 1800 d.C) e o “Pós 1800”. A primeira é definida como o período inicial de discussões no âmbito da meteorologia, onde pensadores e filósofos tentavam desvendar os fenômenos naturais sem o uso de evidências empíricas e/ou método científico, embora o autor defina esse recorte inicial. O segundo período definido pelo autor trata do surgimento de novos instrumentos de aquisição de dados, como termômetro e barômetro, e também o início da observação contínua e sistemática dos dados meteorológicos. No último, o fator de periodização é relacionado ao refinamento de teorias e a evolução da meteorologia como ciência, essa evolução ocorre principalmente por conta do desenvolvimento das *hard sciences*.

Embora Frisinger (1983) defina o ano 600 a.C. como início do interesse acerca dos fenômenos meteorológicos, achados arqueológicos das civilizações assírio-babilônicas evidenciam tentativas anteriores de entender e documentar esses fenômenos (GEHLKEN, 2012). Influenciados pelas teorias assírio-babilônicas, pensadores gregos dedicaram-se ao estudo do tema. Tales de Mileto (Século VII a.C) realizou estudos sobre os conceitos de solstício, equinócio e também da chuva, é notório que Tales tinha a ciência que as nuvens continham água. Anaximandro, discípulo de Tales definiu o vento como “fluxo de ar”, conceito este bastante próximo do atual. Anaxágoras (499-427 a.C. aproximadamente) empenhou-se em explicar o motivo da ocorrência de granizo no verão, sabendo que a temperatura do ar diminuía

conforme a altitude aumentava e que as nuvens continham umidade, e também da existência de correntes de convecção, deduziu que o calor de um dia de verão levaria as nuvens carregadas de umidade a altitudes onde essa umidade poderia congelar e cair de volta para na forma de granizo. Findando as contribuições pré-Aristotélicas, Eudoxos (408-355 a.C. aproximadamente) entendia que havia uma periodicidade nos fenômenos climáticos (FRISINGER, 1983).

A obra de Aristóteles, nomeada de *Meteorologica* e publicada em 4 livros na metade do século IV a.C. discorria sobre os fenômenos de furacões, trovão e relâmpago, mudanças climáticas, ventos, granizo, nuvens e neblina, e chuva. Além dos materiais escritos por Aristóteles, os volumes apresentavam produções de terceiros, dessa forma, atuando como um compêndio do conhecimento meteorológico da época (FRISINGER, 1983).

Ainda segundo Frisinger (1983), erros de concepção eram comuns a todas as produções gregas sobre conceitos e fenômenos naturais devido a falha sistêmica em se desenvolver um método científico baseado em experimentos, em parte pela falta de equipamentos precisos que era inerente à época. Embora *Meteorologica* apresentasse os mesmos problemas, foi a principal obra sobre o tema até o final do século XVII d.C. Durante esses 2.000 anos, o papel central das ideias de Aristóteles atuou como um impedimento à evolução da meteorologia como ciência, visto que as produções nesse período se dedicavam a explorar as ideias expostas na obra.

Embora alguns autores tenham desenvolvido novas ideias em relação às de Aristóteles, nenhum avanço significativo foi feito, e o rompimento do “monopólio” de *Meteorologica* iniciaria no século XIII d.C. Roger Bacon (1214-1294), conhecido como um dos principais fundadores da ciência moderna, era um ferrenho defensor do uso da matemática e da experimentação como fundamentação para os estudos científicos, incluindo a meteorologia. Em um contexto onde os estudos eram fundamentados pela autoridade que as obras da antiguidade possuíam, Bacon iniciou a onda de novos questionamentos em relação a elas.

O segundo golpe na canonicidade de Aristóteles veio com a publicação da obra *De Subtilitate* (1550) por Girolamo Cardano, embora seja evidente a influência Aristotélica, Cardano discorda de diversas teorias de Aristóteles. A publicação de *De Subtilitate* deu a largada em uma onda de questionamentos e assumiu a centralidade como obra de referência. A partir desse momento, os cientistas já não aceitavam as teorias antigas sem o devido questionamento, e também, o uso da experimentação

(FRISINGER, 1983). Em 1637, Descartes publicou seu renomado livro "Discours de la Méthode", no qual ele expôs sua filosofia do método científico, em um apêndice a esta obra, "Les Météores", Descartes aplicou os princípios do método às suas discussões sobre meteorologia.

A ênfase no método, e no uso da matemática como ferramenta para o estudo das ciências naturais foram cruciais para a definição da meteorologia como área de estudo da física. Aliado aos novos pensamentos, nos séculos XVII e XVIII d.C novos instrumentos meteorológicos como o termômetro, barômetro e hidrômetro foram desenvolvidos. O termômetro foi usado para medir a temperatura, o barômetro para medir a pressão atmosférica e o higrômetro para medir a umidade, ainda que em etapas iniciais de desenvolvimento, esses instrumentos desempenharam um papel vital no período inicial das observações meteorológicas contínuas e sistemáticas. (FRISINGER, 1983). É também nesse período que foram realizadas as primeiras observações meteorológicas nas Américas, em Recife, no Brasil (DOMÍNGUEZ-CASTRO *et al.* 2023).

O processo de industrialização e a evolução técnica do século XIX permitiu a criação de novos instrumentos e o refinamento das técnicas e dos instrumentos já existentes, da mesma forma aconteceu a evolução das teorias e do conhecimento científico. Em 1817, Alexander von Humboldt havia desenvolvido uma forma de representar a distribuição do calor sobre a superfície da Terra: linhas sobre um mapa, às quais chamou de isotermas, as linhas conectavam regiões com a mesma temperatura, sendo esse um marco para a Climatologia como área de estudo da Geografia. O desenvolvimento da meteorologia sinótica no início do século e a criação do telégrafo por Samuel Morse em 1837 estreitaram as relações e trocas de informações meteorológicas entre os Estados Unidos e o Reino Unido. Em 1849 os jornais ingleses já noticiavam a previsão do tempo (FRANGSMYR, HEILBRON, RIDER, 1990; CHARLES, 2006).

No início do século XIX, o interesse dos estudos estatísticos se direcionou em parte para os dados meteorológicos como ferramenta para a gestão do território. Em países como a Prússia, Inglaterra e Itália, escritórios oficiais do Estado passaram a utilizar dados meteorológicos para estabelecer relações entre o clima e outros indicadores. Órgãos estatais para a agricultura, saúde, agências militares e instituições científicas dedicavam seus esforços para o estudo da climatologia. (FRANGSMYR, HEILBRON, RIDER, 1990)

Ao discorrer sobre a evolução dos estudos em climatologia no século XIX e início do século XX, Charles (2006, p. 9) destaca:

Na década de 1840, Humboldt, autor de um mapa mundial de isotermas desde 1817, desenvolve a ideia de 'clima solar', expressão já elaborada na climatologia física. Hahn, Köppen e Væikov estabelecem os fundamentos da climatologia clássica. Gradualmente, as ideias sobre a circulação geral da atmosfera se aprofundam em uma visão do clima. [...] As descrições dos climas e de sua variabilidade interanual se multiplicam. Em Viena [...] inicia-se o estudo radioativo, o qual se associa, após 1920, ao estudo do crescimento das plantas. Nos anos 1930, nos Estados Unidos, as conexões entre clima e agricultura se aprofundam e, após a Segunda Guerra Mundial, analisa-se a atividade hidrológica e sua relação com o aspecto energético. (Tradução nossa) (CHARLES, 2006, p. 9).

É relevante ressaltar que Köppen, ao propor sua classificação climática e estabelecer a correlação entre o clima e outros elementos físicos, aproximou a disciplina da climatologia do campo da geografia. Anteriormente, a climatologia era predominantemente vista como uma ferramenta da meteorologia.

A primeira metade do século XX contaria com uma estreita relação da meteorologia com as forças armadas, sendo fundamental na Primeira e na Segunda Guerra Mundial. Em relação a participação de meteorologistas na Primeira Guerra Mundial, Millikan (1919 apud NEBEKER, 1995, p. 84) descreve:

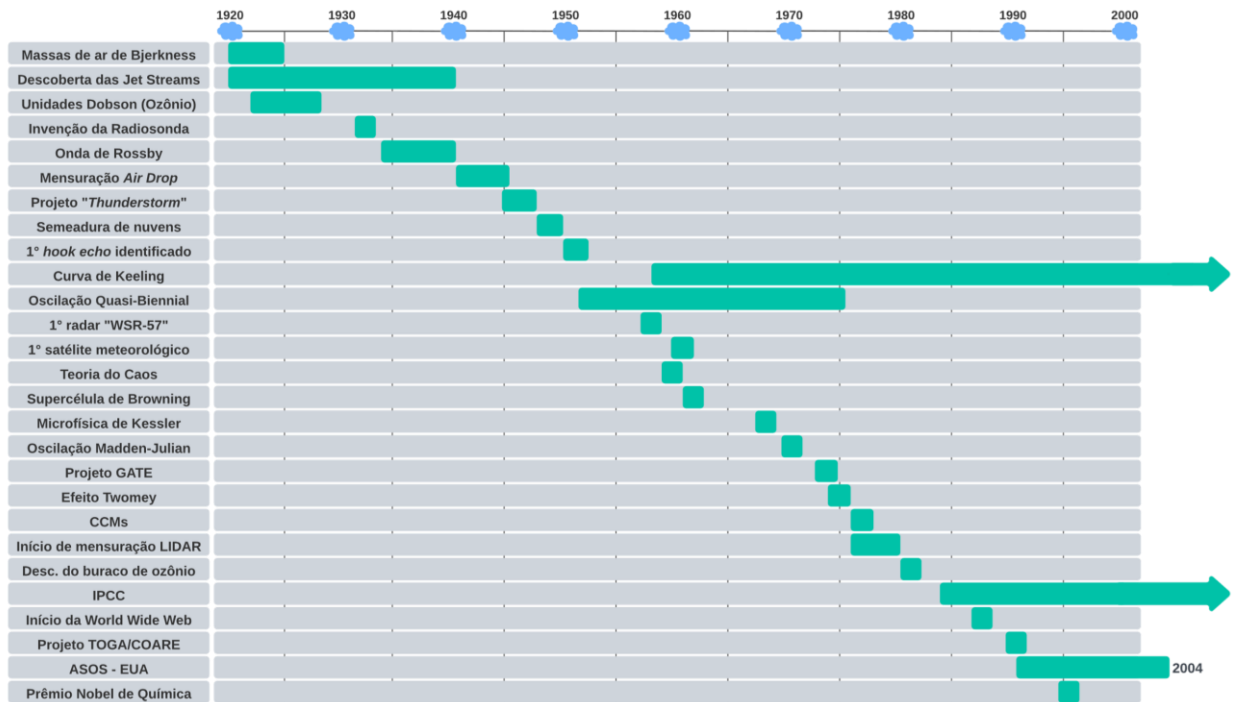
Até 1914, uma seção meteorológica não era considerada uma parte necessária do serviço militar. No final da Primeira Guerra Mundial, todos os principais participantes tinham serviços meteorológicos dentro do exército, e a quantidade e frequência de informações meteorológicas relatadas eram sem precedentes. O serviço de artilharia e aéreo do Exército dos EUA, por exemplo, recebia, a cada 2 horas, medições de temperatura, densidade, velocidade e direção do vento na superfície e em várias altitudes de até 5000m (Tradução nossa) (MILLIKAN, 1919 apud NEBEKER, 1995, p. 84).

É notável o avanço experienciado pelo campo da meteorologia no período entre guerras, até a metade da década de 1920 a meteorologia era reconhecida como disciplina acadêmica apenas na Escandinávia, Alemanha e Áustria e eram poucos os profissionais que tinham passado por uma educação formal e desempenhavam a função. O avanço da aviação e da ciência e tecnologia em geral no período entre guerras também propiciou o avanço da meteorologia como área do conhecimento, fazendo com que na Segunda Guerra Mundial todos os países do ocidente já apresentavam a meteorologia como uma disciplina acadêmica. Destaca-se também a fundamental importância durante o conflito, norteador as táticas de combate (NEBEKER, 1995).

A implementação dos primeiros computadores nas décadas de 1950 e 1960 trouxe mudanças significativas para a meteorologia e para o estudo do clima. Estabeleceu-se uma nova abordagem, utilizando análise numérica e princípios da física matemática novos trabalhos começaram a ser desenvolvidos na área da meteorologia numérica. Também, iniciou-se os estudos para previsão com o uso de computadores, resultando na consolidação da previsão numérica. Os computadores tornaram os processos de cálculo e previsão, mais rápidos e mais eficientes. (NEBEKER, 1995; BENJAMIN *et al.* 2019).

Também, nessa época a tecnologia de satélites mudaria a forma de conceber a meteorologia, com os primeiros satélites orbitando o planeta, houve o aprimoramento das capacidades de observação e monitoramento meteorológico, agora era possível obter uma visão global da atmosfera terrestre, permitindo o rastreamento dos sistemas climáticos e a observação de padrões meteorológicos. Dados como cobertura de nuvens, formação de tempestades e as condições atmosféricas atuais favorecem e aprimoraram os serviços de detecção e previsão do tempo (NEBEKER, 1995; NEVES, GALLARDO, VECCHIA, 2017; BENJAMIN *et al.* 2019). Em consonância, Stith *et al.* (2018) demonstram os primeiros avanços tecnológicos e teóricos na área de meteorologia/climatologia no século XX (Figura 3).

Figura 3: Evolução tecno-teórica na área de estudo do clima no século XX.



Adaptado de Stith *et al.* (2018)

No Brasil, o final do século XIX e o início do século XX presenciaram obras de destaque, como as de Morize, Draenert e Delgado de Carvalho, pioneiras na síntese e classificação do clima brasileiro. Esse momento marcou a transição do foco sanitário para análises mais específicas sobre a distribuição geográfica dos elementos meteorológicos e os regimes climáticos regionais (SANT'ANNA NETO, 2003).

Posteriormente, estudos de notáveis pesquisadores como Serra, Ratisbona, Sampaio Ferraz e outros enriqueceram a compreensão da circulação atmosférica na América do Sul, proporcionando avanços significativos no entendimento dos climas regionais (AB'SABER, 1979).

A partir dos anos 1960, a climatologia brasileira alcançou sua maturidade, segmentando-se em áreas específicas como Geografia, Ciências Agrônomicas e Meteorologia. Personalidades proeminentes, incluindo Linton de Barros, Edmund Nimer e Carlos Augusto de Figueiredo Monteiro, contribuíram para estabelecer um estado da arte na Climatologia Geográfica do Brasil, enfatizando a dinâmica climática e sua relação com a organização do espaço (SANT'ANNA NETO, 2003). Por fim, o surgimento do INPE na década de 70 impulsionou a meteorologia nacional com a

introdução de tecnologias avançadas, como satélites e radares, ampliando significativamente as possibilidades de estudo na área climática.

3.2 AQUISIÇÃO DE DADOS METEOROLÓGICOS: REDES DE OBSERVAÇÃO E ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS NO BRASIL

3.2.1 Redes de observação

Os sistemas de observação desempenham um papel fundamental para o estudo do clima, o tipo do sistema, o seu desenvolvimento e uso estão associados a diferentes necessidades ao longo do tempo. Além da importância da base de dados para o estudo da climatologia, a previsão do tempo é fortemente dependente de observações pontuais.

Até meados do século XVIII, as tentativas de estabelecer uma rede internacional de observadores meteorológicos não obtiveram sucesso. A primeira dessas iniciativas surgiu na Itália durante meados do século XVII, quando Ferdinando II da Toscana promoveu a prática regular de observações meteorológicas pela *Accademia del Cimento*. Equipados com termômetros, barômetros e higrômetros, observadores foram designados para várias cidades, principalmente nas regiões norte e centro do país. Com a posterior inclusão de outras cidades, como Paris, Osnabruck, Innsbruck e Varsóvia, a rede ganharia o caráter internacional (NEVES, GALLARDO, VECCHIA, 2017).

Até o século XVII, ainda não existia um método definido para conduzir as observações meteorológicas, apesar dos avanços da *Accademia del Cimento* nesse sentido, seriam complementadas somente pelo trabalho de Robert Hook, “*For the better making a history of the Weather*”¹, onde o autor lista os itens que deveriam ser observados para o registro meteorológico continuado (THE ROYAL SOCIETY ARCHIVES, 1663).

- A intensidade dos ventos;

¹ Robert Hooke, List, 'For the better making a history of the weather, I conceive it requisite to observe ...' by Robert Hooke, 07 October 1663, CLP/20/2, The Royal Society Archives, London, https://making-science.royalsociety.org/items/clp_20_2/list-for-the-better-making-a-history-of-the-weather-i-conceive-it-requisite-to-observe-by-robert-hooke, accessed on 14 November 2023

- Os graus de calor e frio no ar, observados por um termômetro;
- Os graus de aridez e umidade no ar, observados por um higrômetro;
- A pressão do ar, observada por um instrumento contendo mercúrio;
- A constituição e aparência do céu;
- Os efeitos do clima no corpo humano (resfriados, febres, etc.);
- Possíveis trovões e relâmpagos e seus efeitos no mundo natural;
- Qualquer ocorrência extraordinária nas marés.

Em 1723, observadores que haviam o treinamento e equipamentos adequados foram convidados a submeterem anualmente suas observações diárias à *The Royal Society London*. As observações incluíam a medição diária de termômetro, barômetro, direção e intensidade do vento, quantidade de chuva ou neve, e a descrição da aparência do céu. Os resultados obtidos através da rede eram publicados anualmente na revista *Philosophical Transactions*, porém, os observadores encontraram dificuldades, os instrumentos eram escassos e mesmo quando havia disponibilidade os dados não podiam ser comparados devido ao fato que os instrumentos apresentavam escalas que não eram padronizadas entre os fabricantes, as diferentes unidades de medida de cada região também agiram como empecilho. A imprecisão, a falta de confiabilidade dos instrumentos e operadores, e a falta de padronização entre escalas limitaram avanços na área no início do século XVIII.

Frisinger (1983) considera a rede de observação da *The Royal Society London* como o primeiro caso de cooperação internacional para coleta de dados meteorológicos. Outras sociedades também se destacaram no esforço para o desenvolvimento e organização de redes de observação na segunda metade do século, as de maior proeminência a serem destacadas eram *The Societas Meteorologica Palatina* e a *Société Royale de Médecine*.

Em 1776, encontrava-se em curso uma epidemia de peste bovina na França, como forma de enfrentamento a crise criou-se uma comissão de medicina que mais tarde iria se tornar a *Société Royale de Médecine*, entre as demais atribuições da instituição, estavam mapeamentos e a documentação acerca da natureza e do clima de cada cidade da França que a *Société* tinha médicos. Mais tarde, esses médicos atuariam como observadores meteorológicos para a *Société Royale de Médecine*, em 1785, 150 médicos estavam participando da rede, sendo que cerca de 50 deles observaram por mais de uma década, as operações cessaram em 1789 com o agravamento do cenário político (FRANGSMYR, HEILBRON, RIDER, 1990).

Na cidade de Mannheim – Alemanha, em 1781 era fundada a *Societas Meteorologica Palatina*, primando pela exatidão e padronização de seus instrumentos, a SMP em cooperação com universidades e mosteiros coletou dados da Europa Central, Mediterrâneo, Rússia e América do Norte, os resultados eram disponibilizados em publicação própria. A solidez e precisão da análise e coleta de dados produzidos pela rede de observações da SMP indicam os primeiros passos para uma rede de observação internacional confiável e organizada. Devido a questões próprias da organização e as crises políticas experienciadas na época, o registro dos dados aconteceu somente até 1792 (FRANGSMYR, HEILBRON, RIDER, 1990; NEVES, GALLARDO, VECCHIA, 2017).

Fora de âmbito regional, o primeiro avanço moderno em relação a cooperação entre países para a meteorologia aconteceria somente em 1853, a Conferência de Bruxelas reuniu pesquisadores de diversos países com o intuito de fortalecer os laços de colaboração por meio da troca de dados de observações meteorológicas entre os países, destacou-se a urgência da padronização de instrumentos e códigos para uma rede de observações meteorológicas internacional confiável. Em 1873, seria estabelecida a International Meteorological Organization (IMO) com o intuito de facilitar a cooperação, troca de dados e observações meteorológicas, e fornecer apoio para a padronização de instrumentos e códigos utilizados nas observações meteorológicas.

A Organização Meteorológica Mundial (OMM) sucederia a Organização Meteorológica Internacional (IMO) como o principal órgão internacional para cooperação meteorológica em 1950. Tornando-se o braço especializado das Nações Unidas (ONU), a OMM é encarregada de promover a cooperação internacional em meteorologia, climatologia, hidrologia e campos relacionados. Seus principais objetivos incluem coordenar e padronizar atividades meteorológicas em todo o mundo e facilitar o desenvolvimento de serviços meteorológicos para vários setores, incluindo aviação, agricultura e gerenciamento de desastres. A OMM atua também na instauração e manutenção de sistemas globais de observação e coleta de dados meteorológicos. Além disso, apoia iniciativas de pesquisa e capacitação para aprimorar as capacidades meteorológicas.

Ao analisar os avanços tecnológicos e teóricos da meteorologia no século XX, Benjamin *et al.* (2019) separam o período em 4 eras e propõem uma previsão para os próximos 30 anos. A seguinte adaptação (Quadro 1), mostra a evolução dos métodos

de observação e a mudança das entidades responsáveis pela observação meteorológica.

Quadro 1: Evolução e previsão dos métodos e redes de observação.

Período	Métodos de Observação	Responsável pela previsão
Era 1: 1919–39	Observações principalmente na superfície; praticamente nenhuma observação em tempo real acima da superfície, exceto por algumas sondagens de aeronaves.	Agências governamentais foram dominantes na comunidade inicial de fornecedores de previsão do tempo.
Era 2: 1939–56	Rawinsondas habilitadas por transmissão de rádio; radar desenvolvido, mas ainda não disponível amplamente.	Cooperação governo-militar; departamentos universitários formados; setor privado emerge; comunidade internacional de agências nacionais.
Era 3: 1956–85	A introdução de satélites meteorológicos - imagens para previsões de curto prazo e resgates para NWP; rede de radares nos Estados Unidos.	A comunidade meteorológica internacional cresce (GARP; WMO) para observações e previsões; serviços meteorológicos nacionais se modernizam.
Era 4: 1985–2018	Maior cobertura por satélite, especialmente para micro-ondas e GNSS, e para satélites geoestacionários; DA de radiação; aumento de dados de radar na maioria dos países, incluindo a velocidade do Doppler; dados automatizados de aeronaves comerciais adicionados nos últimos anos.	O papel (da meteorologia) aumenta com uma consciência ambiental geral mais forte; os meteorologistas se tornam mais comunicativos à medida que a NWP amadurece; o setor privado de meteorologistas se fortalece com a colaboração pública e acadêmica rumo a uma "empresa global de previsão do tempo".
Próximos 30 anos	Uma rede de observação integrada e economicamente viável atenderá às demandas de previsão contínua e usará cada vez mais fontes tradicionais e novas de observações da atmosfera, oceano, terra, criosfera e biosfera para uma previsão do tempo/clima sem interrupções.	Amadurecimento da GWE com papéis mais fortes de componentes públicos, privados e acadêmicos e inter coordenação; a WMO continuará coordenando, divulgando e implementando inovações NEWP desenvolvidas por serviços nacionais para beneficiar todas as nações.

Adaptado de Benjamin *et al.* (2019).

3.2.2 Estações e observações meteorológicas no Brasil

A primeira observação meteorológica sistemática nas Américas e no Brasil foi estabelecida em 1639 pelo naturalista alemão Georg Marcgraf na cidade de Recife. Macgraf realizou os primeiros registros sistemáticos acerca das condições climáticas, dados como precipitação, direção do vento, nevoeiros, raios e trovões foram registrados de forma diária no período de 1640-1642. As atividades de observação foram viabilizadas pelo apoio financeiro e interesse científico de Maurício de Nassau, o que permitiu o desenvolvimento e uso de ciência de ponta em uma localização distante dos centros de conhecimento na Europa (DOMÍNGUEZ-CASTRO *et al.* 2023).

Posteriormente, a criação do Observatório Imperial do Rio de Janeiro em 1827 (embora as atividades meteorológicas tenham começado apenas em 1851), marca o primeiro passo em direção a instauração de uma rede de observações organizada no país. Esse período inicial foi marcado por um desenvolvimento lento das observações meteorológicas no país, com registros limitados e pouca organização em termos de serviços meteorológicos, esses, se consolidaram somente no final do século.

Segundo Neiva (1988), navios em campanha ao longo da costa brasileira já realizavam observações meteorológicas desde 1862. Porém, somente em 1888 foi criado o Departamento Meteorológico Central. A partir de 1886, o Departamento Geral de Telégrafos também começou a instalar estações de observação meteorológica no território nacional. No final do século, era evidente a necessidade de organização e integração entre os diferentes órgãos, esse cenário levaria a uma competição entre o Ministério da Defesa e o Observatório Nacional pela liderança no processo de unificação da coleta e organização dos dados. Culminando na criação do Departamento de Meteorologia e Astronomia no Observatório Nacional, no entanto, somente em 1921 houve a separação do Instituto Astronômico e Meteorológico, com a criação da Diretoria de Meteorologia que daria origem ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

De acordo com o Relatório do Ministro de Estado da Agricultura, Indústria e Comércio em 1917, no ano de 1916 o Brasil possuía 222 estações meteorológicas (Ministério da Agricultura, 1917). No inventário (Tabela 1) das estações meteorológicas de 1916, incluíam-se também estações "gratuitas", mantidas por observadores voluntários. Das 222 estações, 116 eram custeadas pela União,

representando a maior parte do financiamento, enquanto 86 eram subsidiadas pelos estados, com o auxílio da União, e 20 eram gratuitas. O estado com o maior número de estações foi o Rio Grande do Sul, totalizando 35, sendo a maioria (34) mantida pelo estado e apenas uma pela União. Em Minas Gerais, havia 32 estações; São Paulo, 27; Rio de Janeiro, 24; e Santa Catarina, 14. Esses dados evidenciam a concentração de estações meteorológicas nas regiões Sul e Sudeste do Brasil.

Tabela 1: Estações meteorológicas por estado do Brasil no ano de 1916.

Estações meteorológicas existentes em 1916				
ESTADOS ²	CUSTEADAS PELA UNIÃO	CUSTEADAS PELOS ESTADOS SUBVENCIONADAS PELA UNIÃO	GRATUITAS	TOTAL
Território do Acre	1	-	-	1
Amazonas	9	-	1	10
Pará	3	-	-	3
Maranhão	7	-	-	7
Piauí	-	-	-	-
Ceará	7	-	-	7
Rio Grande do Norte	4	-	-	4
Paraíba do Norte	3	-	-	3
Pernambuco	7	-	2	9
Alagoas	2	-	1	3
Sergipe	1	-	-	1
Bahia	8	-	-	8
Espírito Santo	2	-	-	2
Rio de Janeiro	19	-	5	24
Distrito Federal	4	-	9	13
São Paulo	6	20	1	27

² Na organização político-administrativa da época; A grafia do nome dos estados foi atualizada.

Paraná	4	-	-	4
Santa Catarina	13	-	1	14
Rio Grande do Sul	1	34	-	35
Minas Gerais	-	32	-	32
Goiás	9	-	-	9
Mato Grosso	6	-	-	6
Total	116	86	20	222

Fonte: Ministério da Agricultura (1917)

Durante a Segunda Guerra Mundial, a Meteorologia ganhou importância estratégica, impulsionando o desenvolvimento de métodos de previsão do tempo e avanços na área em vários países, incluindo o Brasil. O período do pós-guerra seria marcado pelo investimento no desenvolvimento teórico e instrumental na área em vários países.

Nos anos 1950, o Brasil já contava com aproximadamente 150 estações meteorológicas, impulsionadas pelo avanço das telecomunicações e pela crescente integração internacional na esfera da Meteorologia. Contudo, essa rede logo se expandiu para atender às crescentes demandas oriundas do setor agrícola, da aviação e das preocupações ambientais. Essa expansão foi um reflexo do reconhecimento da importância crítica da Meteorologia para diversas áreas (INMET, 2011).

Os anos subsequentes foram marcados por passos significativos na evolução teórico-científica da Meteorologia no Brasil. Em 1958, foi estabelecida a Sociedade Brasileira de Meteorologia, evidenciando um esforço para unir e promover o campo no país. Além disso, em 1964, a Universidade Federal do Rio de Janeiro inaugurou o primeiro curso de graduação em Meteorologia no Brasil, proporcionando uma base educacional crucial para a expansão e aprofundamento do conhecimento nessa área.

Em 2011, a Rede Nacional de Observações Meteorológicas do Inmet, sendo a principal rede de observações do país e abarcando o maior número de estações, mantinha aproximadamente 900 estações de superfície, empregando instalações convencionais e automáticas para coleta de dados essenciais à compreensão e previsão dos fenômenos meteorológicos no território brasileiro (INMET, 2011).

3.3 CHIRPS

O CHIRPS é um conjunto de dados de precipitação com escala quase global (50°S - 50°N) e resolução espacial de 0,05° (FUNK *et al.* 2015), desenvolvido pelo *Climate Hazards Group - University of California*, Santa Barbara (UCSB) e pelo *United States Geological Survey (USGS)*. As precipitações estimadas pelo produto CHIRPS são baseadas em diversas fontes de informações (FUNK *et al.* 2015), como:

- *The Climate Hazards Group's Precipitation Climatology (CHPClim)*;
- Observações de satélites com espectroscopia de infravermelho termal (Thermal Infrared, TIR), geoestacionárias da *National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)*, Centro de Previsão Climática (CPC) e o *National Climatic Data Center (NCDC)*;
- Campos de Precipitação do *Coupled Forecast System* da NOAA, versão 2 (CFSv2);
- Diversas observações de precipitação através de produtos de estações meteorológicas e outros serviços regionais.

A disponibilidade dos dados corresponde ao período de 1981 até os dias atuais, e pode ser acessado em forma de conjuntos diários, em pântadas e mensais. A principal diferença da base de dados do CHIRPS em relação às outras existentes é a alta resolução dos dados disponíveis, já que a maioria dos conjuntos de dados de precipitação global disponíveis tem uma resolução de 0,5° ou inferior (TAPIADOR *et al.* 2012; KATSANOS, RETALIS e MICHAELIDES, 2016).

Para o Brasil foram encontrados alguns trabalhos que realizaram a validação dos dados obtidos com o CHIRPS, com base nas EM. O Quadro 2 resume alguns dos principais resultados obtidos por estes estudos, assim como a área de estudo. Conforme exposto anteriormente, não foram encontrados estudos para o Rio Grande do Sul.

Quadro 2: Demais validações e utilizações do CHIRPS no Brasil.

Fonte	Área de estudo	Principais resultados
Paredes-Trejo,	Nordeste	Os dados CHIRPS correlacionam-se bem

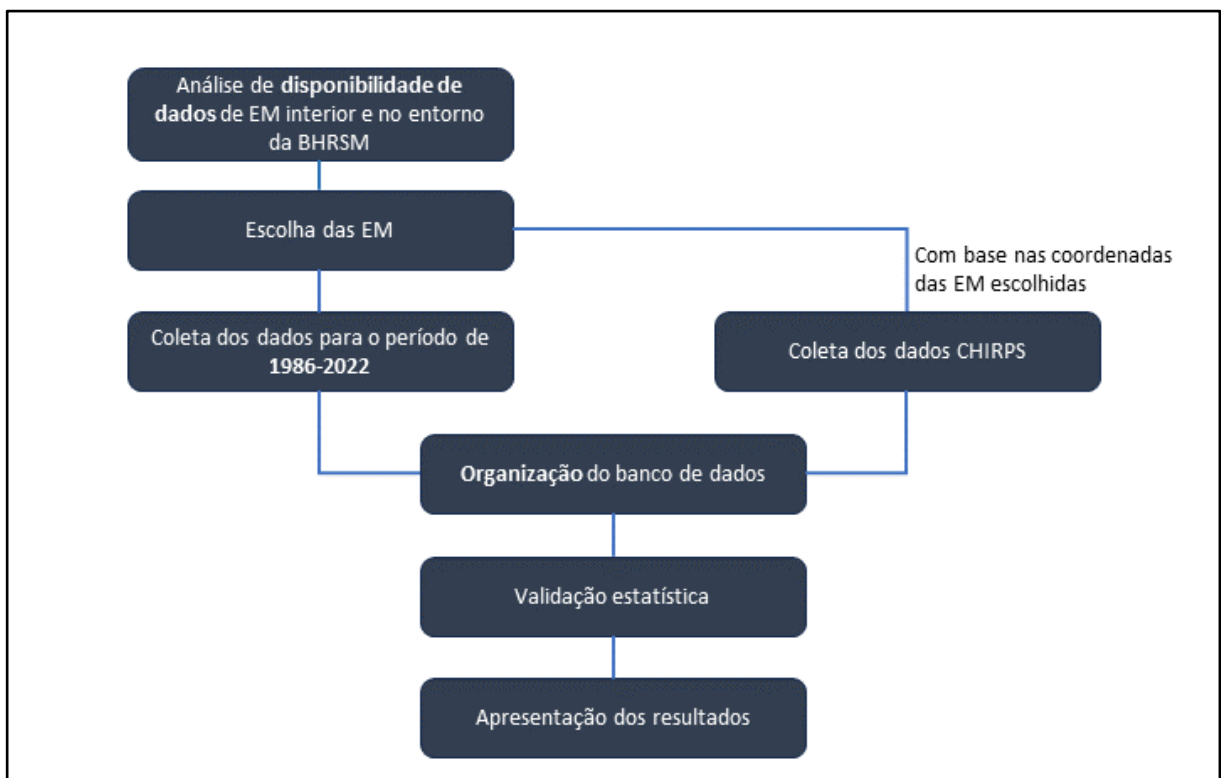
Barbosa e Lakshmi (2017)	brasileiro	com as observações para todas as estações ($r = 0,94$), mas tendem a superestimar os valores baixos e subestimar os valores elevados de precipitação (>100 mm/mês).
Nogueira, Moreira e Volpato (2018)	Região sul-sudeste do estado de Minas Gerais	Os dados de precipitação obtidos com o CHIRPS foram eficientes na determinação dos componentes avaliados e mostraram-se uma alternativa aos dados de precipitação de EM.
Paca <i>et al.</i> (2020)	Bacia hidrográfica do rio Amazonas	A validação cruzada foi realizada utilizando 98 estações <i>in situ</i> com mais de 20 anos de dados registrados, obtendo um R^2 de 0,981, uma inclinação de 1,027 e um erro quadrático médio de 363,6 mm/ano.
Costa <i>et al.</i> (2021)	Brasil	Os resultados obtidos apontam para uma alta determinação entre os dados CHIRPS e EM para todas as regiões políticas brasileiras (95,4%). Os autores apontam que onde houve a maior diferença entre os dados CHIRPS e as EM foi no noroeste do estado do Amazonas e o sudoeste do Pará.
Brito et al (2021)	Bacia hidrográfica do rio Piranhas, nordeste do Brasil	Os resultados mostraram que os dados CHIRPS apresentaram desempenho aceitável na identificação de secas meteorológicas para a bacia hidrográfica.
Mu, Biggs e Shen (2021)	Rondônia	Os dados CHIRPS subestimam a alta precipitação mensal na estação chuvosa e superestimam a baixa precipitação mensal durante a estação seca.

Organizado pelo autor (2023)

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa é de cunho quantitativo e o período abrangido pelos dados é de 1986 a 2022. O *software* QGIS 3.22.7 foi utilizado para realizar a espacialização dos dados de precipitação. A figura 4 resume o fluxograma metodológico, que será detalhado nas próximas seções.

Figura 4: Fluxograma da metodologia empregada para validação dos dados de precipitação anual e mensal do CHIRPS.



Fonte: Autor (2023).

4.1 INVENTÁRIO E ANÁLISE ESPACIAL DE ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS

Os dados referentes à localização e operacionalidade das EM foram obtidos por meio do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos – SNIRH. Para definir o *buffer* para a área de cobertura para cada EM seguiu-se os valores estabelecidos pela Organização Mundial de Meteorologia (WMO, 1994). Dessa forma, o *buffer* foi estabelecido em 13,5 km.

4.1.1 Dados pluviométricos de estações meteorológicas convencionais

Os dados de precipitação pluviométrica diária foram coletados em sete EM convencionais obtidas pelo *site* Hidroweb da Agência Nacional das Águas e posteriormente organizados em escala mensal e anual. As EM foram escolhidas para o estudo com base em dois critérios: um primeiro que se refere à escala temporal, sendo necessário no mínimo 30 anos de atividade; um segundo quanto à espacialidade, para ter cobertura de dados em todas as regiões da BHRSM. Dessa forma, foram selecionadas sete EM para o estudo (Quadro 3).

Quadro 3 – Informações sobre as EM utilizadas na pesquisa.

Código	Nome	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (m)	Posição	Localização em relação a BHRSM
3155001	Três Vendas	-31,28	-55,04	210	Interior da BHRSM	Sul
2954032	Ponte Toropi II	-29,65	-54,43	128	Exterior da BHRSM	Norte
3054002	Dom Pedrito	-30,98	-54,68	136	Interior da BHRSM	Sul
3054016	Granja Umbu	-30,51	-54,77	115	Interior da BHRSM	Central
3055003	Fazenda Encerra	-30,70	-55,84	268	Exterior da BHRSM	Central
3055007	São Carlos	-30,20	-55,49	141	Exterior da BHRSM	Norte
3153003	Paraíso	-31,23	-53,90	331	Exterior da BHRSM	Sul

Fonte: Hidroweb

Todas as EM selecionadas são operadas pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM). Salienta-se que EM fora do limite da BHRSM foram inseridas na pesquisa, visto que realizam um papel fundamental para a interpolação dos dados de precipitação e garantem a qualidade dos dados nas porções limítrofes

da área de estudo (VIVIANI e MANZATO, 2005). Os dados foram organizados no *software Excel*.

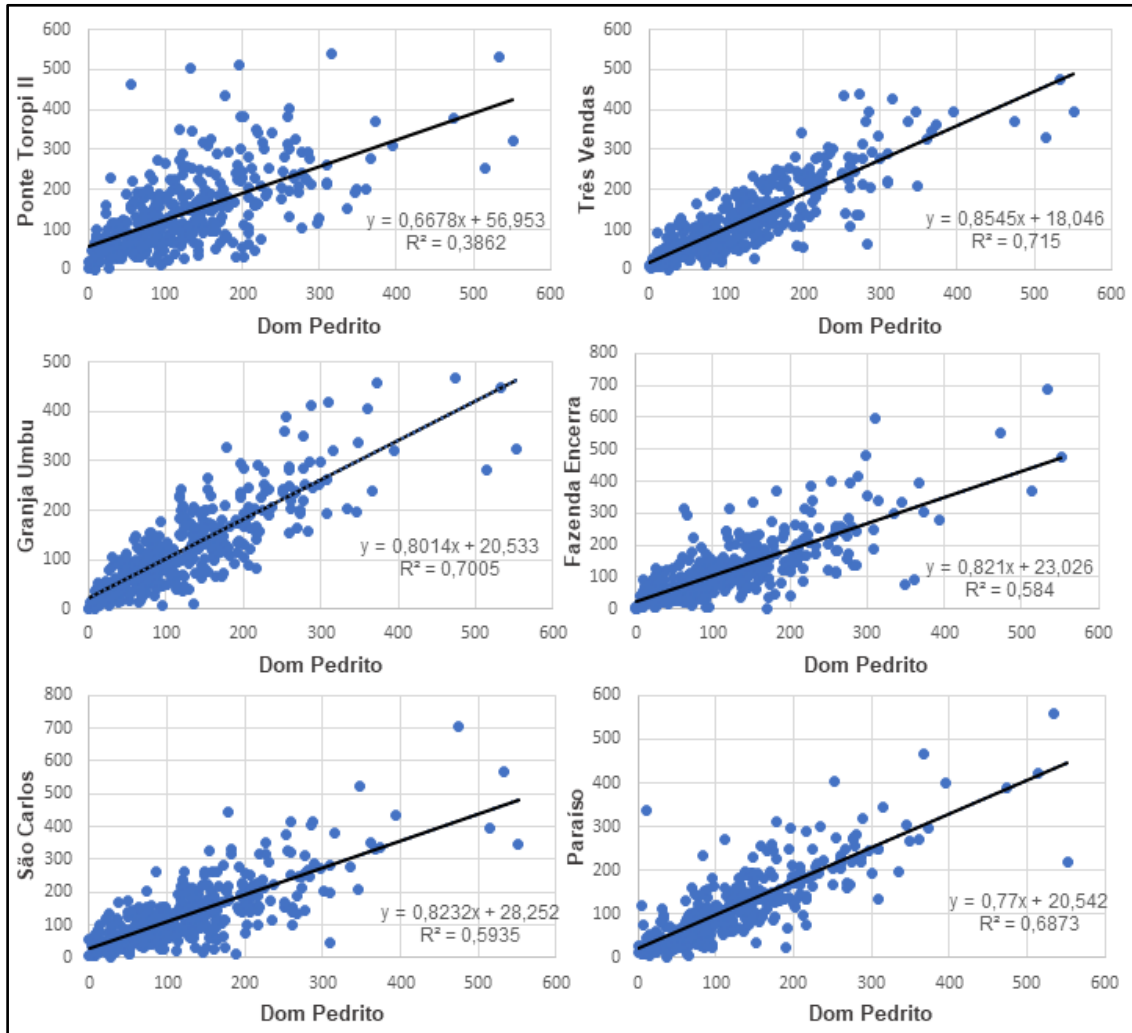
4.1.2 Preenchimento de falhas

Os dados de precipitação pluviométrica provenientes das EM apresentam períodos sem dados, portanto, realizou-se o preenchimento de falhas utilizando a técnica de Regressão Linear Simples (Equação 1) onde y é o valor da falha a ser preenchida (variável dependente), x é o valor do posto/estação vizinha, α é o coeficiente angular da reta de regressão e β o coeficiente linear da reta.

$$y = \alpha x + \beta \quad (\text{Equação 1})$$

O coeficiente de determinação (R^2) foi adotado para avaliar a qualidade da dispersão dos conjuntos de dados utilizados na regressão. A estação de Dom Pedrito foi utilizada diante de sua menor ausência de dados. Os valores de R^2 (Figura 5) obtidos foram 0,71; 0,38; 0,70; 0,58; 0,59 e 0,68, respectivamente, para as estações de Três Vendas (Três Vendas), Ponte Toropi II (Três Vendas), Granja Umbu (Granja Umbu), Fazenda Encerra (Fazenda Encerra), São Carlos (São Carlos) e Paraíso (Paraíso).

Figura 5: Gráficos de correlação entre os dados das estações meteorológicas utilizadas, suas equações de regressão e seus coeficientes de determinação (R^2).



Fonte: Autor (2023).

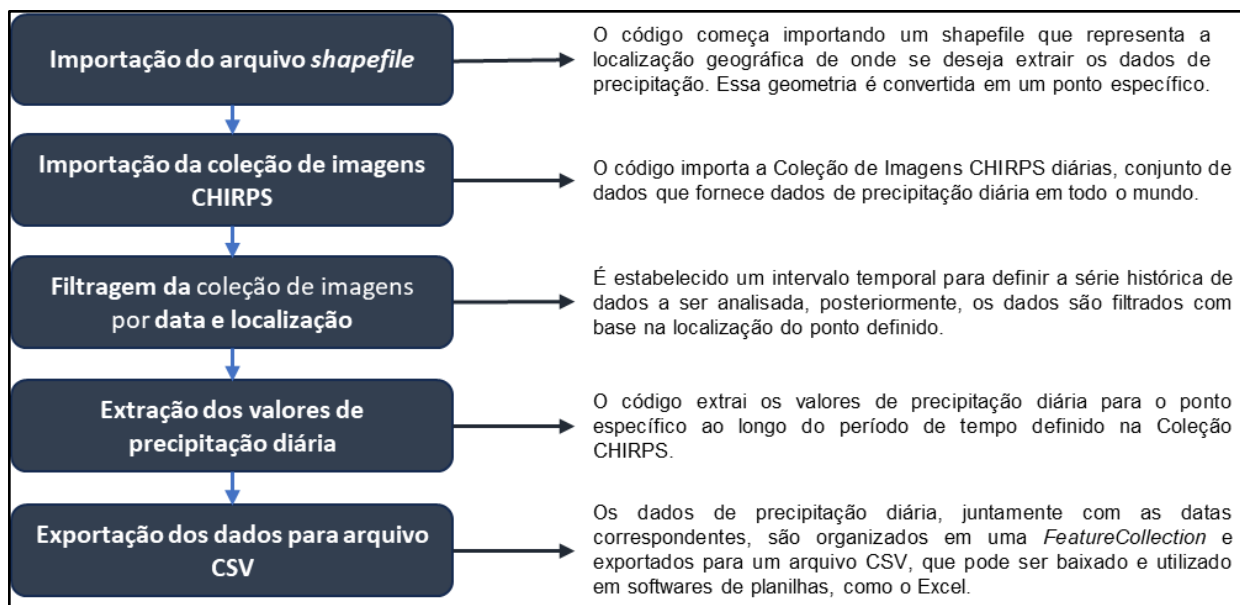
4.2 DADOS PLUVIOMÉTRICOS DE REANÁLISE - PRODUTO CHIRPS

Para essa pesquisa, os dados foram coletados por meio da plataforma *Google Earth Engine* utilizando a linguagem *Javascript*. Na plataforma, a informação é gerada no formato *raster* para toda área, portanto, para a validação dos dados, o código foi produzido de forma a possibilitar a extração dos dados do *pixel* referente às coordenadas geográficas de cada uma das sete EM.

Nesse código específico, são importados e processados dados de imagens de precipitação (CHIRPS Daily) da plataforma GEE. O código seleciona um ponto específico (indicado pelo usuário com arquivo *shapefile*), extrai os valores diários de precipitação para esse ponto ao longo de um intervalo de tempo (indicado pelo usuário), gera o gráfico de precipitação diária e exporta os dados para um arquivo

CSV (Figura 6). O *software* Excel foi utilizado para a organização e tratamento dos dados.

Figura 6: Hierarquia de processos no código para a extração de dados CHIRPS no GEE.



Fonte: Autor (2023).

Além do método utilizado neste trabalho, os dados do CHIRPS também estão disponibilizados diretamente no site da UCSB (<ftp://ftp.chg.ucsb.edu/pub/org/chg/products/CHIRPS-2.0/>).

4.3 PROCEDIMENTOS ESTATÍSTICOS DE VALIDAÇÃO

A validação dos dados CHIRPS foi realizada a partir de métodos estatísticos, com base nos dados obtidos com as EM, conforme realizado por outros autores (PAREDES-TREJO, BARBOSA e LAKSHMI, 2017; CERÓN, CARPIO-MOLINA, RIVERA, 2020; PACA *et al.* 2020; COSTA *et al.* 2021). Diante disso, foram empregadas as abordagens metodológicas do Coeficiente de Determinação (R^2), Erro Médio Absoluto (EMA), Erro Relativo Médio (ERM) e Raiz do Erro Quadrático Médio (REQM) de acordo com Spiegel (1993), Ventura *et al.* (2016), Junqueira *et al.* (2018) e Quina *et al.* (2020), respectivamente.

O Coeficiente de Determinação, representado pela Equação 2, é uma medida estatística que expressa a relação entre a variação explicada pelo modelo de regressão e a variação total dos dados. Seu valor varia entre 0 (zero) e 1 (um). Quanto mais próximo de 1, indica um ajuste melhor e mais explicativo do modelo em relação aos dados observados, assim, apresentando maior associação entre os dois conjuntos.

Na equação, "n" representa o número de observações no conjunto de dados. Os termos "xi" e "yi" correspondem aos valores individuais das duas variáveis, enquanto "x̄" e "ȳ" representam as médias das variáveis "x" e "y", respectivamente.

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \underline{x}) (y_i - \underline{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \underline{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \underline{y})^2}} \right)^2 \quad (\text{Equação 2})$$

O Erro Médio Absoluto, expresso pela Equação 3, reflete a discrepância entre os dados observados e os dados CHIRPS, sugerindo que quanto menor for o valor do EMA, mais aproximados estão os valores CHIRPS em relação aos valores observados.

$$EMA = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \tilde{x}) \quad (\text{Equação 3})$$

Na Equação 3, **n** consiste no número de amostras, **xi** o valor do produto CHIRPS e \tilde{x} a média dos valores de todas as amostras (dados observados).

O Erro Relativo Médio, conforme definido na Equação 4, quantifica a média da magnitude dos erros estimados, idealmente se aproximando de zero (0). Nessa equação, **n** representa o número de amostras, **xi** é o valor CHIRPS para a iésima

amostra, \bar{x} é a média dos valores CHIRPS e \hat{x}_i é o valor obtido a partir dos dados observados, correspondente à i -ésima amostra.

$$ERM = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - \hat{x}_i|}{\sum_{i=1}^n |x_i - \underline{x}|} \quad (\text{Equação 4})$$

A Raiz do Erro Quadrático Médio, representada pela Equação 5, avalia a dispersão dos dados CHIRPS em relação aos dados observados. Nessa equação, n denota o número de amostras, x_i é o valor atribuído pelo produto CHIRPS e \bar{x} é a média dos valores obtidos a partir das amostras dos dados observados. Quanto mais próximo de zero, melhor ajustado está o modelo em relação ao dado observado.

$$REQM = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \underline{x})^2} \quad (\text{Equação 5})$$

4.4 ESPACIALIZAÇÃO E APRESENTAÇÃO DOS DADOS EM MAPAS

Os dados foram exportados do Excel no formato CSV e inseridos no formato de tabela no *software* QGIS 3.22.7. Em seguida, a tabela foi unida ao *shapefile* referente aos pontos da EM, por conseguinte, os dados de precipitação foram agregados à tabela de atributos. Em seguida, a espacialização dos dados de precipitação foi realizada usando o interpolador *Inverse Distance Weighting* (IDW). Este interpolador foi usado com êxito por outros autores (COSTA *et al.* 2021; TAVARES e SANTOS, 2022).

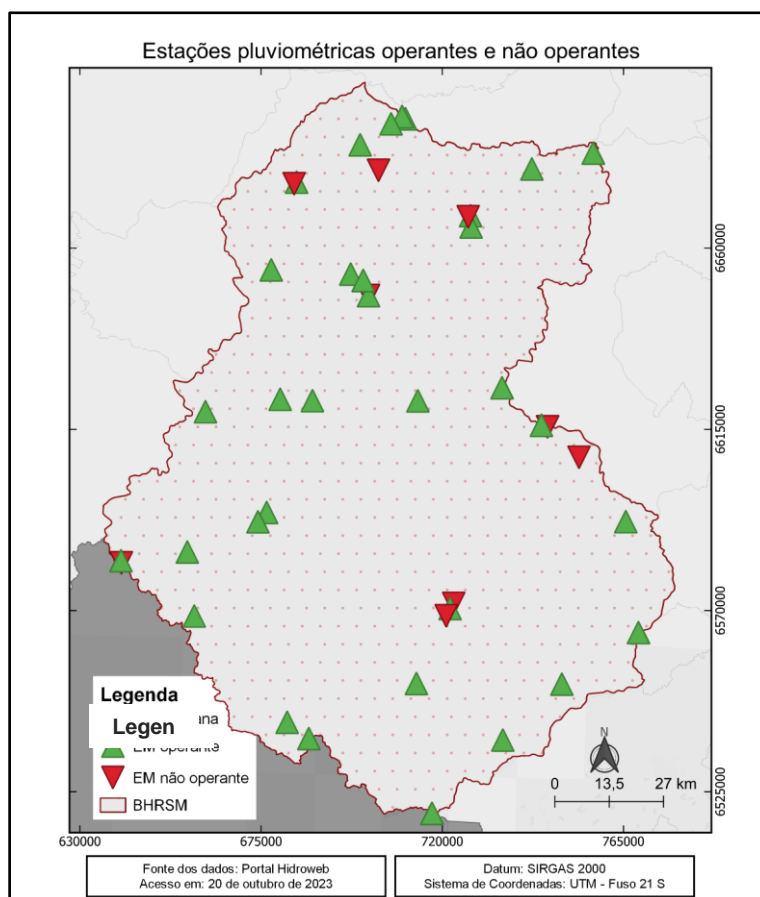
5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo se destina a apresentação dos dados referentes a estatística aplicada e os mapas de espacialização da precipitação, além das discussões.

5.1 COBERTURA ESPACIAL DA REDE DE ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS

A área total abrangida pela BHRSM conta com 44 EM pluviométricas (Figura 7), sendo que 35 dessas estações estão em operação, e nove não estão registrando dados³. As EM que não estão em funcionamento localizam-se próximas a EM operantes, e dessa forma não imprimem perdas significativas à cobertura final.

Figura 7: Estações pluviométricas por situação de operação.



Fonte: Autor (2023).

³ Em outubro de 2023.

As 35 estações meteorológicas em operação atualmente apresentam diferentes períodos de aquisição de dados. Com base na data inicial de registro de precipitação pluviométrica, realizou-se o inventário dos períodos apresentados, representando a evolução da coleta de dados na BHRSM (Tabela 2).

Até o início de 1920, uma única estação meteorológica estava ativa. No intervalo temporal de 1921 a 1940, uma EM iniciou suas operações de coleta de dados. A partir da década de 1940 (1941-1960), observou-se um aumento importante, quatro estações meteorológicas ingressaram no registro. No período subsequente de 1961 a 1980, mais quatro EM começaram a operar.

No período de 1981 a 2000 também foi registrado o ingresso de quatro estações. A partir de 2001 até 2010, apenas uma EM iniciou o registro de dados, representando uma redução na taxa de instalação de novas estações. No entanto, a última década analisada, de 2011 a 2020, apresentou um aumento substancial, com o registro de quinze novas estações meteorológicas. Salienta-se que cinco EM não continham as informações do primeiro registro de dados.

Os períodos analisados evidenciam uma variação significativa na distribuição temporal das estações meteorológicas ao longo do tempo, com uma concentração maior de registros nas duas últimas décadas. Essa concentração pode ser interpretada como um reflexo dos avanços tecnológicos e do aumento no interesse por dados meteorológicos. Em relação ao tipo de EM, os dados revelam que, das 35 estações analisadas, seis foram identificadas como estações automáticas, 19 como estações telemétricas e 10 não dispõem de informações que permitam sua categorização.

Tabela 2: Período de início da coleta de dados de precipitação pluviométrica.

Coleta Inicial	Nº de Estação
Sem informação	5
1900-1920	1
1921-1940	1
1941-1960	4
1961-1980	4
1981-2000	4
2001-2010	1

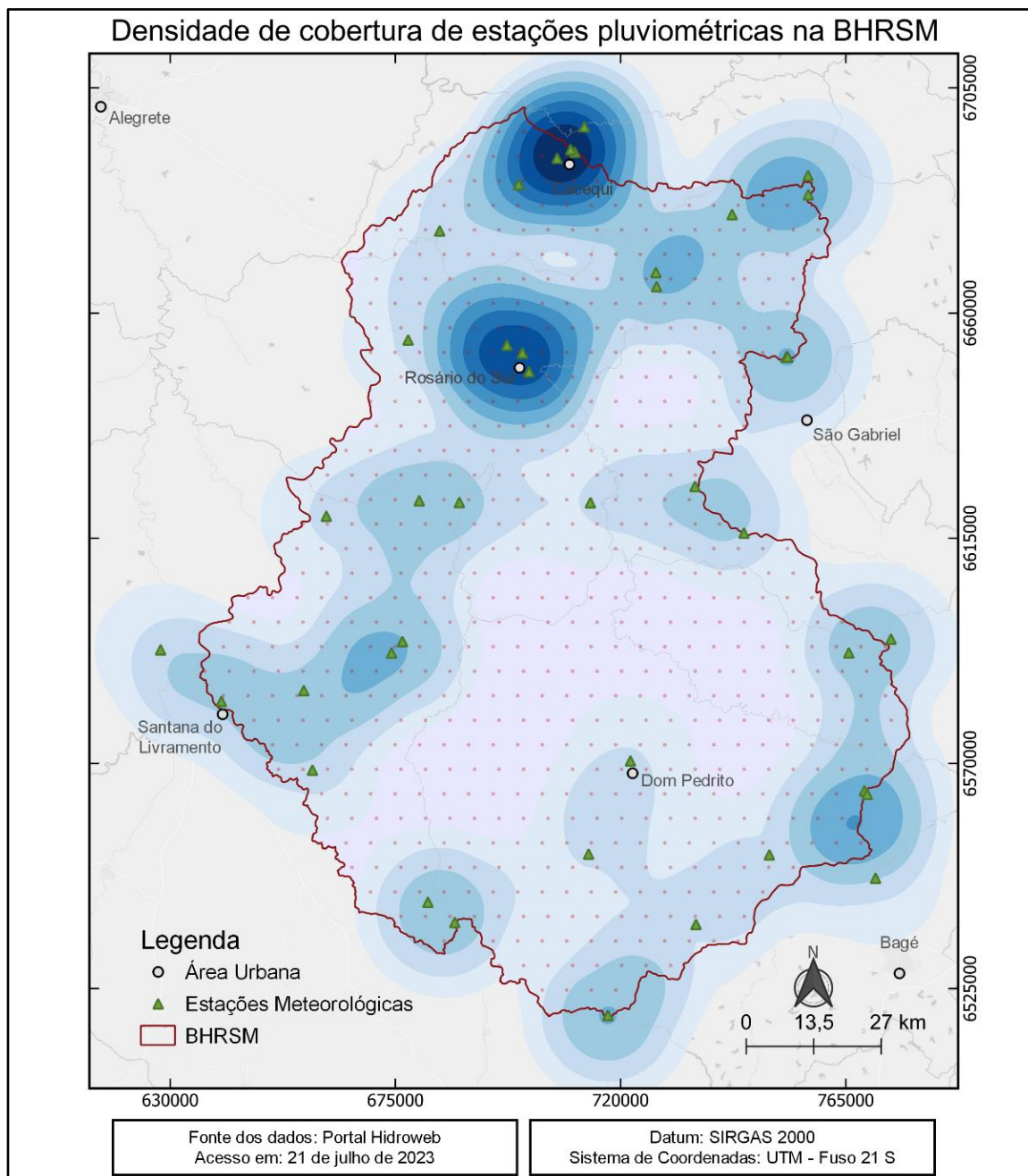
2011-2020	15
TOTAL	35

Fonte: Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos – SNIRH

Com respeito à responsabilidade pelas EM localizadas na BHRSM, a Secretaria Estadual do Meio Ambiente (SEMA/RS) é responsável por um total de 15 estações meteorológicas. Logo em seguida, a Agência Nacional das Águas (ANA) com 13 estações. A Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) mantém a operação de quatro estações meteorológicas, enquanto o Departamento Estadual de Portos, Rios e Canais/Superintendência de Portos e Hidrovias - DEPRC/SPH é responsável por duas estações. Por fim, o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) opera uma estação meteorológica na BHRSM.

Especialmente, as EM se concentram contíguas às principais áreas urbanas da bacia hidrográfica. As regiões próximas a Cacequi (e foz do rio Santa Maria), Rosário do Sul e Santana do Livramento são as áreas com maiores concentrações (Figura 8). Portanto, a porção norte da BHRSM é onde se encontra o maior número de EM, nota-se também um padrão de EM instaladas nos limites da bacia hidrográfica. Em contrapartida, grande parte da área central se encontra desguarnecida.

Figura 8: Densidade de cobertura espacial de EM na BHRSM.

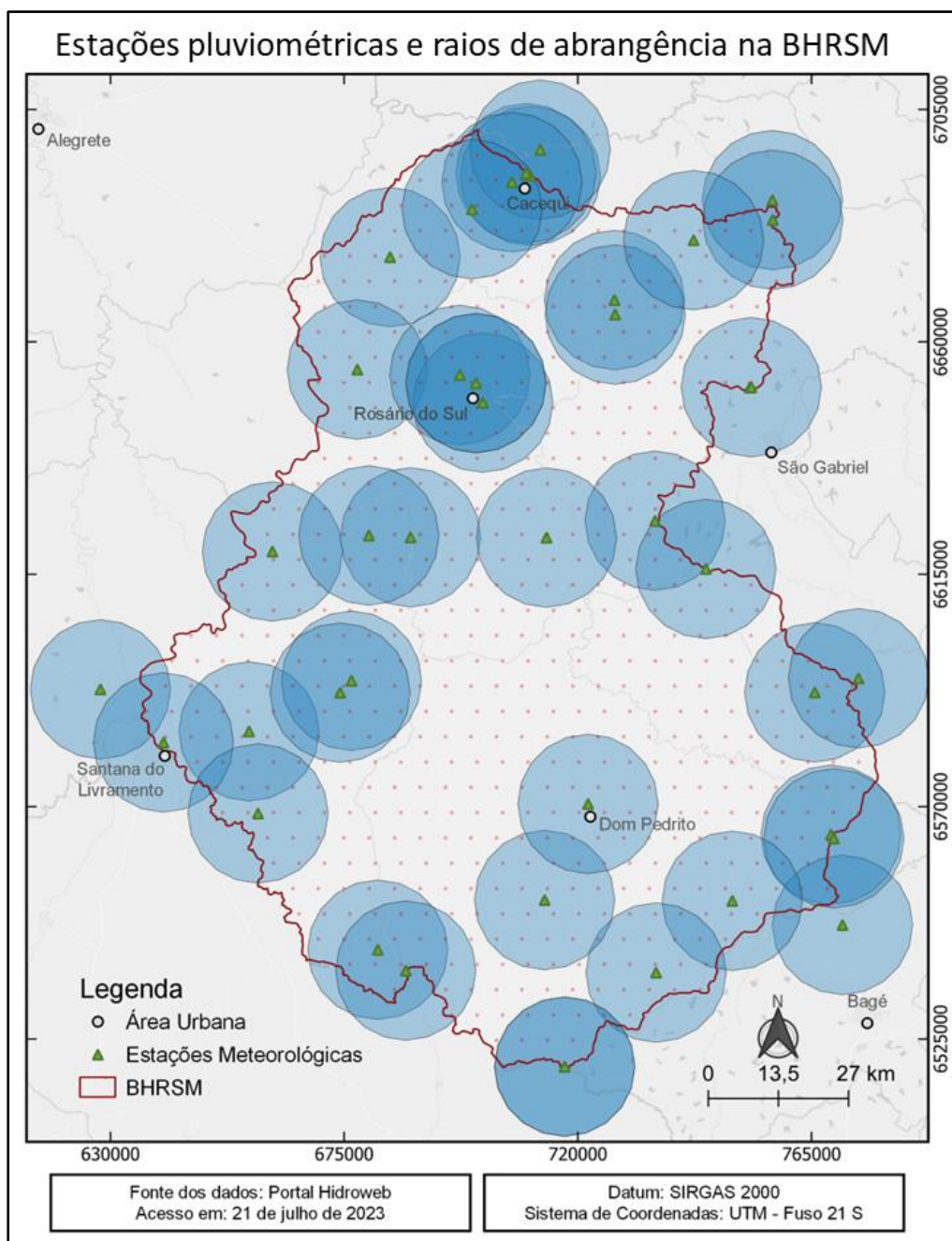


Fonte: Autor (2023).

A Organização Meteorológica Mundial (WMO, 1994) estabelece a densidade mínima de estações para diferentes unidades fisiográficas, para fins de registro hídrico determina-se 575 km² por estação meteorológica em áreas onduladas e em áreas planas no interior do continente. De acordo com essa delimitação, as áreas que não se encontram nos *buffers* encontram-se sub representadas em relação aos dados pluviométricos obtidos através de estações meteorológicas convencionais.

Diante disso, para a BHRSM, há várias áreas sub representadas, com destaque para a área central que carece de maior concentração de EM (Figura 9). Esta área é muito importante no contexto da área de estudo, pois apresenta uma grande densidade de cursos hídricos, e associados a eles, predominam as classes de uso e cobertura do solo de Formação Campestre, Arroz, Lavouras temporárias, e Soja (PETSCH, 2022c).

Figura 9: Raios de abrangência de EM presentes na BHRSM.

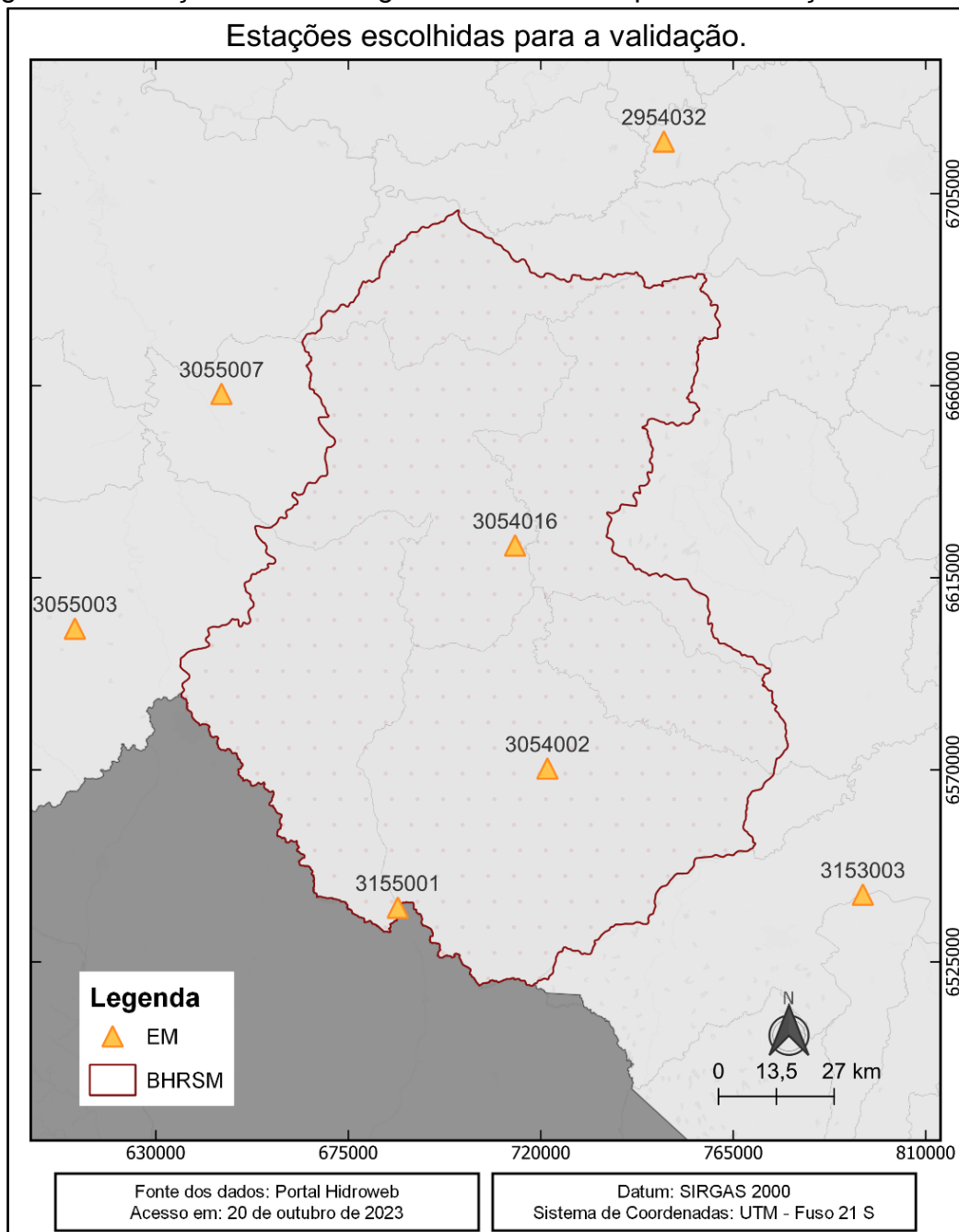


Fonte: Autor (2023).

5.2 VALIDAÇÃO ESTATÍSTICA ENTRE OS DADOS ESTIMADOS PELO CHIRPS E OS OBSERVADOS PELAS EM.

As EM escolhidas para esta pesquisa se localizam em todos os setores da BHRSM (Figura 10), incluindo quatro estações fora da BHRSM.

Figura 10: Estações meteorológicas selecionadas para a validação estatística.



Fonte: Autor (2023).

De acordo com as estatísticas aplicadas (Tabela 3), os dados apresentam oscilações em relação às EM e durante a série histórica, porém, de forma geral refletem o ajuste entre os dois conjuntos de dados.

Tabela 3: Resultados dos testes estatísticos, organizados por mês e EM.

Mês	EM	R²	EMA	ERM	RQEM
Janeiro	Três Vendas	0,48	0,17	0,08	7,17
	Dom Pedrito	0,78	0,02	0,16	5,02
	Granja Umbu	0,67	0,50	1,49	5,41
	Fazenda Encerra	0,74	0,16	0,68	5,76
	São Carlos	0,60	0,31	0,48	7,44
	Paraíso	0,74	0,48	0,36	5,33
	Três Vendas	0,83	0,01	0,91	5,67
Fevereiro	Três Vendas	0,58	0,47	-1,58	5,79
	Dom Pedrito	0,87	0,08	0,12	3,66
	Granja Umbu	0,69	0,28	-0,49	6,54
	Fazenda Encerra	0,69	0,43	3,15	6,08
	São Carlos	0,73	0,13	-0,32	6,32
	Paraíso	0,51	0,65	3,13	7,26
	Três Vendas	0,51	0,44	0,51	5,36
Março	Três Vendas	0,75	0,18	0,01	5,24
	Dom Pedrito	0,87	0,02	-0,09	3,51
	Granja Umbu	0,83	0,46	-0,07	4,41
	Fazenda Encerra	0,83	0,12	0,14	4,13
	São Carlos	0,66	0,02	-0,63	4,91
	Paraíso	0,83	0,20	2,13	4,39
	Três Vendas	0,75	0,06	-0,13	4,87
Abril	Três Vendas	0,74	0,48	0,10	6,08
	Dom Pedrito	0,75	-0,12	-0,23	6,75
	Granja Umbu	0,73	0,25	-0,09	6,43
	Fazenda Encerra	0,90	-0,37	-0,07	5,18
	São Carlos	0,45	0,44	-0,03	8,74
	Paraíso	0,61	0,51	-0,94	7,39
	Três Vendas	0,77	-0,28	-0,19	6,52
Mai	Três Vendas	0,68	-0,37	0,30	6,01
	Dom Pedrito	0,76	-0,11	-0,42	2,00
	Granja Umbu	0,83	0,26	-0,10	3,60
	Fazenda Encerra	0,72	0,14	0,11	4,96

	São Carlos	0,77	-0,01	1,75	4,26
	Paraíso	0,82	-0,14	-0,17	4,30
	Três Vendas	0,85	-0,43	-0,63	4,03
	Três Vendas	0,48	-0,37	2,07	5,23
	Dom Pedrito	0,57	0,33	0,31	4,87
	Granja Umbu	0,62	0,43	-0,58	4,10
Junho	Fazenda Encerra	0,73	0,57	-0,21	4,38
	São Carlos	0,73	0,02	97,20	3,82
	Paraíso	0,51	0,10	-0,29	5,74
	Três Vendas	0,56	0,00	-0,71	4,82
	Três Vendas	0,92	-0,08	-11,33	4,17
	Dom Pedrito	0,86	0,14	-0,42	3,55
	Granja Umbu	0,82	0,21	-0,52	3,76
Julho	Fazenda Encerra	0,78	0,62	0,84	4,51
	São Carlos	0,67	0,41	-0,91	4,48
	Paraíso	0,84	0,85	-0,11	5,50
	Três Vendas	0,81	0,17	-0,19	4,55
	Três Vendas	0,64	0,22	0,59	4,34
	Dom Pedrito	0,79	0,00	0,23	2,88
	Granja Umbu	0,79	0,48	0,35	3,83
Agosto	Fazenda Encerra	0,85	0,26	-0,86	2,93
	São Carlos	0,62	-0,19	-0,14	4,38
	Paraíso	0,74	0,40	-0,28	4,63
	Três Vendas	0,58	-0,26	-0,32	4,89
	Três Vendas	0,70	-0,39	-0,08	5,37
	Dom Pedrito	0,91	0,36	-0,90	3,84
	Granja Umbu	0,75	0,27	-0,81	3,93
Setembro	Fazenda Encerra	0,89	0,10	0,39	3,32
	São Carlos	0,54	0,30	0,39	4,56
	Paraíso	0,76	0,34	-0,38	5,46
	Três Vendas	0,80	0,12	-0,50	3,87
	Três Vendas	0,79	0,13	-0,44	6,14
	Dom Pedrito	0,83	-0,01	0,63	5,16
	Granja Umbu	0,89	0,16	-0,64	3,87
Outubro	Fazenda Encerra	0,78	0,33	-0,23	4,58
	São Carlos	0,72	0,00	-1,15	6,17

	Paraíso	0,85	0,06	0,34	5,15
	Três Vendas	0,67	-0,23	-4,04	6,31
	Três Vendas	0,84	-0,25	-0,17	6,52
	Dom Pedrito	0,91	0,15	-1,10	4,17
	Granja Umbu	0,46	0,64	0,11	5,32
Novembro	Fazenda Encerra	0,93	-0,08	0,27	4,54
	São Carlos	0,85	0,04	-0,12	4,52
	Paraíso	0,91	0,24	24,55	4,49
	Três Vendas	0,89	-0,20	2,21	4,52
	Três Vendas	0,59	0,29	-0,06	8,02
	Dom Pedrito	0,85	0,12	0,09	4,44
	Granja Umbu	0,81	0,37	-0,22	5,65
Dezembro	Fazenda Encerra	0,58	0,52	0,18	7,13
	São Carlos	0,52	0,27	0,42	7,40
	Paraíso	0,82	0,37	75,00	5,74
	Três Vendas	0,60	0,04	-0,21	5,92
	Três Vendas	0,68	0,04	-0,87	5,84
	Dom Pedrito	0,81	0,08	-0,13	4,32
	Granja Umbu	0,74	0,36	-0,13	4,74
Média Anual	Fazenda Encerra	0,79	0,23	0,36	4,79
	São Carlos	0,66	0,14	8,08	5,58
	Paraíso	0,74	0,34	8,61	5,45
	Três Vendas	0,72	-0,05	-0,27	5,11

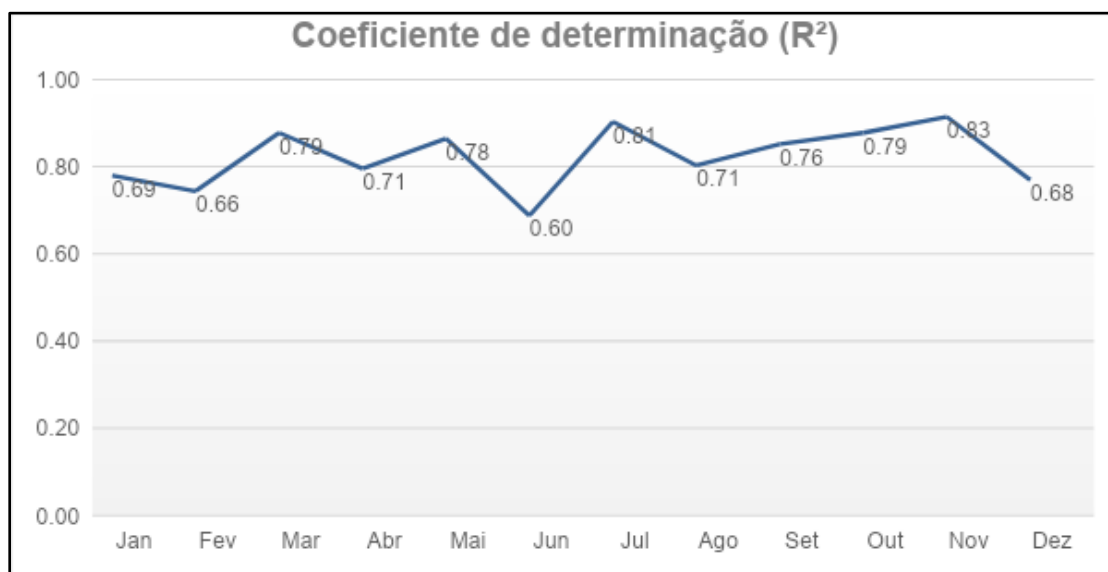
Fonte: Autor (2023).

Durante o período analisado, o coeficiente de determinação (R^2) médio mensal para as sete estações meteorológicas (Figura 11) variou entre 0,60 e 0,81. Os meses de março (0,79), julho (0,81), outubro (0,79) e novembro (0,83) destacaram-se por apresentar valores mais elevados de R^2 , indicando uma conexão mais robusta entre os dados. Costa *et al.* (2021), ressaltam que a região Sul do Brasil apresentou um coeficiente de determinação de 95%, sendo que ocorreu 2% de subestimativa dos dados CHIRPS em relação aos observados nas EM.

No entanto, houve períodos com ajustes menos precisos, como em junho (0,60) e dezembro (0,68), porém ainda demonstrando a aplicabilidade do CHIRPS para a área de estudo. Portanto, apesar de alguns meses terem valores menores de

R^2 , a análise global sugere uma associação moderada a forte entre os conjuntos de dados CHIRPS e EM, ressaltando uma tendência consistente ao longo do ano.

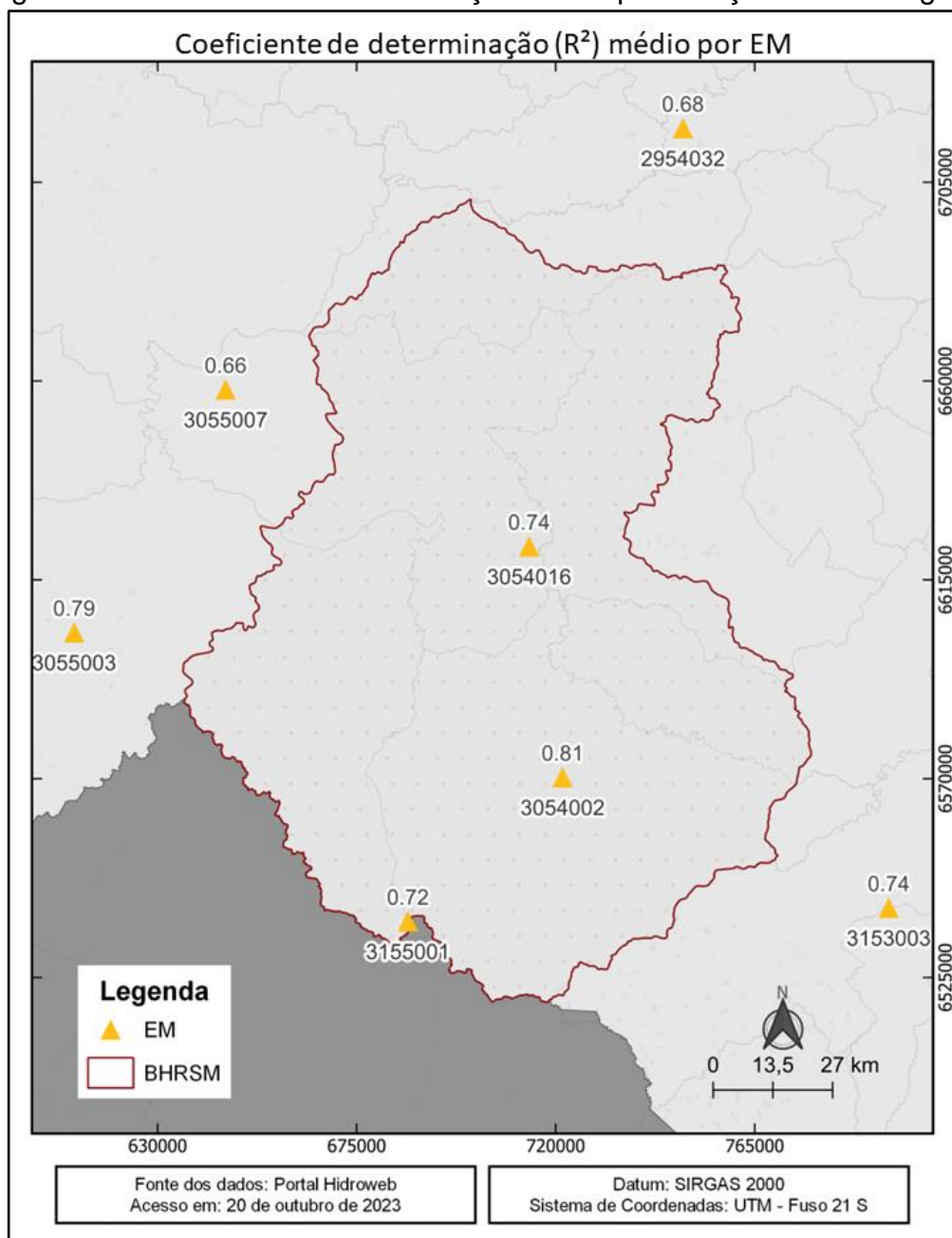
Figura 11: Coeficiente médio mensal para as sete EM.



Fonte: Autor (2023).

Especialmente, na região Norte, as estações Três Vendas e São Carlos possuem coeficientes de determinação (R^2) de 0,68 e 0,66, respectivamente. Já na região Sul, as estações Dom Pedrito, Paraíso e Três Vendas têm coeficientes de determinação (R^2) de 0,81, 0,74 e 0,72, respectivamente. Na região Central, as estações Granja Umbu e Fazenda Encerra apresentam coeficientes de determinação (R^2) de 0,74 e 0,79, respectivamente (Figura 12).

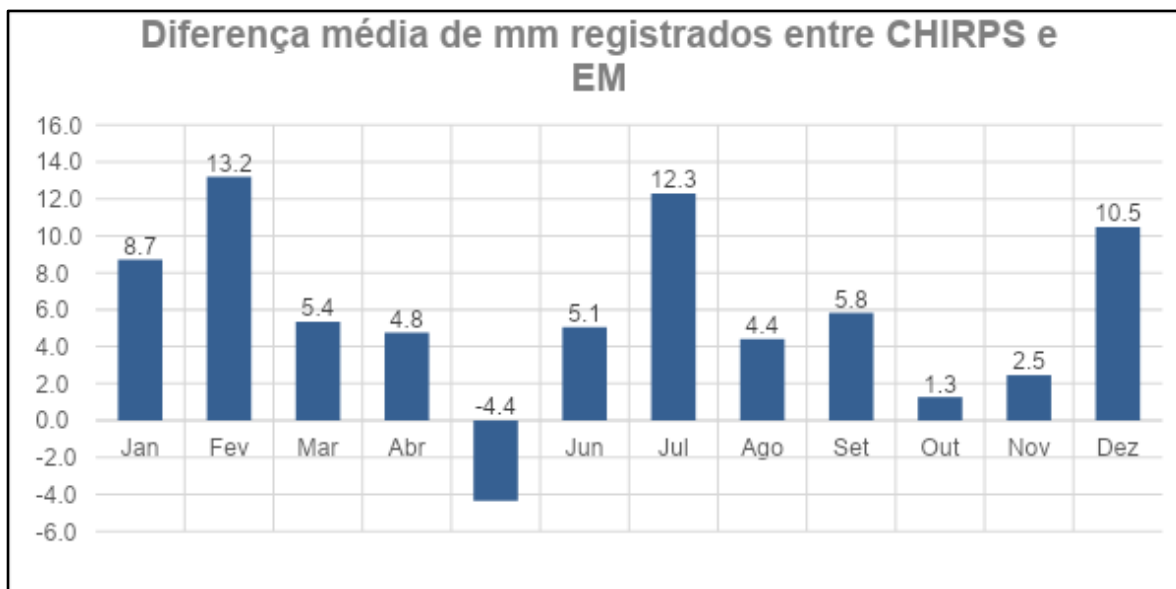
Figura 12: Coeficiente de determinação médio por estação meteorológica.



Fonte: Autor (2023)

Observou-se uma tendência global de superestimação por parte do CHIRPS em relação aos valores de precipitação das EM (Figura 13). Em todos os meses, com exceção de maio, o CHIRPS mostrou-se inclinado a registrar valores mais elevados do que as EM. Contudo, ressalta-se que as diferenças de precipitação são estatisticamente pouco significativas, portanto, o CHIRPS e as EM possuem dados muito semelhantes.

Figura 13: Diferença média em milímetros de chuva registrados entre CHIRPS e EM.

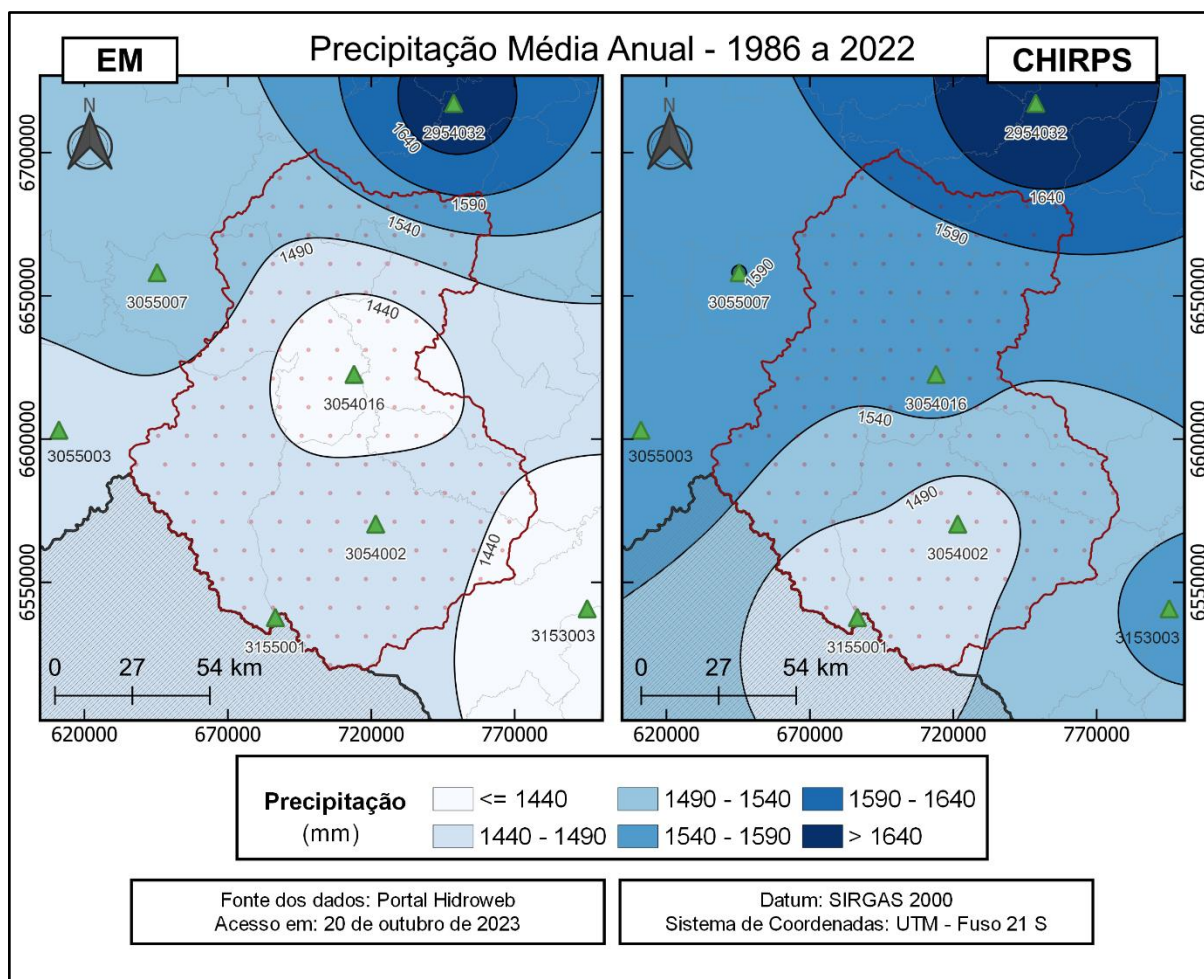


Fonte: Autor (2023).

5.3 ESPACIALIZAÇÃO DOS DADOS DE PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA ANUAL E MENSAL DO PRODUTO CHIRPS E DE ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS DO PERÍODO 1986-2022

Em relação a validação dos dados, a comparação entre a distribuição espacial da precipitação média anual nos conjuntos de dados CHIRPS e dados das EM destaca pequenas diferenças nos valores de precipitação (Figura 14). Os dois conjuntos de dados indicam que a porção norte é a que concentra a precipitação na BHRSM. Além disso, em ambas as representações, as menores quantidades de precipitação estão localizadas na porção sul, embora as estimativas do CHIRPS indiquem valores mais altos em comparação com os dados das EM.

Figura 14: Precipitação média anual – 1986 a 2022 (CHIRPS e EM).



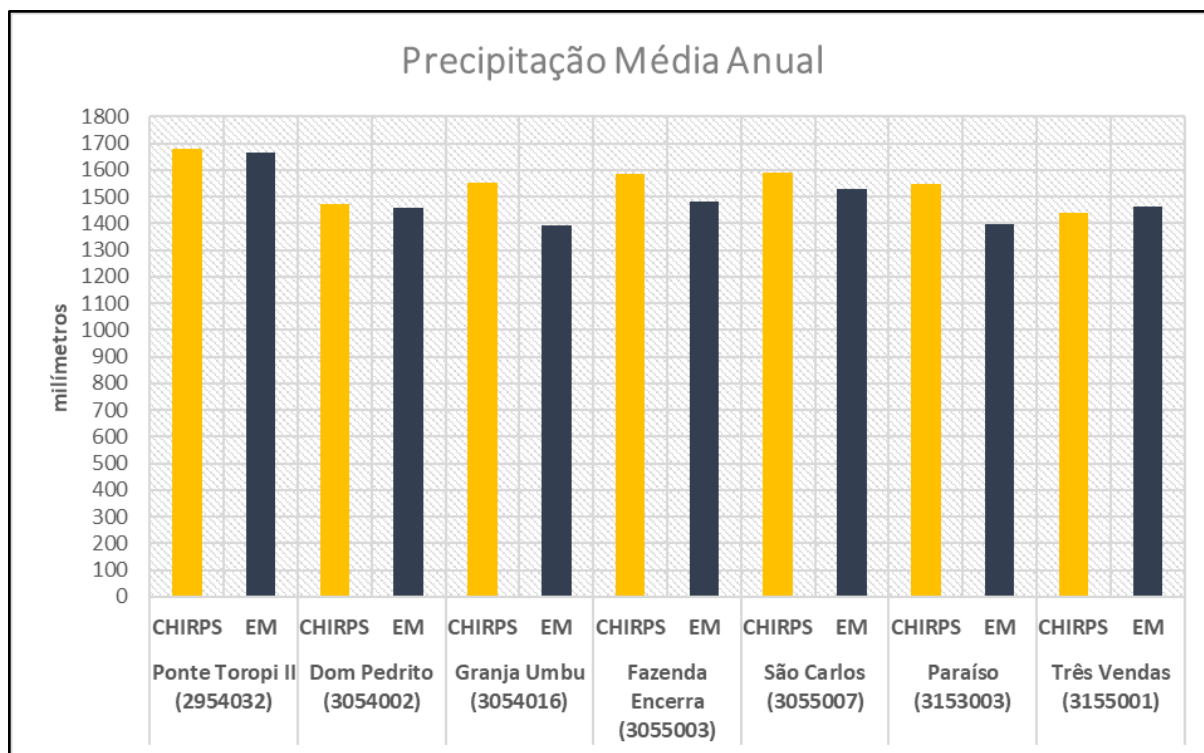
Fonte: Autor (2023).

Na Região Norte, o CHIRPS estimou uma quantidade maior de chuva em relação aos registros das EM. Especificamente, na EM Três Vendas, o CHIRPS estimou 17,2 milímetros a mais do que a medição da EM, enquanto na EM São Carlos, o CHIRPS registrou 63,6 milímetros a mais do que a medição convencional. Na Região Central, as diferenças entre os valores estimados pelo CHIRPS e os registros das EM foram mais acentuadas, na EM Granja Umbu, o CHIRPS superestimou 160,1 milímetros em relação ao registrado na EM. Na EM Fazenda Encerra, os dados do CHIRPS mostram 104 milímetros a mais do que a medição da EM (Figura 15).

Por fim, na Região Sul, o CHIRPS estimou quantidades diferentes em relação às medições das EM: na EM Dom Pedrito registrou 11,5 milímetros a mais, na EM Paraíso, estimou 150,3 milímetros acima do registrado pela EM, e na EM Três Vendas, estimou 20,7 milímetros a menos do que as medições da EM, sendo a única

a apresentar estimativas menores do que o registrado pela estação meteorológica convencional.

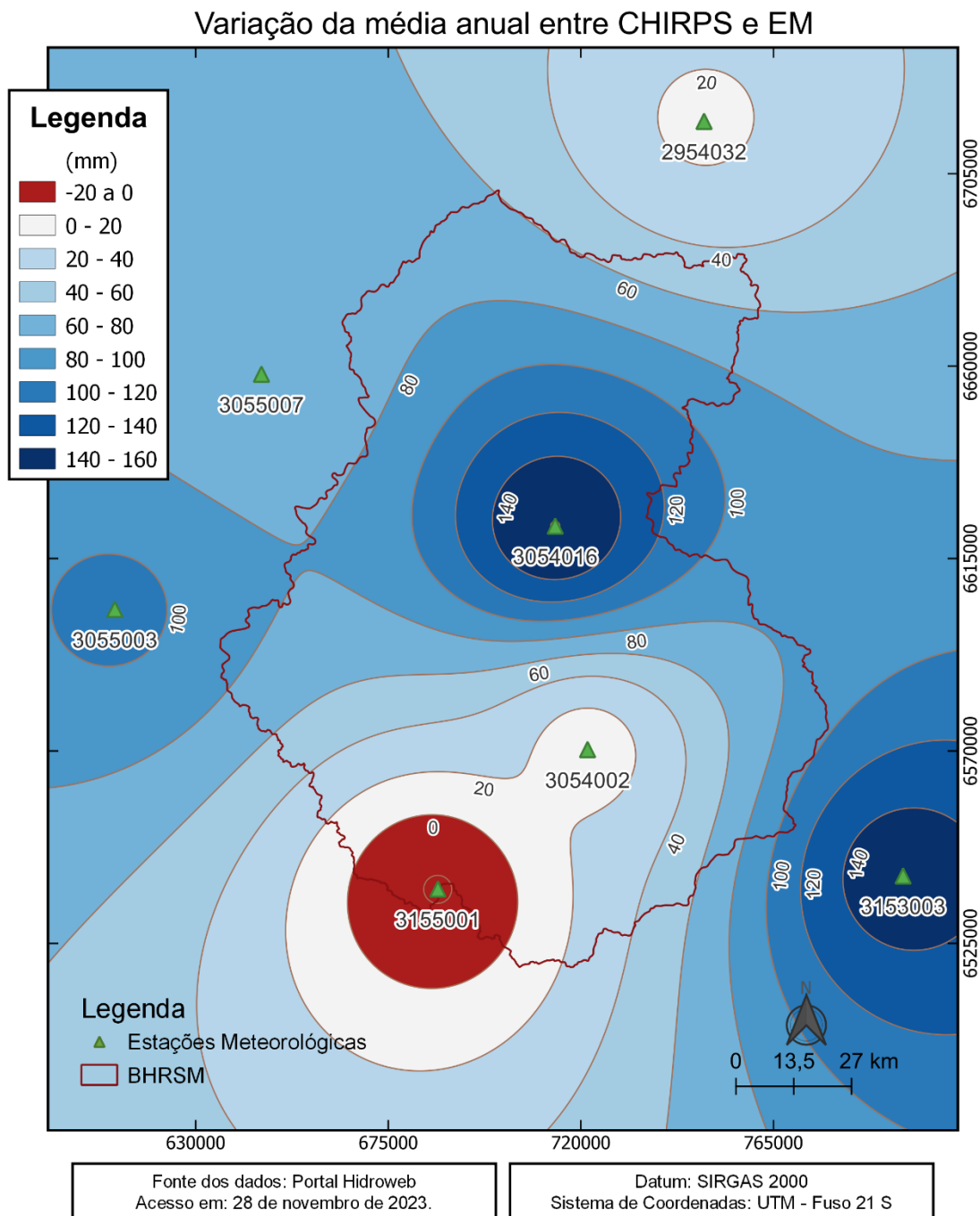
Figura 15: Precipitação Média Anual, considerando os conjuntos de dados provenientes do CHIRPS e EM.



Fonte: Autor (2023).

Dessa forma, especialmente observa-se que houve maior variação entre os conjuntos de dados para a precipitação registrada no norte da BHRSM (Figura 16). Porém, considerando os valores de diferença, avalia-se ainda que o CHIRPS teve um desempenho aceitável para a representação da precipitação média anual na BHRSM.

Figura 16: Diferença média anual em milímetros entre CHIRPS e EM.

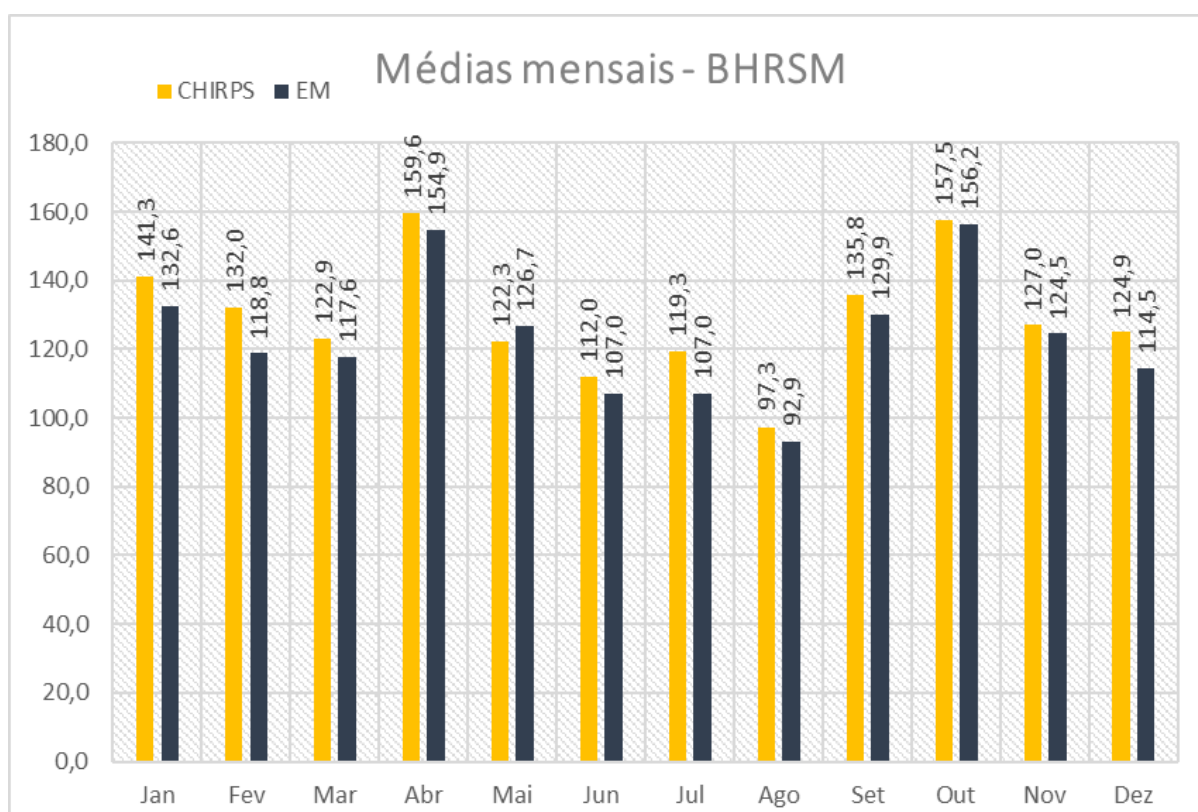


Fonte: Autor (2023).

Mensalmente, os dados CHIRPS e das EM variaram pouco ao longo do ano. Em janeiro, o CHIRPS estimou uma quantidade de chuva 8,7 milímetros maior do que as medições da EM. Em fevereiro, essa diferença aumentou para 13,2 milímetros. Em março, a diferença foi de 5,3 milímetros. No mês de abril, a diferença foi de 4,7 milímetros. No mês de maio, houve uma diferença negativa de 4,4 milímetros,

indicando que o CHIRPS estimou uma quantidade de chuva menor em comparação com as medições das EM. Em junho, a diferença foi de 5,0 milímetros, novamente com uma estimativa superior pelo CHIRPS. Em julho, a discrepância foi de 12,3 milímetros, apresentando a maior discrepância entre os dois conjuntos de dados. No mês de agosto, a diferença foi de 4,4 milímetros. Setembro apresentou uma discrepância de 5,9 milímetros entre os valores estimados pelo CHIRPS e os registros das EM. Em outubro, essa diferença foi de 1,3 milímetros, indicando uma discrepância menor. Em novembro, a diferença foi de 2,5 milímetros, enquanto em dezembro, essa diferença aumentou para 10,4 milímetros (Figura 17).

Figura 17: Médias mensais para a BHRSM – CHIRPS e EM.



Fonte: Autor (2023).

Os valores de diferença de precipitação (mm) registrados entre os dados CHIRPS e das EM, na escala mensal, também são pouco significativos estatisticamente. Portanto, os dados CHIRPS apresentaram um desempenho aceitável para esta escala temporal.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise das estações meteorológicas na BHRSM revelou uma evolução significativa na cobertura e distribuição temporal das estações ao longo do tempo. O aumento expressivo no número de EM, principalmente nas últimas duas décadas, reflete avanços tecnológicos e um maior interesse na coleta de dados meteorológicos. Contudo, a desigualdade na cobertura espacial das estações ocasiona em áreas centrais da bacia sub representadas, especialmente em regiões com alta densidade de cursos hídricos e variadas classes de uso do solo ligadas à produção agropecuária. Esta lacuna na cobertura de dados pluviométricos pode influenciar a precisão e a abrangência das informações obtidas para a BHRSM, justificando a necessidade da validação de produtos de reanálise como o CHIRPS.

O conjunto de métricas utilizado (R^2 , EMA, ERM, REQM) reflete a qualidade do ajuste entre os conjuntos de dados CHIRPS e EM, indicando a capacidade dos modelos em representar com precisão a precipitação. Meses como março, julho, outubro e novembro demonstraram uma conexão mais robusta entre os dados, evidenciada por valores mais elevados de R^2 . Por outro lado, períodos como junho e dezembro revelaram um ajuste menos preciso, caracterizando uma menor adaptabilidade dos modelos aos dados, para o contexto da BHRSM. Embora o CHIRPS tende a superestimar os valores de precipitação em comparação com o EM na maior parte do ano, a análise global sugere uma associação moderada a forte entre os conjuntos de dados.

Em relação a espacialização, observa-se que os dados provenientes do CHIRPS e os obtidos com as EM demonstram a mesma tendência para a BHRSM, com concentração da precipitação na porção norte. Ainda que haja valores superestimados pelo CHIRPS em grande parte da área de estudo, trata-se de variações pequenas, que estatisticamente não são significativas. Portanto, conclui-se que os dados de precipitação obtidos com o CHIRPS podem ser usados para a BHRSM, visando dar suporte a estudos variados, como aqueles voltados a processos erosivos ou hidrológicos na área de estudo.

7 REFERÊNCIAS

- AB'SABER, Aziz N. A climatologia e a meteorologia no Brasil. In: Mario G. Ferri; Shozo Motoyana (org.) **História das ciências no Brasil**. São Paulo:Edusp, 1979. p. 119-145.
- ADLER, R.; SAPIANO, M.; HUFFMAN, G.; WANG, J.-J.; GU, G.; BOLVIN, D.; CHIU, L.; SCHNEIDER, U.; BECKER, A.; NELKIN, E.; XIE, P.; FERRARO, R.; SHIN, D.-B. The Global Precipitation Climatology Project (GPCP) Monthly Analysis (New Version 2.3) and a Review of 2017 Global Precipitation. **Atmosphere**, vol. 9, nº 4, p. 138, 7 abr. 2018.
- ADLER, R.F., GU, G., SAPIANO, M. et al. Global Precipitation: Means, Variations and Trends During the Satellite Era (1979–2014). **Surv Geophys**, n. 38, 679–699, 2017.
- AMARE, M.; JENSEN, N. D.; SHIFERAW, B.; CISSÉ, J. D. Rainfall shocks and agricultural productivity: Implication for rural household consumption. **Agricultural Systems**, vol. 166, p. 79–89, out. 2018.
- ASHOURI, H.; HSU, K.-L.; SOROOSHIAN, S.; BRAITHWAITE, D. K.; KNAPP, K. R.; CECIL, L. D.; NELSON, B. R.; PRAT, O. P. PERSIANN-CDR: Daily Precipitation Climate Data Record from Multisatellite Observations for Hydrological and Climate Studies. **Bulletin of the American Meteorological Society**, vol. 96, nº 1, p. 69–83, 1 jan. 2015.
- BACK, Á. J., SÔNEGO, M., PEREIRA, J. R. Índices de concentração de chuvas da região Sul do Brasil. *Revista Brasileira de Climatologia* [Online] 27, 57-72, 2020 Disponível: <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v27i0.65466>.
- BENJAMIN, S. G.; BROWN, J. M.; BRUNET, G.; LYNCH, P.; SAITO, K.; SCHLATTER, T. W. 100 Years of Progress in Forecasting and NWP Applications. **Meteorological Monographs**, vol. 59, p. 13.1-13.67, 1 jan. 2019.
- BRITO, C. S.; SILVA, R. M.; SANTOS, C. A. G.; NETO, R. M. B.; COELHO, V. H. R. Monitoring meteorological drought in a semiarid region using two long-term satellite-estimated rainfall datasets: A case study of the Piranhas River basin, northeastern Brazil. **Atmospheric Research**, v. 250, p. 105380, 2021.
- CABRAL, T. L.; NUMMER, A. V.; BATEIRA, C. V. de M. Indicadores morfométricos como suporte para a classificação de voçorocas em sub-bacias hidrográficas no município de cacequi, rs. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, [S. l.], v. 21, n. 1, 2020. DOI: 10.20502/rbg.v21i1.1670. Disponível em: <https://rbgeomorfologia.org.br/rbg/article/view/1670>. Acesso em: 21 dez. 2023.
- CERÓN, W.L., MOLINA-CARPIO, J., AYES RIVERA, I. et al. A principal component analysis approach to assess CHIRPS precipitation dataset for the study of climate

variability of the La Plata Basin, Southern South America. **Nat Hazards**, n. 103, p. 767–783, 2020.

COSTA, J., PEREIRA, G., SIQUEIRA, M. E., CARDOZO, F., & SILVA, V. V. da. Validação dos dados de precipitação estimados pelo chirps para o Brasil. **Revista Brasileira De Climatologia**, 24, 2021.

COSTA, S. A. T.; BEZERRA, A. C.; ARAÚJO, A. M. Q.; SILVA, M. F. DA; FERREIRA, M.; CRUZ NETO, J. F.; ALVES, R. M., SOUZA, L. S. B. 2021. Dinâmica espaço-temporal das anomalias de precipitação em uma região semiárida, Nordeste do Brasil. **Revista de Gestão de Água da América Latina** [Online]18, e14. Disponível: <https://doi.org/10.21168/rega.v18e14>. Acesso: 10 ago. 2023.

CROST, B.; DUQUENNOIS, C.; FELTER, J. H.; REES, D. I. Climate change, agricultural production and civil conflict: Evidence from the Philippines. **Journal of Environmental Economics and Management**, vol. 88, p. 379–395, mar. 2018.

EBERT, E. E.; JANOWIAK, J. E.; KIDD, C. Comparison of Near-Real-Time Precipitation Estimates from Satellite Observations and Numerical Models. **Bulletin of the American Meteorological Society**, vol. 88, nº 1, p. 47–64, jan. 2007.

FEIDAS, H. Validation of satellite rainfall products over Greece. **Theor Appl Climatol**, n. 99, p. 193–216, 2010.

FRISINGER, H. H. **The History of Meteorology: To 1800 (American Meteorological Society Historical Monograph Series.)**, Massachusetts: Science History Publications, 1983.

FUNK, C., PETERSON, P., LANDSFELD, M. et al. The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. **Sci Data** 2, 150066 (2015). <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>

FUNK, C.; PETERSON, P.; LANDSFELD, M.; PEDREROS, D.; VERDIN, J.; SHUKLA, S.; HUSAK, G.; ROWLAND, J.; HARRISON, L.; HOELL, A.; MICHAELSEN, J. The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. **Scientific Data**, vol. 2, nº 1, p. 150066, 8 dez. 2015. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>.

GETIRANA, A.; KIRSCHBAUM, D.; MANDARINO, F.; OTTONI, M.; KHAN, S.; ARSENAULT, K. Potential of GPM IMERG Precipitation Estimates to Monitor Natural Disaster Triggers in Urban Areas: The Case of Rio de Janeiro, Brazil. **Remote Sensing**, vol. 12, nº 24, p. 4095, 15 dez. 2020. <https://doi.org/10.3390/rs12244095>.

GOODRICH, D. C.; KEEFER, T. O.; UNKRICH, C. L.; NICHOLS, M. H.; OSBORN, H. B.; STONE, J. J.; SMITH, J. R. Long-term precipitation database, Walnut Gulch Experimental Watershed, Arizona, United States. **Water Resources Research**, vol. 44, nº 5, 6 maio 2008. <https://doi.org/10.1029/2006WR005782>.

GUAN, X.; SUN, W.; KONG, X.; ZHANG, F.; HUANG, J.; HE, Y. Response of fatal landslides to precipitation over the Chinese Loess Plateau under global warming. **Frontiers in Earth Science**, vol. 11, 7 jun. 2023. <https://doi.org/10.3389/feart.2023.1146724>.

HUFFMAN, G. J.; BOLVIN, D. T.; NELKIN, E. J.; WOLFF, D. B.; ADLER, R. F.; GU, G.; HONG, Y.; BOWMAN, K. P.; STOCKER, E. F. The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-Global, Multiyear, Combined-Sensor Precipitation Estimates at Fine Scales. **Journal of Hydrometeorology**, vol. 8, nº 1, p. 38–55, 1 fev. 2007. <https://doi.org/10.1175/JHM560.1>.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Projeto RADAMBRASIL. Levantamento de recursos naturais (Folha SH.22 Porto Alegre e parte das Folhas SH.21 Uruguaiiana e SI.22 Lagoa Mirim)**. 1. ed. Rio de Janeiro: [s.n.], 1986.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2021 – The Physical Science Basis**. [S. l.]: Cambridge University Press, 2021. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>.

JOYCE, R. J.; JANOWIAK, J. E.; ARKIN, P. A.; XIE, P. CMORPH: A Method that Produces Global Precipitation Estimates from Passive Microwave and Infrared Data at High Spatial and Temporal Resolution. **Journal of Hydrometeorology**, vol. 5, nº 3, p. 487–503, jun. 2004. [https://doi.org/10.1175/1525-7541\(2004\)005<0487:CAMTPG>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1525-7541(2004)005<0487:CAMTPG>2.0.CO;2).

JUNQUEIRA, R.; AMORIM, J.S.; OLIVEIRA, A.S. Comparação entre diferentes metodologias para preenchimento de falhas em dados pluviométricos. **Sustentare**, v.2, n.1, jan/jul., 2018.

KATSANOS ,D.; RETALIS, A.; MICHAELIDES, S. Validation of a high-resolution precipitation database (CHIRPS) over Cyprus for a 30-year period. **Atmospheric Research**, Volume 169, Part B, p. 459-464, 2016.

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M.; AMBRIZZI, T.; YOUNG, A.; BARRETO, N. J. C.; RAMOS, A. M. Trends in extreme rainfall and hydrogeometeorological disasters in the Metropolitan Area of São Paulo: a review. **Annals of the New York Academy of Sciences**, vol. 1472, nº 1, p. 5–20, 13 jul. 2020. <https://doi.org/10.1111/nyas.14307>.

MASROOR, M.; SAJJAD, H.; REHMAN, S.; SINGH, R.; HIBJUR RAHAMAN, M.; SAHANA, M.; AHMED, R.; AVTAR, R. Analysing the relationship between drought and soil erosion using vegetation health index and RUSLE models in Godavari middle sub-basin, India. **Geoscience Frontiers**, vol. 13, nº 2, p. 101312, mar. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2021.101312>.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA. **Relatório apresentado ao Presidente da República dos Estados Unidos do Brasil pelo Ministro de Estado da Agricultura, Indústria e Comércio**. [Rio de Janeiro]: 1917. v.I. pp. 108-111.

MU, Y.; BIGGS, T. SHEN, S. S. P. Satellite-based precipitation estimates using a dense rain gauge network over the Southwestern Brazilian Amazon: Implication for identifying trends in dry season rainfall, **Atmospheric Research**, Volume 261, 2021, 105741.

NEIVA, E.J.F. 1988, 'Centenário da Criação da Repartição Central Meteorológica', **Anais Hidrográficos**, vol. XVI, pp. 45-53.

OKAMOTO, K. i.; USHIO, T.; IGUCHI, T.; TAKAHASHI, N.; IWANAMI, K. The global satellite mapping of precipitation (GSMaP) project. [s. d.]. **Proceedings. 2005 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2005. IGARSS '05**.

[...]. [S. l.]: IEEE, [s. d.]. p. 3414–3416.

<https://doi.org/10.1109/IGARSS.2005.1526575>.

OTHMAN, D. B., ABIDA, H., 2022. Monitoring and mapping of drought in a semi-arid region: case of the Merguellil watershed, central Tunisia. **Environmental Monitoring and Assessment** [Online] 194, 287. Disponível: <https://doi.org/10.1007/s10661-022-09926-5>. Acesso: 10 ago. 2023.

PACA, V.H.D.M.; ESPINOZA-DÁVALOS, G.E.; MOREIRA, D.M.; COMAIR, G. Variability of Trends in Precipitation across the Amazon River Basin Determined from the CHIRPS Precipitation Product and from Station Records. **Water** 2020, 12, 1244. <https://doi.org/10.3390/w12051244>

PANAGOS, P.; BORRELLI, P.; MEUSBURGER, K.; YU, B.; KLIK, A.; JAE LIM, K.; YANG, J. E.; NI, J.; MIAO, C.; CHATTOPADHYAY, N.; SADEGHI, S. H.; HAZBAVI, Z.; ZABIHI, M.; LARIONOV, G. A.; KRASNOV, S. F.; GOROBETS, A. V.; LEVI, Y.; ERPUL, G.; BIRKEL, C.; ... BALLABIO, C. Global rainfall erosivity assessment based on high-temporal resolution rainfall records. **Scientific Reports**, vol. 7, nº 1, p. 4175, 23 jun. 2017. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-04282-8>.

PAREDES-TREJO, F. J., H.A. BARBOSA, T.V. LAKSHMI K. Validating CHIRPS-based satellite precipitation estimates in Northeast Brazil, **Journal of Arid Environments**, v. 139, p. 26-40, 2017.

PENDERGRASS, A. G., KNUTTI, R., LEHNER, F., 2017. Precipitation variability increases in a warmer climate. **Scientific Reports** [Online] 7, 17966. Disponível: <https://doi.org/10.1038/s41598-017-17966-y>

PETSCH, C.; CUNHA DO AMARAL, E.; DE OLIVEIRA SANCHES, F. Eventos extremos de precipitação e sua relação com a erosão na Bacia Hidrográfica do rio Santa Maria (RS). **Revista Brasileira de Climatologia**, vol. 33, p. 1–28, 15 jul. 2023. <https://doi.org/10.55761/abclima.v33i19.16473>.

PETSCH, C.; CUNHA DO AMARAL, E.; DE OLIVEIRA SANCHES, F. Eventos extremos de precipitação e sua relação com a erosão na Bacia Hidrográfica do rio Santa Maria (RS) . **Revista Brasileira de Climatologia**, [S. l.], v. 33, n. 19, p. 1–28, 2023. DOI: 10.55761/abclima.v33i19.16473. Disponível em:

<https://ojs.ufgd.edu.br/index.php/rbclima/article/view/16473>. Acesso em: 21 dez. 2023.

PETSCH, C.; SANCHES, F. de O.; SCCOTI, A. A. V.; TRENTIN, R.; ROBAINA, L. E. de S.; AMARAL, E. C. do. Erosividade da bacia hidrográfica do rio Santa Maria (RS): tendências e espacialização. **Boletim de Geografia**, vol. 39, p. 348–368, 24 fev. 2022. <https://doi.org/10.4025/bolgeogr.v39.a2021.e61231>.

PETSCH, C.; SCCOTI, A. A. V.; TRENTIN, R.; ROBAINA, L. S.; ROSA, K. K.. A expansão da cultura de soja no pampa gaúcho: o caso da bacia hidrográfica do rio Santa Maria. **Geografar**. v. 56, p. 162-181, 2022c.

PETSCH, C.; VOLPATO SCCOTI, A. A.; SOUZA ROBAINA, L. E. de; TRENTIN, R. Controlling factors and mapping of linear erosive features in Santa Maria river watershed –RS. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, vol. 23, nº 4, p. 1876–1892, 1 out. 2022. <https://doi.org/10.20502/rbg.v23i4.2151>

PETSCH, C.; VOLPATO SCCOTI, A. A.; SOUZA ROBAINA, L. E. de; TRENTIN, R. Controlling factors and mapping of linear erosive features in Santa Maria river watershed –RS. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, [S. l.], v. 23, n. 4, p. 1876–1892, 2022. DOI: 10.20502/rbg.v23i4.2151. Disponível em: <https://rbgeomorfologia.org.br/rbg/article/view/2151>. Acesso em: 21 dez. 2023.

QUINA, R.R.; COSTA, R.M.; SANCHES, F.O.; GOMES, F.C.M.; ZAIDAN, R.T. Comparação de produtos altimétricos dos sensores Palsar/Alos e Lidar, a partir do modelo Sinmap. **Research, Society and Development**, v. 9, p. e27391211149-26, 2020.

RADEMANN, L. K., TRENTIN, R., & ROBAINA, L. E. DE S. (2018). Relação das variáveis ambientais com os processos erosivos no município de cacequi, rio grande do sul. **Revista Geoaraguaia**, 8(2). Recuperado de <https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/geo/article/view/7675>

RADEMANN, L. K.; TRENTIN, R.; ROBAINA, L. E. de S. Relação das variáveis ambientais com os processos erosivos no município de cacequi, rio grande do sul. **Revista Geoaraguaia**, [S. l.], v. 8, n. 2, 2018. Disponível em: <https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/geo/article/view/7675>. Acesso em: 21 dez. 2023.

RADEMANN, L. K.; TRENTIN, R.; ROBAINA, L. E. S.. Relação das variáveis ambientais com os processos erosivos no município de Cacequi, Rio Grande do Sul. **Revista Geoaraguaia**. v. 8 n. 2, 2018

RAHMAN, M. A.; KANG, S.; NAGABHATLA, N.; MACNEE, R. Impacts of temperature and rainfall variation on rice productivity in major ecosystems of

Bangladesh. **Agriculture & Food Security**, vol. 6, nº 1, p. 10, 21 dez. 2017.
<https://doi.org/10.1186/s40066-017-0089-5>.

RIVERA, J. A.; MARIANETTI, G.; HINRICHS, S. Validation of CHIRPS precipitation dataset along the Central Andes of Argentina. **Atmospheric Research**. Volume 213, 2018, Pages 437-449.

ROBAINA, L. E. de; TRENTIN, R.; LAURENT, F.; SCCOTI, A. A. V.. Zoneamento morfolitológico da bacia hidrográfica do rio Ibicuí e sua relação com processos superficiais e o uso do solo. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 16, n. 1, p. 63-77, 2015

RODRIGUES, E. L., SOUSA, F. A. S., LOPES, R. F. C., 2022. Análise da variabilidade dos períodos secos e chuvosos da precipitação pluvial no estado da Paraíba utilizando o Índice Padronizado de Precipitação (IPP). **Revista Brasileira de Geografia Física** [Online] 15(5), 2544-2581. Disponível: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v15.5.p2544-2581>.

SANT'ANNA NETO, J. L. A Gênese da Climatologia no Brasil: O despertar de uma ciência geográfica. **Geografia**, Rio Claro, v. 28, n. 1, p. 5-27, jan./abr. 2003.

SCCOTI, A. A. V. . Estudo e zoneamento geoambiental com auxílio de sig na bacia hidrográfica do Rio Santa Maria: sudoeste do Estado do Rio Grande do Sul.2017. Tese (Doutorado em Geografia) Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2017. 153p.

SPIEGEL, M.R. Estatística. 3.ed. São Paulo: **Pearson Makron Books/McGraw-Hill do Brasil**, 1993.

STITH, J. L.; BAUMGARDNER, D.; HAGGERTY, J.; HARDESTY, R. M.; LEE, W.-C.; LENSCHOW, D.; PILEWSKIE, P.; SMITH, P. L.; STEINER, M.; VÖMEL, H. 100 Years of Progress in Atmospheric Observing Systems. **Meteorological Monographs**, vol. 59, p. 2.1-2.55, 1 jan. 2018.
<https://doi.org/10.1175/AMSMONOGRAPHS-D-18-0006.1>.

STRECK, E. V.; KÄMPF, N.; DALMOLIN, R. S. D.; KLAMT, E.; NASCIMENTO, P. C.; SCHNEIDER, P.; GIASSON, E.; PINTO, L. F. S. **Solos do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: UFRGS, 222 p., 2008

TANG ,L.; TIAN, Y.; YAN F.; HABIB E. An improved procedure for the validation of satellite-based precipitation estimates, **Atmospheric Research**, Volume 163, 2015, Pages 61-73. ISSN 0169-8095. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.12.016>.

TAPIADOR, F.J.; TURK, W.; PETERSEN, A.Y.; HOU, E.; GARCÍA-ORTEGA, L.A.T. MACHADO, C.F. ANGELIS, P. SALIO, C. KIDD, G.J. HUFFMAN, M. DE CASTRO. 70-97 Global precipitation measurement: methods, datasets and applications. **Atmos. Res.**, 104-105 (2012), pp. 70-97.

TAVARES, M. G.; SANTOS, E. B. 2022. Período de retorno das precipitações máximas diárias no estado do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Climatologia** 30(18), p. 274-290. Disponível: <https://doi.org/10.55761/abclima.v30i18.15196>.

VENTURA, T.M.; SANTANA, L.L.R.; MARTINS, C.A.; FIGUEIREDO, J.M. Análise da aplicabilidade de métodos estatísticos para preenchimento de falhas em dados meteorológicos. **Revista Brasileira de Climatologia**, v.19, jul/dez., 2016.

VIVIANI, E.; MANZATO, G.G. Geração de modelos digitais de superfície por meio de plataformas computacionais com estrutura vetorial e raster. **Ciência e Engenharia**, v.15, p.27-34, 2005.

WILDNER, Wilson; RAMGRAG, Gilberto Emílio; LOPES Ricardo da Cunha; IGLESIAS, Carlos Moacyr da Fontoura **Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Sul. Escala 1:750000**. CPRM, Serviço Geológico do Brasil. Porto Alegre, RS. 2006.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. Guide to Hydrological Practices, Data Acquisition and Processing, Analysis, forecasting and other Applications. **Geneva**: 5 ed. n 168, 1994.

XIE, P.; ARKIN, P. A. Global Precipitation: A 17-Year Monthly Analysis Based on Gauge Observations, Satellite Estimates, and Numerical Model Outputs. **Bulletin of the American Meteorological Society**, vol. 78, nº 11, p. 2539–2558, nov. 1997. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1997\)078<2539:GPAYMA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1997)078<2539:GPAYMA>2.0.CO;2).

ZHAN, W.; PAN, M.; WANDERS, N.; WOOD, E. F. Correction of real-time satellite precipitation with satellite soil moisture observations. **Hydrology and Earth System Sciences**, vol. 19, nº 10, p. 4275–4291, 22 out. 2015. <https://doi.org/10.5194/hess-19-4275-2015>.