



UFRJ

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE METEOROLOGIA

ALINE FIGUEIREDO GALVÃO

ANÁLISE DINÂMICA E TERMODINÂMICA DA ATMOSFERA ASSOCIADA A DOIS
EVENTOS DE PRECIPITAÇÃO INTENSA OCORRIDOS NA CIDADE DE PETRÓPOLIS

- RJ

Rio de Janeiro

2023

ALINE FIGUEIREDO GALVÃO

ANÁLISE DINÂMICA E TERMODINÂMICA DA ATMOSFERA ASSOCIADA A DOIS
EVENTOS INTENSOS DE PRECIPITAÇÃO OCORRIDOS NA CIDADE DE
PETRÓPOLIS – RJ

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Departamento de Meteorologia da
Universidade Federal do Rio de Janeiro, como
parte dos requisitos necessários à obtenção do
grau de Bacharel em Meteorologia.

Orientador: D.Sc. Fabricio Polifke da Silva

Rio de Janeiro

2023

ALINE FIGUEIREDO GALVÃO

ANÁLISE DINÂMICA E TERMODINÂMICA DA ATMOSFERA ASSOCIADA A DOIS
EVENTOS INTENSOS DE PRECIPITAÇÃO OCORRIDOS NA CIDADE DE
PETRÓPOLIS – RJ

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Departamento de Meteorologia da
Universidade Federal do Rio de Janeiro, como
parte dos requisitos necessários à obtenção do
grau de Bacharel em Meteorologia.

Avaliado por:

D.Sc. Fabricio Polifke da Silva (Orientador)
Departamento de Meteorologia - IGEO - UFRJ

D.Sc. Wallace Figueiredo Menezes
Departamento de Meteorologia - IGEO - UFRJ

D.Sc. Wanderson Luiz Silva
Departamento de Meteorologia - IGEO - UFRJ

Rio de Janeiro

2022

Dedico este trabalho à minha família, amigos e todas(os) que de alguma forma convivi durante esse momento. Sinto-me honrada em saber que meu conhecimento foi adquirido por um coletivo de diferentes graus e esferas.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer à minha família, por toda a ajuda e motivação para fazer essa faculdade e por todo apoio nas decisões que tomei até aqui.

Aos meus amigos de curso, principalmente Andressa Migando, Jéssica Lobato (amiga e ex-roomie), Leonardo Lotsch e Rebecca Goldvag, que vou levar para vida e sempre me ajudaram em provas, trabalhos, além das companhias nos momentos bons e ruins. As horas de estudo e fofocas com vocês durante a pandemia me ajudaram a passar por essa fase de uma forma mais leve, dentro do possível. Agradeço também as pessoas que passaram pelo curso, mas ficaram na minha vida, principalmente Babi (Barbara Lotsch) e Jamal (Ygor Nascimento).

Ao meu namorado Alexandre Nascimento, que esteve presente durante toda a minha faculdade e pelo acolhimento durante as horas de desespero do TCC.

Agradecer as orientadoras que tive fora da faculdade, Camila Frez e Christiane Osorio, que contribuem para o meu crescimento profissional e acadêmico. Aos meus colegas de trabalho do ONS por todas as dicas e conselhos. Um agradecimento em especial ao meu orientador acadêmico Fabricio Polifke, que me ajudou muito nesse trabalho e me ensinou demais, sou grata por toda paciência e empenho.

Aos professores do Departamento de Meteorologia da UFRJ, muito obrigada por todo o apoio e paciência durante esses anos. A Rosi, secretária do Departamento de Meteorologia, que nunca me negou ajuda nos meus momentos de apertos com as documentações, que não foram poucos.

De modo geral, agradeço a todas(os) que contribuíram direta ou indiretamente para minha formação acadêmica e pessoal.

RESUMO

GALVÃO, Aline Figueiredo. **Análise dinâmica e termodinâmica da atmosfera associada a dois eventos intensos de precipitação ocorridos na cidade de Petrópolis – RJ**. Monografia (Graduação em Meteorologia) – Instituto de Geociências. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2023.

Em 15 de fevereiro de 2022, fortes chuvas provocaram deslizamentos de terra e enchentes que causaram uma série de destruições na cidade de Petrópolis, sendo decretado estado de calamidade pública. Em um intervalo de pouco mais trinta dias, outro evento de chuvas fortes ocasionou inundações e deslizamentos na região no dia 20 de março. Tais ocorrências consolidam assim que a identificação e análise das tempestades extremas associadas a episódios de desastres socioambientais é de fundamental importância para a segurança da sociedade. Inserido neste contexto, este trabalho tem como objetivo analisar os dois respectivos eventos de chuvas intensas ocorridos em fevereiro e março de 2022 em Petrópolis, com ênfase em averiguar as condições e padrões dinâmicos e termodinâmicos associados os altos volumes de chuva observados. Os resultados mostram que os maiores acumulados de precipitação em ambos os casos ocorreram no Distrito 1º da cidade de Petrópolis, que é uma das áreas mais urbanizadas da cidade. Em relação à escala temporal dos eventos, no dia 20 de março, registrou-se os maiores acumulados em 24 horas, enquanto no evento do dia 15 de fevereiro, a precipitação apresentou um maior volume em um curto período, isso devido ao intervalo de ocorrência do evento de março ser maior que o evento de fevereiro. Em ambas as situações, identificou-se a atuação de uma frente fria, sendo para fevereiro uma situação pós passagem do sistema frontal e em março a frente apresentou deslocamento sobre a região de interesse no dia do evento. Na análise dos indicadores de formação e suporte de tempestades, o caso de março mostrou uma melhor representação espacial e quantitativa. No entanto, a distribuição espacial dos indicadores termodinâmicos CAPE, TT e K sobre o estado do Rio de Janeiro, apresentaram valores mais intensos do que os observados no estudo de caso de março.

Palavras-chave: Petrópolis, Desastres Socioambientais, Tempestades Intensas.

ABSTRACT

GALVÃO, Aline Figueiredo. **Dynamic and thermodynamic analysis of the atmosphere associated with two intense precipitation events that occurred in the city of Petrópolis - RJ.** Monografia (Graduação em Meteorologia) – Instituto de Geociências. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2022.

On February 15th, 2022, heavy rains caused landslides that left the city of Petrópolis in a state of public calamity. In an interval of approximately thirty days, another event of heavy rain caused floods and landslides in the region on March 20th. Such occurrences consolidate the importance of identification and analysis of extreme storms associated with episodes of socio-environmental disasters in order to keep the society safe. In this context, this work aims to analyze two heavy rainfall events that occurred in February and March 2022 in Petrópolis, emphasizing on investigating the conditions associated with high volumes of rain observed, and also the dynamic and thermodynamic patterns of those events. The results show that the highest accumulated precipitation in both cases occurred in the 1st District of the city, which is one of the most urbanized areas of the city. Regarding the time scale of the events, the event of March 20th presented the highest accumulated in 24 hours, however on February 15th the occurrence of precipitation presented a greater volume in a short period, due to the longer occurrence interval of the March event compared to the February event. In both situations, the performance of a cold front was identified, while in February this event occurred after the passage of the system, in March the front presented displacement over the region of interest on the day of the event. In the analysis of the storm formation and support indicators, the case of March showed a better spatial and quantitative representation. However, the spatial distribution of the thermodynamic indicators CAPE, TT and K over the state of Rio de Janeiro exhibited more intense values than those observed in the March case study.

Keywords: Petrópolis, Socio-environmental Disasters, Intense Storms.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Registros do desastre ocorrido em 15 de fevereiro de 2022 (Fonte: BBC News Brasil, 2022)	12
Figura 2: Registro do desastre ocorrido em 20 de março de 2022 (Fonte: Agência Brasil, 2022)	13
Figura 3: Modelo conceitual do JBNAS (Fonte: adaptado de Marengo <i>et al.</i> , 2009)	17
Figura 4: Circulação atmosférica em baixos, médios e altos níveis em eventos de ZCAS (Fonte: Silva <i>et al.</i> , 2019)	19
Figura 5: - Definições de escalas e diferentes fenômenos atmosféricos de acordo com as escalas temporal e espacial segundo Orlanski (1975)	20
Figura 6: Efeito combinado da topografia e do escoamento atmosférico (Fonte: Reboita <i>et al.</i> , 2012)	21
Figura 7: Totais pluviométricos (mm) anuais no estado do Rio de Janeiro. Valores médios no período 1961 – 2012 a partir dos dados observacionais do INMET, da ANA e do Alerta Rio (Fonte: Silva e Dereczynski, 2014)	24
Figura 8: Delimitação espacial de grupos homogêneos de chuva sobre a cidade de Petrópolis durante cheias do rio Quitandinha no período de janeiro de 2013 e dezembro de 2014 (Fonte: Silva <i>et al.</i> , 2020)	25
Figura 9: Mapa de altimetria (m) de Petrópolis com a localização da cidade dentro do estado do Rio de Janeiro	27
Figura 10: Localização dos Distritos de Petrópolis (Fonte: Costa <i>et al.</i> , 2022)	27
Figura 11: Localização da estação do INEA dentro de Petrópolis	29
Figura 12: Procedimento utilizado por Silva (2019) para agrupar os eventos estudados (Fonte: Silva, 2019)	30
Figura 13: Acumulado de precipitação em 1 hora para o posto Cel. Veiga	35
Figura 14. Máxima precipitação acumulada nos pluviômetros em intervalos de 1 hora, 6 horas e 24 horas, durante os eventos de chuva intensa de (a) 15 de fevereiro de 2022 e (b) 20 de março de 2022	36
Figura 15: Imagens do satélite GOES-16 do canal 13 para a) 00UTC de 15/02, b) 06UTC de 15/02, c) 12 UTC de 15/02 e d) 18UTC de 15/02 (Fonte: Acervo CPTEC-INPE)	38
Figura 16: Campos meteorológicos para 12Z de 15 de fevereiro de 2022: (a) Linha de corrente e Umidade Específica (g/kg - sombreado) em 850 hPa ; (b) Convergência do Vento (10-4/s -	

sombreado) em 850 hPa e Pressão ao Nível Médio do Mar (hPa - linha contínua); (c) Linha de corrente e Intensidade do Vento (m/s - sombreado) em 250 hPa; (d) Divergência do Vento (10-4/s - sombreado) em 250 hPa e Pressão ao Nível Médio do Mar (hPa - linha contínua preta); (e) Vorticidade Relativa (10-5/s - sombreado) em 1000 hPa, Pressão ao Nível Médio do Mar (hPa - linha contínua preta) e Altura Geopotencial em 500 hPa (m_gp - linha tracejada cinza) 39

Figura 17: Imagens do satélite GOES-16 do canal 13 para a) 06UTC de 20/03, b) 12UTC de 20/03, c) 18 UTC de 20/03 e d) 00UTC de 21/03 (Fonte: Acervo CPTEC-INPE) 41

Figura 18: Campos meteorológicos para 12Z de 20 de março de 2022: (a) Linha de corrente e Umidade Específica (g/kg - sombreado) em 850 hPa ; (b) Convergência do Vento (10-4/s - sombreado) em 850 hPa e Pressão ao Nível Médio do Mar (hPa - linha contínua); (c) Linha de corrente e Intensidade do Vento (m/s - sombreado) em 250 hPa; (d) Divergência do Vento (10-4/s - sombreado) em 250 hPa e Pressão ao Nível Médio do Mar (hPa - linha contínua preta); (e) Vorticidade Relativa (10-5/s - sombreado) em 1000 hPa, Pressão ao Nível Médio do Mar (hPa - linha contínua preta) e Altura Geopotencial em 500 hPa (m_gp - linha tracejada cinza) 42

Figura 19: Convergência dos ventos em 850 hPa obtida através da reanálise ERA 5 para três instantes de tempo distintos, T₀ (coluna à esquerda), T_i (coluna central) e T_f (coluna à direita), para o evento de 15 de fevereiro (linha superior) e 20 de março (linha inferior) 44

Figura 20: Divergência dos ventos em 250 hPa obtida através da reanálise ERA 5 para três instantes de tempo distintos, T₀ (coluna à esquerda), T_i (coluna central) e T_f (coluna à direita), para o evento de 15 de fevereiro (linha superior) e 20 de março (linha inferior) 44

Figura 21: Velocidade vertical do vento em 500 hPa obtida através da reanálise ERA 5 para três instantes de tempo distintos, T₀ (coluna à esquerda), T_i (coluna central) e T_f (coluna à direita), para o evento de 15 de fevereiro (linha superior) e 20 de março (linha inferior) 45

Figura 22: Umidade específica em 500 hPa obtida através da reanálise ERA 5 para três instantes de tempo distintos, T₀ (coluna à esquerda), T_i (coluna central) e T_f (coluna à direita), para o evento de 15 de fevereiro (linha superior) e 20 de março (linha inferior) 45

Figura 23: Índice K obtido através da reanálise ERA 5 para três instantes de tempo distintos, T₀ (coluna à esquerda), T_i (coluna central) e T_f (coluna à direita), para o evento de 15 de fevereiro (linha superior) e 20 de março (linha inferior) 46

Figura 24: Índice TT obtido através da reanálise ERA 5 para três instantes de tempo distintos, T₀ (coluna à esquerda), T_i (coluna central) e T_f (coluna à direita), para o evento de 15 de fevereiro (linha superior) e 20 de março (linha inferior) 46

Figura 25: CAPE obtido através da reanálise ERA 5 para três instantes de tempo distintos, T0 (coluna à esquerda), Ti (coluna central) e Tf (coluna à direita), para o evento de 15 de fevereiro (linha superior) e 20 de março (linha inferior) 47

Figura 26: Linhas horizontais verde e laranja representam, respectivamente, o estudo de caso de fevereiro e de março de 2022 e as linhas verticais preta o início da precipitação. Sendo: a) Convergência do vento em 850 hPa; b) Divergência do vento em 250 hPa; c) Vorticidade relativa em 1000 hPa; d) Velocidade Vertical em 500 hPa 49

Figura 27: Linhas horizontais verde e laranja representam, respectivamente, o estudo de caso de fevereiro e de março de 2022 e as linhas verticais preta o início da precipitação. Sendo: a) CAPE; b) Índice K; c) Índice TT 50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Indicadores dinâmicos e termodinâmicos	22
Tabela 2: Precipitação acumulada em 1 hora entre 17 UTC - 15/02/2022 e 00 UTC - 16/02/2022 para as estações disponíveis. As colunas das estações apresentam um sombreamento em vermelho para os acumulados igual a zero e em azul para > 0 . A última coluna exibe o máximo de precipitação para aquela hora	32
Tabela 3: Precipitação acumulada em 1 hora entre 16 UTC - 20/03/2022 e 06 UTC - 21/03/2022 para as estações disponíveis. As colunas das estações apresentam um sombreamento em vermelho para os acumulados igual a zero e em azul para >0 . A última coluna exibe o máximo de precipitação para aquela hora	33
Tabela 4: Acumulados de chuva registrados nos postos pluviométricos entre o dia 15/02 e 16/02	34
Tabela 5: Acumulados de chuva registrados nos postos pluviométricos entre o dia 20/03 e 21/03	35

LISTA DE SIGLAS

AB - Alta da Bolívia

ASAS - Alta Subtropical do Atlântico Sul

CAPE - *Convective Available Potential Energy*

CT - *Cross Totals*

DAS - Divisão de Satélite Ambientais

ECMWF - European Centre for Medium-Range Weather Forecast

ERA5 - *ECMWF Reanalysis Version5*

INEA - Instituto Estadual do Ambiente

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

JBN - Jato de Baixo Nível

JBNA - Jato de Baixo Nível da América do Sul

NCEP - *National Centers for Environmental Prediction*

SGB - Serviço Geológico do Brasil

TT - *Índice Total Totals*

VT - *Vertical Totals*

ZCAS - Zona de Convergência do Atlântico Sul

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 OBJETIVO	13
2 REVISÃO DE LITERATURA	15
2.1 SISTEMAS ATUANTES NA AMÉRICA DO SUL	15
2.1.1 SISTEMAS FRONTAIS	15
2.1.2 JATOS DE BAIXOS NÍVEIS	16
2.1.3 ZONA DE CONVERGÊNCIA DO ATLÂNTICO SUL	18
2.2 ESCALAS TEMPORAL E ESPACIAL E DESNVOLVIMENTO DE TEMPESTADES	19
2.3 INDICADORES TERMODINÂMICOS E DINÂMICOS	21
2.4 PRECIPITAÇÃO NO ESTADO DO RIO DE JANEIRO	23
3 METODOLOGIA	26
3.1 REGIÃO DE ESTUDO	26
3.2 DADOS USADOS NA ANÁLISE SINÓTICA	28
3.3 DADOS PLUVIOMÉTRICOS	28
3.4 INDICADORES DINÂMICOS E TERMODINAMOCOS	29
4 RESULTADOS.	31
4.1 DADOS OBSERVADOS	31
4.2 ANÁLISE SINÓTICA DOS EVENTOS	36
4.2.1 CONDIÇÃO SINÓTICA DO DIA 15/02/202	37
4.2.1 CONDIÇÃO SINÓTICA DO DIA 20/03/2022	40
4.3 COMPOSTOS DOS INDICADORES TERMODINÂMICOS E DINÂMICOS	43
4.3.1 ANÁLISE ESPACIAL	43
4.3.2 ANÁLISE DA EVOLUÇÃO TEMPORAL	47
5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS	51
6 PROPOSTAS FUTURAS	52
6 REFERÊNCIAS	53

1 INTRODUÇÃO

Um evento é geralmente considerado extremo quando se encontra acima ou abaixo de um valor limite próximo às extremidades da sua distribuição estatística (IPCC, 2021). De acordo com o sexto relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas, as variações do clima estão ocorrendo de forma mais rápida e intensa do que o projetado em estudos anteriores. Assim, a probabilidade de eventos extremos pode crescer com o aumento da temperatura média global nos cenários de mudanças climáticas, que são causadas e aceleradas pela interferência antrópica (IPCC, 2021).

Quando fenômenos intensos, como inundações, escorregamentos e secas, ocorrem em locais onde os seres humanos vivem, resultando em danos (materiais e humanos) e prejuízos (socioeconômico) são considerados como “desastres naturais” (KOBİYAMA et al., 2006). No entanto, os desastres não devem ser percebidos apenas como eventos únicos, pois os mesmos estão associados a conjunturas sociais, econômicas, culturais e naturais que exprimem contextos específicos (LOPES, 2013). Considerar os eventos extremos de precipitação e/ou geografia física como os únicos causadores de episódios de desastres ambientais é uma compreensão equivocada, que desconsidera todas as circunstâncias presentes. Nesse contexto, este trabalho usará o termo “desastre socioambiental”, para evidenciar toda a conjuntura da situação, na qual os desastres são consequências de ocorrências naturais associadas com questões sociais, econômicas e políticas.

O modo de produção capitalista promove a exploração da natureza, levando a uma utilização de espaços naturais para gerar lucros ao capital e alavancando uma urbanização desordenada. Além disso, a política de estado mínimo, tem levado a uma escassez nos investimentos em políticas públicas que garantam o mínimo de direitos sociais, como segurança, saúde e moradia. Assim, a população é submetida a habitar regiões geograficamente precárias e vulneráveis a desastres socioambientais, como encostas (WISNER et al., 2003).

Guerra *et. al* (2007) relatam que o aumento da ocupação de áreas pelas atividades antrópicas desencadeia reações, que associadas ao mau uso, manejo e conservação dos solos, vêm gerando problemas ambientais, principalmente em áreas de topografia acidentada, como ocorre, por exemplo, no município de Petrópolis que ainda são agravados pelo desmatamento e ocupação desordenada das encostas. No caso de Petrópolis, a desestabilização das encostas, feita pela construção de casas populares e condomínios, tem provocado o desencadeamento de uma série de problemas ambientais, principalmente quando não existe uma legislação urbanística em sintonia com as limitações físicas, ou quando, apesar de sua existência, ela não

consegue ser colocada em prática de forma eficaz, como é o caso da área urbana, estabelecida no 1º e 2º distritos de Petrópolis.

Na cidade de Petrópolis, a importância do relevo acidentado e a proximidade com o Atlântico atuam como um gatilho para a ascendência orográfica do ar úmido e formação de maiores acumulados de precipitação na região centro-sul da cidade (SILVA, 2019). A formação, magnitude e variabilidade temporal e espacial dos eventos severos de precipitação, em conjunto com a geografia local, são essenciais para o entendimento e contribuição na identificação das condições que podem levar a um desastre socioambiental. Neste contexto, o estudo de indicadores índices termodinâmicos e dinâmicos que quantitativamente expressam o ambiente atmosférico favorável ao desenvolvimento convectivo, de forma a permitir que sejam utilizados como ferramentas para as rotinas operacionais, se caracteriza como uma linha de pesquisa científica e operacional a ser realizada continuamente visando o aprimoramento da previsão de fortes chuvas (Nascimento, 2005; Silva *et al.*, 2018; Silva, 2019).

Durante os meses de verão do Brasil (novembro a março) a ocorrência de chuvas fortes é comum na cidade (BRITO et al., 2017). Em 15 de fevereiro de 2022, fortes chuvas provocaram deslizamentos de terra que deixaram a cidade de Petrópolis em estado de calamidade pública. Segundo o Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM), foram registrados 233 mortes e 4 desaparecimentos. Em intervalo de pouco mais de trinta dias, outro evento de chuvas fortes ocasionou inundações e deslizamentos na região no dia 20 de março.

As Figuras 1 e 2 trazem exemplos das consequências associadas aos eventos de fevereiro e março de 2022, respectivamente. Tais ocorrências consolidam assim que o estudo regional das condições atmosféricas favoráveis ao desenvolvimento de chuvas intensas e o seu uso operacional é de extrema importância para a segurança da sociedade.



Figura 1: Registros do desastre ocorrido em 15 de fevereiro de 2022 (Fonte: BBC News Brasil, 2022).



Figura 2: Registro do desastre ocorrido em 20 de março de 2022 (Fonte: AgênciaBrasil, 2022).

Segundo Nascimento (2005) a previsão de tempo severo no Brasil precisa ser discutida, e para isto, é necessário: conhecer melhor os ambientes atmosféricos sinóticos e de mesoescala propícios ao desenvolvimento de tempestades severas no Brasil; estudar procedimentos que maximizem a extração de informação relevante dos dados observados e de modelos de mesoescala que identifiquem estes ambientes atmosféricos, visando uma implementação operacional.

Nesse contexto, este trabalho tem como motivação contribuir para avaliações de padrões associados à chuva no espaço e no tempo, com o intuito de auxiliar na prevenção e compreensão de desastres socioambientais associados à eventos extremos de chuva na cidade de Petrópolis.

1.1 OBJETIVO

Geral

O objetivo geral deste trabalho é realizar um estudo de caso de dois eventos de chuvas intensas que ocorreram na cidade de Petrópolis em 15 de fevereiro e 20 de março de 2022 com a finalidade de avaliar as condições dinâmicas e termodinâmicas que favoreceram a formação dos altos volumes de chuva observados.

Específicos

- Identificar os sistemas sinóticos atuantes sobre o Brasil, com ênfase na região Sudeste, nos dias 15 de fevereiro e 20 de março de 2022, visando compreender o papel dos mesmos para a geração das chuvas intensas que ocorreram na cidade de Petrópolis;

- Analisar indicadores dinâmicos e termodinâmicos da atmosfera visando detectar possíveis características associados a formação e manutenção das chuvas para os dois previamente dias selecionados;

- Realizar uma análise comparativa dos resultados para os dois eventos estudados visando encontrar similaridades no comportamento dos indicadores dinâmicos e termodinâmicos antes, durante e após a ocorrência das chuvas.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 SISTEMAS ATUANTES NA AMÉRICA DO SUL

A distribuição espacial da América do Sul, em diferentes latitudes e com formas de relevo variadas, proporciona a atuação e o desenvolvimento de diferentes sistemas atmosféricos, que contribuem para a não homogeneidade climática da região (REBOITA *ET AL.*, 2010). No entanto, apesar da grande variabilidade dos sistemas atuantes nas condições de tempo do continente, serão apresentados apenas os conhecimentos meteorológicos básicos para a compreensão daqueles que incidem no estado do Rio de Janeiro e influenciam na precipitação.

2.1.1 SISTEMAS FRONTAIS

Um sistema frontal clássico é composto por uma frente fria, uma frente quente e um centro de baixa pressão em superfície. Trata-se de um dos maiores causadores de distúrbios meteorológicos sobre o país e atuante durante o ano todo (LEMOS E CALBETE, 1996). A passagem do sistema é responsável por mudanças nas condições de tempo e ocorrência de precipitação.

No Brasil, as regiões Sul e Sudeste foram consideradas por Satyamurty e Mattos (1989) como frontogenéticas, ou seja, regiões onde as frentes podem se formar ou intensificar. As frentes frias, geralmente, deslocam-se de sudoeste para nordeste sobre o continente e o oceano Atlântico (CAVALCANTI e KOUSKY, 2009). Ocorre uma diminuição do número de ocorrência das latitudes mais altas para as mais baixas (ANDRADE, 2005; CAVALCANTI e KOUSKY, 2009)

No inverno, as frentes frias são mais frequentes e intensas em decorrência, especialmente, de um maior contraste térmico que facilitam o a sua formação e deslocamento das frentes para latitudes mais baixas (CAVALCANTI e KOUSKY, 2009; ANDRADE, 2005). Já nos meses de verão, elas são menos frequentes. No entanto, durante o verão, quando esses sistemas frontais avançam para norte, a interação com o ar úmido e quente tropical pode favorecer a formação de tempestades convectivas e chuvas fortes e alimentam a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) (CAVALCANTI e KOUSKY, 2009).

Justi da Silva e Silva Dias (2002) fizeram uma climatologia dos sistemas frontais, a partir de dados de Reanálise do National Centers for Environmental Prediction (NCEP), utilizando como critério de identificação a mudança do sinal da componente meridional do

vento em cada ponto de grade para o período entre 1981 e 1999. Os resultados mostraram que, nas regiões Sul e Sudeste do Brasil os ventos em baixos níveis têm direção predominante de nordeste, por conta da influência da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) e, em uma situação pré-frontal, o vento é tipicamente de nordeste girando de sudoeste e de sudeste, à medida que a frente se desloca (apud CAVALCANTI e KOUSKY, 2009).

Uma climatologia dos sistemas frontais na América do Sul, entre 1980 e 2002, foi realizado por Andrade (2005) com base nas Reanálises do NCEP/NCAR. Para identificar uma frente fria Andrade considerou aumento da pressão ao nível médio do mar, queda de temperatura e mudança na componente meridional do vento em 925 hPa, de um dia para o outro. Seus resultados mostraram que, na área que compreende parte da região litorânea da Região Sudeste (25-20°S, 48-43°W), o máximo se dá no mês de outubro (6), o mínimo ocorre em janeiro e fevereiro, e a média é de 5 sistemas frontais por mês durante o ano. Nas áreas posicionadas pelo interior, incluindo o interior da Região Sudeste (25-20°S, 53-48°W), nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro há menos atuação de frentes, ou seja, no verão os sistemas não conseguem penetrar pelo interior com tanta frequência.

Após a passagem dos sistemas frontais há a atuação do anticiclone migratório na retaguarda do sistema, que por vezes promove precipitação sobre a cidade do Rio de Janeiro, trazida pelos ventos do oceano em direção ao continente de quadrante sul. Os casos de pós frontal são mais frequentes no outono, sendo os meses de maio e julho os de maior frequência de ocorrência (BONNET, 2017).

A orografia tem como papel bloquear e modificar o escoamento de sistemas sinóticos que por ela se deslocam (FOSS, 2016). Em episódios pós-frontais a circulação litorânea direcionada para o continente sudeste contra a barreira orográfica da região Sudeste do Brasil, promovem a intensificação da chuva localmente (BLANCO, 1999; CHOU *et al.*, 2006).

2.1.2 JATOS DE BAIXOS NÍVEIS

O Jato de Baixo Nível (JBN) representa um escoamento intenso, com máximo de vento situado entre os 1-2 km de altura, e são observados à leste de grandes cadeias de montanhas ou sobre setores de intensos gradientes de temperatura (STENSRUD, 1996). Os JBNs estão vinculados às oscilações diurnas para a produção dos ventos máximos (BONNER, 1968). Eles desempenham uma característica relevante da circulação de baixo nível e desempenha um papel relevante no transporte em direção aos polos de ar quente e úmido (STENSRUD, 1996; VERA *et al.*, 2006).

Na América do Sul, o JBN é conhecido como Jato de Baixo Nível da América do Sul (JBNA), sendo caracterizado por um escoamento meridional a leste da Cordilheira dos Andes, que se dirige da Amazônia para os subtrópicos, transportando massa de ar úmida durante o ano inteiro (MARENGO et al., 2004; VERA et al., 2006). A Figura 3 mostra o modelo conceitual da configuração do JBNA. Em relação ao ciclo anual do posicionamento do JBNA, Marengo et al. (2004), mostra em seu trabalho que durante o período de verão, a umidade é oriunda, em grande parte, da região amazônica. Enquanto no inverno, mesmo ocorrendo transferência de umidade da Amazônia, nota-se um transporte de origem oceânica relacionado a ASAS. Na relação JBN e a ZCAS, Nogués-Paegle e Mo (1997) indica que o JBN desenvolve uma atuação na intensificação e localização da ZCAS, propicia uma gangorra de precipitação entre o Sudeste do Brasil e o Sudeste da América do Sul. Quando o JBN se dirige para o Sudeste do Brasil há intensificação da ZCAS com o consequente aumento de precipitação nessa região; quando se dirige para o Sudeste da América do Sul, há enfraquecimento e redução da precipitação no Sudeste do Brasil, gerando um sinal de anomalia positiva de precipitação em uma região, em decorrência de redução em outra (SILVA *et al.*, 2019).

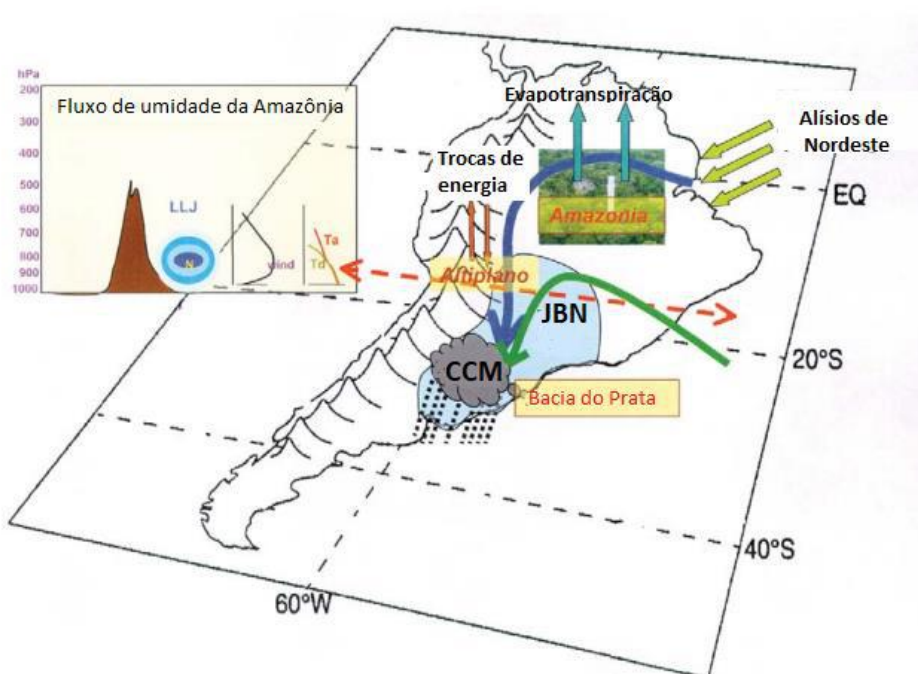


Figura 3: Modelo conceitual do JBNAS, que transporta umidade da Amazônia (flecha azul) e do oceano Atlântico subtropical (flecha verde) (Fonte: adaptado de Marengo *et al.*, 2009).

Campetella e Vera (2002), mostraram que a posição dos sistemas de baixa pressão (ciclones) modula a orientação do JBN para a região deles, de forma que o calor e umidade

transportados pelo jato favorecem os ciclones. Nessa situação, há um mecanismo de retroalimentação, ocasionando um ambiente propício à manutenção da ZCAS, já que está ocorrendo suprimento de umidade (CARVALHO et al., 2002; SILVA et al., 2019).

2.1.3 ZONA DE CONVERGÊNCIA DO ATLÂNTICO SUL

Na região sudeste do Brasil, a ZCAS é um dos principais responsáveis pela distribuição da precipitação na região, durante o verão. Ela é caracterizada por uma banda de nebulosidade e precipitação orientada no sentido noroeste e sudeste, que se estende do sudeste da bacia amazônica até o Atlântico (KODAMA, 1992).

A Alta da Bolívia (AB) juntamente com um cavado a leste, cavado no Nordeste do Brasil, contribui para fortalecer a ZCAS e torná-la estacionária (SILVA DIAS et al. 1983; SILVA DIAS 1985; CARVALHO & JONES 2009). A figura 4 mostra um modelo conceitual da circulação atmosférica durante eventos de ZCAS. Em baixos níveis (850 hPa), o escoamento oriundo da canalização dos alísios que adentram o continente em direção ao sudeste do Brasil, sendo essa circulação favorecida pelo JBNAS, converge com o escoamento existente devido ao posicionamento da ASAS. A presença de um cavado em níveis médios e altos da atmosfera entre o Sul do Brasil e oceano Atlântico, dá suporte para a divergência em altos níveis e ocorrência de movimentos ascendentes na região. Em altos níveis, há a presença da AB e um cavado sobre a Região Nordeste do Brasil (NOGUÉS-PAEGLE & MO, 1997; CARVALHO & JONES 2009; SILVA et al., 2019).

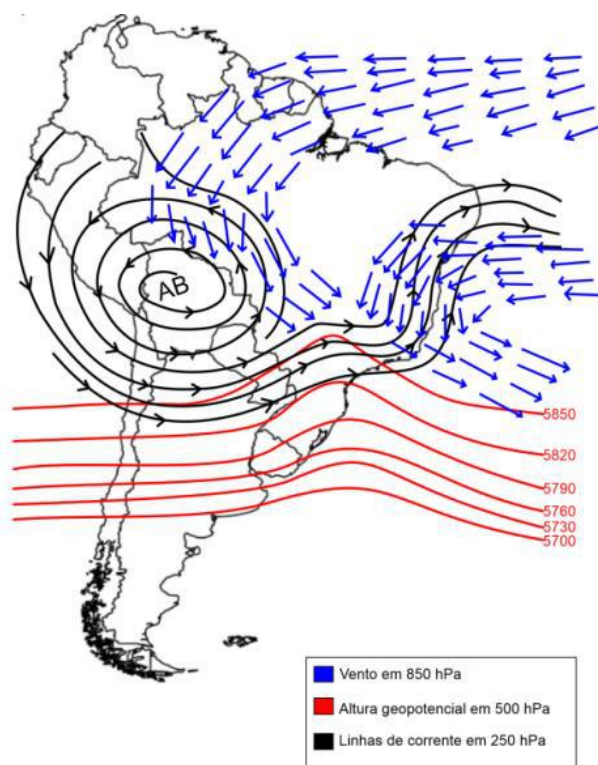


Figura 4: Circulação atmosférica em baixos, médios e altos níveis em eventos de ZCAS (Fonte: Silva et al., 2019).

2.2 ESCALAS TEMPORAL E ESPACIAL E DESENVOLVIMENTO DE TEMPESTADES

Quando se estuda um evento meteorológico, deve-se levar em consideração os aspectos da extensão do espaço e tempo. Diferentes tipos de escalas foram propostos para classificar e identificar os fenômenos meteorológicos, sendo um dos esquemas mais utilizado proposto por Orlanski (1975). A partir da classificação de Orlanski (1975) (Figura 5), na microescala, subdividida em α , β e γ , pertence os fenômenos com escala espacial horizontal da ordem de dezenas a centenas de metros e escala temporal da ordem de minutos, com trocas de calor e umidade próximas ao solo. Sistemas na ordem de 2 a 2000 km estão dentro da mesoescala, com as seguintes subdivisões: meso- α (200 a 2000 km e de um dia a uma semana) encontram-se sistemas tais como frentes frias, furacões e complexos convectivos de mesoescala; meso- β (20 a 200 km e de várias horas a um dia) inclui os sistemas como jatos noturnos de baixos níveis, linhas de instabilidade, aglomerados de Cumulonimbus e brisas de vale-montanha e terrestre-marítima; meso- γ (2 a 20 km e de meia hora a várias horas), as tempestades isoladas ou Cumulonimbus isolados, ondas de gravidade interna, turbulência em céu claro e efeitos urbanos. Na macroescala, encontra-se sistemas de escalas espaciais horizontais maiores do que 2000 km e escalas temporais da ordem de semanas a meses.

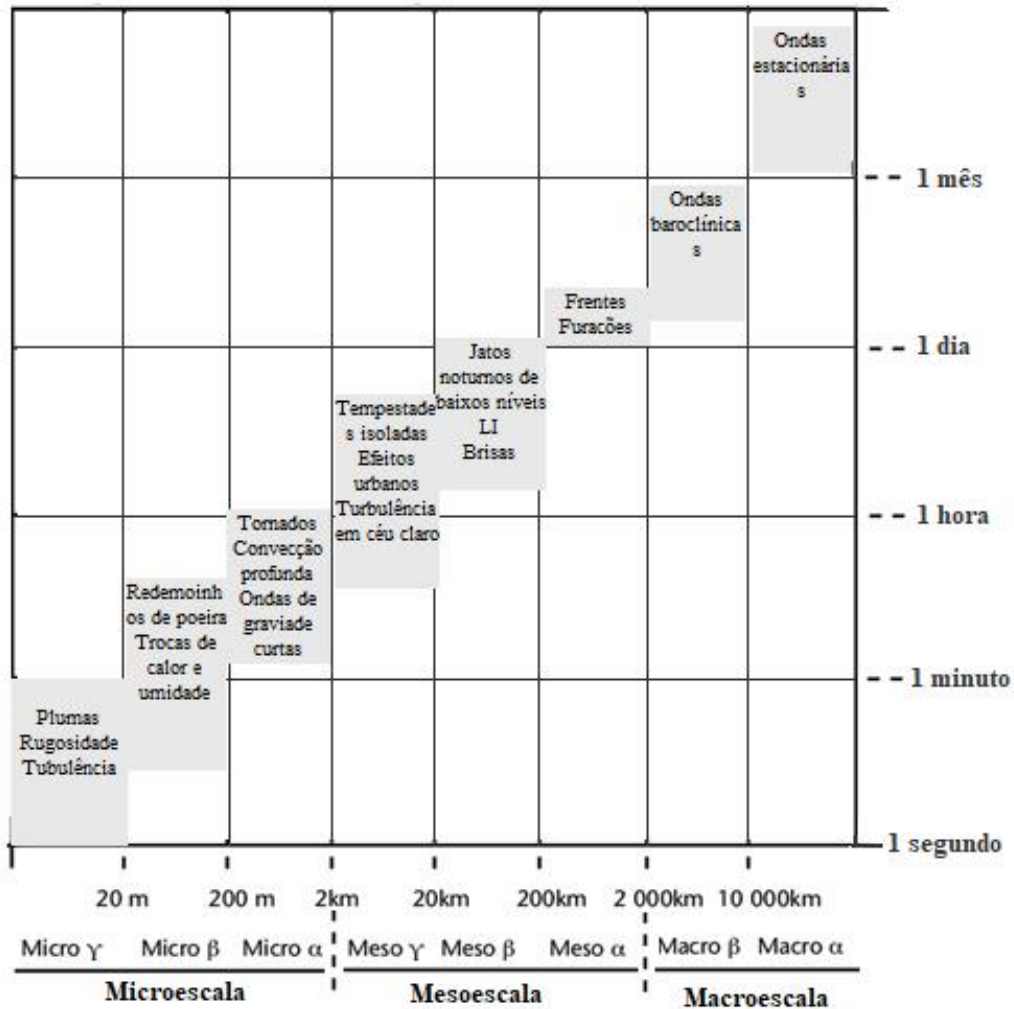


Figura 5: - Definições de escalas e diferentes fenômenos atmosféricos de acordo com as escalas temporal e espacial (Fonte: adaptado Orlanski 1975).

Dessa maneira, as dimensões da escala espaço-temporal dos fenômenos atmosféricos podem variar de segundos a anos, passando por diferentes estágios. As tempestades convectivas isoladas são eventos resultantes da interação de sistemas meteorológicos de diferentes escalas. O fluxo de grande escala estabelece condições ambientais favoráveis para estes fenômenos, os processos de mesoescala iniciam tais tempestades, afetam sua evolução e influenciam seu ambiente, enquanto a orografia serve tanto para fornecer o mecanismo de elevação necessário quanto para ancorar a tempestade em uma localização geográfica fixa (JOHNSON E MAPES, 2001).

Segundo o Doswell (1987) os três ingredientes fundamentais para o desenvolvimento da convecção profunda são: uma camada úmida em níveis médios ou baixos, provendo energia em

forma de calor latente para a intensificação da tempestade; presença de instabilidade sobre uma camada, para gerar alta fluuabilidade na parcela de ar e correntes ascendentes fortes; e um mecanismo de levantamento capaz de garantir o levantamento da parcela.

A relação da orografia com eventos mais extremo de chuva, pode exercer um papel fundamental na distribuição da precipitação, a depender do sistema atmosférico atuante (TAVARES, 2020). Ao encontrar uma barreira topográfica, uma corrente de ar tende a ascender, podendo ocorrer a formação de nuvens e precipitação. Em geral, ocorre chuva a barlavento (lado em que o ar ascende) e condições secas a sota-vento, pois o ar se aquece e seca o que não favorece a formação de nuvens (Figura 5) (REBOITA *et al.*, 2012).

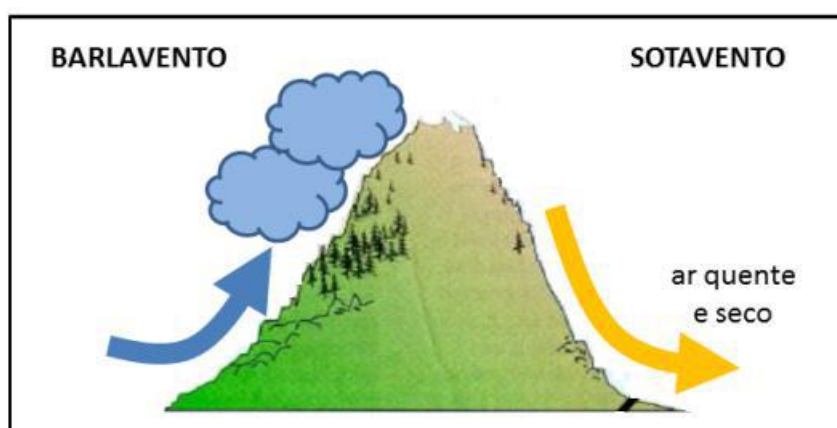


Figura 6: Efeito combinado da topografia e do escoamento atmosférico (Fonte: Reboita et al.,2012)

2.3 INDICADORES TERMODINÂMICOS E DINÂMICOS

Os parâmetros atmosféricos, chamados de “indicadores de tempo severo”, são baseados em perfis verticais de temperatura, umidade e vento, e são usados para auxiliar tanto a pesquisa quanto a previsão operacional de tempestades. A Tabela 1 apresenta alguns dos indicadores atmosféricos, dinâmicos e termodinâmicos, existentes na literatura e que foram usados no decorrer do trabalho. Para a análise dos resultados, variáveis representando o estado da atmosfera também foram consideradas. Entre elas, incluem-se: direção e velocidade do vento em 850 hPa, em 500 hPa e em 250 hPa; pressão ao nível do mar; e umidade em 850 hPa e 500 hPa.

Tabela 1 - Indicadores dinâmicos e termodinâmicos

	Variável	Fórmula
Indicadores termodinâmicos	Índice K	$k = (T_{850} - T_{500}) + T_{d850} - (T_{700} - T_{d700})$
	Índice TT	$TT = (T_{850} + T_{d850}) - 2 * T_{500}$
	<i>Convective available potential energy</i>	$CAPE = g \int_{LFN}^{LNB} \frac{T_{vp}(z) - T_v(z)}{T_v(z)} dz$
Indicadores dinâmicos	Convergência	$CONV = \left(\frac{\partial u_{850}}{\partial x} + \frac{\partial v_{850}}{\partial y} \right) < 0$
	Divergência	$CONV = \left(\frac{\partial u_{850}}{\partial x} + \frac{\partial v_{850}}{\partial y} \right) > 0$
	Velocidade vertical	$\omega \equiv \frac{Dp}{Dt}$

O índice K é a variação vertical da temperatura, obtida pela diferença das temperaturas entre 850 e 500 hPa, temperatura ponto de orvalho em 850 hPa e depressão do ponto de orvalho em 700 hPa (GEORGE, 1960). Quanto maior a umidade e a diferença de temperatura de 850 e 500 hPa, maior o K e, conseqüentemente, um ambiente mais favorável ao desenvolvimento de chuvas intensas. Valores de K acima de 30°C são considerados altos, um indicativo de alto potencial para a ocorrência chuvas intensas e, por vezes, tempestades, e valores acima de 40°C são extremamente altos, apontam para uma possibilidade extremamente alta de um evento de tempestade (NASCIMENTO, 2005).

O Índice Total Totals (TT) identifica potenciais áreas com desenvolvimento de tempestades convectivas (FERREIRA; REBOITA, 2020). É dado pela soma de outros dois índices convectivos, o Vertical Totals (VT = T850hPa–T500hPa) e o Cross Totals (CT = Td850hPa–T500hPa) (MILLER, 1972). Assim como K, a maior limitação do TT é a dependência da umidade em 850 hPa, pois a atmosfera pode apresentar umidade abaixo deste nível. No entanto, quando uma massa de ar é mais fria e mais seca, o TT produzirá melhores resultados por considerar a temperatura em níveis médios (SILVA DIAS, 2000 e NASCIMENTO, 2005). Valores de TT a partir de 40°C indicam situações favoráveis à formação de tempestades, e valores acima de 50°C são propícios à ocorrência de tempestades (NASCIMENTO, 2005). Analisar isoladamente o TT para previsão convectiva não é adequado, uma vez que um lapse rate (taxa vertical da variação de temperatura) alto em níveis médios pode levar a um TT alto, e não ter suporte de umidade em baixos níveis (NASCIMENTO, 2005).

O índice Energia Potencial Disponível Para Convecção (*Convective Available Potential Energy - CAPE*) é uma integração vertical da diferença entre a temperatura virtual da parcela $Tvp(z)$ e a temperatura virtual do ambiente $Tv(z)$ do NCE (Nível de Convecção Livre, no qual a parcela se torna instável com relação ao ambiente e eleva-se livremente) ao NPE (Nível de Equilíbrio ou Nível de Perda de Empuxo, quando a flutuabilidade é neutra, sendo o topo teórico da nuvem) (HOUZE, 1993). O CAPE proporciona uma estimativa da máxima energia cinética possível que uma parcela de ar estaticamente estável pode adquirir, assumindo-se que a parcela ascende em um processo adiabático e se ajusta instantaneamente à pressão ambiente (FERREIRA; REBOITA, 2020).

A divergência é a taxa na qual o ar está se espalhando horizontalmente a partir de um ponto. Este parâmetro é positivo para o ar que está se espalhando, ou divergindo, e negativo para o contrário, quando ar que está se concentrando (convergência). A convergência dos ventos nos níveis mais baixos de atmosfera (850 hPa), a divergência dos ventos em altos níveis (250 hPa), e movimento vertical nos níveis médios (500 hPa) são indicadores dinâmicos que promovem os movimentos ascendentes do ar, que são favoráveis a formação de nuvens que provocam precipitação (LUDLAM, 1963).

2.4 PRECIPITAÇÃO NO ESTADO DO RIO DE JANEIRO

Esse tópico será tratado a climatologia da precipitação no estado do Rio de Janeiro, com ênfase na cidade de Petrópolis, que é a cidade de interesse do estudo.

A topografia, a configuração e a disposição do relevo são aspectos relevantes para a compreensão das diversidades climáticas da região Sudeste do Brasil. Sua posição latitudinal favorece a uma ampla exposição à radiação solar (NUNES *et al.*, 2015). No estado do Rio de Janeiro, a proximidade da costa e a topografia complexa criam uma grande diversidade de chuvas no espaço e no tempo (BRITO *et al.*, 2017).

Silva e Dereczynski (2014) elaboraram uma climatologia da precipitação para o estado do Rio de Janeiro a partir de dados observacionais entre 1961 e 2012 (Figura 7). Nos resultados, os autores mostraram que os maiores índices pluviométricos médios anuais (que variam entre 2.500 e 2.800 mm) se encontram na divisa da região Metropolitana e das Baixadas Litorâneas com a região Serrana. Os menores índices pluviométricos anuais são observados nas áreas das Baixadas Litorâneas, mais próximas ao mar (em torno de 700 a 1.300 mm), e na maior parte do Norte/Noroeste Fluminense (alcançando em média 1.000 mm). Na Costa Verde e no Vale do Paraíba, os valores ficam entre 1.300 e 2.200 mm em toda a sua área. Na região Metropolitana,

a precipitação total anual oscila entre 1.000 e 1.600 mm, com exceção do Maciço da Tijuca, onde este valor alcança 2.500 mm.

Os autores também mostraram que no verão, os índices pluviométricos são os mais elevados devido, especialmente, ao estabelecimento da ZCAS e de convecção local. No inverno, há redução brusca dos totais de precipitação, sendo a chuva neste período uma consequência maior dos sistemas frontais. Na região Serrana e em suas proximidades, o total pluviométrico no verão (inverno) fica em média de 600 a 1.350 mm (até 300 mm). Durante as estações de transição, a primavera possui totais pluviométricos ligeiramente maiores que os do outono, provavelmente devido ao fato da primavera ser a estação do ano com o maior número de passagens de frentes frias pela região. Os valores atingem até 600 mm (750 mm) no outono (primavera) em todo o estado, com os maiores totais concentrados próximos à região Serrana e na Costa Verde, e os menores confinados particularmente às áreas litorâneas.

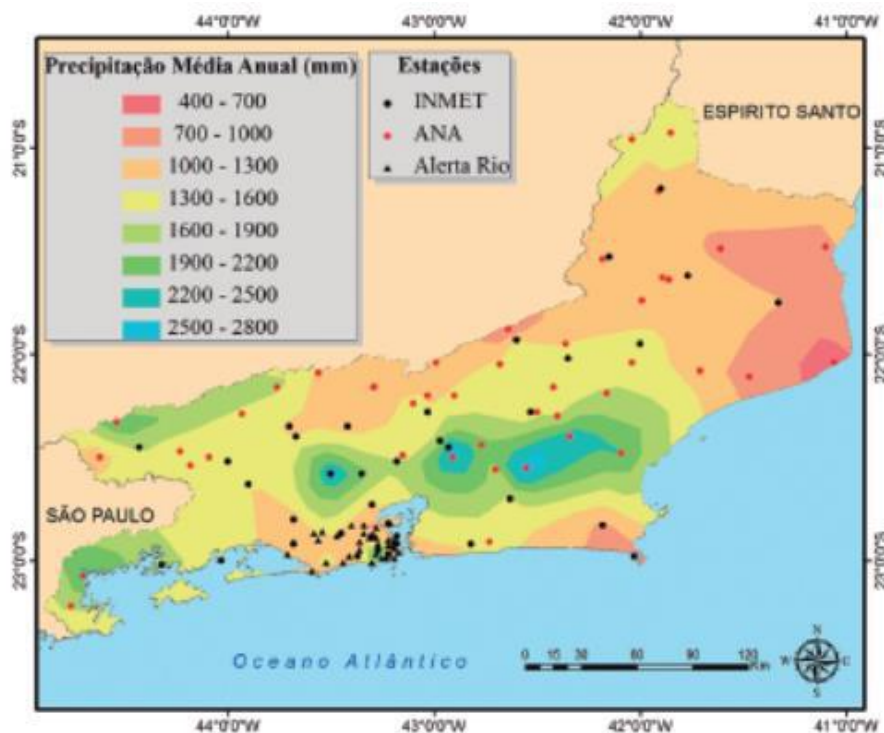


Figura 7: Totais pluviométricos (mm) anuais no estado do Rio de Janeiro. Valores médios no período 1961 – 2012 a partir dos dados observacionais do INMET, da ANA e do Alerta Rio (Fonte: Silva e Dereczynski, 2014)

Silva et al. (2020), examinam os padrões pluviométricos e atmosféricos associados aos eventos do período entre janeiro de 2013 e dezembro de 2014, que desencadearam registros de fortes chuvas e episódios de alimentação do rio Quitandinha, Petrópolis. Na análise de

agrupamento, os autores identificaram a existência de três grupos pluviométricos homogêneos na cidade de Petrópolis, denominados G1, G2 e G3. Esses grupos apresentaram altitudes centrais aproximadas de 716, 832 e 871 metros, respectivamente, como ilustrado na Figura 8. Na figura, os elementos estão representados da seguinte forma: G1 é representado por um círculo azul, G2 por um círculo azul-verde e G3 por um círculo rosa. A partir dos registros pluviométricos, verificaram que o terceiro grupo (G3), apresentou os maiores acúmulos de chuva, sugerindo a importância dos efeitos orográficos como gatilho dinâmico para o desenvolvimento convectivo. Valores de precipitação menores foram observados para os outros dois grupos (G2 e G1).

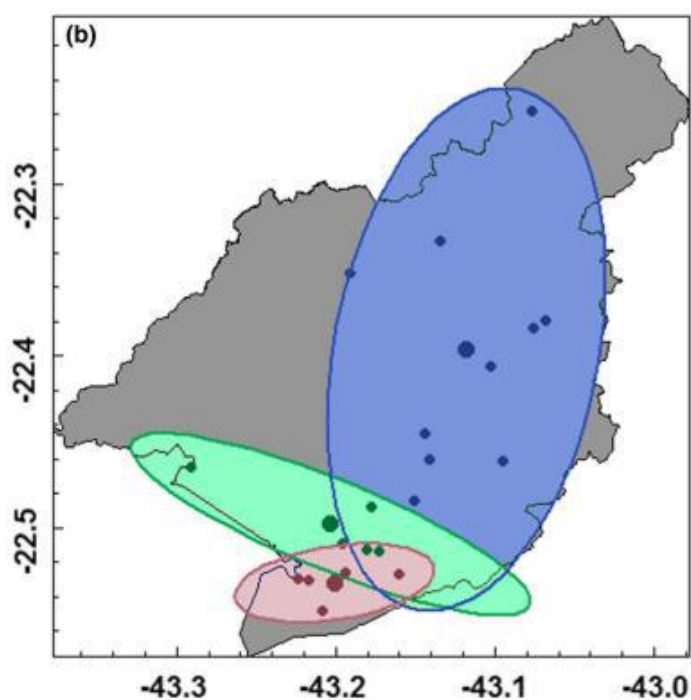


Figura 8: Delimitação espacial de grupos homogêneos de chuva sobre a cidade de Petrópolis durante cheias do rio Quitandinha no período de janeiro de 2013 e dezembro de 2014, sendo G1, G2 e G3 representados pelos círculos azul, verde e rosa, respectivamente (Fonte: Silva *et al.*, 2020).

3 METODOLOGIA

A metodologia empregada neste trabalho, engloba a descrição das características da área de estudo; detalhar os dados usados na análise sinótica para os dias 15 de fevereiro e 20 de março de 2022; expor os dados pluviométricos de forma geográfica; e especificar o processo para investigação dos indicadores dinâmicos e termodinâmicos.

3.1 REGIÃO DE ESTUDO

O município de Petrópolis, localizado na região Serrana do Rio de Janeiro (Figura 9), ocupa uma área de 791,144km² e possui uma população de 307.144 habitantes, tendo 72.070 pessoas exposta em áreas de risco a inundações, enxurradas e deslizamentos, segundo dados de 2021 do IBGE (<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rj/petropolis/panorama>).

A cidade é historicamente marcada por eventos extremos de precipitação que provocam expressivos impactos (enchentes, escorregamento e enxurradas). A região é marcada por um relevo acidentado (Figura 9). A incidência de movimentos de massa apresenta uma correspondência direta com o relevo e pluviosidade. Além disso, a degradação ambiental e a ocupação desordenada são fatores potencializadores para ocorrência de eventos de deslizamentos de encostas, resultando em frequentes perdas de vida.

O 1º distrito (Petrópolis) e parte do 2º distrito (Cascatinha) são as porções mais urbanizadas dentre os cinco distritos de Petrópolis (3º distrito - Itaipava, 4º distrito - Pedro do Rio e 5º distrito - Posse) (Figura 10), na qual concentra a maior parte da população do município, ao longo das estreitas planícies aluviais e encostas. Essa área é a mais afetada pelos movimentos de massa, especialmente por escorregamentos encostas (GUERRA ET AL. 2007; GONÇALVES, 1998), tornando a população presente vulneráveis a desastres socioambientais.

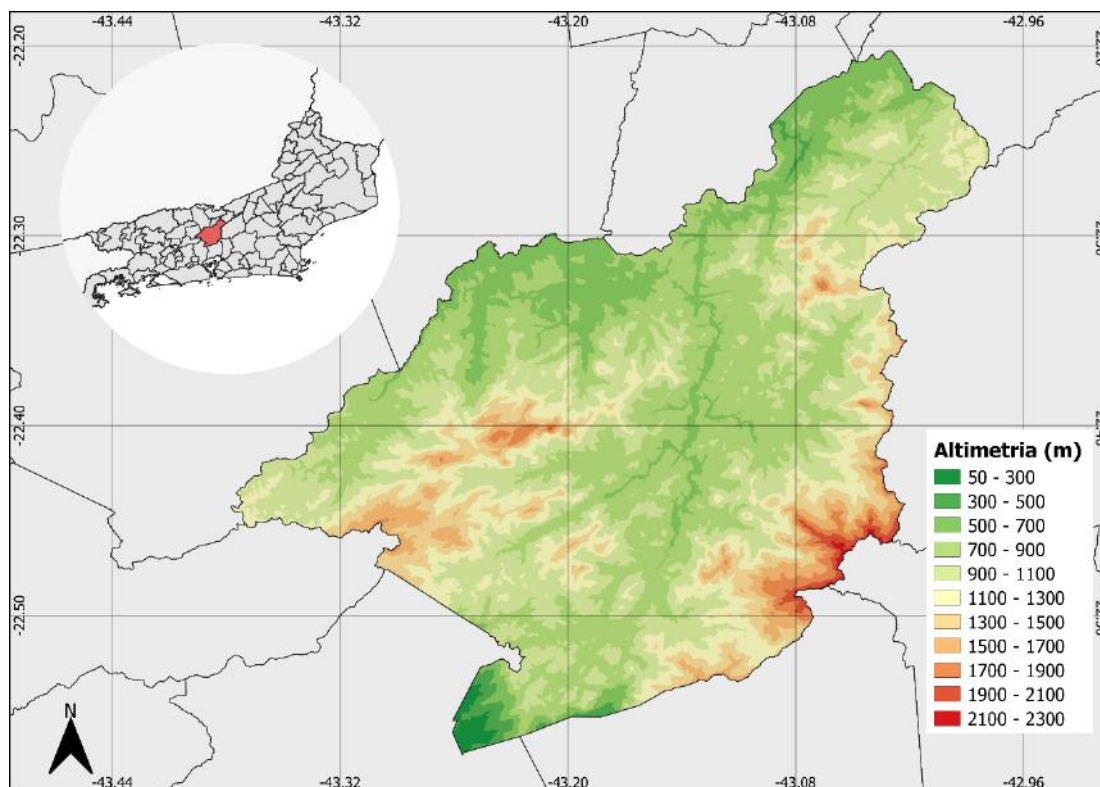


Figura 9: Mapa de altimetria (m) de Petrópolis com a localização da cidade dentro do estado do Rio de Janeiro

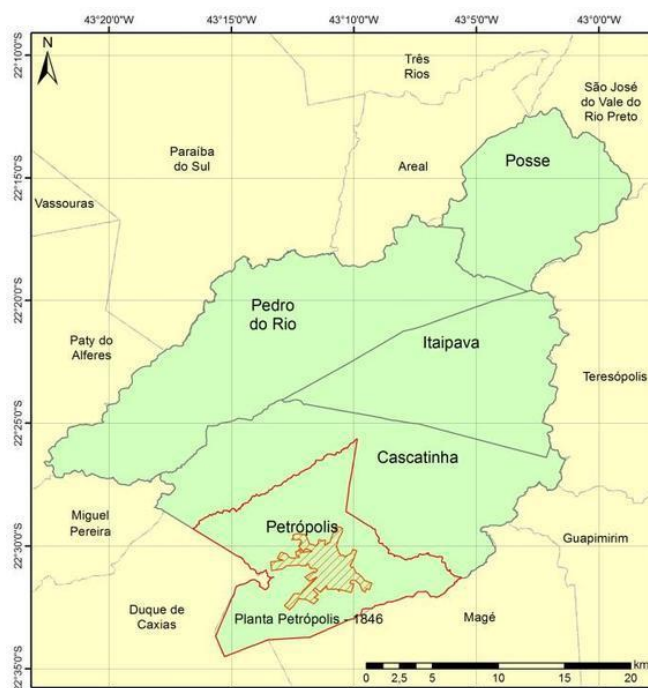


Figura 10: Localização dos Distritos de Petrópolis (Fonte: Costa et al., 2022)

3.2 DADOS USADOS NA ANÁLISE SINÓTICA

Para realizar uma análise sinótica e, conseqüentemente, uma identificação dos sistemas meteorológicos atuantes sobre o Brasil e a região Sudeste, que favoreceram as tempestades severas do dia 15 de fevereiro e 20 de março de 2022, foram usados: 1) Imagens realçadas do canal 13 do satélite geostacionário GOES 13, obtidas pela Divisão de Satélite Ambientais do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (DAS/INPE) nos arquivos online e 2) Saídas horárias da reanálise do modelo global European Centre for Medium-Range Weather Forecast (ECMWF), Version5 (ERA5) oferecidas com resolução horizontal de 0.25° latitude \times 0.25° longitude (31 km x 31 km) (HERSBACH et al, 2023). A partir destes dados foram gerados campos de umidade relativa do ar e linha de corrente em 850 hPa, linha de corrente e magnitude do vento em 250 hPa, convergência em 850 hPa, divergência em 250 hPa, pressão ao nível médio do mar, altura do geopotencial em 500 hPa e vorticidade em 850 hPa.

3.3 DADOS PLUVIOMÉTRICOS

As estações do Sistema de Alerta de Cheias do Instituto Estadual do Ambiente (INEA) conta com uma equipe de meteorologistas 24 horas por dia, todos os dias, com o objetivo de monitorar as chuvas e níveis de rios, alertando população e autoridades sobre a possibilidade de chuvas intensas e inundações (cheias) (Fonte: <http://www.inea.rj.gov.br/ar-agua-e-solo/alerta-de-cheias/>). A rede telemétrica do INEA foi escolhida para a pesquisa por possuir uma boa quantidade de dados disponíveis e apresenta alta frequência de observação, com leituras a cada 15 minutos.

A Figura 11 mostra a distribuição espacial dos postos pluviométricos localizados na cidade de Petrópolis. Os dados pluviométricos utilizados para na geração de resultados contemplavam os meses dos eventos analisados, fevereiro de 2022 e março de 2022. Das estações listadas a Alto da Serra, Bingen, Centro, Coronel Veiga, Correias, Itaipava e Nogueira apresentam registros de informações hidrológicas, além dos dados pluviométricos. Destaca-se, que foi retirada da pesquisa para o período de 15 fevereiro os postos Centro, Itaipava e Itamarati, por não apresentarem dados no período. O posto Morin foi retirado de todos os resultados, pois ocorreram falhas na leitura durante o período de interesse que acarretaram registros de dados incoerentes.

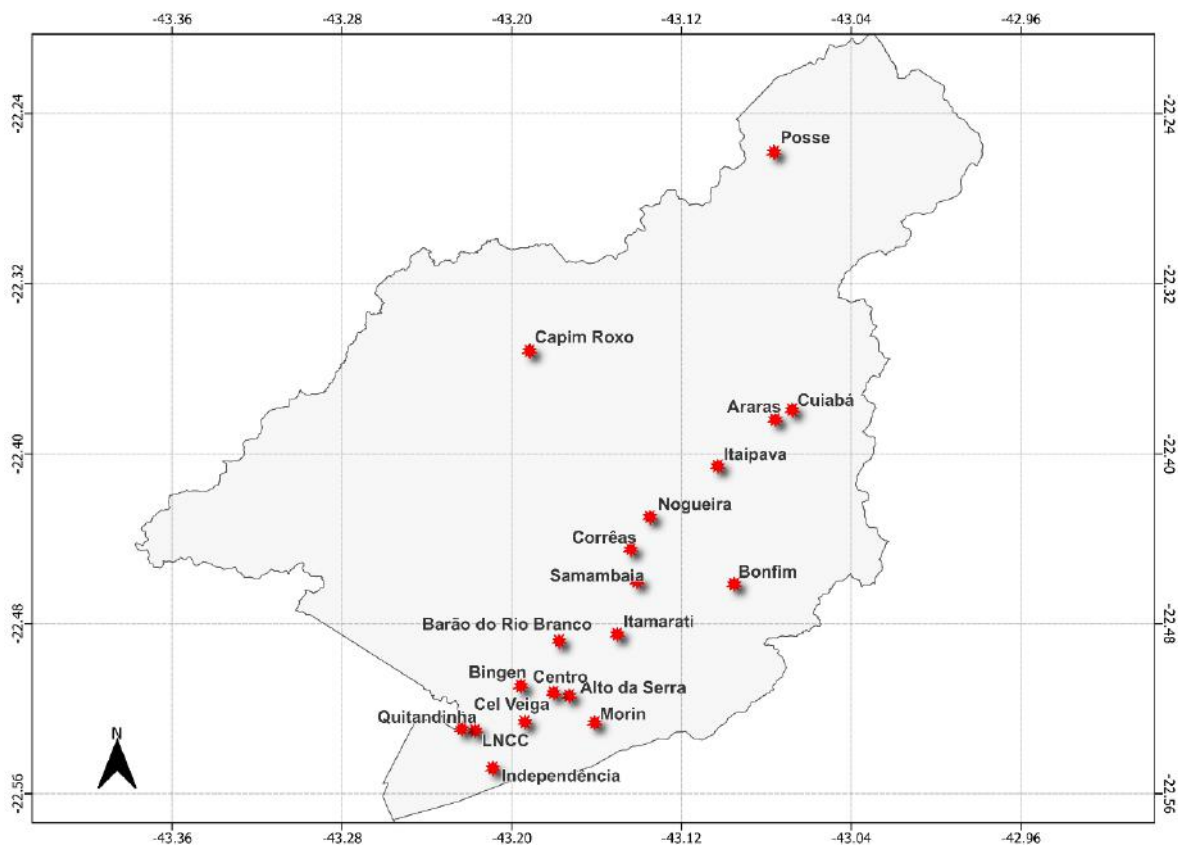


Figura 11: Localização da estação do INEA dentro de Petrópolis.

3.4 INDICADORES DINÂMICOS E TERMODINÂMICOS

Para a análise dos campos termodinâmicos e dinâmicos, que contribuem na condição dos fenômenos meteorológicos, é importante que sejam estabelecidas condições atmosféricas antes do início da precipitação e durante sua ocorrência, para um melhor diagnóstico. Tendo como base a metodologia utilizada por Silva (2019), no qual agrupou os eventos a partir do início da chuva, de forma a caracterizar o momento correspondente a 12 h antes do início da precipitação e usou como tempo final, o instante em que a precipitação terminou para o evento mais prolongado de chuva em questão (Figura 12). O presente trabalho, designa como tempo antecedente (T_0) o momento correspondente a 12 h antes do início da precipitação (T_i) e o tempo posterior ao evento (T_{32}), sendo 12 h após o fim da precipitação do evento mais prolongado de chuva.

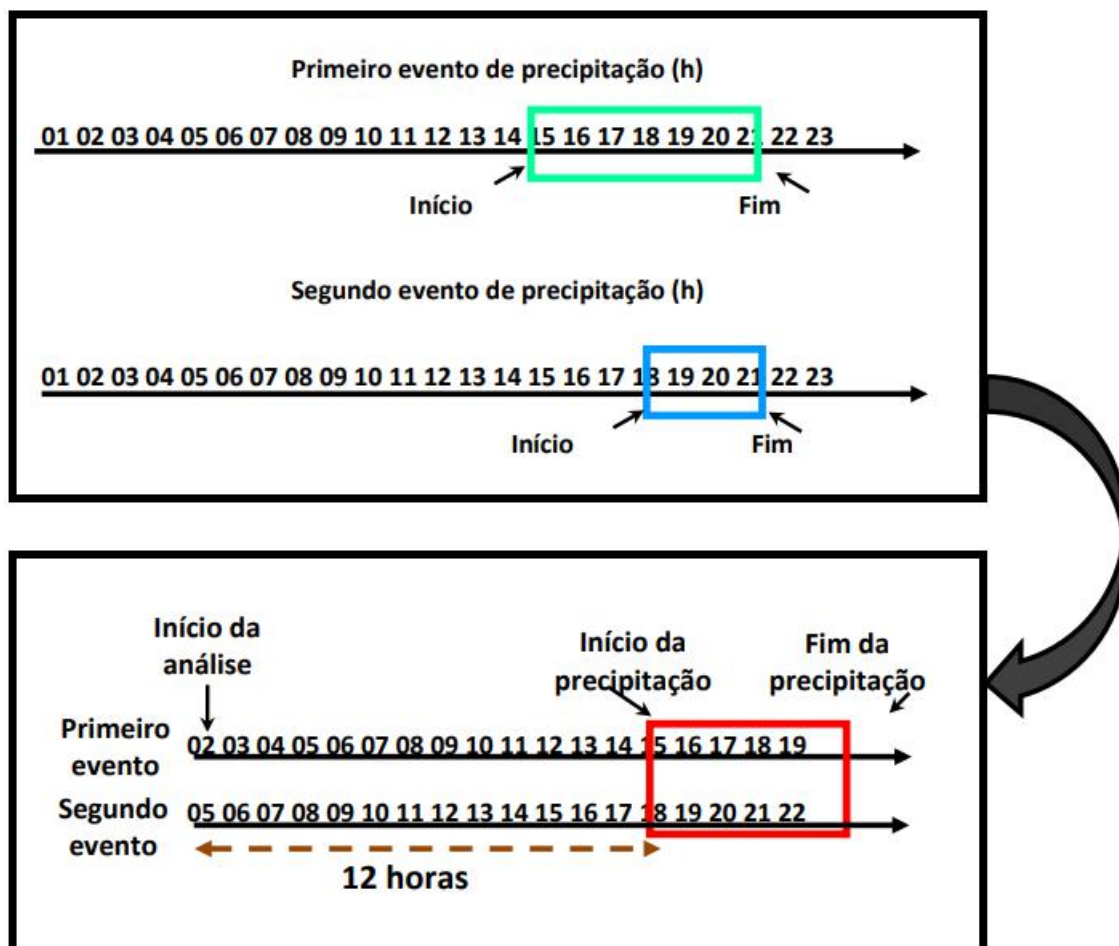


Figura 12: Procedimento utilizado por Silva (2019) para agrupar os eventos estudados (Fonte: Silva, 2019)

Usando as saídas horárias do ERA5, para os dois eventos de chuva estudado, serão gerados compostos das seguintes variáveis: índice K, TT e CAPE, convergência em 850 hPa, divergência em 250 hPa, umidade 500 hPa. O processo foi realizado no ambiente de programação/software Grid Analysis and Display System (GrADS).

Para entender a evolução temporal, serão desenvolvidos gráfico afim de realizar análises quantitativas dos indicadores dinâmicos e termodinâmicos usando: índice k, TT e CAPE, convergência em 850 hPa, divergência em 250 hPa, umidade 500 e 850 hPa, pressão a nível médio do mar, vorticidade em 850 hPa e velocidade vertical em 500 hPa.

4 RESULTADOS.

4.1 DADOS OBSERVADOS

O tópico atual expõe os resultados dos registros pluviométricos, a fim de analisar o comportamento, espacial e temporal, dos acumulados de precipitação referentes aos dias 15 de fevereiro e 20 de março de 2022 sobre a cidade de Petrópolis. Os resultados utilizaram os dados observados do INEA com registros a cada 15 minutos. Foram excluídas as estações que apresentaram falhas ou incoerência, conforme exposto na metodologia.

A partir dos dados pluviométricos, foi possível analisar o comportamento temporal da precipitação sobre a cidade. As Tabela 2 e 3 exibem os acumulados de precipitação em 1 hora, apresentando o máximo de precipitação e a tendência dos registros para o intervalo que contempla ao evento do dia 15/02/2022 e 20/03/2022, respectivamente. Os acumulados foram calculados partindo dos dados observados do INEA com registros a cada 15 minutos.

Nota-se que na Tabela 2, referente ao evento de fevereiro, a primeira hora com registro de chuva foi às 19 UTC. Às 22 UTC os registros apresentam uma situação de estabilidade, com o último registro ocorrendo na hora seguinte, 23 UTC, sendo esse apenas de chuvisco/chuva fraca. Sendo assim, defina-se que o evento ocorreu entre 18 e 22 UTC.

Tabela 2: Precipitação acumulada em 1 hora entre 17 UTC - 15/02/2022 e 00 UTC - 16/02/2022 para as estações disponíveis. As colunas das estações apresentam um sombreado em vermelho para os acumulados igual a zero e em azul para > 0. A última coluna exibe o máximo de precipitação para aquela hora.

	Alto da Serra	Araras	Barão do Rio Branco	Bingen	Bonfim	Capim Roxo	Coronel Veiga	Correias	Cuiabá	Independência	LNCC	Nogueira	Posse	Quitandinha	Samaíba	MÁXIMO	
15/02 17	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
15/02 18	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
15/02 19	7,8	0,0	0,0	2,2	0,0	0,0	18,0	0,0	0,0	16,5	10,8	0,0	0,0	4,8	0,0	0,0	18,0
15/02 20	104,8	0,0	53,0	70,2	0,3	0,0	86,8	4,0	0,0	34,8	43,0	1,8	0,0	23,8	12,6	0,0	104,8
15/02 21	70,6	0,0	53,0	90,8	0,0	0,0	103,2	25,8	0,0	60,5	77,3	12,6	0,0	50,0	27,4	0,0	103,2
15/02 22	39,6	0,0	17,0	22,6	0,0	0,0	44,2	2,8	0,0	34,0	10,3	3,2	0,0	4,0	5,0	0,0	44,2
15/02 23	0,2	0,0	0,3	0,2	0,0	0,0	1,0	0,2	0,0	1,0	0,5	0,0	0,0	0,3	0,0	0,0	1,0
16/02 00	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
16/02 01	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

O evento do dia 20 de março, se difere do anterior, pois apresentou uma precipitação mais abrangente em escala temporal. O evento se iniciou em torno das 17 UTC, apresentando dois picos de máximo acumulado, o primeiro no intervalo de 18 UTC e 19 UTC e o segundo às 23UTC. O fim do caso foi definido para 01 UTC, o horário foi estabelecido com base na tendência de queda dos registros para as horas seguintes, com máximos abaixo de 20 mm nas próximas 6 horas seguintes (Tabela 3).

Tabela 3: Precipitação acumulada em 1 hora entre 16 UTC - 20/03/2022 e 06 UTC - 21/03/2022 para as estações disponíveis. As colunas das estações apresentam um sombreado em vermelho para os acumulados igual a zero e em azul para >0. A última coluna exibe o máximo de precipitação para aquela hora.

	Alto da Serra	Araras	Barão do Rio Branco	Bingen	Bonfim	Capim Roxo	Centro	Coronel Veiga	Correias	Cuiba	Independência	LNC C	Nogueira	Posses	Quitandinha	Samaíba	MÁXIMO
20/03 16	0,0	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3
20/03 17	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	7,3	4,5	0,0	0,0	0,3	0,0	7,3
20/03 18	19,2	0,0	37,3	74,6	9,0	0,0	74,0	101,4	2,4	0,0	81,3	84,0	0,4	1,8	43,0	4,8	101,4
20/03 19	39,8	0,0	15,3	54,0	0,8	0,0	41,8	69,8	2,8	5,2	41,8	37,0	0,6	7,8	14,8	4,8	69,8
20/03 20	18,8	0,0	19,0	12,8	0,0	0,0	11,6	22,0	1,2	0,0	5,8	3,0	0,2	0,0	1,5	1,6	22,0
20/03 21	3,4	0,0	9,8	3,8	9,0	0,0	1,4	0,4	5,8	0,0	1,8	1,8	3,2	0,0	3,0	3,0	9,8
20/03 22	1,8	0,0	2,0	0,6	4,0	0,2	3,8	4,6	1,0	0,4	1,8	2,3	0,6	0,0	1,3	3,2	4,6
20/03 23	15,6	0,0	26,8	51,0	1,3	0,0	50,8	70,2	2,0	0,0	58,8	58,5	2,0	0,0	52,3	4,6	70,2
21/03 00	32,6	0,0	46,5	53,6	14,5	0,8	65,6	57,0	11,2	0,6	29,3	37,8	3,2	0,0	28,3	16,8	65,6
21/03 01	30,8	0,0	18,5	32,8	24,5	3,2	13,8	28,4	5,4	3,0	13,0	21,8	4,4	0,5	16,8	7,0	32,8
21/03 02	12,4	0,0	6,5	12,4	11,0	6,0	10,8	14,2	6,4	1,2	6,0	7,5	6,4	0,0	8,3	4,6	14,2
21/03 03	5,2	0,0	7,0	4,8	5,3	1,6	4,4	8,2	1,8	0,4	3,8	6,0	2,4	0,0	5,0	3,0	8,2
21/03 04	3,8	0,0	7,5	11,6	4,5	1,2	14,2	18,0	1,2	2,0	5,5	6,0	1,6	0,3	4,0	2,6	18,0
21/03 05	4,4	0,0	8,5	12,0	3,5	0,8	14,6	15,2	6,8	0,4	13,0	12,5	3,2	0,3	9,8	8,2	15,2
21/03 06	15,6	0,0	4,8	7,0	2,3	0,0	7,4	11,0	1,0	0,6	3,5	8,3	1,0	0,3	4,8	1,8	15,6

As Tabelas 4 e 5 mostram os registros de precipitação acumulados em 1 hora, 4 horas, 6 horas e 24 horas para o evento do dia 15/02/2022 e 20/03/2022, respectivamente. O cálculo para os acumulados de precipitação foi realizado com os registros pluviométrico das estações da rede do INEA para Petrópolis (Figura 11), retirando aquelas apresentaram falhas ou incoerência, para o intervalo do dia 15 e 16 de fevereiro e 20 e 21 de março de 2022.

Na Tabela 4, referente ao evento de fevereiro, observa-se que o acumulado máximo de precipitação em 1 hora foi de 104,8 mm na estação Alto da Serra. No entanto, a estação Coronel Veiga, foi a que apresentou os maiores registros em 4 h (252,6 mm), 6 h (253,2 mm) e 24 horas (253,2 mm). Os valores iguais ou próximos dos acumulados nos acumulados de 4, 6 e 24 horas mostram que o evento ocorreu durante um curto período, o que já foi observado na Tabela 3.

Tabela 4: Acumulados de chuva registrados nos postos pluviométricos entre o dia 15/02 e 16/02

	1 hora	4 horas	6 horas	24 horas
Alto da Serra	104,8	223,0	223,0	223,0
Araras	0,0	0,0	0,0	0,0
Baro do Rio Branco	56,5	123,3	123,3	123,5
Bingen	90,8	186,0	186,0	186,0
Bonfim	0,3	0,3	0,3	0,5
Capim Roxo	0,0	0,0	0,0	7,4
Coronel Veiga	103,2	252,6	253,2	253,2
Corrêas	25,8	32,8	32,8	32,8
Cuiabá	0,0	0,0	0,0	43,6
Independência	66,3	146,5	146,8	147,0
LNCC	81,5	141,8	141,8	141,8
Nogueira	13,8	17,6	17,6	20,4
Posse	0,0	0,0	0,0	10,0
Quitandinha	55,3	82,8	82,8	83,0
Samambaia	27,4	45,0	45,0	45,4

O maior acumulado de chuva em 24 horas, conforme apresentado na Tabela 5, para o estudo de caso de 20/03/2022 foi registrado na estação Coronel Veiga (468,4 mm). No entanto, é importante observar que esse acumulado ocorreu no dia seguinte, em 21/03/2020, devido à persistência das chuvas, conforme mostrado na Figura 13.

Tabela 5: Acumulados de chuva registrados nos postos pluviométricos entre o dia 20/03 e 21/03

	1 hora	4 horas	6 horas	24 horas
AltodaSerra	48,20	91,40	112,00	247,80
Araras	0,25	0,25	0,25	1,25
Barão do Rio Branco	51,00	98,25	128,75	238,75
Bingen	74,60	149,80	199,40	374,20
Bonfim	28,75	55,25	66,75	102,00
Capim Roxo	6,80	12,40	13,60	14,20
Centro	80,60	141,00	189,60	360,00
Coronel Veiga	101,40	193,60	273,20	468,40
Corrêas	12,00	25,20	32,80	51,00
Cuiabá	5,20	7,20	8,20	14,60
Independência	81,25	137,75	191,00	330,50
LNCC	84,00	130,25	186,50	348,25
Nogueira	7,60	16,60	21,40	31,20
Posse	9,00	9,50	9,50	12,50
Quitandinha	57,50	105,50	115,75	233,25
Samambaia	18,00	33,60	42,60	70,00

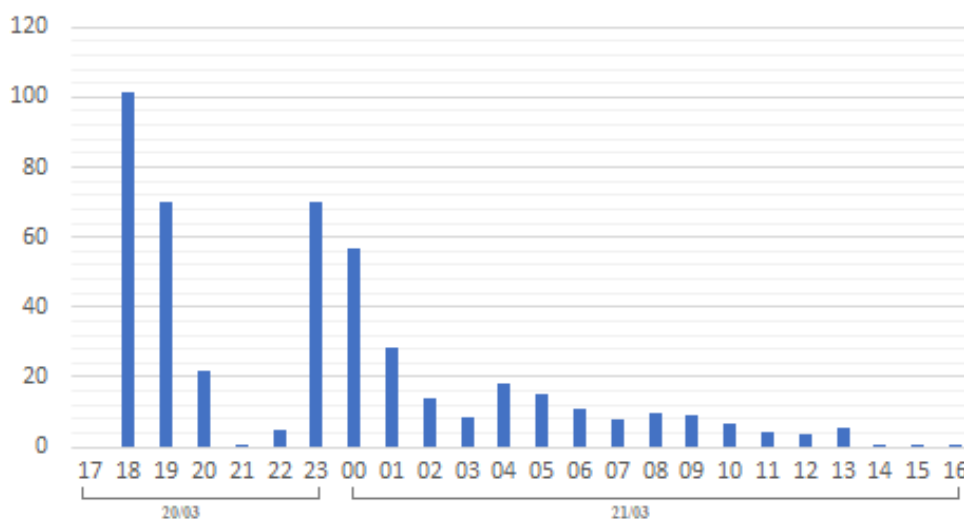


Figura 13: Acumulado de precipitação em 1 hora para o posto Cel. Veiga.

A distribuição espacial dos máximos de precipitação em acumulados de 15 minutos, 1 hora e 24 horas são mostrados na Figura 14. Nos dois dias os máximos ocorreram na mesma

região, conhecida como 1º Distrito. Assim como nos resultados descritos anteriormente (Tabela 4 e Tabela 5), nota-se uma disparidade nos máximos em 24 horas, devido a continuidade da chuva para o caso de março de 2022. Entretanto, considerando o acumulado em 4 horas verificam-se maiores acumulados no dia 15 de fevereiro em relação ao dia 20 de março de 2022, duração das chuvas no dia 15 de fevereiro, a sua ocorrência apresentou um maior volume em um curto intervalo de tempo. Observa-se, também, que os eventos foram isolados, especialmente o do dia 15 de fevereiro, no qual apresentou estações com acumulados de 0mm.

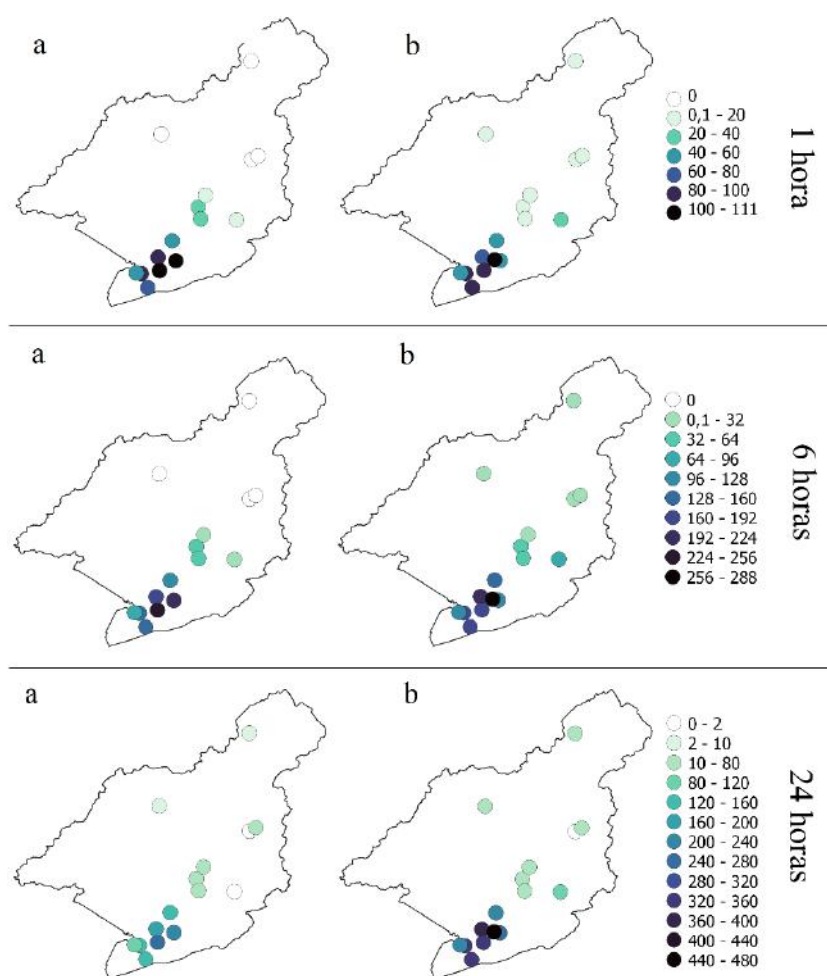


Figura 14. Máxima precipitação acumulada nos pluviômetros em intervalos de 1 hora, 6 horas e 24 horas, durante os eventos de chuva intensa de (a) 15 de fevereiro de 2022 e (b) 20 de março de 2022

4.2 ANÁLISE SINÓTICA DOS EVENTOS

O propósito do tópico é abordar os sistemas atuantes sobre o país como um todo, a fim de destacar os sistemas sinóticos associados à formação das tempestades na região de estudo. Para tal conta com o auxílio de imagens de satélite, em diferentes tempos, e os diagnósticos

desenvolvidos com as saídas do ERA5 para 12 UTC, com a intenção de analisar a atuação dos sistemas na parte da manhã do dia de ocorrência dos eventos, visto que ambos se iniciam no período da tarde.

4.2.1 CONDIÇÃO SINÓTICA DO DIA 15/02/2022

A figura 15 mostra as imagens do canal 13 (infravermelho termal realçado) do satélite GOES16, na qual ajuda a ter um conhecimento da temperatura do topo da nuvem, para o intervalo de 00 UTC até 18 UTC de 15 de fevereiro de 2022, investigando assim os horários que antecedem o evento. Nas imagens é possível notar no Oceano Atlântico regiões com topos frios (indicado pela tonalidade vermelha e preta), associadas a um ciclone extratropical, na latitude de 40°S e a atuação de uma frente localizada em torno da nebulosidade no Atlântico Sul. No interior do continente, observa-se áreas isoladas com topos frios, que chegam a atingir entre -60°C e -70°C, na faixa que cobre o Norte, Centro-Oeste e Sudeste do Brasil. Destaca-se, a nebulosidade associada à frente fria atuou sobre o estado do Rio de Janeiro entre 00 e 12 UTC (Figura 15a, 15b e 15c), sendo às 00UTC posicionada mais para o estado de São Paulo e às 18 UTC, localizava-se na região mais ao norte do estado do Rio de Janeiro e sobre o Espírito Santo (Figura 15d).

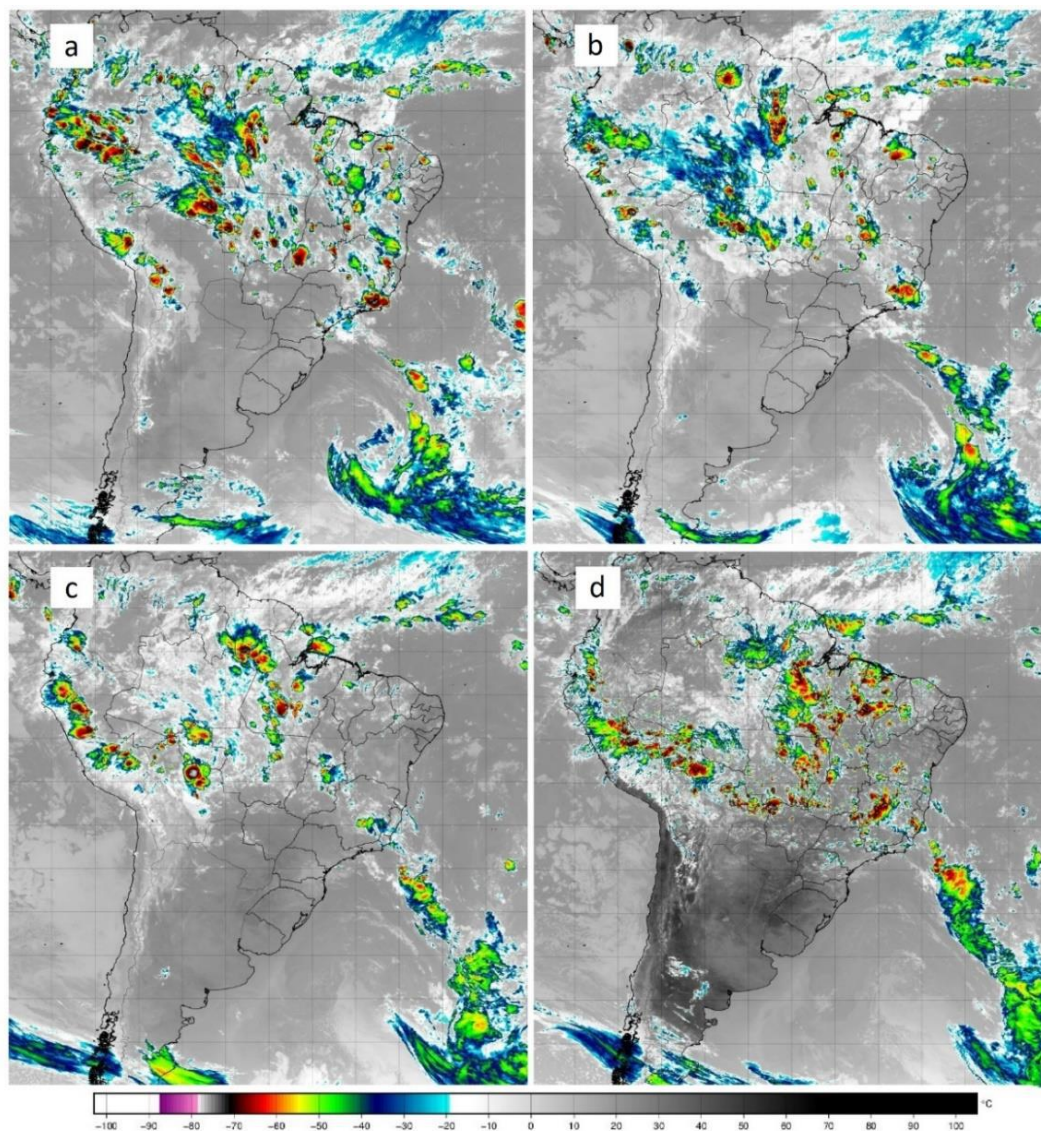


Figura 15: Imagens do satélite GOES-16 do canal 13 para a) 00UTC de 15/02, b) 06UTC de 15/02, c) 12 UTC de 15/02 e d) 18UTC de 15/02 (Fonte: Acervo CPTEC-INPE).

O campo de pressão ao nível médio do mar (Figura 16b, d ou e) confirma a análise das imagens de satélite (Figura 15), no qual se observa o centro do ciclone (de 1002 hPa) posicionado em, aproximadamente, 40°S e 35°W às 12 UTC. Nota-se também, uma isolinha fechada de 1014 hPa na retaguarda do centro de baixa pressão.

Na figura 16a, uma circulação ciclônica em 850 hPa é observado no Atlântico. Na região da Bolívia existe uma circulação ciclônica, que em 250 hPa é uma circulação anti-ciclônica (Figura 16c). Ainda em 250 hPa (Figura 16c), verifica-se um cavalo no Atlântico e os posicionamento dos jatos nos entornos do cavado

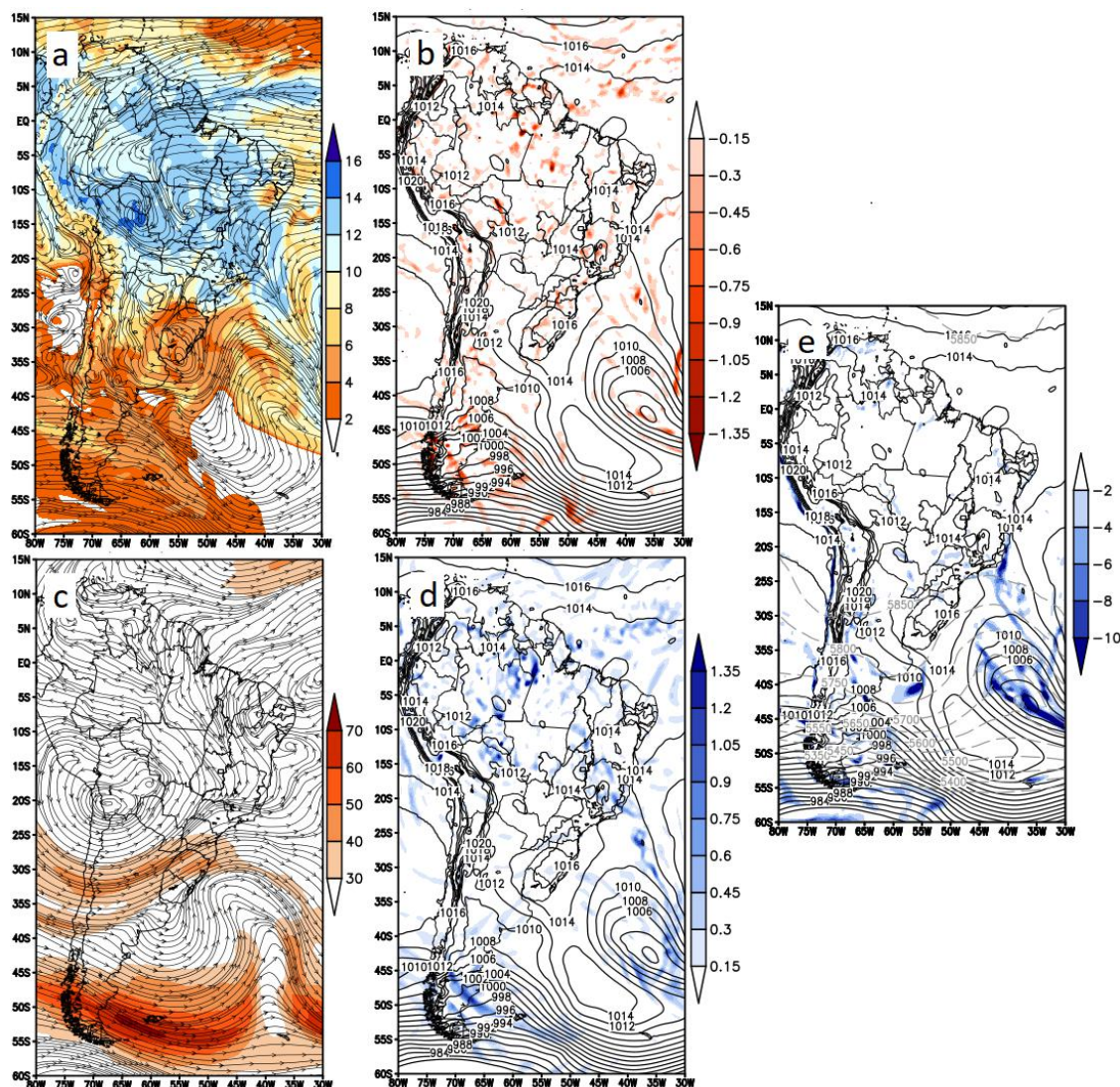


Figura 16: Campos meteorológicos para 12Z de 15 de fevereiro de 2022: (a) Linha de corrente e Umidade Específica (g/kg - sombreado) em 850 hPa ; (b) Convergência do Vento (10-4/s - sombreado) em 850 hPa e Pressão ao Nível Médio do Mar (hPa - linha contínua); (c) Linha de corrente e Intensidade do Vento (m/s - sombreado) em 250 hPa; (d) Divergência do Vento (10-4/s - sombreado) em 250 hPa e Pressão ao Nível Médio do Mar (hPa - linha contínua preta); (e) Vorticidade Relativa (10-5/s - sombreado) em 1000 hPa, Pressão ao Nível Médio do Mar (hPa - linha contínua preta) e Altura Geopotencial em 500 hPa (mcp - linha tracejada cinza).

A Figura 16e, exibe uma vorticidade relativa negativa na borda do centro de baixa pressão e na região da frente. Ela ainda mostra um cavado em médios níveis, 500 hPa, posicionando-se sobre o ciclone, podendo indicar uma tendência a levar o sistema para uma situação de barotropia, que acarreta ao favorecimento da oclusão do sistema frontal. No entanto, a borda desse cavado atinge regiões próximas ao litoral do Sudeste do Brasil, podendo gerar uma instabilidade. Nota-se sobre a região da frente um alto teor de umidade relativa, entre 10 e

12 g/kg, presente e mais intenso dentro do continente (Figura 16a) e uma confluência do vento ocorrendo ao norte do Rio de Janeiro. A leste da baixa do Atlântico existe um sinal de divergência do vento em altos níveis, um fraco sinal de convergência em 850 hPa.

4.2.1 CONDIÇÃO SINÓTICA DO DIA 20/03/2022

No decorrer do dia 20/03 e 21/03 aconteceram fortes chuvas no estado do Rio de Janeiro devido ao deslocamento de uma frente fria sobre o litoral (Figura 17). Nas imagens das 18 e 00 UTC é possível observar nuvens de topo frio na parte central do estado, que engloba a cidade de Petrópolis.

Na figura 18e, as isolinhas da pressão ao nível médio do mar marcam a região de cavado associada à banda frontal, tendo a sua posição marcada também pela vorticidade relativa. O centro de baixa pressão associado à frente fria ficou próximo do limite dos campos observados, mas é possível notar o fechamento da isolinha de 998 hPa (Figura 17).

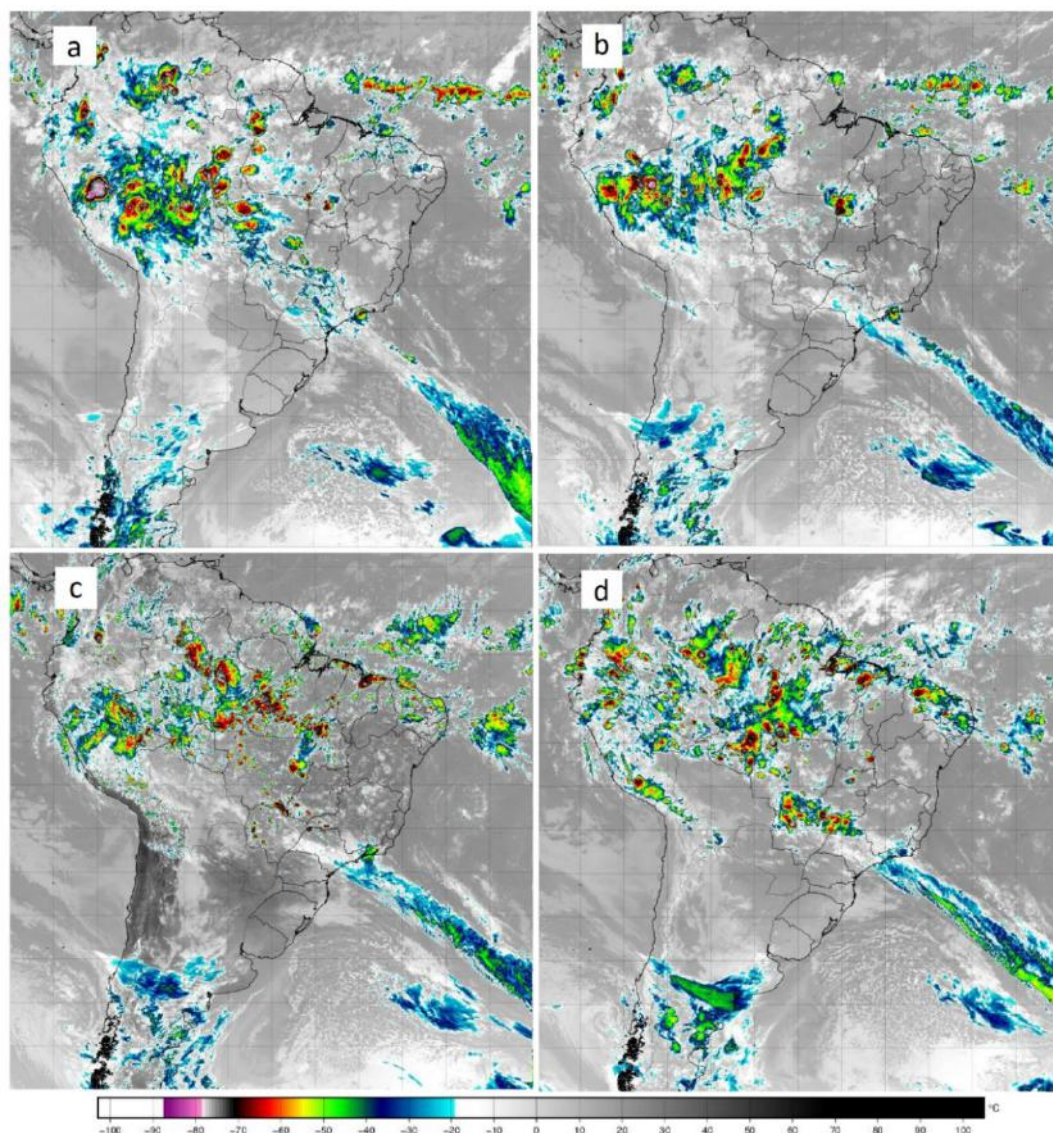


Figura 17: Imagens do satélite GOES-16 do canal 13 para a) 06UTC de 20/03, b) 12UTC de 20/03, c) 18 UTC de 20/03 e d) 00UTC de 21/03 (Fonte: Acervo CPTEC-INPE).

Em baixos níveis, às 12 UTC, nota-se um canal de umidade (Figura 18a), em torno de 10 a 12 g/kg, dando suporte à frente fria, e a confluência dos ventos próximo ao litoral Sudeste. Observa-se também um padrão de circulação anticiclônica ao leste da Argentina (Figura 18a) com centro de pressão de 1028 hPa (Figura 18e). Nos altos níveis, em 200 hPa (Figura 18c), verifica-se um cavado, aproximadamente em 50°S e 40°W, com o Jato Subtropical e Jato Polar Norte acoplados e atuando a leste. Na mesma região em médios níveis, encontra-se um cavado marcado pela altura geopotencial em 500 hPa (Figura 18e).

Na região sul do Rio de Janeiro, onde encontra-se nuvens de topos frios às 12 UTC (Figura 17 b), observa-se um sinal de convergência em 850 hPa (Figura 18b) e da divergência em 250 hPa (Figura 18d), fomentando movimentos ascendente do ar e promovendo um aprofundamento das nuvens.

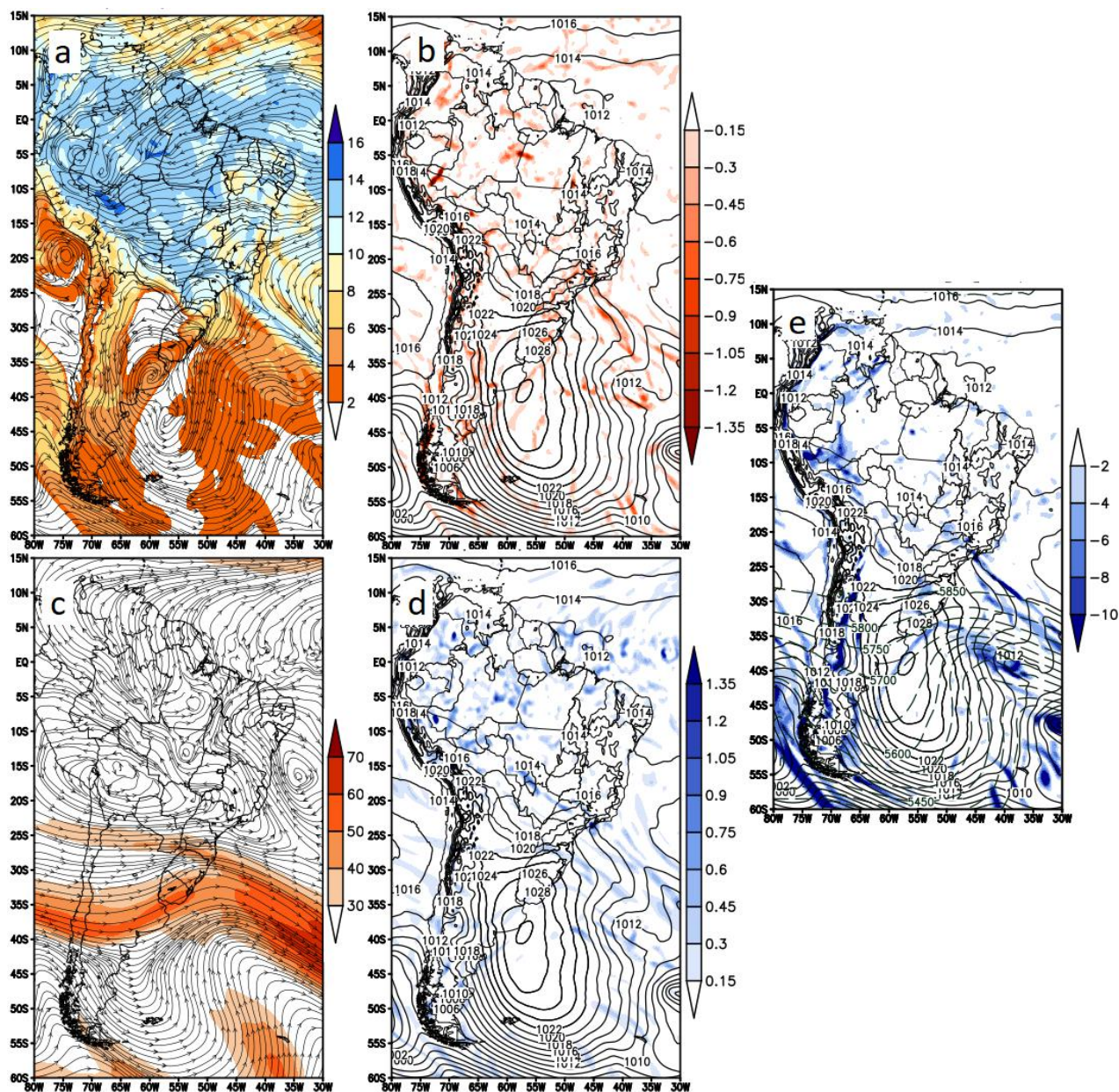


Figura 18: Campos meteorológicos para 12Z de 20 de março de 2022: (a) Linha de corrente e Umidade Específica (g/kg - sombreado) em 850 hPa ; (b) Convergência do Vento (10-4/s - sombreado) em 850 hPa e Pressão ao Nível Médio do Mar (hPa - linha contínua); (c) Linha de corrente e Intensidade do Vento (m/s - sombreado) em 250 hPa; (d) Divergência do Vento (10-4/s - sombreado) em 250 hPa e Pressão ao Nível Médio do Mar (hPa - linha contínua preta); (e) Vorticidade Relativa (10-5/s - sombreado) em 1000 hPa, Pressão ao Nível Médio do Mar (hPa - linha contínua preta) e Altura Geopotencial em 500 hPa (mcp - linha tracejada cinza).

4.3 INDICADORES TERMODINÂMICOS E DINÂMICOS

Os resultados exibidos adiante, foram desenvolvidos com o intuito de caracterizar padrões termodinâmicos e dinâmicos espaciais e temporais associados às chuvas ocorridas em 15 de fevereiro e 20 de março de 2022.

As figuras 19 a 25 apresentam a distribuição espacial da convergência dos ventos em 850 hPa (Figura 19), divergência dos ventos em 250 hPa (Figura 20), velocidade vertical do vento em 500 hPa (Figura 21), umidade específica em 500 hPa (Figura 22), índice k (Figura 23), índice TT (Figura 24) e CAPE (Figura 25). Em cada uma destas figuras são mostradas três instantes de tempo distintos, o primeiro (campos à esquerda), chamado como T0 se refere à 12 horas antes do início das chuvas, o segundo (campos localizados no centro da figura), referentes ao início da precipitação à (Ti) e o terceiro (Tf) (campos à direita), associados última hora de precipitação de cada evento, sendo eles às 22UTC para o dia 15 de fevereiro e 01UTC para o dia 21 de março.

As figuras 26 e 27, tem ênfase na avaliação na evolução temporal das variáveis sobre o posto Cel. Veiga, que apresentou os maiores acumulados de precipitação para ambos os eventos. Para tal, foi analisado os indicadores começando 12 horas antes e durante (32 horas), abrangendo as horas antecedente, o período de chuva e as horas posteriores.

4.3.1 ANÁLISE ESPACIAL

Na análise do estudo de caso de fevereiro, encontram-se áreas isoladas de convergência do vento em 850 hPa e divergência em 250 hPa na região Sudeste em todos os tempos observados (Figura 19 – linha superior). No entanto, as áreas não atingem Petrópolis, sendo os maiores valores no norte do estado e em Minas Gerais.

Em 20 de março, observa-se um núcleo intenso de convergência, coexistindo com um núcleo de divergência, no litoral de São Paulo no tempo T0, que se prolonga e descola-se para dentro do estado durante os tempos seguintes (Figura 19 e 20 – linha inferior). Para a hora inicial da precipitação os valores máximos de convergência dos ventos em baixos níveis da atmosfera encontra-se no litoral sul do estado, presente sobre Petrópolis apenas no Tf (Figura 19 – linha inferior). Contudo, a divergência dos ventos no Tf aparece nas regiões mais ao norte do estado (Figura 20 – linha inferior), indicando que o núcleo presente em Petrópolis não apresenta esse mecanismo de aprofundamento.

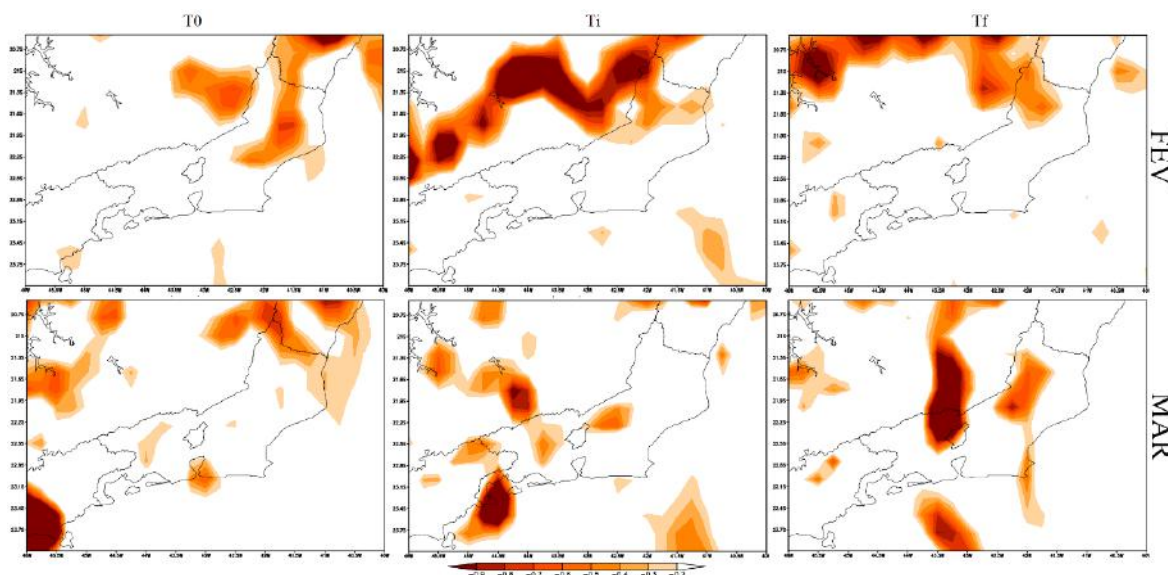


Figura 19: Convergência dos ventos em 850 hPa obtida através da reanálise ERA 5 para três instantes de tempo distintos, T0 (coluna à esquerda), Ti (coluna central) e Tf (coluna à direita), para o evento de 15 de fevereiro (linha superior) e 20 de março (linha inferior).

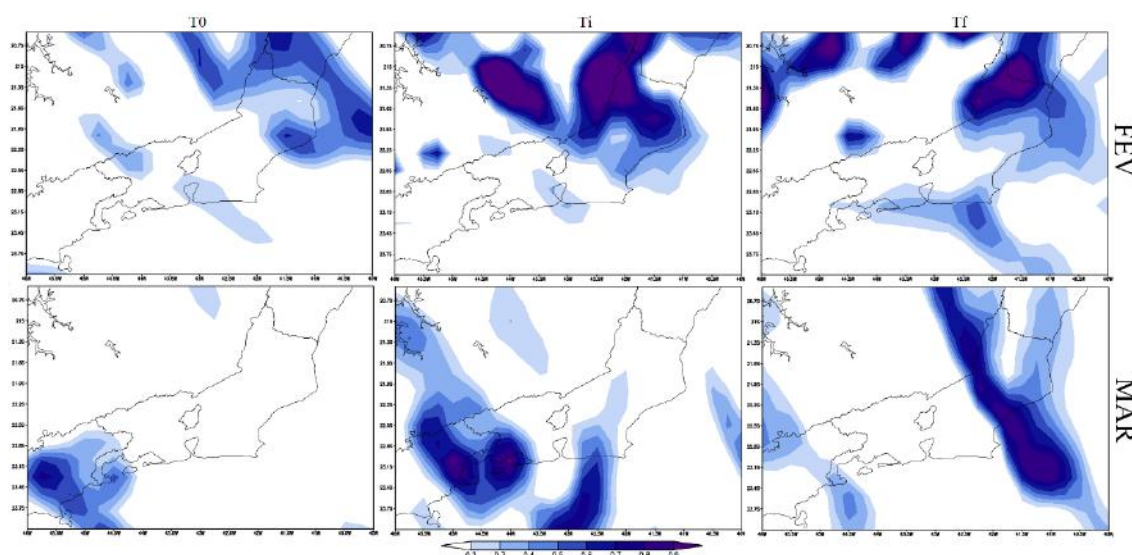


Figura 20: Divergência dos ventos em 250 hPa obtida através da reanálise ERA 5 para três instantes de tempo distintos, T0 (coluna à esquerda), Ti (coluna central) e Tf (coluna à direita), para o evento de 15 de fevereiro (linha superior) e 20 de março (linha inferior).

O parâmetro de velocidade vertical do ar, é útil para entender a dinâmica do movimento do ar em um determinado nível, no qual informa áreas de movimento ascendente (valores negativos) e movimento descendente (valores positivos). Na figura 21, o estudo de caso de fevereiro não demonstra sinal de movimento vertical em 500 hPa, em contrapartida em março (Figura 21 – linha inferior), principalmente no instante Ti, observa-se movimento ascendente coincidindo com os valores máximos de umidade específica (Figura 22 – linha inferior),

indicando que a tempestade dispôs de mecanismos dinâmicos de suporte em médios níveis para a formação da precipitação, ou seja, o caso de março contou com forte auxílio da passagem da frente pela região.

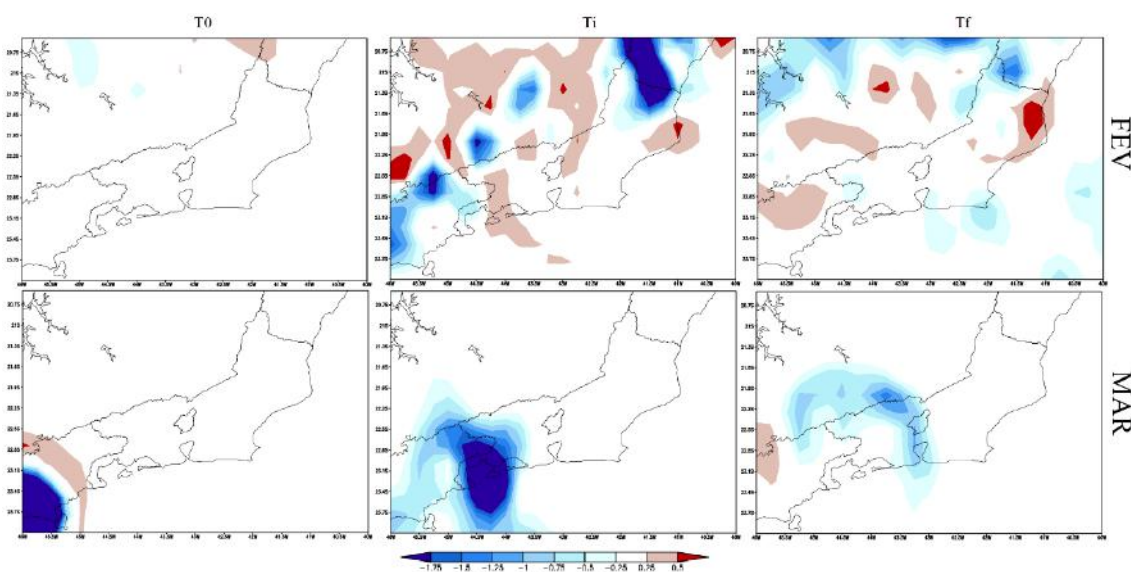


Figura 21: Velocidade vertical do vento em 500 hPa obtida através da reanálise ERA 5 para três instantes de tempo distintos, T0 (coluna à esquerda), Ti (coluna central) e Tf (coluna à direita), para o evento de 15 de fevereiro (linha superior) e 20 de março (linha inferior).

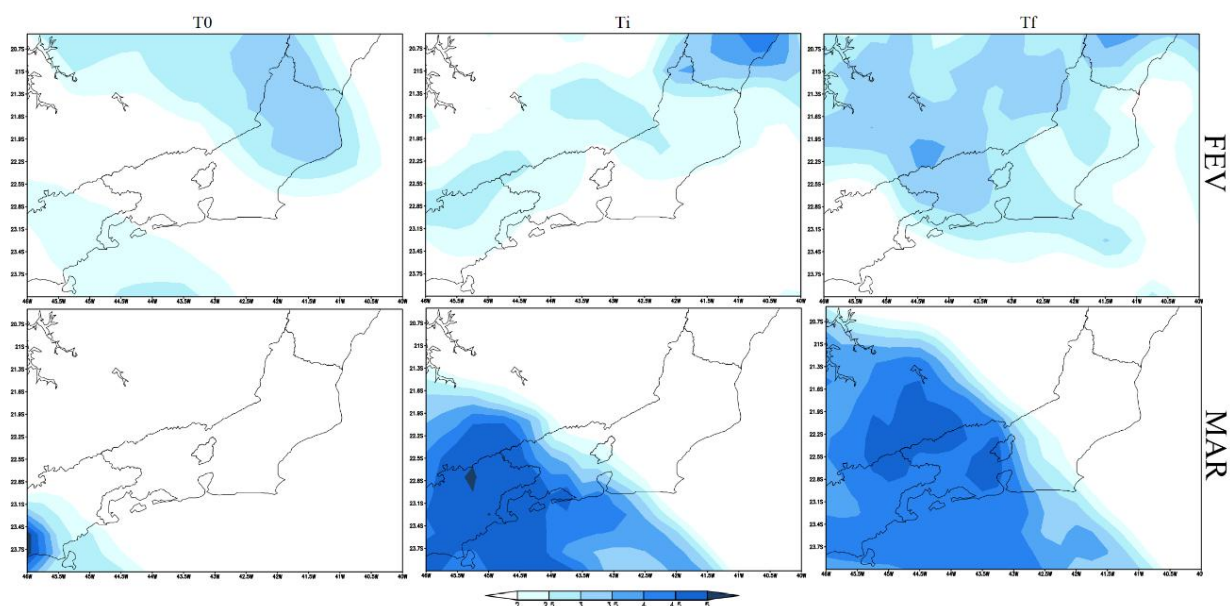


Figura 22: Umidade específica em 500 hPa obtida através da reanálise ERA 5 para três instantes de tempo distintos, T0 (coluna à esquerda), Ti (coluna central) e Tf (coluna à direita), para o evento de 15 de fevereiro (linha superior) e 20 de março (linha inferior).

Os índices K e TT são índices de instabilidade que são estimados com base nas diferenças de condições de temperatura e umidade entre dois ou três níveis isobáricos. Em ambas as chuvas ocorridas, do dia de 15 fevereiro e 20 de março de 2022, os índices K e TT apresentam valores altos, acima de 30° e 40° , respectivamente (Figura 23 e 24). Sendo que, para o evento de fevereiro os índices apresentam magnitudes maiores e uma maior dimensão espacial sobre o Estado do Rio de Janeiro (Figura 23 e 24 – linha superior).

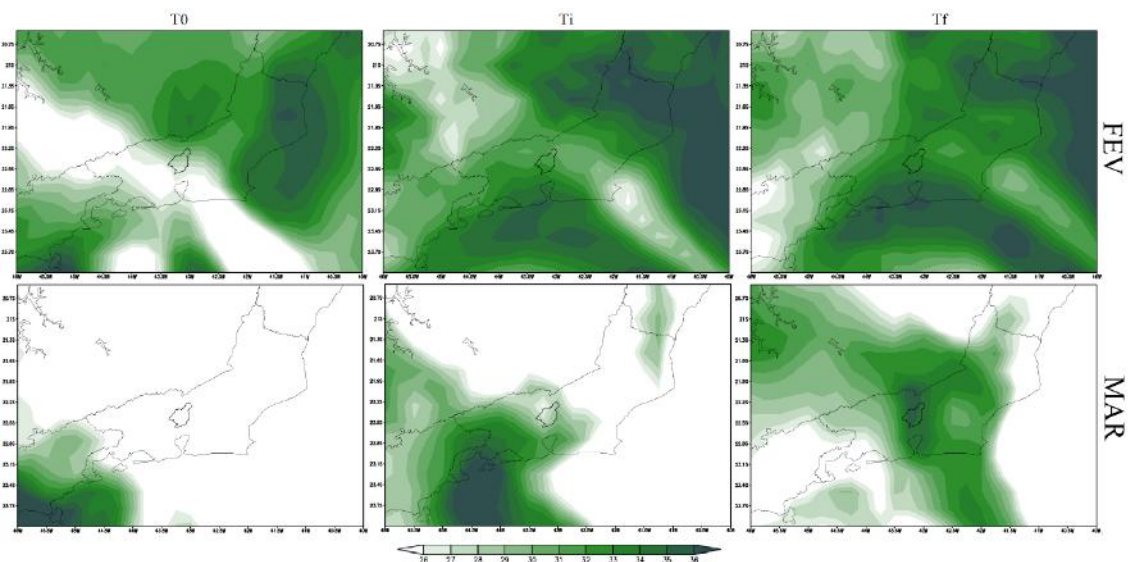


Figura 23: Índice K obtido através da reanálise ERA 5 para três instantes de tempo distintos, T0 (coluna à esquerda), Ti (coluna central) e Tf (coluna à direita), para o evento de 15 de fevereiro (linha superior) e 20 de março (linha inferior).

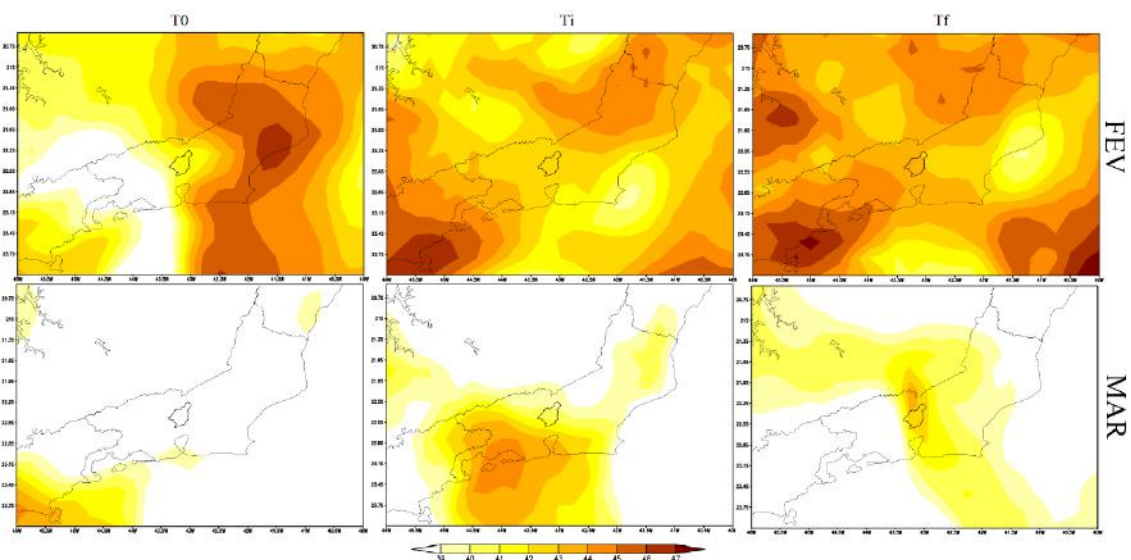


Figura 24: Índice TT obtido através da reanálise ERA 5 para três instantes de tempo distintos, T0 (coluna à esquerda), Ti (coluna central) e Tf (coluna à direita), para o evento de 15 de fevereiro (linha superior) e 20 de março (linha inferior).

O índice CAPE, assim como K e TT, pode ser um indicador de tempestades severas. Ao comparar os dois eventos, é nítida a diferença do valor de CAPE entre as duas. Durante o instante T0 de fevereiro, observa-se altos valores, principalmente sobre o litoral, enquanto no tempo Ti os valores diminuem expressivamente na região de Petrópolis (Figura 25 – linha superior). Apesar dos menores valores de CAPE observados em março, verifica-se um aumento de sua magnitude durante o tempo Ti.

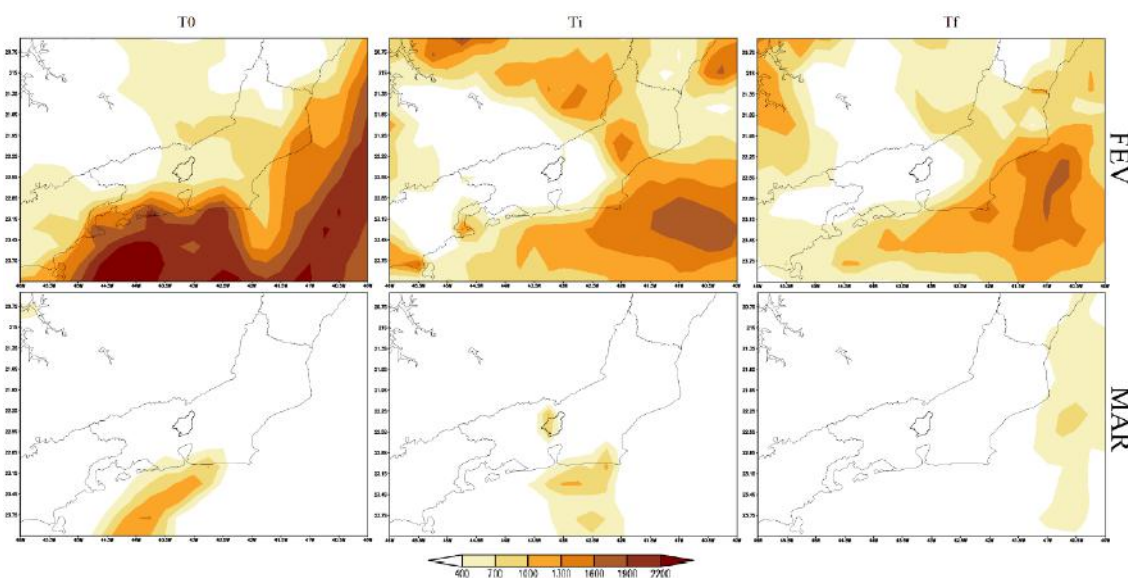


Figura 25: CAPE obtido através da reanálise ERA 5 para três instantes de tempo distintos, T0 (coluna à esquerda), Ti (coluna central) e Tf (coluna à direita), para o evento de 15 de fevereiro (linha superior) e 20 de março (linha inferior).

De forma geral, é possível notar que todos os campos analisados (Figuras 19 a 25) para o evento de chuva na cidade de Petrópolis em 20 de março de 2022, a distribuição espacial dos indicadores dinâmicos coincidiu com os núcleos de topo frio das imagens de satélite (Figura 17). Tal evento, esteve associado a um ingrediente da escala sinótica, passagem de uma frente fria pelo litoral do Sudeste. Em contrapartida, os resultados para o evento de 15 de fevereiro de 2022 não apresentaram uma boa representação espacial dos indicadores, com exceção dos índices K, TT e CAPE que estavam presentes sobre a região Sudeste, caracterizando assim os desafios operacionais para a previsão de chuvas extremas em escala local.

4.3.2 ANÁLISE DA EVOLUÇÃO TEMPORAL

A figura 26 apresenta os resultados da convergência do vento em 850 hPa (Figura 26a); divergência do vento em 250 hPa (Figura 26b), vorticidade relativa em 1000 hPa (Figura 27c) e velocidade vertical (Figura 26d) para o ponto de grade referente a estação Coronel Veiga. A linha verde representa os resultados para o dia 15 de fevereiro de 2022 e a linha laranja para o dia 20 de março de 2022.

As variáveis de convergência e divergência mostram melhores sinais para o evento de março, já que a convergência (divergência) exhibe sinal negativo (positivo) antes e durante a precipitação (Figura 26 a e b), apresentando uma condição dinâmica prolongada favorável ao desenvolvimento de precipitação. A área do posto Cel. Veiga não registrou convergência durante a observação de fevereiro (Figura 26a) e baixa amplitude da divergência (Figura 26b).

Os valores da vorticidade relativa em 1000 hPa e da velocidade vertical em 500 hPa apresentam a mesma tendência, com o máximo negativo ocorrendo algumas horas após o início da precipitação (Figura 26 c e d). Tal resultado indica um cenário favorável aos movimentos ascendentes e o intervalo de decréscimo dessas variáveis ocorrem justamente com a passagem da frente fria pela região mais próxima de Petrópolis. O caso de fevereiro não apresentou sinal de velocidade vertical e pouca amplitude na vorticidade relativa (Figura 26 c e d).

Os resultados encontrados na figura 26, podem indicar que o evento de fevereiro esteve associado a contribuições de escalas menores à sinótica. Apesar da situação atuante no dia ser de uma situação pós-frontal (Figura 15 e 16), o que pode ter desencadeado o evento de tempestade extrema ser padrões da microescala.

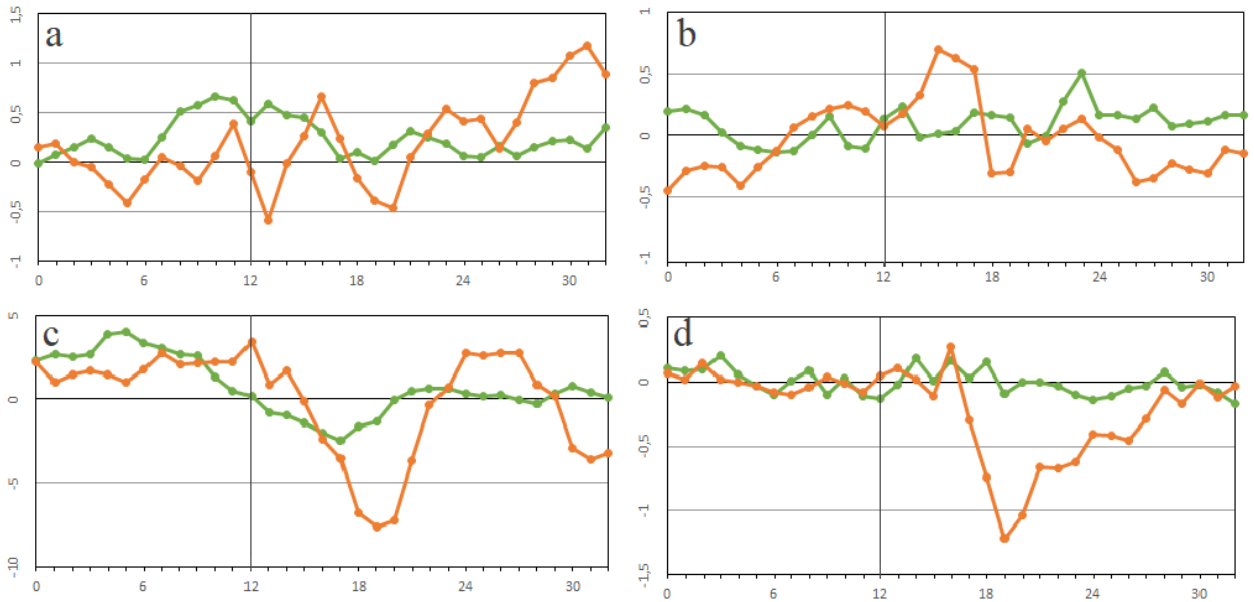


Figura 26: Linhas horizontais verde e laranja representam, respectivamente, o estudo de caso de fevereiro e de março de 2022 e as linhas verticais preta o início da precipitação. Sendo: a) Convergência do vento em 850 hPa; b) Divergência do vento em 250 hPa; c) Vorticidade relativa em 1000 hPa; d) Velocidade Vertical em 500 hPa.

Os valores de CAPE revelam um aumento da energia potencial algumas horas antes do início da precipitação para março, passando por uma abrupta queda após o início da chuva (Figura 27 a). Já para fevereiro, não ocorre qualquer oscilação ou valores significativos da CAPE (Figura 27 a). O índice K apresenta um acréscimo de seu valor até algumas horas após o início da chuva em março (Figura 27 b) e valores significativos para todo o período observado de fevereiro. O índice TT (Figura 27 c), para março e fevereiro, apresentam grades mudanças no decorrer do evento, no entanto apresentam valores expressivos, que podem contribuir para formação de tempestades.

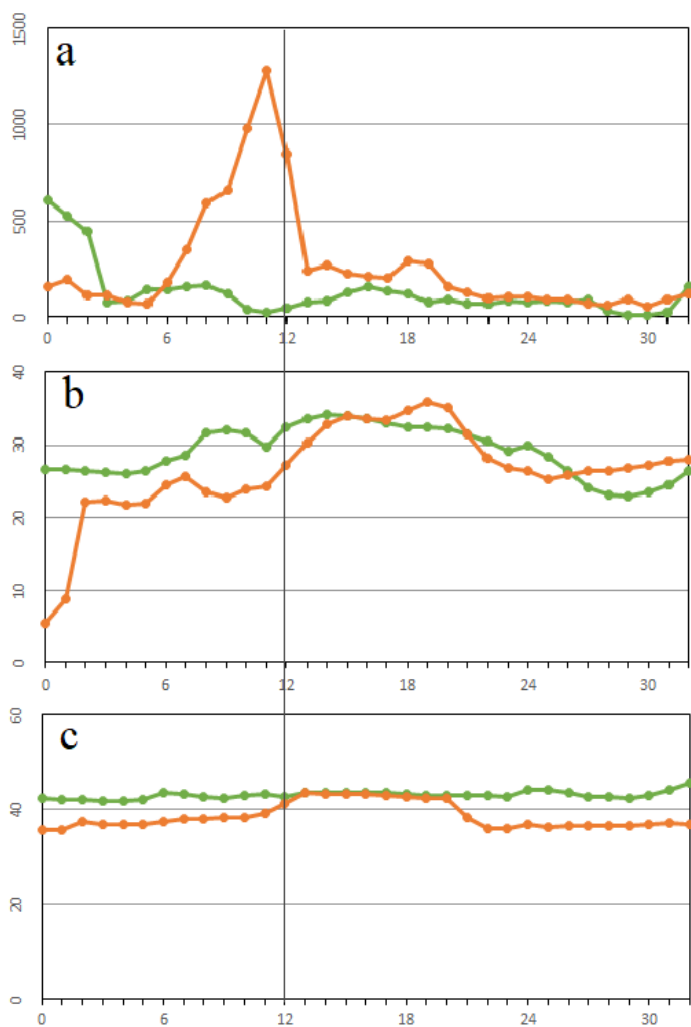


Figura 27: Linhas horizontais verde e laranja representam, respectivamente, o estudo de caso de fevereiro e de março de 2022 e as linhas verticais preta o início da precipitação. Sendo: a) CAPE; b) Índice K; c) Índice TT.

5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A identificação e análise das tempestades extremas associadas a episódios de desastres socioambientais é de extrema importância para uma melhor previsibilidade dos fenômenos, além de auxiliar na construção de medidas mitigadora para as regiões suscetíveis ao deslocamento de massa e enchentes. Dentre os diversos casos de enchentes e deslizamentos observados nos últimos anos, a escolha para os eventos de 15 de fevereiro e 20 de março de 2022, ocorreu devido aos altos volumes de chuva, ao estado de calamidade que a cidade foi imposta e devido à proximidade da data de ocorrência.

Através dos dados pluviométricos para as estações localizadas em Petrópolis, foi possível identificar que os maiores acumulados de precipitação foram observados no Distrito 1º da cidade para ambos os eventos. Verificou-se que o evento de 20 de março de 2022 apresentou os maiores acumulados em 6 e 24 horas. No entanto, os maiores acumulados de precipitação de 1 e 4 horas foram registrados durante o evento de 15 de fevereiro de 2022, evidenciando a atuação em um intervalo menor de horas. Assim, entende-se que um dos fatores para os desastres vivenciados na cidade foi a distribuição espacial e temporal da precipitação, visto que o evento de fevereiro acarretou maiores complicações.

Na análise dos sistemas sinóticos atuantes nos dias dos eventos, identificou-se a atuação de uma frente fria, sendo para fevereiro uma situação pós passagem e em março a frente apresentou deslocamento sobre a região de interesse no dia do evento.

Finalmente, o presente artigo dedicou atenção aos indicadores dinâmicos e termodinâmicos de tempestades severas, na qual a abordagem partia da análise de 32 horas de observação. Por meio deste, verificou-se que o evento de março apresentou uma boa concordância com os indicadores, tanto no acompanhamento espacial quanto na evolução temporal dos valores. A partir das variáveis foi possível notar a intensidade dos núcleos de precipitação atuando desde o litoral de São Paulo, 12 horas antes do início de precipitação, até a atuação dos mesmos sobre a cidade. Confirmando a importância nas análises dinâmicas e termodinâmicas para previsão de eventos de tempestades, em especial, associados a passagem de frente fria.

Através dos resultados da distribuição espacial dos indicadores termodinâmicos sobre o estado do Rio de Janeiro, nota-se valores mais intensos para os índices K, TT e CAPE para o evento de fevereiro. Tal apontamento indica que o evento pode ter contado com uma contribuição maior das camadas atmosféricas mais baixas, sofrendo maior influência da umidade e circulação dos ventos nos níveis mais baixos.

6 PROPOSTAS FUTURAS

Sugere-se como trabalhos futuros, análises e estudos mais aprofundados, em especial para o evento de 15 de fevereiro de 2022, utilizando modelos numéricos de altíssima resolução para identificar efeitos mais locais que contribuem para o desenvolvimento de tempestades. Buscando contribuir para o aprimoramento de técnicas e soluções que permitam o entendimento e previsibilidade dos eventos que acarretam desastres socioambientais.

Também é relevante, uma análise observando outros eventos de precipitação intensa na última década, a fim de produzir compostos que irão auxiliar a encontrar padrões atmosféricos.

6 REFERÊNCIAS

AHRENS D., SAMSON P. J. *Extreme Weather and Climate*. Cengage Learning, 511 p., 2011.

ANDRADE, K. M. *Climatologia e comportamento dos sistemas frontais sobre a América do Sul*. Dissertação de Mestrado em Meteorologia, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São Paulo, São José dos Campos, Brasil, 2005.

BLANCO, Cintia Maria Rodrigues. *Processos de Intensificação Orográfica da Precipitação na Serra do Mar em São Paulo*. 1999. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999. doi:10.11606/D.14.1999.tde-10042007-102412. Acesso em: 2023-03-20.

BONNER, W. D. *Climatology of the low level jet*. *Monthly Weather Review*, v. 96, n. 12, p. 833–850, 1968.

BONNET, S. M.; DEREZYNSKI, C. P.; NUNES, A. *Caracterização Sinótica e Climatológica de Eventos de Chuva Pós-Frontal no Rio de Janeiro*. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 33, n. 3, p. 547–557, 1 jul. 2018

BRITO, T. T. et al. *Multivariate analysis applied to monthly rainfall over Rio de Janeiro state, Brazil*. *Meteorology and Atmospheric Physics*, v. 129, n. 5, p. 469–478, 2017.

CARVALHO, L. M.; JONES, C.; LIEBMANN, B. *Extreme precipitation events in southeastern South America and large-scale convective patterns in the South Atlantic convergence zone*. *Journal of Climate*, v. 15, n. 17, p. 2377-2394, 2002.

CAMPETELLA, C. M.; VERA, C. S. *The influence of the Andes mountains on the South American low-level flow*. *Geophysical Research Letters*, v. 29, n. 17, 1 set. 2002.

CAVALCANTI, I. F. A., KOUSKY, V. E. “Sistemas meteorológicos que afetam o tempo na América do Sul: Frentes frias sobre o Brasil”, parte I. In: _____. CAVALCANTE, I.F.A.; FERREIRA, N.J.; SILVA DIAS, M.A.F.; JUSTI, M.G.A. *Tempo e clima no Brasil*. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

CHOU, S. C.; BUSTAMANTE, J. F.; GOMES, J. L. Predictability of heavy rainfall events over the Serra do Mar. XVII International Conference on Southern Hemisphere Meteorology and Oceanography. Anais...2006.

CPRM: Modesto, F.B.F.; Kuhlmann, L.G.; Jacques, P.D.; Ribeiro, R.S.; Santos, T.D. (orgs) (2022). Avaliação técnica pós-desastre, Petrópolis, RJ. Rio de Janeiro: CPRM, 2022. 4p. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/22668> Acesso em: 30 de julho de 2022. CPTEC. Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos, c2016. Disponível em: . Acesso em: 14 de março de 2023.

DA SILVA, F. P. et al. Synoptic thermodynamic and dynamic patterns associated with Quitandinha River flooding events in Petrópolis, Rio de Janeiro (Brazil). *Meteorology and Atmospheric Physics*, v. 131, n. 4, p. 845–862, 2019.

DOSWELL III, C. A. The distinction between large-scale and mesoscale contribution to severe convection: A case study example. *Weather and Forecasting*, v. 2, n. 1, p. 3–16, 1987.

FERREIRA, C.; REBOITA, M. S. Índices De Instabilidade: O Que São E Para Que Servem? [s.l.] Clube de Autores, 2020.

FOSS, Marilei. Efeitos Da Orografia Do Sudeste Da América Do Sul Na Estrutura Dos Sistemas Frontais. 2016.

GEORGE, J. J. *Weather Forecasting for Aeronautics*. New York, Academic Press, 1960.

GONÇALVES, L.F.H. (1998) Avaliação e diagnóstico da distribuição espacial e temporal dos movimentos de massa com a expansão da área urbana em Petrópolis - RJ. 170 f. Dissertação (Mestrado em Geografia). Departamento de Geografia, UFRJ, Rio de Janeiro

GUERRA, A. J. T.; GONÇALVES, L. F. H.; LOPES, P. B. M. Evolução histórico-geográfica da ocupação desordenada e movimentos de massa no município de Petrópolis, nas últimas décadas. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 8, n. 1, 2007.

HERSBACH, H. et al. ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), 2023. DOI: 10.24381/cds.adbb2d47.

HERSBACH, H. et al. ERA5 hourly data on pressure levels from 1940 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), 2023. DOI: 10.24381/cds.bd0915c6

HIDALGO NUNES, L.; KOGA VICENTE, A.; HENRIQUE CANDIDO, D. “Clima da Região Sudeste do Brasil”. In: _____, CAVALCANTE, I.F.A.; FERREIRA, N.J.; SILVA DIAS, M.A.F.; JUSTI, M.G.A. Tempo e clima no Brasil. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.

HOUZE, R. A., JR. Cloud Dynamics. 1st ed., San Diego, USA, Academic Press, 1993.

INEA. Instituto Estadual do Ambiente. Disponível em: . Acesso em: 02 de março de 2023

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). IBGE/Município de Petrópolis. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rj/petropolis/panorama>. Acesso: 25 ago. 2022.

IPCC - INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. Chapter 11: Weather and climate extreme events in a changing climate. 2021.

JOHNSON, R. H.; MAPES, B. E. Mesoscale Processes and Severe Convective Weather. Em: DOSWELL, C. A. (Ed.). Severe Convective Storms. Boston, MA: American Meteorological Society, 2001. p. 71–122.

KOBIYAMA, M. et al. Prevenção de desastres naturais: conceitos básicos. [s.l.] Organic Trading Curitiba, 2006.

KODAMA, Y. Large-scale common features of subtropical precipitation zones (the Baiu frontal zone, the SPCZ, and the SACZ) Part I: Characteristics of subtropical frontal zones. Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II, v. 70, n. 4, p. 813–836, 1992.

LE MOS, C. F., CALBETE, N. O. “Sistemas Frontais que atuaram no litoral de 1987 a 1995”. Climanálise Especial, edição comemorativa de 10 anos, 1996.

LOPES, A. R. S. A natureza do risco: paisagem e risco na análise dos desastres socioambientais. *Esboços: histórias em contextos globais*, v. 20, n. 30, p. 52–66, 2013.

LUDLAM, F. H. Severe Local Storms: A Review. Em: ATLAS, D. et al. (Eds.). *Severe Local Storms*. Boston, MA: American Meteorological Society, 1963. p. 1–32.

LUIZ SILVA, W.; PEREIRA DEREZYNSKI, C. Caracterização Climatológica e Tendências Observadas em Extremos Climáticos no Estado do Rio de Janeiro Climatic risk in territorial planning: dynamics of tropical climate units in context of environmental changes View project CARACTERIZAÇÃO DA METEOROLOGIA E DO CLIMA DE ONDAS DA BACIA DE SANTOS View project. *Anuário do Instituto de Geociências*, v. 37, p. 123–138, 2014.

MARENGO, J. A. et al. Climatology of the Low-Level Jet East of the Andes as Derived from the NCEP-NCAR Reanalyses: Characteristics and Temporal Variability. *JOURNAL OF CLIMATE*, v. 17, n. 1, p. 15, 2004.

MILLER, R. C. Notes on analysis and severe storm forecasting procedures of the Air Force Global Weather Center. Technical Report 200 (Rev.). Air Weather Service (MAC) United States Air Force, 1972.

NASCIMENTO, E. DE L. Previsão de tempestades severas utilizando-se parâmetros convectivos e modelos de mesoescala: uma estratégia operacional adotável no Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 20, n. 1, p. 121–140, 2005.

NOGUÉS-PAEGLE, J.; MO, K. C. Alternating wet and dry conditions over South America during summer. *Monthly Weather Review*, v. 125, n. 2, p. 279–291, 1997.

ORLANSKI, I. A Rational Subdivision of Scales for Atmospheric Processes. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 56, n. 5, p. 527–530, 1975.

Petrópolis registrou 250 deslizamentos em 24 horas por causa da chuva | Agência Brasil. Disponível em: <<https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2022-03/petropolis-registrou-250-deslizamentos-em-24-horas-por-causa-da-chuva>>. Acesso em: 2 abr. 2023.

POLIFKE DA SILVA, F. et al. Identification of rainfall and atmospheric patterns associated with Quitandinha River flooding events in Petropolis, Rio de Janeiro (Brazil). *Natural Hazards*, v. 103, p. 3745–3764, 2020.

REBOITA, M. et al. Precipitation regimes in South America: a bibliography review. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 25, p. 185–204, mar. 2010.

REBOITA, M. S.; KRUSCHE, N.; AMBRIZZI, T.; ROCHA, R. P. da. Entendendo o tempo e o clima na América do Sul. *Terrae Didactica*, Campinas, SP, v. 8, n. 1, p. 34–50, 2015. DOI: 10.20396/td.v8i1.8637425. Disponível em: <https://periodicos.sbu.unicamp.br/ojs/index.php/td/article/view/8637425>. Acesso em: 24 mar. 2023.

SATTYAMURTY, P., MATTOS, L. F. “Climatological lower tropospheric frontogenesis in midlatitudes due to horizontal deformation and divergence”. *Monthly Weather Review*, v. 117, pp. 1355-1364, 1989

SILVA DIAS, M. A. F. “Índices de instabilidade para previsão de chuva e tempestades severas”. Departamento de Ciências Atmosféricas, Instituto Astronômico e Geofísico, Universidade de São Paulo, pp. 1-10, 2000. Disponível em: <https://www.redemet.aer.mil.br/uploads/2014/04/indice_sweat.pdf>. Acesso em: 14 mar. 2023.

SILVA DIAS, P. L. A preliminary study of the observed vertical mode structure of the summer circulation over tropical South America. *Tellus*, v. 37A, n. 2, p. 185-195, 1985.

SILVA DIAS, P. L.; SCHUBERT, W. H.; DE MARIA, M. Large-scale response of the tropical atmosphere to transient convection. *Journal of Atmospheric Sciences*, v. 40, n. 11, p. 2689-2707, 1983

SILVA, Fabricio Polifke da. Previsão de tempestades severas e de transbordamentos no rio Quitandinha – Petrópolis/RJ. Orientadores: Otto Corrêa Rotunno Filho, Maria Gertrudes

Alvarez Justi da Silva, Afonso Augusto Magalhães de Araújo. Tese (doutorado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Civil, 2019

SILVA, J. P. R.; REBOITA, M. S.; ESCOBAR, G. C. J. CARACTERIZAÇÃO DA ZONA DE CONVERGÊNCIA DO ATLÂNTICO SUL EM CAMPOS ATMOSFÉRICOS RECENTES. *Revista Brasileira de Climatologia*, [S. l.], v. 25, 2021. DOI: 10.5380/abclima.v25i0.64101. Disponível em: <https://ojs.ufgd.edu.br/index.php/rbclima/article/view/14163>. Acesso em: 25 mar. 2023.

STENSRUD, D. J. Importance of Low-Level Jets to Climate: A Review. *Journal of Climate*, v. 9, n. 8, p. 1698–1711, 1996.

TAVARES, C. de M. G.; FERREIRA, C. de C. M. A RELAÇÃO ENTRE A OROGRAFIA E OS EVENTOS EXTREMOS DE PRECIPITAÇÃO PARA O MUNICÍPIO DE PETRÓPOLIS-RJ. *Revista Brasileira de Climatologia*, [S. l.], v. 26, 2021. DOI: 10.5380/abclima.v26i0.71123. Disponível em: <https://ojs.ufgd.edu.br/index.php/rbclima/article/view/14242>. Acesso em: 23 mar. 2023.

Tragédia em Petrópolis: número de mortos sobe para 186 e 71 seguem desaparecidos - BBC News Brasil. Disponível em: <<https://www.bbc.com/portuguese/brasil-60402524>>. Acesso em: 2 abr. 2023.

VERA, C. et al. The South American low-level jet experiment. *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 87, p. 63–77, 2006.

WISNER, Ben et al. *At Risk: natural hazards, people's vulnerability and disasters*. 2. ed. London: Routledge, 2003.