UNESP – UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE PRESIDENTE PRUDENTE
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

VIVIANE APARECIDA DOS SANTOS

APLICAÇÃO DO GNSS NA ESTIMATIVA DO PWV PARA PREVISÃO DE EVENTOS EXTREMOS DE PRECIPITAÇÃO

Presidente Prudente – SP
2025

UNESP – UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE PRESIDENTE PRUDENTE
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

VIVIANE APARECIDA DOS SANTOS

APLICAÇÃO DO GNSS NA ESTIMATIVA DO PWV PARA PREVISÃO DE EVENTOS EXTREMOS DE PRECIPITAÇÃO

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Ciências e Tecnologia – Campus de Presidente Prudente, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Ciências Cartográficas. Área de concentração em aquisição, análise e representação de informações espaciais.

Orientadora: Prof.ª Dra. Daniele Barroca Marra Alves

Coorientadora: Dra. Tayná Aparecida Ferreira Gouveia

Presidente Prudente – SP

2025

S237a

Santos, Viviane Aparecida dos
Aplicação do GNSS na estimativa do PWV para previsão de eventos extremos de precipitação / Viviane Aparecida dos Santos. -- Presidente Prudente, 2025
109 p. : il., tabs.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente
Orientadora: Daniele Barroca Marra Alves
Coorientadora: Tayná Aparecida Ferreira Gouveia

1. Atraso da neutrosfera. 2. PWV-GNSS. 3. Eventos extremos de precipitação. 4. Posicionamento GNSS. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Dados fornecidos pelo autor(a).

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

Esta pesquisa visa contribuir com o aprimoramento da previsão de eventos extremos de precipitação, ao utilizar valores de PWV-GNSS como indicador precursor. Os resultados indicam que a aplicação do PWV-GNSS fortalece o monitoramento atmosférico e pode apoiar sistemas de alerta precoce, reduzindo impactos de desastres de precipitação.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

This research aims to improve the forecasting of extreme precipitation events by using GNSS-derived Precipitable Water Vapor (PWV-GNSS) as a precursor indicator. The results indicate that the application of PWV-GNSS enhances atmospheric monitoring and can support early warning systems, thereby reducing the impacts of precipitation-related disasters.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Presidente Prudente

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: "Aplicação do GNSS na estimativa do PWV para detecção e monitoramento de eventos extremos de precipitação".

AUTORA: VIVIANE APARECIDA DOS SANTOS
ORIENTADORA: DANIELE BARROCA MARRA ALVES
COORIENTADORA: TAYNÁ APARECIDA FERREIRA GOUVEIA

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em Ciências Cartográficas, área: Aquisição, Análise e Representação de Informações Espaciais pela Comissão Examinadora:

Profa. Dra. DANIELE BARROCA MARRA ALVES (Participaçao Virtual)
Departamento de Cartografia / Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" - Faculdade de Ciências e Tecnologia

Profa. Dra. SONIA MARIA ALVES COSTA (Participaçao Virtual)
- / Universidade Federal Fluminense

Prof. Dr. FELIPE GEREMIA NIEVINSKI (Participaçao Virtual)
Departamento de Geodésia / Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof. Dr. LUIZ FERNANDO SAPUCCI (Participaçao Virtual)
INPE

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Presidente Prudente

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

Prof. Dr. PAULO DE TARSO SETTI JÚNIOR (Participaçao Virtual)
- / INPE

Presidente Prudente, 26 de junho de 2025

Agradecimentos

Primeiramente, meu agradecimento a Deus, por me amparar nos momentos difíceis e por me presentear com pessoas tão especiais.

Agradeço aos meus pais Vera e Cido, por todo amor, educação, incentivo e confiança. Ao meu irmão Ua (Renato), cunhada Isabela e sobrinho Levi por todo apoio.

Ao meu noivo João Vitor, que foi meu maior incentivador, principalmente na reta final, quando tudo se tornou mais difícil e ficava comigo até tarde, trabalhando junto, só para eu não desanimar.

Ao IGC (Instituto Geográfico e Cartográfico) e aos meus amigos de trabalho, por me apoiarem.

A minha orientadora Daniele e a minha coorientadora Tayná, por toda atenção, carinho, disposição e conhecimento transmitido, sem dúvida esse título eu dedico a elas.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas (PPGCC), à Universidade Estadual Paulista (UNESP) pela infraestrutura fornecida e aos colegas e amigos que fiz ao longo de toda trajetória.

Aos meus amigos, que não vou colocar o nome de todos, pois sou capaz de esquecer de alguém, vocês são muito especiais na minha vida.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Epígrafe

"A presença de Jesus no barco não significa que não haverá tempestades, mas sim que o barco não vai afundar."

RESUMO

A influência da neutrosfera na propagação dos sinais GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*) está relacionada com o ângulo de elevação do satélite, isto é, a espessura da camada da atmosfera que o sinal percorre. Um dos efeitos causados pela neutrosfera é o atraso na direção zenital devido à mesma (ZTD- *Zenith Tropospheric Delay*), o qual é gerado pela influência dos gases e vapor d'água. Esse atraso pode ser dividido em duas componentes: hidrostática (ZHD- *Zenith Hydrostatic Delay*), composta pelos gases e não hidrostática (ZWD- *Zenith Wet Delay*), composta pelo vapor d'água. Embora a componente não hidrostática represente apenas em torno de 10% do atraso, a mesma é de difícil predição, pois ocorre uma variação de aproximadamente 20% em poucas horas. Por esse motivo, diferentes estratégias foram desenvolvidas ao longo dos anos visando quantificar a componente não hidrostática, a partir da qual é possível obter os valores de PWV (*Precipitable Water Vapor*). Os valores de ZWD e PWV podem ser determinados a partir de diferentes fontes, dentre elas radiossondas (considerada como referência nesse trabalho), radiômetros, PNT (Previsão Numérica do Tempo) e etc. Outra opção que vem sendo muito utilizada para estimar o vapor d'água é o PWV-GNSS (vapor d'água precipitável adquirido por GNSS), que apresenta diversas vantagens, como: qualidade semelhante aos dados advindos por radiossonda, valores contínuos e alta resolução temporal e espacial, de acordo com a densidade de estações GNSS. Dessa forma, as observações de PWV-GNSS vêm sendo muito utilizadas em investigações meteorológicas. Neste sentido, nesse trabalho foi determinado o valor de ZTD para a RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS) utilizando o software Bernese com o método de posicionamento relativo. Além disso, constatou-se que o número de estações utilizadas no processamento pode não impactar significativamente nos resultados. Em um estudo de caso no Rio Grande do Sul, no qual ocorreu um evento extremo de precipitação, observou-se que a sensibilidade do ZTD não está relacionada somente a quantidade de chuva, mas também ao tempo decorrido sem chuva antes da precipitação, estudos resultados também mostraram que é possível observar um aumento entre 5 e 10 cm no valor de ZTD até duas horas antes do evento, podendo demonstrar a capacidade de prever a precipitação. Além disso, os valores de PWV obtidos por meio da radiossonda e de PWV-GNSS na estação SMAR (Santa Maria-RS), tiveram uma diferença média absoluta de aproximadamente 2,5 mm, enquanto na estação POAL (Porto Alegre-RS) a diferença média absoluta entre as diferentes fontes de PWV foi de 3,27 mm, indicando que o PWV-GNSS se aproxima da radiossonda, podendo contribuir na estimativa de eventos de precipitação.

Palavras-chaves: atraso da neutrosfera, PWV-GNSS, eventos extremos de precipitação, posicionamento GNSS.

ABSTRACT

The influence of the neutral atmosphere on the propagation of GNSS (Global Navigation Satellite Systems) signals is related to the satellite's elevation angle, that is, the thickness of the atmospheric layer the signal traverses. One of the effects caused by the neutral atmosphere is the delay it induces (ZTD – Zenith Tropospheric Delay), which is generated by the influence of gases and water vapor. This delay can be divided into two components: hydrostatic (ZHD – Zenith Hydrostatic Delay), composed of gases, and non-hydrostatic (ZWD – Zenith Wet Delay), composed of water vapor. Although the non-hydrostatic component represents only about 10% of the delay, it is difficult to predict, as it can vary by approximately 20% within a few hours. For this reason, different strategies have been developed over the years to quantify the non-hydrostatic component, from which PWV (Precipitable Water Vapor) values can be obtained. ZWD and PWV values can be determined from different sources, including radiosondes (considered the reference in this study), radiometers, NWP (Numerical Weather Prediction), etc. Another widely used option to estimate water vapor is PWV-GNSS (Precipitable Water Vapor obtained via GNSS), which offers several advantages, such as quality comparable to radiosonde data, continuous values, and high temporal and spatial resolution depending on GNSS station density. As a result, PWV-GNSS observations have been widely used in meteorological studies. In this context, the objective of this study was to determine the ZTD value for the RBMC (Brazilian Network for Continuous Monitoring of GNSS Systems) using the Bernese software with the relative positioning method. Additionally, it was found that the number of stations used in the processing may not significantly impact the results. In a case study in Rio Grande do Sul, where an extreme precipitation event occurred, it was observed that ZTD sensitivity is not only related to the amount of rainfall but also to the duration of the dry period preceding the precipitation. The study also showed that an increase of 5 to 10 cm in the ZTD value can be observed up to two hours before the event, indicating the potential to predict precipitation. Moreover, the PWV values obtained through radiosonde and PWV-GNSS at the SMAR station (Santa Maria, RS) had an average absolute difference of approximately 2.5 mm, while at the POAL station (Porto Alegre, RS), the average absolute difference between the different PWV sources was 3.27 mm, indicating that PWV-GNSS closely agrees with radiosonde-derived PWV and can contribute to the estimation and monitoring of precipitation events.

Keywords: neutral atmosphere delay, PWV-GNSS, extreme precipitation events, GNSS positioning

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Efeito atmosférico no sinal GNSS 8
Figura 2- Representação do processo de lançamento de uma radiossonda até a transmissão dos dados ... 15
Figura 3- Distribuição das estações meteorológicas de altitude (radiossondas) no mês de maio do ano de 2024 sobre o território brasileiro 16
Figura 4- Distribuição das estações GNSS pertencentes ao IGS 17
Figura 5-Distribuição das estações GNSS pertencentes ao NGL 18
Figura 6- Distribuição das estações GNSS pertencentes a rede SIRGAS 19
Figura 7- Representação do ciclo hidrológico 22
Figura 8- Estações automáticas, convencionais e pluviômetros do INMET 26
Figura 9- Pastas do software Bernese onde os arquivos são alocados 30
Figura 10- Página inicial do software Bernese 5.2. 32
Figura 11- Fluxograma de processamento para obtenção do ZTD 33
Figura 12- Localização das estações utilizadas no processamento 37
Figura 13- Séries temporais de (a) PWV-GPS_{Gipsy} e valores de PWV_{Radio} (pontos em vermelho); (b) PWV-$GNSS_{Bernese}$ e valores de PWV_{Radio} (pontos em vermelho); (c) diferença entre os valores de PWV-$GNSS_{Bernese}$ e PWV-GPS_{Gipsy}; e a (d) intensidade de precipitação observada pelo disdrômetro de Joss 43
Figura 14- Diferença do $PWV_{Bernese}$ variando o número de estações de 4 a 26 e o do Gipsy (Dif_Gipsy), comparando com a radiossonda (PWV_{Radio}) 44
Figura 15- Diferença do PWV variando o número de estações de 18 a 26 e o do Gipsy (Dif_Gipsy), comparando com a radiossonda (PWV_{Radio}) 45
Figura 16- Diferença média do dia 308 até 317 ao variar o número de estações de 4 até 26 46
Figura 17- Valores de ZTD com as diferentes fontes: Bernese, IBGE, SIRGAS, NGL e IGS durante o período de 13 de agosto a 01 de setembro (DOY 225 a 244) de 2023 47
Figura 18- Diferença dos valores de ZTD_{SIRGAS} com ZTD do Bernese, IBGE e do IGS, para as cinco regiões brasileiras durante o período de 13 de agosto a 01 de setembro (DOY 225 a 244) de 2023 48
Figura 19- Desvios padrão das diferentes fontes de ZTD no período de 13 de agosto a 01 de setembro (DOY 225 a 244) de 2023 para as estações BOAV, SAVO, BRAZ, CHPI e POAL 50
Figura 20- Valores de ZTD, para os dias 225 a 244 de 2023, com as diferentes fontes: Bernese, IBGE, SIRGAS, IGS e radiossonda 51
Figura 21- Valores de $ZTD_{Bernese}$ com resolução temporal de 5 minutos e 1 hora, além da precipitação, para as estações POAL e SMAR durante os dias 118 e 133 (27 de abril a 11 de maio) de 2024 53
Figura 22- Valores de $ZTD_{Bernese}$, precipitação, umidade relativa e temperatura da estação POAL no dia 118 de 2024 54
Figura 23- Valores de $ZTD_{Bernese}$, precipitação, umidade relativa e temperatura da estação POAL no dia 120 de 2024 55
Figura 24- Valores de $ZTD_{Bernese}$, precipitação, umidade relativa e temperatura da estação POAL no dia 121 de 2024 56
Figura 25- Valores de $ZTD_{Bernese}$, precipitação, umidade relativa e temperatura da estação POAL no dia 122 de 2024 57
Figura 26- Valores de $ZTD_{Bernese}$, precipitação, umidade relativa e temperatura da estação POAL no dia 123 de 2024 58
Figura 27- Valores de $ZTD_{Bernese}$, precipitação, umidade relativa e temperatura da estação POAL no dia 127 de 2024 59
Figura 28- Valores de $ZTD_{Bernese}$, precipitação, umidade relativa e temperatura da estação POAL no dia 129 de 2024 60

Figura 29- Valores de $ZTD_{Bernese}$, precipitação, umidade relativa e temperatura da estação POAL no dia 131 de 2024 61
Figura 30- Valores de $ZTD_{Bernese}$, precipitação, umidade relativa e temperatura da estação SMAR no dia 118 de 2024 62
Figura 31- Valores de $ZTD_{Bernese}$, precipitação, umidade relativa e temperatura da estação SMAR no dia 120 de 2024 63
Figura 32- Valores de $ZTD_{Bernese}$, precipitação, umidade relativa e temperatura da estação SMAR no dia 121 de 2024 64
Figura 33- Valores de $ZTD_{Bernese}$, precipitação, umidade relativa e temperatura da estação SMAR no dia 122 de 2024 65
Figura 34- Valores de $ZTD_{Bernese}$, precipitação, umidade relativa e temperatura da estação SMAR no dia 123 de 2024 66
Figura 35- Valores de $ZTD_{Bernese}$, precipitação, umidade relativa e temperatura da estação SMAR no dia 129 de 2024 67
Figura 36- Valores de $ZTD_{Bernese}$, precipitação, umidade relativa e temperatura da estação SMAR no dia 131 de 2024 68
Figura 37- Valores de $ZTD_{Bernese}$, precipitação, umidade relativa e temperatura da estação SMAR no dia 132 de 2024 69
Figura 38- Correlação entre a precipitação e o $ZTD_{Bernese}$ nas estações a) POAL e b) SMAR 70
Figura 39- Valores de $ZTD_{Bernese}$, ZTD_{IGS}, ZTD_{SIRGAS} e ZTD_{radio} para as estações POAL e SMAR, durante os dias 118 a 132 de 2024 71
Figura 40- Diferença entre o ZTD_{radio} e as demais fontes nas estações POAL e SMAR..... 72
Figura 41- Desvio padrão das diferentes fontes ZTD durante os dias 118 a 132, para as estações POAL e SMAR..... 74
Figura 42- Valores de precipitação e $PWV\text{-}GNSS_{Ber_INMET}$ e PWV_{Radio}, durante os dias 118 e 132 de 2024, para as estações POAL e SMAR 75
Figura 43- Correlação entre o $PWV\text{-}GNSS_{Ber_INMET}$ e a precipitação nas estações a) POAL e b) SMAR. 77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Média da diferença absoluta dos valores de ZTD do SIRGAS com o Bernese, IBGE e IGS, nas 5 regiões brasileiras 49
Tabela 2- Valores de RMSE das diferentes fontes de dados ZTD, para as estações BOAV, BRAZ e POAL 52
Tabela 3- Diferença média entre o ZTD_{radio} e as demais fontes 72
Tabela 4- RMSE das diferentes fontes 73
Tabela 5- Desvio padrão médio de cada fonte de ZTD 74

LISTA DE SIGLAS

ABIN - Agência Brasileira de Inteligência

AIUB- *Astronomical Institute, University of Bern*

ANA- Agência Nacional de Águas

BMF- *Brazilian Mapping Function*

CDDIS- *Crustal Dynamics Data Information System*

CEMADEN - Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais

CENAD- Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres

CENSIPAM- Centro Gestor e Operacional do Sistema de Proteção da Amazônia

CHUVA- *Cloud processes of tHe main precipitation systems in Brazil: A contribUtion to cloud resolVing modeling and to the GPM (GlobAl Precipitation Measurement*)

CIMA- Centro de Análise para a Atmosfera Neutra

CONICET- Conselho Nacional de Investigações Científicas e Técnicas da Argentina

CPTEC- Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos

ECMWF- *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*

EMAE- Empresa Metropolitana de Águas e Energia Elétrica

EMBRACE- Estudo e Monitoramento BRAsileiro de Clima Espacial

GLONASS- *Global Navigation Satellite System*

GNSS- *Global Navigation Satellite Systems*

GPS- *Global Positioning System*

IBAMA- Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis

IBGE- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IGG- Instituto de Geodésia e Geofísica

IGS- *International GNSS Service*

IMF- *Isobaric Mapping Function*

INMET- Instituto Nacional de Meteorologia

INPE- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

IPCC- *Intergovernmental Panel on Climate Change*

IWV- *Integrated Water Vapor*

GBAS- *Ground-Based Augmentation System*

GMF- *Global Mapping Function*

NCEP- *National Centers for Environmental Prediction*

NGL- *Nevada Geodetic Laboratory*

NMF- *Niell Mapping Function*

NOAA- *National Oceanic and Atmospheric Administration*

PCF- *Process Control File*

PNT- Previsão Numérica do Tempo

PPP- Posicionamento por Ponto Preciso

PWV- *Precipitable Water Vapor*

RBMC- Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas

RMS- *Root Mean Squar*

SBAS- *Satellite Based Augmentation System*

SIRGAS- Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas

UTC- Tempo Universal Coordenado

VMF- *Vienna Mapping Function*

VMF1- *Vienna Mapping Function 1*

VMF3- *Vienna Mapping Function 3*

ZHD- *Zenith Hydrostatic Delay*

ZTD- *Zenith Total Delay*

ZWD- *Zenith Wet Delay*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 1
1.1. Caracterização do tema de estudo 1
1.2. Objetivos 5
1.3. Justificativas 5
1.4. Estrutura da tese 7
2. NEUTROSFERA E SEUS EFEITOS NO GNSS 8
2.1. Modelos de atraso 10
2.1.1. Saastamoinen 10
2.1.2. Niell Mapping Function (NMF) 11
2.1.3. Vienna Mapping Function 1 (VMF1) 12
2.1.4. Função de Mapeamento Global (Global Mapping Function - GMF) 12
2.2. Estimativa do PWV a partir de dados GNSS 12
2.3. PWV obtido por meio de dados de estações meteorológicas de altitude 14
2.4. Centros que disponibilizam valores de atraso ZTD e IWV 16
2.4.1. Produto disponibilizado pelo IGS 16
2.4.2. Produto disponibilizado pelo NGL 18
2.4.3. Produto disponibilizado pelo SIRGAS 19
2.4.4. Produto disponibilizado pelo EMBRACE 20
3. PRECIPITAÇÃO E OS EVENTOS METEOROLÓGICOS 21
3.1. Precipitação 21
3.1.1. Eventos extremos e moderados de precipitação 23
3.1.2. Centros de monitoramento de precipitação no Brasil 23
3.1.2.1. CPTEC 23
3.1.2.1.1. CHUVA 24
3.1.2.2. INMET 26
3.1.2.3. CEMADEN 26
3.1.2.4. CENAD 27
4. METODOLOGIA 29
4.1. Configurações iniciais do Bernese 29
4.2. Processamento com os dados do Projeto CHUVA 35
4.3. Processamento com diferentes números de estações 36
4.4. Análise do ZTD disponibilizado por diferentes centros 38

4.5. Estudo de caso - Rio Grande do Sul 39
5. RESULTADOS E ANÁLISES 42
5.1. Processamento com os dados do Projeto CHUVA 42
5.2. Processamento com diferentes números de estações 43
5.3. Análise do ZTD disponibilizado por diferentes fontes de dados 46
5.4. Estudo de caso - Rio Grande do Sul 52
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS 78
REFERÊNCIAS 81

1. INTRODUÇÃO

1.1. Caracterização do tema de estudo

Uma das tecnologias espaciais mais avançadas utilizada nas atividades que envolvem posicionamento é o GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*), em que o princípio básico é a obtenção da distância entre a antena do receptor e no mínimo quatro satélites, para assim obter a coordenada do receptor (MONICO, 2008; LANGLEY, TEUNISSEN e MONTENBRUCK, 2017). O GNSS engloba os sistemas GPS (*Global Positioning System*), GLONASS (*Global Navigation Satellite System*), Galileo e Beidou-Compass, além dos sistemas de aumento baseados em satélites ou estações terrestres, SBAS (*Satellite Based Augmentation System*) e GBAS (*Ground-Based Augmentation System*), respectivamente (MONICO, 2008; LANGLEY, TEUNISSEN e MONTENBRUCK, 2017).

No caminho percorrido desde o satélite até o receptor em bases terrestres os sinais GNSS atravessam a atmosfera terrestre. Essa é composta por diversas camadas com diferentes composições, a qual pode ser dividida em função da temperatura, quantidade de vapor d'água, ionização e propagação de ondas eletromagnéticas. Com relação à propagação de ondas eletromagnéticas, a atmosfera terrestre é dividida em ionosfera e neutrosfera (MENDES, 1999; SEEBER, 2003; GOUVEIA, et al., 2020).

A neutrosfera é compreendida entre a superfície terrestre até, em média, 50 km de altura (VIANELLO e ALVES, 2000), sendo essa o foco desse trabalho. A mesma é composta por partículas neutras, gases e vapor d'água. Entre os efeitos causados pela neutrosfera pode-se citar: a atenuação, a cintilação e o atraso, sendo o atraso o efeito de maior magnitude. No que diz respeito ao atraso da neutrosfera, o mesmo é gerado pela influência dos gases e vapor d'água, podendo ser dividido em duas componentes: hidrostática, composta pelos gases, e não hidrostática, composta pelo vapor d'água (SAPUCCI, 2001; MONICO, 2008; GOUVEIA, et al., 2020). O atraso decorrente da componente hidrostática varia em função da temperatura, latitude e pressão atmosférica e pode ser estimado ou predito com razoável precisão, já que sua variação é pequena, sendo da ordem de 1% durante várias horas (SEEBER, 2003). Já o atraso devido à componente não hidrostática é gerado pela influência do vapor d'água atmosférico total e sua variação é muito maior, atingindo cerca de 20% em poucas horas, tornando assim muito difícil sua predição com boa precisão, inclusive quando se têm medidas de umidade de superfície disponíveis (SEEBER, 2003). O atraso da neutrosfera pode ser modelado

como um produto do atraso neutrosférico zenital (ZTD - *Zenith Total Delay*) e um fator geométrico, denominado como função de mapeamento (NIELL, 1996). Esses atrasos zenitais são: ZHD (*Zenith Hydrostratic Delay*) e ZWD (*Zenith Wet Delay*), componente hidrostática e não hidrostática, respectivamente. O ZWD pode ser convertido em PWV (*Precipitable Water Vapor* - Vapor D'água Precipitável) o qual é amplamente utilizado na meteorologia, para determinar o vapor d'água na atmosfera (HOBIGER e JAKOWSKI, 2017). O vapor d'água é o elemento que compõe a neutrosfera de grande importância para a manutenção da vida terrestre, como parte do efeito estufa da atmosfera ao absorver a radiação emitida pela superfície terrestre, participa do ciclo hidrológico e absorve parte da radiação solar no infravermelho (BENTON e ESTOQUE, 1954).

Existem algumas fontes de dados a partir das quais é possível obter os valores do ZWD, porém, as mesmas apresentam vantagens e desvantagens. As radiossondas, um dos equipamentos que compõe as estações meteorológicas de altitude, são lançadas na atmosfera por balões. Essas realizam medidas dos perfis verticais (temperatura, pressão, vapor d'água, etc.) da neutrosfera in loco, ou seja, em diferentes níveis de altitude da atmosfera. Porém, os sensores que compõe esse sistema têm um alto custo, resultando em restrições nos lançamentos, o que resulta em uma baixa resolução espacial (a maioria das radiossondas são lançadas próximas a aeroportos) e temporal (1 a 2 vezes ao dia – 0h e 12h UTC (Tempo Universal Coordenado) em geral. Já as observações de estações meteorológicas de superfície têm como vantagem obter registros de longo tempo e terem estações distribuídas em diversas regiões do Brasil, porém são deficientes pelo fato de serem locais (CAMPOS, 2018), ou seja, os dados coletados representam a condição climatológica daquela área onde está localizada a estação, mas podem não refletir as condições meteorológicas de regiões próximas, especialmente em áreas com relevo complexo ou grande variabilidade climática.

Dessa forma, observa-se que os sistemas de observação disponíveis para estimar o ZWD possuem deficiências. Logo, é possível afirmar que com o uso combinado de diferentes fontes de dados disponíveis, menor serão as deficiências na caracterização do ZWD e PWV, que estão correlacionados com a umidade atmosférica.

Uma alternativa para tais limitações seria o uso do PWV-GNSS (PWV obtido por GNSS). Além de apresentar qualidade semelhante a obtida pelas estações meteorológicas de altitude, tem a vantagem de ser contínuo (BONAFONI e BIONDI, 2016) e de obter alta resolução espacial, dependendo da localização geográfica e densidade de estações GNSS, mas principalmente pelo fato de apresentar alta resolução temporal, até 5 minutos, como é o caso, por exemplo, dos produtos do IGS (*International GNSS Service*) (IGS,

2025). Além disso, o IWV-GNSS pode ser estimado com valores acurados (2,7 e 3,8 kg m^{-2}) (SAPUCCI et al., 2007) em tempo real (ROCKEN et al., 1993) ou no modo pós-processado (SAPUCCI et al., 2007). Vale ainda destacar que a estimativa do PWV-GNSS pode ser obtida tanto no modo de posicionamento relativo, como no modo PPP (Posicionamento por Ponto Preciso).

O PWV-GNSS tem se apresentado como uma boa estratégia na análise de eventos de precipitação. Benevides, Catalao e Miranda (2015) analisaram o comportamento de uma série temporal de dados PWV-GPS em vários estudos de caso de precipitação intensa (precipitação média anual de 600 a 800 mm) na área de Lisboa em Portugal. Os autores destacaram que as precipitações intensas ocorrem em tendências descendentes após um longo período ascendente de PWV.

Sapucci et al. (2019) mostrou que na escala de 32 a 64 minutos antes de precipitações intensas há fortes oscilações de PWV-GPS, gerando um significativo aumento do conteúdo de umidade até atingir um valor máximo (de aproximadamente 48 mm), subsequentemente há uma forte redução e após um curto período a precipitação atinge um pico máximo. Este padrão foi definido como *Jump* PWV-GPS. O aumento de PWV-GPS pode ser explicado pela convergência de umidade em baixos níveis que são produzidas por ondas de gravidade geradas por liberação de calor latente em fortes processos convectivos. A diminuição de PWV-GPS, segundo os autores, pode estar associada a conversão de vapor d'água para água líquida. Os autores deixam claro que esse padrão é um indicativo de ocorrência de precipitações intensas (> 35 mm/h), logo, tais medidas apresentam potencial para aplicação na previsão de precipitação em tempo quase real (80 min) (SAPUCCI et al., 2019).

Tunali e Özlüdemir (2019) utilizaram um conjunto de estações do IGS localizadas em uma área afetada por uma inundação na Europa Central, ocorrida em 2013 e avaliaram o desempenho do PPP no modo pós-processado durante condições climáticas severas, com o intuito de analisar a estimativa ZWD utilizando dados GPS e GLONASS. Para isso, foram aplicados diferentes modelos para determinar o atraso da neutrosfera, além dos valores de ZHD a priori derivados do ECMWF (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*) e os ZHDs a priori baseados no NCEP (*National Centers for Environmental Prediction*). Todas as soluções de PPP concordaram com os valores do IGS. A Raiz do Erro Médio Quadrático (*Root Mean Squared Error* - RMSE) do PPP utilizando a VMF1 (*Vienna Mapping Function 1*) (BOEHM et al., 2006a) apresentou melhor desempenho, com RMSE de 4 mm.

Em um estudo realizado por Sugiyama, Nishino e Kusaka (2024) o PWV foi medido de abril de 2021 a abril de 2022 usando dados GNSS no Deserto do Atacama, Chile. O PWV-GNSS foi obtido por meio do CSRS-PPP (*Canadian Spatial Reference System Precise Point Positioning*) e comparado com as medições do radiômetro. Ao usar dados GNSS, o PWV-GNSS estimado mostrou um deslocamento sistemático de +1,08mm. Ao combinar dados GNSS com dados de um barômetro, que foi colocado junto ao receptor GNSS, o PWV estimado mostrou um deslocamento sistemático menor de -0,05 mm.

A resolução temporal das observações GNSS pode impactar a precisão do PWV em previsões de curto prazo, a distribuição espacial das estações GNSS afetam a capacidade de capturar variações locais no vapor d'água. Além disso, a aplicação de modelos neutrosféricos também pode influenciar, já que diferentes modelos de mapeamento neutrosférico, têm impacto direto nas estimativas de PWV e por fim as condições atmosféricas variáveis, ou seja, a temperatura, umidade e pressão, afetam a qualidade das medições GNSS e, consequentemente, as estimativas de PWV.

Nota-se que o uso de dados GNSS na determinação do PWV tem apresentado bons resultados, além de valores acurados (mm). Muitos trabalhos na investigação do PWV, a partir de satélites de monitoramento dos sistemas da Terra, vêm sendo desenvolvidos, o que mostra a importância desse tema, como pode ser consultado em: Li et al. (2022); Wei et al (2023); SHANGGUAN et al. (2023) e SUGIYAMA, NISHINO e KUSAKA (2024).

Dessa maneira, essa pesquisa considerou que a quantidade e a distribuição espacial das estações GNSS da RBMC, utilizadas no processamento relativo no software científico Bernese, podem influenciar na qualidade das estimativas do atraso (ZTD) e, consequentemente, do PWV. Por sua vez, as variações temporais do ZWD e do PWV-GNSS apresentam relação significativa com a evolução da umidade atmosférica e podem anteceder a ocorrência de precipitações intensas, possibilitando seu uso como informação complementar para o monitoramento e a previsão de eventos extremos.

Adicionalmente, considera-se a hipótese de que as variações do ZTD, principalmente na componente úmida (ZWD) refletem mudanças nas condições atmosféricas associadas à ocorrência de eventos extremos de precipitação, de modo que esses parâmetros possam atuar como indicadores precursores desses eventos. A partir dessas relações, pressupõe-se que o vapor d’água precipitável obtido por GNSS (PWV-GNSS) possa apresentar relação significativa com a evolução da precipitação em eventos extremos e, portanto, constituir uma fonte de informação relevante para o monitoramento

atmosférico, especialmente em cenários de condições meteorológicas extremas, podendo ser utilizado para o aprimoramento de estudos voltados à previsão de curtíssimo prazo (*nowcasting*) de precipitações intensas.

1.2. Objetivos

O objetivo principal desse trabalho foi quantificar o PWV a partir do processo de estimação do ZWD por meio de observações de estações GNSS, no modo pós processado, para previsão de eventos extremos de precipitação. Para tanto, compareceram os seguintes objetivos específicos:

- Determinação do atraso zenital da neutrosfera por meio do posicionamento relativo GNSS no modo pós-processado;
- Investigação da melhor estratégia de processamento de dados GNSS para a determinação do ZTD;
- Avaliação da quantidade de estações buscando melhoria na obtenção do ZTD;
- Validação do atraso a partir de dados de diferentes centros;
- Validação do PWV-GNSS por meio das estações de superfície e de altitude (radiossondas);
- Realização de estudo de caso para período e área investigada previamente com ocorrência de evento extremo de precipitação, com o intuito de identificar um padrão do comportamento do ZTD e PWV.

1.3. Justificativas

Os eventos climáticos extremos são uma grande preocupação para a sociedade atual e futura. Detectar, e principalmente prever eventos extremos é de suma importância, uma vez que podem ser evitados muitos danos materiais, mas principalmente vítimas fatais.

A popularização do uso do GNSS, utilizado nos trabalhos de campo em eventos de desastres, juntamente com as imagens e os softwares, são ferramentas muito importantes, que auxiliam de forma decisiva na identificação, monitoramento e mapeamento de desastres naturais e eventos extremos, em todas as partes do mundo (MARCELINO, 2008).

O Brasil está localizado em uma área em que não é comum a ocorrência de desastres naturais como: terremotos, furacões e tsunamis. Apesar disso, há um número

crescente de outros desastres naturais como enchentes e deslizamentos de encostas de morros. A preocupação em prever esses eventos, além de descrevê-los após sua ocorrência, tem ganhado preocupação e investimento do governo, em parceria com a pesquisa científica e ações do governo local, como a defesa civil. O CEMADEN (Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais) é um desses investimentos de parceria entre a ciência e o governo, o qual foi criado com o objetivo de realizar o monitoramento das ameaças naturais em áreas de riscos em municípios brasileiros suscetíveis à ocorrência de desastres naturais (CEMADEN, 2025).

A região equatorial, na qual grande parte do território brasileiro está inserido, está exposta a intensa luz solar durante todo o ano. O vapor d'água é responsável pela estabilização atmosférica, pois quanto mais quente o ar, a umidade relativa diminui, e o ar mais quente retém maior quantidade de vapor d'água, quando têm disponibilidade e assim forma gotículas que eventualmente produzem a chuva (SANTOS et al, 2013; DRISU, 2017). Essa circunstância é responsável pela dinâmica atmosférica e pela incerteza climática na região tropical (LYSTAD, 2011; DENG, 2012).

Nesse sentido, esse trabalho objetiva gerar como resultado informações de vapor d'agua (ZWD, PWV) pós-processado, que possam ser utilizadas como informações complementares para a análise do comportamento da atmosfera. Essas estimativas poderão subsidiar a avaliação e o aprimoramento de correções em estudos futuros voltados ao desenvolvimento de ferramentas de previsão de curtíssimo prazo (*nowcasting*) para eventos extremos de precipitação.

Vale ressaltar que o uso de dados GNSS na detecção de eventos extremos de precipitação tem diversas vantagens, dentre elas: não ter que implantar novas estações, uma vez que há redes de estações que coletam dados continuamente distribuídas ao longo de todo o globo (IGS, SIRGAS (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas), RBMC-IBGE (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS-Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), dentre outras); os dados são disponibilizados continuamente e sem custo adicional; além do grande volume de dados (24h/dia), entre outras.

Além disso, o tema desse projeto está inserido no 13° Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU: "Tomar medidas urgentes para combater a mudança climática e seus impactos", a qual até 2030 deve implementar por todos os países do mundo dezessete ODS. Por fim, o tópico principal dessa pesquisa também está inserido no Tema 6 do Projeto Capes PrInt: "Biodiversidade e mudanças climáticas", no objetivo 2 "Mudanças climáticas: bases físicas, adaptação e mitigação".

1.4. Estrutura da tese

A tese está dividida em 6 capítulos, sendo que o primeiro é composto pela introdução, objetivos e justificativas da pesquisa realizada. No segundo é apresentado uma breve teoria sobre a neutrosfera e seus efeitos no GNSS. Já no terceiro capítulo tem-se um resumo sobre precipitação e eventos extremos. Todos os materiais e métodos utilizados nos estudos desenvolvidos nessa tese estão dispostos no quarto capítulo. No quinto capítulo tem-se os resultados obtidos por meio das metodologias apresentadas no capítulo anterior. E por fim, no sexto capítulo encerra-se com as considerações finais e recomendações para trabalhos futuros.

2. NEUTROSFERA E SEUS EFEITOS NO GNSS

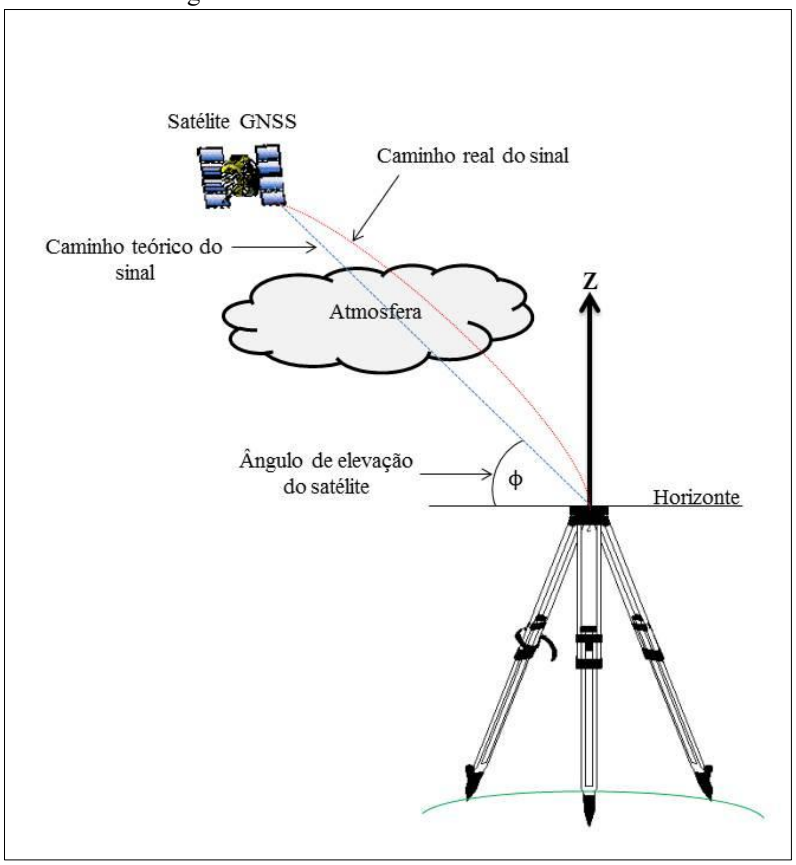
Na neutrosfera (Chapman 1950; Mendes 1999; Gouveia et al. 2020) tem-se que a maior concentração dos gases encontra-se até uma altitude de 12 km, contendo dióxido de carbono, argônio, nitrogênio, oxigênio, vapor d'água, entre outros gases. Para frequências abaixo de 30 GHz, a neutrosfera comporta-se como um meio não dispersivo, ou seja, a refração independe da frequência do sinal transmitido, depende apenas das propriedades termodinâmicas do ar (LEICK, 1995).

O índice de refração (n) pode ser descrito pela refratividade (N), a qual descreve o desvio da refração do meio em relação ao vácuo (BEVIS *et al*, 1992):

$$N = 10^6(n - 1). \quad (1)$$

Além disso, o índice de refração da neutrosfera depende da temperatura, pressão, umidade, compressibilidade e características elétricas das moléculas. Porém, o atraso devido à neutrosfera depende da distância do zênite ou ângulo de elevação do satélite. Se a distância ao zênite é z, o atraso do caminho de propagação é proporcional a $1/\cos z$. As interações entre o sinal GNSS e a atmosfera são representadas na Figura 1.

Figura 1- Efeito atmosférico no sinal GNSS



Fonte: Adaptado de Opaluwa et al. (2014).

A distância ao zênite é dada por:

$$z = 90° - \phi \quad (2)$$

logo,

$$\frac{1}{\cos z} = \frac{1}{\operatorname{sen} \phi} \quad (3)$$

em que ϕ é o ângulo de elevação do satélite, conceito utilizado para função de mapeamento.

O atraso devido a neutrosfera pode ser aproximado como a soma dos efeitos das componentes hidrostática e não hidrostática. Geralmente, cada uma das componentes é expressa como o produto do atraso zenital (vertical) por uma função de mapeamento, a qual relaciona o atraso vertical com o atraso para ângulos de elevação do satélite. De forma simplificada, o atraso decorrente da neutrosfera (TD) pode ser escrito da seguinte forma (MACMILLAN, 1995):

$$TD = [ZHD * m_h(\phi) + ZWD * m_w(\phi)], \quad (4)$$

em que:

ZHD , ZWD : atraso zenital das componentes hidrostática e não hidrostática, respectivamente;

$m_h(\phi), m_w(\phi)$: funções de mapeamento que relacionam o atraso zenital das componentes hidrostática e não hidrostática com o ângulo de elevação (ϕ).

O atraso zenital das componentes hidrostática e não hidrostática podem ser descritos como:

$$ZHD = 10^{-6} \int_{h_0}^{h_{top}} \left(k_1 \frac{P_d}{T} z_d^{-1} \right) dh \quad (5)$$

$$ZWD = 10^{-6} \int_{h_0}^{h_{top}} \left(k_2' \frac{e}{T} z_w^{-1} + k_3 \frac{e}{T^2} z_w^{-1} \right) dh \quad (6)$$

em que:

k_1, k_2' e k_3 : constantes da refratividade do ar (RUEGER, 2002);

P_d : representa a pressão parcial da componente hidrostática;

Z_d^{-1} e Z_w^{-1}: representam, respectivamente, o inverso da constante de compressibilidade das componentes hidrostática e não-hidrostática, as quais são dadas por:

$$Z_d^{-1} = 1 + \rho_d \left[57{,}97.10^{-8} \left(1 + \frac{0{,}52}{T} \right) - 9{,}4611.10^{-4} \frac{T_c}{T^2} \right] \quad (7)$$

$$Z_w^{-1} = 1 + 1650 \frac{e}{T^3} [1 - 0{,}01317\, T_c + 1{,}75.10^{-4}\, T_c^2 + 1{,}44.10^{-6}\, T_c^3] \quad (8)$$

As funções de mapeamento possibilitam obter o valor do efeito da neutrosfera para qualquer ângulo de elevação do satélite em relação ao receptor (GOUVEIA, 2019).

Ao longo do tempo surgiram diversas funções de mapeamento, a fim de obter o atraso de uma forma cada vez mais acurada, em ordem cronológica pode-se citar: Marini (1972), Chao (1974), Davis (1985), Herring (1992), NMF (*Niell Mapping Function*) (NIELL, 1996), IMF (*Isobaric Mapping Function*) (2001), VMF (*Vienna Mapping Function*) Bohm et al. (2006), VMF1+GMF (*Global Mapping Function*) (2006), UNB/VMF (2012), VMF3 (*Vienna Mapping Function 3*) (2017) e BMF (*Brazilian Mapping Function*) (GOUVEIA, 2019).

Para a assimetria azimutal existe a possibilidade de estimar os gradientes da neutrosfera. Isso ocorre, pois, o atraso estimado em uma determinada época pode ter um valor diferente para direções distintas ao ser projetado em uma direção inclinada, pois apesar dessas direções possuírem o mesmo ângulo de elevação, há heterogeneidade das condições meteorológicas nos trajetos percorridos pelos sinais de diferentes satélites (DE OLIVEIRA JUNIOR, 2015).

2.1. Modelos de atraso

Nessa seção são apresentados alguns modelos e funções de mapeamento da neutrosfera, os quais são os mais utilizados.

2.1.1. Saastamoinen

No modelo de Saastamoinen admite-se uma atmosfera em equilíbrio hidrostático e que a quantidade total de vapor d'água concentra-se na neutrosfera, como um gás ideal. Segundo Saastamoinen (SAASTAMOINEM, 1973 apud HOPFIELD, 1996), as componentes do atraso neutrosférico para seu modelo são dadas por:

$$T_{ZH} = 0{,}00277DP \tag{9}$$

$$T_{ZW} = 0{,}002277D\left(\frac{1255}{T} + 0{,}05\right)e \tag{10}$$

em que:

P: pressão atmosférica (dada em hPa);

e: pressão do vapor d'água, a qual é dada por:

$$e = 6{,}108\left(10^{\frac{7.5\,T}{237.3\,T}}\right) \tag{11}$$

T: temperatura (Kelvin);

D: correção em relação a latitude (φ) e a altitude (h) em quilômetros, que pode ser dada em:

$$D = 1 + 0{,}0026\cos 2\varphi + 0{,}00028h \tag{12}$$

2.1.2. Niell Mapping Function (NMF)

A NMF tem como base a função de Marini (MARINI, 1972). A NMF é obtida por meio de observações de mudança temporal e localização geográfica, logo, a NMF não considera a medida da temperatura da superfície na obtenção do atraso zenital neutrosférico.

No que diz respeito à componente hidrostática, os coeficientes são dados em função do dia do ano, latitude e altitude da estação. Já em relação à componente não hidrostática, depende apenas da latitude da estação. Dessa maneira, a função de mapeamento de Niell é dada por (NIELL, 1996):

$$m_h(E) = \frac{1+\frac{a_h}{1+\frac{b_h}{1+c_h}}}{sen(E)+\frac{a_h}{sen(E)+\frac{b_h}{sen(E)+c_h}}} + \left\{ \frac{1}{sen(E)} - \frac{1+\frac{a_{ht}}{1+\frac{b_{ht}}{1+c_{ht}}}}{sen(E)+\frac{a_{ht}}{1+\frac{b_{ht}}{sen(E)+c_h}}} \right\} Hx10^{-3} \tag{13}$$

$$m_w(E) = \frac{1+\frac{a_w}{1+\frac{b_w}{1+c_w}}}{sen(E)+\frac{a_w}{sen(E)+\frac{b_w}{sen(E)+c_w}}} \tag{14}$$

em que:

$m_h(E)$: função de mapeamento para a componente hidrostática;

$m_w(E)$: função de mapeamento para a componente não hidrostática;

E: ângulo de elevação do satélite;

a_h, b_h , c_h, a_w, b_w e c_w: valores que são calculados utilizando os coeficientes das componentes hidrostáticas e não hidrostáticas de acordo com a latitude (Niell (1996));

a_{ht}, b_{ht} e c_{ht}: 2,53x10^{-5}, 5,49x10^{-3} e 1,14x10^{-3}, respectivamente.

2.1.3. Vienna Mapping Function 1 (VMF1)

A VMF1 é fornecida pelo IGG (Instituto de Geodésia e Geofísica) da Universidade de Tecnologia de Viena[1]. Ela é uma atualização da VMF, sendo que na VMF1 considerou 40 anos de dados de reanálise do ECMWF, em que os coeficientes b e c foram ajustados por mínimos quadrados. Os parâmetros da VMF1 são disponibilizados em 4 arquivos diários: às 0h, 6h, 12h e 24h, com os valores (a_h, a_w) em uma grade global de 2,5° x 2° em longitude e latitude, respectivamente (BOEHM, WERL e SCHUH, 2006).

2.1.4. Função de Mapeamento Global (Global Mapping Function - GMF)

A GMF se baseia em grades globais de 15° × 15° de perfis médios mensais para pressão, temperatura e umidade dos dados de reanálise de 40 anos do ECMWF, os coeficientes (a_h, a_w) foram determinados para o período de setembro de 1999 a agosto de 2002 aplicando a mesma estratégia empregada para a VMF1.

Semelhante à NMF, os valores dos coeficientes requerem apenas as coordenadas da estação e o dia do ano como parâmetros de entrada. Ao comparar a GMF aos valores de 6 horas da VMF1, ocorre uma ligeira degradação na precisão de curto prazo usando a GMF. Porém, os vieses regionais de altura e os erros anuais da NMF são significativamente reduzidos com a GMF (BOEHM, 2006).

2.2. Estimativa do PWV a partir de dados GNSS

O termo PWV é utilizado quando se refere à altura de uma coluna equivalente de água líquida na superfície e é dado em milímetros, enquanto denomina-se IWV (*Integrated Water Vapor*) no que tange à massa de vapor d'água por unidade de área, dado em kg/m^2 (Bevis *et al.*,1992). A conversão de PWV para IWV se dá ao dividir o IWV pela densidade da água líquida (ρ_a).

A componente não hidrostática da neutrosfera pode ser convertida em PWV, que é uma medida difícil de se obter, visto a sua variabilidade em curto período de tempo. O vapor d'água é um importante constituinte da atmosfera por interferir na distribuição de

[1] https://vmf.geo.tuwien.ac.at/

temperatura, uma vez que participa ativamente dos processos de absorção e emissão de calor sensível para a atmosfera. Além disso, a temperatura atua como veículo de energia ao transferir calor latente de evaporação de uma região para outra, o qual é liberado como calor sensível, quando o vapor se condensa (SILVA, 2009; CAMPOS, 2018). O PWV pode ser obtido a partir do ZWD, que é uma medida métrica. Aplicando a constante de proporcionalidade (ψ) é possível determinar a quantidade de vapor d'água integrado na atmosfera na direção vertical (zenital) em milímetros (BEVIS et al., 1992):

$$\mathrm{PWV} = \mathrm{ZWD} * \psi \tag{15}$$

sendo

$$\psi = \frac{10^6}{\mathrm{R_v}\left[\mathrm{K'_2} + \frac{\mathrm{K_3}}{\mathrm{T_m}}\right]} \tag{16}$$

em que:

$\mathrm{R_v}$: constante específica para o vapor d'água ($\mathrm{R_v}$ = 461,5181 J $\mathrm{Kg^{-1}\ K^{-1}}$);

$\mathrm{K'_2}$: 71,2952 K/hPa (RUEGER, 2002);

$\mathrm{K_3}$: 375463 $\mathrm{K^2}$/hPa (RUEGER, 2002);

$\mathrm{T_m}$: temperatura média (K) do perfil da neutrosfera ponderado pela concentração do vapor d'água (DAVIS et al., 1985).

A qualidade dos valores de PWV está diretamente ligada a qualidade dos valores de $\mathrm{T_m}$. Os valores de $\mathrm{T_m}$ podem ser obtidos por meio de perfis de estações meteorológicas de altitude, mas para tornar as medidas de PWV independentes das mesmas, pode-se modelar os valores de $\mathrm{T_m}$ a partir de medidas realizadas em superfície ou empregando modelos de previsão numérica de tempo. Em Sapucci et al. (2014) foi realizado um estudo sobre a modelagem de $\mathrm{T_m}$ no Brasil, o qual apresentou modelos específicos para a região de estudo. Assim, um modelo mais confiável e preciso foi desenvolvido para região brasileira:

$$\mathrm{T_m} = 0{,}558\, T_s + 0{,}0105\, P_s + 110{,}578 \tag{17}$$

em que:

T_s: temperatura do ar medida na superfície;

P_s: pressão atmosférica medida na superfície.

A meteorologia por meio do GNSS e a relação com o vapor d'água identificada por Bevis et al. (1992), expressaram forte correlação entre o atraso úmido no zênite (ZWD) derivado do GNSS e o vapor d'água atmosférico, contribuindo positivamente para as análises atmosféricas (TUNALI e OZLUDEMIR, 2019).

Tregoning et al. (1998) mostraram que as estimativas de PWV-GNSS apresentavam um RMSE de 1–3 mm em comparação com medições atmosféricas tradicionais, como radiossondas e sensoriamento remoto.

Em um estudo realizado por Li, X. et al. (2014) foi desenvolvido um sistema de processamento de PWV-GPS em tempo real, aplicando correções de ambiguidade, órbita de satélite, relógio e atraso de fase. Os resultados mostram que uma precisão de 1,0 a 2,0 mm é atingível para o novo valor de IWV baseado em GPS em tempo real.

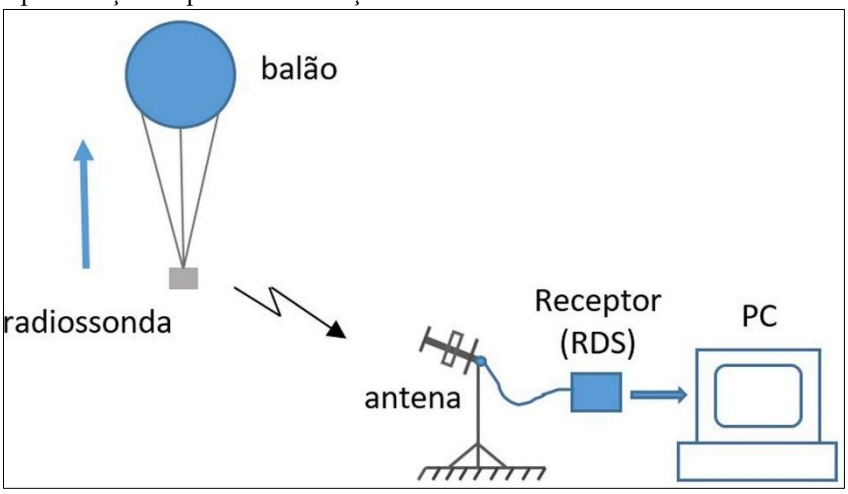
Já Wu et al. (2022) identificaram e analisaram os principais fatores que influenciam a precisão e a utilidade do PWV-GNSS em previsões em tempo real, ou de curtíssimo tempo (*nowcasting*), que são essenciais para prever condições meteorológicas severas.

2.3. PWV obtido por meio de dados de estações meteorológicas de altitude

As estações meteorológicas de altitude (equipadas com radiossondas) são carregadas a partir de um balão preenchido com gás hidrogênio ou hélio e chegam a atingir cerca de 25 km de altitude. Durante o voo, a radiossonda envia os parâmetros atmosféricos em diferentes altitudes, via rádio, para a estação que está em terra (OLIVEIRA et al., 2018). Elas são instrumentos muito utilizados por centros meteorológicos para fornecer um diagnóstico (medidas *in loco*) das condições atmosféricas (SAPUCCI, 2001). O atraso (ZTD, ZHD e ZWD) e por consequência o PWV obtido a partir dos dados fornecidos por essas estações podem ser considerados como referência quando comparados aos demais modelos.

O Ministério da Defesa Comando da Aeronáutica estabelece os procedimentos de lançamento de uma estação meteorológica de altitude, como a recomendação em relação ao horário, os quais são recomendados que ocorram às 00h, 06h, 12h e 18h UTC (CIRCEA 36-3, 2017). Porém é muito comum os lançamentos ocorrerem a cada 12 horas: às 0 e 12 horas UTC devido ao custo operacional (BEVIS et al., 1992). Apesar dos dados das estações meteorológicas de altitude apresentarem valores com precisão, é uma técnica de alto custo, logo esse fato acaba restringindo o número de estações e também de lançamentos diários das radiossondas (GOUVEIA, 2019). A Figura 2 mostra a o processo de lançamento de uma radiossonda até a transmissão de seus dados.

Figura 2- Representação do processo de lançamento de uma radiossonda até a transmissão dos dados

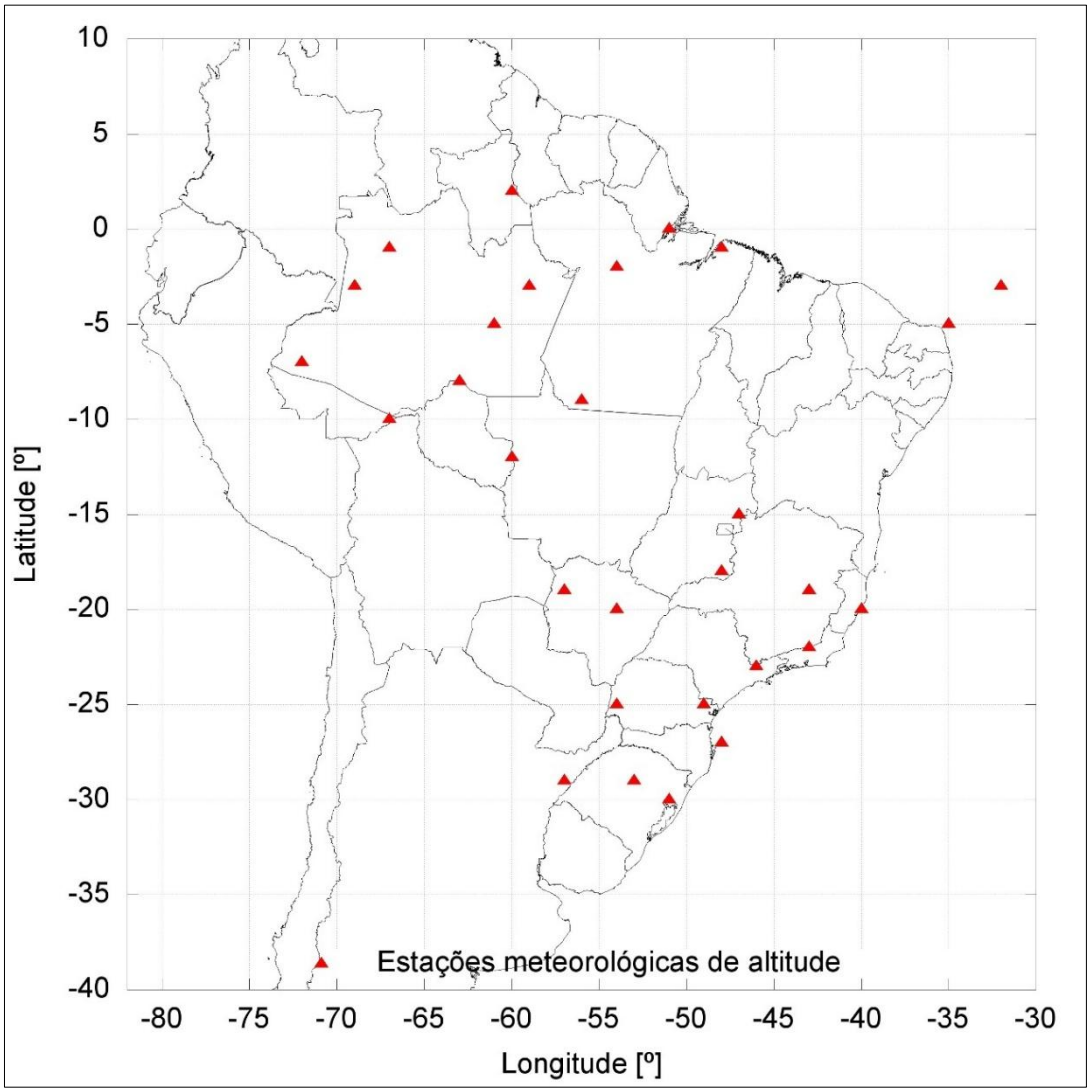


Fonte: Oliveira, Amorim, & Dereczynski, 2018.

Os parâmetros atmosféricos obtidos pelas estações meteorológicas de altitude são perfis de pressão, altura geopotencial, temperatura do ponto de orvalho, temperatura do ponto de gelo, umidade relativa, umidade relativa em relação ao gelo, taxa de mistura, direção do vento, velocidade do vento, temperatura potencial, temperatura potencial equivalente e temperatura potencial virtual.

A Figura 3 apresenta a distribuição das estações meteorológicas de altitude no mês de maio do ano de 2024 sobre o território brasileiro, de acordo com o banco de dados da Universidade de Wyoming (WYOMING, 2024).

Figura 3- Distribuição das estações meteorológicas de altitude (radiossondas) no mês de maio do ano de 2024 sobre o território brasileiro



Elaborado pelo autor.

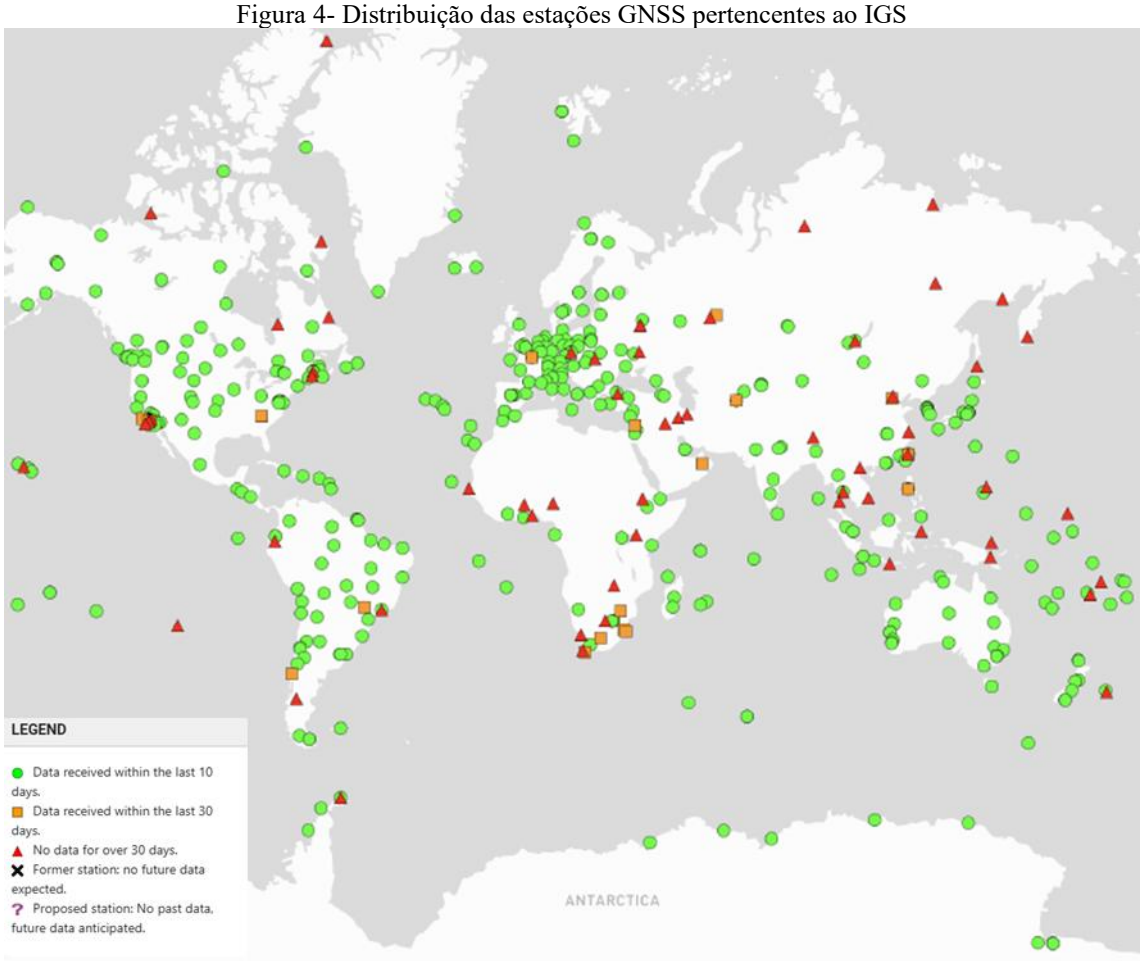
2.4. Centros que disponibilizam valores de atraso ZTD e IWV

Diversos centros no mundo disponibilizam valores de IWV, mas principalmente de ZTD. Alguns possuem estações GNSS distribuídas somente em uma região específica, enquanto outros têm estações espalhadas mundialmente. Além disso, cada centro utiliza um software em específico, além de diferentes estratégias de processamento. Por esse motivo, nessa seção serão apresentados alguns desses centros mundiais e regionais, com foco no Brasil.

2.4.1. Produto disponibilizado pelo IGS

Os centros de análise associados ao IGS geram produtos da neutrosfera a partir de dados das estações GNSS. Esses produtos incluem estimativas a cada cinco minutos do atraso zenital (ZTD) e componentes do gradiente norte e leste da neutrosfera. Os dados estão disponíveis em arquivos diários no site do CDDIS[2] (*Crustal Dynamics Data Information System*), para mais de 350 estações GNSS da rede IGS. Vale ressaltar que atualmente existem 17 estações IGS no território brasileiro, como mostra a Figura 4. Os círculos na cor verde significam que essas estações receberam dados nos últimos 10 dias, enquanto os quadrados em laranja apresentam as estações que receberam dados nos últimos 30 dias e os triângulos em vermelho as estações que estão há mais de 30 dias sem receber dados, sendo a última atualização dessa Figura foi em 27 de dezembro de 2023, no relatório "IGS Technical Report 2023".

Figura 4- Distribuição das estações GNSS pertencentes ao IGS



Fonte: Adaptado de IGS (2025).

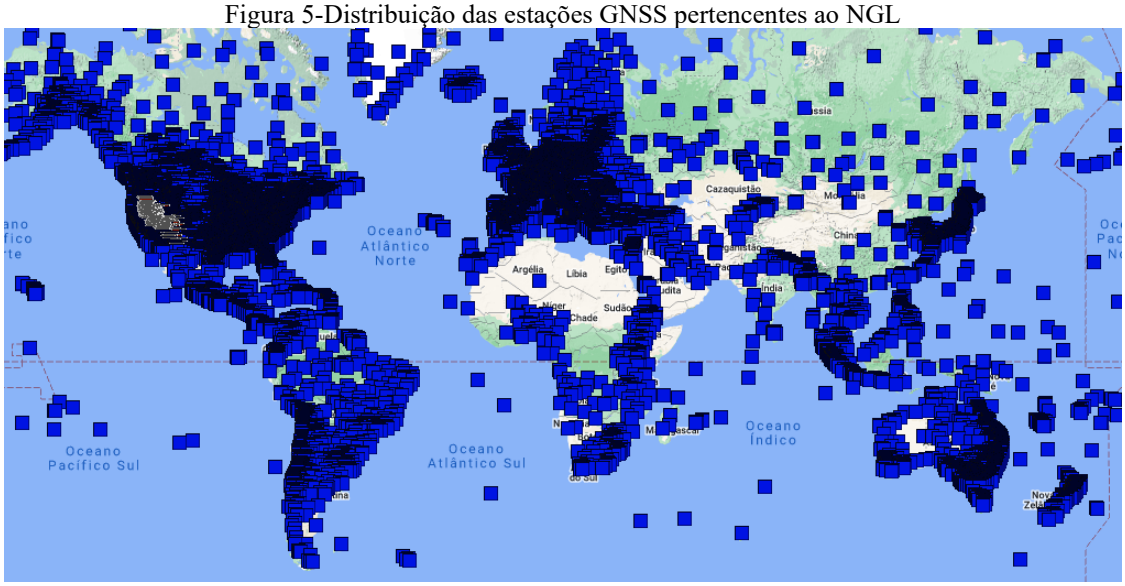
[2] https://cddis.nasa.gov/archive/gnss/products/troposphere/zpd/

O centro utiliza o software GIPSY na obtenção do ZTD, para isso utiliza o método PPP (Byun e Bar-Sever, 2009). Ao final, o ZTD é disponibilizado com uma resolução temporal de 5 minutos, para 350 estações, espalhadas no mundo e com precisão de 4 mm.

2.4.2. Produto disponibilizado pelo NGL

O NGL[3] (*Nevada Geodetic Laboratory*) coleta e processa dados GPS de mais de 18.600 estações distribuídas no mundo desde 1994. Atualmente são disponibilizados dados de: ZTD, gradiente norte, gradiente leste, vapor d'água e temperatura média ponderada, todos com intervalo de 5 minutos (NGL, 2025). A Figura 5 apresenta a distribuição de todas as estações que pertencem ao NGL.

Figura 5-Distribuição das estações GNSS pertencentes ao NGL



Fonte: Adaptado de NGL (2024).

Os produtos NGL são gerados usando o método de PPP no software GipsyX versão 1.0 da JPL (*Jet Propulsion Laboratory*) com órbitas e relógios também da JPL, dados em grade VMF1 e parâmetros de função de mapeamento como entradas (DING e CHEN, 2020).

[3] http://geodesy.unr.edu/

2.4.3. Produto disponibilizado pelo SIRGAS

Dentro do processamento semanal da rede de monitoramento contínuo do SIRGAS[4] (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas) (SIRGAS-CON), os Centros de análises do SIRGAS estimam o ZTD com uma taxa de amostragem de 1 hora. Dessa maneira, essas estimativas do ZTD são os dados de entrada para a geração de produtos da neutrosfera do SIRGAS, que fornece estimativas combinadas semanais da neutrosfera com alta confiança para cada estação da rede SIRGAS. As posições das estações são obtidas por meio das soluções semanais combinadas do SIRGAS. Assim, estações sem posições estimadas em uma combinação semanal são excluídas da solução da neutrosfera combinada (SIRGAS, 2025). A Figura 6 mostra a distribuição das estações GNSS pertencentes a rede SIRGAS.

Figura 6- Distribuição das estações GNSS pertencentes a rede SIRGAS



Fonte: Adaptado de SIRGAS (2024).

O CIMA (Centro de Análise para a Atmosfera Neutra) é responsável por calcular os produtos finais da neutrosfera fornecidos pelo SIRGAS, o qual é operado pela UNCuyo

[4] https://sirgas.ipgh.org/pt/organizacao/sobre-nos/

(Facultad de Ingeniería da Universidad Nacional de Cuyo) (Mendoza, Argentina) em cooperação com a *Facultad de Ingeniería da Universidad Juan Agustín Maza* (Mendoza, Argentina) e com o apoio do CONICET (Conselho Nacional de Investigações Científicas e Técnicas da Argentina).

Os ZTD disponibilizados pelo SIRGAS são gerados semanalmente com uma latência de 30 dias e estão disponíveis com uma taxa de amostragem de hora em hora em arquivos diários, desde janeiro de 2014 (SIRGAS, 2025). A obtenção do ZTD é dada por meio do Bernese 5.2., aplicando o posicionamento relativo, onde o ZHD a priori é determinado por meio da VMF1 e o ZWD estimado utilizando a mesma função de mapeamento.

2.4.4. Produto disponibilizado pelo EMBRACE

O EMBRACE (Estudo e Monitoramento BRAsileiro de Clima Espacial) foi criado em agosto de 2007 por um grupo de trabalho designado pela equipe do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) para desenvolver e operar um programa de clima espacial (EMBRACE, 2025).

O EMBRACE disponibiliza diversos produtos, dentre eles o IWV e o ZTD. O ZTD é disponibilizado para as estações pertencentes a RBMC com uma resolução de 5 minutos. Já em relação ao IWV, o mesmo também é disponibilizado com uma resolução temporal de 5 minutos, porém há poucas estações que fornecem esse tipo de dado. Além disso, o ZTD e o IWV são gerados com um ângulo de elevação de 7° e a função de mapeamento utilizada é a VMF (EMBRACE, 2025).

3. PRECIPITAÇÃO E OS EVENTOS METEOROLÓGICOS

Nessa seção são apresentados alguns conceitos básicos sobre precipitação e eventos extremos de precipitação, visto que esse trabalho tem sua especialidade na Geodésia, sendo essa uma ferramenta para a meteorologia. Além disso, são descritos os principais centros que monitoram e quantificam a precipitação ocorrida no território brasileiro.

3.1. Precipitação

Segundo Almeida (2016), a precipitação está relacionada à queda livre da água do céu, seja na forma líquida ou sólida. Ela é responsável por retornar a maior parte da água que recicla no planeta, tornando-se assim, um dos principais componentes do ciclo hidrológico, como mostra a Figura 7.

O processo de formação das gotas de água se dá a partir da grande quantidade de partículas de impurezas naturais ou não na atmosfera, onde algumas das partículas sólidas são fragmentos de cloreto de sódio, resultado da evaporação dos oceanos. Além disso, há outras partículas denominadas higroscópicas (propriedade que certos materiais possuem de absorver água), em torno das quais o vapor d'água se condensa (núcleo de condensação) (VIANELLO e ALVES, 1991).

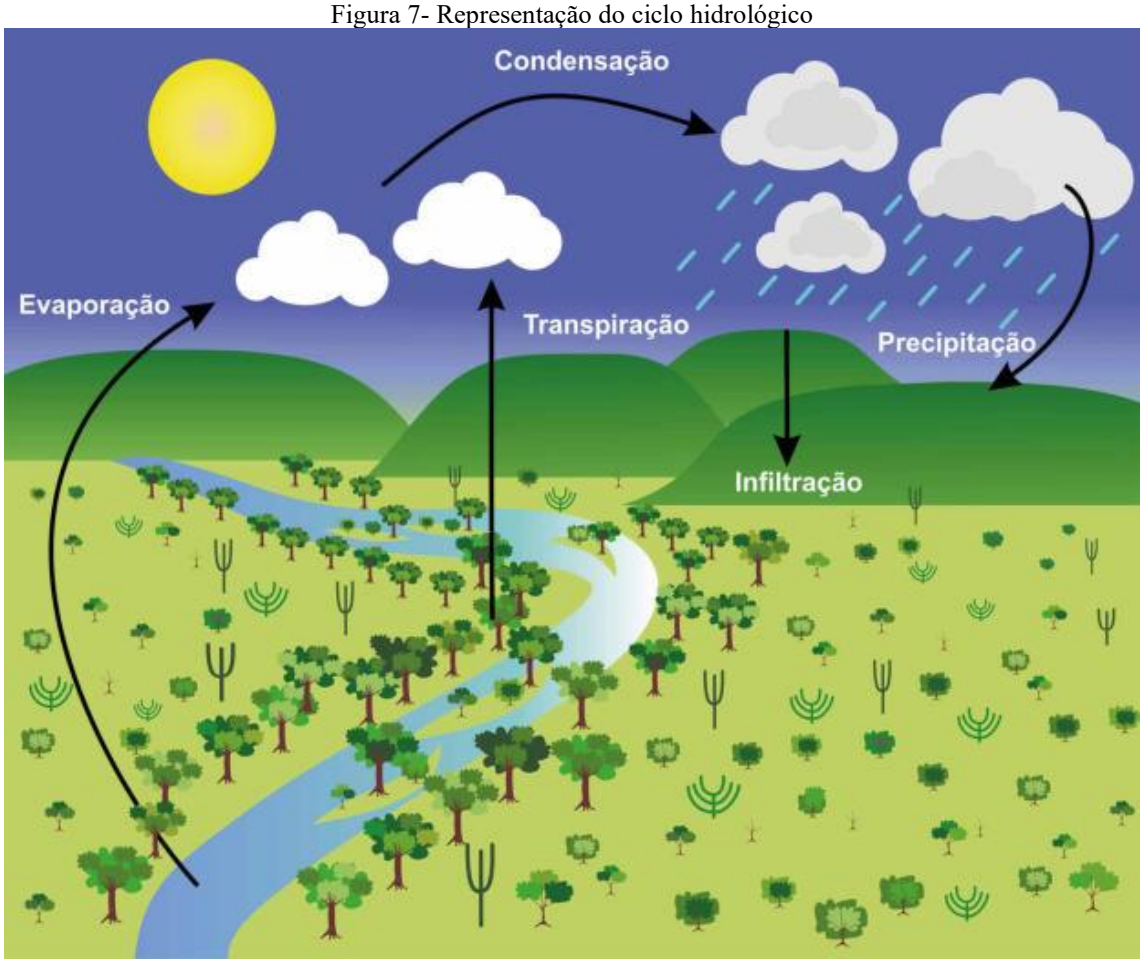
Ainda segundo Almeida (2016), existem duas teorias que explicam o desenvolvimento das gotas até a ocorrência de precipitação. A primeira está relacionada às nuvens frias, àquelas onde a temperatura seja inferior a 0°C. Enquanto a segunda teoria diz respeito às nuvens quentes, as quais possuem temperatura acima de 0°C. Além da existência de núcleos de condensação, pode-se dizer que o vapor d'água na atmosfera se condensa quando as condições tendem à saturação, e isso pode ocorrer de duas maneiras. A primeira é pelo aumento na pressão parcial de vapor d'água, devido à evaporação e a segunda pela transpiração, e/ou pelo resfriamento do ar, sendo que esses dois processos podem ocorrer ao mesmo tempo, embora na natureza o segundo seja mais efetivo em promover a formação de orvalho e de nuvens.

O fenômeno no qual a água passa do estado de vapor para o líquido, dá-se o nome de condensação. Processo esse que ocorre da seguinte forma: quando o ar se esfria, a umidade relativa aumenta, e até mesmo antes de atingir o máximo da umidade, já inicia o processo de condensação em torno dos núcleos maiores e as gotículas crescem até atingir valores

máximos que ocorrem na saturação, ou seja, a umidade relativa é igual a 100% (ALMEIDA, 2016).

Pelo fato do processo de condensação ser lento, ou seja, a gotícula demora mais de 24 horas até atingir o tamanho de uma gota de chuva, somente esse processo não é suficiente para garantir que haja precipitação. Dessa maneira, para que ocorra precipitação é necessário que aconteça o processo de coalescência: crescimento de uma gotícula pela incorporação de outras com as quais entra em contato, para a formação das gotas maiores (ALMEIDA, 2016).

Figura 7- Representação do ciclo hidrológico



Fonte: De Oliveira, Alves e França (2010).

A chuva é caracterizada pela sua origem, podendo ser de 3 tipos: frontal ou ciclônica, convectiva e orográfica. A frontal ou ciclônica é formada a partir de nuvens que se originam a partir do encontro de massas de ar frio e quente, sendo que a massa quente tende a se elevar, resfriando-se de maneira adiabática (quando não há troca de energia térmica entre o sistema e o meio exterior). Já a chuva convectiva resulta de um aquecimento diferencial da superfície terrestre, dando origem à ascensão do ar, além de ter como origem nuvens de grande desenvolvimento vertical. E por último a chuva

orográfica, a qual ocorre quando os ventos úmidos se elevam e se resfriam encontrando as vertentes das cadeias de montanhas isoladas (VIANELLO e ALVES, 1991).

3.1.1. Eventos extremos e moderados de precipitação

Sarewitz et al. (2000) consideram que, quando eventos naturais excedem seu ritmo natural, são classificados como extremos. Segundo Albala-Bertrand (1993), eventos climáticos extremos são responsáveis pelas principais catástrofes naturais de grande impacto e relevância. Para ser considerado um evento extremo de precipitação pluviométrica é importante destacar que não basta observar só a quantidade, mas também o período dessa chuva.

Segundo o relatório do IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) (2020), estima-se que a frequência e a intensidade de eventos extremos de chuva aumentem em muitas regiões, as evidências são, em sua maioria, extraídas das mudanças em índices baseados em precipitação de um dia ou cinco dias, com o uso de estudos regionais e globais.

A chuva é medida de acordo com o índice pluviométrico, o qual refere-se à quantidade de chuva por metro quadrado em um determinado local e por um período (INPE, 2024). Segundo a Defesa Civil (2022), a chuva pode ser classificada em 5 intensidades: a chuva fraca vai de 0,1 a 10 mm/h, a chuva fraca a moderada vai de 10 a 20 mm/h, a chuva moderada vai de 20 a 30 mm/h, a moderada forte está entre 30 e 40 mm/h e a forte é acima de 40 mm/h.

3.1.2. Centros de monitoramento de precipitação no Brasil

Nessa seção serão apresentados os principais centros de monitoramento de precipitação no território brasileiro.

3.1.2.1.CPTEC

O CPTEC (Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos) surgiu em 1995 e é o centro mais avançado de previsão numérica de tempo e clima da América Latina, fornecendo previsões de tempo de curto e médio prazos e climáticas de alta precisão, além de dominar técnicas de modelagem numérica altamente complexas, da atmosfera e dos oceanos, para prever condições futuras (CPTEC, 2024). O CPTEC tem como missão

“prover o país com o estado da arte em previsões do tempo e clima e dispor da capacidade científica e tecnológica de melhorar continuamente estas previsões, visando o benefício da sociedade” (CPTEC, 2024).

O CPTEC fornece diversos produtos em sua página[5], tais como: previsão de tempo, imagens de satélites, precipitação por radar e por satélite, informações sobre queimadas, entre outros.

3.1.2.1.1. CHUVA

Dentro do CPTEC é possível citar o projeto CHUVA (*Cloud processes of tHe main precipitation systems in Brazil: A contribUtion to cloud resolVing modeling and to the GPM (GlobAl Precipitation Measurement*)), o qual é um projeto temático da FAPESP (n°: 2009/15235-8) que surgiu com o objetivo de realizar estudos climáticos e de processos físicos na atmosfera usando métodos convencionais e especiais, com o intuito de criar um banco de dados que possa auxiliar na descrição dos processos das nuvens dos principais sistemas de precipitação que acontecem no Brasil (CHUVA, 2022). Para isso, o projeto CHUVA consistiu em 7 campanhas em diferentes regiões do país que permitiram definir as características microfísicas dos principais regimes de precipitação do país, são elas: Alcântara-MA, Fortaleza-CE, Belém-PA, Vale do Paraíba-SP, Santa Maria-RS, Megacidades-SP e GoAmazon (*Green Ocean Amazon*)-AM (CHUVA, 2022).

Os experimentos realizados pelo CHUVA utilizaram diversos instrumentos, tais como: um radar meteorológico de dupla polarização, radares de apontamento vertical para medir os perfis verticais das nuvens, uma rede GPS para medida da umidade na atmosfera, uma rede de estações meteorológicas de altitude para fazer medidas em alta resolução da dinâmica e termodinâmica da atmosfera, disdrômetros para medir os tamanhos das gotas de chuva, pluviômetros para medir a quantidade de chuva, uma torre de medidas dos fluxos na superfície e um radiômetro de microondas para medir a quantidade de água líquida das nuvens (CHUVA, 2022).

O experimento de Alcântara ocorreu durante o período de 01 a 25 de março de 2010 e teve como objetivo estudar a formação de gotas de chuva a partir de nuvens quentes, buscando aprimorar os modelos de previsão do tempo e a estimativa de precipitação a partir de dados meteorológicos de satélite (CHUVA, 2022).

[5] https://www.cptec.inpe.br/

Já o experimento de Fortaleza teve início em 29 de março e término em 29 de abril de 2011. Nesse experimento foram coletados dados de nuvens quentes, típicas de regiões tropicais, que evoluem sem formar partículas de gelo em seu interior. O interesse em estudar essas nuvens é pelo fato que elas estão associadas às chuvas fortes e contínuas, que costumam provocar deslizamentos de encosta e enchentes (CHUVA, 2022).

A campanha em Belém foi realizada no período de 01 de junho a 02 de julho de 2011. Sendo que o objetivo da campanha foi investigar as linhas de instabilidades que se formam na região costeira do continente, dando origem a grandes aglomerados de nuvens Cúmulo Nimbos, sendo que durante essa época do ano estes aglomerados penetram o interior da Amazônia, provocando chuvas intensas. E consequentemente elas provocam enchentes e prejuízos às cidades e metrópoles da região (CHUVA, 2022).

O experimento do Vale do Paraíba foi de 31 de outubro até 23 de dezembro de 2011. Nesse experimento foram realizados diversos sítios de medidas na direção do litoral para estudar as mudanças nas características das nuvens e tempestades entre o litoral e o Vale. Além disso, foi utilizado uma rede de detectores de descargas elétricas da NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) e de diversas companhias, a rede de descargas elétricas do ELAT (Grupo de Eletricidade Atmosférica)/INPE e câmeras de alta velocidade para filmagem das descargas elétricas, tudo isso em um raio de maior de abrangência (CHUVA, 2022).

Em Santa Maria, a campanha foi no período de 6 de novembro a 22 de dezembro de 2012. A campanha teve como objetivo identificar passagens de frentes frias, chuvas intensas locais, pré frontais e principalmente grandes e intensos aglomerados de precipitação denominados de Complexos Convectivos de Mesoescala (conjunto de nuvens convectivas que possuem forma circular, e seu crescimento é de maneira vertical em um intervalo de tempo de 6 a 12 horas, normalmente esse conjunto de nuvens está associado com precipitações intensas (MADDOX, 1980)) (CHUVA, 2022).

Já a campanha Megacidades ocorreu em São Paulo no período de março a maio de 2013. O radar móvel Banda X foi instalado na EMAE (Empresa Metropolitana de Águas e Energia Elétrica) e o sítio principal no IFUSP (Instituto de Física da Universidade de São Paulo) no prédio do Pelletron. Diferentemente dos outros experimentos, essa foi uma operação mais simplificada, baseada somente nas coletas de dados destes dois sítios (CHUVA, 2013).

Por fim, a campanha GoAmazon durou cerca de dois anos, entre 01 de janeiro de 2014 e 31 de dezembro de 2015. O principal foco dessa campanha foi estudar a convecção na Amazônia (REHBEIN, 2016).

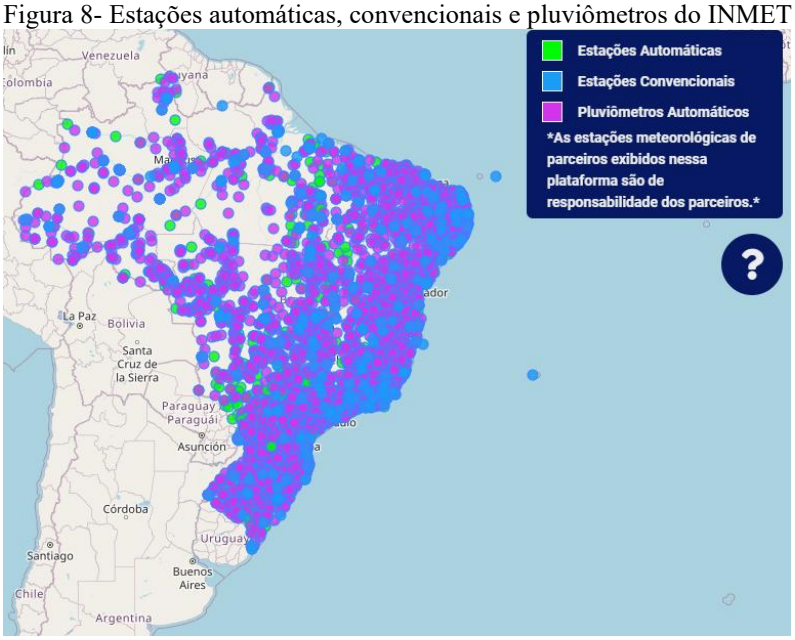
Na página do projeto[6] é possível observar que o mesmo conta com diversas instituições colaboradoras, diferentes experimentos ao longo do território brasileiro, além de ter acesso aos dados das campanhas realizadas.

3.1.2.2.INMET

O INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) foi criado em 1909 e tem como missão agregar valor à produção no Brasil por meio de informações meteorológicas. Em seu acervo digital, atualmente, conta com dados desde 1961. Por meio do site[7], é possível ter acesso a diversos produtos, tais como: dados meteorológicos, previsão do tempo, alertas meteorológicos, boletins e climáticos.

Em relação aos dados meteorológicos, os mesmos são referentes a estações automáticas e convencionais e pluviômetros automáticos. Sendo que as estações automáticas disponibilizam dados horários, são alguns deles: temperatura, umidade, pressão, precipitação, entre outros. A Figura 8 apresenta a distribuição das estações INMET no território brasileiro.

Figura 8- Estações automáticas, convencionais e pluviômetros do INMET



Fonte: Adaptado de: < https://portal.inmet.gov.br/>

3.1.2.3.CEMADEN

[6] http://chuvaproject.cptec.inpe.br/portal/instituicoes.jsp
[7] https://portal.inmet.gov.br/

O CEMADEN foi criado em julho de 2011 pelo Decreto Presidencial n° 7.513. Desde então, o qual possui uma estrutura científica e tecnológica profissional, desenvolve capacidades de inovação científica e tecnológica e melhora continuamente o nível de alerta precoce de desastres naturais. O CEMADEN monitora as áreas de risco de 957 municípios classificados como vulneráveis a desastres naturais no país, 24 horas por dia e sem interrupção (CEMADEM, 2025).

O CEMADEN possui nove radares instalados em diferentes regiões do território brasileiro, porém a Sala de Situação de Monitoramento da instituição utiliza dados de natureza meteorológica, provenientes de um total de 27 radares em operação no Brasil, decorrente da parceria realizada com diversas instituições públicas. Com a junção das informações do radar e o uso de avançados programas de computador, o órgão melhora a precisão e a antecipação dos alertas. O radar é uma ferramenta importante na previsão de chuva de curtíssimo prazo, além de que seus dados podem ser aliados a outros tipos de dados, como por exemplo: detecção de descargas elétricas, pluviômetros automáticos, estações hidrológicas, estações totais robotizadas, entre outros dados, tudo isso a fim de compor uma base cada vez mais completa e diversa, e que auxilie no envio de alertas de desastres naturais (CEMADEM, 2025).

O CEMADEN envia alertas de desastres naturais ao CENAD (Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres), do Ministério da Integração Nacional (MI), auxiliando o Sistema Nacional de Defesa Civil (CEMADEM, 2025).

3.1.2.4.CENAD

O CENAD surgiu em 2005 a partir do Decreto n° 5.376, coordenado pela Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil do Ministério do Desenvolvimento Regional, com o objetivo de gerenciar ações estratégicas de preparação e resposta a desastres em território nacional e, eventualmente, também no âmbito internacional. O monitoramento e operações ocorrem 24 horas por dia (CENAD, 2022).

O CENAD é responsável por consolidar as informações sobre riscos em todo o território brasileiro, tais como mapas de áreas de risco de deslizamentos e inundações e dados relativos à ocorrência de desastres naturais e tecnológicos e os danos associados. Assim, o gerenciamento de todas essas informações possibilita ao Centro apoiar estados e municípios nas preparações de ações para desastres junto às comunidades mais vulneráveis.

O funcionamento do CENAD ocorre da seguinte forma: primeiramente o centro recebe informações de diversos órgãos do governo federal responsáveis por monitorar desastres naturais, em seguida as informações passam pelo processo de serem avaliadas e processadas, e por fim são encaminhadas aos órgãos de Proteção e Defesa Civil dos estados e municípios com risco de ocorrência de desastres, onde o alerta irá ocorrer de acordo com a intensidade do evento adverso (CENAD, 2022).

O CENAD atua em parceria com muitos órgãos, tais como: CEMADEN, o Serviço Geológico do Brasil (CPRM), o IBAMA (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis), a ANA (Agência Nacional de Águas), a ABIN (Agência Brasileira de Inteligência), o CPTEC/INPE, o INMET, o CENSIPAM (Centro Gestor e Operacional do Sistema de Proteção da Amazônia), as Forças Armadas e demais órgãos do Poder Executivo Federal (CENAD, 2022). Todos esses esforços dos centros estão na detecção ágil de um desastre natural e assim evitar perdas financeiras e humanas para a sociedade.

4. METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentados os materiais e métodos utilizados em cada estudo desenvolvido nesse trabalho. Inicialmente apresenta-se uma breve descrição de como é criada uma campanha no software Bernese, os arquivos de entrada, bem como suas principais configurações na obtenção dos valores de ZTD por meio de dados GNSS.

Em seguida, é descrito como os dados processados no Bernese foram comparados com os dados do projeto CHUVA. Na sequência, apresenta-se a metodologia empregada no uso de diferentes números de estações no processamento Bernese. Subsequente, avalia-se o ZTD-GNSS obtido por diferentes centros e por fim, um estudo de caso da região do Rio Grande do Sul, durante um evento extremo de precipitação, no qual avaliou-se o comportamento do ZTD, do desvio padrão e do PWV em relação à precipitação.

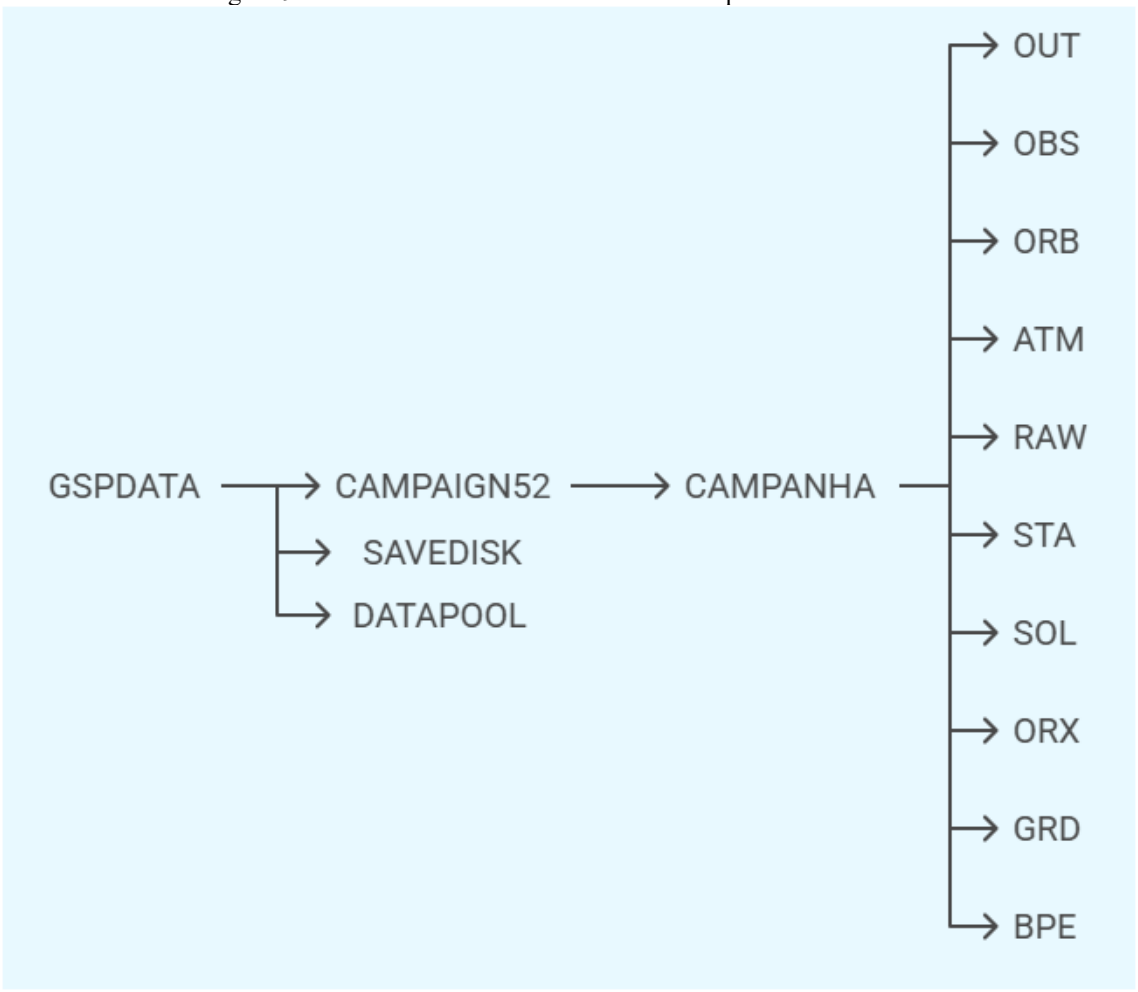
4.1. Configurações iniciais do Bernese

O Bernese é um software científico desenvolvido pelo AIUB (*Astronomical Institute, University of Bern*), na Suíça, e utilizado mundialmente em processamentos de dados GNSS pelos principais centros, tais como IGS, SIRGAS, entre outros. Dentro do mesmo há o arquivo PCF (*Process Control File*) que é o modo automatizado do Bernese para processamento de dados GNSS, o qual define quais scripts devem ser executados e em que ordem devem ser processados. Além de listar os scripts a serem executados, no PCF é possível definir:

- quais scripts devem aguardar a execução de outros antes de serem iniciados;
- os parâmetros que devem ser passados para os scripts;
- a CPU a ser utilizada pelo cliente;
- especificar os painéis de opções a serem usados pelos programas executados nos scripts.

A área onde os dados GNSS são alocados é dividida em três subpastas, como mostra a Figura 9.

Figura 9- Pastas do software Bernese onde os arquivos são alocados



Elaborado pelo autor.

Na pasta GPSDATA ficam as campanhas que serão trabalhadas no Bernese. Já na subpasta CAMPAIGN52 ficam armazenadas as campanhas e os arquivos referentes aos processamentos das mesmas (BERN, 2015). Dentro de cada campanha, existem outras dez pastas, sendo que cada uma delas tem uma finalidade específica:

• OUT: arquivos de saída dos processamentos realizados por cada aplicativo do Bernese;

• OBS: armazena arquivos de observação GNSS dos dados no formato Bernese;

• ORB: armazena arquivos de órbita e ERP;

• ATM: armazena arquivos referentes à neutrosfera e ionosfera;

• RAW: armazena arquivos de observação GNSS que são utilizados no processamento de dados;

• STA: armazena arquivos relacionados às estações presentes na campanha, tais como: coordenadas, excentricidades e velocidades das estações, além de um arquivo contendo o histórico de todas as estações, tais como modelo de antena e receptor, excentricidade e o período de tempo que estavam instalados na estação, entre outros;

• SOL- arquivos relacionados à solução final do processamento (SINEX);

• ORX- local onde os arquivos RINEX originais devem ser alocados;

• GRD- arquivos de grid, tais como: coeficientes de VMF1 e modelos de deslocamento de estações;

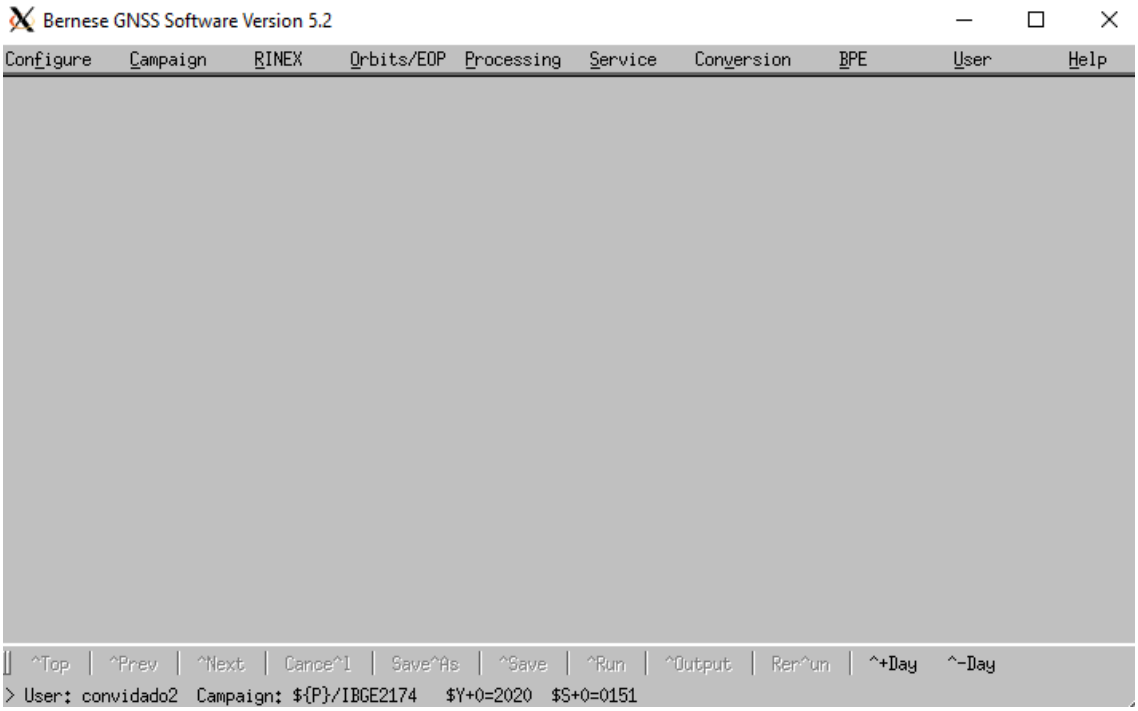
• BPE- arquivos log gerados sobre os resultados de cada etapa do processamento de um script PCF.

A pasta SAVEDISK é onde ficam armazenados os principais arquivos de resultados do processamento realizado pela campanha. Já a área DATAPOOL é uma pasta para cópias locais de arquivos externos.

Durante essa pesquisa, explorou-se a utilização do software Bernese 5.2. na obtenção do ZTD, isso se deve ao fato do mesmo estar disponível na FCT/UNESP, além de ser muito utilizado pela comunidade científica internacional por ter a capacidade de modelar e/ou reduzir praticamente todos os erros envolvidos no posicionamento GNSS. No que diz respeito à neutrosfera, o Bernese oferece vários modelos a priori e funções de mapeamento, como por exemplo: VMF1; GMF; modelo de Niell; modelo de Saastamoinen e o modelo de Hopfield modificado (GOAD e GOODMAN, 1974 apud BERN, 2015). Vale destacar que centros como o IGS e o SIRGAS, embora utilizem diferentes configurações de processamentos para obter os valores de ZTD, empregam o software Bernese, o que indica que esse software é robusto para esse tipo de trabalho.

Com o intuito de obter os valores de ZTD, primeiramente foi criada uma campanha no software Bernese 5.2., a Figura 10 mostra a interface gráfica desse software.

Figura 10- Página inicial do software Bernese 5.2.



Elaborado pelo autor.

O Quadro 1 traz as principais configurações utilizadas na obtenção dos valores de ZTD do experimento.

Quadro 1- Principais configurações utilizadas no processamento

Configurações no software Bernese 5.2	
Método de Posicionamento	Posicionamento relativo
Função de mapeamento	GMF úmida
ZHD	GMF seca
Modelo de estimativa de gradiente	Chenher (Chen e Herring, 1997)
Ângulo de elevação	3
Resolução temporal	5 minutos

Elaborado pelo autor.

Ao utilizar a função de mapeamento GMF úmida, as correções ZTD são calculadas com base no modelo de GPT (*Global Pressure Temperature*) conforme fornecido por Böhm et al. (2007). A Equação 18 é utilizada pelo Bernese para obter o valor do atraso total da neutrosfera, de acordo com Bern (2015):

$$T_r^s(t, A_r^s, z_r^s) = T_r(t, z_r^s) + T_r^0(t)\, f(z_r^s) + {}^nT_r(t)\, \frac{\partial f}{\partial z} cos A_r^s + {}^eT_k(t) \frac{\partial f}{\partial z} sin\, A_r^s \qquad (18)$$

em que:

T_r^s: atraso total da neutrosfera no caminho entre a estação (r) e o satélite (s);

t : época de observação;

z_r^s, A_r^s: ângulo zenital e o azimute do satélite (s) observados da estação (r);

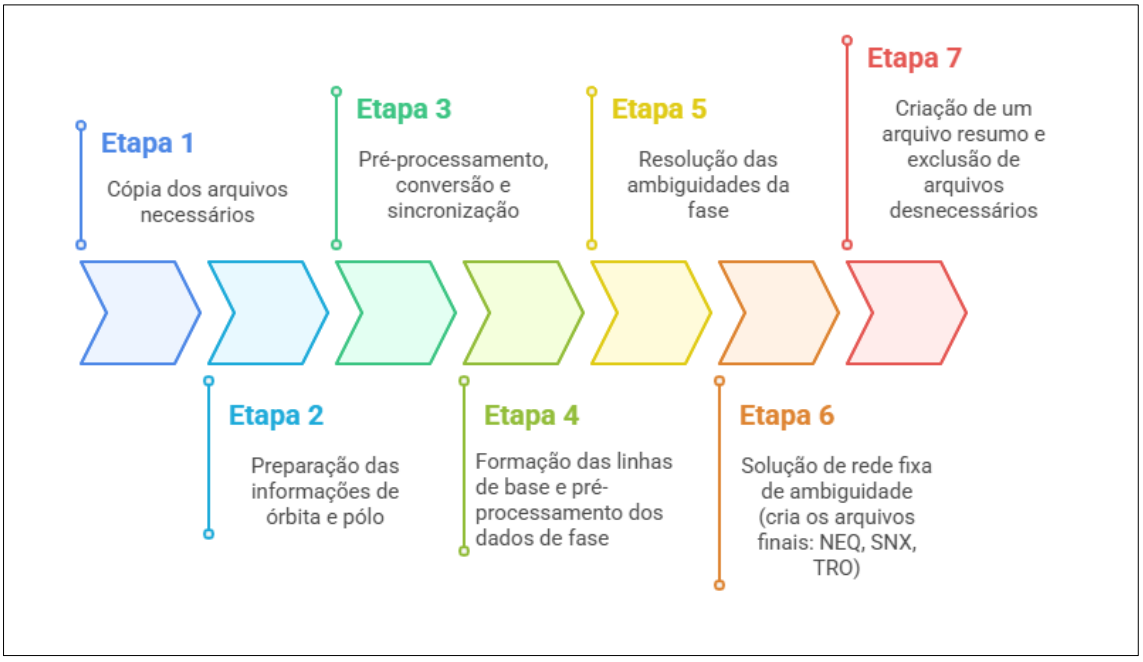
$T_r(t, z_r^s)$: atraso inclinado de acordo com um modelo a priori;

$T_r^0(t)\ f(z_r^s)$: parâmetro ZTD e sua função de mapeamento;

${}^nT_r(t)$, ${}^eT_r(t)$: parâmetros horizontais do gradiente da troposfera norte e leste.

O ZTD a priori pode ser constante no tempo se for assumida apenas uma atmosfera padrão. O PCF RNX2SNX (Anexo I) foi utilizado para realizar todos os processamentos necessários até obter os valores de ZTD com resolução temporal de 5 minutos. Nesse script cada um dos programas utilizados tem um objetivo, mais informações de cada módulo podem ser obtidas em Bern (2015). O PCF mencionado é dividido em 7 principais etapas, as quais são descritas na Figura 11.

Figura 11- Fluxograma de processamento para obtenção do ZTD



Elaborado pelo autor.

Na etapa 1 é preciso fornecer os arquivos necessários (descritos no Quadro 2) na área da campanha, para que os mesmos sejam copiados para a pasta correta. Para tanto, foi criado um script em Python para baixar os arquivos de entrada de maneira automática para o período desejado. Após o download, os quais são copiados para suas respectivas pastas. O Quadro 2 apresenta os arquivos que foram utilizados para realizar uma campanha para obter os valores de ZTD, bem como o link de onde esses dados foram obtidos e sua pasta de destino dentro da campanha.

Quadro 2- Arquivos utilizados como dado de entrada na campanha no Bernese e seus respectivos sites e pastas de destino

Tipo de arquivo	**Site**	**Pasta de destino**
Dados de observação (.O)	ftp://anonymous:a@geoftp.ibge.gov.br/informacoes_sobre_posicionamento_geodesico/rbmc/dados/	RAW
Dados da função de mapeamento (.GRD)	https://vmf.geo.tuwien.ac.at/trop_products/GRID/2.5x2/VMF1/VMF1_OP/	GRD
Arquivos de efemérides precisas e parâmetros de rotação da Terra (.SP3, .ERP)	ftp://igs.ensg.ign.fr/pub/igs/products/	ORB
Arquivos de ionosfera (.ION)	http://ftp.aiub.unibe.ch/CODE/	ATM
Arquivos de coordenadas (.CRD)	ftp://ftp.sirgas.org/pub/gps/SIRGAS/	STA

Elaborado pelo autor.

A segunda etapa apresentada na Figura 11 se refere a conversão de arquivos de órbita e orientação da Terra para o formato Bernese. Nessa etapa é importante que sejam utilizadas as órbitas juntamente com as informações de polo, para evitar inconsistências, além dos arquivos de efemérides e de parâmetros de orientação terrestre serem do mesmo centro.

A terceira etapa consiste em converter arquivos RINEX para o formato Bernese e sincronizar os relógios do receptor com a hora GPS. A quarta etapa constitui o pré-processamento, sendo uma etapa essencial. Os arquivos de simples diferença são criados, perdas de ciclo são detectadas e reparadas, e observações incompatíveis são removidas.

Já na quinta etapa do PCF, depois de calcular uma solução com ambiguidades de valor real no final da etapa anterior, as estratégias para resolver as ambiguidades são aplicadas às observações de GPS e/ou GLONASS. No experimento foram aplicados diferentes métodos de resolução das ambiguidades em função do comprimento da linha de base: solução L1 e L2 em linhas de base de 0 km a 20 km, solução L3 e L5 em linhas de base de 18 km a 200 km, estratégia *wideline* em linhas de base de 180 km a 9000 km e estratégia QIF (*Quasi Ionosphere Free*) L1/L2 em linhas de base de 18 km a 5600 km, vale destacar que os modelos de ionosfera (GIM) são usados como entrada para aumentar o número de ambiguidades resolvidas.

Na sexta etapa os arquivos de observação são pré-processados (simples diferenças da fase) e a maioria das ambiguidades são resolvidas para seus valores inteiros. Os resultados são armazenados no formato Bernese e os da neutrosfera são salvos no formato SINEX e na extensão TRO.

Por fim, na sétima etapa do PCF os resultados são salvos e os arquivos de saída dispensáveis são removidos, tais como arquivos temporários.

4.2. Processamento com os dados do Projeto CHUVA

Com o intuito de comparar os processamentos iniciais desta pesquisa, primeiramente foram processados os dados do Projeto CHUVA (CHUVA, 2022) no Bernese e comparados com os resultados obtidos por Sapucci et al. (2016). A seguir é apresentada uma breve descrição do Projeto CHUVA e dos dados utilizados.

O projeto CHUVA (Processo número: 2009/15235-8) realizou várias campanhas durante o período de 2010 a 2015 em diferentes regiões do Brasil com o intuito de realizar um levantamento de nuvens dos diferentes regimes climáticos no Brasil, como foi apresentado na seção 3.1.2.1.1.

Um estudo realizado por Sapucci et al. (2016) utilizou dados do Projeto CHUVA da campanha Vale, a qual foi realizada em São José dos Campos, no estado de São Paulo, em um vale elevado entre as cadeias de montanhas da Mantiqueira e da Serra do Mar durante o período de 3 de novembro a 28 de dezembro de 2011. Os instrumentos utilizados foram: um receptor GPS de dupla frequência (localizado na estação IEAV (Instituto de Estudos Avançados do Departamento de Ciência e Tecnologia Aeroespacial)), um disdrômetro e um radar móvel de banda X com dupla polarização (XPol). Foram processadas medidas GPS com amostragem de um segundo, enquanto o sensor meteorológico capturou a pressão e a temperatura em frequências de um minuto.

Nesse estudo o ZTD foi obtido processando os dados GPS com o software GOA-II (Gipsy, GPS Inferred PositioningSystem- OASIS, Orbit Analysis and Simulation Software II) (Gregorius, 1996) aplicando o método de PPP no modo pós processado. O ZWD foi convertido em PWV usando a relação sugerida por Bevis et al. (1992) (Equação 17). As temperaturas médias neutrosféricas (Tm) foram obtidas a partir da temperatura e pressão medida na antena GPS aplicando o modelo regional sugerido por Sapucci (2014). A taxa de amostragem dos valores PWV-GPS_{Gipsy} foi de 1 minuto (SAPUCCI et al., 2016).

Utilizando os dados de observação da campanha Vale, como apresentado na seção 3.1.2.1.1 como dado de entrada em uma campanha no Bernese, além de dados da RBMC, por meio das configurações apresentadas na seção 4.1, foram obtidos os valores de $ZTD_{Bernese}$, onde posteriormente a partir da Equação 19 obteve-se os valores de $ZHD_{Bernese}$.

$$ZHD = (2{,}27683157 \times 10^{-3} \pm 5 \times 10^{-7}) \frac{P_0}{(1-0{,}0026cos2\varphi-0{,}00028h_0)} \quad (19)$$

Em seguida, foi possível calcular o $ZWD_{Bernese}$ (ZWD=ZTD-ZHD) e PWV-$GNSS_{Bernese}$.

Vale destacar que, para transformar os valores de $ZTD_{Bernese}$ em PWV-$GNSS_{Bernese}$, foram utilizadas as mesmas equações que Sapucci et al. (2016) usaram (Equação 15).

Nessa etapa, os valores de PWV-$GNSS_{Bernese}$ calculados foram comparados com o PWV-GPS_{Gipsy} para a estação IEAV, a qual foi objeto de estudo no projeto CHUVA, assim, calculou-se a diferença absoluta dos valores de PWV-GPS_{Gipsy} e PWV-$GNSS_{Bernese}$.

4.3. Processamento com diferentes números de estações

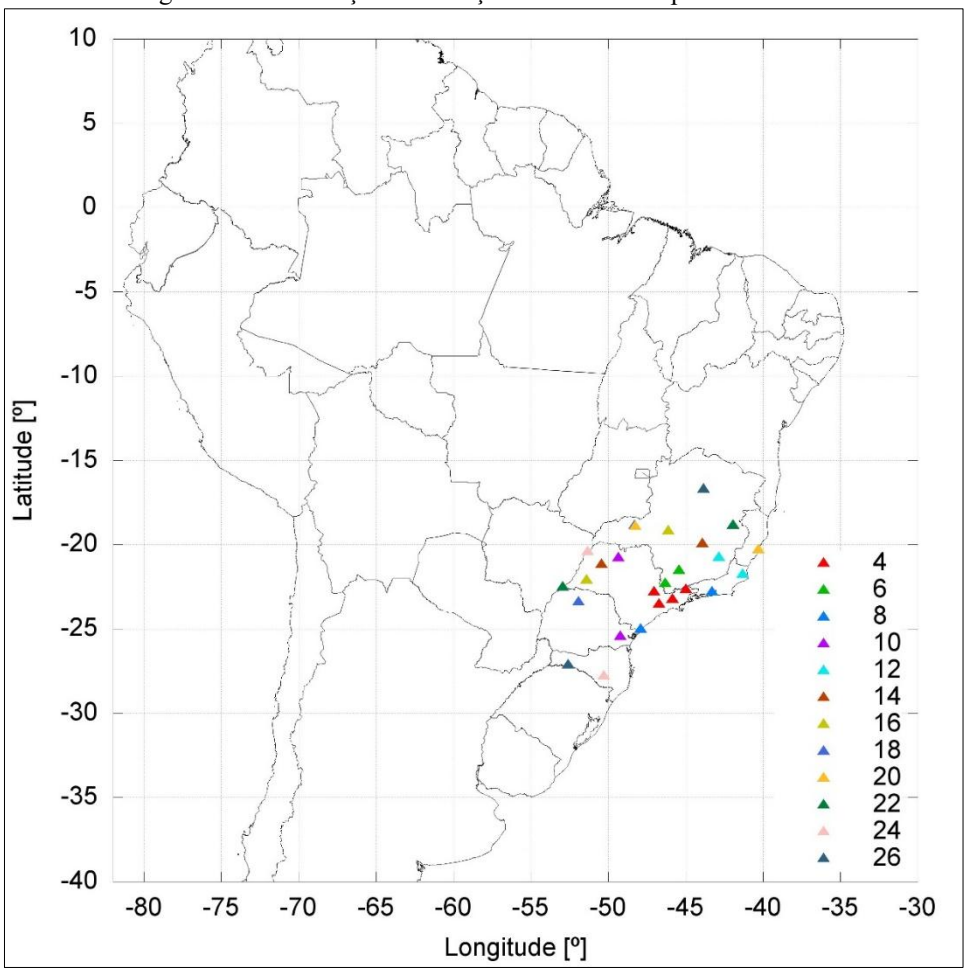
Foi feito um estudo em relação a variação do número de estações utilizadas para a obtenção do ZTD no software Bernese. Esse experimento teve como objetivo analisar o quanto o número de estações utilizadas nos processamentos influencia na precisão do valor ZTD obtido e no tempo de processamento.

Ainda considerando o projeto CHUVA, campanha Vale, foram selecionados os dados da estação IEAV, além de mais 3 estações pertencentes a RBMC. A estação IEAV apresenta o melhor cenário: estação GNSS junto com a radiossonda, isso pelo fato da radiossonda ser utilizada como referência na avaliação dos resultados, além de disponibilizar dados para a obtenção do ZWD.

Foram processados para o período de 10 dias (308 a 317) do ano de 2011. Dessa maneira, a cada processamento, foram aumentando de duas em duas estações (RBMC), sendo que o critério de escolha dessas estações foi a menor distância horizontal em relação à estação IEAV. O número máximo de estações foi de 26 estações, pois após esse número não foram identificadas diferenças significativas, como será apresentado na seção 5.2. A Figura 12 mostra a distribuição das estações utilizadas, sendo que a cor vermelha representa as 4 primeiras estações utilizadas no processamento, depois, a cor verde-clara

representa as duas estações que foram acrescentadas junto com 4 anteriores no processamento, e assim sucessivamente. As configurações utilizadas nesses processamentos são as mesmas apresentadas na seção 4.1.

Figura 12- Localização das estações utilizadas no processamento



Elaborado pelo autor.

Os valores de $ZTD_{Bernese}$ foram transformados em $ZWD_{Bernese}$ e posteriormente em $PWV\text{-}GNSS_{Bernese}$ (Equação 15). Logo, os valores de $PWV\text{-}GNSS_{Bernese}$ puderam ser comparados com os valores obtidos com a radiossonda (PWV_{radio}). Os valores de PWV_{radio} foram calculados por meio da ferramenta NEPTool (*Neutrosphere Processing Tool*) (Lima et al.,2020; Albuquerque et al.,2024, Gouveia et al., 2026) na qual é possível obter o atraso zenital a partir da integração de parâmetros atmosféricos em função da altitude, por meio das formulações apresentadas nas Equações 5 e 6, e logo em seguida, utilizando a Tm (Equação 17) o atraso zenital não-hidrostático é convertido em PWV (Equação 15).

Por fim, comparou-se também o PWV_{radio} com os dados de $PWV\text{-}GPS_{Gipsy}$ obtido no trabalho de Sapucci et. al (2016).

4.4. Análise do ZTD disponibilizado por diferentes centros

Com o intuito de comparar o ZTD-GNSS dos diferentes centros de processamento: $ZTD\text{-}GNSS_{SIRGAS}$, $ZTD\text{-}GNSS_{IGS}$, $ZTD\text{-}GNSS_{Bernese}$ e $ZTD\text{-}GNSS_{NGL}$, foi solicitado ao IBGE dados de ZTD-GNSS gerados pelo centro, pelo fato do mesmo ser um centro de referência no Brasil e pelo fato do ZTD gerado por esse centro não ser disponibilizado individualmente, mas sim em uma combinação com mais centros da América, por meio do SIRGAS. O IBGE forneceu dados de $ZTD\text{-}GNSS_{IBGE}$ do período de 13 de agosto (DOY: 225) a 1 de setembro (DOY: 244) de 2023.

Em seguida, foi realizada uma campanha no Bernese com dados desse mesmo período, utilizando arquivos de observação da rede RBMC inteira. As configurações utilizadas para realizar o processamento são as mesmas apresentadas no Quadro 1, exceto a resolução temporal, que foi de 1 hora. Assim, ao final da campanha foram obtidos valores de $ZTD_{Bernese}$ para todas as estações da RBMC.

No território brasileiro existem 17 estações ativas do IGS, assim, com o intuito de comparar as diferentes fontes de ZTD-GNSS, foram selecionadas 5 estações IGS, uma de cada região do país, considerando a variação climatológica regional. As estações selecionadas foram: BOAV (Boa Vista- RR) (Norte), SAVO (Salvador- BA) (Nordeste), BRAZ (Brasília- DF) (Centro-Oeste), CHPI (Cachoeira Paulista -SP) (Sudeste) e POAL (Porto Alegre- RS) (Sul). Dessa maneira, foi feito o download dos arquivos de ZTD disponibilizados pelo SIRGAS, IGS e NGL para o período 225 a 244 de 2023, das 5 estações citadas anteriormente.

Adicionalmente, buscou-se dados de estações de altitude equipadas com radiossonda, considerando essas medidas diretas na obtenção do ZTD como referência para análises dos resultados dessa sessão. Porém, das 5 estações somente 3 possuíam radiossondas próximas (distância máxima de 20.000 m): BOAV (SBBV), BRAZ (SBBR) e POAL (SBPA). O

Quadro 3 apresenta a distância horizontal entre a estação GNSS e a radiossonda mais próxima, além das suas altitudes.

Quadro 3-Distância horizontal e altitude das estações GNSS e as meteorológicas de altitude

Localização	Estação GNSS Estação meteorológica de altitude	Altitude (m)	Distância horizontal (m)
Boa Vista	BOAV SBBV	69,478 140	1.663

Brasília	BRAZ SBBR	1106,020 1061	11.156
Porto Alegre	POAL SBPA	76,745 3	10.046

Elaborado pelo autor.

Os dados de radiossondas normalmente são utilizados como referência, mas como nesse caso só se tem dados para 3 das 5 estações, utilizou-se o valor de ZTD disponibilizado pelo SIRGAS como referência, uma vez que o mesmo é um centro de referência regional e diferentemente do IGS, o SIRGAS possui dados ZTD para toda a rede RBMC.

4.5. Estudo de caso - Rio Grande do Sul

A fim de avaliar a variabilidade do $ZTD_{Bernese}$ durante um evento extremo, foi selecionado o evento extremo de precipitação ocorrido no Rio Grande do Sul entre os meses de abril e maio de 2024.

Segundo a Secretaria da Agricultura, Pecuária, Produção Sustentável e Irrigação (2024), entre os dias 27 de abril e 2 de maio, cerca de uma semana, em muitos municípios do Rio Grande do Sul ocorreram registros de precipitação pluvial entre 300 e 400 mm e em algumas cidades esses valores chegaram a atingir 500 a 700 mm, o que corresponde a um terço da média histórica de precipitação anual.

Os dados do experimento foram obtidos a partir das estações da RBMC do período de 27 de abril a 11 de maio de 2024. Em seguida, foi criada uma campanha no software Bernese e utilizando a metodologia apresentada na seção 4.1 os dados foram processados e assim obtidos os valores de $ZTD_{Bernese}$. O $ZTD_{Bernese}$ foi estimado considerando a resolução temporal de 5 minutos e posteriormente de 1 hora, com o intuito de analisar se há perda de informação quando os dados estão com resolução temporal menor. Foram selecionados os dados das estações POAL (Porto Alegre-RS) e SMAR (Santa Maria-RS), as quais estão localizadas na região afetada pelo evento extremo.

Em seguida, foi feito o download dos dados ZTD do IGS e do SIRGAS, a fim de primeiramente comparar os valores de ZTD e observar como esse parâmetro se comporta durante um evento extremo de precipitação, além de analisar os valores de desvios padrão associados a cada valor de ZTD, os quais estão nos arquivos SINEX, juntamente com o ZTD.

A fim de realizar uma análise da acurácia calculou-se também o RMSE dos ZTD das diferentes fontes em relação a radiossonda, logo o ZTD_{radio} (p_i) foi considerado como referência em relação aos ZTD das demais fontes: $ZTD_{Bernese}$, ZTD_{IGS} e ZTD_{SIRGAS} (y_i), como mostra a Equação 20.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(y_i - p_i)^2} \tag{20}$$

A próxima etapa foi o cálculo do $PWV\text{-}GNSS_{Bernese}$, para tanto, pelo fato dessas estações não terem dados meteorológicos juntamente com os dados GNSS, optou-se por selecionar a estação meteorológica do INMET mais próxima a elas. O Quadro 4 apresenta as distâncias horizontal e vertical entre as estações RBMC e a INMET mais próxima.

Quadro 4- Distância horizontal e vertical entre as estações GNSS e INMET

Estação RBMC	**Estação INMET**	**Distância horizontal (m)**	**Distância vertical (m)**
POAL	A801	5754	1,47
SMAR	A803	777	0,05

Elaborado pelo autor.

Assim, foi feito o download dos arquivos das estações INMET. Vale destacar, que é um arquivo .csv por estação, e que dentro há diversas informações, como por exemplo: pressão, temperatura, umidade, porém as que foram utilizadas são: latitude do local, altitude, precipitação, temperatura e pressão.

Os valores de ZHD_{INMET} puderam ser calculados por meio da formulação dada por Saastamnoinen (1972) (Equações 9 e 12). Mas antes, foi necessário ajustar a pressão atmosférica obtida pela estação meteorológica (P_{MET},) para a posição da estação GNSS (P_{GNSS}), como mostra a Equação 21.

$$P_{GNSS} \cong P_{MET} \cdot (1 - 0{,}0000226 \cdot (h_{GNSS} - h_{MET}))^{5{,}225} \tag{21}$$

em que:

h_{GNSS}: altitude da estação GNSS;

h_{MET}: altitude da estação meteorológica.

Assim, os valores de latitude e altitude inseridos foram de acordo com a posição da estação GNSS, já a pressão atmosférica utilizada foi a obtida por meio da Equação 17.

Dessa maneira, obtiveram-se os valores de ZHD, a partir do modelo de Saastamoinen utilizando parâmetros atmosféricos de uma estação meteorológica INMET próxima.

A partir dos valores de ZHD_{INMET} calculados, os mesmos foram subtraídos do $ZTD_{Bernese}$, resultando em valores de ZWD_{Ber_INMET}, como mostra a Equação 22.

$$ZWD_{Ber_INMET} = ZTD_{Bernese} - ZHD_{INMET} \quad (22)$$

Visto que nas estações meteorológicas são obtidos somente os parâmetros de medidas de superfície, a fim de obter os valores de PWV, foi necessário calcular a Tm, com base nos parâmetros de temperatura e pressão superficiais, descrito por Sapucci (2005), como apresentado na Equação 9. Dessa maneira, os valores de T_0 e P_0 utilizados foram os obtidos a partir das estações do INMET. Antes de aplicar a Equação 9 foi necessário realizar o processo de ajuste da temperatura da estação meteorológica (T_{MET}) para a posição da estação GNSS (T_{GNSS}) para isso pode-se utilizar a formulação descrita por Sapucci (2001):

$$T_{GNSS} \cong T_{MET} - (h_{GNSS} \cdot 0{,}0065). \quad (23)$$

Assim, por meio das Equações 22 e 23, foi possível obter os valores de PWV-$GNSS_{Ber_INMET}$.

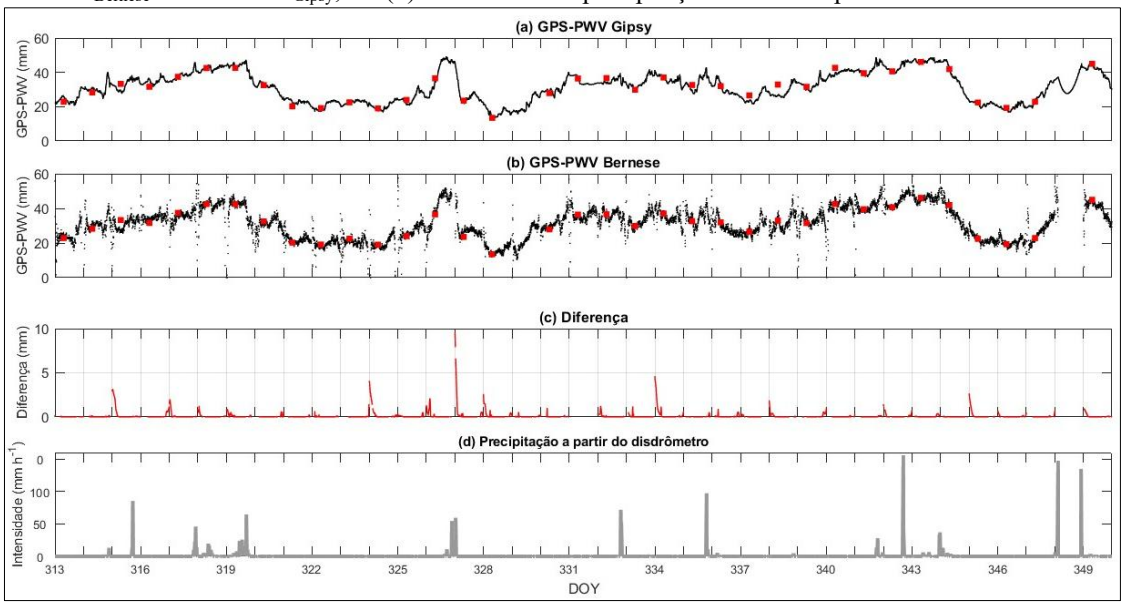
5. RESULTADOS E ANÁLISES

Nessa seção são apresentados os resultados obtidos a partir das metodologias aplicadas e apresentadas na seção 4. Isso envolve o processo de comparação dos dados processados no Bernese com os dados do projeto CHUVA, o processamento variando o número de estações GNSS, a comparação dos valores de ZTD de diferentes centros e por fim um estudo de caso em que houve um evento de precipitação extremo, a fim de avaliar o comportamento do PWV-GNSS.

5.1. Processamento com os dados do Projeto CHUVA

A partir dos dados do projeto CHUVA da campanha Vale, por meio do software Bernese 5.2., utilizando as configurações apresentadas na seção 4.1, foi possível obter os valores de $ZTD_{Bernese}$ para os dados do projeto CHUVA e posteriormente transformá-los em $PWV\text{-}GNSS_{Bernese}$. Dessa maneira, os valores de $PWV\text{-}GPS_{Gipsy}$ obtidos no trabalho de Sapucci et al. (2016), foram comparados com os $PWV\text{-}GNSS_{Bernese}$. A Figura 13 apresenta os valores das séries temporais de (a) $PWV\text{-}GPS_{Gipsy}$ e valores de PWV_{Radio} (pontos em vermelho); (b) $PWV\text{-}GNSS_{Bernese}$ e valores de PWV_{Radio} (pontos em vermelho); (c) Diferença entre os valores de GPS-PWV Gipsy e Bernese; e a (d) intensidade de precipitação observada pelo disdrômetro de Joss.

Figura 13- Séries temporais de (a) PWV-GPS_{Gipsy} e valores de PWV_{Radio} (pontos em vermelho); (b) PWV-$GNSS_{Bernese}$ e valores de PWV_{Radio} (pontos em vermelho); (c) diferença entre os valores de PWV-$GNSS_{Bernese}$ e PWV-GPS_{Gipsy}; e a (d) intensidade de precipitação observada pelo disdrômetro de Joss



Elaborado pelo autor.

A partir da Figura 13 foi possível observar que a série temporal PWV-$GNSS_{Bernese}$ apresentou comportamento similar a série PWV-GPS_{Gipsy}, embora, seja possível notar que a série PWV-$GNSS_{Bernese}$ apresente uma maior variação dos valores. Isso pode estar relacionado ao fato de que o software Gipsy utiliza o filtro de Kalman e o Random Walk no processamento do ZTD, o que pode resultar em uma série mais suave de acordo com os parâmetros usados. Apesar disso, nota-se que a diferença atinge no máximo 10 mm, já a diferença média é de 0,25 mm ao longo de todo o período analisado. Visto que a precisão do ZTD disponibilizado pelo IGS é de 4 mm, um centro de referência, tem-se que os valores de diferença encontrados são satisfatórios, ainda mais que o ZTD_{Gipsy} e o $ZTD_{Bernese}$ foram processados em softwares diferentes e com metodologia diferente, dos quais os valores de PWV deriva.

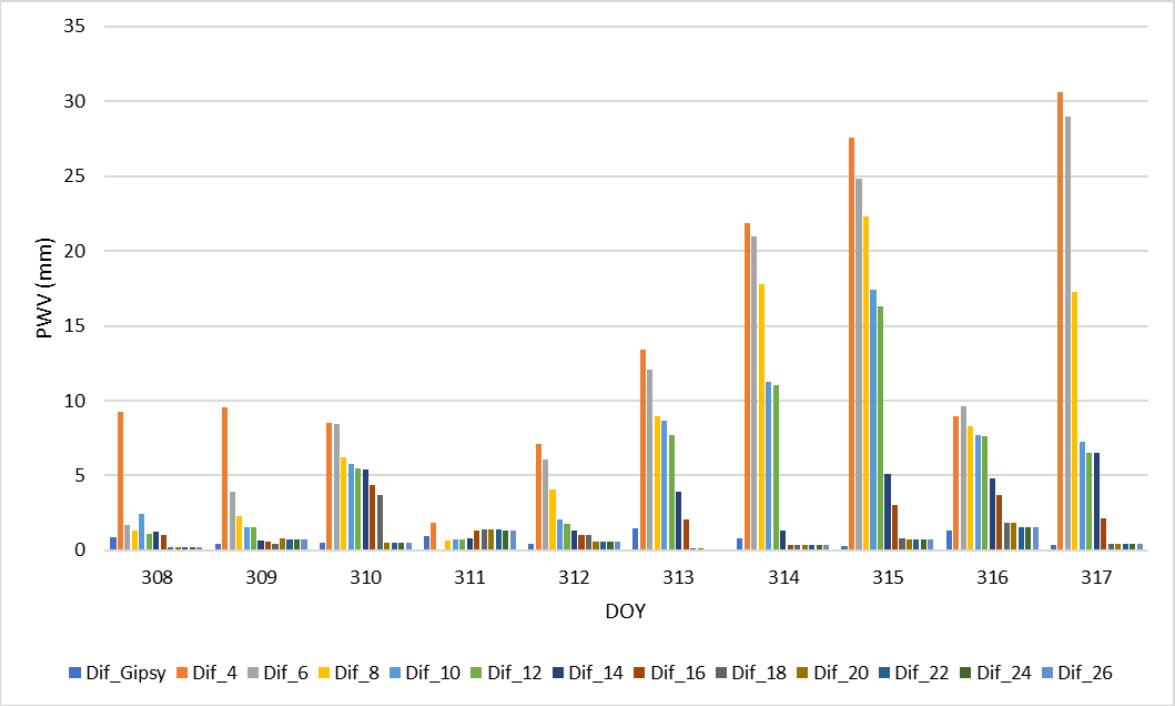
5.2. Processamento com diferentes números de estações

Em seguida, foi realizado um estudo variando o número de estações utilizadas na geração dos valores de ZTD no software Bernese, utilizando metodologia apresentada na seção 4.1. Esse experimento teve como objetivo analisar o quanto o número de estações utilizadas nos processamentos influencia na precisão do valor de ZTD e no tempo de processamento.

Inicialmente foram utilizados no processamento dados da estação do projeto CHUVA: IEAV e mais 3 estações pertencentes a RBMC, no período de 10 dias (308 a

317). O número de estações no processamento foi aumentando de 2 em 2, onde o critério de escolha foi a menor distância em relação a estação IEAV. A Figura 14 apresenta os valores de diferença do PWV variando o número de estações de 4 a 26 e o PWV-GPS_{Gipsy}, todos sendo comparados com a radiossonda.

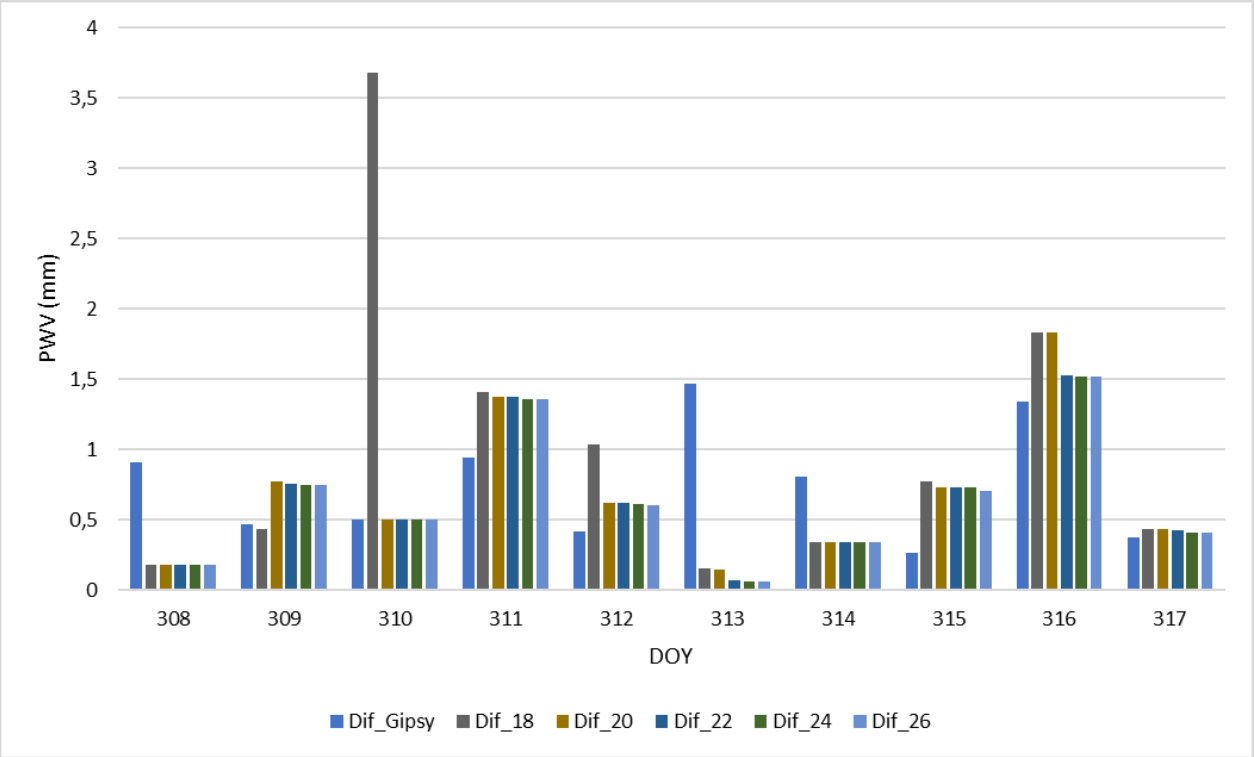
Figura 14- Diferença do $PWV_{Bernese}$ variando o número de estações de 4 a 26 e o do Gipsy (Dif_Gipsy), comparando com a radiossonda (PWV_{Radio})



Elaborado pelo autor.

Devido a escala dificultar a visualização dos dados com 18 estações ou mais, e as diferenças serem grandes com poucas estações, foi feita a exclusão das diferenças com 16 estações ou menos. A Figura 15 apresenta a diferença PWV variando o número de estações de 18 a 26 e com o valor obtido no Gipsy, comparando com a radiossonda como referência.

Figura 15- Diferença do PWV variando o número de estações de 18 a 26 e o do Gipsy (Dif_Gipsy), comparando com a radiossonda (PWV_{Radio})

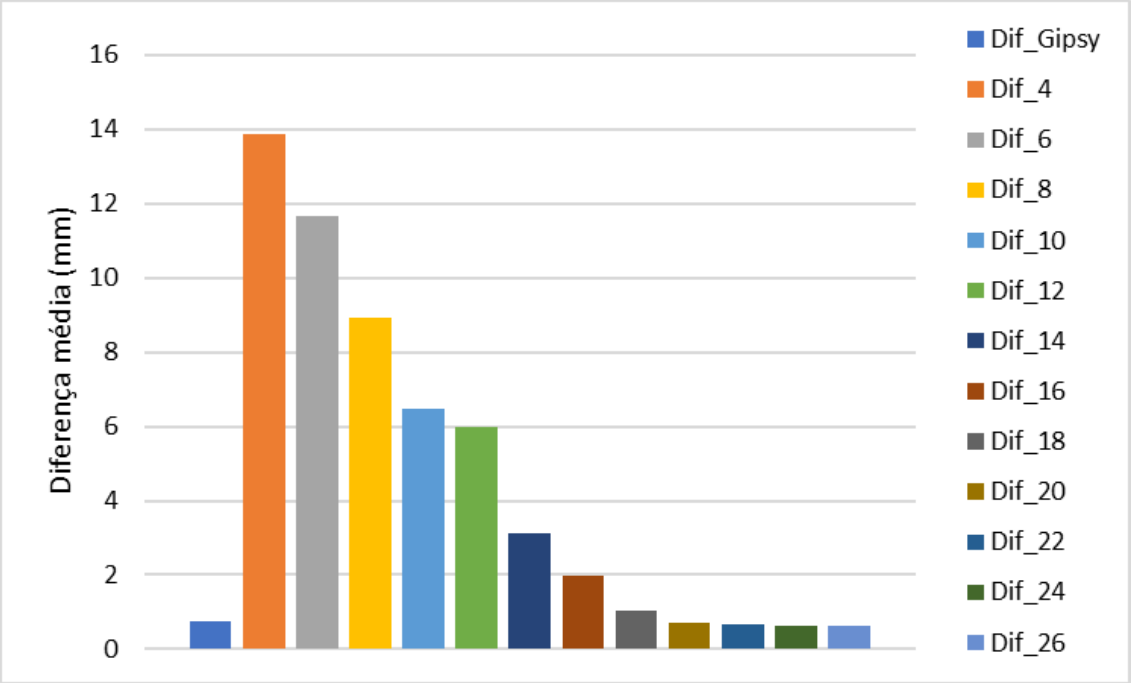


Elaborado pelo autor.

É possível observar que na maioria dos dias analisados, a partir de 20 estações os valores de PWV não variaram de maneira significativa.

Posteriormente analisou-se ainda a diferença média absoluta entre os dias 308 e 317, com os diferentes números de estações e com o $PWV\text{-}GPS_{Gipsy}$, como mostra a Figura 16.

Figura 16- Diferença média do dia 308 até 317 ao variar o número de estações de 4 até 26



Elaborado pelo autor.

A partir da Figura 16 constata-se que a diferença a partir de 20 estações se mantem constante, quando comparada com 22, 24 e 26 estações. Entre 20 e 26 estações o valor do PWV-GNSS$_{Bernese}$ teve uma diferença de aproximadamente 0,051 mm, representado um porcentual de 7,3%. Observou-se também que a diferença média com o Gipsy foi de 0,752 mm, enquanto com o Bernese ao utilizar 26 estações foi de 0,644 mm, diferença que pode estar relacionada ao método de posicionamento utilizado por cada um, os dados do Gipsy foi utilizado o método PPP e no do Bernese o método de posicionamento relativo, ambos no modo pós-processado.

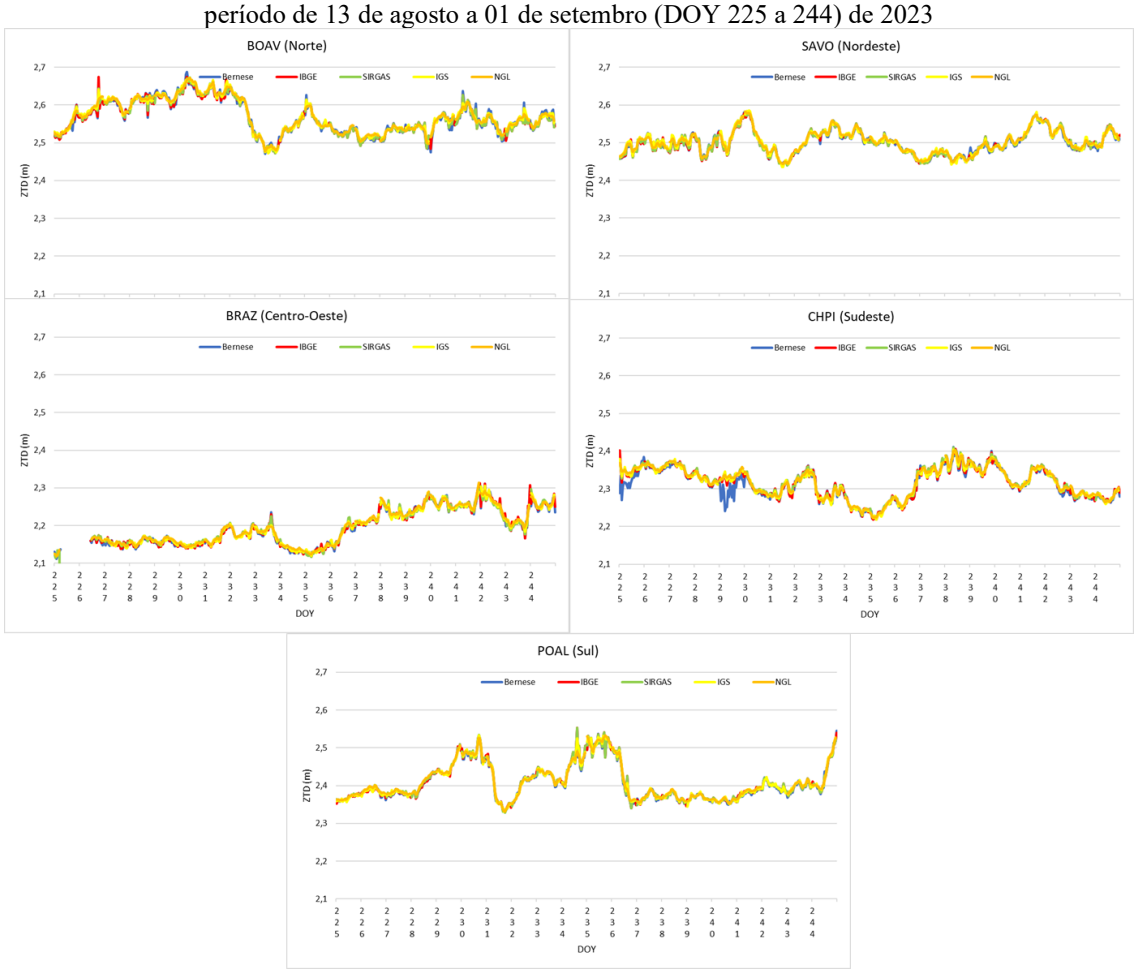
Ademais, ao realizar os processamentos, notou-se que partir de 18 estações o tempo de processamento foi ± 3h 30 min, tempo esse que é similar ao que foi gasto no processamento da RBMC inteira. Logo, concluiu-se que, como o valor de ZTD mais confiável, se dá a partir de 20 estações, e para isso o tempo é similar ao processar a RBMC inteira, dessa maneira, optou-se por sempre processar a rede inteira.

5.3. Análise do ZTD disponibilizado por diferentes fontes de dados

A partir dos dados de ZTD$_{IBGE}$, ZTD$_{IGS}$, ZTD$_{NGL}$, ZTD$_{SIRGAS}$, além do calculado no Bernese (ZTD$_{Bernese}$), durante o período de 225 a 244 de 2023, foi possível comparar as diferentes fontes de ZTD-GNSS. A Figura 17 apresenta os valores de ZTD durantes os

dias 225 a 244, obtidos por meio do IBGE, SIRGAS, NGL, IGS e Bernese, para as estações BOAV, SAVO, BRAZ, CHPI e POAL.

Figura 17- Valores de ZTD com as diferentes fontes: Bernese, IBGE, SIRGAS, NGL e IGS durante o período de 13 de agosto a 01 de setembro (DOY 225 a 244) de 2023



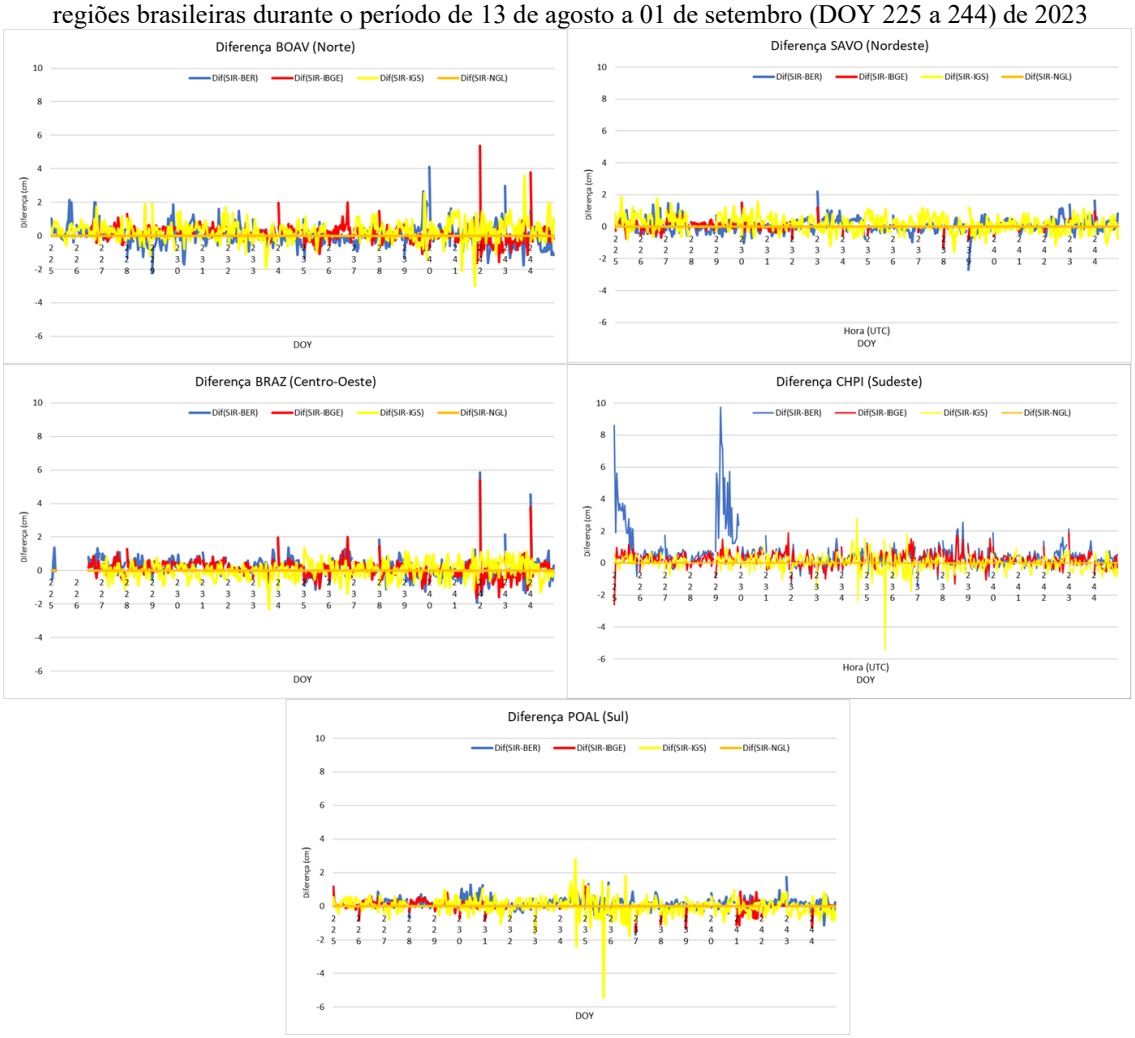
Elaborado pelo autor.

A estação BOAV é a que apresenta os maiores valores de ZTD, isso pode estar relacionado ao fato dessa estação estar em uma região caracterizada como úmida, aumentando a componente não hidrostática (ZWD) e consequentemente o ZTD. Enquanto a estação BRAZ tem os menores valores de ZTD, a qual está localizada em uma região considerada seca.

Na estação CHPI é onde os dados $ZTD_{Bernese}$ apresentam a maior discrepância em relação às demais fontes de dados, sendo que os valores ficaram subestimados, principalmente dos dias DOY: 225 e DOY: 229.

Para as diferenças ficarem mais claras, foi utilizado o SIRGAS como referência e calculada a diferença com as demais fontes, como mostra a Figura 18.

Figura 18- Diferença dos valores de ZTD_{SIRGAS} com ZTD do Bernese, IBGE e do IGS, para as cinco regiões brasileiras durante o período de 13 de agosto a 01 de setembro (DOY 225 a 244) de 2023



Elaborado pelo autor.

Por meio da Figura 18 é possível observar que nos dias 225 e 229 na estação CHPI, os valores de $ZTD_{Bernese}$ chegaram a atingir 10 cm de diferença do SIRGAS. Enquanto em todas as estações analisadas, notou-se que o ZTD_{NGL} é o que mais se assemelha ao ZTD_{SIRGAS}. A Tabela 1 apresenta a média da diferença absoluta dos valores de ZTD_{SIRGAS} em relação às demais fontes, para as cinco regiões brasileiras.

Tabela 1- Média da diferença absoluta dos valores de ZTD do SIRGAS com o Bernese, IBGE e IGS, nas 5 regiões brasileiras

Estação	**Média da diferença absoluta (cm)**			
	SIRGAS-Bernese	**SIRGAS-IBGE**	**SIRGAS-IGS**	**SIRGAS-NGL**
BOAV	0,433	0,162	0,467	0,005
SAVO	0,298	0,090	0,390	0,004
BRAZ	0,396	0,302	0,352	0,004
CHPI	0,711	0,348	0,378	0,003
POAL	0,251	0,115	0,324	0,004
Média	**0,418**	**0,203**	**0,382**	**0,004**

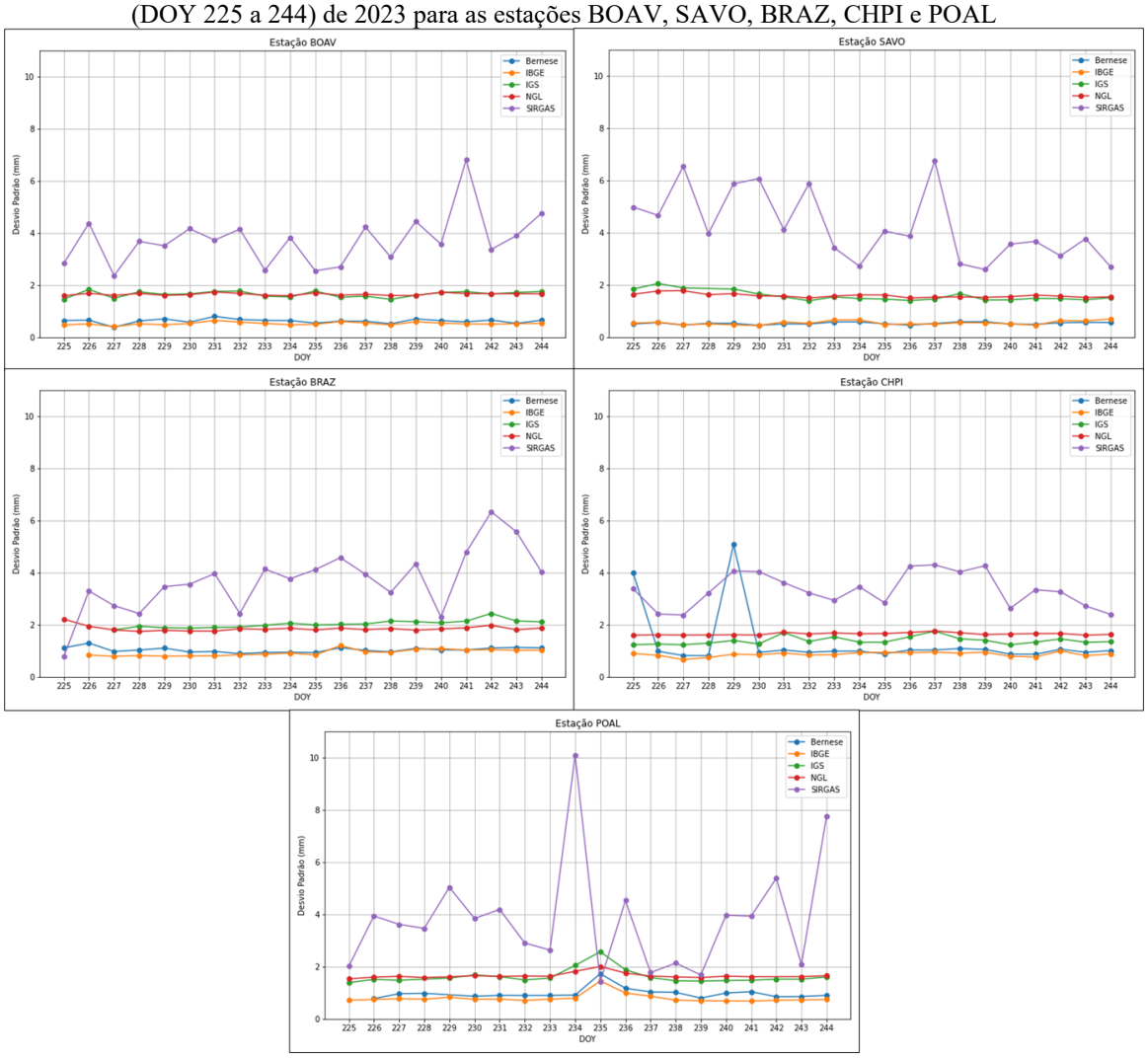
Elaborado pelo autor.

Nas estações BOAV, SAVO e POAL a maior diferença média absoluta foi entre os dados SIRGAS e IGS com valores de 0,467 cm, 0,390 cm e 0,324 cm, respectivamente. Enquanto nas estações BRAZ e CHPI a maior média foi entre as fontes SIRGAS e Bernese. A estação CHPI apresenta a maior diferença ao comparar os dados SIRGAS e Bernese.

Em todas as estações analisadas, a menor diferença média foi ao comparar ZTD_{SIRGAS} e ZTD_{NGL} (0,004 cm), mesmo ambos utilizando softwares diferentes e com técnicas de processamento diferentes, já que o SIRGAS processa no modo relativo e o NGL no modo PPP. Em relação ao modelo de troposfera, o NGL utiliza a VMF1 e o SIRGAS a VMF.

Em seguida foram analisados os valores dos desvios padrão das diferentes fontes de ZTD. Vale destacar que esses valores são disponibilizados juntamente com os valores de ZTD nos arquivos SINEX. A Figura 19 apresenta os valores de desvios padrão das diferentes fontes de ZTD, para as estações BOAV, SAVO, BRAZ, CHPI e POAL.

Figura 19- Desvios padrão das diferentes fontes de ZTD no período de 13 de agosto a 01 de setembro (DOY 225 a 244) de 2023 para as estações BOAV, SAVO, BRAZ, CHPI e POAL



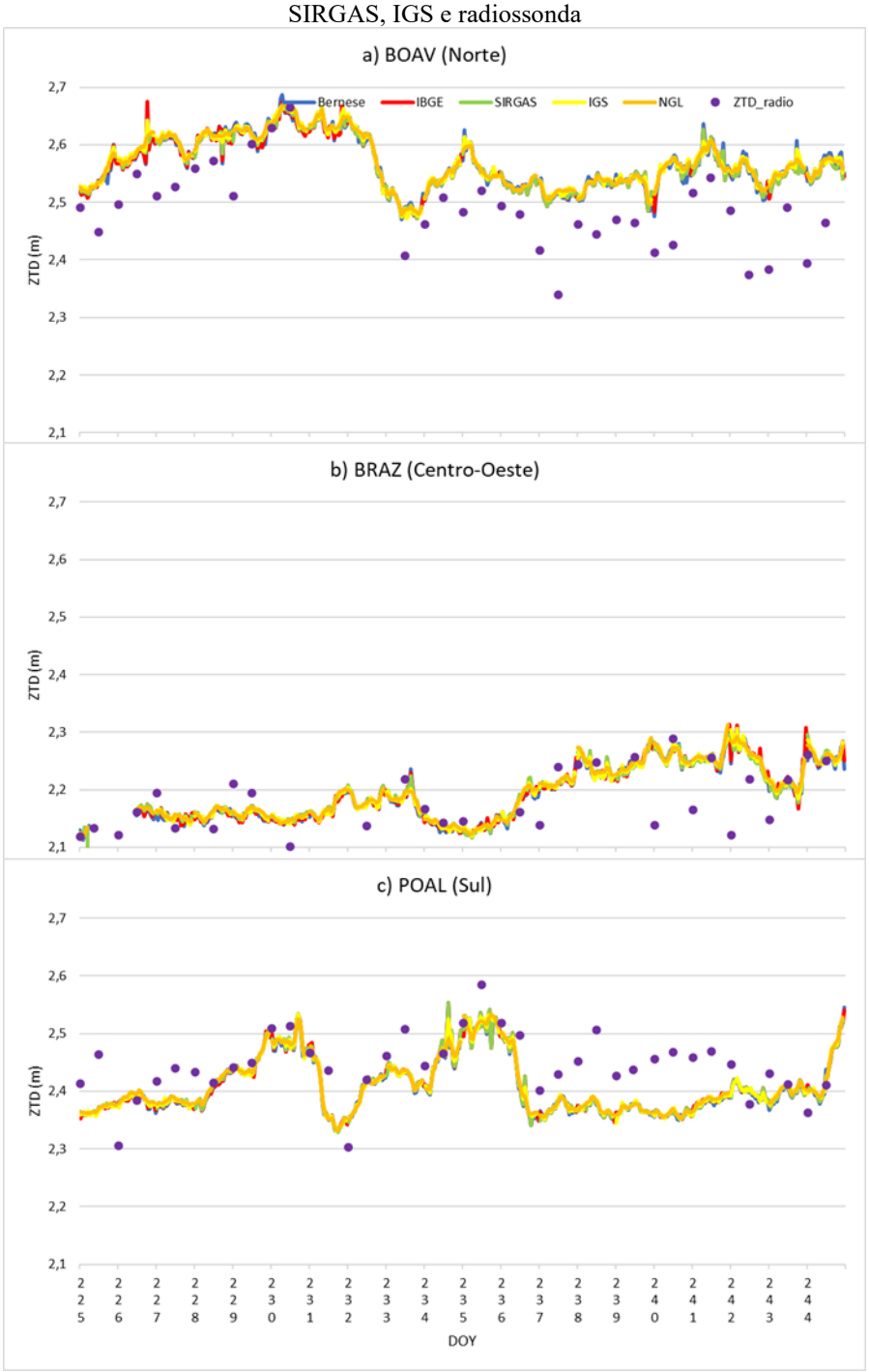
Elaborado pelo autor.

Nas estações BOAV e SAVO durante todo o período analisado, o desvio padrão do SIRGAS é maior em relação às demais fontes, além de apresentar uma maior variação no período analisado. Nas estações BRAZ (DOY 225), CHPI (DOY 225 e 229) e POAL (DOY 235), o desvio padrão do SIRGAS não foi o maior do período. O desvio padrão do Bernese e o IBGE ficaram muito próximos, provavelmente pelo fato de ambos utilizarem configurações semelhantes nos processamentos. Já os desvios do NGL e do IGS também ficaram muito próximos entre si.

Posteriormente, foi calculado os valores de ZTD_{radio} próximas as estações GNSS, porém isso só foi possível para 3 estações: BOAV (SBBV), BRAZ (SBBR) e POAL (SBPA), pois as demais não possuíam radiossonda próximas (distância máxima de 20 km).

A Figura 20 apresenta os valores de ZTD_{radio} junto às demais fontes (Figura 17), para as estações a) BOAV b) BRAZ e c) POAL durante os dias 13 de agosto a 01 de setembro (DOY 225 a 244) de 2023.

Figura 20- Valores de ZTD, para os dias 225 a 244 de 2023, com as diferentes fontes: Bernese, IBGE, SIRGAS, IGS e radiossonda



Elaborado pelo autor.

Nota-se na Figura 20 que os valores de radiossonda foram os que mais dispersaram das demais fontes, nas três estações analisadas. Isso pode ter ocorrido pelo

fato que os valores de ZTD de todas as fontes, exceto da radiossonda, são oriundos de dados GNSS, apresentando comportamento mais similar entre si, além das distâncias entre as estações de radiossonda e GNSS. Foi possível observar também que na estação BOAV todos os valores de ZTD_{Radio} estão subestimados em relação as demais fontes. Enquanto na estação POAL a maioria dos valores de ZTD_{Radio} estão superestimados em relação as demais fontes.

Foi possível obter também os valores de RMSE dos ZTD a partir das diferentes fontes (SIRGAS, IBGE, Bernese e NGL), utilizando o ZTD calculado a partir dos dados de radiossonda como referência. A Tabela 2 apresenta os valores de RMSE de cada fonte de dado ZTD para as estações BOAV, BRAZ e POAL.

Tabela 2- Valores de RMSE das diferentes fontes de dados ZTD, para as estações BOAV, BRAZ e POAL

Estação	$RMSE_{SIRGAS}$ (cm)	$RMSE_{IBGE}$ (cm)	$RMSE_{Bernese}$ (cm)	$RMSE_{NGL}$ (cm)
BOAV	8,9	8,7	8,8	9,1
BRAZ	6,3	5,9	5,8	6,2
POAL	5,9	5,8	6,0	5,8
$Média_{RMSE}$	7,0	6,8	6,9	7,0

Elaborado pelo autor.

Ao observar os valores médios de RMSE das três estações, verifica-se que a média nas 4 fontes (SIRGAS, IBGE, Bernese e NGL) os valores RMSE são próximos, sendo que o do SIRGAS e do NGL são iguais (7 cm). O maior valor de RMSE, foi do NGL na estação BOAV (9,1 cm). Logo, por meio da média dos RMSE das 4 fontes de dados, pode-se dizer que todas apresentam praticamente o mesmo distanciamento em relação a radiossonda.

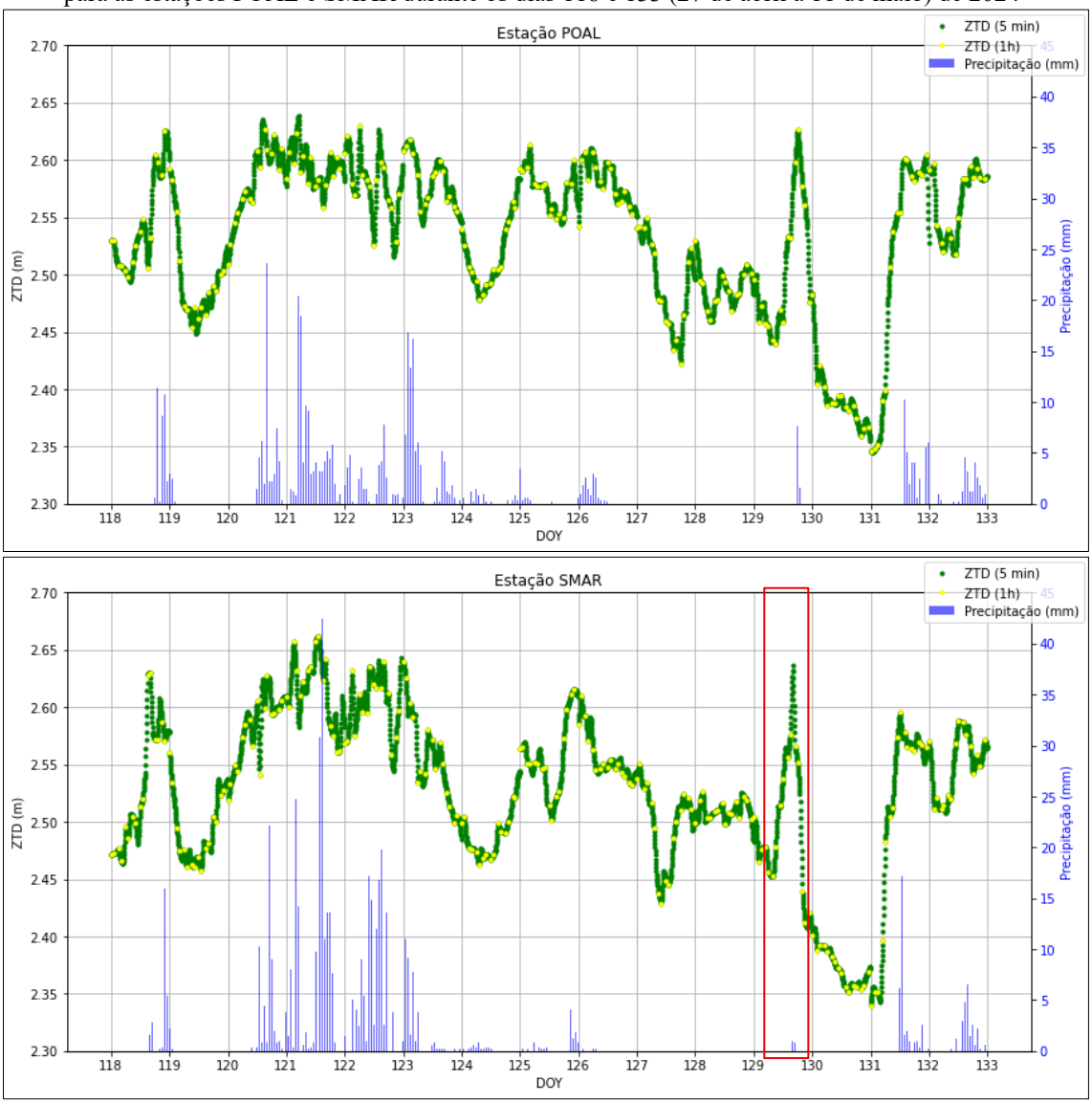
5.4. Estudo de caso - Rio Grande do Sul

A fim de analisar a qualidade do produto desenvolvido sob condições climatológicas extremas, foi feito um estudo de caso de um evento de precipitação extrema ocorrido no Rio Grande do Sul em 2024. A seção 5.4.1 apresenta uma análise dos valores de ZTD de diferentes fontes para esse estudo de caso, bem como seus respectivos desvios padrão, enquanto a seção 5.4.2 apresenta o comportamento do PWV-GNSS.

5.4.1. Análise do ZTD

A partir dos processamentos realizados no software Bernese, como apresentado na sessão 4.1 obteve-se os valores de $ZTD_{Bernese}$ entre os dias 118 e 133 (27 de abril a 11 de maio) de 2024, para a RBMC inteira (em torno de 140 estações), de modo que serão apresentados os valores das estações POAL e SMAR, com resoluções temporais de 5 minutos e de 1 hora, além dos valores de precipitação obtida por meio dos dados das estações INMET, como mostra a Figura 21.

Figura 21- Valores de $ZTD_{Bernese}$ com resolução temporal de 5 minutos e 1 hora, além da precipitação, para as estações POAL e SMAR durante os dias 118 e 133 (27 de abril a 11 de maio) de 2024



Elaborado pelo autor.

Ao analisar a Figura 21 nota-se que de fato a maior resolução temporal (5 min) possibilita observar detalhes no comportamento do $ZTD_{Bernese}$ que os dados a cada uma hora não são capazes de mostrar, como pode ser observado entre os dias 129 e 130 da estação SMAR, onde há um salto (*jump*) que somente os dados a cada 5 minutos mostram.

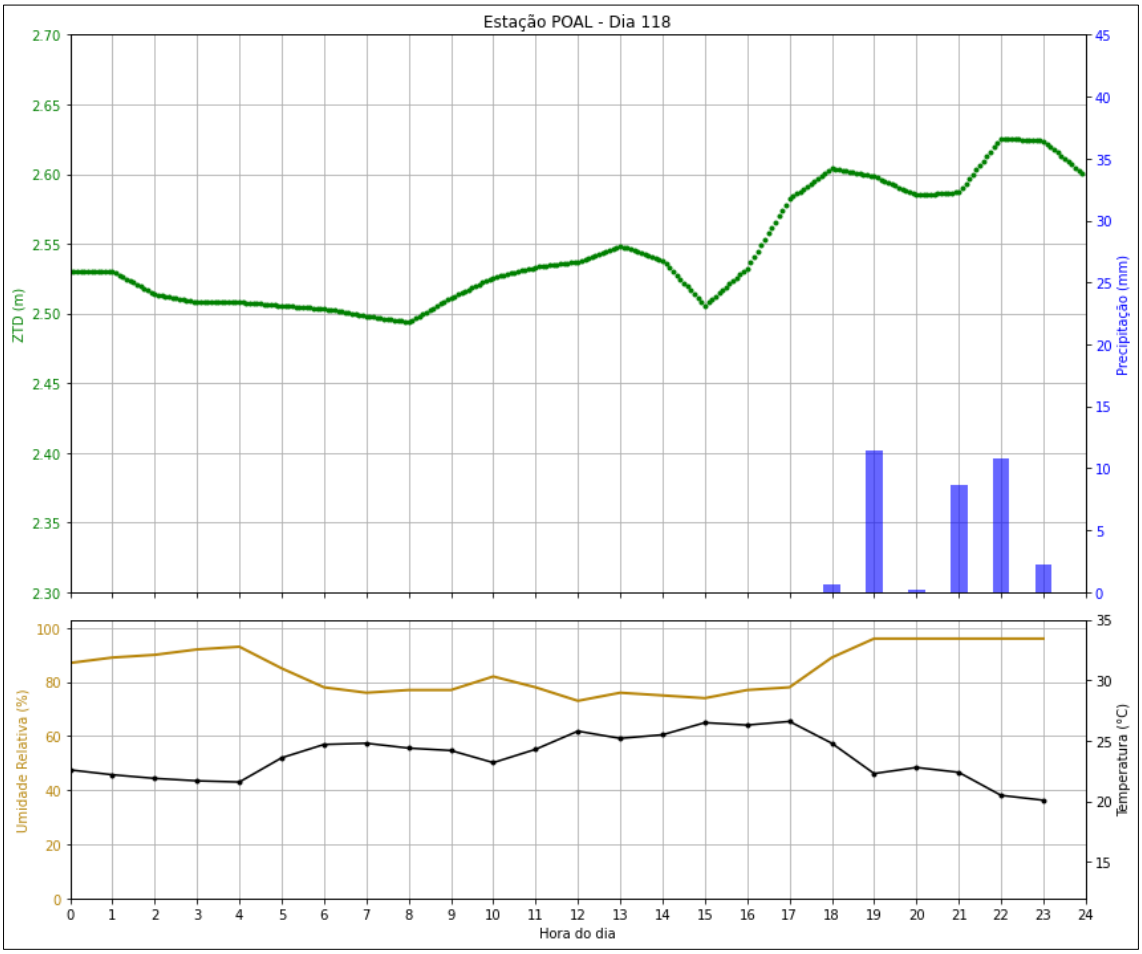
A partir disso, optou-se por analisar somente os dados com resolução temporal de 5 minutos.

Ao analisar a Figura 21 observa-se que a variabilidade do $ZTD_{Bernese}$ é similar nas duas estações ao longo dos dias. Apesar disso, na estação SMAR nota-se o maior valor de precipitação horária registrado, que foi no dia 121 às 15h, uma precipitação de 42,4 mm.

Com o intuito de observar de maneira mais detalhada o desempenho do $ZTD_{Bernese}$ em relação a precipitação foram analisadas também a variabilidade da umidade relativa e temperatura. Essas variáveis foram plotadas dia por dia, e os dias que apresentaram comportamentos mais relevantes em cada estação são apresentados nas Figuras Figura **22** aFigura **37**. Vale destacar que os dados de precipitação, umidade relativa e temperatura, são oriundos das estações INMET mais próximas às estações GNSS avaliadas, como citado na sessão 3.1.2.2.

Na Figura 22 são apresentados os valores de $ZTD_{Bernese}$ da estação POAL, bem como a precipitação, umidade relativa e temperatura durante o dia 118 de 2024.

Figura 22- Valores de $ZTD_{Bernese}$, precipitação, umidade relativa e temperatura da estação POAL no dia 118 de 2024

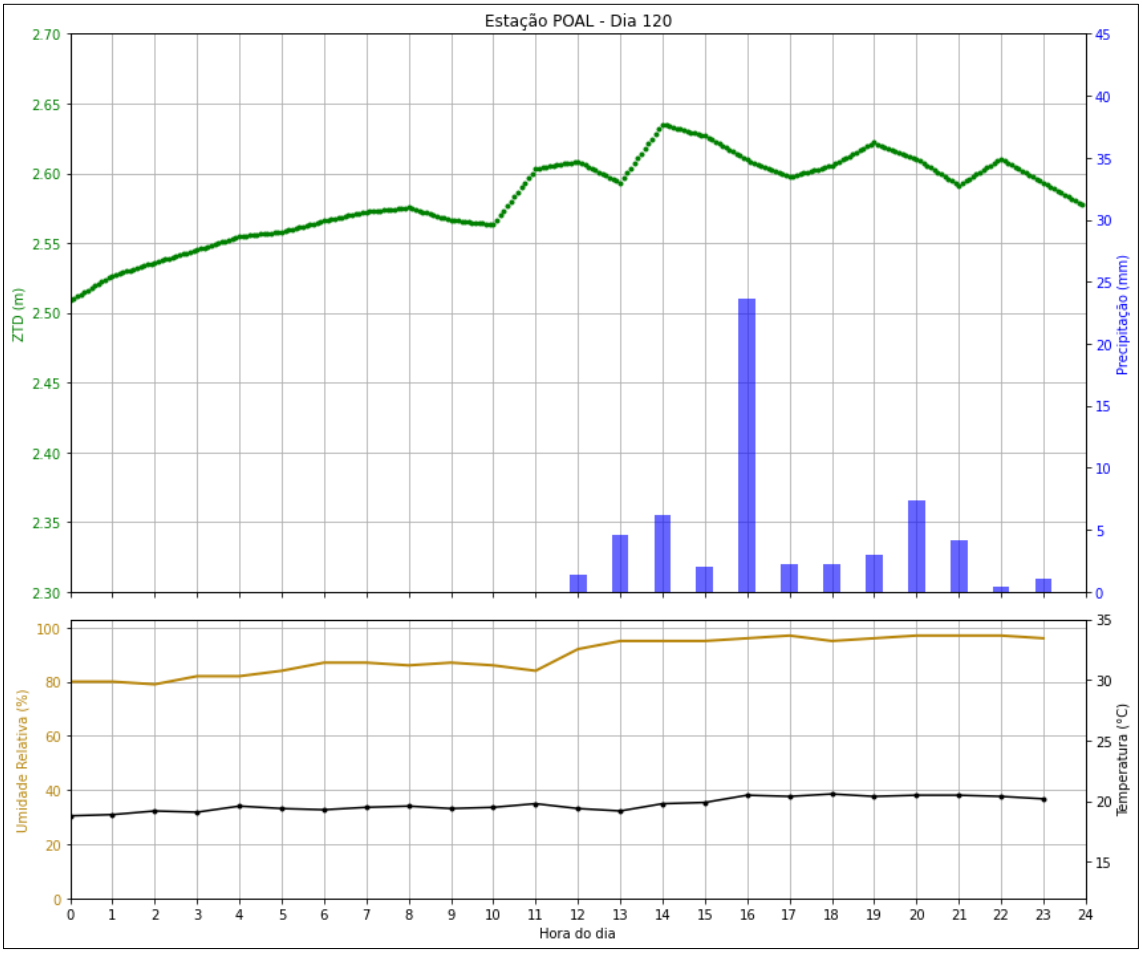


Elaborado pelo autor.

Ao analisar a Figura 22 é possível notar um aumento de aproximadamente 10 cm (2,505 m – 2,604 m) do ZTD no intervalo de 3h (entre 15h e 18h), após pelo menos 17 horas sem chuva. Já em relação à umidade relativa e à temperatura, como é sabido (VIANELLO, 2000) as quais são inversamente proporcionais, a partir das 17h até às 19h há uma queda na temperatura de 4,3° e um aumento de 18% na umidade, e a amplitude entre essas diminui, horário esse (19h) que ocorre a maior precipitação do dia, que foi de 11,4 mm.

A Figura 23 apresenta os valores de $ZTD_{Bernese}$ para o dia 120 de 2024, além dos dados de umidade relativa, precipitação e temperatura, todos para a estação POAL.

Figura 23- Valores de $ZTD_{Bernese}$, precipitação, umidade relativa e temperatura da estação POAL no dia 120 de 2024



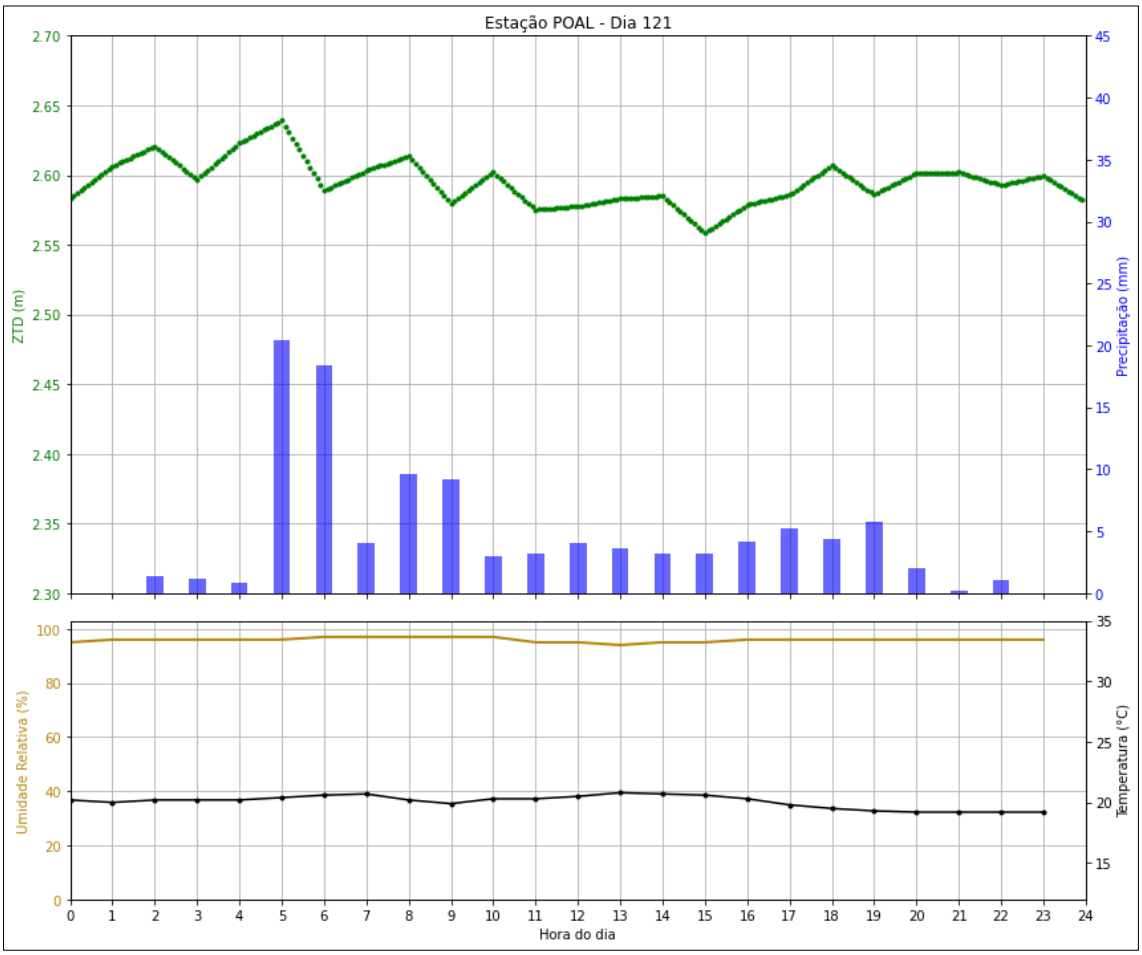
Elaborado pelo autor.

No dia 120, às 12h, foi registrada a primeira precipitação, após 31 horas sem chuva. Apesar desse registro, o maior valor de precipitação nesse dia deu-se às 16h, atingindo 23,6 mm. É possível observar que a partir das 10h há um aumento de 40 mm no valor de ZTD até a próxima hora. Em relação à umidade relativa, a mesma apresenta

um aumento mais significativo após às 11h, enquanto a temperatura tem uma amplitude de 1,8°C no dia.

A Figura 24 traz os dados de $ZTD_{Bernese}$, precipitação, umidade relativa e temperatura durante o dia 121 de 2024, da estação POAL.

Figura 24- Valores de $ZTD_{Bernese}$, precipitação, umidade relativa e temperatura da estação POAL no dia 121 de 2024

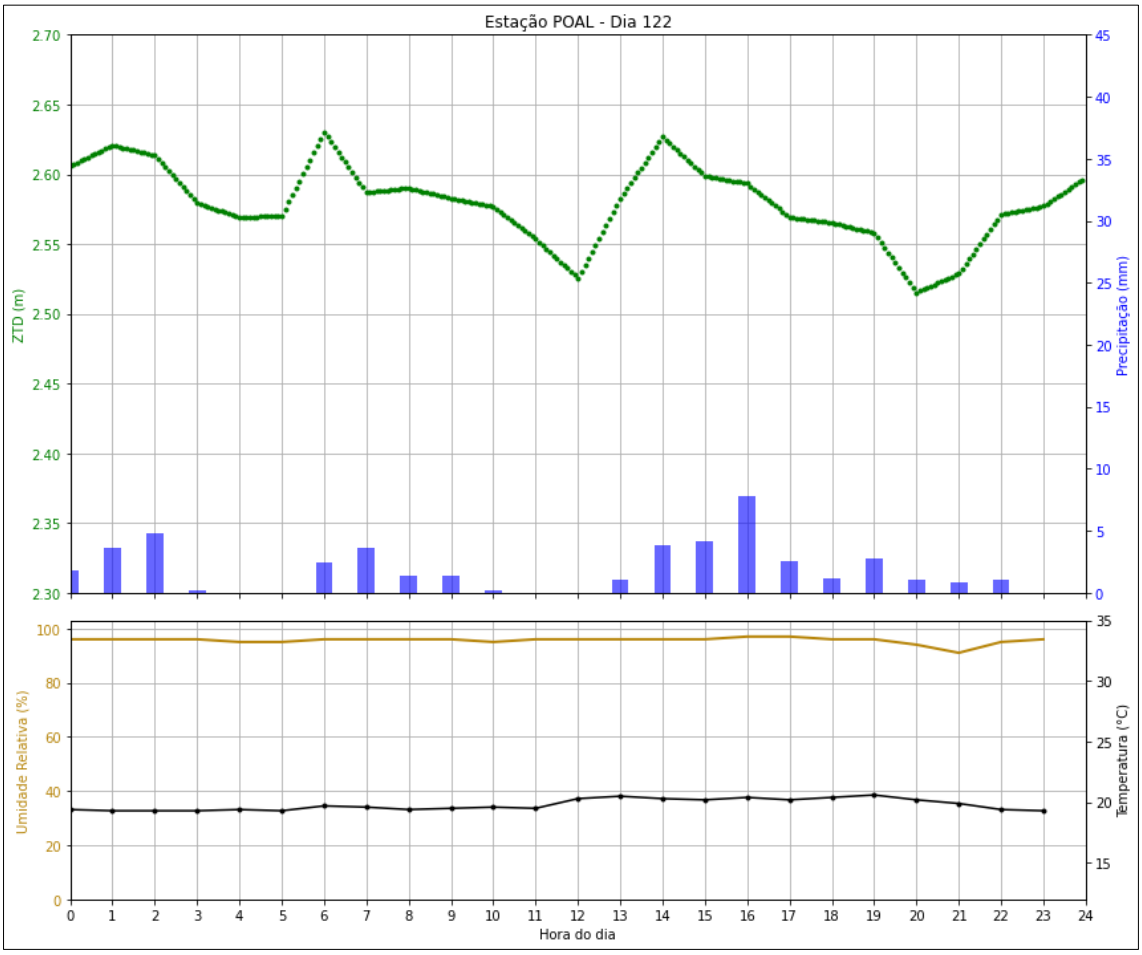


Elaborado pelo autor.

No dia 121, nota-se que a umidade se manteve próxima a 100% ao longo de todo o dia e a temperatura ficou entre 19,2°C e 20,8°C. Já em relação ao ZTD, o mesmo teve uma variação de aproximadamente 10 cm durante o dia, sendo que o maior valor foi às 5h (2,64 m), horário que também foi registrado o maior valor de precipitação acumulada horária (20,4 mm). Além disso, observa-se que duas horas antes do salto das 5h, o $ZTD_{Bernese}$ aumentou 5 cm, mesmo já sendo registrada precipitações a partir das 2h.

Na Figura 25 é possível observar os valores de $ZTD_{Bernese}$, precipitação, umidade relativa e temperatura na estação POAL, para o dia 122 do ano de 2024.

Figura 25- Valores de $ZTD_{Bernese}$, precipitação, umidade relativa e temperatura da estação POAL no dia 122 de 2024

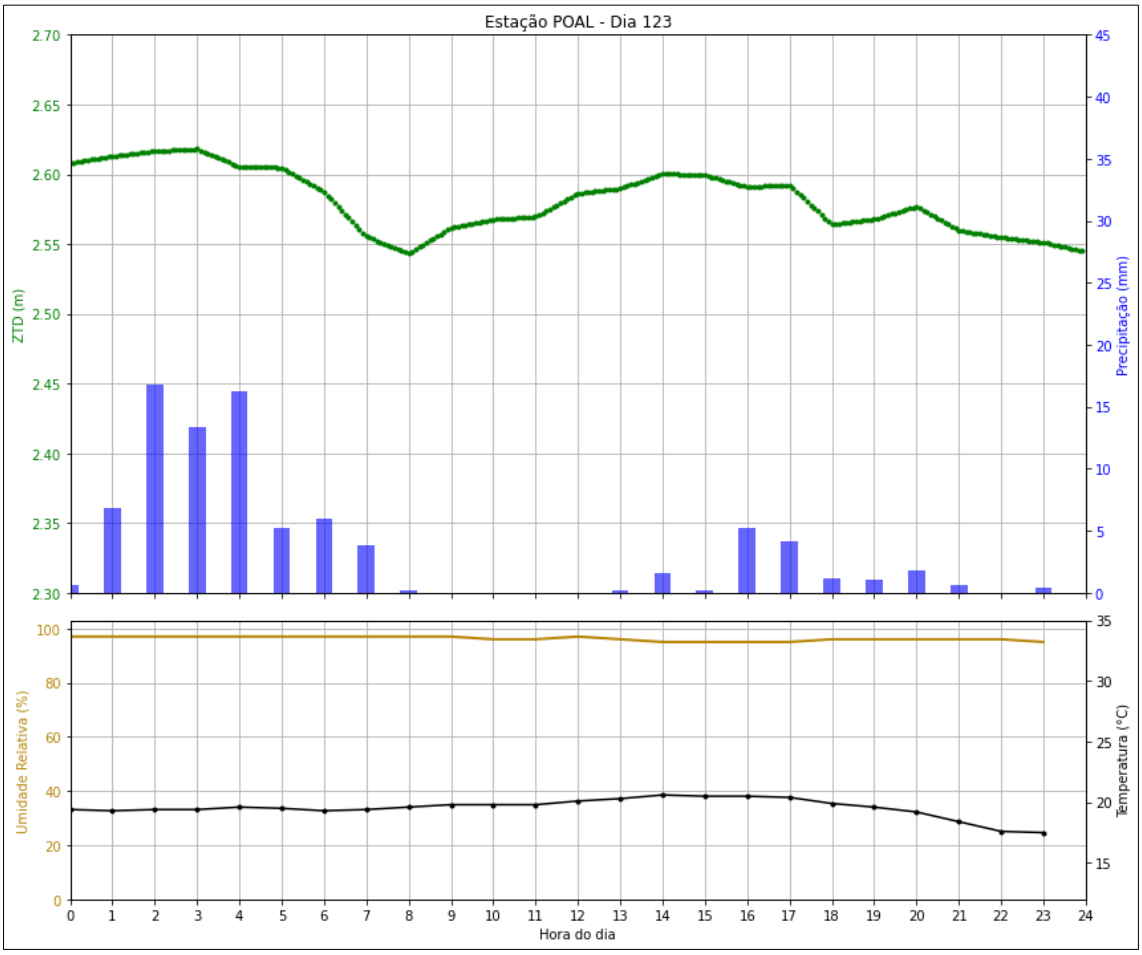


Elaborado pelo autor.

O que mais chama a atenção no dia 122 são os dois saltos nos valores de $ZTD_{Bernese}$ às 6 e 14h, além da queda brusca entre os dois saltos (às 12h). O primeiro salto de $ZTD_{Bernese}$ foi registrado logo após não haver precipitação durante 2 horas antes, onde o valor de ZTD entre 5 e 6 horas aumentou 6 cm. Já entre às 12h e 14h o salto foi de 10 cm. Embora o maior valor de precipitação tenha sido registrado às 16h, o $ZTD_{Bernese}$ estava em queda nesse horário, a qual foi mais rápida após esse horário.

Já a Figura 26 traz os valores de $ZTD_{Bernese}$, precipitação, umidade relativa e temperatura da estação POAL para o dia 123 de 2024

Figura 26- Valores de $ZTD_{Bernese}$, precipitação, umidade relativa e temperatura da estação POAL no dia 123 de 2024

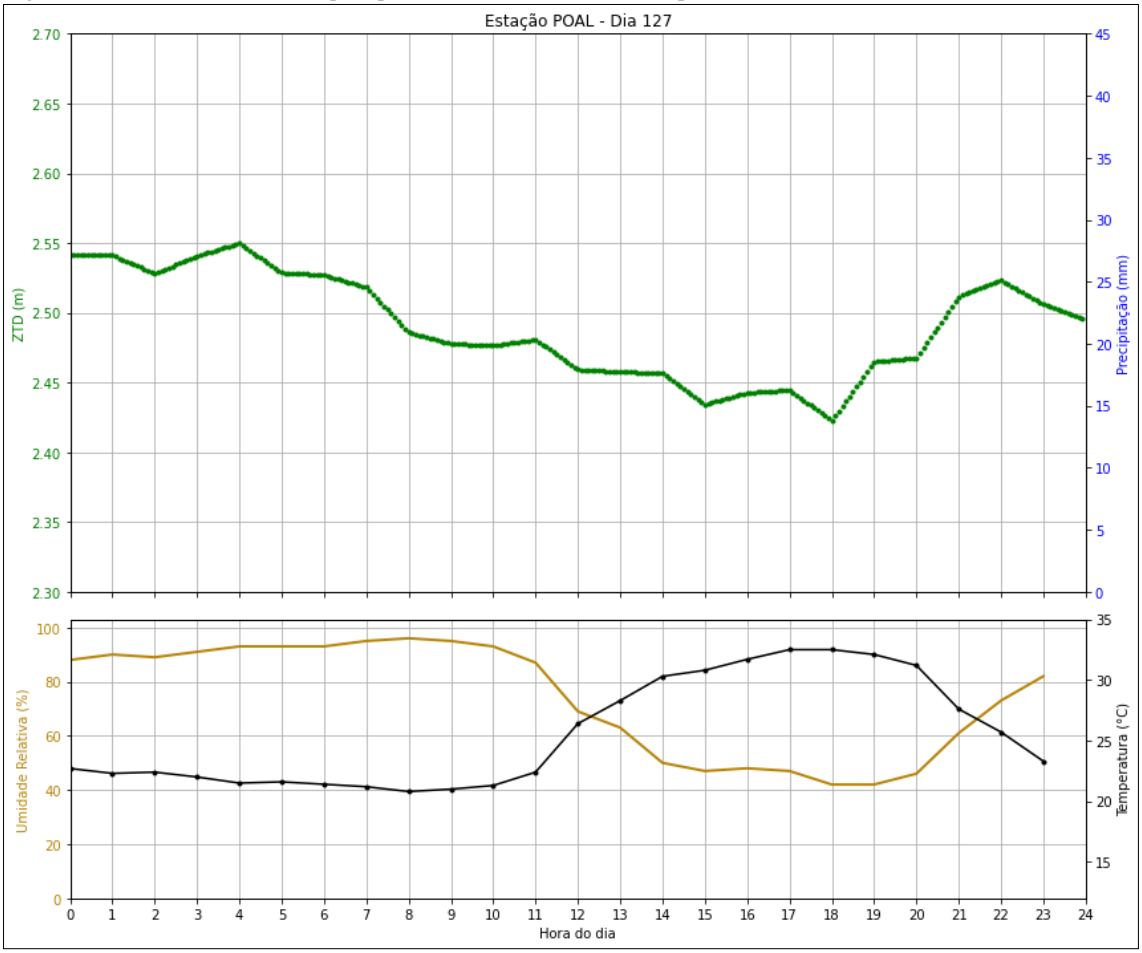


Elaborado pelo autor.

O dia 123 inicia com precipitação de 0,6 mm, a qual finaliza após às 8h e retoma às 13h. Nesse dia a precipitação acumulada foi de 85,4 mm. Já o ZTD atinge valor máximo às 3h (2,618 m) e diminui até às 8h (2,543 m), que é quando a precipitação acaba. Após esse período, o ZTD volta a subir até às 14h. Durante todo o dia, a umidade se mantém próxima a 100%, enquanto a temperatura atinge seu valor mais alto às 14h e após esse horário entra em declínio, de maneira lenta.

Tem-se na Figura 27 os valores de $ZTD_{Bernese}$, precipitação, umidade relativa e temperatura, no dia 127 de 2024 da estação POAL.

Figura 27- Valores de $ZTD_{Bernese}$, precipitação, umidade relativa e temperatura da estação POAL no dia 127 de 2024

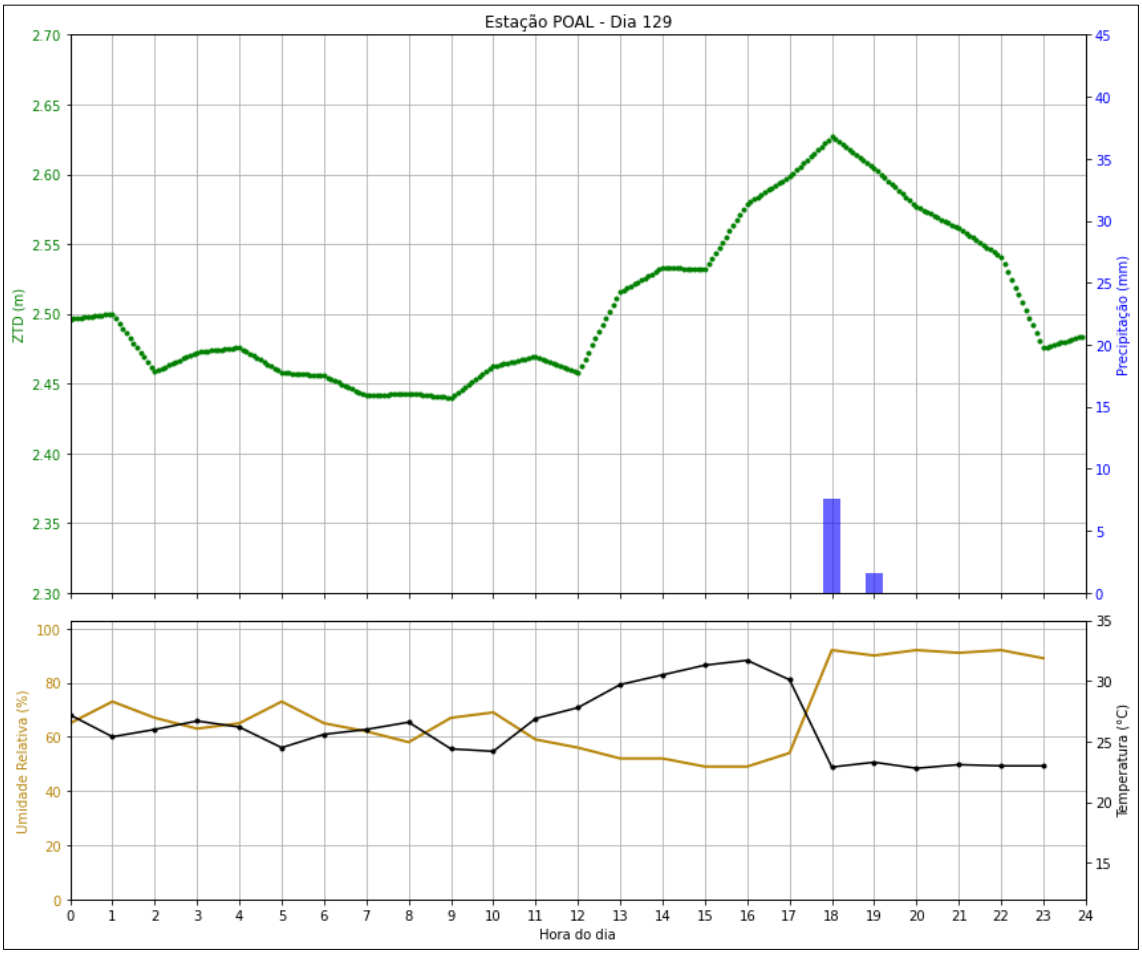


Elaborado pelo autor.

Apesar do dia 127 não registrar nenhuma precipitação, nota-se que o comportamento do ZTD é similar ao da umidade, mostrando o quanto a componente não hidrostática influencia no valor de ZTD. Às 12h há uma inversão entre as curvas da umidade e da temperatura, onde teve um aumento da temperatura e a diminuição da umidade.

A Figura 28 traz os valores de $ZTD_{Bernese}$, precipitação, umidade relativa e temperatura durante o dia 129 de 2024, na estação POAL.

Figura 28- Valores de $ZTD_{Bernese}$, precipitação, umidade relativa e temperatura da estação POAL no dia 129 de 2024

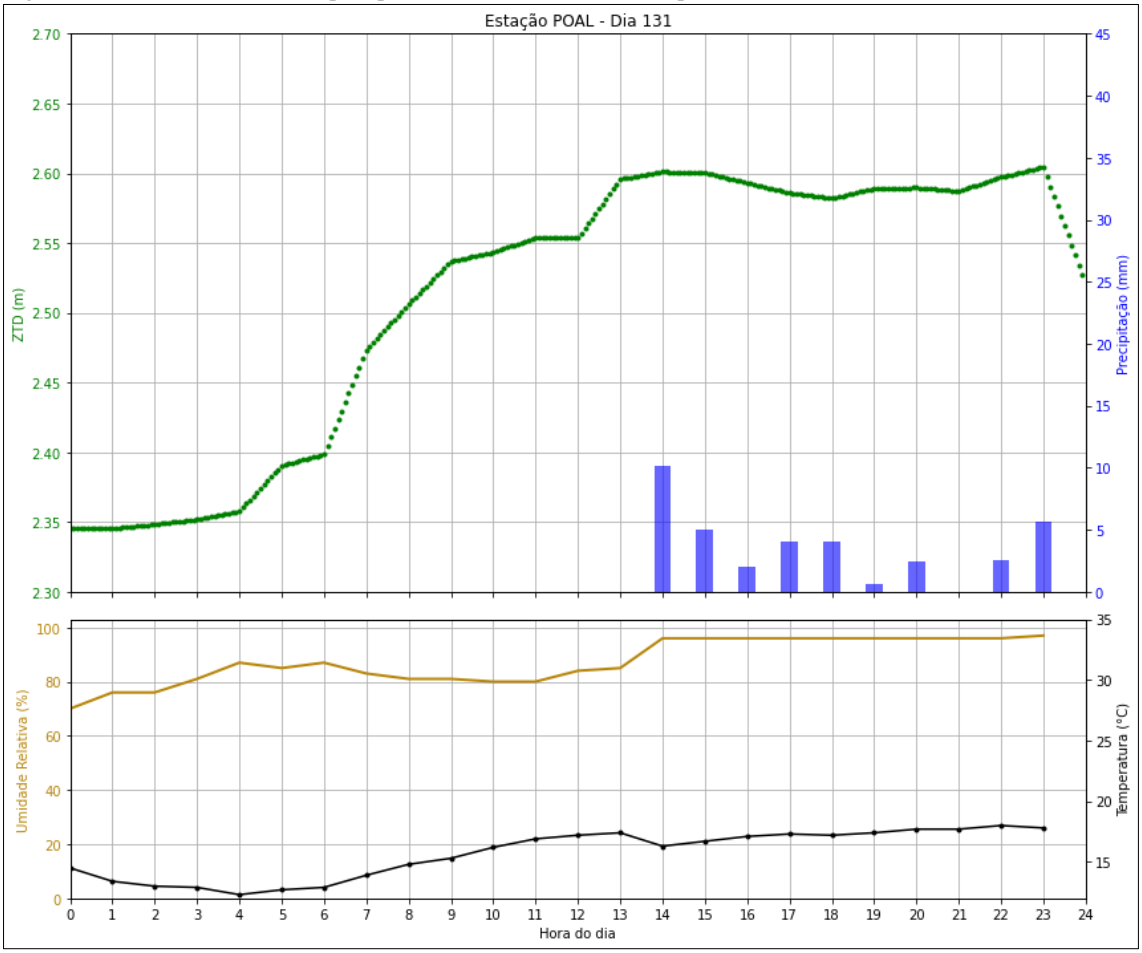


Elaborado pelo autor.

A precipitação registrada no dia 129 às 18h foi de 7,6 mm, apesar de não ser um valor alto, nota-se que o ZTD atingiu seu valor máximo do dia, o qual foi de 2,626 m. Vale destacar, que essa precipitação ocorreu após 3 dias e 6 horas sem chuva, o que tornou o valor de ZTD mais sensível. Já a umidade teve um aumento de 38% em uma hora e a temperatura teve uma queda de 7,2°C (entre 17h e 18h). Esse dia deve ser destacado também, pelo fato de que, ao analisar a Figura 21, nota-se que esse foi o maior salto observado de $ZTD_{Bernese}$ ao longo dos dias analisados.

A Figura 29 apresenta os valores obtidos de $ZTD_{Bernese}$, precipitação, umidade relativa e temperatura no dia 131 na estação POAL.

Figura 29- Valores de $ZTD_{Bernese}$, precipitação, umidade relativa e temperatura da estação POAL no dia 131 de 2024

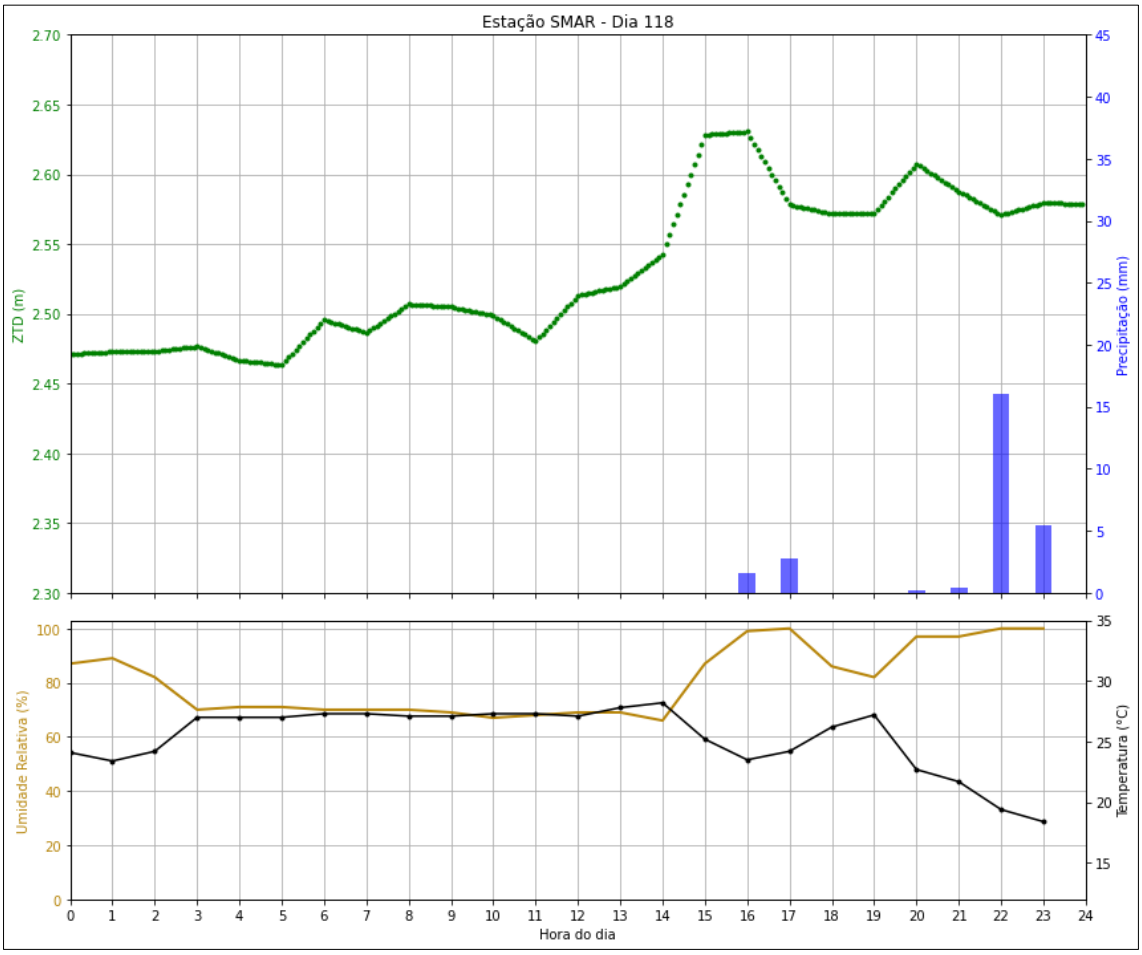


Elaborado pelo autor.

No dia 131 os valores de ZTD foram aumentando ao longo do dia e entre 12h e 13h houve um aumento de 42 mm, enquanto a umidade aumentou 9% entre 13 e 14h, sendo que às 14h foi registrada a primeira e a maior precipitação do dia de 10,2 mm.

Após a análise em relação à estação POAL também foram analisados alguns dias para estação SMAR. Já em relação à estação SMAR, os dados diários são apresentados a seguir. A Figura 30 mostra os valores de precipitação, $ZTD_{Bernese}$, umidade relativa e temperatura no dia 118 de 2024.

Figura 30- Valores de $ZTD_{Bernese}$, precipitação, umidade relativa e temperatura da estação SMAR no dia 118 de 2024

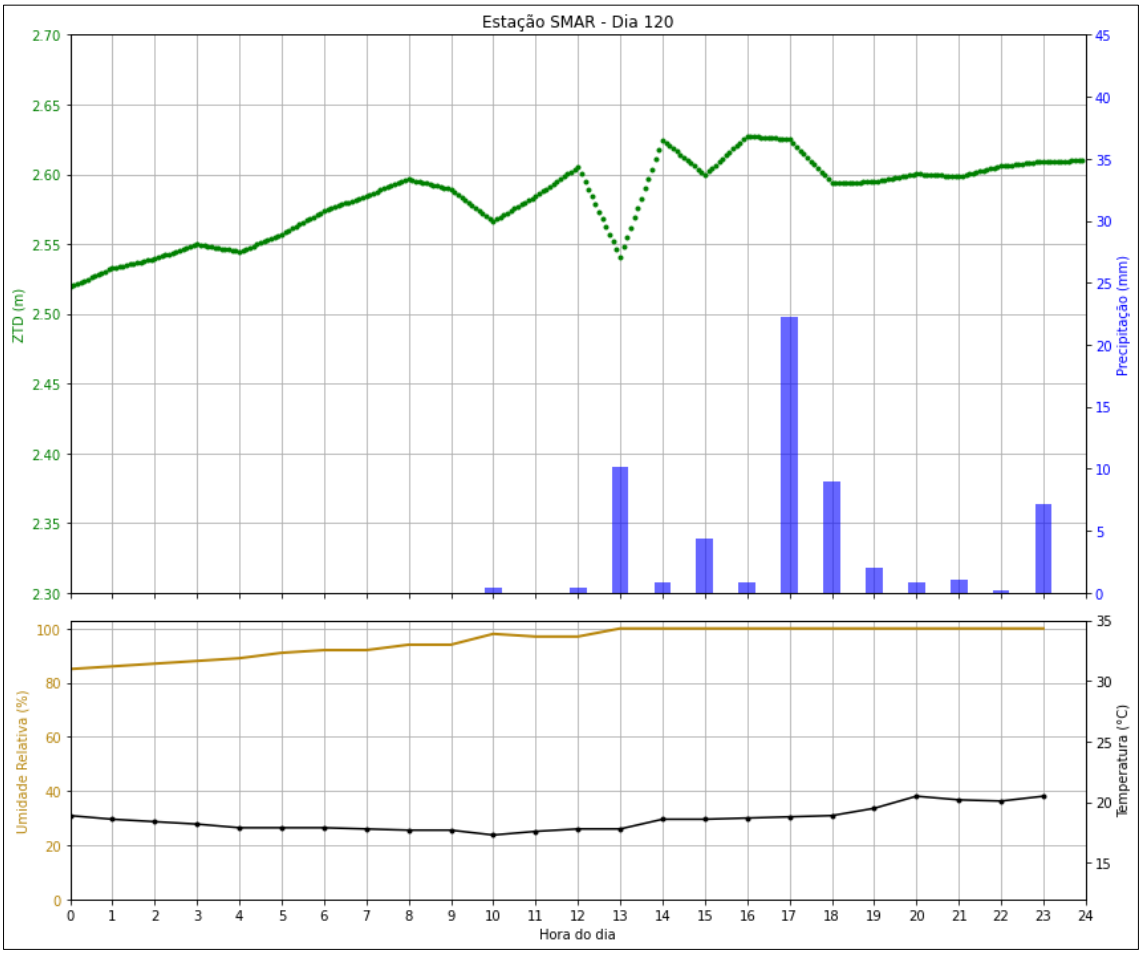


Elaborado pelo autor.

No dia 118 é possível verificar que o valor de $ZTD_{Bernese}$ às 15h aumentou 85 mm e a temperatura 1,7°C em relação à hora anterior, porém a precipitação só foi registrada às 16h. Apesar da precipitação ocorrida às 17h (2,8 mm) ter sido maior que a das 16h (1,6 mm), o valor de $ZTD_{Bernese}$ reduz em 5 cm após a chuva das 16h. Em seguida, às 20h o valor de $ZTD_{Bernese}$ apresenta mais um salto, e após 22h há uma chuva de 16 mm. Vale destacar que apesar da chuva registrada às 22h (16 mm) ser maior que às das 17h (2,8 mm), o valor de $ZTD_{Bernese}$ do primeiro salto foi maior que do segundo, isso pode estar relacionado ao fato de que o primeiro ocorreu após pelo menos 15h sem chuva.

A Figura 31 apresenta os valores de $ZTD_{Bernese}$, precipitação, umidade relativa e temperatura no dia 120 de 2024.

Figura 31- Valores de $ZTD_{Bernese}$, precipitação, umidade relativa e temperatura da estação SMAR no dia 120 de 2024

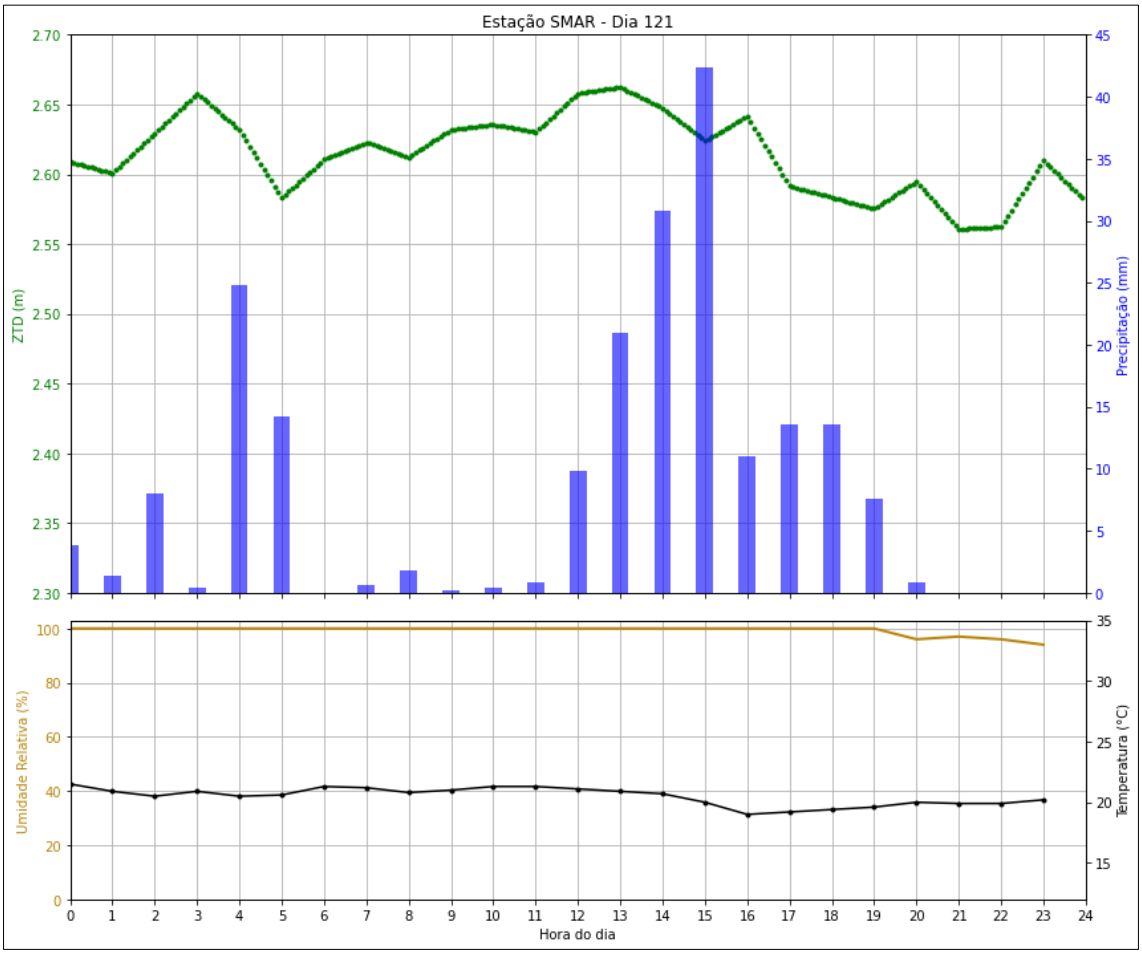


Elaborado pelo autor.

No dia 120 na estação SMAR é possível notar uma queda acentuada de 64,4 mm no valor de $ZTD_{Bernese}$ entre 12 e 13h, seguida de um aumento de 83,5 mm das 13h às 14h. O horário das 13h que é quando ocorre esse ponto de inversão, teve uma precipitação de 10,2 mm, a qual é a segunda maior registrada no dia. Após às 14h o $ZTD_{Bernese}$ diminui, mas após uma hora volta a subir, o menor valor registrado ao longo do dia não diminui a marca de 2,594 m. Às 17h ocorre a maior precipitação do dia, apesar disso, não se nota um salto no valor de $ZTD_{Bernese}$, isso pode estar relacionado ao fato de que já estava chovendo nas horas anteriores, além disso, nota-se que a partir das 13h, o valor de umidade se manteve constante em 100%. Em relação a temperatura, a mesma varia pouco durante todo o dia, apenas 3,2°C de amplitude.

A Figura 32 traz os valores de $ZTD_{Bernese}$, precipitação, umidade relativa e temperatura no dia 121 de 2024.

Figura 32- Valores de $ZTD_{Bernese}$, precipitação, umidade relativa e temperatura da estação SMAR no dia 121 de 2024

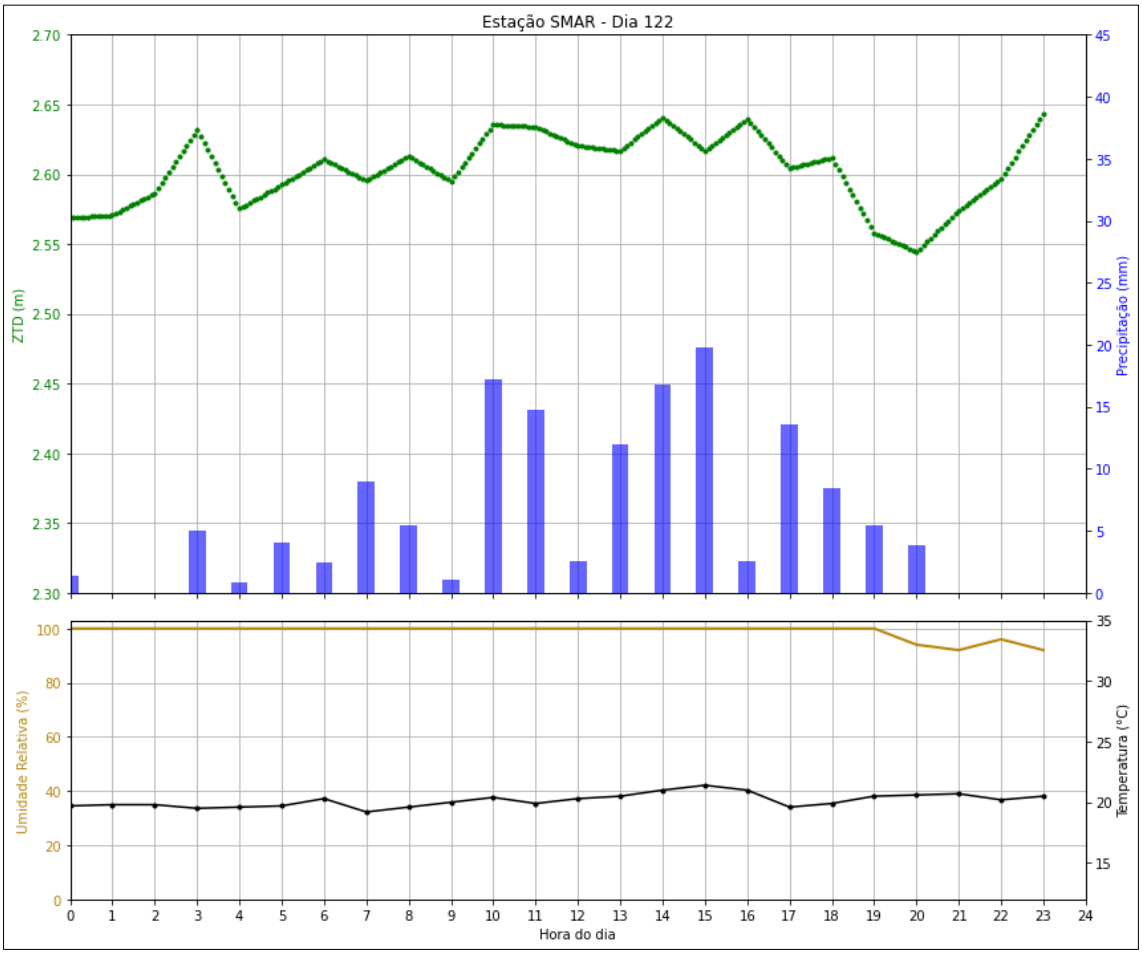


Elaborado pelo autor.

É possível observar que o dia 121 foi muito chuvoso, a precipitação acumulada foi de 207 mm. Nota-se que uma hora antes da precipitação das 4h (24,8 mm) o $ZTD_{Bernese}$ apresentou um salto, chegando atingir 2,658 m, após esse episódio teve uma queda até às 5 h onde teve uma precipitação de 14,2 mm. Nesse dia, a umidade e a temperatura não apresentaram grandes variações.

A Figura 33 apresenta os dados de $ZTD_{Bernese}$, precipitação, umidade relativa e temperatura no dia 122 de 2024.

Figura 33- Valores de $ZTD_{Bernese}$, precipitação, umidade relativa e temperatura da estação SMAR no dia 122 de 2024

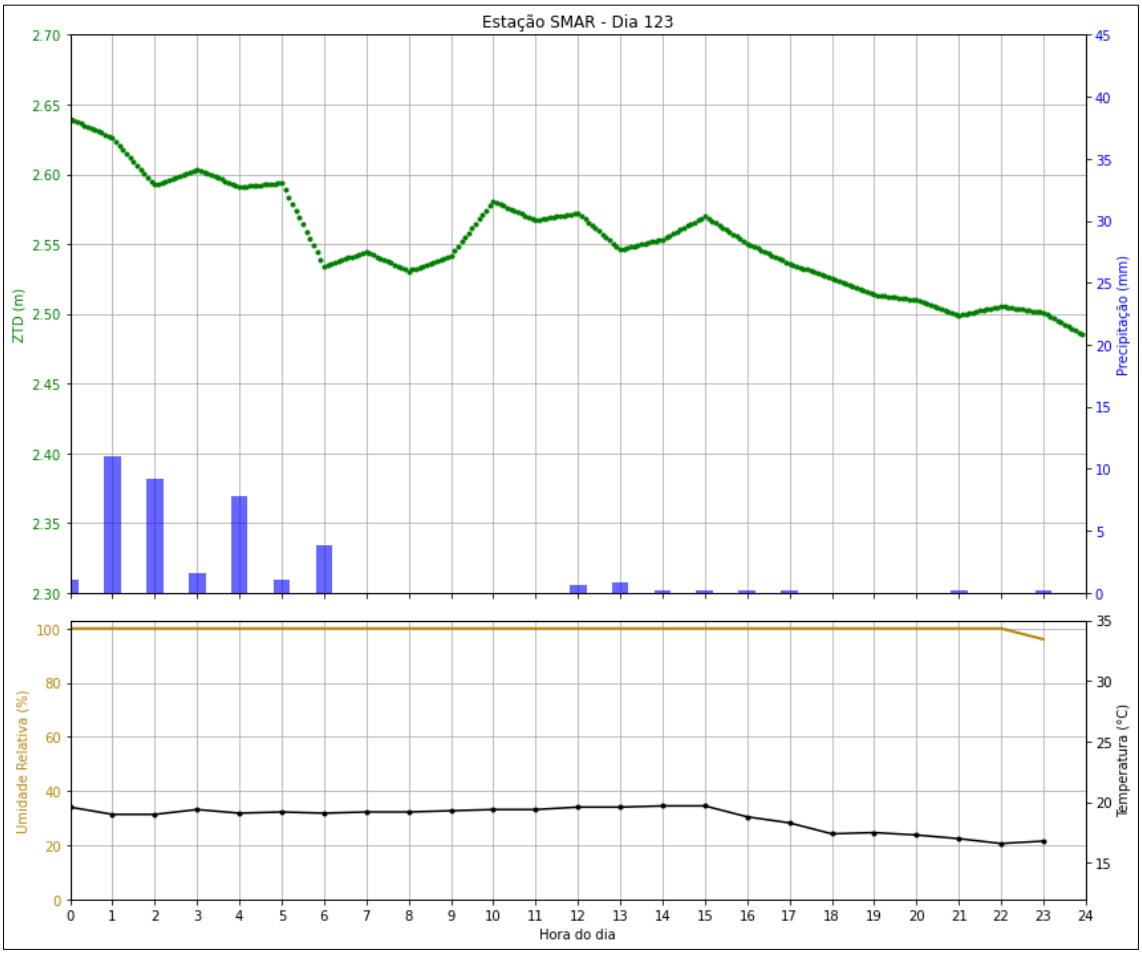


Elaborado pelo autor.

O dia 122 registrou precipitação durante quase todas as horas do dia, chegando a atingir o acumulado de 146 mm no dia. Às 3 h constatou-se um salto no valor de $ZTD_{Bernese}$ (de 50 mm), e uma precipitação 5 mm, após duas horas sem chuva, mesmo não sendo um valor alto de precipitação (como visto na sessão 3.1.1) comparado com as demais horas do dia.

A Figura 34 apresenta os valores de $ZTD_{Bernese}$, precipitação, umidade relativa e temperatura no dia 123 de 2024 para a estação SMAR.

Figura 34- Valores de $ZTD_{Bernese}$, precipitação, umidade relativa e temperatura da estação SMAR no dia 123 de 2024

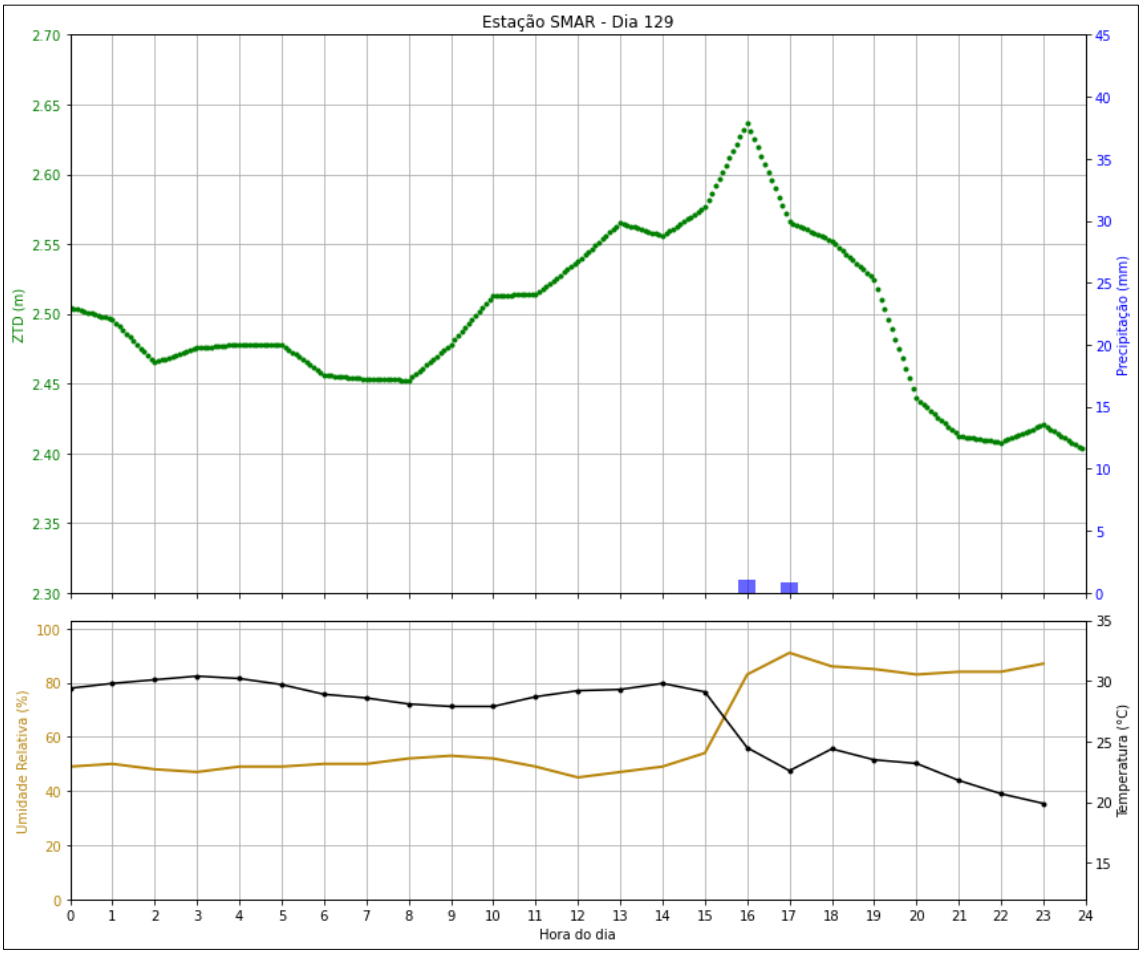


Elaborado pelo autor.

Por meio da Figura 34 nota-se que o $ZTD_{Bernese}$ começou com valor próximo a 2,65 m e finalizou o dia com valor próximo a 2,48 m. Ao longo do dia, a variação mais significativa do $ZTD_{Bernese}$ foi entre às 5h e 6h, onde o $ZTD_{Bernese}$ teve uma redução de aproximadamente 60 mm em uma hora.

A seguir, a Figura 35 apresenta os valores de $ZTD_{Bernese}$, precipitação, umidade relativa e temperatura no dia 129 para a estação SMAR.

Figura 35- Valores de $ZTD_{Bernese}$, precipitação, umidade relativa e temperatura da estação SMAR no dia 129 de 2024

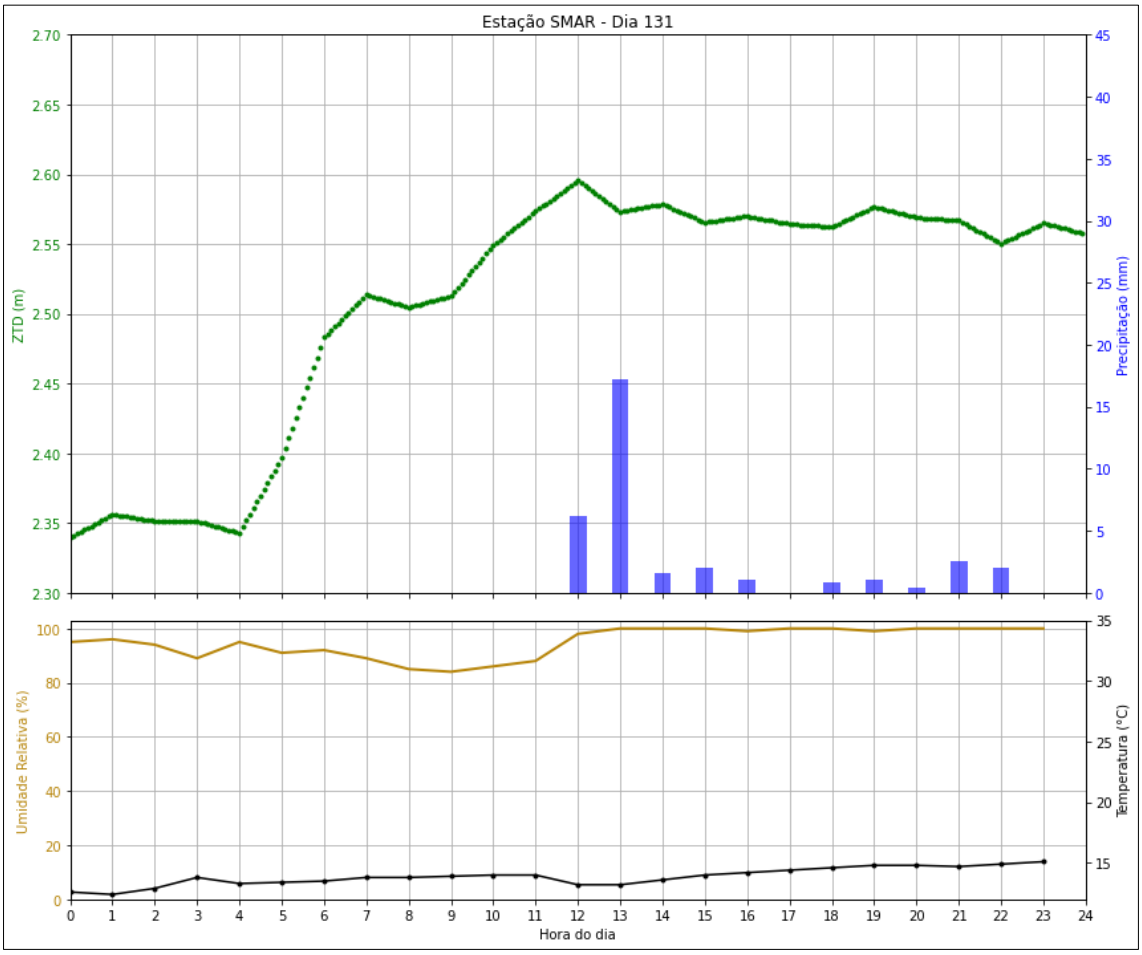


Elaborado pelo autor.

O dia 129 da estação SMAR, assim como observado na estação POAL (Figura 28), não apresentou alta precipitação, o valor acumulado foi de 1,8 mm, apesar desse fato, o valor de ZTD teve um salto, chegando a atingir 2,637 m às 16h. Esse fato ocorreu após um período de 3 dias e 9 horas sem nenhuma precipitação. No que diz respeito à umidade, a qual teve um aumento de 29% entre 15h e 16h, enquanto a temperatura teve uma queda de 4,6°C no mesmo período.

A Figura 36 mostra os valores de $ZTD_{Bernese}$, precipitação, umidade relativa e temperatura no dia 131 de 2024 para a estação SMAR.

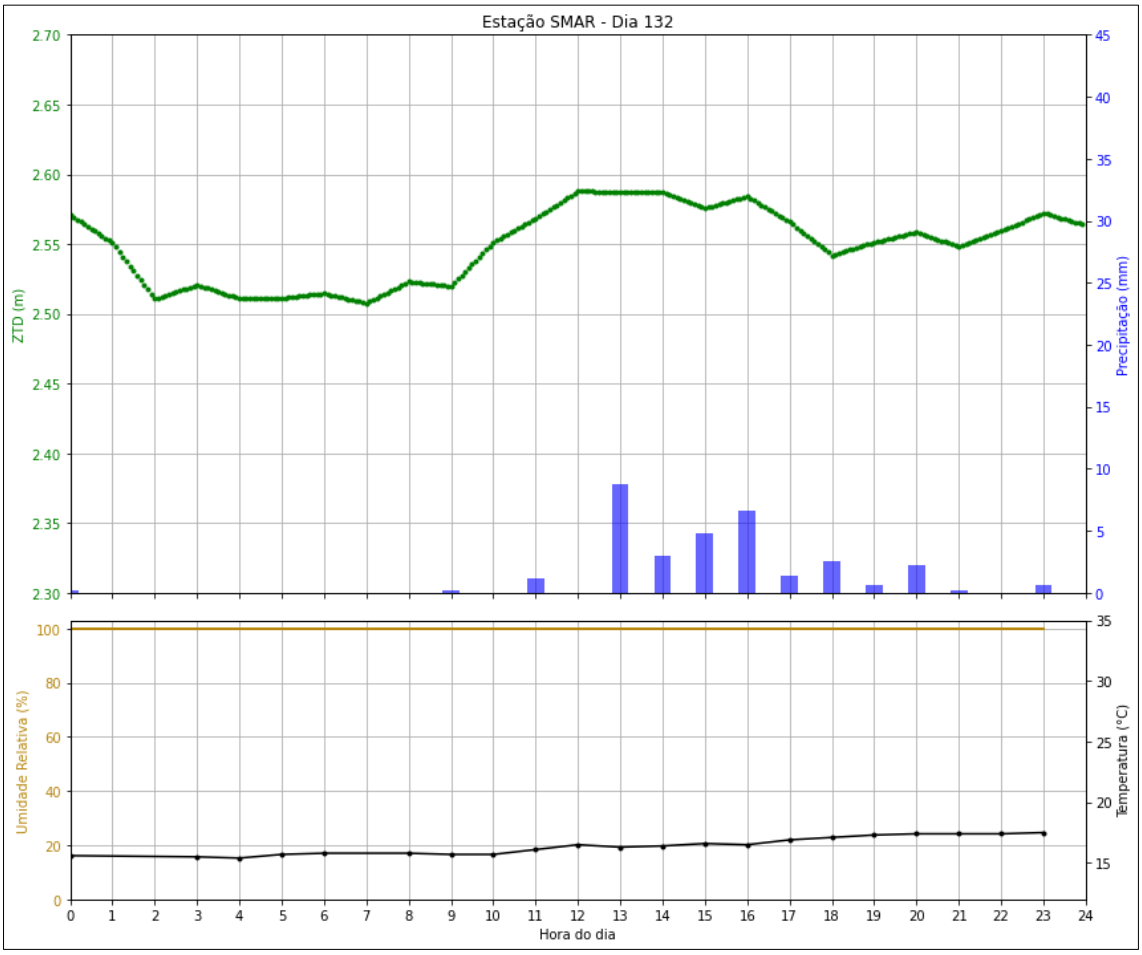
Figura 36- Valores de $ZTD_{Bernese}$, precipitação, umidade relativa e temperatura da estação SMAR no dia 131 de 2024



Elaborado pelo autor.

No dia 131 nota-se que após às 4h o ZTD começa a aumentar de maneira significativa, principalmente entre às 5 e 6h, o qual aumenta 90 mm em uma hora, apesar desse aumento em pouco tempo o ZTD ainda continuou subindo até às 7h e diferente do que se espera, não houve precipitação pelas próximas 5 horas. O próximo salto foi às 12h, juntamente com a precipitação de 6,2 mm, seguida de outra de 17,2 mm.

Figura 37- Valores de $ZTD_{Bernese}$, precipitação, umidade relativa e temperatura da estação SMAR no dia 132 de 2024



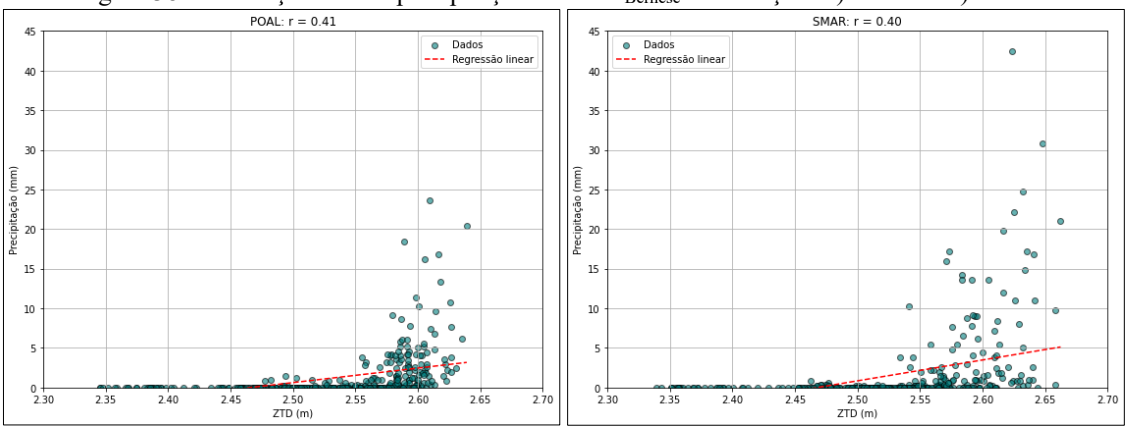
Elaborado pelo autor.

O dia 132 apresentou o maior valor de ZTD uma hora antes da maior precipitação do dia (8,8 mm), valor esse que foi de 2,588 m. Nesse dia, a umidade atingiu o valor máximo durante todo o dia e a temperatura não teve grandes variações.

Por meio dos resultados apresentados nesse experimento, pode-se dizer que a sensibilidade do ZTD não está relacionada somente a quantidade de chuva, mas também a quanto tempo a estação está sem precipitação. Observou-se que em um período de mais de 3 dias sem precipitação é possível observar que o ZTD começa a aumentar 8h antes da chuva, mesmo sendo fraca (1,8 mm) (Defesa Civil, 2022).

A fim de analisar a correlação entre o $ZTD_{Bernese}$ e a precipitação, foi realizada análise da correlação entra essas duas variáveis, como mostra a Figura 38.

Figura 38- Correlação entre a precipitação e o $ZTD_{Bernese}$ nas estações a) POAL e b) SMAR



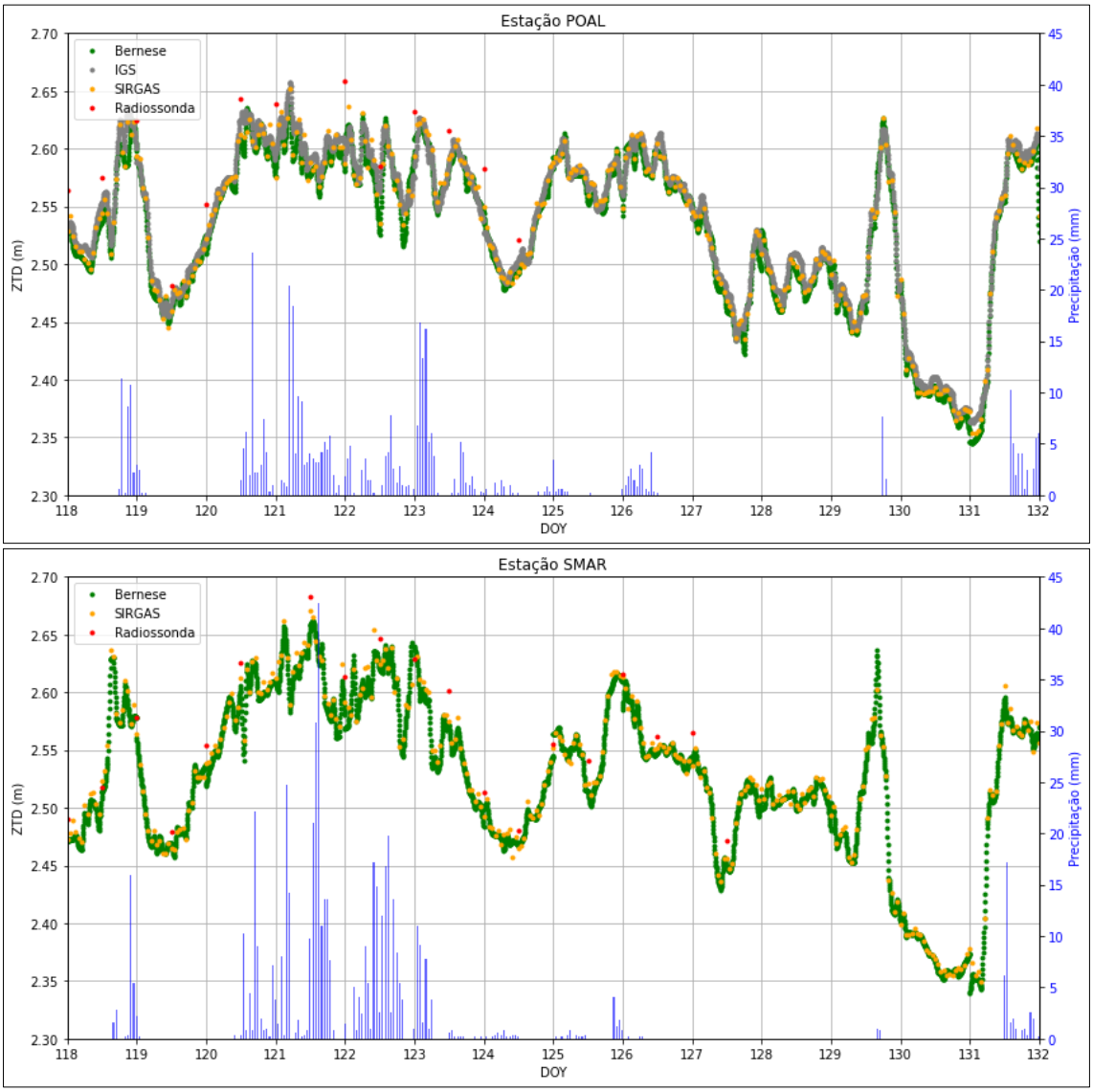
a) b)

Elaborado pelo autor.

As estações POAL e SMAR apresentam baixa correlação entre o valor de $ZTD_{Bernese}$ e a precipitação, sendo que os valores de correlação das mesmas são 0,41 e 0,40, respectivamente. Segundo Rumsey (2023), r = |±0,30| é considerada uma relação linear fraca, já r = |±0,50| é considerada uma relação linear moderada. Assim, os valores de $ZTD_{Bernese}$ e a precipitação durante os dias 118 e 132, apresentaram uma relação linear fraca.

Após analisar de maneira detalhada o comportamento do $ZTD_{Bernese}$ nas estações POAL e SMAR, na Figura 39 é apresentado os valores de ZTD_{IGS}, ZTD_{SIRGAS} e ZTD_{radio} e a precipitação durante os dias 118 ao 132.

Figura 39- Valores de $ZTD_{Bernese}$, ZTD_{IGS}, ZTD_{SIRGAS} e ZTD_{radio} para as estações POAL e SMAR, durante os dias 118 a 132 de 2024

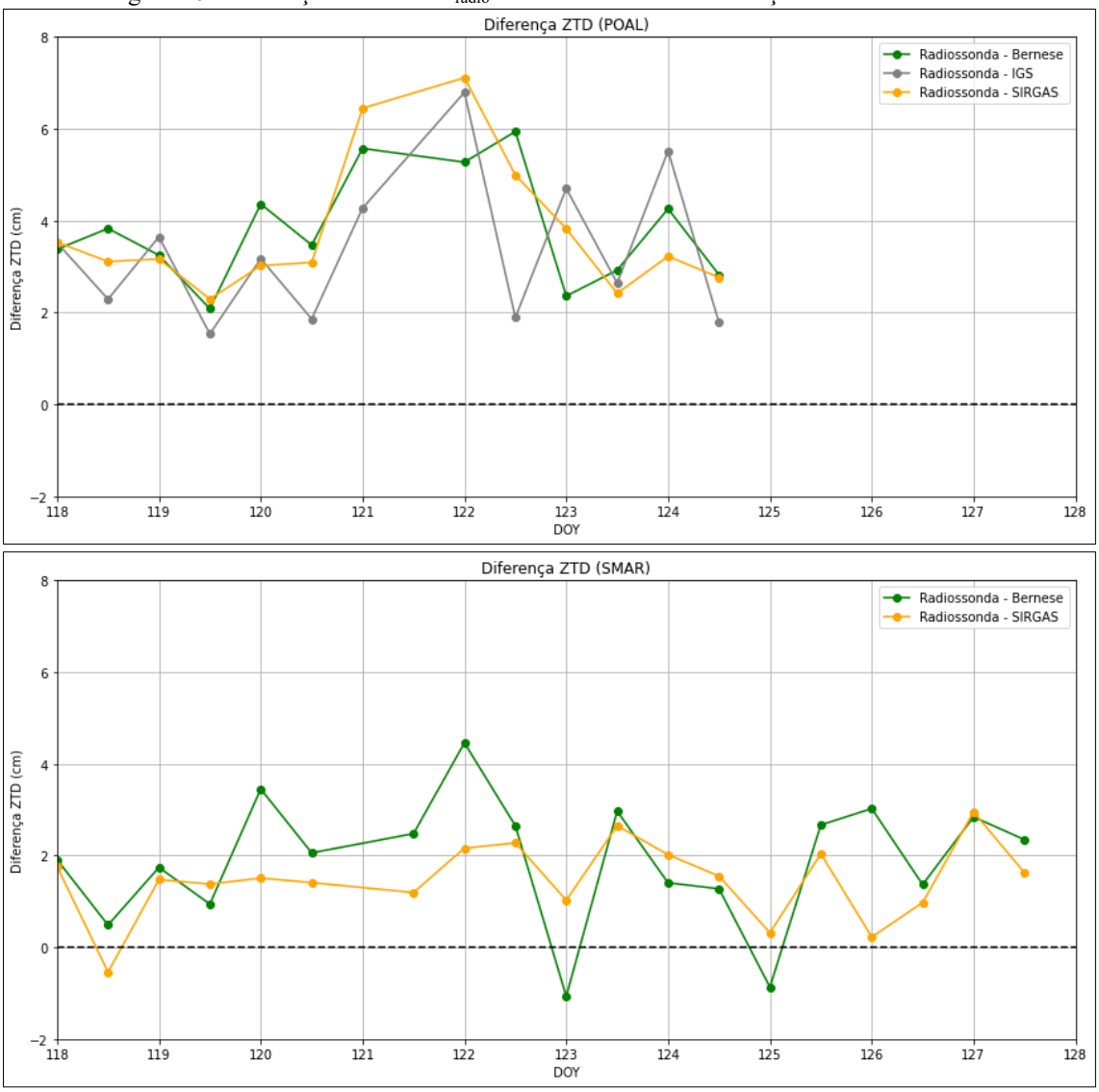


Elaborado pelo autor.

Nota-se que na estação SMAR não há dados ZTD_{IGS}, isso se dá pelo fato de que essa estação não faz parte da rede IGS.

Ao analisar a Figura 39, observa-se que no geral os valores de ZTD apresentam o mesmo comportamento entre as fontes, com exceção do ZTD_{radio}. A Figura 40 mostra a diferença entre o ZTD_{radio} que é considerada a referência e as demais fontes para as estações POAL e SMAR no período de 118 a 132 de 2024.

Figura 40- Diferença entre o ZTD_{radio} e as demais fontes nas estações POAL e SMAR



Elaborado pelo autor.

Por meio da Figura 40 é possível observar que na estação POAL a diferença foi calculada até o dia 124 e na estação SMAR até o dia 127, isso se deve à ausência de dados de radiossonda. A Tabela 3 apresenta de maneira sumarizada a diferença média absoluta entre o ZTD_{radio} e as demais fontes de dados.

Tabela 3- Diferença média entre o ZTD_{radio} e as demais fontes

Estação	Radiossonda-Bernese (cm)	Radiossonda-IGS (cm)	Radiossonda-SIRGAS (cm)
POAL	3,808	3,355	3,771
SMAR	2,107	-	1,475

Elaborado pelo autor.

Ao analisar a Tabela 3 observa-se que a menor diferença é na estação SMAR quando comparada com a estação POAL. Já a maior diferença média é entre o ZTD_{radio} e o $ZTD_{Bernese}$, onde a média foi de 3,808 cm na estação POAL. Ainda na estação POAL, a

menor diferença média foi entre o ZTD_{radio} e o ZTD_{IGS} onde o valor foi de 3,355 cm. Em seguida, calculou-se também o RMSE das diferentes fontes em relação a radiossonda, a Tabela 4 apresenta esses valores.

Tabela 4- RMSE das diferentes fontes

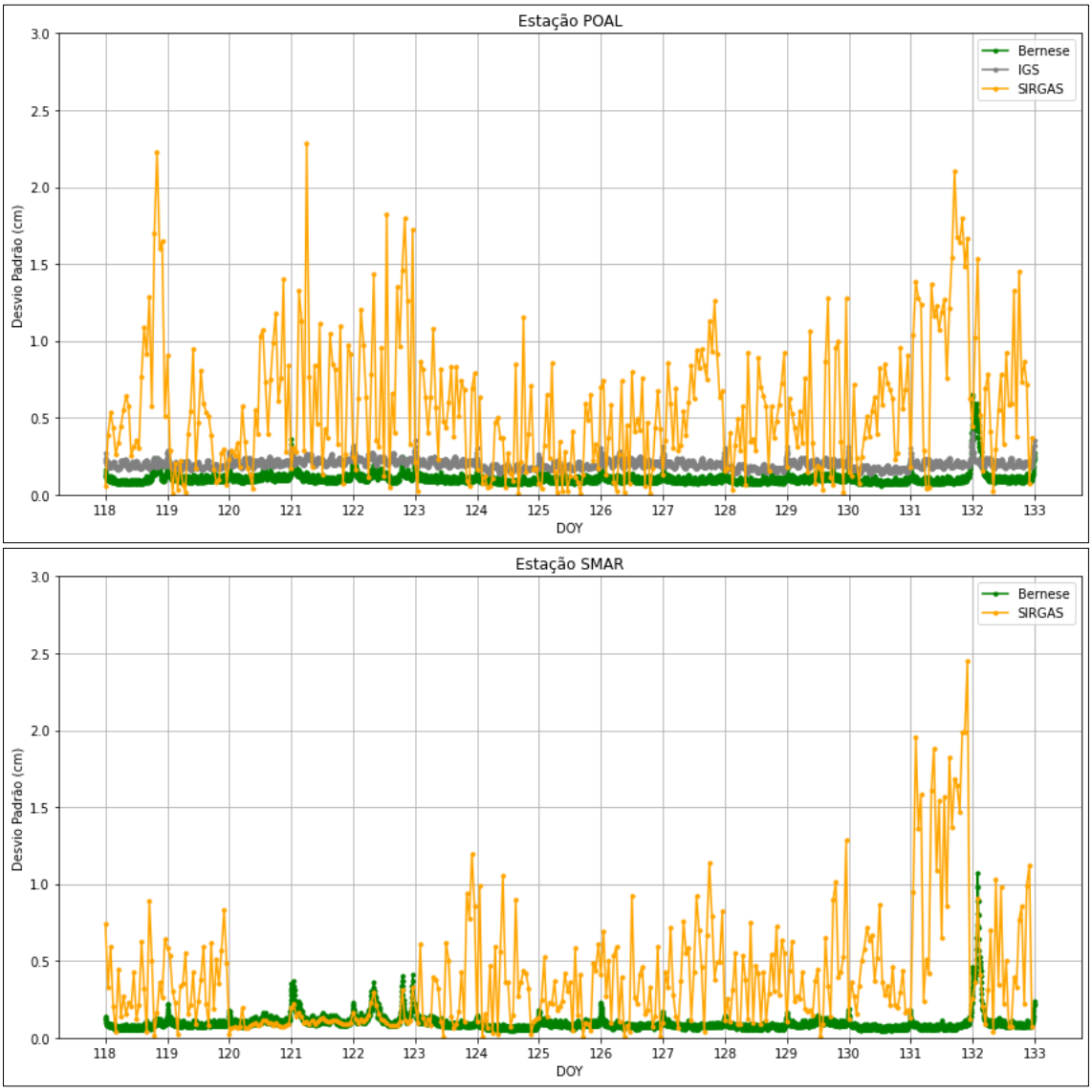
Estação	$RMSE_{Bernese}$ (cm)	$RMSE_{IGS}$ (cm)	$RMSE_{SIRGAS}$ (cm)
POAL	3,984	3,694	4,037
SMAR	2,330	-	1,690

Elaborado pelo autor.

Ao observar os valores de RMSE, nota-se que os valores da estação POAL são maiores do que os da estação SMAR. Além disso, na estação POAL, o menor valor foi o $RMSE_{IGS}$ (3,694 cm), seguido do $RMSE_{Bernese}$ (3,984 cm) e por último o $RMSE_{SIRGAS}$ (4,037 cm), logo, nessa estação a fonte que mais se afasta dos valores de referência (ZTD_{radio}) é o SIRGAS. Já na estação SMAR, a fonte que mais ficou próxima da referência, foram os dados do SIRGAS (1,69 cm), seguido do Bernese (2,33 cm), vale lembrar que não há dados IGS para essa estação.

Posteriormente, analisou-se também os valores de desvio padrão que são disponibilizados junto com o ZTD de cada fonte, por meio do arquivo SINEX. A Figura 41 apresenta os valores de desvio padrão das diferentes fontes de dados ZTD durante os dias 118 a 132, para as estações POAL e SMAR.

Figura 41- Desvio padrão das diferentes fontes ZTD durante os dias 118 a 132, para as estações POAL e SMAR



Elaborado pelo autor.

Por meio da Figura 41, observa-se que os valores de desvios padrão do SIRGAS apresentam os maiores valores, em relação às demais fontes, na maior parte do tempo, com exceção nos dias 120 a 123 na estação SMAR. O desvio padrão do SIRGAS chega a atingir 2,28 cm na estação POAL e 2,45 cm na estação SMAR. A Tabela 5 apresenta o desvio padrão médio de cada fonte de ZTD.

Tabela 5- Desvio padrão médio de cada fonte de ZTD

Estação	Desvio padrão médio (mm)		
	Bernese	IGS	SIRGAS
POAL	1,06	1,98	5,72
SMAR	0,96	-	3,79

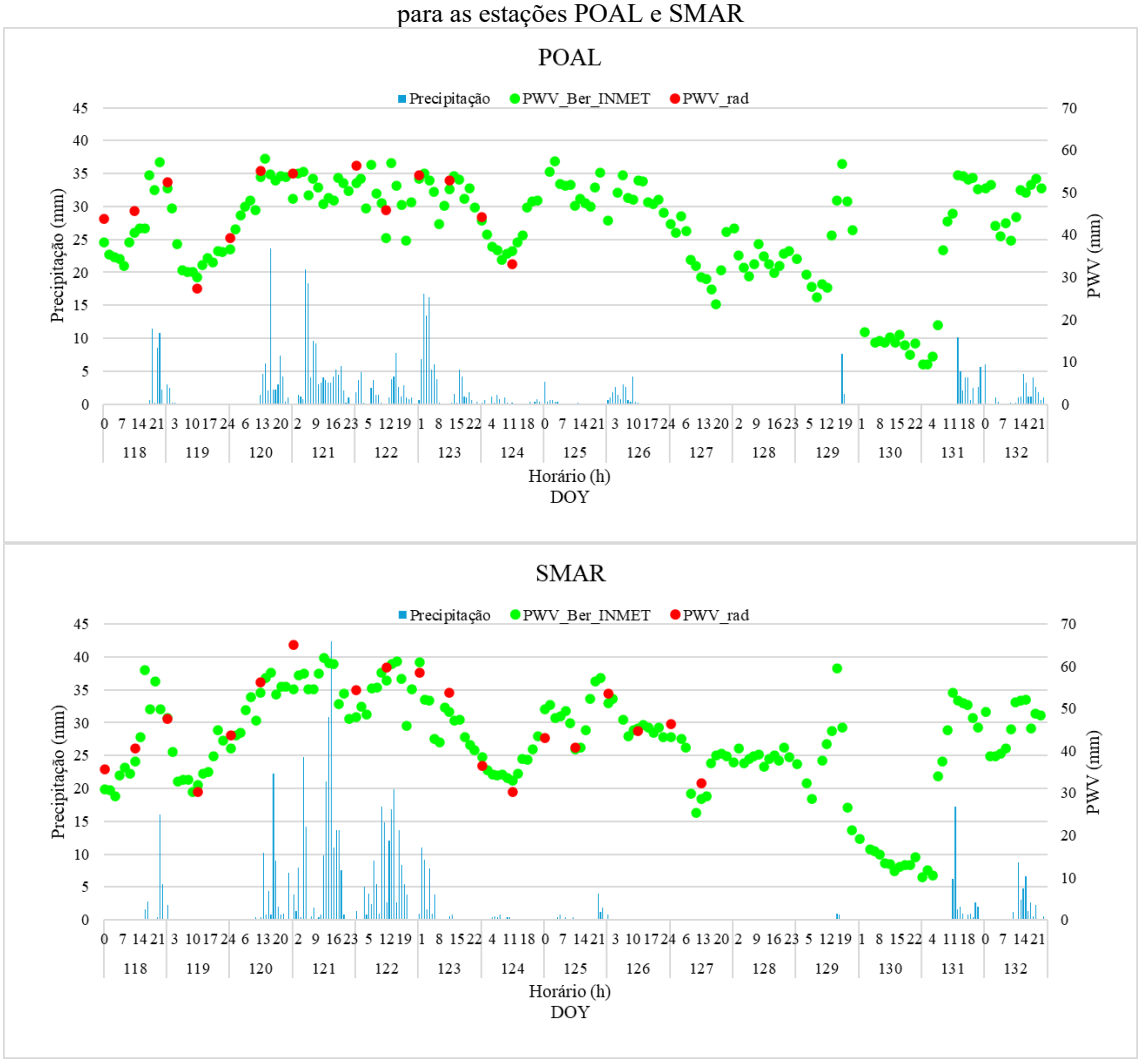
Elaborado pelo autor.

Ao analisar a Tabela 5 nota-se que em ambas as estações os desvios padrão do $ZTD_{Bernese}$ apresentam os menores valores (1,06 mm e 0,96 mm), enquanto os do SIRGAS são os maiores (5,72 mm e 3,79 mm).

5.4.2. Análise do PWV

Por meio dos valores de ZHD_{INMET} e $ZTD_{Bernese}$ foi possível obter os valores de ZWD_{Ber_INMET} e transformá-los em $PWV\text{-}GNSS_{Ber_INMET}$. Como os valores meteorológicos estão a cada uma hora, embora o $ZTD_{Bernese}$ esteja a cada 5 min, os valores de $PWV\text{-}GNSS_{Ber_INMET}$ também estarão com resolução temporal horária. Assim, os valores de $PWV\text{-}GNSS_{Ber_INMET}$, PWV_{radio} e precipitação foram plotados para as estações POAL e SMAR como mostra a Figura 42.

Figura 42- Valores de precipitação e $PWV\text{-}GNSS_{Ber_INMET}$ e PWV_{Radio}, durante os dias 118 e 132 de 2024, para as estações POAL e SMAR



Elaborado pelo autor.

Observa-se que a partir do dia 125 e 128, nas estações POAL e SMAR, respectivamente, não há dados de PWV_{Radio}, isso porque de fato não foram coletados dados de radiossondas nesses dias. Isso muito possivelmente deve estar relacionado ao fato das fortes chuvas e alagamentos nesses dias, o que pode ter impossibilitado o lançamento da radiossonda.

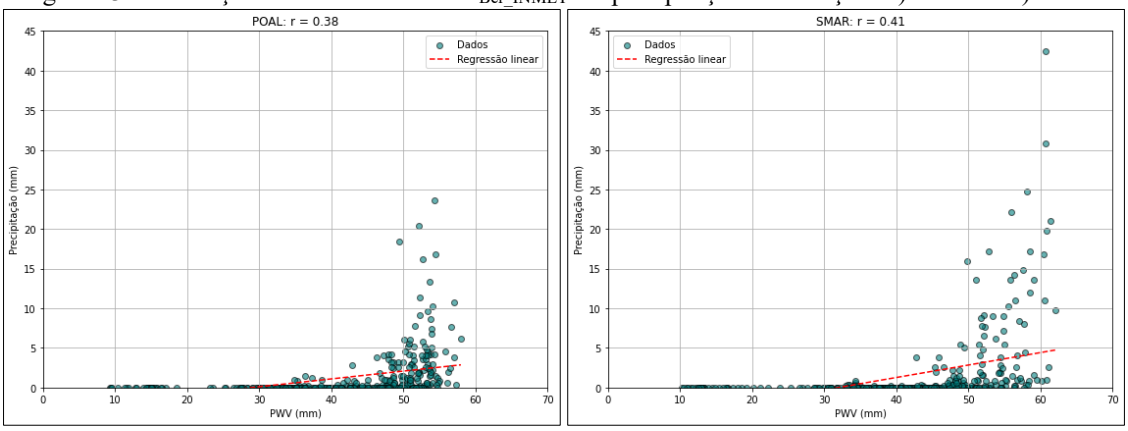
Ao realizar uma análise comparativa entre as duas estações, nota-se que em ambas os valores de PWV tiveram uma variação muito similar. Além disso, entre as diferentes fontes de PWV, nota-se que houve uma concordância nos valores obtidos. Os valores PWV_{Radio} e $PWV\text{-}GNSS_{Ber_INMET}$ na estação SMAR, tiveram uma diferença média absoluta de aproximadamente 2,5 mm. Já na estação POAL a diferença média absoluta entre as diferentes fontes de PWV foi de 3,27 mm.

Foi possível observar também que nos saltos de precipitação há um aumento nos valores de $PWV\text{-}GNSS_{Ber_INMET}$ e logo em seguida um pequeno decréscimo do mesmo, como é possível observar na estação SMAR nos dias 120, 121 e 131. Já na estação POAL, é possível observar esse padrão mais nitidamente nos dias 120, 121 e 123. Como os dados de radiossondas são de uma ou duas vezes ao dia, fica difícil visualizar esse comportamento no PWV_{radio}.

O dia 121 da estação SMAR é o que apresenta a maior precipitação (42 mm) dentro do período analisado, isso ocorre às 15h e de maneira análoga, o $PWV\text{-}GNSS_{Ber_INMET}$ atinge seu valor máximo que foi de 62,03 mm duas horas antes (12h UTC). Sendo que após o salto das 12h, o $PWV\text{-}GNSS_{Ber_INMET}$ apresenta um decréscimo nas horas seguintes: 60,73 mm; 60,62 mm e 60,58 mm, às 13h, 14h e 15h, respectivamente.

Posteriormente calculou-se também a correlação entre a precipitação e o $PWV\text{-}GNSS_{Ber_INMET}$, como mostra a Figura 43.

Figura 43- Correlação entre o PWV-$GNSS_{Ber_INMET}$ e a precipitação nas estações a) POAL e b) SMAR



a) b)

Elaborado pelo autor.

Na estação POAL a correlação foi menor que a estação SMAR, diferentemente de quando calculou-se a correlação entre a precipitação e o $ZTD_{Bernese}$ (Figura 38). Em ambas as estações, esperava-se que a correlação fosse maior entre a precipitação e o PWV-$GNSS_{Ber_INMET}$, já que o mesmo surge a partir da componente não hidrostática do ZTD. Porém, a baixa correlação pode estar ligada ao fato de que muitos dados não foram utilizados, pois o $ZTD_{Bernese}$ estava a cada 5 minutos, enquanto o PWV-$GNSS_{Ber_INMET}$ está somente a cada hora. Apesar disso, ambas as estações continuam tendo uma relação linear fraca, segundo Rumsey (2023).

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Atualmente, os eventos climáticos extremos são uma grande preocupação para a sociedade, já que causa danos materiais e vítimas fatais. Por isso, identificar o comportamento do PWV-GNSS antes de eventos extremos de precipitação é de suma importância.

Neste contexto, inicialmente foi realizada uma revisão bibliográfica da neutrosfera e seus efeitos, bem como o cálculo do PWV-GNSS e seu estado da arte. Foi apresentado também um resumo dos principais modelos para cálculo do atraso, tais como: Saatamoinen, NMF, VMF1e GMF. Em seguida, foi feita uma breve fundamentação teórica sobre os centros que disponibilizam valores de atraso e de IWV, tais com: IGS, NGL, SIRGAS e EMBRACE. Além disso, apresentou uma revisão de conceitos relacionados a eventos de precipitação e de centros brasileiros que disponibilizam dados de chuva.

Posteriormente foi descrita a metodologia inicial utilizada para validação dos resultados. Tal metodologia foi desenvolvida no software Bernese 5.2, utilizando o modo relativo de dados GPS e GLONASS, a fim de obter os valores de atraso. Com dados meteorológicos disponibilizados pelo projeto CHUVA, os valores de ZTD foram transformados em PWV-GPS e puderam ser comparados com os resultados do projeto CHUVA. Os resultados obtidos foram satisfatórios, uma vez que a diferença de PWV-GPS atingiu no máximo 10 mm.

Em seguida foi feito um estudo variando o número de estações no processamento e o quanto isso influenciava na acurácia dos valores de ZTD e no tempo de processamento. Para tanto, iniciou-se o processamento dos dados da estação IEAV do projeto CHUVA e mais 3 estações pertencentes a RBMC, onde o critério de escolha foi a menor distância em relação à estação IEAV, e foi se acrescentando duas estações em cada processamento. Foi possível observar que no processamento utilizando 18 estações o tempo gasto foi de ± 3h 30 min, tempo esse que é similar ao que foi gasto no processamento da RBMC inteira (em torno de 150 estações). Assim, chegou-se à conclusão de que o valor de ZTD mais confiável se dá a partir de 20 estações, e para isso o tempo, de ± 3h 30 min, é similar ao processar a RBMC inteira, o que indicou que devido a precisão obtida compensa processar todas as estações RBMC.

Na seção 5.3, avaliou-se as diferentes fontes de dados ZTD-GNSS, para isso foram utilizados dados de ZTD do SIRGAS, IBGE, NGL, IGS e processado no Bernese, por meio de uma campanha, durante o período de 225 a 244 de 2023. A análise foi feita

para uma estação em cada região brasileira. Ao utilizar os dados do SIRGAS como referência, observou-se que as estações BOAV, SAVO e POAL apresentaram a maior diferença média entre os dados SIRGAS e IGS com valores de 0,467 cm, 0,390 cm e 0,324 cm, respectivamente. Já as estações BRAZ e CHPI tiveram a maior média entre as fontes SIRGAS e Bernese. Em um segundo momento, foi utilizado dados de radiossondas também na obtenção do ZTD, porém, foi constatado que somente 3 estações possuíam radiossondas próximas: BOAV (SBBV), BRAZ (SBBR) e POAL (SBPA). Assim, ao comparar as diferentes fontes de ZTD nas estações BOAV, BRAZ e POAL, verificou-se que os valores de radiossonda foram os que mais se dispersaram das demais fontes. Uma possível justificativa para esse ocorrido é que os valores de ZTD de todas as fontes, exceto da radiossonda, são provenientes de dados GNSS.

No último experimento (seção 5.4), foi realizado um estudo de caso no Rio Grande do Sul durante o período de 27 de abril a 11 de maio de 2024, quando houve um evento extremo de grande precipitação. Para isso, os dados da RBMC desse período foram processados no Bernese e obteve-se os valores de ZTD. Os dados das estações POAL e SMAR, localizadas no Rio Grande do Sul foram analisados, e a partir dos mesmos observou-se que a resolução temporal ser alta é grande valia, pois pode mostrar saltos que com uma resolução menor não são detectados. Além disso, foi possível notar que a sensibilidade do ZTD não está relacionada somente a quantidade de chuva, mas também quanto tempo antes de uma precipitação não há registros chuva. Como apresentado na sessão 5.4.1 foi possível observar um aumento significativo do ZTD até duas horas antes sem chuva.

O PWV-GNSS$_{Ber_INMET}$ das estações POAL e SMAR foi obtido a partir dos dados meteorológicos de estações do INMET e dos valores de ZTD$_{Bernese.}$ Antes de realizar essa transformação, os dados de pressão e temperatura da estação meteorológica foram adaptados para a coordenada da estação GNSS. Foram calculados dados de PWV por meio de dados de radiossondas próximas às estações GNSS (PWV$_{radio}$). Logo, ao analisar os valores de PWV$_{Ber_INMET}$ e PWV$_{Radio}$, notou-se que os valores e PWV-GNSS$_{Ber_INMET}$ na estação SMAR, tiveram uma diferença média absoluta de aproximadamente 2,5 mm. Já na estação POAL a diferença média absoluta entre as diferentes fontes de PWV foi de 3,27 mm, demonstrando que os valores PWV-GNSS$_{Ber_INMET}$ são condizentes com os PWV$_{Radio}$.

A partir dos resultados desse trabalho, pode-se dizer que além do PWV-GNSS, o ZTD é uma fonte de informação muito importante na detecção de eventos extremos,

principalmente pelo fato de obter o mesmo para qualquer estação GNSS e com resolução temporal maior (5 minutos).

Os resultados obtidos por meio do processamento no Bernese apresentaram resultados satisfatórios quando comparados com os demais centros, mostrando-se uma ótima ferramenta a ser explorada em trabalhos futuros. Logo é possível sugerir os seguintes trabalhos futuros:

- expandir a análise para outras regiões do Brasil, avaliando a relação entre os valores de PWV e a ocorrência de eventos extremos de precipitação em diferentes climas e características geográficas;
- avaliar o uso de dados de estações meteorológicas na obtenção do PWV, em regiões que possuem radiossondas, a fim de comparar;
- utilizar o modelo de VMF3 na obtenção do ZTD no Bernese, uma vez que é o modelo mais atual e está disponível na nova versão 5.4 do Bernese.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Hermes Alves de. Climatologia Aplicada à Geografia. Campina Grande: Editora da Universidade Estadual da Paraíba, 2016. Disponível em: http://dspace.bc.uepb.edu.br/jspui/bitstream/123456789/13346/1/Climatologia-Aplicada-aCC80-Geografia%20%281%29.pdf. Acesso em: Dez. 2024.

ALBALA-BERTRAND, J.M. Political economy of large natural disasters: with a special reference to developing countries. New York: Oxford University Press, 1993. 259p.

ALBUQUERQUE, A. M., T. A. F. Gouveia, D. B. M. Alves, et al., 2026a: Brazilian tropospheric delay (ZTD) temporal series and development of a climatology over nine years of sounding and GNSS data. *Appl. Geomat.*, **18**, 9, doi: 10.1007/s12518-025-00656-0.

BENEVIDES, P.; CATALAO, J.; MIRANDA, P. M. A. On the inclusion of GPS precipitable water vapour in the nowcasting of rainfall. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 15, n. 12, p. 2605-2616, 2015.

BERN. Bernese GNSS Software Version 5.2. Astronomical Institute, University of Bern. 2015, 852 p.

BENTON, George S.; ESTOQUE, Mariano A. Water-vapor transfer over the North American continent. **Journal of Atmospheric Sciences**, v. 11, n. 6, p. 462-477, 1954.

BEVIS, M.; STEVEN, B.; A., H. T.; CHRISTIAN, R.; A., A. R.; H., W. R. GPS meteorology: remote sensing of atmospheric water vapor using the global positioning system. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 97, n. D14, p. 15787–15801, 1992.

BOEHM, Johannes et al. Global Mapping Function (GMF): A new empirical mapping function based on numerical weather model data. **Geophysical research letters**, v. 33, n. 7, 2006.

BOEHM, J.; WERL, B.; SCHUH, H. Troposphere mapping functions for GPS and very long baseline interferometry from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts operational analysis data Journal Of Geophysical Research. Vol. 111, B02406, doi:10.1029/2005JB003629, 2006a.

BONAFONI, S.; BIONDI, R. The usefulness of the Global Navigation Satellite Systems (GNSS) in the analysis of precipitation events. **Atmospheric Research**, v. 167, p. 15–23, jan 2016.

BYUN, Sung H.; BAR-SEVER, Yoaz E. A new type of troposphere zenith path delay product of the international GNSS service. **Journal of Geodesy**, v. 83, n. 3, p. 1-7, 2009.

CAMPOS, T. L. O. B. **O potencial de PWV-GPS em predizer tempestades: estudo de caso de linhas de instabilidade**. 2018. 125f. Tese (Doutorado em Meteorologia)-Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2018.

CEMADEN. Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais. Disponível em: < https://www.gov.br/cemaden/pt-br> Acesso em: Jan. 2025

CENAD. Disponível em: <https://antigo.mdr.gov.br/protecao-e-defesa-civil/centro-nacional-de-gerenciamento-de-riscos-e-desastres-cenad>. Acesso em: Mar. 2022
.

CIRCEA 36-3. **Coordenação MET/ATS referente ao lançamento de balão meteorológico.** Ministério da Defesa – Comando da Aeronáutica. 2017.

CHAPMAN, Sydney. Upper atmospheric nomenclature. **Journal of Geophysical Research**, v. 55, n. 4, p. 395-399, 1950.

CHUVA. Disponível em: <http://chuvaproject.cptec.inpe.br/portal/noticia.ultimas.logic>. Acesso em: Abr.2022

CHUVA. Relatório Projeto CHUVA. CPTEC/INPE.2013. Disponível em: < http://chuvaproject.cptec.inpe.br/portal/pdf/relatorios/relatorio_2013.pdf>. Acesso em: Abr.2022.

CPTEC. Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos. Disponível em: < https://www.cptec.inpe.br/>. Acesso em: Dez. 2024.

DAVIS, J. L.; HERRINCH, T. A.; SHAPIRO, I. I.; ROLLERS, A. E. E.; ELGLERED, G. Geodesy by radio interferometry: effects of atmospheric modeling errors on estimates of baseline length. **Radio Science**, v. 20, n. 6, p. 1593–1607, 1985.

DE OLIVEIRA, J. B.; ALVES, J. J.; FRANÇA, FMC. Barragens sucessivas de contenção de sedimentos. **Cartilhas temáticas tecnologias e práticas hidroambientais para convivência com o Semiárido, v. 1**, 2010.

DE OLIVEIRA JUNIOR, Paulo Sérgio. Influência da estimativa do gradiente horizontal troposférico no posicionamento GNSS de alta acurácia. 2015.

Defesa Civil. Disponível em: https://www3.santoandre.sp.gov.br/defesacivil/mapa-dos-pluviometros/ . Acesso em: Mar. 2022

DENG, Z.; BENDER, M.; ZUS, F.; GE, M.; DICK, G.; WICKERT, J.; SCHON, S.. **GPS meteorology with single frequency receivers**. 2012. Tese de Doutorado. Leibniz-Univ., Fachrichtung Geodäsie und Geoinformatik.

DING, Junsheng; CHEN, Junping. Assessment of empirical troposphere model GPT3 based on NGL's global troposphere products. **Sensors**, v. 20, n. 13, p. 3631, 2020.

DRISU, O. Y.. MODELLING ATMOSPHERIC WET REFRACTIVITY PROFILE USING GROUND AND SPACE-BASED GLOBAL POSITIONING SYSTEM. 2017.Tese de doutorado (Doctor of Philosophy)- UNIVERSITI TEKNOLOGI MALAYSIA, 2017.

Duan, J., Bevis, M., Fang, P., Bock, Y., Chiswell, S., Businger, S., Rocken, C., Solheim, F., Hove, T., Ware, R., Mcclusk, S., Herring, T. A. & King, R. W. *GPS meteorology:*

Direct Estimation of the absolute Value of Precipitable Water, Journal of Applied Meteorology, vol. 35, 830-838, 1996.

EMBRACE, Estudo e Monitoramento BRAsileiro de Clima Espacial. Disponível em: <https://www2.inpe.br/climaespacial/portal/o-programa-mbrace/#:~:text=Neste%20contexto%2C%20o%20Programa%20Embrace,um%20programa%20de%20clima%20espacial> . Acesso em: Jan. 2025.

GAO, Yang; SHEN, Xiaobing. A New Method for Carrier-Phase-Based Precise Point Positioning. **Navigation**, v. 49, n. 2, p. 109-116, 2002.

GOUVEIA, Tayná Aparecida Ferreira. Função de mapeamento brasileira da atmosfera neutra e sua aplicação no posicionamento GNSS na América do Sul. 2019.

GOUVEIA, T. A. F.; MONICO, J. F. G.; ALVES, D. B. M.; SAPUCCI, L. F.; GEREMIA-NIEVINSKI, F. 50 anos de sinergia entre geodésia espacial e meteorologia: Do erro no posicionamento GNSS a aplicações de previsão de precipitação de curtíssimo prazo. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 72, p. 1509-1535, Dez. 2020. DOI: <10.14393/RBCV72NESPECIAL50ANOS-56767>. Disponível em: <http://doi.org/10.14393/RBCV72NESPECIAL50ANOS-56767>.

GOUVEIA, T., D. Alves, A. Albuquerque, M. J. Pompei, J. Monico, B. Vani, I. Dibbern, and I. Peres, 2026 : NEPTool: an automated tool for neutrospheric variables, GNSS delay and PWV modeling. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, **X-3/W4-2025**, 179–184, doi: 10.5194/isprs-annals-X-3-W4-2025-179-2026.

GREGORIUS T. How it Works...GIPSY–OASIS II. Department of Geomatics University of Newcastle upon Tyne, Canadá, 1996.

HERRING, T. A. Modelling atmospheric delays in the analysis of space geodetic data. Proceedings of the Symposium Refraction of Transatmospheric Signals in Geodesy, eds. J. C. de Munck, and T. A. TH. Spoelstra, No. 36, Netherlands Geodetic Commission, The Hague, The Netherlands, May 19–22, ISBN 9789061322436, pp. 157–164, 1992.

HOBIGER, Thomas; JAKOWSKI, Norbert. Atmospheric signal propagation. **Springer handbook of global navigation satellite systems**, p. 165-193, 2017.

HOPFIELD, H. S. Two-quartic tropospheric refractivity profile for correcting satellite data. Journal of Geophysical Research, Vol. 74, No. 18, pp. 4487–4499, 1969.

IGS. International GNSS Service. Disponível em: <https://igs.org/>. Acesso em Mai.2025

INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Disponível em: <http://mudancasclimaticas.cptec.inpe.br/>. Acesso em: Set.2019

INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Disponível em: < https://www.gov.br/inpe/pt-br>. Acesso em Dez. 2024

IPCC. PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS. Relatório Especial sobre Mudança do Clima, Desertificação,

Degradação da Terra, Gestão Sustentável da Terra, Segurança Alimentar e Fluxos de Gases de Efeito Estufa nos Ecossistemas Terrestres. Brasília: MCTI, 2020. Disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/relatorios-do-ipcc/arquivos/pdf/srcl-port-web.pdf. Acesso em: 04/02/25.

LANGLEY, Richard B.; TEUNISSEN, Peter JG; MONTENBRUCK, Oliver. Introduction to GNSS. **Springer handbook of global navigation satellite systems**, p. 3-23, 2017.

LEICK, A.; RAPOPORT, L.; TATARNIKOV, D.. **GPS satellite surveying**. John Wiley & Sons, 2015.

Li, X., Dick, G., Ge, M., Heise, S., Wickert, J., & Bender, M.. Real-time GPS sensing of atmospheric water vapor: Precise point positioning with orbit, clock, and phase delay corrections. **Geophysical Research Letters**, v. 41, n. 10, p. 3615-3621, 2014.

LIMA, T. M. A.; AZEVEDO, S. C. ; GOUVEIA, T. A. F. ; SINGH, R. ; ALVES, D. B. M. ; MONICO, J. F. G. . Variability of Atmospheric Pollutants and its Association with Meteorological Parameters under Quarantine Period over Sao Paulo City.. In: AGU Fall Meeting, 2020. Abstract Book, 2020.

LYSTAD, S. L. **Estimating ground precipitation by use of Data from the Global Navigation Satellite System (GNSS). Norwegian Meteorological Institute**. Climate Report, 2011.

MACMILLAN, D.S. Atmospheric gradients from very long baseline interferometry observations. J. Geophys. Res., p. 1041–1044, 1995.

MARCELINO, E. V. Desastres naturais e geotecnologias: conceitos básicos. 40p. **INPE, Santa Maria, Brasil. Disponível em: http://mtc-m18. sid. inpe. br/col/sid. inpe. br/mtc-m18**, v. 80, n. 2008, 2008.

MARINI, J. W. Correction of satellite tracking data for an arbitrary tropospheric profile. Radio Science, Vol. 7, No. 2, pp. 223–231, 1972. DOI:10.1029/RS007i002p00223.

MARQUES, H. A. **PPP em tempo real com estimativa das correções dos relógios dos satélites no contexto de rede GNSS**. 2012. 245f. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas)- Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente. 2012.

MENDES, V. B. **Modeling The Neutral-Atmosphere Propagation Delay in Radiometric Space Techniques**, 1999. 353 f. Tese de Doutorado, Department of Geodesy and Geomatics Engineering Technical Report No. 199, University of New Brunswick, Canada.

MONICO, J. F. G.. **Posicionamento pelo GNSS: Fundamentos, Definição e Aplicação.** 2 ed. São Paulo: Editora UNESP, 2008. 476p.

NIELL, A. E. Global Mapping Functions for the Atmosphere Delay at Radio Wavelengths. Journal of Geophysical Research. v. 101, n.B2, 1996.

NGL. Disponível em: http://geodesy.unr.edu/gps_timeseries/README_trop2.txt. Acesso em: Jan. 2025.

OLIVEIRA, F. P.; AMORIM, H. S.; DERECZYNSKI, C. P. Investigando a atmosfera com dados obtidos por radiossondas. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 40, 2018. ADAMS, D. K.; GUTMAN, S. I.; HOLUB, K. L.; PEREIRA, D. S. GNSS observations of deep convective time scales in the Amazon. **Geophysical Research Letters**, v. 40, n. 11, p. 2818-2823, 2013.

REHBEIN, Amanda. **Sistemas convectivos de mesoescala observados na bacia Amazônica durante o projeto GOAmazon**. 2016. Tese de Doutorado. Dissertação (Mestrado)-Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo.

RUEGER, J. M. (2002). Refractive index formulae for radio waves. FIG XXII International Congress, International Federation of Surveyors (FIG), Washington, D.C., April 19–26. Disponível em: <http://www.fig.net/pub/fig_2002/Js28/JS28_rueger.pdf>.

Rumsey, D.J. What is r value correlation? Dummies. 2023. Acesso em: 25 maio de 2025. Disponível em: <https://www.dummies.com/article/academics-the-arts/math/statistics/how-to-interpret-acorrelation-coefficient-r-169792/>

SAPUCCI, L. F.; BASTARZ, C. F.; CERQUEIRA, F.; AVANCO, L. A.; HERDIES, D. L. Impacto de perfis de radio ocultacao GNSS na qualidade das previsões de tempo do CPTEC/INPE. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, n. 4, p. 551–567, 2014.

SAPUCCI, L. F. **Estimativa do vapor d'água atmosférico e avaliação da modelagem do atraso zenital troposférico utilizando GPS**. 2001. 167 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente. 2001.

SAPUCCI, Luiz F. et al. GPS-PWV jumps before intense rain events. **Atmospheric Measurement Techniques Discussions**, v. 2016, p. 1-27, 2016.

Sapucci, L. F.; Machado, L. A.T.; SOUZA, E. M.; CAMPOS, T. B.. Global Positioning System precipitable water vapour (GPS-PWV) jumps before intense rain events: A potential application to nowcasting. **Meteorological Applications**, v. 26, n. 1, p. 49-63, 2019

SAPUCCI, L. F.; MONICO, J. F. G.; MACHADO, L. A. T.; HERDIES, D. L.; SOUZA; R. A. F. Assimilação do IWV-GPS no Brasil: otimização das estimativas do atraso zenital troposférico em tempo real. Rev. Bras. Geof. vol.25 n.3, São Paulo, 2007.

SANTOS, A.F.; ASSIREU, A. T.; PASSOS, H. L.; MATTOS, J. G. Z.; SCHMENGLER, M. **Estabilidade Atmosférica e desenvolvimento de nuvens**. São José dos Campos. Curso de e Ciências Atmosféricas. INPE. 2013. Universidade Federal de Itajubá.

SAREWITZ, D. et al. Workshop: Extreme Events Developing a Research Agenda for the 21st Century. Bolder, 2000. disponível em: http://www.esig.ucar.edu/extremes/.

SECRETARIA DA AGRICULTURA, PECUÁRIA, PRODUÇÃO SUSTENTÁVEL E IRRIGAÇÃO. *Boletim COPAAERGS extraordinário: maio 2024*. Disponível em: https://www.agricultura.rs.gov.br/upload/arquivos/202405/31084753-boletim-copaaergs-extraordinario-maio-2024-final.pdf. Acesso em: 24 jan. 2025.

SEEBER, G. Satellite geodesy. 2. ed. Berlin, New York: Walter de Gruyter, 2003. 589 p.

SIRGAS, Sistema de Referência Geodésico para as Américas. Disponível em: < https://sirgas.ipgh.org/pt/produtos/atraso-troposferico/>. Acesso em: Jan. 2025

SHANGGUAN, Ming et al. A Combined model to predict GNSS precipitable water vapor based on deep learning. **IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing**, v. 16, p. 4713-4723, 2023.

SILVA, F. M.; CHAVES, M. S; LIMA, Z. M. C. Geografia física II. **Natal: EDUFRN**, 2009.

Sugiyama, Junna; Nishino, Haruki; Kusaka, Akito. Precipitable water vapour measurement using GNSS data in the Atacama Desert for millimetre and submillimetre astronomical observations. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 528, n. 3, p. 4582-4590, 2024.

Tregoning, Paul et al. Accuracy of absolute precipitable water vapor estimates from GPS observations. **Journal of geophysical research: atmospheres**, v. 103, n. D22, p. 28701-28710, 1998.

Tunali, E.; Ozludemir, M. T.. GNSS PPP with different troposphere models during severe weather conditions. **GPS Solutions**, v. 23, n. 3, p. 82, 2019.

Vianello, R. L.; ALVES, A. R. Meteorologia básica e aplicações. Universidade Federal de Viçosa (UFV), Viçosa: Editora UFV, 448 p., 2000.

Zumberge, J. F.; Heflin, M. B.; Jefferson, D. C.; Watkins, M. M.; Webb, F. H.. Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. Journal of geophysical research: solid earth 102.B3 (1997): 5005-5017.

Wei, Juan et al. Retrieving Accurate Precipitable Water Vapor Based on GNSS Multi-Antenna PPP With an Ocean-Based Dynamic Experiment. **Geophysical Research Letters**, v. 50, n. 6, p. e2023GL102982, 2023.

WU, Zhilu et al. Sensing real-time water vapor over oceans with low-cost GNSS receivers. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 60, p. 1-8, 2022.

WYOMING. Disponível em:< http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>. Acesso em: Abr. 2025.

ANEXO I- Script do RNX2SNX.PCF

```
#
#
# ============================================================================
# RNX2SNX.PCF
#
# ============================================================================
#
# Purpose:      RINEX-TO-SINEX (RNX2SNX): standard double difference
#               processing for regional networks for static, dual-frequency
#               stations.
#
#               The purpose of this BPE is to compute station coordinates
#               and troposphere parameters for all included stations in
#               a given reference frame using the translation conditions
#               from a minimum constraint solution. In addition normal
#               equation files are generated.
#
# ----------------------------------------------------------------------------
#
# A description of the BPE, the use of the BPE server variables, input and
# output files as well as the important points to be checked in the processing
# summary are provided in
#               ${U}/PCF/RNX2SNX.README    (UNIX/Linux)
#                %U%\PCF\RNX2SNX.README    (Windows)
#
# ----------------------------------------------------------------------------
#
# Author     :  R. Dach
# Created    :  10-Aug-2011             Last modified: 10-Aug-2011
#
# Changes    :
#
#
# ============================================================================
#
#
PID SCRIPT   OPT_DIR  CAMPAIGN CPU      F WAIT FOR....
3** 8******* 8******* 8******* 8******* 1 3** 3** 3** 3** 3** 3** 3** 3**
3**
#
# Copy required files
# -------------------
# modified by MARCO - IBGE
#
#
# Prepare the orbits
# ------------------
```

```
100 SNX2NQ0  MRG1_M          ANY      1
101 CCPREORB R2S_GEN          ANY      1 100
105 POLUPDH  R2S_GEN          ANY      1 101
112 PRETAB   R2S_GEN          ANY      1 105
113 ORBGENH  R2S_GEN          ANY      1 112
199 DUMMY    NO_OPT           ANY      1 113
#
# Preprocess, convert, and synchronize observation data
# ----------------------------------------------------
201 RNXGRA   R2S_GEN          ANY      1 199
211 RNXSMTAP R2S_GEN          ANY      1 201
212 RNXSMT_H R2S_GEN          ANY      1 211
221 RXOBV3AP R2S_GEN          ANY      1 212
222 RXOBV3_H R2S_GEN          ANY      1 221
230 CRDMERGE MRG_M            ANY      1 222
231 CODSPPAP R2S_GEN          ANY      1 230
232 CODSPP_P R2S_GEN          ANY      1 231
233 CODXTR   R2S_GEN          ANY      1 232
240 CRDMERGE R2S_GEN          ANY      1 233
245 HELMR1   R2S_GEN          ANY      1 240
299 DUMMY    NO_OPT           ANY      1 245
#
# Form baselines and pre-process phase data (incl. residual screening)
# --------------------------------------------------------------------
301 INIT_BSL R2S_GEN          ANY      1 299
302 SNGDIF   R2S_GEN          ANY      1 301
303 SNGDIF   R2S_GE2          ANY      1 302
311 MAUPRPAP R2S_GEN          ANY      1 303
312 MAUPRP_P R2S_GEN          ANY      1 311
313 MPRXTR   R2S_GEN          ANY      1 312
321 GPSEDTAP R2S_EDT          ANY      1 313
322 GPSEDT_P R2S_EDT          ANY      1 321
323 GPSXTR   R2S_EDT          ANY      1 322
331 RES_SUM  R2S_GEN          ANY      1 322
341 ADDNEQ2  R2S_GEN          ANY      1 331
342 GPSXTR   R2S_GEN          ANY      1 341
399 DUMMY    NO_OPT           ANY      1 342
#
# Resolve phase ambiguities
# -------------------------
401 SATMRK   R2S_GEN          ANY      1 399
411 GNSAMBAP R2S_AMB          ANY      1 401
412 GNSAMB_P R2S_AMB          ANY      1 411
421 GNSL53AP R2S_L53          ANY      1 412
422 GNSL53_P R2S_L53          ANY      1 421
431 GNSQIFAP R2S_QIF          ANY      1 422
432 GNSQIF_P R2S_QIF          ANY      1 431
441 GNSL12AP R2S_L12          ANY      1 432
442 GNSL12_P R2S_L12          ANY      1 441
443 AMBXTR   R2S_AMB          ANY      1 442
499 DUMMY    NO_OPT           ANY      1 443 422 432 442
#
```

```
# Compute ambiguity-fixed network solution, create final NEQ/SNX/TRO files
# ------------------------------------------------------------------------
501 GPSESTAP R2S_FIN          ANY      1 499
502 GPSEST_P R2S_FIN          ANY      1 501
511 ADDNEQ2  R2S_FIN          ANY      1 502
512 GPSXTR   R2S_FIN          ANY      1 511
# 513 COMPARF  R2S_FIN          ANY      1 511 512
514 HELMCHK  R2S_FIN          ANY      1 511 512
521 ADDNEQ2  R2S_RED          ANY      1 511 512
522 GPSXTR   R2S_RED          ANY      1 521
# sonia marco
530 COMPAR   TRANS_M          ANY      1 522
#535 SNX2NQ0  MRG1_M          ANY      1 530
540 CRDMERGE MRG1_M           ANY      1 530
545 ADDNEQ2  COMB_M           ANY      1 540
547 HELMR1   COMP_M           ANY      1 545
550 ADDNEQ2  MINC_M           ANY      1 547
555 HELMR1   COMB_M           ANY      1 550
# 599 DUMMY    DUMMY            ANY      1 512 514 522 540
#
# Create summary file and delete files
# ------------------------------------
# 901 R2S_SUM  R2S_GEN          ANY      1 599
# 902 R2S_SAV  R2S_GEN          ANY      1 901
# 903 R2S_DEL  R2S_GEN          ANY      1 902
# 991 BPE_CLN  R2S_GEN          ANY      1 903
#
# End of BPE
# ----------
# 999 DUMMY    DUMMY            ANY      1 991
#
#
556 HELMR1   MRG1_M           ANY      1 550
PID USER        PASSWORD PARAM1   PARAM2   PARAM3   PARAM4
PARAM5   PARAM6   PARAM7   PARAM8   PARAM9
3** 12********** 8******* 8******* 8******* 8******* 8******* 8*******
8******* 8******* 8******* 8*******
# Copy required files
# -------------------
#
# Prepare the orbits
# ------------------
# ....
#
# Preprocess, convert, and synchronize observation data
# -----------------------------------------------------
211                 $211
212                 PARALLEL $211
221                 $221
222                 PARALLEL $221
231                 $231
232                 PARALLEL $231
```

```
#
# Form baselines and pre-process phase data (incl. residual screening)
# -------------------------------------------------------------------
311                 $311
312                 PARALLEL $311
321                 $321     V_C
322                 PARALLEL $321
331                 NEXTJOB  301
#
# Resolve phase ambiguities
# -------------------------
411                 $411
412                 PARALLEL $411
421                 $421
422                 PARALLEL $421
431                 $431
432                 PARALLEL $431
441                 $441
442                 PARALLEL $441
#
# Compute ambiguity-fixed network solution, create final NEQ/SNX/TRO files
# -------------------------------------------------------------------------
501                 $501
502                 PARALLEL $501
514                 NEXTJOB  511
#
# Create summary file and delete files
# ------------------------------------
# 903                 (10)
#
#
VARIABLE DESCRIPTION                          DEFAULT
8******* 40************************************
30**************************
V_A      A priori information                 APR
V_B      Orbit/ERP, DCB, CLK information      COD
V_C      Preliminary (ambiguity-float) results    P1_
V_E      Final (ambiguity-fixed) results      F1_
V_F      Size-reduced NEQ information         R1_
V_RNXDIR Directory with the RINEX files       RINEX
V_OBSSEL Station selection file (blank: all)
V_REFDIR Directory with basic Bernese files   REF52
V_REFINF Master/reference CRD/VEL filename    IGb14
V_CRDINF Merged CRD/VEL filename              EXAMPLE
V_CRXINF Accepted station inform. inconsistencies
V_BLQINF BLQ FILE NAME, CMC CORRECTIONS       EXAMPLE
V_ATLINF ATL FILE NAME, CMC CORRECTIONS       EXAMPLE
V_HOIFIL Ionosphere model for higher order iono   HOI$YSS+0
V_RESULT Directory name for the RNX2SNX results   RNX2SNX
V_SATSYS Select the GNSS (GPS, GPS/GLO)       GPS/GLO
V_SAMPL  Sampling of the solutions            30
V_GNSSAR GNSS to be used for ambiguity resolution ALL
```

```
V_BL_AMB Maximum baseline length for MW/L3 AR     6000
V_BL_QIF Maximum baseline length for QIF AR       2000
V_BL_L53 Maximum baseline length for L5/L3 AR     200
V_BL_L12 Maximum baseline length for L1&L2 AR     20
V_HOURLY Number of hourly sessions proc. together 8
V_MYATX  ANTEX file for update (name incl. ext)
V_PCVUSE Absolute/relative PCV model              PCV_COD.I14
V_INFSAT Satellite information file               SATELLIT.I14
V_SATCRX Satellite problem file                   SAT_$Y+0
V_CLU    Maximum number of files per cluster      4
V_CLUEDT Same as V_CLU but for GPSEDT             5
V_CLUFIN N: to skip clustering in GPSCLU          Y
V_MINUS  Session range begin (for COMPAR)         -6
V_PLUS   Session range end                        +0
V_SAV    Save results?                            Y
V_DEL    Delete results?                          Y
V_MAXPAR ADDNEQ2                                  30000
V_FORMAT formato da orbita GPS/GLO                SP3
#
# DO NOT USE V_D, V_J, V_M, V_Y VARIABLES!
# (they are used already by the menu)
#
```

DADOS CURRICULARES

Nascimento 18/11/1994- Tupã, SP

Filiação Vera Lúcia Gomes Botareli dos Santos
Aparecido Euclides dos Santos

2013-2018 Graduação
Bacharelado em Engenharia Cartográfica
Faculdade de Ciências e Tecnologia- Universidade Estadual Paulista
"Júlio de Mesquita Filho"- UNESP, campus Presidente Prudente

2018-2020 Pós-Graduação
Mestrado em Ciências Cartográficas
Faculdade de Ciências e Tecnologia- Universidade Estadual Paulista
"Júlio de Mesquita Filho"- UNESP, campus Presidente Prudente

2020-2025 Pós-Graduação
Doutorado em Ciências Cartográficas
Faculdade de Ciências e Tecnologia- Universidade Estadual Paulista
"Júlio de Mesquita Filho"- UNESP, campus Presidente Prudente

Lattes http://lattes.cnpq.br/8243518657884830

Orcid https://orcid.org/0000-0002-6601-0995