

FERNANDA FERREIRA PACHECO MACEDO
THAINARA MUNHOZ ALEXANDRE DE LIMA

**MONITORAMENTO DO VAPOR D'ÁGUA DURANTE EVENTOS
EXTREMOS DE PRECIPITAÇÃO EMPREGANDO DIFERENTES
TÉCNICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso
Engenharia Cartográfica e de Agrimensura

FERNANDA FERREIRA PACHECO MACEDO
THAINARA MUNHOZ ALEXANDRE DE LIMA

**MONITORAMENTO DO VAPOR D'ÁGUA DURANTE EVENTOS
EXTREMOS DE PRECIPITAÇÃO EMPREGANDO DIFERENTES
TÉCNICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso
Engenharia Cartográfica e de Agrimensura

Trabalho de conclusão de curso (TCC) do curso de graduação em Engenharia Cartográfica e de Agrimensura da Faculdade de Ciências e Tecnologias - UNESP - Universidade Estadual Paulista “Júlio Mesquita Filho” - Campus de Presidente Prudente - SP.

Orientadores: Dra. Daniele Barroca Marra Alves
Dra. Fernanda Sayuri Yoshino Watanabe
Dra. Tayná Aparecida Ferreira Gouveia

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação - Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação - UNESP, Campus de Presidente Prudente

M121m Macedo, Fernanda Ferreira Pacheco.
Monitoramento do vapor d'água durante eventos extremos de precipitação empregando diferentes técnicas / Fernanda Ferreira Pacheco Macedo, Thainara Munhoz Alexandre de Lima. - 2020
93 f. : il.

Orientadoras: Daniela Barroca Marra Alves, Fernanda Sayuri Yoshino Watanabe, Tayná Aparecida Ferreira Gouveia
Trabalho de conclusão (bacharelado - Engenharia Cartográfica e de Agrimensura) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente, 2020
Inclui bibliografia

1. Eventos extremos. 2. Precipitação. 3. Meteorologia. 4. Sensoriamento remoto. 5. GNSS. I. Lima, Thainara Munhoz Alexandre de. II. Alves, Daniela Barroca Marra. III. Watanabe, Fernanda Sayuri Yoshino. IV. Gouveia, Tayná Aparecida Ferreira. V. Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente. VI. Título.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado com o apoio e financiamento da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - Processo n° 2017/11873-6, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP).

RESUMO

A análise do comportamento, frequência e impacto de eventos climatológicos extremos vêm ganhando cada vez mais atenção mediante as significativas mudanças climatológicas globais, como por exemplo, o aquecimento global. Além disso, alterações no comportamento desses eventos podem estar associadas ao crescimento da população e conseqüente aumento da emissão de gases do efeito estufa. No Brasil, salvo exceções, os desastres naturais de maior impacto social, econômico e ambiental são causados por eventos extremos de precipitação, seja pelo alto volume de chuva, provocando inundações, ou pela sua escassez, caracterizando os longos períodos de seca. Assim, o conhecimento e o monitoramento desses eventos atmosféricos, em especial do vapor d'água, são essenciais para a prevenção e mitigação de desastres. Outro ponto que ressalta a importância do monitoramento da precipitação é a necessidade de água para múltiplos usos, como irrigação de culturas agrícolas e o abastecimento de água doméstico e industrial. Por isso, conhecer o ciclo hidrológico de uma região é fundamental para o seu desenvolvimento socioeconômico. Mediante este cenário, ao longo dos anos, inúmeros investimentos têm sido feitos para se obter uma caracterização detalhada da precipitação e dos fenômenos com ela relacionados, o que resulta em uma grande quantidade de dados, cada vez mais precisos. As principais fontes brasileiras para obtenção de parâmetros relacionados com precipitação são os pluviômetros e as estações meteorológicas (que incluem também o pluviômetro), mas que apesar de possuírem um grande reconhecimento de contribuições práticas, apresentam uma insuficiência de dados, devido à falta de medições e à baixa resolução espacial, principalmente na região Norte do país. Dessa forma, o principal objetivo deste estudo é analisar a aplicabilidade de técnicas alternativas para o estudo e monitoramento do vapor d'água durante a ocorrência de eventos extremos de precipitação relacionados com altos volumes de chuva. Para tanto, foram feitas análises de parâmetros atmosféricos ao longo de um ano de dados nas cidades de São Paulo e Belo Horizonte, a partir de dados fornecidos por estações de altitude - radiossondas, estações meteorológicas pluviômetros, GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*), e sensores meteorológicos imageadores e não-imageadores. Os resultados obtidos estão de acordo com o esperado, indicando significativas correlações entre as informações das diferentes fontes, principalmente na análise do comportamento da atmosfera durante a ocorrência de eventos extremos de precipitação.

Palavras-chave: Eventos extremos, precipitação, meteorologia, sensoriamento remoto, GNSS.

ABSTRACT

The analysis of the behavior, frequency and impact of extreme weather events has been gaining more and more attention due to significant global weather changes, such as global warming. In addition, changes in the behavior of these events may be associated with population growth and the consequent increase in greenhouse gas emissions. In Brazil, with some exceptions, natural disasters with the greatest social, economic and environmental impact are caused by extreme precipitation events, either by the high volume of rain, causing floods, or by their scarcity, characterizing the long periods of drought. Thus, knowledge and monitoring of these atmospheric events, especially water vapor, are essential for the prevention and mitigation of disasters. Another point that highlights the importance of monitoring rainfall is the need for water for multiple uses, such as irrigation of agricultural crops and domestic and industrial water supply. For this reason, knowing the hydrological cycle of a region is essential for its socioeconomic development. Through this scenario, over the years, numerous investments have been made to obtain a detailed characterization of precipitation and related phenomena, which results in a large amount of data, increasingly accurate. The main Brazilian sources for obtaining parameters related to precipitation are the rain gauges and the meteorological stations (which also include the rain gauges), but which despite having a great recognition of practical contributions, present a lack of data, due to the lack of measurements and low spatial resolution, mainly in the North of the country. Thus, the main objective of this study is to analyze the applicability of alternative techniques for the study and monitoring of water vapor during the occurrence of extreme precipitation events related to high volumes of rain. To this end, analyzes of atmospheric parameters were carried out over a year of data in the cities of São Paulo and Belo Horizonte, based on data provided by altitude stations - radiosonde, pluviometer weather stations, GNSS (Global Navigation Satellite Systems), and imager and non-imager meteorological sensors. The results obtained are in line with expectations, indicating significant correlations between information from different sources, mainly in the analysis of the behavior of the atmosphere during the occurrence of extreme precipitation events.

Key words: Climate events, precipitation, remote sensing, GNSS.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Circulação da atmosfera em diferentes épocas do ano, sendo (a) janeiro e (b) julho	19
Figura 2 - Movimentação da Célula de Walker em condições normais	20
Figura 3 - Movimentação da Célula de Walker durante período do El Niño em (a); e Movimentação da Célula de Walker durante a ocorrência do El Niña em (b).	21
Figura 4 - Fluxograma que mostra a relação entre os órgãos responsáveis por coletar informações acerca do monitoramento de desastres no Brasil, e o CENAD.	27
Figura 5 - Mapa que apresenta manchas de inundações na cidade de Porto Velho – RO, no entorno do Rio Madeira. A variação nas cores da mancha indica os diferentes níveis de elevação do nível do rio, sendo vermelho=19 m, laranja=18 m, amarelo=17 m e verde=16 m.	28
Figura 6 - Exemplo de parte de um pluviograma, onde é mostrado a distribuição das alturas de chuva acumuladas no tempo.	33
Figura 7 - Espectro eletromagnético.....	36
Figura 8 - Propagação do sinal ao longo da ionosfera e da atmosfera neutra (troposfera) ..	38
Figura 9 - Mapa indicando as duas cidades (São Paulo e Belo Horizonte) definidas para avaliação dos dados de diferentes fontes e dos eventos extremos de precipitação.	42
Figura 10 - Tabela de dados pluviométricos de Belo Horizonte. Da esquerda pra direita são mostradas nas colunas nome da cidade, código da estação, estado, local, latitude, longitude, hora, e precipitação em mm.....	46
Figura 11 - Distribuição das estações de radiossonda na América do Sul. As estações utilizadas para avaliação do método em estudos de eventos de precipitação, localizadas nas cidades de São Paulo e Belo Horizonte aparecem destacadas em amarelo.....	47
Figura 12 - Mapa de precipitação acumulada para a América do Sul no dia 10/06/2020, disponibilizada pelo DSA, obtida a partir de dados do satélite GOES-16.	51
Figura 13 - Eixo direito - ZTD em São Luiz, obtido pelo EMBRACE (azul) e pelo IGS (verde) durante o mês de março de 2019. Eixo esquerdo – discrepância em cm, entre o ZTD obtido pelo EMBRACE e pelo IGS.....	53
Figura 14 - Eixo direito - ZTD em São Luiz, calculado por dados de radiossonda (ZTD/Rad) e dados do INMET (ZTD/INMET), do ZTD obtido pelo IGS (ZTD/IGS), no período de março/2019. Eixo esquerdo - diferença entre o ZTD/Rad e ZTD/IGS (amarelo) e entre o ZTD/INMET e ZTD/IGS (azul).	56
Figura 15 - Atraso úmido (ZWD) em São Paulo, obtido pela subtração do ZHD, calculado por dados de radiossonda (laranja) e dados do INMET (azul), do ZTD obtido pelo ZTD/EMBRACE, no período de março/2019 - março/2020.	59
Figura 16 - Atraso úmido (ZWD) em Belo Horizonte, obtido pela subtração do ZHD, calculado por dados de radiossonda (laranja) e dados do INMET (azul), do ZTD obtido pelo ZTD/EMBRACE.....	59

Figura 17 - Parâmetros atmosféricos na cidade de Belo Horizonte entre março/2019 e março/2020 obtidos de diferentes fontes: pressão, temperatura e umidade (estações meteorológicas - INMET e radiossondas); precipitação (estação meteorológica - INMET, pluviômetros - ANA e CEMADEN); IWV (ZTD/GNSS - EMBRACE).....	61
Figura 18 - Parâmetros atmosféricos da cidade de São Paulo entre março/2019 e março/2020 obtidos de diferentes fontes: pressão, temperatura e umidade (estações meteorológicas - INMET e radiossondas); precipitação (estação meteorológica - INMET, pluviômetros - ANA e CEMADEN); IWV (ZTD/GNSS - EMBRACE).....	62
Figura 19 - Quantidade de vapor d'água ao longo da coluna vertical em cm, medido pelo sensor MODIS a bordo das plataformas Aqua e Terra, sobre a cidade de Belo Horizonte (destacada pelo retângulo vermelho), entre os dias 21/11/2019 e 25/11/2019.....	67
Figura 20 - Precipitação diária estimada pelo satélite GOES-16 sobre um recorte da América do Sul, com destaque para a cidade de Belo Horizonte (retângulo em preto), entre os dias 21/11/2019 e 25/11/2019.....	67
Figura 21 - Parâmetros atmosféricos na cidade de Belo Horizonte obtidos entre os dias 21/11/2019 e 25/11/2019 a partir de diferentes fontes: pressão, temperatura e umidade (estações meteorológicas - INMET e radiossondas); precipitação (estação meteorológica - INMET, pluviômetros - ANA e CEMADEN; e sensores meteorológicos - GPM (IMERG)).	68
Figura 22 - Quantidade de vapor d'água ao longo da coluna vertical em cm, medido pelo sensor MODIS a bordo das plataformas Aqua e Terra, sobre a cidade de Belo Horizonte (destacada pelo retângulo vermelho), entre os dias 22/01/2020 e 26/01/2020.....	70
Figura 23 - Precipitação diária estimada pelo satélite GOES-16 sobre um recorte da América do Sul, com destaque para a cidade de Belo Horizonte (retângulo em preto), entre os dias 22/01/2020 e 26/01/2020.....	70
Figura 24 - Parâmetros atmosféricos na cidade de Belo Horizonte obtidos entre os dias 22/01/2020 e 26/01/2020 a partir de diferentes fontes: pressão, temperatura e umidade (estações meteorológicas - INMET e radiossondas); precipitação (estação meteorológica - INMET, pluviômetros - ANA e CEMADEN; e sensores orbitais meteorológicos - GPM (IMERG)); IWV (radiossondas e ZTD/GNSS - EMBRACE).	71
Figura 25 - Quantidade de vapor d'água ao longo da coluna vertical em cm, medido pelo sensor MODIS a bordo das plataformas Aqua e Terra, sobre a cidade de São Paulo (destacada pelo retângulo vermelho), entre os dias 03/07/2019 e 07/07/2019.....	73
Figura 26 - Precipitação diária estimada pelo satélite GOES-16 sobre um recorte da América do Sul, com destaque para a cidade de São Paulo, entre os dias 03/07/2019 e 07/07/2019.	73
Figura 27 - Parâmetros atmosféricos na cidade de São Paulo obtidos entre os dias 03/07/2019 e 07/07/2019 a partir de diferentes fontes: pressão, temperatura e umidade (estações meteorológicas - INMET e radiossondas); precipitação (estação meteorológica - INMET, pluviômetros - ANA e CEMADEN); IWV (radiossondas e ZTD/GNSS - EMBRACE).	74

Figura 28 - Quantidade de vapor d'água ao longo da coluna vertical em cm, medido pelo sensor MODIS a bordo das plataformas Aqua e Terra, sobre a cidade de São Paulo (destacada pelo retângulo vermelho), entre os dias 08/02/2020 e 12/02/2020.....	76
Figura 29 - Precipitação diária estimada pelo satélite GOES-16 sobre um recorte da América do Sul, com destaque para a cidade de São Paulo, entre os dias 08/02/2020 e 12/02/2020.	77
Figura 30 - Parâmetros atmosféricos na cidade de São Paulo obtidos entre os dias 08/02/2020 e 12/02/2020 a partir de diferentes fontes: pressão, temperatura e umidade (estações meteorológicas - INMET e radiossondas); precipitação (estação meteorológica - INMET, pluviômetros - ANA e CEMADEN); IWV (radiossondas e ZTD/GNSS - EMBRACE). ...	78
Figura 31 - Tabela de disponibilidade de dados para Belo Horizonte. Na primeira coluna a esquerda são mostrados os meses de março/2019 até março/2020; na primeira linha são mostrados os dias de 1 até 31. Para cada mês, cada linha representa uma fonte de dados: rosa – EMBRACE, azul – radiossonda (00h e 12h), amarelo – pluviômetros (CEMADEN e ANA), e verde – estação meteorológica. Os espaços em branco correspondem aos dias sem dados.	93
Figura 32 - Tabela de disponibilidade de dados para São Paulo. Na primeira coluna a esquerda são mostrados os meses de março/2019 até março/2020; na primeira linha são mostrados os dias de 1 até 31. Para cada mês, cada linha representa uma fonte de dados: rosa – EMBRACE, azul – radiossonda (00h e 12h), amarelo – pluviômetros (CEMADEN e ANA), e verde – estação meteorológica. Os espaços em branco correspondem aos dias sem dados.	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Coordenadas geodésicas das estações utilizadas em cada uma das fontes nas cidades de Belo Horizonte e São Paulo.	43
Tabela 2 - Distâncias entre as estações utilizadas como fontes de dados e suas respectivas altitudes nas cidades de Belo Horizonte e São Paulo	43
Tabela 3 - Configurações do sensor MODIS a bordo dos satélites Aqua e Terra.	49
Tabela 4 - Configurações do sensor ABI a bordo do satélite GOES-16	50

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANA - Agência Nacional de Águas

ABIN - Agência Brasileira de Inteligência

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

CPTEC/INPE - Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos/Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais

DP - Desvio padrão

DAS - Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais/INPE

EMBRACE - Estudo e Monitoramento Brasileiro de Clima Espacial

EMS - Estações Meteorológicas de Superfície

EMA – Estações Meteorológicas de Altitude

ERM - Estações de Radars Meteorológicos

GNSS - *Global Navigation Sattelite System*

GPM - *Global Precipitation Measurements*

GOES - *Geostationary Operational Environmental Satellite*

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

IGS - *International GNSS Service*

IMERG - *Integrated Multi-satelliE Retrievals for GPM*

IWV - *Integrated Water Vapour*

LAADS-DAAC - *Level-1 and Atmosphere Archive and Distribution System - Distributed Active Archive Center*

MODIS - *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*

PCDs - Plataformas de Coletas de Dados Automáticos

RBMC - Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo

REQM - Erro Médio Quadrático

REM - Radiação Eletromagnética

RHNR - Rede Hidrometeorológica Nacional de Referência

SACE - Sistema de Alerta de Eventos Críticos

SCM - Sistemas Frontais, Sistemas Convectivos de Mesoescala

TRMM - *The Tropical Rainfall Measuring Mission*

ZCAS - Zona de Convergência do Atlântico Sul

ZCIT - Zona de Convergência Intertropical

ZTD - *Zenital Total Delay*

ZHD ou SHD - *Zenital Hydrostatic Delay*

ZWD ou SWD - *Zenital Wet Delay*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1. Objetivos	16
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1. Características e formação de eventos extremos de precipitação.....	18
2.1.1. Circulação geral da atmosfera	18
2.1.2. Precipitação	22
2.1.3. Eventos extremos de precipitação	23
2.2. Monitoramento de precipitação no Brasil	25
2.2.1. Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN).....	26
2.2.2. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM)	27
2.2.3. Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres (CENAD).....	29
2.2.4. Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC).....	30
2.3. Fontes de dados	30
2.3.1. Estações meteorológicas	31
2.3.1.1. Pluviômetro	32
2.3.2. Radiossondas.....	34
2.3.3. Sensoriamento Remoto	35
2.3.4. Satélite de navegação GNSS	38
3. MATERIAIS E MÉTODOS	41
3.1. Áreas e período de estudo	41
3.2. Fontes de dados aplicadas	44
3.2.1. Fonte 1: Estações Meteorológicas.....	44
3.2.1.1. Fonte 2: Pluviômetros	45
3.2.2. Fonte 3: Radiossondas.....	46
3.2.3. Fonte 4: Dados de Sensoriamento Remoto	48
3.2.4. Fonte 5: Satélite de Navegação GNSS	52
3.3. Validação da radiossonda e das estações meteorológicas (INMET).....	55
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	58
4.1. ZWD derivado de dados EMBRACE, radiossonda e INMET	58
4.2. Avaliação temporal das diferentes fontes.....	60
4.3. Estudo de caso.....	65

4.3.1.	Estudo de caso - Belo Horizonte	66
4.3.2.	Estudo de caso - São Paulo	72
5.	CONCLUSÃO	80
	REFERÊNCIAS	83

1. INTRODUÇÃO

A precipitação pode ser entendida como a fase do ciclo hidrológico responsável pelo retorno das águas à superfície da Terra. Esse fenômeno, considerado aleatório no tempo e no espaço, provém das intervenções de fatores climáticos, característicos das regiões. Todo o regime hidrológico de uma região é determinado pelas suas características físicas, geológicas, topográficas e climatológicas (ZIPSER et al, 2006).

Eventos de precipitação podem ser colocados, dependendo de suas características de ocorrência, dentro da categorização de eventos extremos. Esses eventos são definidos como grandes variações de um determinado estado climático com relação à média, em diferentes escalas de tempo (BRITTO, 2015).

A ocupação inadequada do solo próximas às bacias hidrográficas e a má utilização desse recurso natural, em conjunto com outros fatores ligados à urbanização e industrialização, como o aquecimento causado pelo efeito estufa, vêm provocando drásticas alterações climáticas. Essas drásticas flutuações climáticas afetam diretamente o balanço hídrico, com repercussão em ocorrências de secas e inundações inesperadas, tendo como consequência prejuízos às populações e aos governos em várias escalas econômicas e sociais, resultando em desastres. Conhecer o comportamento desses eventos, suas frequências e os impactos provocados é extremamente importante para a prevenção e mitigação de desastres (DUARTE et al, 2015).

A crescente necessidade em melhorar o gerenciamento dos recursos hídricos é outro importante ponto que destaca a necessidade do conhecimento e modelagem correta da precipitação. A investigação desse fenômeno durante o ano é um fator determinante para estimar, entre outros, a disponibilidade de água para a irrigação de culturas, o abastecimento doméstico e industrial (BERTONI & TUCCI, 1993). Esse conhecimento é, portanto, um requisito fundamental para o desenvolvimento socioeconômico de uma região ou de uma bacia hidrográfica, já que informações de precipitações, como a estimativa dos seus valores prováveis, a identificação das áreas de ocorrências e regularidade com que as mesmas se distribuem, são imprescindíveis ao planejamento hídrico.

Diante desse cenário, é inegável a necessidade de uma caracterização detalhada da precipitação e dos fenômenos que a cercam, o que resulta em uma busca por maiores

quantidades de dados, com melhores resoluções temporais e espaciais, garantindo a geração de dados pluviométricos de boa qualidade e quantidade adequada às análises diversas (SALGUEIRO, 2005).

Das técnicas atuais para controle, estudo e monitoramento de precipitação, empregadas no Brasil, as principais delas envolvem as estações meteorológicas. Mas apesar da grande aplicabilidade e da alta precisão, é ainda observada uma baixa distribuição espacial dessas estações sobre o território brasileiro, principalmente na região Norte do país (SALGUEIRO, 2005), o que faz com que nem sempre o máximo de chuva precipitado seja registrado (MASSAGLI et al, 2011 apud SODRÉ et al, 2013).

Assim, várias são as fontes de dados que podem ser usadas na construção do perfil da variação espacial da precipitação. Uma alternativa interessante para complementação desses dados pode vir de dados GNSS (*Global Navigation Sattelite Systems*) baseada no uso de medidas de satélites artificiais. Com base no atraso sofrido pelo sinal GNSS ao atravessar a atmosfera neutra até uma estação na superfície, parâmetros como o IWV (*Integrated Water Vapor*) podem ser usados para avaliação do vapor d'água na atmosfera (SAPPUCI, 2001; MONICO, 2008; TEUNISSEN & MONTEBRUCK, 2017).

Além do GNSS, uma outra técnica que permite a determinação de parâmetros atmosféricos são as sondagens advindas das radiossondas. Esses equipamentos, que compõe as estações meteorológicas de altitude, são utilizados para medição *in loco* de temperatura, pressão, umidade, direção e velocidade do vento, entre outros parâmetros, em diversos níveis de altitudes (OLIVEIRA et al, 2017).

Além das observações terrestres, uma outra alternativa cada vez mais utilizada, e que pode ser aplicada para obter dados de precipitação são os sensores imageadores e não-imageadores. Esses sensores se encontram a bordo de satélites utilizados em sensoriamento remoto, como o sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) a bordo das plataformas Terra e Aqua, que permite a determinação da concentração de vapor d'água na atmosfera (LAADS DAAC, 2020; NASA, 2020).

Dessa forma, com base no exposto, esse trabalho vem realizar uma avaliação sobre o conjunto de técnicas que podem ser aplicados como complementação aos métodos tradicionais (estações meteorológicas), por meio de uma análise sazonal e de estudos de caso do vapor

d'água e de outros parâmetros atmosféricos (e.g. temperatura, pressão e umidade), de modo a verificar como cada método explica o comportamento dessas variáveis.

Ao longo do trabalho, foi realizado um detalhamento acerca de cada método e os principais órgãos atuantes no monitoramento de precipitação no país. Além dos métodos convencionais, são apresentadas outras técnicas que permitem uma avaliação e comparação com as técnicas usuais, sendo elas: radiossondas, GNSS e dados provenientes de satélites meteorológicos e de sensoriamento remoto.

1.1.Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é empregar diferentes técnicas para monitorar o vapor d'água durante a ocorrência de eventos extremos de precipitação envolvendo altos volumes de chuva, ou seja, que extrapolem o valor médio esperado para dado período e localização.

Os objetivos específicos são:

- Desenvolver um estudo teórico acerca de eventos extremos de precipitação, suas características e frequência de ocorrência no Brasil;
- Investigar dados relacionados com a precipitação advindos de diferentes fontes, como radiossondas (estações meteorológicas de altitude), IWV (GNSS), dados meteorológicos (INMET – Instituto Nacional de Meteorologia), dados de pluviometria (estações meteorológicas de superfície), dados de satélites meteorológicos e de sensoriamento remoto;
- Estudar e descrever as características dos dados obtidos por cada técnica considerada;
- Elaborar um estudo de caso envolvendo eventos extremos de precipitação, buscando investigar como as diferentes fontes de dados podem contribuir com o estudo desses fenômenos.

O relatório está estruturado da seguinte maneira: no Capítulo 2 é realizada a revisão teórica, com o detalhamento das características e formação de eventos de precipitação, quais os principais órgão brasileiros responsáveis por monitorar esses fenômenos e quais as fontes utilizadas na determinação de parâmetros relacionados com precipitação. No Capítulo 3 são apresentados os materiais e métodos, com a descrição da área e período de estudo e as

diferentes técnicas empregadas no uso de cada fonte. No Capítulo 4 são realizadas as análises dos resultados obtidos e no Capítulo 5 são apresentadas as considerações finais.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo é apresentado um estudo teórico que está estruturado em três principais pilares: definição de eventos extremos, características e ocorrências no Brasil, os principais órgãos brasileiros responsáveis pelo controle e monitoramento dos eventos de precipitação e as principais técnicas estudadas.

2.1. Características e formação de eventos extremos de precipitação

Nesta seção, é descrito todo o processo de formação de uma precipitação na forma de chuva (precipitação pluvial), desde a circulação geral da atmosfera até a formação da precipitação. É também apresentado um estudo de eventos extremos de precipitação, com enfoque para a realidade brasileira.

2.1.1. Circulação geral da atmosfera

Para compreender melhor o processo da formação de uma precipitação, é importante inicialmente entender como se dá a circulação geral da atmosfera. A energia que entra na Terra é proveniente do Sol, na forma de radiação, sendo que a radiação recebida nas regiões tropicais é maior do que as recebidas nas regiões polares (GRIMM, 1999).

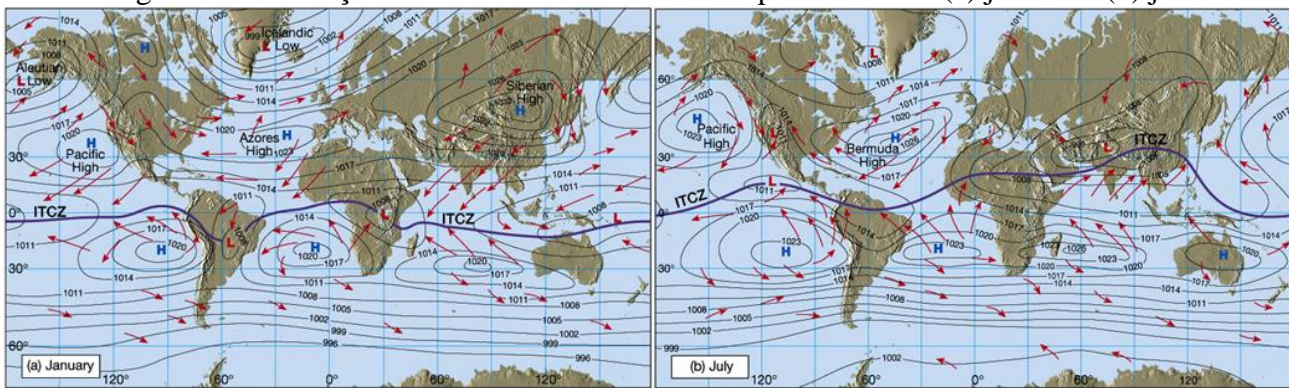
Essa diferença na incidência solar causa um desequilíbrio de calor latitudinal que resulta em uma diferença de pressão, e que por sua vez é responsável por dirigir a circulação da atmosfera. Em um cenário que não ocorresse essa troca de calor entre a região polar e a tropical, a região polar ficaria cada vez mais fria e os trópicos cada vez mais quentes. (GRIMM, 1999).

Uma das primeiras contribuições ao modelo clássico de circulação geral é de George Hadley, em 1735. Ele propôs, a partir de observações, que o gradiente de temperatura entre os polos e o equador cria uma circulação térmica que faz o ar se mover para equilibrar as desigualdades (TARBUCK & LUTGENS, 2001). Na década de 1920, foi proposto um

sistema de três células de circulação atmosférica em cada hemisfério, com o intuito de descrever o equilíbrio de calor na Terra.

Apesar de o modelo de Hadley ainda ser atualmente aceito, observações recentes mostraram algumas alterações na movimentação dos ventos. Essas particularidades ocorrem pelo fato da superfície da Terra não ser uniforme, provocando um aquecimento desigual devido aos contrastes terra/água e as variações no relevo. Além disso, o Sol não fica sobre o equador, mas se move de $23,5^{\circ}\text{N}$ para $23,5^{\circ}\text{S}$ ao longo do ano. Essas influências podem ser vistas na Figura 1, que mostra as variações na circulação atmosférica em diferentes épocas do ano (GRIMM, 1999).

Figura 1 - Circulação da atmosfera em diferentes épocas do ano: (a) janeiro e (b) julho.

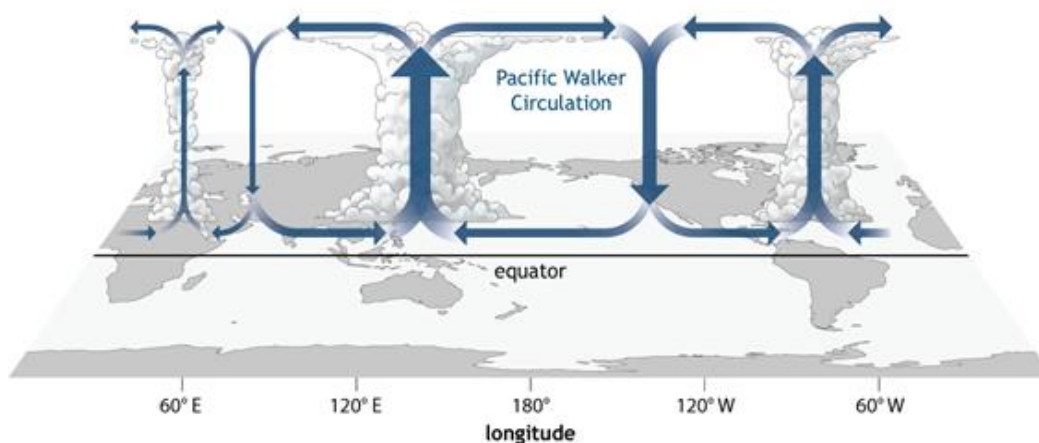


Fonte: GLOBE (2013).

Importante destacar que na região tropical, além da circulação meridional (O_x) decorrente das atividades das Células de Hadley, existe também uma circulação no plano vertical em larga escala na direção zonal (O_y) que ocorre devido a presença das Células de Walker. Essa circulação zonal é causada pelas diferenças na distribuição de calor entre o oceano e a superfície terrestre, como é mostrado na Figura 2, que faz uma representação didática e sem escala das Células de Walker (K-M & YANG, 2002; WALKER, 1932).

A partir da Figura 2, nota-se que há locais com movimento ascendente (baixa pressão em superfície, favorecendo a formação de nuvens) e locais com movimento descendente (alta pressão em superfície, o que dificulta a formação de nuvens). As partes das células de Walker que correspondem aos ventos de superfície são chamadas de ventos alísios. Toda a movimentação que ocorre na célula permite que algumas áreas sejam mais chuvosas que suas áreas vizinhas (K-M & YANG, 2002; WALKER et al, 1932).

Figura 2 - Movimentação da Célula de Walker em condições normais.

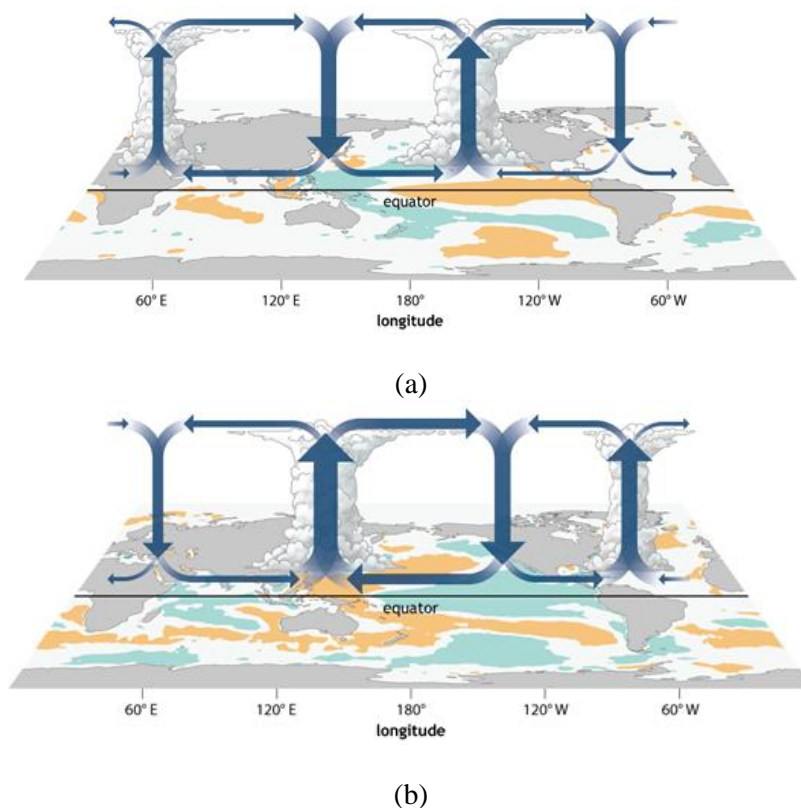


Fonte: Climate-NOAA (2014).

Durante episódios de El Niño, um fenômeno climático no qual ocorre um aumento significativo da temperatura na costa oeste da América do Sul, ocorre um deslocamento no ramo ascendente da Célula de Walker. Essa ocorrência altera toda a configuração da célula, como é apresentado na Figura 3. Nota-se, por exemplo, um forte movimento subsidente na região Norte do Brasil, em anos de El Niño, e em geral, registra-se chuva abaixo da média nessa região (K-M & YANG, 2002; WALKER et al, 1932).

Por outro lado, durante eventos de La Niña ocorre um fenômeno climatológico oposto ao El Niño. Na costa oeste da América do Sul, tem-se o resfriamento das águas, dificultando a convecção sobre os oceanos nessa região (K-M & YANG, 2002; WALKER et al, 1932). Durante o fenômeno, um dos ramos ascendentes da circulação fica sobre o norte do continente Sul-Americano, como visto na Figura 3, e tem-se, portanto, chuva acima da média em parte da Região Norte do Brasil.

Figura 3 - Movimentação da Célula de Walker durante período do El Niño (a); e Movimentação da Célula de Walker durante a ocorrência do El Niña (b).



Fonte: Climate - NOAA (2014).

A circulação geral atmosférica dá origem às massas de ar e provoca também seus deslocamentos, além disso, características dessas massas estão diretamente vinculadas com sua localização ou região de origem. A condição ideal para a formação de uma massa de ar é a estagnação do ar sobre uma determinada superfície. Já o deslocamento dessas massas de ar ocorre pela diferença de pressão e temperatura entre as diversas áreas da superfície (MENDONÇA & OLIVEIRA, 2011).

Na América do Sul, as principais massas de ar atuantes são: Massa de ar Equatorial Continental, Massa de ar Tropical Continental, Massa de ar Tropical Marítima, Massa de ar Polar Continental e Massa de ar Polar Marítima. A circulação dessas massas é influenciada principalmente pelos oceanos Pacífico e Atlântico, a Cordilheira dos Andes e a Floresta Amazônica (MENDONÇA & OLIVEIRA, 2011). Essa movimentação, entre as massas de ar e oceanos, forma os chamados sistemas meteorológicos, sendo eles responsáveis diretos pela

precipitação Sul-Americana. Logo, os principais sistemas meteorológicos são: SCM (Sistemas Frontais, Sistemas Convectivos de Mesoescala), ZCAS (Zona de Convergência do Atlântico Sul), ZCIT (Zona de Convergência Intertropical), alta da Bolívia, e Zona de Convergência do Pacífico Sul. Com base nesses sistemas é que se dá a formação da precipitação (MENDONÇA & OLIVEIRA, 2011).

2.1.2. Precipitação

Na atmosfera, há uma grande quantidade de partículas de impurezas naturais ou artificiais, sendo muitas dessas, fragmentos sólidos de cloreto de sódio resultado da evaporação das águas dos oceanos. Há outras partículas chamadas de higroscópicas (partículas que possuem a característica de absorver água do ambiente), que formam os núcleos de condensação (parte da nuvem em que o vapor de água se condensa). Essas partículas são essenciais para a formação de nuvens, pois é sobre a superfície delas que se inicia o processo de condensação do vapor d'água em torno da gotícula principal, que é a gotícula a partir da qual é formada a gotícula de precipitação (ALMEIDA, 2016). Além dos núcleos de condensação, o vapor d'água na atmosfera se condensa quando as condições tendem a saturação, ou seja, quando ocorre um aumento significativo na pressão parcial do vapor d'água devido a evaporação e transpiração, e/ou pelo resfriamento do ar (ALMEIDA, 2016).

No processo de condensação, a água passa do estado de vapor para o líquido, o que acontece devido o resfriamento do ar e o aumento da umidade relativa. Mesmo antes de atingir os 100% da umidade, inicia-se o processo de condensação em torno dos núcleos maiores e as gotículas crescem até atingir valores máximos que ocorrem na saturação. Porém, apenas o processo de condensação não é suficiente para garantir a formação de precipitação, isso porque, no caso de as gotículas crescerem apenas por condensação, demoraria mais de 24 horas para atingir o tamanho de uma gota de chuva (ALMEIDA, 2016).

Como já destacado, o processo de condensação trata-se de um processo que por si só não é capaz de promover chuvas. A ocorrência de chuva somente se dá mediante ao processo de coalescência, que é o crescimento de uma gotícula pela incorporação de outras com as quais entra em contato, para a formação de gotas maiores, podendo ou não envolver a

formação de cristais de gelo. Durante esse processo, as gotículas se movem no interior das nuvens com diferentes velocidades, o que possibilita a colisão entre si e, conseqüentemente, a formação de gotículas cada vez maiores (ALMEIDA, 2016).

Dessa forma, a chuva, precipitação líquida na forma de gotas de água, é basicamente caracterizada pela sua origem de formação, podendo ser classificada de três maneiras: frontal ou ciclônica, convectiva e orográfica. A primeira se origina de nuvens que se formam a partir do encontro de massas de ar frio e quente, onde a massa quente tende a se elevar, resfriando e provocando a precipitação (TORRES & MACHADO, 2016).

A precipitação convectiva é resultado de um aquecimento diferencial da superfície que origina uma ascensão do ar. Tem como origem nuvens de grande desenvolvimento vertical, tais como as nuvens do gênero cumulonimbus, conhecidas também como nuvens de tempestade (TORRES & MACHADO, 2016). A precipitação convectiva tem curta duração e maior intensidade. Porém, variações nas condições climáticas, principalmente nas condições de temperatura, podem aumentar de forma significativa a duração dessa precipitação, levando a ocorrência de inundações (TORRES & MACHADO, 2016).

Por fim, a precipitação orográfica, também conhecida como chuva de relevo, é a chuva provocada pelas condições do relevo. Ocorre quando uma massa de ar carregada de umidade sobe ao encontrar uma elevação do relevo, como uma montanha. O ar mais quente é empurrado para cima. Com a queda de temperatura, o vapor se condensa, provocando chuva, que apresenta características de baixa intensidade, curta duração e ocorrência de precipitação do lado do sentido do vento (TORRES & MACHADO, 2016).

2.1.3. Eventos extremos de precipitação

De acordo com o dicionário de Oxford (OXFORD, 2020), evento é definido como algo que ocorre ou acontece e que tem uma importância; e extremo é definido como algo muito grande, não usual, que excepciona. Assim, um evento climatológico extremo pode ser definido como a ocorrência de eventos onde os valores de uma variável ficam muito acima (ou abaixo) da média observada em uma região específica (KAROLY, 2014). No caso da precipitação, não há um limiar padrão para classificar uma precipitação como um evento

extremo ou não, esse critério deve ser definido de acordo com o comportamento usual da precipitação na região (SAPUCCI et al., 2019).

Apesar disso, um sistema de tempo que produz intensa precipitação sempre está relacionado com a atividade convectiva e é resultado da interação de mecanismos físicos de diferentes escalas (MENDONÇA & OLIVEIRA, 2011). O início das tempestades convectivas está diretamente relacionado a processos em mesoescala (fenômenos atmosféricos menores que a escala sinótica, porém, maiores que a microescala). Por sua vez, a evolução ou intensificação desses eventos é resultado da ação de processos de escala sinótica (sistemas meteorológicos que têm escalas de algumas centenas de quilômetros ou mais), que criam um ambiente favorável a formação de chuvas intensas pela desestabilização do ambiente local (MENDONÇA & OLIVEIRA, 2011).

Por exemplo, se o sistema é de escala sub sinótica e desloca-se rapidamente, a precipitação associada geralmente ocorre em grande intensidade e pode ocasionar as chamadas enchentes urbanas. Neste tipo de enchente, há um rápido aumento do nível das águas pouco tempo após a ocorrência de precipitação. A gravidade dos impactos depende principalmente da atuação do sistema de drenagem local. Quando o sistema sinótico se desloca mais lentamente, a precipitação associada geralmente não é muito intensa, porém contínua durante um período de tempo relativamente grande (até vários dias), embora possam ocorrer eventuais pancadas de chuvas. Neste caso, quando as características físicas (topográficas) da região permitirem, pode haver extravasamento da calha dos rios e, como consequência, a inundação de grandes áreas. O retorno dos rios aos seus níveis normais irá depender de vários fatores físicos da bacia hidrográfica, tais como o tempo e velocidade do escoamento das águas (MADDOX et al, 1978).

Apesar disso, o processo de inundação de uma área envolve outros fatores além da chuva. Muitos rios formam as chamadas planícies de inundação, esses cursos d'água dispõem de uma área nos limites de suas margens para as quais extravasam a sua vazão durante período de fortes chuvas. Porém, devido a expansão urbana, algumas áreas de inundação são ocupadas, o que acaba provocando alagamento de áreas urbanas (ALMEIDA, 2016).

Outro fator que ocasiona inundações é o desenvolvimento humano, que promove mudanças no uso do solo e aumento de riscos de alagamento, tais como alterações no fluxo

dos canais, excessiva impermeabilização do solo e ocupação do solo sobre mares, rios e córregos canalizados. Megacidades como São Paulo possuem numerosos problemas sociais e ambientais associados aos padrões de desenvolvimento e transformação do espaço, que têm se agravado pelo aumento na frequência e intensidade de chuvas (TORRES & MACHADO, 2016).

Em um estudo feito por Zipser et al (2006), intitulado *Where Are The Most Intense Thunderstorm on Earth?*, foram utilizados seis anos de dados do satélite TRMM (*The Tropical Rainfall Measuring Mission*) para mapeamento dos casos de convecção severa mais extremos no globo. Os resultados obtidos enfatizaram o sul da América do Sul como áreas com as tempestades mais intensas na Terra (ZIPSER et al, 2006).

Alguns desses casos envolvendo eventos extremos de precipitação ocorreram em 2005 e 2010, no qual a Amazônia sofreu períodos de intensa seca do Rio Solimões, provocada pela falta de chuva na região (SERRÃO et al, 2015). Por outro lado, em 2012, Manaus foi atingida por uma das piores enchentes da sua história, provocando perdas agrícolas, desabastecimento de água e alimentos, provocando até a interrupção do ano letivo das escolas (CPRM, 2012). Nos anos de 2009, 2010 e 2011, foram registradas enchentes na região Nordeste, levando a mortes, desabrigados, perdas agrícolas e outros impactos econômicos (LOUREIRO et al, 2014). No período de 2012 a 2015, o Nordeste brasileiro sofreu a pior seca em 50 anos, onde 1100 cidades foram afetadas, resultando em perdas agrícolas e falta de água para consumo humano. Esse evento foi fundamental para o grande processo de migração da região (MARENGO, 2016). Outros eventos históricos ocorridos no país são descritos por Rittl (2012).

2.2. Monitoramento de precipitação no Brasil

Nesta seção são descritos os principais centros responsáveis pelo monitoramento de eventos climatológicos extremos no Brasil.

2.2.1. Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN)

No Brasil, o CEMADEN (Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais), criado em 2003, é um dos principais órgãos nacionais vinculado ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação, responsável pelo monitoramento de desastres naturais, monitorando 958 municípios em todas as regiões brasileiras (CEMADEN, 2020a). Todo o processo de monitoramento é feito com base em Radares Meteorológicos, que são capazes de realizar o monitoramento hidrometeorológico, obtendo informações detalhadas em um raio de até 400 km de cada radar. Sendo uma ferramenta para a previsão de chuva de curto prazo, o radar é aliado a outras fontes de dados, como as estações hidrológicas e os pluviômetros (CEMADEN, 2020b).

A principal missão do centro é a realização do monitoramento contínuo das condições geológicas, meteorológicas e hidrológicas do país, emitindo alertas de riscos de desastres. Um alerta indica que a situação de risco de desastre é previsível em curto prazo. Na condição de alerta, a defesa civil inicia a fase de preparação para o desastre, mobilizando os recursos necessários para a resposta. Um documento é preparado contendo as recomendações de ações de preparação, tais como, verificações *in loco*, acionamento de Planos de Contingência (estratégias elaboradas para diminuir danos humanos e materiais) e acionamento de Planos de Chamadas, que é o estabelecimento de comunicação entre as autoridades de recursos humanos especializados em gestão de desastres, e do Comando Operacional Conjunto das Forças Armadas do Brasil (CEMADEN, 2020c; DIÁRIO OFICIAL DA UNIÃO, 2013).

Todas as informações obtidas no CEMADEN são enviadas para o Centro Nacional de gerenciamento de riscos e desastres (CENAD). O Protocolo de Ação entre os dois centros regulamenta que todo alerta de risco de desastres naturais a ser emitido pelo CEMADEN deve ser enviado ao CENAD, para que esses dados sirvam de subsídio na tomada de ações preventivas de proteção civil, entre outros aspectos legais (CEMADEN, 2020c). A Figura 4 ilustra o fluxograma das ações para combinar dados e tomar medidas integradas entre o CENAD, o CEMADEN e os demais parceiros.

Figura 4 - Fluxograma que mostra a relação entre os órgãos responsáveis por coletar informações acerca do monitoramento de desastres no Brasil e o CENAD.



Fonte: CEMADEN (2020c).

Até 31 de dezembro de 2015, foram enviados um total de 4353 alertas para risco hidrológico e de movimentos de massa. Mais informações acerca do CEMADEN são encontradas em <http://www.cemaden.gov.br/>.

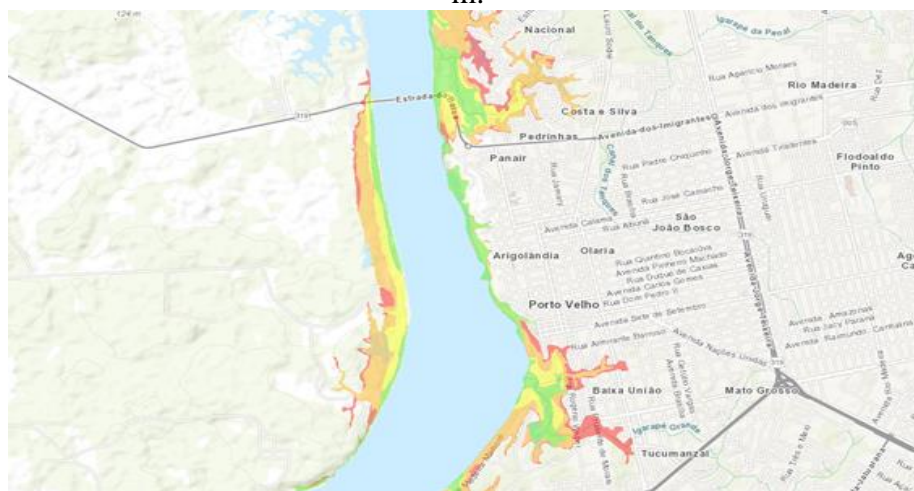
2.2.2. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM)

A CPRM (Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais), empresa pública brasileira, vinculada ao Ministério de Minas e Energia, foi criada em 1969, com o objetivo de desenvolver estratégias buscando soluções na área de Hidrologia do Serviço Geológico no Brasil, garantindo o bem-estar da população. Suas principais ramificações são: Programa Recursos Hídricos Superficiais, que atua no monitoramento de redes hidrometeorológicas com a implantação e operação de redes; na previsão e alerta de enchentes e inundações, a partir da implantação e operação de sistemas de alertas hidrológicos; e no desenvolvimento de estudos e pesquisa interpretativos de hidrologia para apoio à gestão territorial (CPRM, 2020a).

Com relação à previsão e alerta de enchentes e inundações, foi desenvolvido o SACE (Sistema de Alerta de Eventos Críticos), plataforma disponível no link <https://geoportail.cprm.gov.br/desastres/>, que disponibiliza em tempo real dados e previsões com o objetivo de auxiliar na prevenção de danos em eventos de cheias e inundações (CPRM, 2020b). Os sistemas de alerta operam após a realização de estudos e definições de níveis de referência (medidas usadas para verificar variações) para cada evento. Dados são recebidos diariamente pelo centro e processados por meio de modelos hidrológicos, permitindo a previsão dos níveis para locais de risco de inundação. Essas previsões são enviadas por meio de boletins e informes para os representantes de Defesa Civil para realocação ou remoção das populações (CPRM, 2020b).

Outros importantes produtos do SACE são os mapas de manchas de inundações, que possibilitam delimitar áreas atingidas por inundações. Esses mapas são muito utilizados como ferramentas de planejamento urbano e como incrementos ao sistema de alerta (CPRM, 2020c). A Figura 5 apresenta um exemplo de uma mancha de inundação para a cidade de Porto Velho – RO, no entorno do Rio Madeira, onde é possível observar as diferentes manchas associadas aos níveis das águas do rio, sendo que em vermelho corresponde ao nível (em relação ao solo) 19 metros, laranja 18 m, amarelo 17 m, e verde 16 m.

Figura 5 - Mapa que apresenta manchas de inundações na cidade de Porto Velho – RO, no entorno do Rio Madeira. A variação nas cores da mancha indica os diferentes níveis de elevação do nível do rio, sendo vermelho=19 m, laranja=18 m, amarelo=17 m e verde=16 m.



Fonte: CPRM (2020c)

O monitoramento dos níveis e vazão dos rios é possível por meio da operação de PCDs (Plataformas de Coletas de Dados Automáticos) situadas às margens dos rios. As PCDs enviam em tempo real os dados dos níveis dos rios e dos volumes de chuva que são registrados, e que posteriormente são disponibilizados no SACE. Estas estações telemétricas (estações que coletam e enviam dados a uma central) integram a RHNR (Rede Hidrometeorológica Nacional de Referência). A operação e manutenção destas estações, bem como o uso dos equipamentos de medição tem apoio operacional e financeiro da ANA (Agência Nacional de Águas).

2.2.3. Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres (CENAD)

Criado em 2005 a partir do Decreto Federal nº5.376, e atualmente coordenado pela Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil, do ministério do Desenvolvimento Regional, o CENAD possui como principal objetivo o gerenciamento de ações estratégicas de preparação e resposta a desastres (secas, inundações, enchentes, ventanias, etc) em território nacional e, eventualmente, também no âmbito internacional (CENAD, 2019).

Atualmente, a principal função do CENAD é consolidar as informações sobre riscos provocados por eventos extremos no país, advindos de diversos outros órgãos do governo federal. Esses órgãos são responsáveis pela predição de tempo; avaliação de condições geológicas de áreas de risco; monitoramento dos movimentos das placas tectônicas; acompanhamento das bacias hidrográficas; controle de queimadas e incêndios florestais; e transporte e armazenamento de produtos perigosos. As informações enviadas ao CENAD são avaliadas e processadas pelo CENAD, que as encaminha aos órgãos de Proteção e Defesa Civil dos estados e municípios com riscos de ocorrência de desastres (CENAD, 2019).

O CENAD atua em parceria com diversos órgãos, entre eles o CEMADEN, o CPRM, o IBAMA (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis), a ANA, a ABIN (Agência Brasileira de Inteligência), o CPTEC/INPE (Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos/Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), o INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), o CENSIPAM (Centro Gestor e Operacional do Sistema de Proteção da Amazônia), entre outros. Dessa forma, considerando toda a atuação e os esforços dos centros apresentados nesta seção, destaca-se a importância da

obtenção de dados e produtos de monitoramento e alertas de qualidade, de modo a garantir a mitigação de desastres no país.

2.2.4. Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC)

Fundado em 1995, o CPTEC consiste em um centro, pertencente ao INPE, de previsão numérica de tempo (PNT) e clima da América Latina, que fornece previsões de tempo de curto e médio prazos e climáticas de alta precisão. A partir de modelos numéricos, o CPTEC contribui para a previsão de secas ou inundações, que em conjunto com os demais centros de monitoramento, auxiliam na tomada de decisões, prevenindo desastres (CPTEC, 2020).

Dentre os diferentes produtos que o centro oferece, alguns deles são: previsão do tempo utilizando modelos de PNT; precipitação por satélite; precipitação por radar; monitoramento de queimadas; dentre outros. Esses dados, advindos de diferentes fontes, são constantemente atualizados e disponibilizados por meio do site do CPTEC (<https://www.cptec.inpe.br/>). Mais informações sobre cada produto são apresentadas no site (CPTEC, 2020).

2.3. Fontes de dados

Nesta seção são apresentadas as fontes de dados a serem avaliadas neste trabalho, iniciando pelas fontes mais comumente utilizadas para monitoramento de chuva no Brasil, que são as estações meteorológicas e os pluviômetros (aqui além dos pluviômetros da estação meteorológica, estes são também avaliados de forma isolada). São também avaliadas técnicas que permitem determinar parâmetros relacionados com a formação de precipitação na forma de chuva, como IWV a partir de dados GNSS e parâmetros atmosféricos medidos por sensores a bordo de satélites meteorológicos e de sensoriamento remoto.

2.3.1. Estações meteorológicas

As estações meteorológicas são um conjunto de equipamentos onde se registram parâmetros meteorológicos, tais como: pressão atmosférica, temperatura, umidade relativa do ar, precipitação, radiação solar, direção e velocidade do vento, etc. Trata-se de um conjunto de equipamentos responsáveis por monitorar e registrar variações nas condições meteorológicas e climáticas, e proporcionar dados para a previsão do clima ou do tempo (UNESP, 2020; INMET, 2020a). As estações meteorológicas do INMET, por exemplo, são compostas pelos seguintes instrumentos: anemógrafo, anemômetro, barógrafo, barômetro de mercúrio, evaporímetro de piche, heliógrafo, higrógrafo, microbarógrafo, piranógrafo, pluviógrafo, pluviômetro, psicrômetro, termógrafo, termohigrógrafo e termômetros. Uma breve descrição de cada um pode ser encontrada em INMET (2020a).

As estações meteorológicas são subdivididas em: estações de superfície, que têm por finalidade efetuar a coleta e o processamento de dados meteorológicos à superfície para fins aeronáuticos e sinóticos; estações de altitude, que têm por finalidade coletar dados de pressão, temperatura, umidade, direção e velocidade do vento, nos diversos níveis da atmosfera através de radiossondagem; e estações de radar meteorológico, que têm por finalidade fazer vigilância constante na área de cobertura dos radares e divulgar as informações obtidas por meio rápido e confiável aos Centros Meteorológicos de Vigilância (REDEMET, 2015).

Tratando-se das estações meteorológicas de superfície podem ser divididas em convencionais e automáticas. A quantificação de fenômenos utilizando as estações convencionais requer a atuação de profissionais especializados para o manuseio dos equipamentos da estação. Enquanto nas estações automáticas, há uma automação na mensuração dos dados meteorológicos. Nos últimos anos, essas estações convencionais vêm sendo substituídas pelas estações automáticas, devido à alta capacidade de armazenamento de dados e facilidade no acesso aos dados, evitando também erros de leituras (FINHOLDT, 2008).

As estações meteorológicas podem ser classificadas do seguinte modo: Estações Sinóticas (em Terra e no Mar); Estações Climatológicas; Estações de Meteorologia Aeronáutica; Estações de Meteorologia Agrícola; e Estações Especiais (AMORIM; ORGAZ;

TEIXEIRA, 1995). Com relação aos tipos de observações feitas pelas estações, tem-se: observações sinóticas, que podem ser classificadas em meteorológicas de superfície (EMS), de altitude (EMA) e as estações de radares meteorológicos (ERM) (REDEMET, 2015); observações climatológicas; observações de meteorologia aeronáutica; observações de meteorologia agrícola; e as observações especiais (AMORIM; ORGAZ; TEIXEIRA, 1995).

Toda estação meteorológica apresenta uma identificação. Esta é composta por identificação física por meio de sua posição geográfica expressa em latitude, longitude e altitude; identificação internacional composta por 5 algarismos fornecidos pela OMM (Organização Meteorológica Mundial); e a identificação operacional feita por um indicador de localidade, composto por 4 (quatro) letras (SILVA; CHAVES; LIMA, 2009).

Balbino (2020) apresenta algumas exigências que são necessárias para instalar uma estação meteorológica, sendo elas: um local sem desníveis, a fim de evitar o acúmulo de água, e longe de instalações elétricas; horizontes amplos, sem barreiras que impeçam a radiação solar ou mudem as características do vento, recomendando-se a distância de 10 vezes a altura do obstáculo; distantes de cursos d'água, lagos e banhados, evitando distúrbios na medição da umidade relativa do ar; solo gramado ou com vegetação rasteira para minimizar a influência dos diferentes tipos de textura de solo.

Apesar do extenso uso dessas estações, na aplicação de modelos meteorológicos, os dados de entrada devem possuir informações rigorosamente corretas durante um considerável período de tempo, o que ainda é uma dificuldade no Brasil por conta das falhas encontradas nos dados das estações meteorológicas (SODRÉ et al, 2013).

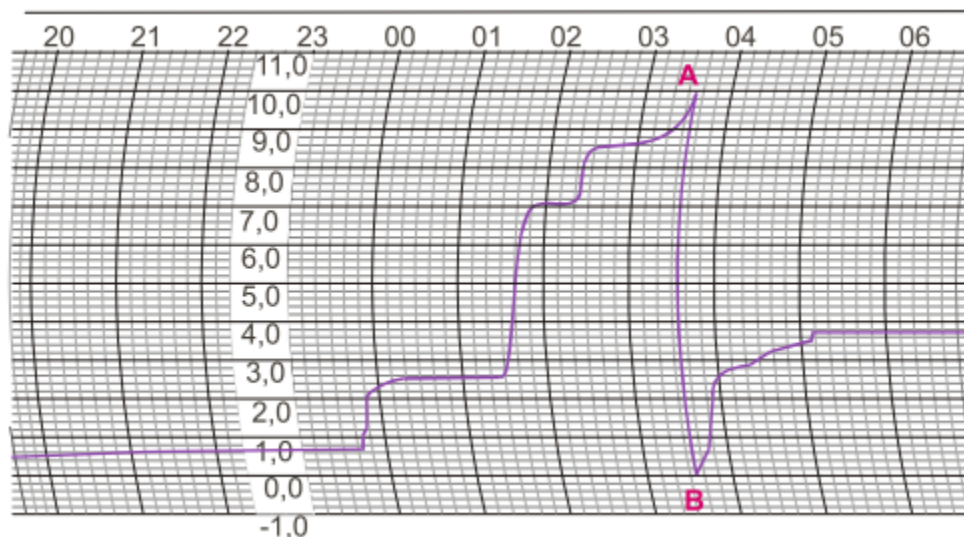
2.3.1.1. Pluviômetro

O pluviômetro, equipamento que compõe as estações meteorológicas de superfície, consiste em um instrumento que tem como finalidade básica medir a quantidade de precipitação atmosférica por meio da coleta da água da chuva em um recipiente graduado, de modo que os dados de pluviosidade são fornecidos por meio da “altura pluviométrica” indicada no instrumento. Essa altura trata da altura média que a água precipitada recobre uma determinada superfície, medida em milímetros (mm) (MENEZES, 2019).

A medida da altura pluviométrica é bastante simples, pois considera a quantidade de água que cai sobre uma superfície impermeabilizada como se fosse a altura da coluna de água (SANTOS, 2002). Essa quantidade é normalmente expressa em termos da espessura da camada d'água sobre uma superfície (a área em m^2), plana e impermeável. A precipitação é ainda caracterizada por sua duração (diferença de tempo entre os instantes de início e término do evento) e por sua intensidade, relação entre altura pluviométrica e a duração da precipitação (mmh^{-1}) (VAREJÃO-SILVA, 2005).

Para realizar as medidas de precipitação citadas acima, os dois tipos de equipamentos mais usados são o pluviômetro e o pluviógrafo. Eles se diferem pela forma de coleta dos dados, enquanto o pluviômetro precisa de leituras manuais, o pluviógrafo registra os dados em forma gráfica e automática. Na Figura 6, é mostrado um exemplo de um pluviograma, onde é possível verificar a distribuição das chuvas acumuladas ao longo do tempo em mm (MENEZES, 201).

Figura 6 - Exemplo de parte de um pluviograma, onde é mostrado a distribuição das alturas de chuva acumuladas no tempo, sendo que o eixo X representa as horas e o eixo Y representa a quantidade de precipitação em milímetros.



Fonte: VAREJÃO-SILVA, 2005.

Com relação a sua instalação, de maneira geral, recomenda-se que o aparelho fique longe de qualquer obstáculo que possa prejudicar a medição e a coleta da chuva deve ser feita a uma altura média de 1 a 1,5 metro acima da superfície do solo. Essas são algumas regras básicas que a OMM tenta uniformizar (STUDART, 2004).

Os pluviômetros compõem o conjunto de instrumentos de uma estação meteorológica (Seção 2.3.1) e, da mesma forma, podem ser classificados em convencionais e automáticos. Estes últimos registram automaticamente a altura pluviométrica em função do tempo, medindo a duração e intensidade da chuva. Por sua vez, nos pluviômetros convencionais, as leituras são feitas manualmente. Além disso, nos pluviômetros automáticos, a água precipitada é descartada, enquanto que nos convencionais essa água é armazenada (MENEZES, 2019).

2.3.2. Radiossondas

As estações meteorológicas de altitude são compostas por balões equipados com sensores meteorológicos acoplados em um sistema de rádio transmissor, que percorrem as camadas da atmosfera medindo os parâmetros atmosféricos em diferentes altitudes, que variam da superfície até aproximadamente 20 km. As radiossondas são instrumentos muito utilizados por centros meteorológicos para fornecer um diagnóstico (medidas *in loco*) das condições atmosféricas (SAPUCCI, 2001), muitas vezes consideradas como medidas de referência para avaliar a atmosfera.

No lançamento das radiossondas, o Ministério da Defesa Comando da Aeronáutica – Proteção ao voo, estabelece os procedimentos operacionais relacionados ao lançamento desses balões meteorológicos, sendo recomendado que as radiossondagens sejam realizadas às 00h, 06h, 12h e 18h UTC (CIRCEA 63-3, 2017). Após a elaboração do planejamento para o lançamento da radiossonda, a EMA deve informar ao Serviço de Tráfego Aéreo (ATS) o local, o horário do lançamento e encerramento da operação de voo, a cor do balão, entre outras características que permitam a perfeita identificação do equipamento (CIRCEA 36-3, 2017).

No processo de radiossondagem, o sensor meteorológico ao medir os parâmetros atmosféricos envia esses dados para bases terrestres, materializadas por antenas fixas na superfície terrestre, na faixa do UHF. A partir dessa antena, o sinal chega até um receptor que pode ser de qualquer modelo de rádio com sensibilidade na faixa de 400 a 450 MHz. Esse receptor é conectado a um computador que a partir de um software apropriado permite converter e armazenar essas informações no formato desejado (OLIVEIRA et al, 2017).

As medições de radiossonda são essencialmente amostras de pontos ao longo de um caminho inclinado pela atmosfera. As amostras têm duas características indesejáveis: (i) devido ao volume limitado de amostras, os dados contêm informações sobre variações atmosféricas nas escalas de tempo ou espaço que são inadequadas para seu uso em meteorologia sinótica (KITCHEN, 1989); (ii) as observações da radiossonda são geralmente atribuídas ao local de lançamento, enquanto as medições na troposfera superior (até aproximadamente 15 km) e na estratosfera (até aproximadamente 50 km) são tipicamente deslocadas várias dezenas de quilômetros horizontalmente a partir desse ponto (KITCHEN, 1989).

Além disso, nas radiossondas, os sensores de temperatura e umidade relativa, bem como o sensor de pressão, estão sujeitos a erros (ELLIOT et al, 1991). A OMM estabeleceu requisitos de precisão e limites de desempenho para medições no ar superior (OMM, 1983). Os requisitos da OMM variam de acordo com o uso pretendido dos dados (por exemplo, meteorologia sinótica ou climatologia) e nível de pressão, mas os requisitos mais estritos para a baixa troposfera são que a pressão seja medida com uma precisão de ± 1 mb (1 mb = 1 hPa), temperatura com precisão de $\pm 0,5$ °C e umidade relativa com precisão de $\pm 5\%$ (ELLIOT et al, 1991).

As medições feitas pelas radiossondas são utilizadas, por exemplo, na determinação da quantidade do vapor d'água, na obtenção da temperatura média, na previsão de ventos, turbulências, formação de gelo em aeronaves, cálculo da probabilidade de trovoadas, nevoeiro, formação de nuvens, trilhas de condensação e na avaliação de deslocamentos e dispersão de nuvens de cinzas vulcânicas e de nuvens radioativas (SAPUCCI, 2001; OLIVEIRA et al, 2016; CIRCEA 63-3, 2017).

2.3.3. Sensoriamento Remoto

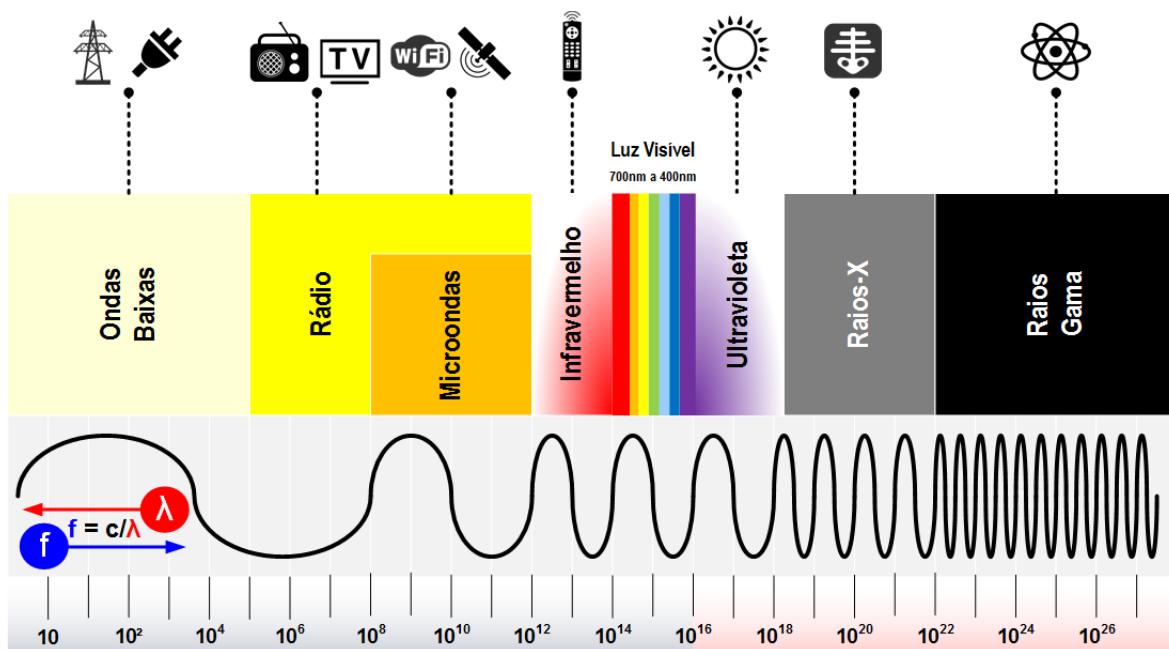
O sensoriamento remoto é um conjunto de técnicas que permite coletar observações sobre os elementos atmosféricos, terrestres e oceânicos da biosfera da Terra de uma forma quase inviável de replicar utilizando métodos baseados no solo. Os diversos sistemas que dão suporte a vida na Terra (como por exemplo, a atmosfera terrestre e a água) são movidos pelo

Sol, e o sensoriamento remoto consegue observar e medir a energia do sol em suas várias manifestações (LAADS DAAC, 2020).

Um importante conceito que sustenta a base do sensoriamento remoto é a radiação eletromagnética (REM), que se propaga em ondas e abrange um longo espectro desde grandes ondas de rádio a raios gama muito curtos, como mostra a Figura 7. O olho humano pode detectar apenas uma pequena porção desse espectro, chamada luz visível, enquanto um rádio detecta uma porção diferente do espectro e uma máquina de raio-x usa outra porção (NASA, 2016a).

O Sol é uma fonte de energia que emite radiação em todo o espectro e sua REM atinge nossa atmosfera constantemente, sendo que cada objeto com suas características bio-físico-químicas particulares interage de uma forma diferente à essa radiação (NASA, 2016a). Essa é a premissa básica da obtenção de medidas da superfície terrestre por sensoriamento remoto.

Figura 7 - Espectro eletromagnético.



Fonte: Labcisco (2010)

A aplicação de sensoriamento remoto é realizada utilizando um instrumento chamado de sensor. A maioria dos instrumentos registram a REM que se desloca à velocidade da luz a partir de uma fonte, diretamente pelo vácuo (no caso da fonte ser o sol), ou

indiretamente por reflexão ou irradiação para o sensor (no caso da fonte ser o próprio sensor). As mudanças na quantidade ou propriedade da REM que chega ao sensor a bordo dos satélites, tornam-se uma valiosa fonte de dados para interpretar importantes propriedades de um fenômeno em estudo (SCHOWENGERDT, 2007). Cada sensor mede a quantidade de energia refletida ou emitida em um comprimento de onda específico da luz ao longo do espectro eletromagnético para obter informações sobre a atmosfera, terra ou oceano (NASA-NOAA, 2020).

Assim, a base da tecnologia de sensoriamento remoto é a detecção das alterações ocorridas na REM, quando esta interage com os componentes na superfície terrestre. A detecção ou identificação de um objeto nas imagens é determinada por quatro diferentes características das medições: (i) resolução espacial, no qual quanto maior a resolução espacial, maior o nível de detalhamento da imagem; (ii) resolução espectral, que indica a quantidade de regiões do espectro eletromagnético nas quais o sensor é capaz de gerar imagens (devido às diferenças na composição físico-química dos materiais que compõem os objetos, estes interagem de maneira diferente com as ondas eletromagnéticas); (iii) resolução temporal, indica o intervalo de tempo que o satélite leva para voltar a cobrir a mesma área de interesse; (iv) e resolução radiométrica, que indica a capacidade do sensor de distinguir pequenas diferenças na energia refletida ou emitida (SCHOWENGERDT, 2007).

Atualmente alguns dos principais satélites em operação voltados para observações da Terra são os satélites da série LANDSAT (<https://landsat.gsfc.nasa.gov/>), os satélites da missão Sentinel (<https://www.sentinel-hub.com/>), Ikonos (<https://www.euspaceimaging.com/about/satellites/IKONOS/>), Rapideye (<https://earth.esa.int/eogateway/missions/rapideye>), Aqua (<https://aqua.nasa.gov/>) e Terra (<https://terra.nasa.gov/>), cada um voltado para diferentes aplicações (SCHOWENGERDT, 2013).

Nas últimas décadas, um tipo de satélite que vem ganhando espaço são os satélites meteorológicos, usados principalmente para monitorar o clima da Terra. Esses satélites podem estar em órbita polar, cobrindo toda a Terra de forma assíncrona ou geoestacionária, pairando sobre o mesmo ponto no equador. Normalmente, a observação é feita por diferentes

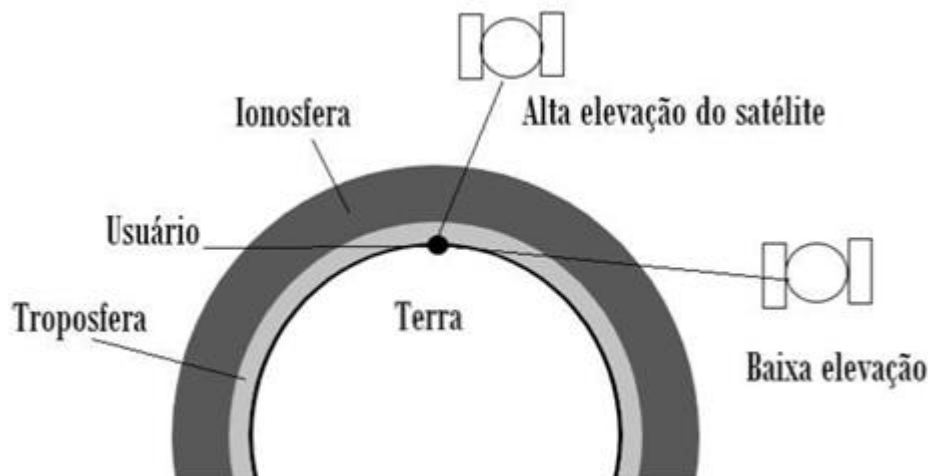
intervalos no espectro eletromagnético, em particular nas regiões do visível e infravermelho (NESDIS, 2008).

2.3.4. Satélite de navegação GNSS

A técnica de posicionamento baseada na utilização de satélites artificiais é uma das mais empregadas atualmente, devido a aspectos práticos e a alta acurácia obtida. O princípio básico do posicionamento geodésico está na determinação da posição e da velocidade de deslocamento de pontos localizados na superfície, por meio de medidas (pseudodistância e fase da onda portadora) transmitidas por uma constelação de satélites distribuídos ao redor da Terra (SEEBER, 2003). As informações enviadas pelos satélites são os sinais em ondas eletromagnéticas que percorrem a atmosfera, ionosfera e atmosfera neutra, até chegar no receptor localizado na superfície (MONICO, 2008).

O sinal GNSS ao percorrer a ionosfera sofre uma refração causada pelos elétrons livres que compõem essa camada e ao passar pela atmosfera neutra é afetado pelos gases que compõe a mesma (MONICO, 2008). A Figura 8 mostra de maneira esquemática e fora de escala o caminho feito pelo sinal entre o satélite e o receptor e a extensão das duas principais camadas para o posicionamento GNSS (GROVES, 2008).

Figura 8 - Propagação do sinal ao longo da ionosfera e da atmosfera neutra (troposfera).



Fonte: Adaptado de Groves (2008)

Dentre os efeitos causados na atmosfera neutra está a refração troposférica, que provoca um atraso que depende do caminho percorrido pela onda e do índice de refração dos gases ao longo do caminho. Assim, a variação no índice de refração da atmosfera neutra pode causar uma diminuição da velocidade de propagação da onda fazendo com que ocorra uma curvatura na trajetória do sinal, esse efeito é chamado de atraso na atmosfera neutra, que na direção zenital é também conhecido como ZTD (*Zenital Total Delay*) (metro) e na direção inclinada (SEEBER, 2003). Essa variação na refratividade é ocasionada pelas componentes seca e úmida, sendo que quando relacionado com a componente hidrostática (seca) é chamado de ZHD (*Zenital Hidrostatic Delay*) e ZWD (*Zenital Wet Delay*), ambos em metro, quando é ocasionado pela componente úmida (SEEBER, 2003; MONICO, 2008; GOUVEIA 2013).

Cerca de 90% do atraso na atmosfera neutra é resultante da componente hidrostática, podendo gerar um atraso com cerca de 2,35 m próximo ao zênite e até dez mais vezes mais próximo ao horizonte, variando conforme a temperatura, latitude e pressão atmosférica. Os outros 10% do atraso total é provocado pela componente úmida que apesar de exercer menor efeito (cerca de 0,30 cm no zênite) é mais difícil de ser modelada devido às variações do vapor d'água. A variação do atraso ocorre conforme a temperatura, latitude e pressão atmosférica (HOFMANN -WELLENHOF, 2008).

Como o principal fator que provoca o atraso no sinal é a variação no índice de refração, este pode ser determinado em função da velocidade da onda eletromagnética no vácuo e a velocidade da mesma onda em um meio qualquer (SPILKER, 1994). Esse índice de refração, por sua vez, pode ser expresso por meio da refratividade do ar (N) que varia conforme a temperatura, pressão parcial do ar hidrostático, da pressão parcial do vapor d'água e da altitude da atmosfera neutra (h) em km (SAPUCCI, 2001), assim, conhecendo-se os parâmetros atmosféricos, é possível calcular o valor do atraso (SEEBER, 2003).

O valor do atraso calculado permite relacionar o índice de refração na direção zenital, porém, o ângulo de elevação entre o satélite e o receptor pode variar conforme a posição do satélite. Assim, determina-se o atraso do sinal na direção zenital e, por meio de uma função de mapeamento, esse atraso é relacionado com a variação no ângulo de elevação

do satélite (MARINI, 1972). Mais detalhes da formulação matemática do atraso na atmosfera neutra são encontrados em Thayer (1974), Spilker (1994) e Seeber (2003).

A chave para o uso do GNSS na avaliação de eventos de precipitação é que a partir da componente úmida (ZWD) do ZTD é possível obter o valor do vapor d'água integrado na atmosfera (IWV). A formulação pode ser encontrada em Sapucci (2001). Esse parâmetro desempenha um importante papel nos processos atmosféricos, pois sua distribuição está associada com a concentração de nuvens e a ocorrência de precipitação (SAPUCCI, 2001).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho é dividido em duas partes: na primeira, é analisada uma série temporal de parâmetros atmosféricos, nas áreas de estudo definidas (Seção 3.1), considerando os diferentes métodos detalhados (Seção 3.2.); na segunda, são identificados, com base na primeira análise, eventos extremos de precipitação a partir dos quais são feitos estudos de caso.

Um ponto importante é que a fonte de dados relacionada com sensoriamento remoto aplicando sensores imageadores é avaliada apenas no estudo de caso, devido ao alto espaço de armazenamento requerido pelas imagens.

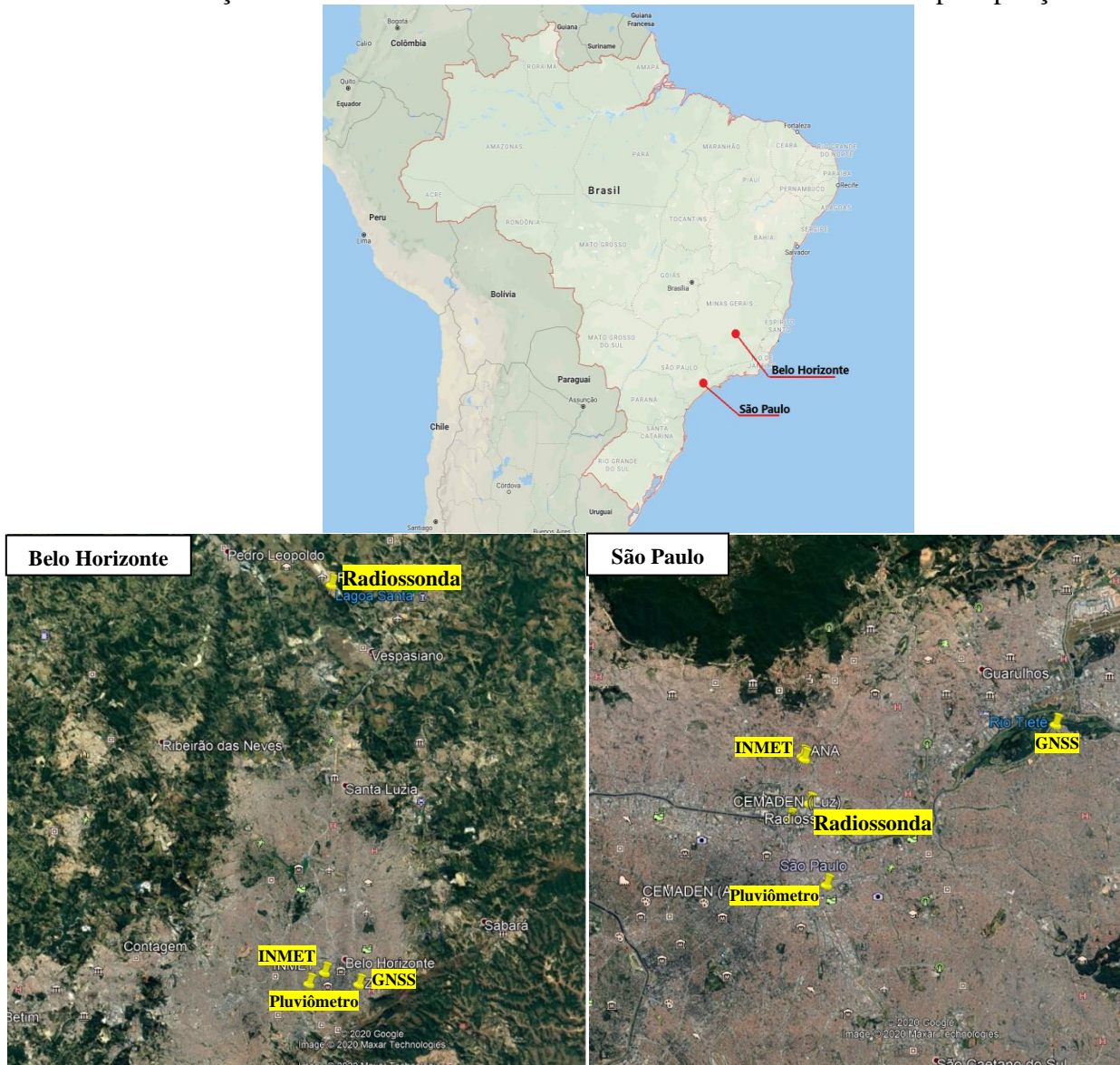
Nesta seção serão detalhados os critérios de escolha das áreas e períodos de estudo (Seção 3.1), bem como as fontes de dados (Seção 3.2) a serem utilizadas em cada uma das técnicas.

3.1. Áreas e período de estudo

As áreas de estudo selecionadas foram as cidades de Belo Horizonte (MG) e São Paulo (SP), indicadas na Figura 9. A escolha desses locais se baseou em dois critérios. O primeiro foi a disponibilidade de dados. Como será melhor detalhado, foram utilizadas diferentes técnicas para obtenção dos dados, sendo de suma importância garantir que o local escolhido apresentasse dados para todas as técnicas empregadas. Dessa forma, em ambas as cidades definidas foi feita a verificação da disponibilidade de dados para todas as fontes.

O segundo critério considerado foi a busca por locais com presença de eventos extremos de precipitação. Em fevereiro de 2020, a cidade de São Paulo registrou o maior volume de chuva em 77 anos, com um acúmulo de 449,0 mm (CLIMATEMPO, 2020a). Em Belo Horizonte - MG, janeiro de 2020 foi considerado o mês mais chuvoso da história da cidade, com um acúmulo de 935,2 mm, o que representa mais da média esperada para o ano todo, cerca de 1602,6 mm (G1, 2020a). Esses dois cenários, somados a disponibilidade dos parâmetros atmosféricos das diferentes técnicas empregadas, permitiram avaliar o comportamento desses dados durante a ocorrência do evento.

Figura 9 - Mapa indicando as duas cidades (São Paulo e Belo Horizonte) definidas para avaliação dos dados de diferentes fontes e dos eventos extremos de precipitação.



Fonte: GOOGLE MAPS (2020)

Dentro de cada cidade definida como área de estudo, a distribuição espacial das técnicas usadas (Seção 3.2.) variam. A Tabela 1 apresenta as coordenadas geodésicas das estações utilizadas em cada fonte e a Tabela 2 apresenta as distâncias entre as estações usadas e suas respectivas altitudes, em ambas as cidades.

Tabela 1 - Coordenadas geodésicas das estações utilizadas em cada uma das fontes nas cidades de Belo Horizonte e São Paulo.

Belo Horizonte			
Estações	Latitude	Longitude	Altitude (m)
Radiossonda	- 23°31'0.44"	- 46°37'0.32"	827 m
INMET	- 23°29'47.02"	- 46°37'11.56"	915,47 m
Pluviômetro	- 23°31'23.81"	- 46°37'34.17"	-
GNSS	- 23°28'57.62"	- 46°30'1.58"	974,85 m
São Paulo			
Estações	Latitude	Longitude	Altitude (m)
Radiossonda	- 19°38'53.25"	- 43°57'34.81"	722 m
INMET	-19°56'3.78"	- 43°57'8.25"	785,16 m
Pluviômetro	- 19°56'34.80"	- 43°57'50.40"	-
GNSS	- 19°56'30.84"	- 43°55'29.63"	744,27 m

Tabela 2 - Distâncias entre as estações utilizadas como fontes de dados e suas respectivas altitudes nas cidades de Belo Horizonte e São Paulo

Belo Horizonte	
Estações	Distância (km)
radiossonda - INMET	31,7 km
radiossonda - pluviômetro	33 km
radiossonda - GNSS	32,7 km
INMET - pluviômetro	1,5 km
INMET - GNSS	2,9 km
pluviômetro - GNSS	4 km
São Paulo	
Estações	Distância (km)

radiossonda - INMET	2,3 km
radiossonda - pluviômetro	1,2 km
radiossonda - GNSS	12,4 km
INMET - pluviômetro	2,9 km
INMET - GNSS	12,3 km
pluviômetro - GNSS	13,6 km

Para geração e avaliação dos resultados, foi considerado um período de um ano de estudo, de 1º março de 2019 até 1º março de 2020, de modo a contemplar as diferentes estações climáticas do Brasil e conseguir avaliar o comportamento das diferentes fontes durante as variações sazonais.

3.2. Fontes de dados aplicadas

Na seção 2.3, são detalhadas as diferentes fontes avaliadas neste trabalho, sendo elas: estações meteorológicas de superfície e de altitude (radiossondas) (seção 3.2.1), pluviômetros, dados de sensoriamento remoto (seção 3.2.3) e GNSS (seção 3.2.4). Nesta seção, são apresentados os procedimentos para obtenção dos dados a partir das diferentes fontes descritas.

3.2.1. Fonte 1: Estações Meteorológicas

Os dados meteorológicos presentes neste trabalho têm como fonte estações meteorológicas de superfície (Seção 2.3.1) mantidas pelo INMET, que disponibilizam, por meio de uma rede de estações, parâmetros atmosféricos. Um mapa da rede de estações pode ser encontrado em: <https://mapas.inmet.gov.br/>. A partir do mapa disponibilizado é possível ter acesso ao banco de dados de todas as estações do INMET.

O INMET permite duas formas de acesso aos dados das estações. A primeira forma é restrita a dados medidos nos últimos 365 dias (para estações automáticas) e nos últimos 90 dias (para estações convencionais) a partir da data de consulta. Para esse acesso, os dados apresentam

uma resolução temporal horária de 00h até 23h UTC para as estações automáticas e de 00h a 12h para as convencionais. A segunda forma de acesso é para dados históricos das estações convencionais, onde são disponibilizadas informações em três resoluções temporais: horária (00h, 12h e 18h), diária e mensal.

Com relação aos dados disponíveis, nas estações automáticas são medidos parâmetros de temperatura (instantânea, máxima e mínima) em °C, umidade (instantânea, máxima e mínima) em %, temperatura do ponto de orvalho (instantânea, máxima e mínima) em °C, pressão (instantânea, máxima e mínima) em hPa, vento (velocidade, direção e rajada) em m/s e °, radiação em kJ m⁻² e chuva em mm. Nas estações convencionais, são medidos temperatura, umidade, pressão, vento (velocidade e direção), nebulosidade, insolação e precipitação (acúmulo diário).

Neste trabalho, foram utilizados os dados históricos das estações convencionais, sendo os parâmetros de interesse: pressão, temperatura, umidade e precipitação acumulada. A partir dos parâmetros obtidos, foi desenvolvido um programa em linguagem Matlab para a leitura dos dados e geração de seus gráficos. Os resultados são apresentados e discutidos no Capítulo 4.

3.2.1.1. Fonte 2: Pluviômetros

Os dados pluviométricos utilizados neste trabalho têm como fontes o CEMADEN e a ANA. Estes possuem plataformas em que os dados dos pluviômetros são fornecidos. O CEMADEN disponibiliza os dados medidos por meio de um mapa interativo (<http://www.cemaden.gov.br/mapainterativo/>), no qual é possível ter acesso a medições feitas por radares, estações pluviométricas, estações hidrológicas, estações Acqua e estações geotécnicas. Para cada estação de interesse, os dados são obtidos inserindo o local da estação e período. Com relação aos dados de pluviometria, estes são medidos pontualmente com uma resolução temporal média de 10 minutos, porém, essa resolução varia dependendo das condições atmosféricas, de modo que durante a ocorrência de chuva, a resolução aumenta.

A ANA disponibiliza os dados através de uma plataforma, chamada HidroWeb (<http://www.snirh.gov.br/hidroweb/mapa>), no qual também é apresentado um mapa com as estações da Rede Hidrometeorológica Nacional. Definida a estação e o período, os dados são fornecidos para estações pluviométricas e fluviométricas. Os dados são disponibilizados com

uma resolução temporal diária do acúmulo de precipitação, onde são fornecidos também os números de dias com chuva em cada mês e o total acumulado mensal. Os dados são enviados por e-mail, em forma de tabela do Excel, como mostra a Figura 10.

Figura 10 - Tabela de dados pluviométricos de Belo Horizonte. Da esquerda pra direita são mostradas nas colunas nome da cidade, código da estação, estado, local, latitude, longitude, hora, e precipitação em mm.

BELO HORIZONTE	310620007A	MG	Pampulha	-43,956	-19,866	2020-03-31 15:10:00.0	0
BELO HORIZONTE	310620007A	MG	Pampulha	-43,956	-19,866	2020-03-31 16:10:00.0	0
BELO HORIZONTE	310620007A	MG	Pampulha	-43,956	-19,866	2020-03-31 17:10:00.0	0
BELO HORIZONTE	310620007A	MG	Pampulha	-43,956	-19,866	2020-03-31 18:10:00.0	0
BELO HORIZONTE	310620007A	MG	Pampulha	-43,956	-19,866	2020-03-31 19:10:00.0	0
BELO HORIZONTE	310620007A	MG	Pampulha	-43,956	-19,866	2020-03-31 20:10:00.0	0
BELO HORIZONTE	310620007A	MG	Pampulha	-43,956	-19,866	2020-03-31 21:10:00.0	0
BELO HORIZONTE	310620007A	MG	Pampulha	-43,956	-19,866	2020-03-31 22:10:00.0	0
BELO HORIZONTE	310620007A	MG	Pampulha	-43,956	-19,866	2020-03-31 23:10:00.0	0
BELO HORIZONTE	310620016A	MG	Av. Silva Lobo	-43,964	-19,943	2020-03-01 00:10:00.0	0
BELO HORIZONTE	310620016A	MG	Av. Silva Lobo	-43,964	-19,943	2020-03-01 01:20:00.0	0
BELO HORIZONTE	310620016A	MG	Av. Silva Lobo	-43,964	-19,943	2020-03-01 02:10:00.0	0
BELO HORIZONTE	310620016A	MG	Av. Silva Lobo	-43,964	-19,943	2020-03-01 03:10:00.0	0
BELO HORIZONTE	310620016A	MG	Av. Silva Lobo	-43,964	-19,943	2020-03-01 04:10:00.0	0
BELO HORIZONTE	310620016A	MG	Av. Silva Lobo	-43,964	-19,943	2020-03-01 05:10:00.0	0
BELO HORIZONTE	310620016A	MG	Av. Silva Lobo	-43,964	-19,943	2020-03-01 06:10:00.0	0
BELO HORIZONTE	310620016A	MG	Av. Silva Lobo	-43,964	-19,943	2020-03-01 07:10:00.0	0
BELO HORIZONTE	310620016A	MG	Av. Silva Lobo	-43,964	-19,943	2020-03-01 08:10:00.0	0
BELO HORIZONTE	310620016A	MG	Av. Silva Lobo	-43,964	-19,943	2020-03-01 09:10:00.0	0
BELO HORIZONTE	310620016A	MG	Av. Silva Lobo	-43,964	-19,943	2020-03-01 10:10:00.0	0
BELO HORIZONTE	310620016A	MG	Av. Silva Lobo	-43,964	-19,943	2020-03-01 11:10:00.0	0
BELO HORIZONTE	310620016A	MG	Av. Silva Lobo	-43,964	-19,943	2020-03-01 12:10:00.0	0
BELO HORIZONTE	310620016A	MG	Av. Silva Lobo	-43,964	-19,943	2020-03-01 12:40:00.0	0,2
BELO HORIZONTE	310620016A	MG	Av. Silva Lobo	-43,964	-19,943	2020-03-01 13:10:00.0	0
BELO HORIZONTE	310620016A	MG	Av. Silva Lobo	-43,964	-19,943	2020-03-01 14:10:00.0	0

Fonte: Autores (2020)

A cidade de Belo Horizonte possui duas estações, sendo que a estação Avenida Silva Lobo (310620016A) foi selecionada por sua maior proximidade com a estação meteorológica do INMET. A cidade de São Paulo também possui duas estações, sendo a estação Luz (355030812A) escolhida, considerando o mesmo critério de seleção aplicado em Belo Horizonte.

3.2.2. Fonte 3: Radiossondas

Em um banco de dados online desenvolvido pela Universidade de Wyoming (ATMOSPHERIC SOUNDINGS, 2020), parâmetros atmosféricos provenientes das radiossondas são fornecidos para estações distribuídas em todo o mundo, assim como sobre o território brasileiro.

A maioria dos lançamentos ocorrem a cada 12 horas (00-12 UTC – Tempo Universal Coordenado), mas há casos de até quatro lançamentos diários (00-06-12-18 UTC), sendo que a altitude máxima alcançada pelas radiossondas é em torno de 25 km, somando aproximadamente 25 níveis de pressão que variam de acordo com a estação (ATMOSPHERIC SOUNDINGS, 2020).

Os parâmetros meteorológicos (pressão (PRES), altitude (HGHT), temperatura (TEMP), temperatura do ponto de orvalho (DWPT), umidade relativa (RELH), massa de ar seco (MIXR), direção do vento (DRCT), velocidade do vento (SKNT), temperatura potencial (THTA), temperatura potencial equivalente (THTE) e temperatura potencial virtual (THTV)) são medidos pelas radiossondas conforme o incremento de altitude. No caso das estações de radiossondas, ambas as estações escolhidas na cidade de São Paulo e de Belo Horizonte são destacadas na Figura 11 em amarelo.

Figura 11 - Distribuição das estações de radiossonda na América do Sul, sendo que as estações utilizadas para avaliação do método em estudos de eventos de precipitação, localizadas nas cidades de São Paulo e Belo Horizonte, aparecem destacadas em amarelo.



Fonte: Atmospheric Soundings, 2020

A partir da escolha dos locais e período (Seção 3.1), foi gerado um *script* em linguagem Matlab que permite a leitura dos dados provenientes das radiossondas em cada horário de medição (00h e 12h UTC), sendo que os dados de interesse aqui são pressão, temperatura e umidade. No *script*, cada valor é lido e armazenado em arquivos de texto (.txt) referentes ao dia e horário de medição, sendo que para um único dia o instrumento realiza uma série de medições de acordo com o nível de altitude, de modo que para geração de uma série anual são considerados apenas os valores medidos em superfície.

Esses dados de superfície são armazenados em arquivos do Excel, por meio dos quais são gerados os gráficos temporais para cada parâmetro de interesse. Além das leituras pontuais, o *script* também calcula a média diária dos valores medidos que foram sobrepostos na série temporal sobre os dados horários por meio de uma função de interpolação cúbica que utiliza um polinômio de grau superior ao linear, permitindo maior grau de liberdade na construção da interpolação. Os resultados gerados são apresentados no Capítulo 4 de análises dos resultados.

3.2.3. Fonte 4: Dados de Sensoriamento Remoto

Os produtos do sensoriamento remoto podem ser imagens ou não, que apresentam diferentes resoluções espaciais e temporais de acordo com o sensor. Neste trabalho, foram utilizados três diferentes satélites: Terra e Aqua (considerados um único conjunto, pois ambos possuem o mesmo sensor MODIS), GOES (*Geostationary Operational Environmental Satellite*) e o GPM (*Global Precipitation Measurements*).

Os produtos do MODIS relacionados com a atmosfera são fornecidos gratuitamente por meio do LAADS-DAAC (*Level-1 and Atmosphere Archive and Distribution System - Distributed Active Archive Center*) (<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/search/>), um dos 12 centros de dados da NASA, responsáveis pela distribuição de dados, e que tem como enfoque dados atmosféricos (*Purpose and Mission - LAADS DAAC, 2020*). O sensor apresenta uma extensão espacial global, com imagens em dimensões geográficas de aproximadamente 1200 x 1200 km. As configurações espaciais e espectrais do sensor MODIS são apresentadas na Tabela 3. Para o caso específico do vapor d'água e das nuvens, as principais bandas utilizadas são 26, 27 e 28, localizadas no intervalo espectral de 1360 - 1390 nm, 6535 - 6895 nm e 7175 - 7475 nm, respectivamente (NASA - MODIS, 2020). Um dos produtos fornecido pelo MODIS é a

água precipitável total, que consiste em quantidades de vapor d'água ao longo de uma coluna vertical.

Tabela 3 - Configurações do sensor MODIS a bordo dos satélites Aqua e Terra.

Banda	Intervalo espectral (nm)	Resolução espacial (m)
1	620–670	250
2	841–876	250
3	459–479	500
4	545–565	500
5	1230–1250	500
6	1628–1652	500
7	2105–2155	500
8	405–420	1000
9	438–448	500
10	483–493	1000
11	526–536	1000
12	546–556	1000
13	662–672	1000
14	673–683	1000
15	743–753	1000
16	862–877	1000
17	890–920	1000
18	931–941	1000
19	915–965	1000
20	3.660–3.840	1000
21	3.929–3.989	1000
22	3.929–3.989	1000
23	4.020–4.080	1000
24	4.433–4.498	1000
25	4.482–4.549	1000
26	1.360–1.390	1000
27	6.535–6.895	1000
28	7.175–7.475	1000
29	8.400–8.700	1000
30	9.580–9.880	1000
31	10.780–11.280	1000
32	11.770–12.270	1000
33	13.185–13.485	1000
34	13.485–13.785	1000

Fonte: EOS (2020)

Existem dois arquivos de produtos de dados *MODIS Water Vapor*: MOD05_L2, contendo dados coletados da plataforma Terra; e MYD05_L2, contendo dados coletados da

plataforma Aqua. O produto *Water Vapor* (ou *Total Precipitable Water*) é gerado a partir de algoritmos que combinam as bandas NIR (infravermelho próximo) com uma resolução espacial de 1 x 1 km e IR (infravermelho termal) com resolução espacial de 5 x 5 km. O vapor de água atmosférico deve ser determinado com uma precisão de 5 a 10%.

O segundo conjunto de dados provêm do satélite meteorológico GOES-16, que permite a visualização da Terra em 16 diferentes bandas espectrais. Esses diferentes canais são utilizados por modelos e ferramentas para indicar vários elementos na superfície da Terra ou em sua atmosfera, como árvores, água, nuvens ou fumaças. A Tabela 4 indica as configurações do GOES (NASA-NOAA, 2020a).

Tabela 4 - Configurações do sensor ABI (Advanced Baseline Imager) a bordo do satélite GOES-16.

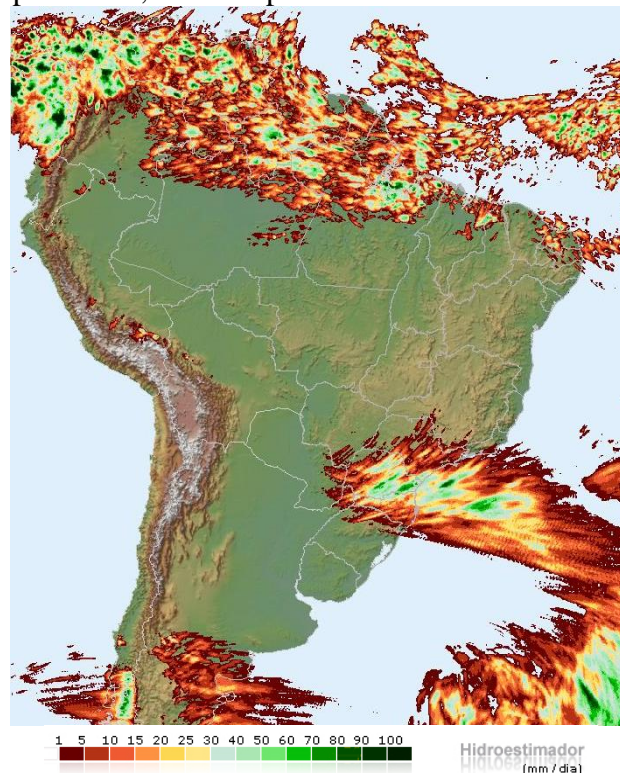
Bandas	Comprimento de onda central (nm)	Resolução Espacial (m)
1	470	500
2	640	500
3	860	1000
4	1380	1000
5	1610	1000
6	2250	2000
7	3900	2000
8	6180	2000
9	6950	2000
10	7340	2000
11	8500	2000
12	9610	2000
13	10350	2000
14	11200	2000
15	12300	2000
16	13300	2000

Fonte: NASA-NOAA (2020a)

Os dados foram obtidos por meio da DSA (Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais/INPE). Os produtos da DSA são gerados a partir de imagens de satélites de órbita geoestacionária e polar (GOES, METEOSAT, série NOAA, TERRA e AQUA). Adicionalmente, a DSA adapta e desenvolve ferramentas, algoritmos e códigos para geração de diferentes produtos. Dentre esses produtos está a estimativa de precipitação, implementado no CPTEC (Modelo Hidroestimador) utilizando dados dos satélites GOES e METEOSAT obtidos

a cada trinta minutos. Além desses mapas de chuva a cada trinta minutos, campos de precipitação acumulada diária e mensal também são gerados por meio do GOES-16 DSA website, http://sigma.cptec.inpe.br/prec_sat/. Assim, ao selecionar a data de interesse é disponibilizado um mapa de precipitação sobre toda a América do Sul, como é mostrado no exemplo na Figura 12.

Figura 12 - Mapa de precipitação acumulada para a América do Sul no dia 10/06/2020, disponibilizada pelo DSA, obtida a partir de dados do satélite GOES-16.



Fonte: DSA (2020)

Por fim, foram utilizados dados de precipitação obtidos a partir do IMERG (*Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM*), onde são usados dados provenientes da constelação de satélites GPM (NASA-GPM, 2020). Trata-se de um único sistema de código integrado para tempo-real e pós-processado que gera como produto final dados de precipitação com uma resolução temporal de 30 minutos ou mensal (apenas para o caso pós-processado), em um grid global de resolução espacial de 0.1°. Mais informações acerca do algoritmo e a geração do produto são detalhadas em Huffman (2017).

Os dados de precipitação do IMERG são disponibilizados por meio da plataforma Giovanni (<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>), uma interface on-line para visualização e análise de dados de satélite (mantida pelo GES DISC DAAC), onde é possível definir a área de interesse, o período de dados desejado e os tipos de dados, sendo estes fornecidos no formato csv ou em gráficos.

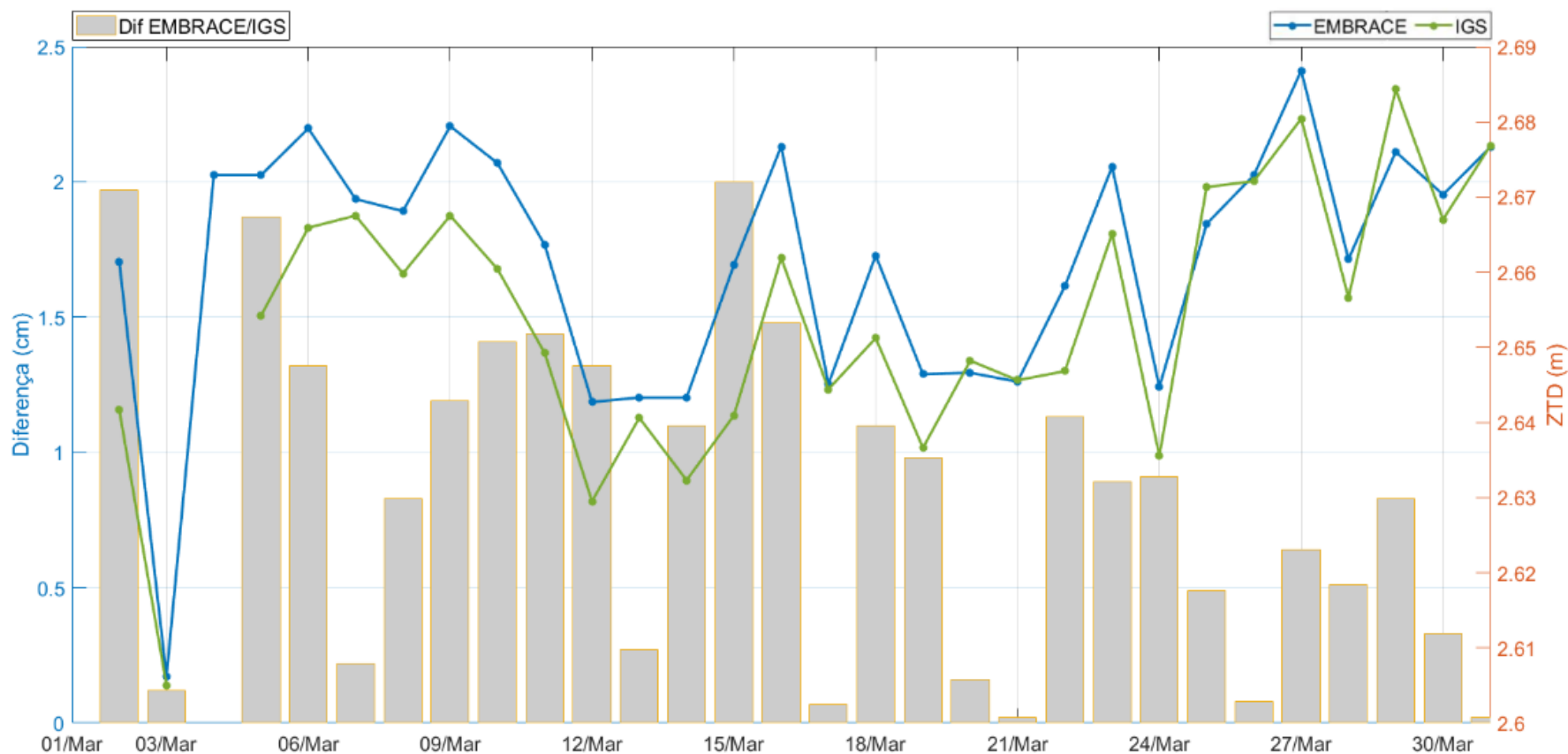
3.2.4. Fonte 5: Satélite de Navegação GNSS

O INPE criou em 2007 o centro de Estudo e Monitoramento Brasileiro de Clima Espacial (EMBRACE), que tem como objetivo o desenvolvimento de produtos de clima espacial (EMBRACE/INPE, 2020). Dentre os produtos fornecidos pelo EMBRACE está o ZTD, disponibilizados com uma resolução temporal de 5 minutos para as estações da RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo). Além do ZTD, são também gerados como produtos valores de IWV e ZHD. Porém, há uma baixa no número de estações que disponibilizam dados de IWV e ZHD.

De modo a garantir a validade dos dados a serem utilizados neste trabalho, previamente, foi realizada uma validação do ZTD/EMBRACE usando como referência o ZTD fornecido pelo IGS (*International GNSS Service*), que possui uma acurácia de 4 mm (IGS, 2020). Para tanto, foi escolhida uma estação em São Luís (MA) durante o período de março/2019, a escolha foi feita com base na disponibilidade dos dados do IGS e do EMBRACE, já que a resolução espacial das estações IGS no Brasil é baixa (IGS-NETWORK, 2020). Dessa forma, foi gerada uma série temporal do atraso comparando os dois produtos, onde é feita a subtração entre eles, tomando o IGS como referência. Os resultados são mostrados na Figura 13.

A comparação aqui apresentada entre o EMBRACE e o IGS não são suficientes para garantir a qualidade do EMBRACE, mas apenas para justificar o uso dessa fonte de dados no trabalho. Para conclusões mais adequadas deveriam ser feitas avaliações robustas considerando um número maior de estações, além de um maior período de dados.

Figura 13 - Eixo direito - ZTD em São Luiz, obtido pelo EMBRACE (azul) e pelo IGS (verde) durante o mês de março de 2019. Eixo esquerdo – discrepância em cm, entre o ZTD obtido pelo EMBRACE e pelo IGS.



Com base nos resultados apresentados, nota-se uma significativa aproximação entre os dois produtos, com uma diferença máxima entre eles de 2 cm, e com uma média de 0,8 cm, como é mostrado na Figura 13. O que reflete a discrepância centimétrica dos dados disponibilizados pelo EMBRACE, considerando a precisão do IGS de 4 mm. Portanto, após validar o ZTD/EMBRACE foi verificada sua utilização neste trabalho, visto que o número de estações é maior que do IGS.

Como foi citado na Seção 2.3.4, a componente úmida do atraso (ZWD) permite determinar a quantidade de vapor d'água na atmosfera integrado em uma coluna vertical (IWV). No entanto, nos produtos finais disponibilizados pelo EMBRACE é visto apenas o atraso final (ZTD), resultado da soma do ZHD com o ZWD. Assim, o ZWD pode ser derivado após subtrair do atraso o ZHD, que por sua vez pode ser calculado a partir da pressão atmosférica superficial (TUNALLI, 2018). Em trabalhos como HEISE et al (2009), SAPUCCI (2001) e DEBLONDE (2004), o ZWD é obtido por meio do cálculo do ZHD e posterior subtração desse valor do ZTD.

Como apresentado na Seção 2.3.2., as radiossondas apresentam uma maior qualidade quanto as medidas dos parâmetros atmosféricos, mas por outro lado, apresentam uma maior ausência de dados (como pode ser observado no gráfico mostrado no Apêndice A). Por essa razão, a partir da formulação apresentada por DAVIS et al (1985), o ZHD é calculado utilizando como parâmetros de entrada a pressão atmosférica medida pelas radiossondas e a pressão fornecida pelo INMET, e o valor obtido, subtraído do ZTD proveniente do EMBRACE. Os resultados obtidos são apresentados no Capítulo 4.

A partir do cálculo da componente úmida, sua relação com o IWV pode ser definida em função da temperatura média da troposfera (T_m), sendo essa relação expressa pela seguinte equação (SAPUCCI, 2001):

$$IWV = ZWD \times \frac{10^6}{R_w [k'_2 + \frac{k_3}{T_m}]}, \quad (1)$$

sendo $R_w = 461,5181 \text{ J Kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ a constante específica para o vapor d'água, $k'_2 = 22,10 \text{ K hPa}^{-1}$ e $k_3 = 373900 \text{ K}^2 \text{ hPa}^{-1}$ as constantes da refratividade atmosférica (BEVIS et al., 1994). Os valores de T_m neste estudo foram utilizados com base na fórmula apresentada por Sapucci (2001), uma modelagem adequada que relaciona os valores de T_m com dados

obtidos na superfície foi desenvolvida empregando-se 90.000 radiossondas (SAPUCCI, 2001; SAPUCCI et al., 2004).

Um importante ponto a ser destacado é que a resolução temporal do GNSS é de 5 minutos, enquanto os dados de radiossonda são disponíveis as 00Z e 12Z, e do INMET as 00h, 12h e 18h UTC. Assim, de modo a permitir a subtração do ZHD do ZTD, foi aplicada uma interpolação cúbica nos parâmetros atmosféricos (LO & EL-Mowafy, 2011). Estudos futuros poderiam comparar a eficiência de diferentes métodos de interpolação, de modo a obter a modelagem mais adequada.

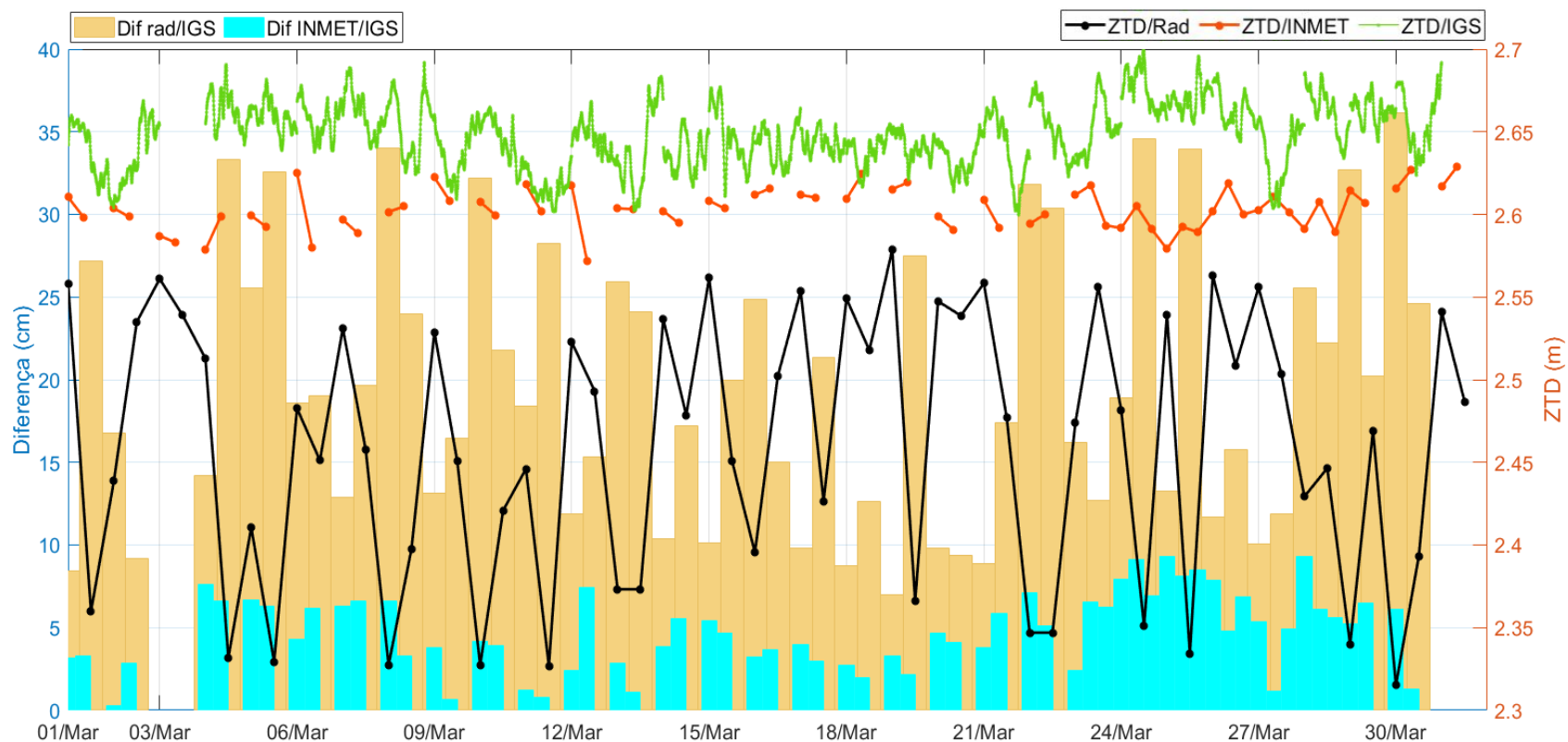
3.3. Validação da radiossonda e das estações meteorológicas (INMET)

No Capítulo 4 (Resultados e Discussões), são feitas comparações entre os parâmetros atmosféricos (pressão, temperatura e umidade) medidas pelas estações meteorológicas de superfície (INMET) e de altitude (radiossondas). Com o objetivo de validar estas duas fontes, foi feito um experimento onde ZTD foi calculado aplicando o modelo empírico de Saastamoinen (SAASTAMOINEN, 1972; SEEGER, 2003) usando o INMET e a radiossonda como fonte dos dados de entrada.

A mesma estação utilizada na validação do EMBRACE (Seção 3.2.4) foi utilizada, e o atraso calculado foi comparado com ZTD fornecido pelo IGS, cuja precisão de 4 mm é conhecida. O resultado do experimento é mostrado na Figura 14.

As radiossondas, como apresentado na Seção (2.3.2.), fornecem medições *in loco* de parâmetros da atmosfera (ELLIOT, 1991), enquanto os dados fornecidos pelo INMET envolvem estações meteorológicas e outras fontes incluindo também estações de radiossondagens (INMET, 2020a). Assim, o que se observa na Figura 14 é uma discrepância maior para o ZTD/Rad, com uma diferença média de 15 cm (685%) maior do que a observada para o ZTD/INMET.

Figura 14 - Eixo direito - ZTD em São Luiz, calculado por dados de radiossonda (ZTD/Rad) e dados do INMET (ZTD/INMET), do ZTD obtido pelo IGS (ZTD/IGS), no período de março/2019. Eixo esquerdo - diferença entre o ZTD/Rad e ZTD/IGS (amarelo) e entre o ZTD/INMET e ZTD/IGS (azul).



Além disso, o modelo aplicado para o cálculo do ZTD trata-se de um modelo empírico (SEEBER, 2003), portanto, variações eram esperadas. Apesar disso, as diferenças máximas entre o ZTD/IGS e o atraso calculado chegam a 35 cm, com uma média de 19,5 cm (desvio padrão de 8,4 cm) para ZTD/Rad, e 4,8 cm (desvio padrão de 2,3 cm) para ZTD/INMET.

Uma possível razão para as discrepâncias observadas entre as duas fontes está na diferença de altitude entre elas, que foi de 34 m. Essa diferença tem um impacto direto na diferença de pressão medida, o que por sua vez afeta o resultado final do atraso.

O experimento aqui realizado apresenta resultados iniciais, que apesar de não ser suficiente para trazer conclusões definitivas acerca da validação de cada fonte, permite concluir que devido a diferença de altitude entre elas, as duas fontes não podem ser comparadas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, são apresentadas as análises dos resultados obtidos a partir da aplicação de dados de diferentes fontes, sendo elas: estações meteorológicas (Seção 3.2.1.), pluviômetros (Seção 3.2.1.1), radiossondas (Seção 3.2.2.), satélites meteorológicos (Seção 3.2.3.) e satélites de navegação GNSS (Seção 3.2.4.),

Na Seção 4.1., os resultados da metodologia descrita na Seção 3.3., referentes a validação das radiossondas e INMET, são apresentados. Conforme explicado no início do Capítulo 3, as análises das diferentes técnicas foram feitas em duas etapas. Na Seção 4.2. são mostrados os resultados da primeira etapa e, na Seção 4.3., os resultados da segunda etapa, referente ao estudo de caso.

4.1. ZWD derivado de dados EMBRACE, radiossonda e INMET

De acordo com a metodologia apresentada na Seção 3.3., foram calculados valores para o ZWD a partir do ZTD/EMBRACE e dos parâmetros meteorológicos medidos pelas radiossondas e fornecidas pelo INMET. Os resultados são mostrados nas Figura 15 e Figura 16 para as estações de São Paulo e Belo Horizonte, respectivamente.

Nota-se que em ambos os gráficos (Figura 15 e Figura 16), o ZWD possui o mesmo comportamento para as radiossondas e para o INMET, sendo observado um viés entre as duas fontes de 2,2 cm em Belo Horizonte e 3,9 cm em São Paulo. Em ambos os gráficos, também se nota um intervalo sem valores entre novembro e dezembro, que é proveniente de uma falha de dados do ZTD/EMBRACE. Uma possibilidade para essa magnitude do viés do ZWD/INMET em relação ZWD/Rad é a diferença de altura entre as estações (Tabela 2), que afeta diretamente a pressão medida e consequentemente o valor do ZHD calculado.

Figura 15 - Atraso úmido zenital (ZWD) em São Paulo, obtido pela subtração do ZHD, calculado por dados de radiossonda (laranja) e dados do INMET (azul), do ZTD obtido pelo ZTD/EMBRACE, no período de março/2019 - março/2020.

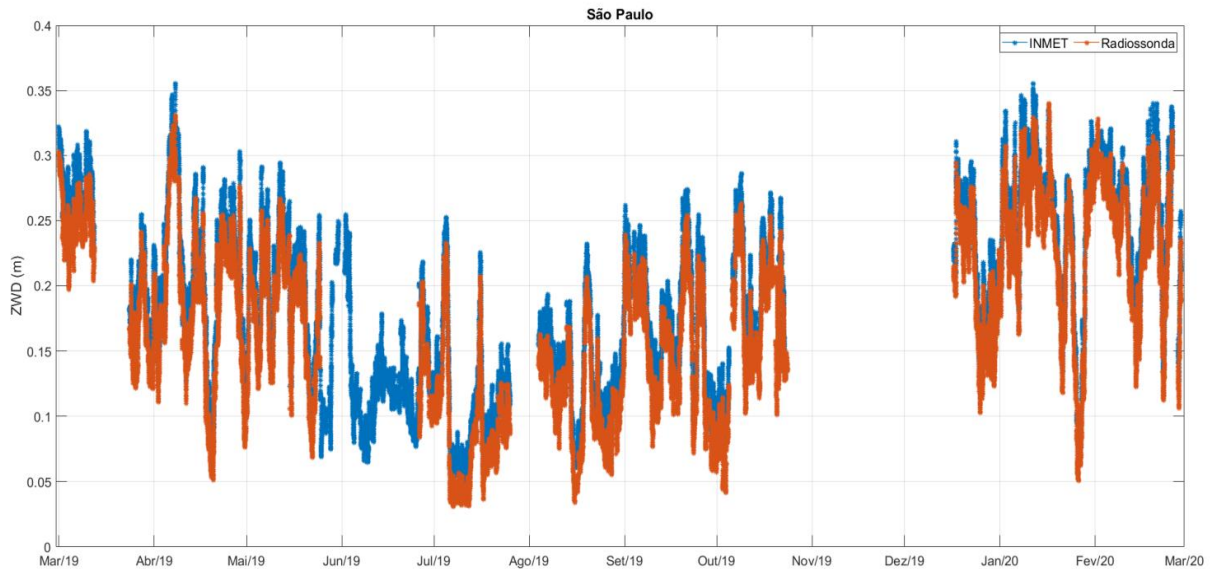
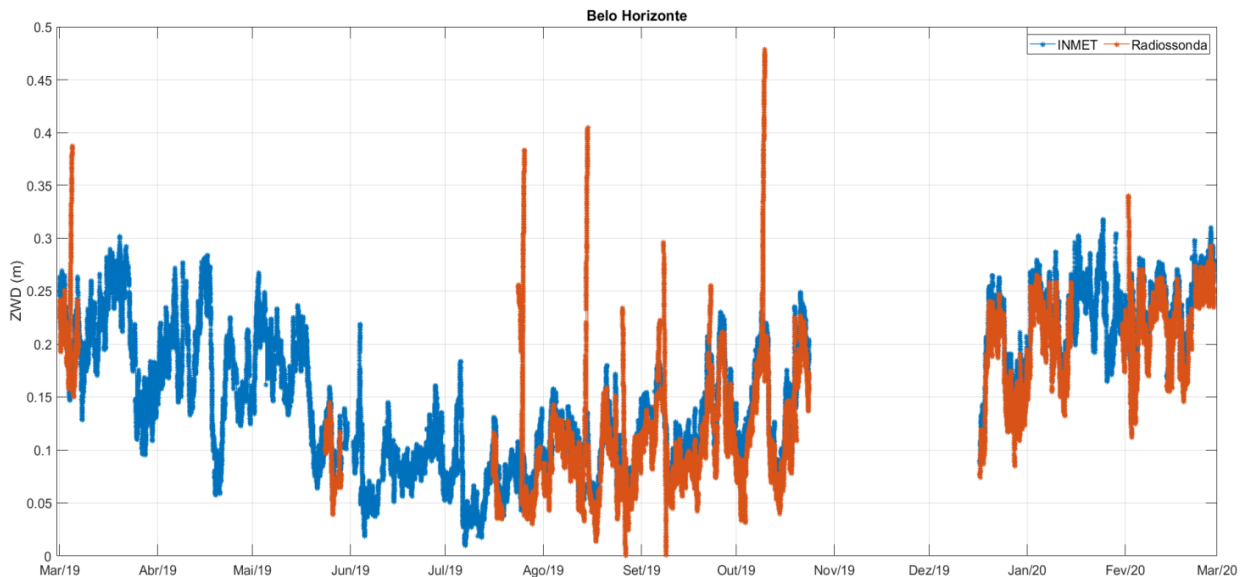


Figura 16 - Atraso úmido zenital (ZWD) em Belo Horizonte, obtido pela subtração do ZHD, calculado por dados de radiossonda (laranja) e dados do INMET (azul), do ZTD obtido pelo ZTD/EMBRACE.



Apesar disso, comparando os dois métodos de cálculo do ZHD (radiossonda e INMET), nota-se pela Figura 15 e Figura 16 que a resolução temporal do INMET é significativamente melhor, principalmente para a estação em Belo Horizonte, como pode ser também observado na Figura e Figura mostradas no Apêndice A. Logo, considerando a proximidade das fontes, a

estratégia adotada foi a combinação das duas fontes (radiossonda + INMET), para o cálculo do IWV, utilizando o ZWD/INMET nos períodos faltantes do ZWD/radiossonda.

No entanto, apesar de ser considerada a combinação de ambas, de modo a se obter uma série temporal dos dados mais completa, em aplicações futuras, a combinação das duas fontes pode ser feita mediante a correção do desnível entre elas, justamente devido ao viés observado (SAPUCCI, 2001).

Nas próximas seções, o IWV calculado como uma combinação das radiossondas e INMET é apresentado como ZTD/GNSS - EMBRACE.

4.2. Avaliação temporal das diferentes fontes

Nas Figura 17 e Figura 18 são apresentados gráficos que descrevem o comportamento da atmosfera na cidade de Belo Horizonte e São Paulo, respectivamente, durante um ano (março/2019 - março/2020).

A análise dos resultados nesta seção se divide em duas partes. Na primeira, é feita uma análise geral comparando as diferentes fontes utilizadas na determinação de cada parâmetro, suas diferenças e correlações, para as duas cidades. Na segunda etapa, é analisado como cada fonte descreveu o comportamento da atmosfera durante a ocorrência de precipitações, tomando como referência os dados de precipitação (gráfico 4 da Figura 17 e Figura 18).

Como o objetivo deste estudo é avaliar diferentes fontes, para os parâmetros pressão, temperatura e umidade foram consideradas nas análises as radiossondas e o INMET. No entanto, em estudos futuros, apenas uma fonte pode ser considerada, visto que ambas apresentam uma distância significativa, uma da outra, o que pode inviabilizar a utilização conjunta de ambas.

Figura 17 - Parâmetros atmosféricos na cidade de Belo Horizonte entre março/2019 e março/2020 obtidos de diferentes fontes: pressão, temperatura e umidade (estações meteorológicas - INMET e radiossondas); precipitação (estação meteorológica - INMET, pluviômetros - ANA e CEMADEN); IWV (ZTD/GNSS - EMBRACE).

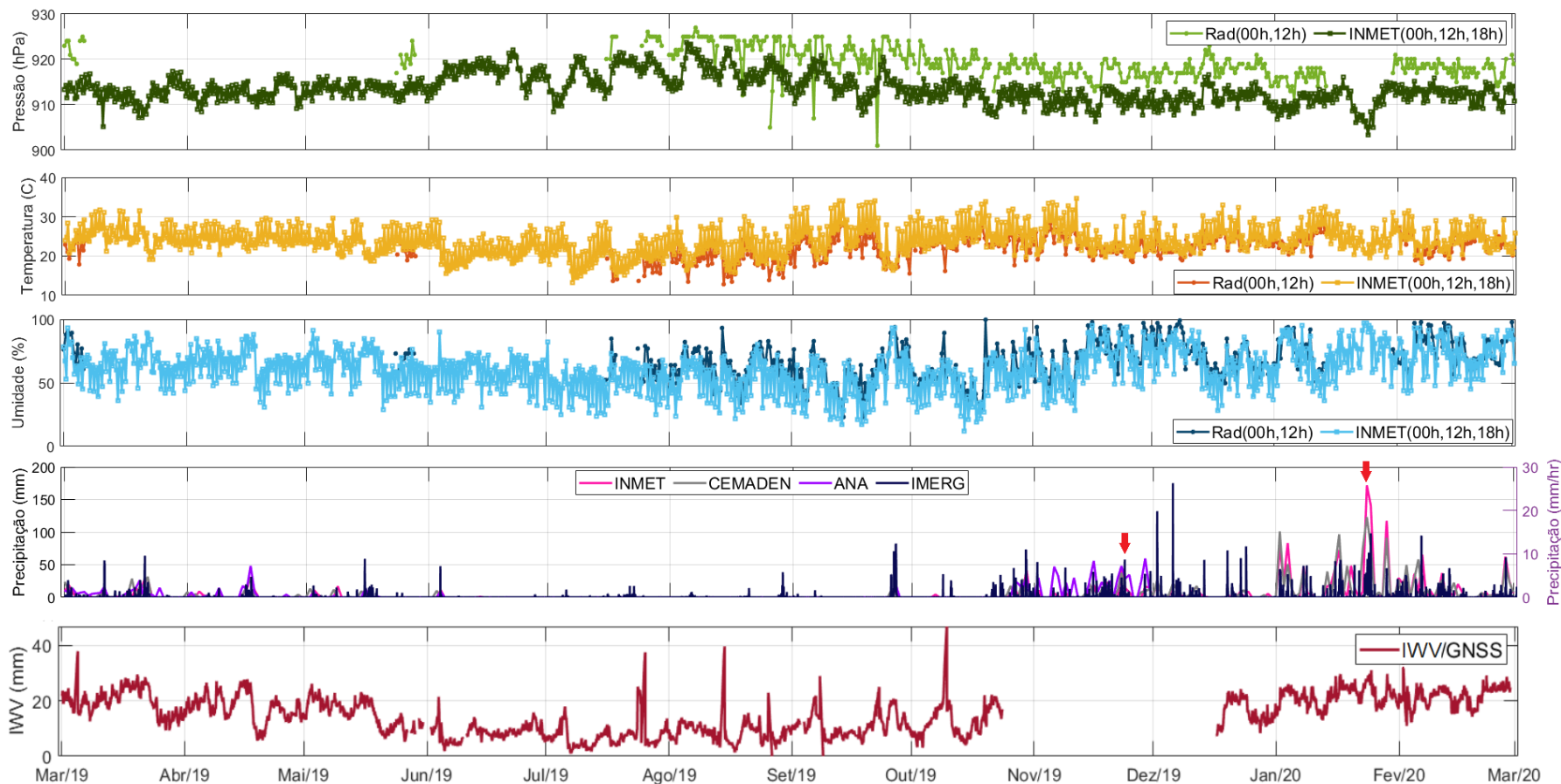
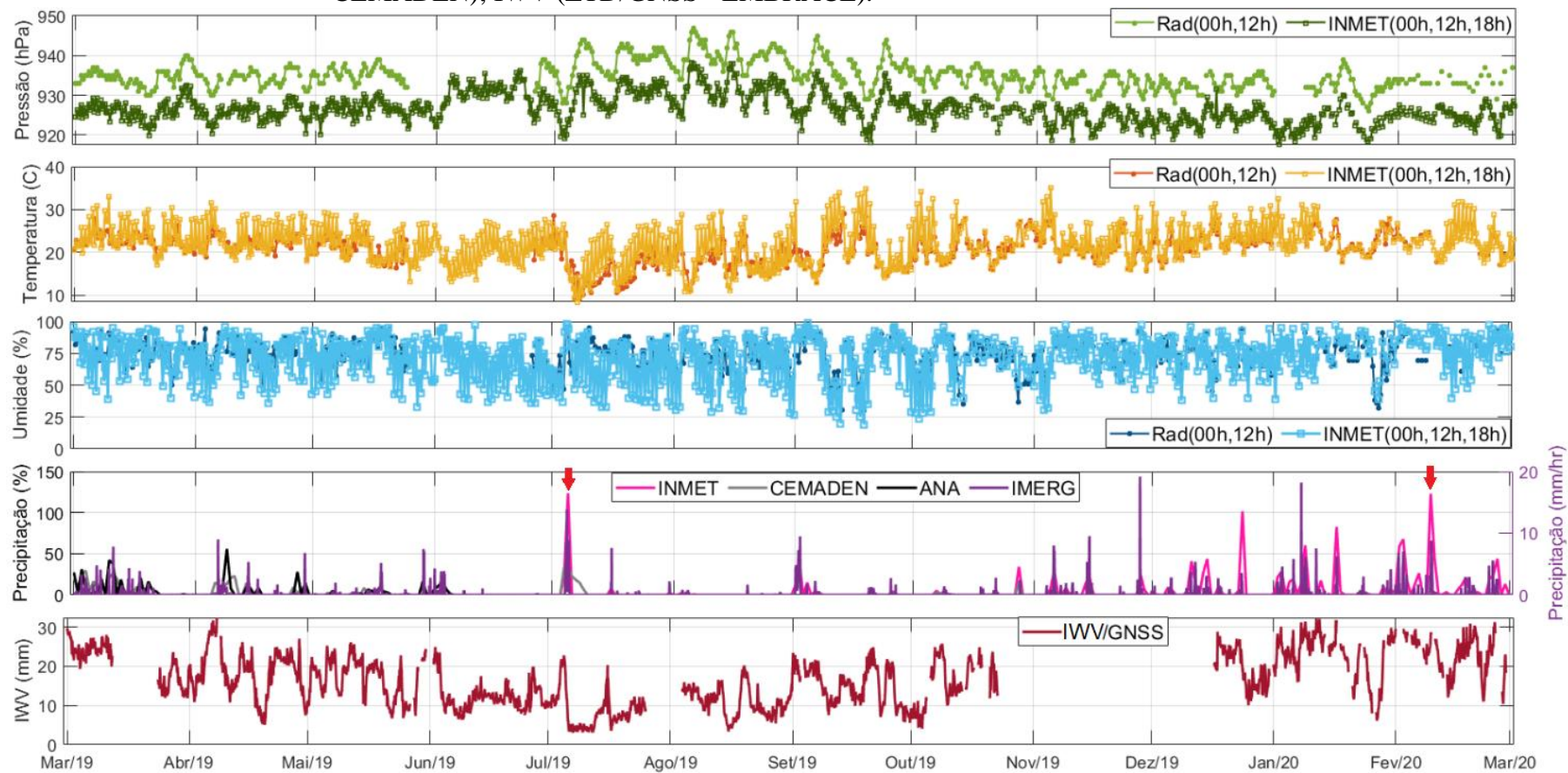


Figura 18 - Parâmetros atmosféricos da cidade de São Paulo entre março/2019 e março/2020 obtidos de diferentes fontes: pressão, temperatura e umidade (estações meteorológicas - INMET e radiossondas); precipitação (estação meteorológica - INMET, pluviômetros - ANA e CEMADEN); IWV (ZTD/GNSS - EMBRACE).



Avaliando inicialmente os parâmetros de pressão, temperatura e umidade que possuem como fontes as radiossondas e o INMET, nota-se uma maior divergência entre ambas as fontes na pressão, com um viés maior de 9,22 hPa em Belo Horizonte (Figura 17) comparado com o viés de 7,45 hPa em São Paulo (Figura 18), o que pode ser justificado pela maior diferença de altitude entre as duas estações em Belo Horizonte (88,47 m) do que em São Paulo (63,16 m). Apesar do viés, o comportamento entre as duas fontes é semelhante em São Paulo, com um desvio padrão de 3,57 hPa na radiossonda e de 3,71 hPa no INMET.

Com relação às componentes umidade e temperatura, observa-se uma maior variação nos dados do INMET, principalmente na umidade, em que os valores mínimos atingem 1% e com as radiossondas atingem 30% em São Paulo.

Outro ponto a ser observado nos gráficos (Figura 17 e Figura 18), é a disponibilidade dos dados. Nota-se entre os meses de março e julho em Belo Horizonte significativas falhas nos dados de radiossonda, enquanto se tem uma continuidade maior nos dados do INMET. Esse comportamento já era esperado considerando que as radiossondas apresentam uma série de regulamentos sobre as condições permitidas para voo (Seção 2.3.2), o que torna o instrumento sensível a determinados eventos climatológicos, como chuvas intensas, e que pode levar a uma maior indisponibilidade dos dados.

Apesar dessas diferenças, a correlação entre as duas fontes (INMET e radiossonda) é de 0,971 para a pressão, 0,863 para temperatura e 0,716 para a umidade, com respectivos valores de coeficiente angular de 1,02, 0,831, 0,646 em São Paulo (Figura 18). Na estação em Belo Horizonte (Figura 17), a correlação entre as fontes foi de 0,807 (pressão), 0,878 (temperatura) e 0,858 (umidade), indicando uma proximidade entre as fontes. Maiores correlações em São Paulo eram esperadas devido a menor diferença de altura e menor distância entre as estações (Tabela 2).

Com relação a precipitação (gráfico 4, nas Figura 17 e Figura 18), foram consideradas as fontes: INMET, CEMADEN, ANA e IMERG. Com respeito à disponibilidade de dados, um ponto a se destacar é que os dados fornecidos pela ANA somente vão até o mês de junho em São Paulo e até dezembro em Belo Horizonte, porém ao calcular a correlação entre o ANA e o INMET para o período disponível, o valor resulta em 1, além disso a posição das duas fontes é a mesma, o que indica que apesar de serem dois órgãos diferentes, a fonte de dados de

precipitação coincide. Em determinados momentos, como em meados de janeiro e fevereiro, são observadas algumas diferenças nos picos de precipitação entre as diferentes fontes, essa diferença ocorre devido às distâncias entre as fontes, como mostrado na Tabela 2, fazendo com que a quantidade de chuva registrada por elas sejam diferentes.

Comparando os dados do INMET com os do CEMADEN, a correlação é de 0,437 e o coeficiente angular de 0,19 em São Paulo, o que indica uma baixa relação estatística entre as duas fontes. Por outro lado, em Belo Horizonte, a correlação foi de 0,811, indicando uma considerável similaridade entre as fontes. Esse comportamento pode ser explicado pela distância de 2,9 km entre as duas estações em São Paulo (Figura 18), e de 1,5 km em Belo Horizonte (Figura 17). O CEMADEN mantém estações pluviométricas espalhadas em diversos locais da cidade, sendo que esses instrumentos medem o valor da precipitação pela quantidade de água captada, de modo que a baixa correlação observada pode ser provocada pelo distanciamento entre as duas estações. Em outras palavras, é possível que tenha chovido em um local e não em outro.

Como citado, os dados medidos pelo sensor IMERG são disponibilizados em uma resolução temporal de 30 min, de modo que ao calcular o acúmulo diário desses dados, a correlação com o INMET é de 0,378 e com o CEMADEN de 0,402, em São Paulo. Em um estudo feito por Yuda et al (2019), no qual foi realizada uma análise de cinco anos comparando dados de precipitação do IMERG com pluviômetros, foi mostrada uma baixa relação entre os dados, e concluiu-se que os dados do IMERG possuem uma boa performance para detectar a ocorrência de chuva, mas não se apresenta muito acurado quando não está chovendo, sendo pouco preciso na quantificação da precipitação observada localmente (YUDA et al, 2019).

Avaliando agora o comportamento dos dados obtidos de cada fonte na ocorrência de precipitação, na Figura 17, onde são mostrados os dados para Belo Horizonte, nota-se no gráfico D um aumento significativo na ocorrência de precipitação a partir de novembro até meados de fevereiro, com maiores picos durante o mês de janeiro. Avaliando os parâmetros pressão, temperatura e umidade, nota-se maior variação na umidade, que tem um aumento durante janeiro, e na pressão, que diminui significativamente nesse período.

Observa-se que nos picos de aumento da umidade, como no começo de dezembro e fim de janeiro, a temperatura decai, mas em menor intensidade. Apesar disso, no geral, se nota que

em períodos chuvosos a temperatura é em média maior, e nos períodos de baixa ocorrência de chuva tem-se uma menor temperatura (inverno e outono). Mas, vale destacar que durante a ocorrência da maior parte das precipitações mais intensas, onde a umidade aumenta, a temperatura decai.

Com relação ao IWV um comportamento semelhante ao da umidade é observado, porém com menor magnitude de variação. Em outras palavras, durante os períodos junho a outubro tem-se menores valores para o IWV, enquanto que em períodos chuvosos, nota-se um aumento gradativo desses valores.

Uma distribuição parecida é observada em São Paulo (Figura 18), onde o período de chuva vai de dezembro a março. Conforme aumento da taxa de precipitação diária, nota-se um aumento na umidade e uma diminuição na pressão. Durante setembro e outubro em São Paulo, nota-se uma queda nos valores mínimos de umidade, que chegam a atingir menos de 20%, porém em picos de chuva, como o que ocorreu no começo de julho e começo de setembro, observa-se um rápido aumento na umidade, e por outro lado, tem-se um rápido decaimento da pressão e temperatura. No final de fevereiro, também se nota um pequeno intervalo sem precipitação, onde é também possível observar uma diminuição significativa da umidade. Maiores detalhamentos de estudos de caso serão discutidos na Seção 4.2.

O IWV, mostrado no gráfico 5 (Figura 17), apresenta comportamento semelhante a umidade, durante o mês de julho, quando são notados dois picos de chuva. Nota-se uma concordância com a precipitação que também apresenta os picos durante a chuva. Entretanto, em geral, o IWV apresenta uma variação com picos nos meses chuvosos.

4.3. Estudo de caso

A partir das séries temporais geradas para as estações e períodos descritos na Seção 4.1, alguns eventos extremos de precipitação foram destacados para um estudo de caso mais detalhado. Nesta seção, são apresentadas as justificativas para os dias escolhidos e as posteriores análises.

Para a cidade de Belo Horizonte, foram destacados dois eventos de precipitação intensa: o primeiro no dia 23/11/2019, quando foi registrado um total de 45,6 mm de chuva; e o segundo

no dia 24/01/2020, com um total de 171,8 mm de precipitação acumulada, de acordo com as Figura 25 e Figura 26. Com relação a cidade de São Paulo, foram também destacados dois eventos. O primeiro foi no dia 05/07/2020, quando foi registrado um total de 123,6 mm de chuva; e o segundo no dia 10/02/2020, com um total de chuva de 123,0 mm. De modo a avaliar o comportamento da atmosfera antes e após a ocorrência do evento, nas análises são também considerados dois dias antes e dois dias depois das datas definidas.

Os eventos de precipitação intensa foram evidenciados por meio de sites informativos, principalmente, devido aos desastres causados pela ocorrência dessas chuvas intensas e imprevistas. Para a cidade de Belo Horizonte, pode-se ver tal evidência em Fonseca (2020). E em São Paulo, esses dados foram expostos em sites como Pegorim (2020) e Agência Brasil (2019).

Com base nos resultados e discussões feitas na Seção 4.2. foi observada uma baixa correlação nos valores de precipitação do CEMADEN e uma baixa disponibilidade de dados para os pluviômetros do ANA. Assim, nas análises desenvolvidas no estudo de caso, são considerados apenas dados de precipitação provenientes do INMET e IMERG.

4.3.1. Estudo de caso - Belo Horizonte

Na Figura 19 são apresentadas imagens do vapor d'água para os dias entre 21/11/2019 e 25/11/2019, obtidas pelas plataformas Terra e Aqua (sensor MODIS) a partir do algoritmo no infravermelho próximo. Na Figura 20, imagens de precipitação obtidas pelo satélite GOES-16 (sensor ABI) são apresentadas. Na Figura 21 são plotados dados de pressão, temperatura, umidade, IWV e precipitação para as demais fontes avaliadas.

Figura 19 - Quantidade de vapor d'água ao longo da coluna vertical em cm, medido pelo sensor MODIS a bordo das plataformas Aqua e Terra, sobre a cidade de Belo Horizonte (destacada pelo retângulo vermelho), entre os dias 21/11/2019 e 25/11/2019.

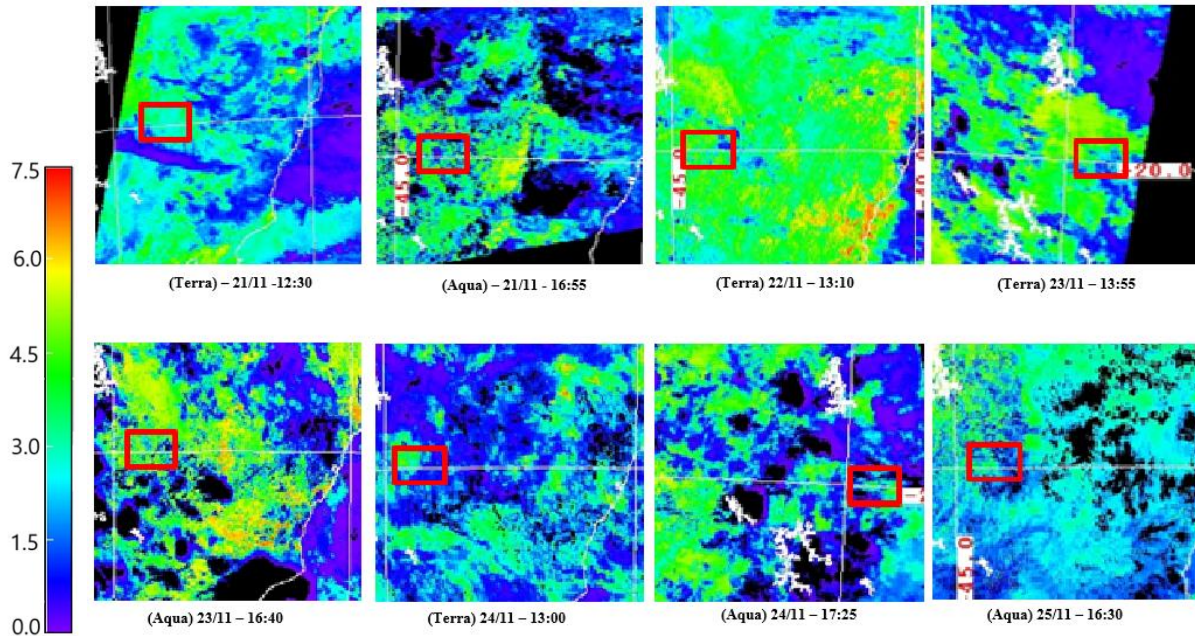


Figura 20 - Precipitação diária estimada pelo satélite GOES-16 sobre um recorte da América do Sul, com destaque para a cidade de Belo Horizonte (retângulo em preto), entre os dias 21/11/2019 e 25/11/2019.

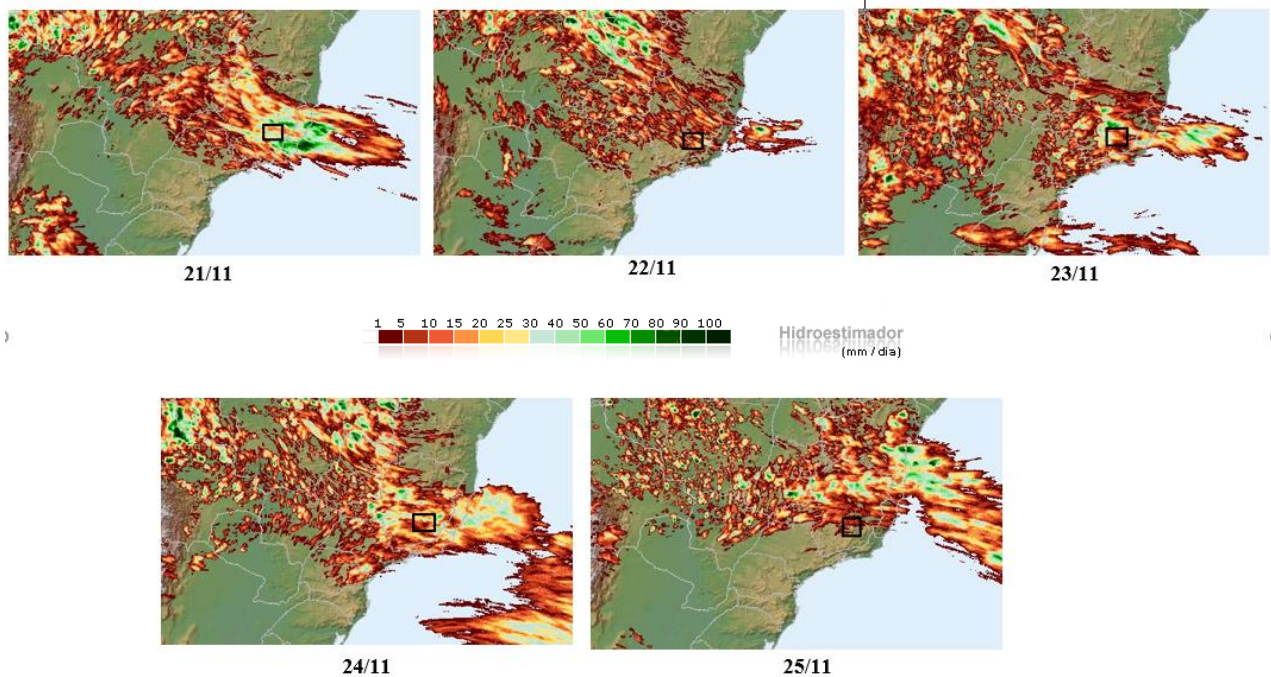
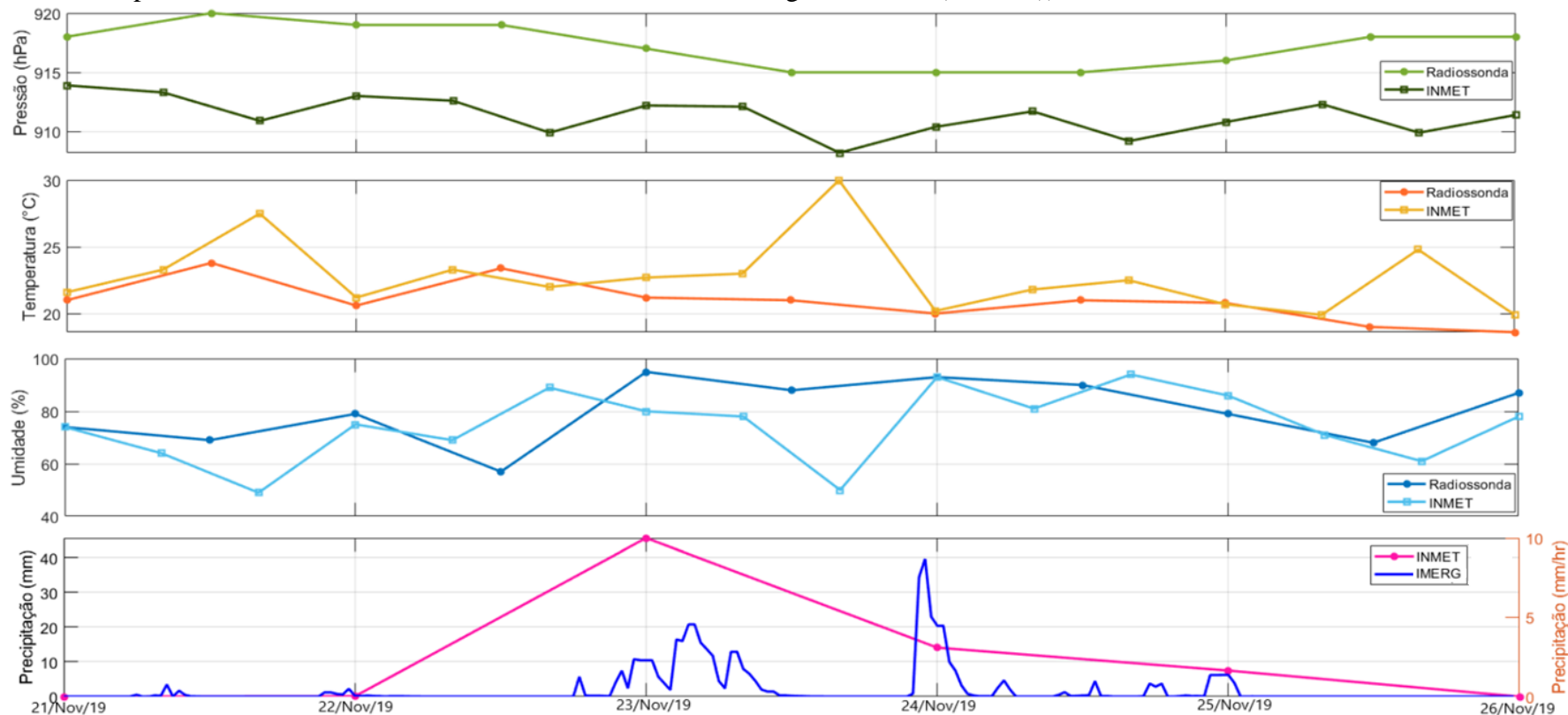


Figura 21 - Parâmetros atmosféricos na cidade de Belo Horizonte obtidos entre os dias 21/11/2019 e 25/11/2019 a partir de diferentes fontes: pressão, temperatura e umidade (estações meteorológicas - INMET e radiossondas); precipitação (estação meteorológica - INMET, pluviômetros - ANA e CEMADEN; e sensores meteorológicos - GPM (IMERG)).



Para os dias considerados (21/11/19 - 25/11/19), a quantidade de precipitação medida pela estação meteorológica do INMET em cada dia foi respectivamente de: 0,0 mm; 0,1 mm; 45,6 mm; 14,1 mm e 7,5 mm. Analisando as imagens da Figura 19, pode-se observar que dois dias antes do evento (23/11/2019) havia uma quantidade considerável de vapor d'água na atmosfera, de modo que esse vapor d'água condensa e precipita no dia 23. Nos dois dias seguintes ao evento, observa-se que a quantidade de vapor d'água sofre uma considerável queda.

Essa mesma análise corrobora para as imagens da Figura 20 que mostram a precipitação diária estimada pelo GOES. Considerando essas imagens e os valores de precipitação fornecidos pelas estações meteorológicas do INMET, percebe-se que ambos se relacionam, pois, conforme a variação da tonalidade da imagem se aproxima do vermelho, os dados de precipitação fornecidos pelo INMET aumentam, onde no dia do evento (23) a imagem aparece avermelhada e o INMET nos fornece um valor de 45,6 mm de precipitação.

A respeito da precipitação em si, fornecida tanto pelo INMET quanto pelo IMERG percebe-se que os dados apresentam comportamento semelhante, porém deve-se prestar atenção ao gráfico, pois os dados são fornecidos em escalas temporais diferentes, enquanto o INMET fornece o acúmulo diária, o GPM fornece o valor em horas. Em relação ao IWV, percebe-se uma falta de informações devido à indisponibilidade de dados do EMBRACE, como pode ser visto no Apêndice A, e, portanto, a análise não pôde ser feita com relação a este parâmetro.

Considerando o segundo evento de precipitação na cidade de Belo Horizonte. Na Figura 22 são apresentadas imagens do vapor d'água para os dias entre 22/01/2020 e 26/01/2020, obtidas pelas plataformas Terra e Aqua (sensor MODIS) a partir do algoritmo no infravermelho próximo. Na Figura 23, imagens de precipitação acumulada obtidas pelo satélite GOES-16 são apresentadas. Na Figura 24 são plotados dados de pressão, temperatura, umidade, IWV e precipitação para as demais fontes avaliadas. É importante destacar que para o período em questão, os dados de radiossonda não estavam disponíveis e, portanto, são mostrados apenas os parâmetros atmosféricos fornecidos pelo INMET.

Figura 22 - Quantidade de vapor d'água ao longo da coluna vertical em cm, medido pelo sensor MODIS a bordo das plataformas Aqua e Terra, sobre a cidade de Belo Horizonte (destacada pelo retângulo vermelho), entre os dias 22/01/2020 e 26/01/2020.

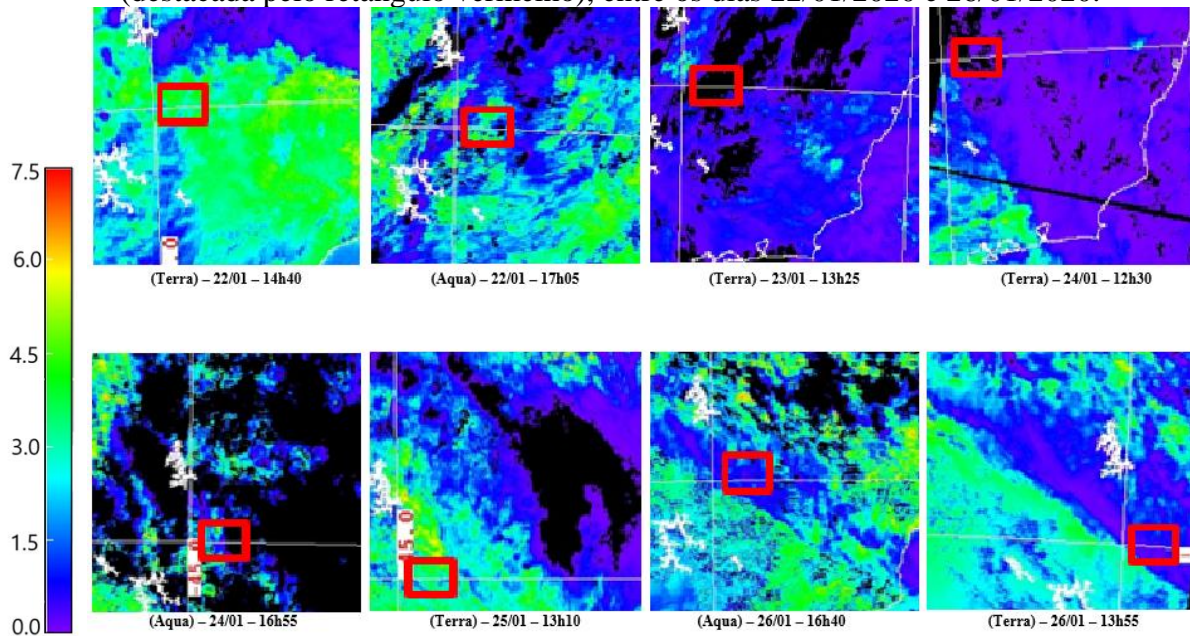


Figura 23 - Precipitação diária estimada pelo satélite GOES-16 sobre um recorte da América do Sul, com destaque para a cidade de Belo Horizonte (retângulo em preto), entre os dias 22/01/2020 e 26/01/2020.

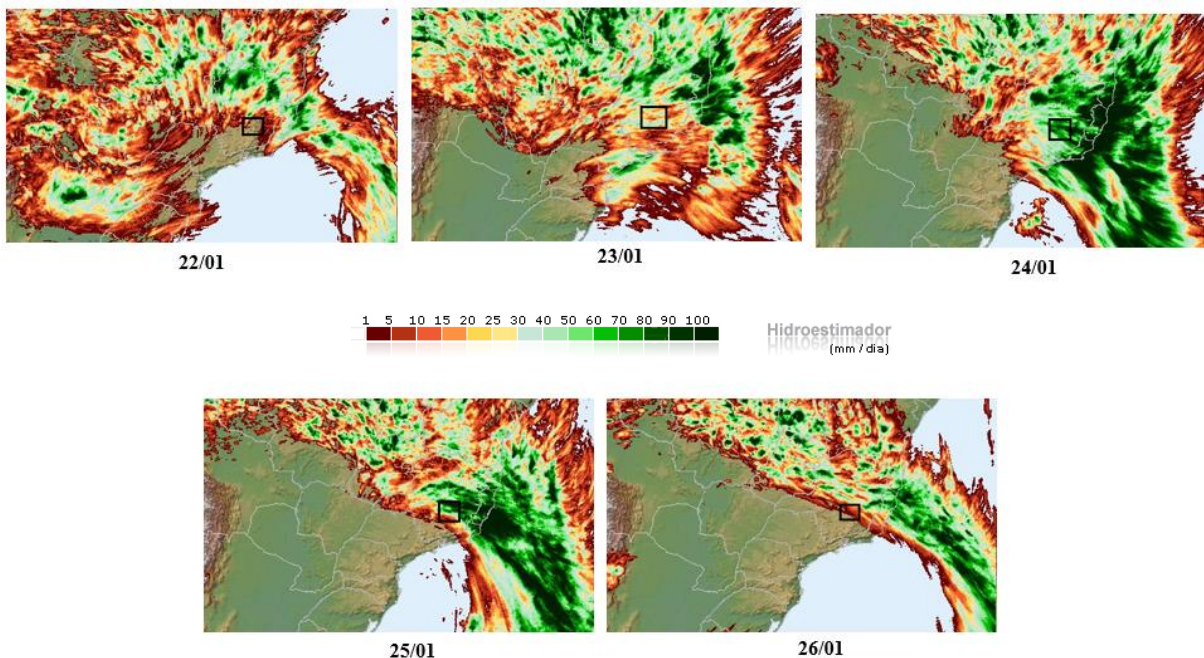
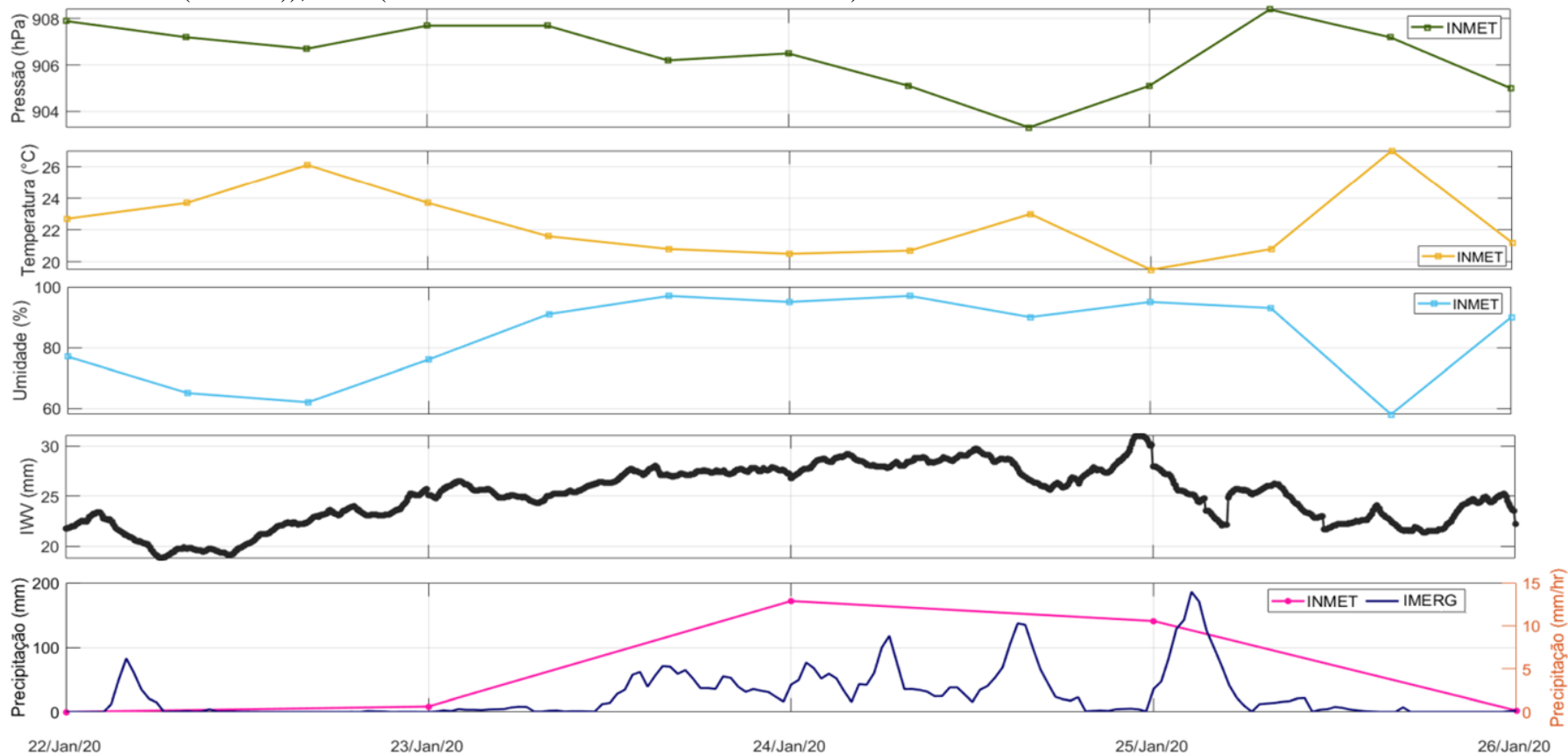


Figura 24 - Parâmetros atmosféricos na cidade de Belo Horizonte obtidos entre os dias 22/01/2020 e 26/01/2020 a partir de diferentes fontes: pressão, temperatura e umidade (estações meteorológicas - INMET e radiossondas); precipitação (estação meteorológica - INMET, pluviômetros - ANA e CEMADEN; e sensores orbitais meteorológicos - GPM (IMERG)); IWV (radiossondas e ZTD/GNSS - EMBRACE).



Seguindo a mesma linha de raciocínio do evento anterior, têm-se as análises para este evento. Para facilitar as análises referentes às imagens e aos gráficos, têm-se primeiramente os dados fornecidos pelo INMET com relação a precipitação, sendo eles de 0,0 mm (22/01/20); 8,4 mm (23/01/20); 171,8 mm (24/01/20); 140,7 mm (25/01/20) e 2,2 mm (26/01/20).

Ao analisar a Figura 22, referente aos produtos de vapor d'água do MODIS, no dia 22/01, observa-se a presença de uma coluna de vapor d'água de aproximadamente 4,5 cm vinda da direção sul. Nos dias 23/01, 24/05 e 25/01, todos com registro de precipitação, há uma diminuição no tamanho da coluna, observada pela coloração azulada da imagem. Essa diminuição do vapor d'água pode ser resultado do processo de condensação da água, que passa do seu estado gasoso para o líquido.

A partir dos dados de precipitação obtidos da plataforma GOES (Figura 23), é possível observar de maneira mais clara os dias em que ocorreram chuva, os resultados mostram maiores índices de precipitação nos dias 23/01, 24/01 e 25/01, o que condiz com o comportamento do vapor d'água.

Com relação aos parâmetros apresentados na Figura 24, nota-se um aumento da umidade e diminuição da temperatura nos dias com chuva. Por exemplo, no dia 22/01, a umidade e a temperatura apresentavam valores de 69% e 26°C, respectivamente; e no dia 23/01, esses parâmetros atingem 96% (umidade) e 23°C (temperatura). Por outro lado, a pressão não apresentou variações tão significativas, que passou de 907,9 hPa (22/01) para 906,2 hPa (23/01).

Com relação à precipitação foram analisados dados de duas fontes, sendo elas INMET e o IMERG. Ambas mostram bem o aumento da quantidade de precipitação no dia do evento, reafirmando assim as análises feitas sobre a Figura 22. Para esse período, há dados do IWV. De acordo com o gráfico, pode-se notar que o valor do parâmetro aumenta consideravelmente no dia de maior ocorrência de precipitação, ou seja, dia 24.

4.3.2. Estudo de caso - São Paulo

Na Figura 25 são apresentadas imagens do produto de vapor d'água para os dias 03/07/2019 a 07/07/2019, obtidas pelas plataformas Terra e Aqua (sensor MODIS) a partir do algoritmo no infravermelho próximo. Na Figura 26, imagens de precipitação obtidas pelo satélite

GOES-16 (sensor ABI) são apresentadas. Na Figura 27 são plotados dados de pressão, temperatura, umidade, IWV e precipitação para as demais fontes avaliadas.

Figura 25 - Quantidade de vapor d'água ao longo da coluna vertical em cm, medido pelo sensor MODIS a bordo das plataformas Aqua e Terra, sobre a cidade de São Paulo (destacada pelo retângulo vermelho), entre os dias 03/07/2019 e 07/07/2019.

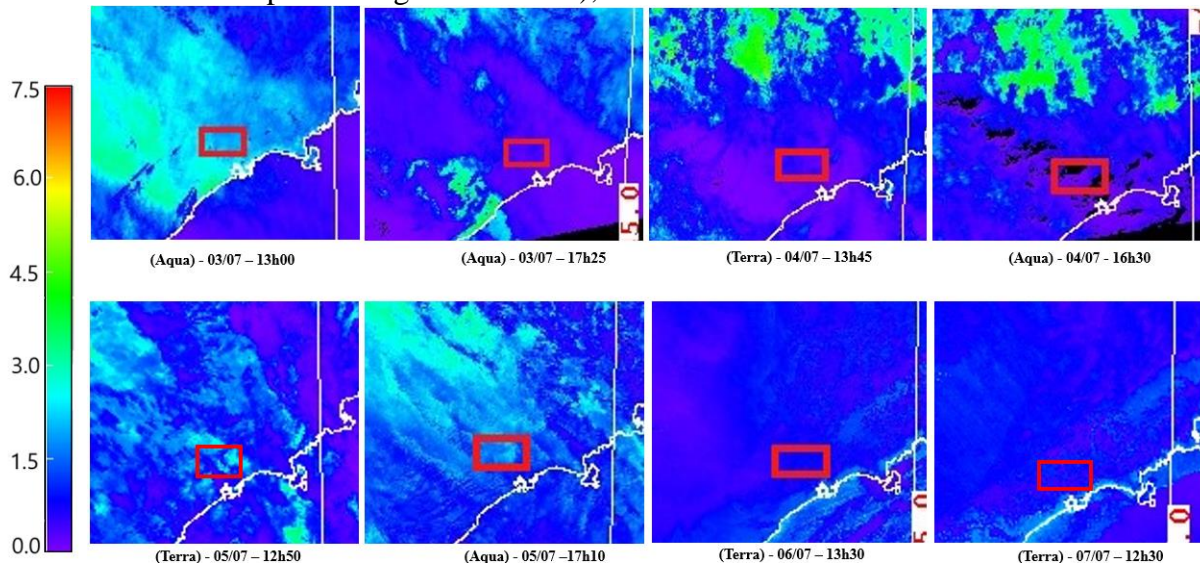


Figura 26 - Precipitação diária estimada pelo satélite GOES-16 sobre um recorte da América do Sul, com destaque para a cidade de São Paulo, entre os dias 03/07/2019 e 07/07/2019.

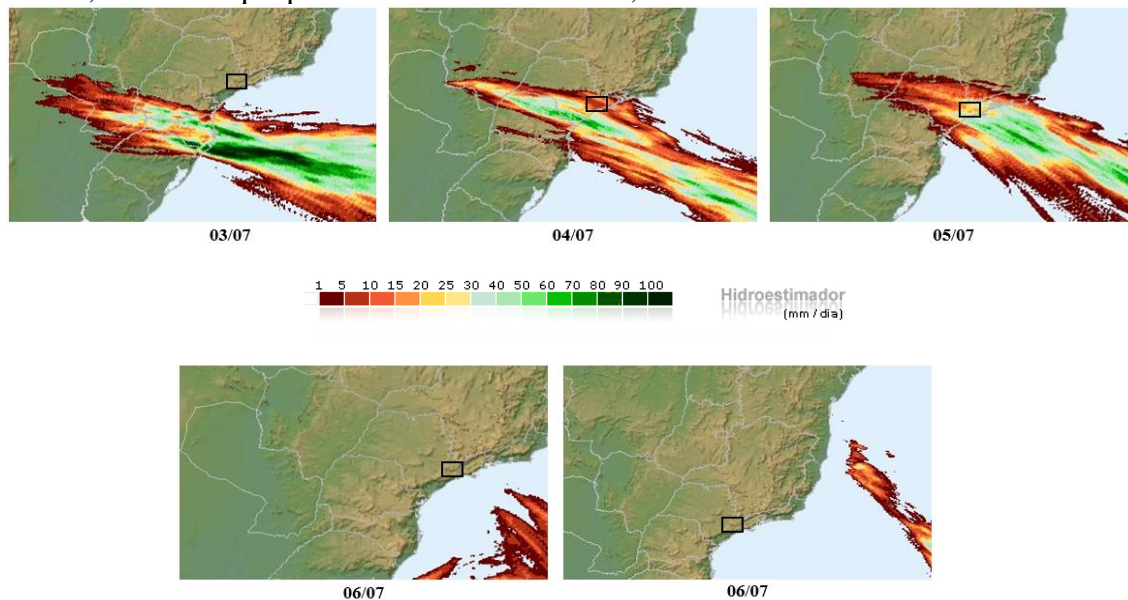
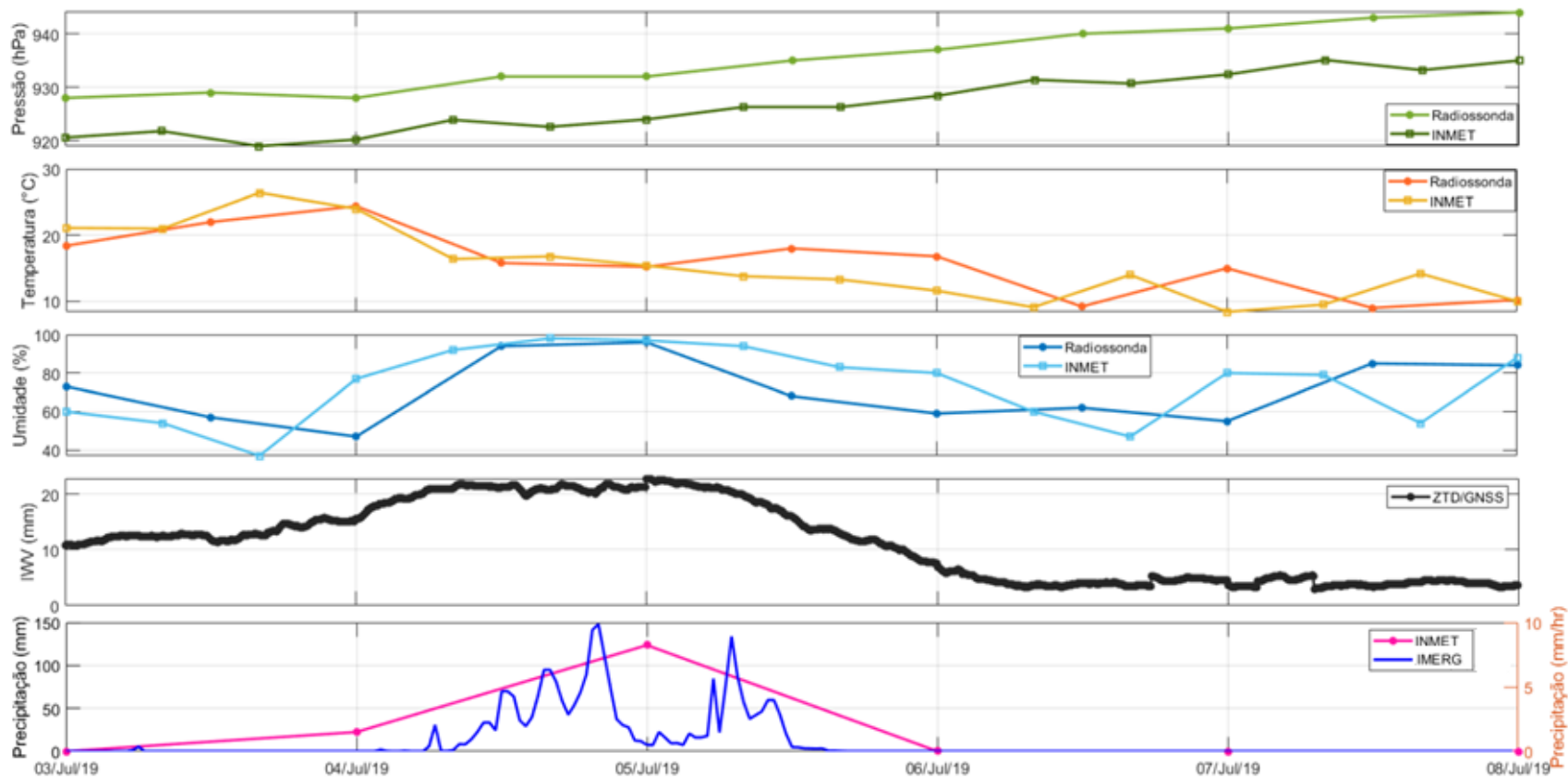


Figura 27 - Parâmetros atmosféricos na cidade de São Paulo obtidos entre os dias 03/07/2019 e 07/07/2019 a partir de diferentes fontes: pressão, temperatura e umidade (estações meteorológicas - INMET e radiossondas); precipitação (estação meteorológica - INMET, pluviômetros - ANA e CEMADEN); IWV (radiossondas e ZTD/GNSS - EMBRACE).



A partir dos gráficos de precipitação do INMET (Figura 27), o acúmulo diário de chuva foi de 0,0 mm (03/07), 22,4 mm (04/07), 123,6 mm (05/07), 0,1 mm (06/07) e 0 mm (07/07). No produto de vapor d'água mostrado na Figura 25, no dia 03/07, quando houve registro de chuva, nota-se às 13h00 uma concentração de vapor d'água próxima de 4,5 cm, e às 17h25, do mesmo dia, observa-se uma diminuição dessa concentração (com precipitação registrada pelo IMERG a partir da 21h). No dia 04/07, a concentração de vapor d'água fica abaixo de 1,5 cm durante o dia todo (indicado pela mescla de cores entre azul e roxo).

As diminuições do vapor d'água na atmosfera eram esperadas, pois na precipitação há uma condensação desse vapor que é transformado para sua forma líquida, liberando calor latente na atmosfera e precipitando. Esse comportamento é avaliado observando a temperatura e umidade na Figura 27, no qual é possível observar um aumento na temperatura ao longo do dia e uma diminuição da umidade, que chega a 40%. Com relação ao IWV, este também apresenta uma diminuição, mas de menor magnitude.

No dia 05/07, quando foi observado o maior acúmulo de chuva, observa-se um aumento do vapor d'água que vem da direção Noroeste. Esse aumento provoca uma diminuição do calor latente da atmosfera e, conseqüentemente, um aumento na umidade, como pode ser visto na Figura 27, em que a umidade ultrapassa 80%. Para esse mesmo dia, observa-se um aumento no IWV que atinge um máximo de 22,8 mm.

Após o pico de chuva, o vapor d'água volta a diminuir se mantendo em torno de 1,5 cm nos dias seguintes. Comportamento semelhante é notado no IWV (Figura 27), que após a chuva, tem uma diminuição significativa e mantém-se instável nos dias seguintes, com um leve aumento no dia 06/07 e posterior diminuição no dia 07/07. Com relação a temperatura, esta se mantém baixa nos demais dias com uma média de 15°C, enquanto que a umidade apresenta algumas variações, mas em menores magnitudes. Com relação a pressão, ao longo dos dias avaliados, nota-se um aumento gradativo, mantendo uma baixa relação com os demais parâmetros observados.

A partir da Figura 26, que mostra o produto de acúmulo diário da precipitação do satélite meteorológico GOES-16, nota-se um comportamento semelhante aos dados de precipitação do IMERG e INMET, no qual, nos dias 04/07 e 05/07, são registradas chuvas na região de São

Paulo. Pela sequência de imagens do GOES-16, é possível ainda observar a forma em que a chuva se dissipou, atingindo São Paulo ao Sul e se deslocando na direção Sudeste.

Em relação aos dados do IMERG (Figura 27), é possível notar a distribuição da chuva ao longo do dia. Por exemplo, nota-se que a precipitação registrada no dia 04/07 ocorreu antes do meio dia; enquanto o alto acúmulo de precipitação do dia 05/07 se distribuiu ao longo de todo o dia. Apesar do comportamento indicar que houve um alto nível de precipitação, o acumulado de chuva pelo IMERG foi de 58,05 mm no dia 05/07, enquanto o acumulado do dia 04/07 foi de 120,37 mm, valor mais próximo ao registrado pelo INMET no dia 05/07. Essa diferença de valores é dada pelo fato de que o acumulado de chuva registrada pelo INMET foi medido entre às 9h do dia 04/07 até as 09h do dia 05/07.

Na Figura 28, Figura 29 e Figura 30, são apresentados os resultados para o período de 08/02/2020 até 12/02/2020. De acordo com os dados de precipitação fornecidos pelo INMET (Figura 30), o acúmulo de chuva foi de: 0,0 mm (08/02), 0,0 mm (09/02), 123 mm (10/02), 43 mm (11/02) e 0,2 mm (12/02).

Figura 28 - Quantidade de vapor d'água ao longo da coluna vertical em cm, medido pelo sensor MODIS a bordo das plataformas Aqua e Terra, sobre a cidade de São Paulo (destacada pelo retângulo vermelho), entre os dias 08/02/2020 e 12/02/2020.

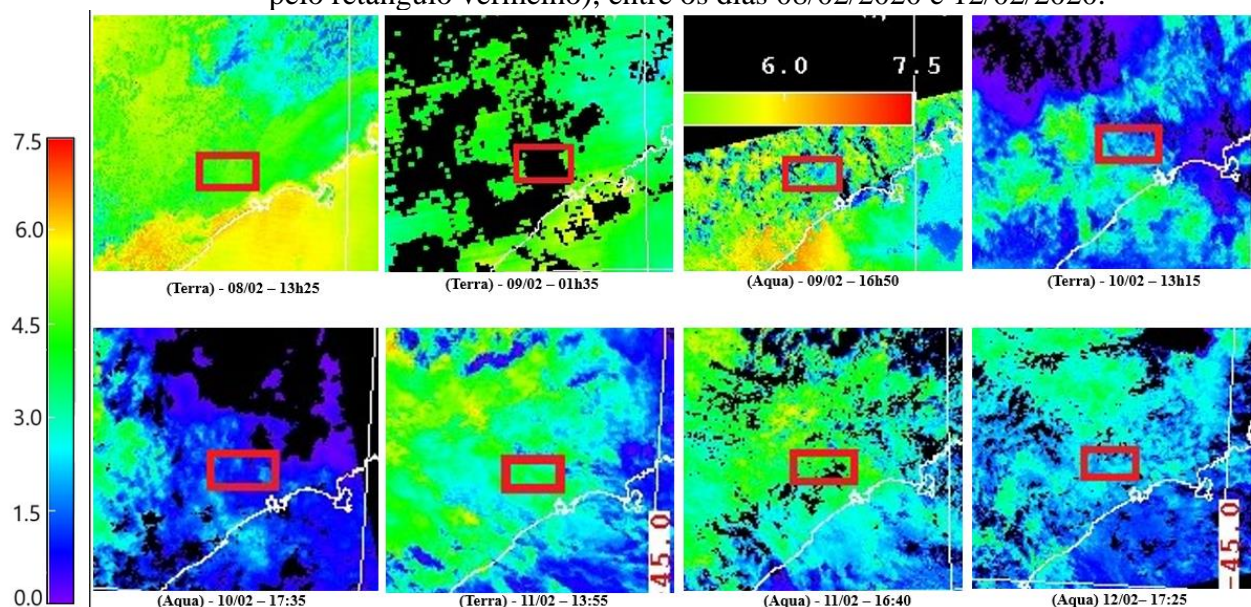
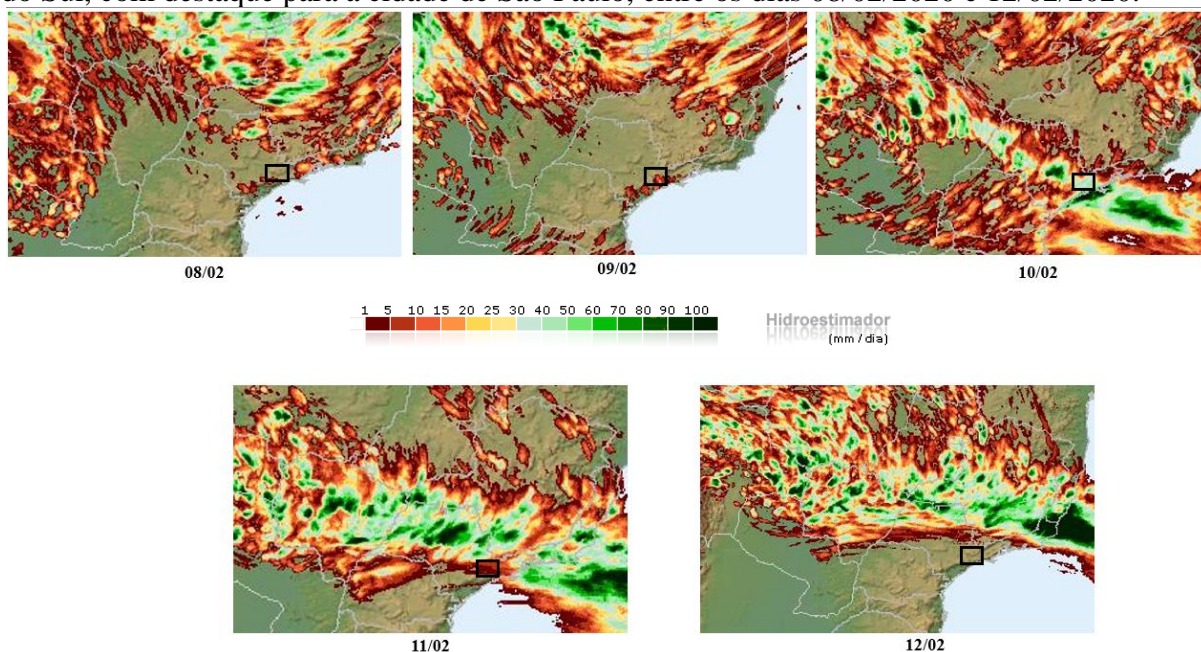


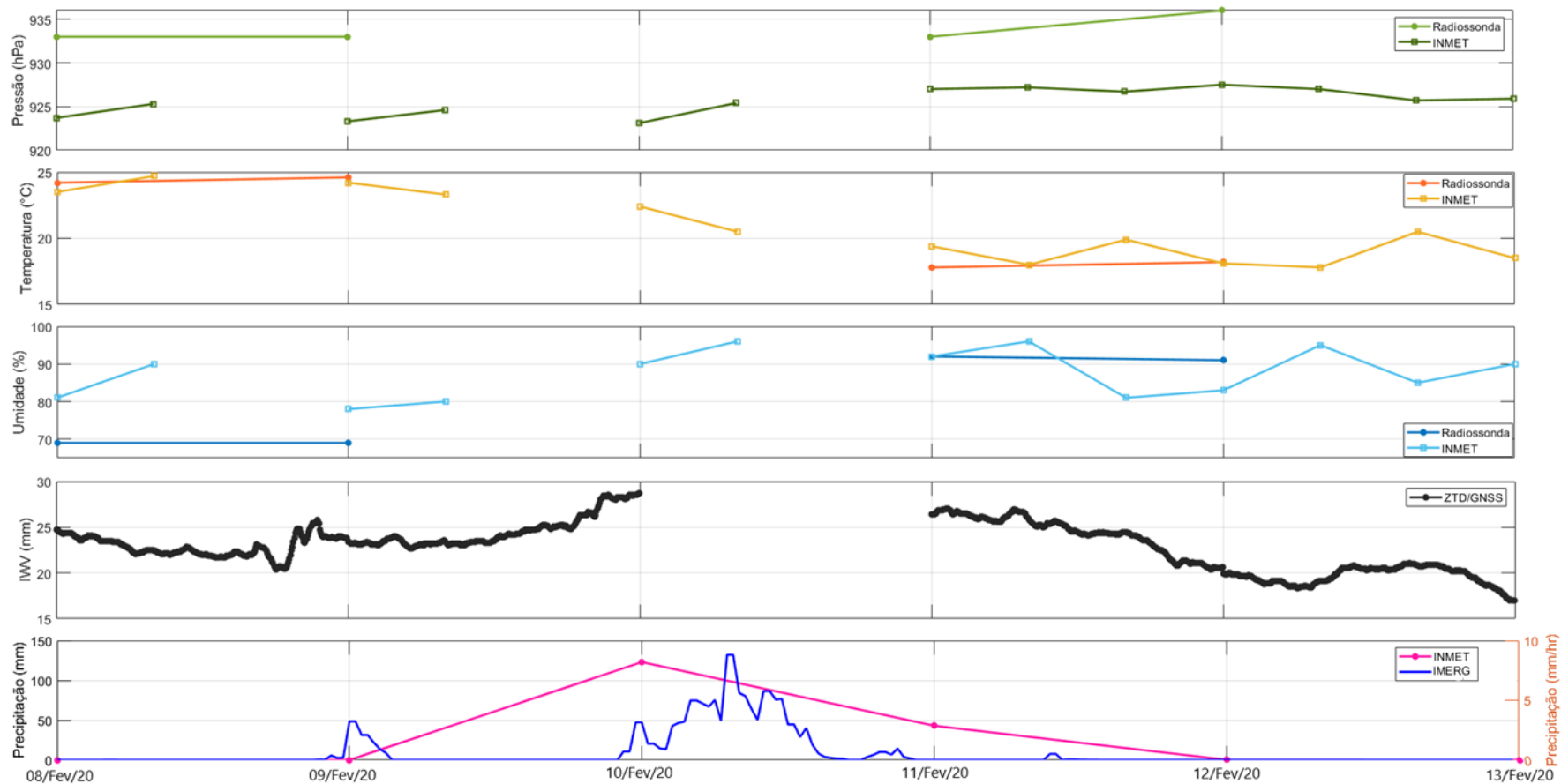
Figura 29 - Precipitação diária estimada pelo satélite GOES-16 sobre um recorte da América do Sul, com destaque para a cidade de São Paulo, entre os dias 08/02/2020 e 12/02/2020.



Ao avaliar o produto de vapor d'água mostrada na Figura 28, nota-se para o dia 08/02 uma alta concentração de vapor d'água de aproximadamente 4,5 cm. Observa-se também nos dados do INMET uma elevação da umidade que atinge 90%, mas que se mantém instável pela radiossonda. Nos dias 09/02 e 10/02, a alta concentração de vapor d'água se mantém, como é visto pela coloração verde sobre São Paulo, e da mesma forma, nota-se um aumento significativo da umidade, que para a radiossonda passa de 69% para 91%, e uma diminuição da temperatura que decai de 24°C para 17°C.

Nos demais dias após o pico de chuva do dia 10/02, ainda é notada uma significativa concentração de vapor d'água, principalmente no entorno da região de São Paulo. O comportamento do vapor d'água ao longo dos dias analisados possui uma correlação com a precipitação, mostrada na Figura 29, para os dados do GOES-16, em que a dissipação do vapor d'água na atmosfera possui comportamento semelhante com a precipitação registrada. Como consequência, houve uma alta precipitação em São Paulo e no seu entorno, mesmo após o pico de chuva.

Figura 30 - Parâmetros atmosféricos na cidade de São Paulo obtidos entre os dias 08/02/2020 e 12/02/2020 a partir de diferentes fontes: pressão, temperatura e umidade (estações meteorológicas - INMET e radiossondas); precipitação (estação meteorológica - INMET, pluviômetros - ANA e CEMADEN); IWV (radiossondas e ZTD/GNSS - EMBRACE).



Com relação aos dados de pressão, temperatura e umidade mostrados na Figura 30, nota-se uma falha de dados da radiossonda para os dias 09/02, 10/02 e 12/02, e uma falha no INMET para os dados das 18h, dos dias 08/02, 09/02 e 10/02. Para o IWV, também se nota uma falha de dados no dia 10/02.

Avaliando o comportamento do IWV, mostrado na Figura 30, no dia 08/02, houve um aumento desse parâmetro no final do dia, que pode ser justificado pela chuva mostrada pelo IMERG, também no fim do dia. No dia 09/02, quando foi registrado um índice de chuva, se tem um aumento do IWV atingindo um máximo de 29 mm. Para o dia 10/02, quando houve o pico de chuva, houve uma falha nos dados do GNSS.

Para os dias 09/02 e 10/02, a precipitação acumulada medida pelo IMERG foi de 15,73 mm e 108,52 mm, respectivamente, valor mais próximo ao registrado pelo INMET que foi de 0 mm (09/02) e 123 mm (10/02). Ao comparar os dados do IMERG e INMET com a precipitação estimada pelo GOES-16, verifica-se que no dia 11/02 houve um acúmulo de chuva, destacada pela mancha sobre São Paulo, que por sua vez, não é registrado pelo INMET, mas é medida pelo IMERG com um acumulado de 1,2 mm.

5. CONCLUSÃO

O principal objetivo deste trabalho foi propor uma metodologia para investigar o monitoramento do vapor d'água atmosférico durante a ocorrência de eventos extremos de precipitação empregando diferentes técnicas. Conforme as etapas descritas para atingir os objetivos propostos, inicialmente foi realizado um desenvolvimento teórico acerca dos eventos extremos de precipitação, os princípios básicos da sua formação, como se dá a ocorrência desses eventos no Brasil e como é feito o monitoramento por meio de diferentes órgãos (CEMADEN, CPRM e CENAD). Também foi realizado um desenvolvimento teórico sobre diferentes fontes que podem ser utilizadas para monitoramento de eventos de precipitação, sendo elas: estações meteorológicas (pluviômetro), radiossondas, satélites de posicionamento GNSS, satélites meteorológicos e de sensoriamento remoto.

A partir desse estudo teórico foram definidas como áreas de estudo as cidades de São Paulo e Belo Horizonte, para o período de março/2019 a março/2020, onde foram analisados os dados as fontes descritas para descrever o comportamento atmosférico. Foram obtidos, para tanto, os parâmetros pressão, temperatura e umidade a partir de dados proveniente de radiossondas e das estações meteorológicas do INMET; dados de precipitação a partir do INMET e dos satélites meteorológicos GOES-16 e IMERG; dados de vapor d'água medidos pelo sensor MODIS; e a partir do ZTD/GNSS foi calculado o IWV.

Apesar da boa precisão dos dados registrados pelas radiossondas (ELLIOT, 1991), por se tratarem de medições *in loco* e por permitirem avaliar o comportamento da atmosfera ao longo de colunas verticais, foi observada um melhor desempenho dos dados fornecidos pelo INMET, como foi mostrado no experimento na Seção 3.3, e também com relação a resolução temporal e espacial, como foi observado no estudo de caso em Belo Horizonte. No entanto, é importante destacar que na comparação realizada com o IGS, a diferença de altitude entre as estações não foi considerada, trabalhos futuros devem avaliar o impacto dessa correção.

Com relação ao uso do ZTD/GNSS para obtenção do IWV, as principais vantagens do método são a sua alta resolução temporal (5 minutos); suas estimativas, onde foi

observado uma acurácia de 4 mm para o ZTD/EMBRACE e a acurácia do ZWD engloba também a acurácia das radiossondas e do INMET. Além disso, de acordo com a região, tem-se uma alta resolução espacial. Apesar disso, foi discutido que o uso do ZTD para avaliação da precipitação parte da determinação do IWV, que por sua vez, depende do ZWD. Nesse cenário, é necessário utilizar ótimas medidas de pressão, temperatura e umidade para aplicar aos modelos de ZTD (ZHD + ZWD) e assim obter valores iniciais do atraso. E ao converter o ZTD em ZWD/IWV, medidas precisas coletadas junto a antena de parâmetros meteorológicos devem ser usadas para calcular o ZHD. Portanto, a precisão do ZWD e ZHD dependerá da qualidade dos dados aplicados em seus modelos.

Referente às estações meteorológicas, algumas vantagens são que os dados fornecidos pelas estações são observações realizadas de maneira sistemática, uniforme e ininterrupta. Foi observado que o comportamento entre a radiossonda e as estações meteorológicas é bastante próximo em ambas as cidades, com as estações tendo a vantagem de maior disponibilidade de dados.

Com relação a precipitação medida pelas estações meteorológicas de superfície, ao comparar com os dados dos pluviômetros, nota-se uma desvantagem da resolução espacial. O CEMADEN opera pluviômetros em diferentes pontos de ambas as cidades, enquanto que se observa uma média de três estações meteorológicas em cada região. Além disso, a resolução temporal dos pluviômetros é horária, enquanto das estações é o acúmulo diário. Essas resoluções são desvantagens, visto que a precipitação apresenta grandes variações de um local para outro em uma mesma cidade e de grandes variações ao longo do dia. Apesar disso, com relação à disponibilidade de dados, as estações meteorológicas se mostraram em vantagem em relação aos pluviômetros.

No que diz respeito aos dados fornecidos pelos satélites de sensoriamento remoto, foi mostrado que os produtos de precipitação e vapor d'água são uma alternativa promissora como fonte de dados de chuva para estudos hidrológicos e climatológicos. Esses equipamentos possuem a vantagem de serem capazes de monitorar grandes áreas, apresentar medições contínuas, e podem ainda superar as limitações espaciais de observações no solo, que apresentam uma maior defasagem de dados, como é o caso das radiossondas e dos pluviômetros. Além disso, com relação aos dados de precipitação, a resolução temporal dos

dados do IMERG é de 30 minutos, o que permite verificar o comportamento da chuva ao longo do dia, e constatar, por exemplo, se uma chuva foi pontual ou se ela se distribuiu ao longo do dia.

Por fim, os dados de vapor d'água medidos pelo MODIS se mostraram promissores neste estudo, com uma significativa relação com os dados de umidade, temperatura e IWV. Assim, apesar de algumas das técnicas abordadas apresentarem lacunas de dados, a combinação delas pode ser utilizada como uma forma de auxiliar no monitoramento de eventos extremos de precipitação.

Avaliações futuras de eventos de precipitação usando diferentes fontes podem ser realizadas em outras regiões do Brasil, considerando uma maior variabilidade climática, permitindo buscar relações ainda mais significativas desses dados. Além disso, estudos mais aprofundados podem ser feitos considerando o IWV e os dados provenientes dos sensores meteorológicos, e investigar como essas duas fontes podem ser combinadas para identificação de eventos de precipitação. Por fim, trabalhos futuros devem considerar a correção de altitude entre as fontes de dados utilizadas.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA BRASIL. **São Paulo registra recorde de chuva em 24 horas para o mês de julho.** Tribuna Hoje – notícias. 2019. Disponível em: <<https://tribunahoje.com/noticias/brasil/2019/07/05/sao-paulo-registra-recorde-de-chuva-em-24-horas-para-o-mes-de-julho/>>. Acesso em: 03 jul. 2020.

AGSOLVE. **Como funciona o pluviômetro?**. 2011. Disponível em: <<https://www.agsolve.com.br/noticias/4940/como-funciona-o-pluviometro>>. Acessado em: 13 abr. 2020.

ALMEIDA, H. A. **Climatologia aplicada à geografia.** Universidade Estadual da Paraíba; Editora Edupedb. Campina Grande. 2 ed. 2016.

AMBRIZZI, T; REBOITA, M.S; SILVA, G.A.M; YNOUE, R.Y. **Meteorologia: noções básicas.** Oficina de textos. 2017.

AMORIM, Vasco; ORGAZ, Maria de los Dolores Manso; TEIXEIRA, Maria Esmeralda Miranda. **Instrumentação e métodos de observação.** Universidade de Aveiro. Portugal, 1995.

ANA. **Séries históricas de estações.** Disponível em: <<http://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>>. Acessado em: 13 abr. 2020.

ATMOSPHERIC SOUNDINGS. **Radiosonde software.** 2020. Disponível em: <<http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>>. Acesso em: 01 mai. 2020.

AQUA PROJECT SCIENCE. **Aqua Earth-observing satellite mission.** Disponível em: <<https://aqua.nasa.gov/>>. Acesso em: 30 abr. 2020.

BALBINO, Amanda. **Estação meteorológica: como funciona e sua importância na agricultura.** Agroblog, 2016. Disponível em: <<https://agrosmart.com.br/blog/estacao-meteorologica-funciona-importancia-agricultura/>>. Acessado em: 25 abr. 2020.

BERTONI, J. C. & TUCCI, C. E. M. (1993). **Precipitação.** In. TUCCI, C. E. M. Org. Hidrologia: Ciência e Aplicação, UFRGS, ABRH, Porto Alegre-RS, Cap 5, p177-200.

BEVIS M, BUSINGER S, HERRING TA, ROCKEN C, ANTHES RA & WARE RH. **GPS Meteorology: Remote of Atmospheric Water Vapor Using the Global Positioning System.** Journal of Geophys Research. Vol. 97: 15787–15801, 1992.

BEVIS, M.; CHISWELL, G.; HERRING, T. A.; ANTHES, R.; ROCKEN, C.; WARE, E. R. H. **GPS Meteorology: Mapping zenith wet delays into precipitable water.** J. Appl. Meteor. 33: 379-386. 1994.

BRITO, Adriane Lima; VEIGA, José Augusto P. **Um estudo observacional sobre a frequência, intensidade e climatologia de eventos extremos de chuva na Amazônia.** Ciência e Natura, Santa Maria, v.37, p.163-169, 2015.

CEMADEN. **Histórico de Criação do CEMADEN.** Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. 2020a. Disponível em: < <http://www.cemaden.gov.br/historico-da-criacao-do-cemaden/>>. Acesso em: 25. jul. 2020.

CEMADEN. **Radares Meteorológicos.** Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. 2020b. Disponível em: < <http://www.cemaden.gov.br/radares-meteorologicos-2/>>. Acesso em: 25. jul. 2020.

CEMADEN. **O Alerta.** Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações. 2020c. Disponível em: <<https://www.cemaden.gov.br/o-alerta/>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

CEMADEN, **Mapa interativo.** 2020. Disponível em: <<http://www.cemaden.gov.br/mapainterativo/#>>. Acessado em: 15 abr. 2020.

CEMADEN. **Pluviômetros.** 2020. Disponível em: <<http://www.cemaden.gov.br/o-que-sao-pluviometros/>>. Acessado em: 19 abr. 2020.

CEMADEN, **Pluviômetros automáticos.** 2020. Disponível em: <<http://www.cemaden.gov.br/pluviometros-automatico/>>. Acessado em: 19 abr. 2020.

CENAD, **Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres: Sobre o CENAD.** 2019. Disponível em: <<https://www.mdr.gov.br/protecao-e-defesa-civil/centro-nacional-de-gerenciamento-de-riscos-e-desastres-cenad>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

CEMADEN. **Sala de Situação.** 2020a. Disponível em: < <https://www.cemaden.gov.br/sala-de-operacao/>>. Acesso em: 25 abr. 2020.

CENAD. **Recomendações.** 2019. Disponível em: <<https://www.mdr.gov.br/protecao-e-defesa-civil/centro-nacional-de-gerenciamento-de-riscos-e-desastres-cenad/recomendacoes-cenad>>. Acesso em: 02 fev. 2020.

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

CLIMA TEMPO. **São Paulo está tendo o mês mais chuvoso em 77 anos.** 2020a. Disponível em:< <https://www.climatempo.com.br/noticia/2020/02/26/sao-paulo-esta-tendo-o-fevereiro-mais-chuvoso-em-77-anos-2103>>. Acesso em: 01 maio. 2020.

CLIMATE-NOAA. **The Walker Circulation: ENSO's atmospheric buddy.** 2014. Disponível em:< <https://www.climate.gov/news-features/blogs/enso/walker-circulation-ensos-atmospheric-buddy>>. Acesso em: 25 abr. 2020.

CPRM. **Relatório da cheia de 2012 em Manaus**. CPRM – Serviço Geológico do Brasil. 2012.

CPRM. **Missão, visão, valores e princípios**. Serviço Geológico do Brasil. 2020a. Disponível em: < <http://www.cprm.gov.br/publicue/Sobre/Missao%2C-Visao%2C-Valores-e-Principios-19>>. Acesso em: 25. jul. 2020a.

CPRM. **SACE – Sistema de Alerta de Eventos Críticos**. CPRM. 2020b. Disponível em: < <http://www.cprm.gov.br/sace/>>. Acesso em: 25. jul. 2020.

CPRM. **SACE – Manchas de Inundação**. CPRM. 2020c. Disponível em: http://www.cprm.gov.br/sace/index_manchas_inundacao.php>. Acesso em: 25. jul. 2020.

CPTEC. **Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos**. 2020. Disponível em: < <https://www.cptec.inpe.br/>>. Acesso em: 25. Out. 2020.

DAVIS, J. L.; HERRING, T. A.; SHAPIRO, I.; ROGERS, A. E.; ELGENED, G. *Geodesy by radio Interferometry: Effects of Modeling Errors on Estimates of BaseLine Length*. *Radio Sci.* 20: 1593-1607. 1985.

DIÁRIO OFICIAL DA UNIÃO. **Portaria Conjunta N° 148, de 18 de dezembro de 2013**. Secretaria Nacional de Defesa Civil. Num 249. ISSN 1677-7042. 2013.

DSA. **Precipitação Estimada por Satélite – o hidroestimador. Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais – DSA**. 2020. Disponível em: <http://sigma.cptec.inpe.br/prec_sat/#>. Acesso em: 29 mai. 2020.

DEBLONDE, G.; MACPHERSON, S; MIREAULT, Y.; HÉROUX, P. *Evaluation of GPS precipitable water over Canada and the IGS network*. American Meteorological Society, Canada. 2004.

DUARTE, Cristiana Coutinho; NÓBREGA, Ranyére Silva; COUTINHO, Roberto Quental. **Análise climatológica e dos eventos extremos de chuva no município do Ipojuca, Pernambuco**. Revista de Geografia (UFPE), Pernambuco, v.32, N.2, 2015.

ELLIOT, W. P.; GAFFEN, D. J. *On the utility of radiosonde humidity archives for climate studies*. Bulletin American Meteorological Society. 1991.

EMBRACE/INPE. **O programa EMBRACE – sobre**. 2020. Disponível em: < <http://www2.inpe.br/climaespacial/portal/o-programa-embrace/>>. Acesso em: 09 junho. 2020.

EOS. **NASA’s Earth Observing System Project Science Office**. Project Science Office. 2019. Disponível em: < <https://eospsso.gsfc.nasa.gov/>>. Acesso em: 27 mai. 2020.

FINHOLDT, G. **Desenvolvimento e Avaliação de uma Estação Meteorológica Automática para Manejo de Irrigação**. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. Viçosa. 2008.

FONSECA, M. **Em apenas um mês, BH recebeu a chuva de um ano inteiro**. Jornal Estado de Minas. 2020. Disponível em: <https://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2020/01/30/interna_gerais,1118075/em- apenas-um-mes-bh-recebeu-a-chuva-de-um-ano-inteiro.shtml>. Acesso em: 03 jul. 2020.

G1. **Janeiro mais chuvoso da história de BH termina com quase o triplo da chuva esperada para o mês**. 2020a. Disponível em: <<https://g1.globo.com/mg/minas-gerais/noticia/2020/02/01/janeiro-mais-chuvoso-da-historia-de-bh-termina-com-quase-3-vezes-mais-chuva-que-a-media-esperada-para-o-mes.ghtml>>. Acesso em: 01 mai. 2020.

GLOBE. *Exploring the Intertropical Convergence Zone*. The Globe Program. 2013. Disponível em: <https://www.globe.gov/explore-science/scientists-blog/archived-posts/sciblog/index.html_p=1661.html>. Acesso em: 25 abr. 2020.

GRIMM, Alice Marlene. **Meteorologia básica**. 1999. Disponível em: <<http://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/>>. Acessado em: 04 mai. 2020.

GOUVEIA, Tayná Aparecida Ferreira. Modelagem Neutrosférica sobre a América do Sul baseada em PNT e assimilação de dados locais utilizando observações GNSS. Dissertação. Unidade Estadual Paulista UNESP. 2013

GOUVEIA, Tayná Aparecida Ferreira. **Função de mapeamento brasileira da atmosfera neutra e sua aplicação no posicionamento GNSS na América do Sul**. 2019. 129 f. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas) – Universidade Estadual Paulista (UNESP), Presidente Prudente.

GROVES, Paul D. *Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems*. U.S.A: Artech House, 2008. 517 p.

HEISE, S.; DICK, G.; SCHMIDT, T.; WICKERT J. *Integrated water vapor from IGS ground-based GPS observations: initial results from a global 5-min data set*. Annales Geophysicae. 2009.

HIRSCH, Robert P. *Introduction to Bioestatistical Applications in Health Research with Microsoft Office Excel*. Miley. 2016.

IGS-NETWORK. **IGS – Network**. 2020. Disponível em: <<http://www.igs.org/network>>. Acesso em: 09 junho. 2020.

IGS. **IGS – Products**. 2020. Disponível em: <<http://www.igs.org/products>>. Acesso em: 09 junho. 2019.

INMET. **Sobre meteorologia - instrumentos meteorológicos**. 2020a. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home/page&page=instrumentos>>. Acesso em: 25/07/2020.

INMET. **Sobre o INMET**. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home/page&page=sobre_inmet>. Acessado em: 15 mai, 2020.

KAROLY, D. *What is an Extreme Event?* University of Melbourne. 2014. Disponível em: <https://www.wcrp-climate.org/images/summer_school/ICTP_2014/documents/presentations/day1/Karoly_Extremes.pdf>. Acesso em: 25. Out. 2020

K-M, L.; YANG, S. *Walker Circulation*. Encyclopedia of Atmospheric Sciences. 2002.

KITCHEN, M. *Representativeness errors for radiosonde observations*. Q. J. R Meteorological Society. 1988.

LAADS DAAC. **Earth Data – Water Vapor**. Disponível em: <<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/missions-and-measurements/science-domain/water-vapor/>>. Acesso em: 25 abr. 2020.

LAZZAROTTO, C.; PEIXOTO, P.P.P. **Estação meteorológica da EMBRAPA-CPAO**. Dourados: EMBRAPA-CPAO, 1995. 24p.

LOUREIRO, R. S.; SARAIBA, J. M.; SARAIVA, I.; SENNA, R. C; FREDÓ, A. S. **Estudo dos eventos extremos de precipitação ocorridos em 2009 no estado do Pará**. Revista Brasileira de Meteorologia. Vol. 29. 2014.

MADDOX, R. A.; CHAPPEL, C. F.; HOXIT, L. R. *Synoptic and Meso-Scale Aspects of Flash Flood Events*. NOAA. Bulletin American Meteorological Society. 1979.

MARENGO, J. A.; CUNHA, a. p.; ALVES, L. M. **A seca de 2012-15 no semiárido do Nordeste do Brasil no contexto histórico**. 2016.

MARINI, John W. *Correction of satellite tracking data for an arbitrary tropospheric profile*. Radio Science, vol 7, 1972.

MARTINS, J.E.M.P; MODRO, N.R; SILVA, A.C.T; KUCHLER, O.A. **Sistema para aquisição de dados pluviométricos**. XXX Encontro Nacional de Engenharia de Produção. 2010.

MENDONÇA, F.; OLIVEIRA, I. M. D. **Climatologia – noções básicas e climas do Brasil** Oficina de Texto. 2 edição. 2011

MENEZES, A. C. S. **Desenvolvimento e Calibração de pluviômetros automáticos de baixo custo**. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. Juazeiro. 2019.

METRÓPOLE. **O que é um pluviômetro?**. 2011. Disponível em: <<https://meteoropole.com.br/2011/12/o-que-e-um-pluviometro/>>. Acessado em: 13 abr. 2020.

MIRANDA, Pedro M.A. **Introdução a meteorologia**. Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa. 2013.

MIRANDA, Ricardo Augusto Calheiros; OLIVEIRA, Marcus Vinicius Siqueira; SILVA, Danielle Ferreira. **Ciclo hidrológico planetário: abordagens e conceitos**. Universidade Estadual do Rio de Janeiro - UERJ. 2010.

MODIS. **Produtos do índice de vegetação MODIS (NDVI e EVI)**. 2020. Disponível em: <<https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/mod13.php>>. Acessado em: 03 jun. 2020.

MONICO, João Francisco Galera. **Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações**. 2 ed. São Paulo: Editora UNESP, 2008. 476 p.

MUNDO CLIMA. *Como funciona e quais as vantagens da estação meteorológica?*. Disponível em: <<http://blog.mundoclima.com.br/como-funciona-e-quais-as-vantagens-da-estacao-meteorologica/>>. Acessado em: 26 abr. 2020.

NASA. *Giovanni – The bridge between data and science*. Disponível em: <<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>>. Acesso em: 25 abr. 2020.

NASA, Science Mission Directorate. *"Introduction to the Electromagnetic Spectrum" NASA Science*. 2010. National Aeronautics and Space Administration. [insert date - e.g. 10 Aug. 2016a] http://science.nasa.gov/ems/01_intro

NASA-GPM, *The GPM Constellation*. Disponível em: <<https://gpm.nasa.gov/missions/GPM/constellation>>. Acesso em: 23 Jul. 2020.

NASA-NOAA. *Transforming energy into imagery. Geostationary Operational Environmental Satellites – R Series. A collaborative NOAA & NASA program*. 2020. Disponível em: <<https://www.goes-r.gov/featureStories/transformingEnergy.html>>. Acesso em: 27 mai. 2020.

NASA-NOAA. *Instruments: Advanced Baseline Imager (ABI)*. GOES-R. Disponível em: <<https://www.goes-r.gov/spacesegment/abi.html>>. Acesso em: 29 mai. 2020a.

NESDIS. *How Weather Satellites Changed the World*. 2008. Disponível em: <<https://www.nesdis.noaa.gov/content/our-satellites>>. Acesso em: 27 mai. 2020.

OLIVEIRA, Aureo S. **Fundamentos de meteorologia e climatologia**. Núcleo de Engenharia de Água e Solo da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia - NEAS/UFRB. 2016.

OLIVEIRA, Evaldo Vieira. **Meteorologia aplicada**. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia. Pernambuco, 2014.

OLIVEIRA, F. P.; AMORIM, H. S.; DERECZYNSKI, C.P. **Investigando a atmosfera com dados obtidos por radiossondas**. Revista Brasileira de Ensino de Física, vol 40. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2017.

OMM. *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation*. World Meteorological Organization, 1983.

OXFORD. *Oxford Dictionary*. Disponível em: <<https://www.oxfordlearnersdictionaries.com/>>. Acesso em: 16 nov. 2020.

PEGORIM, J. **São Paulo está tendo o fevereiro mais chuvoso em 77 anos**. Clima tempo – notícias. 2020. Disponível em: <<https://www.climatempo.com.br/noticia/2020/02/26/sao-paulo-esta-tendo-o-fevereiro-mais-chuvoso-em-77-anos-2103>>. Acesso em: 07 jul. 2020.

POLON, Luana. **Climas do Brasil – Tipos e mapas**. Estudo prático. 2019. Disponível em: <<https://www.estudopratico.com.br/climas-do-brasil-tipos-e-mapa/>>. Acesso em: 01 mai. 2020.

REDEMET. **Rede de estações meteorológicas**. Disponível em: <<https://www.redemet.aer.mil.br/?i=blog&id=1818>>. Acessado em: 30 abr. 2020.

RITTL Carlos. **Eventos Climáticos Extremos no Brasil**. São Paulo. WWF – Brasil/ FAPESP/IPC. 2012

ROCHA, Caroline R.Mazzoli; SILVA, Mariana Palagano R; VELLLOSO, Maria Francisca. **Curso básico de meteorologia e oceanografia**. Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ. 2006.

LO, J.; EL-MOWAFY, A. *Interpolation of the GNSS Wet Troposphere Delay*. Surveying and Spatial Sciences Biennial Conference. 2011.

RUFMANN, G. J. *NASA Global Precipitation Measurement (GPM) Integrated Multi-Satellite Retrievals for GPM (IMERG) – algorithm theoretical basis document*. NASA/GSFC. 2017.

SACE. **Manchas de inundação**. 2020a. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/sace/index_manchas_inundacao.php#>. Acesso em: 25 abr. 2020.

SALGUEIRO, João Hipólito Paiva de Britto. **Avaliação de rede pluviométrica e análise de variabilidade espacial da precipitação: estudo de caso na bacia do rio Ipojuca em pernambuco**. Universidade Federal de Pernambuco - UFPE. 2005.

SANTOS, Aderson Stanley Peixoto. **Sistema de calibração e teste de sensores de precipitação**. Dissertação. Projeto de iniciação científica. Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN, Natal, 2008.

SANTOS, Alexandre Rosa. **Precipitação atmosférica**. Departamento de Geografia/Climatologia. Universidade Federal do Espírito Santo - UFES. 2002.

SAPUCCI LF, MACHADO LAT & MONICO JFG. 2004. **Modelagem da temperatura média troposférica no Brasil para quantificação do IWV utilizando GPS**. In: Congr. Bras. Met., 13.: 2004, Fortaleza. Anais do XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia. Fortaleza: SBMET, 2004. CD-ROM.

SAPUCCI, L. F. **Estimativa do vapor d'água atmosférico e avaliação da modelagem do atraso zenital troposférico utilizando GPS**. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas. Faculdade de Ciências e Tecnologias – UNESP. Presidente Prudente, 2001.

SALGUEIRO, João Hipólito Paiva de Britto. **Avaliação de rede pluviométrica e análise de variabilidade espacial da precipitação: estudo de caso na bacia do Rio Ipojuca em Pernambuco**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2005.

SAASTAMOINEN, J. *Atmospheric Correction for the Troposphere and Stratosphere in Radio ranging of Satellites*. National Research Council of Canada, Ottawa – Canadá. 1972.

SCHOWENGERDT, R. A. *Remote Sensing – models and method for image processing*. Elsevier, 3 ed. 515p. Arizona, 2007.

SEEBER, Gunter. *Satellite Geodesy: Foundations, methods, and applications*. 2 ed. Berlin: Walter de Gruyter, 2003. 589 p.

SERRÃO, E.; WANZELER, R.; ASSIS, C.; LIMA, A. M. M. **Avaliação da seca de 2005 e 2010 na Amazônia: análise da bacia hidrográfica do Rio Solimões**. Revista Geográfica Acadêmica. DOI: 10.18227/1678-7226rga.v9i2.2945. 2015.

SILVA, Audenice. **Precipitações atmosféricas - pluviometria**. 2015. Disponível em: <<https://pt.slideshare.net/ronaldosantos33046/pluviometria>>. Acessado em: 13 abr. 2020.

SILVA, F. M.; CHAVES, M. S.; LIMA, Z. M. **Sistema de coleta de dados meteorológicos**. Geografia Física II. Universidade Federal da Paraíba. 2009.

SODRÉ, G. R. C.; RODRIGUES, L. L.L M. **Comparação entre estimativa da precipitação observada pela técnica CMORPH e estações meteorológicas do INMET em diferentes regiões do Brasil.** Revista Brasileira de Geografia Física. 2013.

SPIPKER, J. J.; PARKINSON, B. W. *Overview of GPS Operation and Design.* American Institute of Aeronautics and Astronautics. 1994.

SCHOWENGERDT, R. A. *Remote Sensing: models and methods for image processing.* 3 ed. 2007.

STUDART, Ticiania Marinho de Carvalho. **Precipitação.** Notas de aula. 2004.

SUGAWARA, Márcio Takeshi. **Estudo de sensores de baixo custo para estação meteorológica automática.** Programa de pós-graduação. Universidade Federal de Viçosa. Minas Gerais, 2003.

TARBUCK, E.J; LUTGENS, F.K. *Ciencias de la Tierra.* Pearson Educacion S. A., Madrid. 2005.

TEUNISSEN, Peter J.G.; MONTENBRUCK, Oliver. Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems. 2017.

THAYER, Gordon D. *An improved for the radio refractive index of air.* Boulder, Colorado. 1974.

TERRA. *About Terra.* Disponível em: <<https://terra.nasa.gov/about>>. Acesso em: 30 abr. 2020.

TORRES, F. T. P.; MACHADO, P. J. O. **Introdução à Climatologia.** Ed. Geographica. 234 p. 2008.

TUNALI, E. OZLUDEMIR, M. T. *GNSS PPP with different troposphere models during severe weather conditions.* GPS Solutions. 2018.

UNESP. **A estação meteorológica de Presidente Prudente – SP.** Circuito Científico Cultural. FCT UNESP. Presidente Prudente. 2020. Disponível em:<https://www.fct.unesp.br/index.php?menu_esq1=4#!/extensao/circuito-cientifico-cultural/estacao-meteorologica/>. Acesso em: 25. jul. 2020.

USGS. **O ciclo d'água.** 2020. Disponível em: <https://www.usgs.gov/special-topic/water-science-school/science/o-ciclo-d-gua-water-cycle-portuguese?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects>. Acessado em: 02 jun. 2020.

VAREJÃO-SILVA, Mário Adelmo. *Meteorologia e climatologia.* Recife. Pernambuco, 2006.

YUDA, W. A., PRASETIE R., AS-SYAKUR R., OSAWA T., NAGAI. M. *Na assessment of IMERG rainfall products over Bali at multiple time scale*. E3S Web of Conferences. Indonesia. 2019.

WALKER, G. T. *World Weather V*. Memoirs of the Royal Meteorological Society. Vol. 5. 1932.

ZIPSER, Edward J.; LIU, Chuntao; NESBITT, Stephen William; YORTY, David P. *Where are the most intense thunderstorms on Earth?* Bulletin of the American Meteorological Society. 2006.

APÊNDICE A - DISPONIBILIDADE DOS DADOS

Figura A1 - Tabela de disponibilidade de dados para Belo Horizonte. Na primeira coluna a esquerda são mostrados os meses de março/2019 até março/2020; na primeira linha são mostrados os dias de 1 até 31. Para cada mês, cada linha representa uma fonte de dados: rosa – EMBRACE, azul – radiossonda (00h e 12h), amarelo – pluviômetros (CEMADEN e ANA), e verde – estação meteorológica. Os espaços em branco correspondem aos dias sem dados.

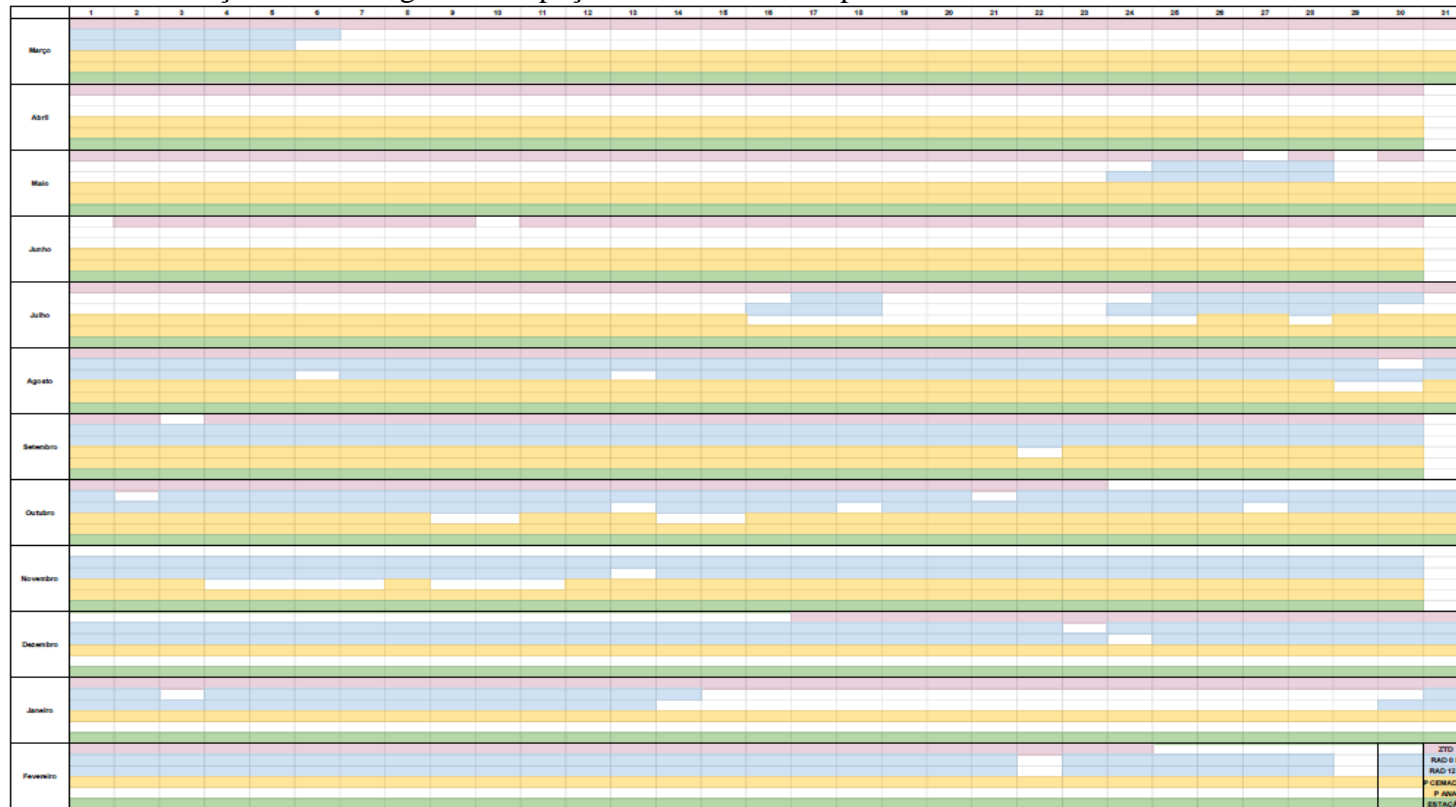


Figura A2 - Tabela de disponibilidade de dados para São Paulo. Na primeira coluna a esquerda são mostrados os meses de março/2019 até março/2020; na primeira linha são mostrados os dias

de 1 até 31. Para cada mês, cada linha representa uma fonte de dados: rosa – EMBRACE, azul – radiossonda (00h e 12h), amarelo – pluviômetros (CEMADEN e ANA), e verde – estação meteorológica. Os espaços em branco correspondem aos dias sem dados.

