



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
INSTITUTO DE RECURSOS NATURAIS
PROGRAMA DE GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS**

**ANÁLISE DE EVENTOS EXTREMOS DE PRECIPITAÇÃO NO
SUDESTE DO BRASIL NO VERÃO 2021/2022**

MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO

Fabiana da Rocha Bartolomei

Itajubá, MG, Brasil

2022

ANÁLISE DE EVENTOS EXTREMOS DE PRECIPITAÇÃO NO SUDESTE DO BRASIL NO VERÃO 2021/2022

por

Fabiana da Rocha Bartolomei

Monografia apresentada à comissão examinadora Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas da Universidade Federal Itajubá (UNIFEI, MG), como requisito parcial para obtenção do grau de
Bacharel em Ciências Atmosféricas.

Orientador: Michelle Simões Reboita

**Itajubá, MG, Brasil
2022**

**Universidade Federal de Itajubá
Instituto de Recursos Naturais
Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a
Monografia

**ANÁLISE DE EVENTOS EXTREMOS DE PRECIPITAÇÃO NO
SUDESTE DO BRASIL NO VERÃO 2021/2022**

elaborada por

Fabiana da Rocha Bartolomei

Como requisito parcial para a obtenção do grau de
Bacharel em Ciências Atmosféricas

Comissão Examinadora:



Michelle Simões Reboita, Dr(a). (UNIFEI)
(Presidente/Orientador)



Vanessa Silveira Barreto Carvalho , Dr(a). (UNIFEI)



Luiz Felipe Gozzo, Dr. (UNESP)



Carla Borges de Lemos (Prefeitura de Itajubá)

Itajubá, 17 de novembro de 2022 .

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer aos meus pais, Pedro e Solange Bartolomei, por terem sido fortes desde que eu nasci e por sempre priorizarem um ensino de qualidade para mim e para a minha irmã. Além disso, mesmo escutando minhas diversas reclamações, sempre prestaram apoio em meus momentos mais difíceis, me ensinando que tudo tem seu tempo.

Agradeço à minha irmã, Bianca Bartolomei, por todos os momentos que vivemos juntas, por toda a compaixão em relação ao meu primeiro ano de faculdade. Obrigada pelas dicas, pela paciência e por sempre estar presente me ensinando a crescer cada vez mais.

Agradeço às minhas amigadas, tanto de Itajubá quanto de Varginha, por terem me acompanhado em uma dura jornada. Obrigada a todos por aguentarem minhas desculpas e por me mostrarem a realidade, que a faculdade não é apenas dias de estudo. Obrigada por sempre conversar comigo sobre meus problemas e por tornar a minha vida acadêmica mais leve.

Muito obrigada também aos meus professores por compartilharem conhecimentos comigo, por me escutarem quando mais precisei e por sempre confiar em meus serviços ao longo do curso.

Meus agradecimento, especialmente, para os professores: Michelle Simões Reboita, minha orientadora de TCC, que me ensinou muitas coisas sobre a vida e sobre a área de sinótica, e Arcilan Trevenzoli Assireu, que foi quem confiou inicialmente em meus serviços como pesquisadora, sendo meu orientador de IC e me proporcionou diversas aventuras e experiências.

Para meus pais, que nunca me deixaram desistir. Obrigada por sempre compreenderem minhas angústias e por terem dedicado a sua vida em promover uma vida digna para mim.

RESUMO

Monografia de Graduação
Programa de Graduação em Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Itajubá, MG, Brasil

Análise dos Eventos Extremos de Precipitação no Sudeste do Brasil no Verão 2021/2022

AUTOR(A): FABIANA DA ROCHA BARTOLOMEI
ORIENTADOR: MICHELLE SIMÕES REBOITA
Local e Data da Defesa: Itajubá, 17 de novembro de 2022.

No período de dezembro de 2021 a março de 2022, o sudeste do Brasil, em alguns dias, foi afetado por eventos extremos de precipitação, o que também impactou o nível dos rios e causou problemas sociais. Diante disso, este estudo tem como objetivo: (a) identificar sistemas atmosféricos presentes na ocorrência de quatro eventos extremos de precipitação registrados no referido período e que chamaram a atenção da mídia e (b) validar os prognósticos de tempo elaborados para a cidade de Itajubá, sul de Minas Gerais, com antecedência de 12, 24 e 48 horas. Para tanto, é realizada uma análise sinótica dos eventos extremos de precipitação ocorridos em Brumadinho - MG (08 de janeiro), Petrópolis - RJ (15 de fevereiro e 20 de março) e Muriaé - MG (09 de fevereiro). A característica comum desses quatro eventos extremos é a passagem de uma frente fria próximo à costa sudeste do Brasil que contribui para a canalização da umidade no sudeste brasileiro. Com relação aos prognósticos de tempo para Itajubá, verificou-se que a previsão das temperaturas mínimas e máximas possuem um de até 1°C enquanto para a precipitação há um viés de 5 a 10 mm. Em geral, a previsão com melhor assertividade é a com antecedência de 12 horas.

Palavras-chave: Precipitação diária; ZCAS; Previsão do tempo; sudeste do Brasil; Itajubá.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 01 - Precipitação horária (mm) em (a) Brumadinho no dia 08/01/22, em que sua climatologia para o mês de janeiro é de 127 mm, (b) Muriaé no dia 09/02/22, cuja climatologia para o mês de fevereiro é de 156,3 mm, (c) Petrópolis no dia 15/02/22, cuja climatologia para o mês de fevereiro é de 259 mm, e (d) Petrópolis no dia 20/03/22, com climatologia para o mês de março de 252 mm.....20
- Figura 02 - Topografia da região sudeste do Brasil (metros)Localização do município de Itajubá (ponto verde), Brumadinho (ponto preto), Petrópolis (ponto azul) e Muriaé (ponto amarelo) em relação à região sudeste do Brasil.....21
- Figura 03 - Imagem aérea da cidade de Itajubá mostrando o rio atravessando a cidade.....24
- Figura 04 - Jatos (intensidade do vento acima de 30 m/s) em 250 hPa, em hachurado, pressão a nível médio do mar (hPa), em linhas contínuas pretas, e a espessura da camada (diferença entre a altura geopotencial em 500 e 1000 hPa, em gpm), representada pelas linhas pontilhadas em vermelho, para os dias 07,08 e 09 de janeiro, representados pela primeira, segunda e terceira coluna, respectivamente. O ponto vermelho representa a localização da cidade de Brumadinho,MG.....34
- Figura 05 - Imagens do canal Infravermelho (CH 13) do satélite GOES 13, em que a primeira fileira é referente ao dia 07, a segunda,08 e a terceira ao dia 09 de janeiro de 2022 às 00, 06,12 e 18 UTC, respectivamente.....35
- Figura 06 - Divergência do fluxo de umidade integrado na coluna em diferentes níveis de pressão (kg m/s), em hachurado, e vetores do fluxo integrado na vertical (km/h) para os dias 07,08 e 09 de janeiro, representados pela primeira, segunda e terceira coluna,

respectivamente. O ponto vermelho representa a localização da cidade de Brumadinho, MG.....36

Figura 07 - Cisalhamento do vento (diferença entre a velocidade do vento em 500 hPa e 1000 hPa, em m/s), em hachurado, divergência dos ventos em 250 hPa maiores que $0.5(s^{-1})$, em linhas laranjas, e altura geopotencial em 250 hPa (m^2/s^2), em linhas pretas, para os dias 07,08 e 09 de janeiro, representados pela primeira, segunda e terceira coluna, respectivamente. O ponto preto representa a localização da cidade de Brumadinho, MG.....37

Figura 08 - Umidade relativa (soma da umidade relativa em 850 hPa e 500 hPa, dado em porcentagem), a altura geopotencial em 500 hPa (m^2/s^2), em linhas vermelhas, e a velocidade vertical ômega menores que $-0.2(Pa.s^{-1})$, em linhas cianos, para os dias 07,08 e 09 de janeiro, representados pela primeira, segunda e terceira coluna, respectivamente. O ponto preto representa a localização da cidade de Brumadinho, MG.....38

Figura 09 - Energia Potencial Disponível para Convecção (CAPE, em $J.kg^{-1}$), em shaded, o cisalhamento vertical negativo (diferença entre a velocidade do vento em 500 hPa e 1000 hPa, em m/s), em linhas vermelhas, e o cisalhamento positivo (diferença entre a velocidade do vento em 500 hPa e 1000 hPa, em m/s), em linhas azuis, para os dias 07,08 e 09 de janeiro, representados pela primeira, segunda e terceira coluna, respectivamente. O ponto vermelho representa a localização da cidade de Brumadinho, MG.....39

Figura 10 - Jatos (intensidade do vento acima de 30 m/s) em 250 hPa, em hachurado, pressão a nível médio do mar (hPa), em linhas contínuas pretas, e a espessura da camada (diferença entre a altura geopotencial em 500 e 1000 hPa, em gpm), representada pelas linhas pontilhadas em vermelho, para os dias 08,09 e 10 de fevereiro, representados pela primeira, segunda e terceira coluna,

- respectivamente. O ponto vermelho representa a localização da cidade de Muriaé, MG.....41
- Figura 11 - Imagens do canal Infravermelho (CH 13) do satélite GOES 13, em que a primeira fileira é referente ao dia 08, a segunda, 09 e a terceira ao dia 10 de fevereiro de 2022 às 00, 06, 12 e 18 UTC, respectivamente.....42
- Figura 12 - Divergência do fluxo de umidade integrado na coluna em diferentes níveis de pressão (kg m/s), em hachurado, e vetores do fluxo integrado na vertical (km/h) para os dias 08, 09 e 10 de fevereiro, representados pela primeira, segunda e terceira coluna, respectivamente. O ponto vermelho representa a localização da cidade de Muriaé, MG.....43
- Figura 13 - Cisalhamento do vento (diferença entre a velocidade do vento em 500 hPa e 1000 hPa, em m/s), em hachurado, divergência dos ventos em 250 hPa maiores que $0.5 (s^{-1})$, em linhas laranjas, e altura geopotencial em 250 hPa (m^2/s^2), em linhas pretas, para os dias 08, 09 e 10 de fevereiro, representados pela primeira, segunda e terceira coluna, respectivamente. O ponto preto representa a localização da cidade de Muriaé, MG.....44
- Figura 14 - Umidade relativa (soma da umidade relativa em 850 hPa e 500 hPa, dado em porcentagem), a altura geopotencial em 500 hPa (m^2/s^2), em linhas vermelhas, e a velocidade vertical ômega menores que $-0.2 (Pa.s^{-1})$, em linhas cianos, para os dias 08, 09 e 10 de fevereiro, representados pela primeira, segunda e terceira coluna, respectivamente. O ponto preto representa a localização da cidade de Muriaé, MG.....45
- Figura 15 - Energia Potencial Disponível para Convecção (CAPE, em $J.kg^{-1}$), em shaded, o cisalhamento vertical negativo (diferença entre a velocidade do vento em 500 hPa e 1000 hPa, em m/s), em linhas vermelhas, e o cisalhamento positivo (diferença entre a velocidade

do vento em 500 hPa e 1000 hPa, em m/s), em linhas azuis, para os dias 08,09 e 10 de fevereiro, representados pela primeira, segunda e terceira coluna, respectivamente. O ponto vermelho representa a localização da cidade de Muriaé, MG.....46

Figura 16 - Jatos (intensidade do vento acima de 30 m/s) em 250 hPa, em hachurado, pressão a nível médio do mar (hPa), em linhas contínuas pretas, e a espessura da camada (diferença entre a altura geopotencial em 500 e 1000 hPa, em gpm), representada pelas linhas pontilhadas em vermelho, para os dias 14,15 e 16 de fevereiro, representados pela primeira, segunda e terceira coluna, respectivamente. O ponto vermelho representa a localização da cidade de Petrópolis, RJ.....48

Figura 17 - Imagens do canal Infravermelho (CH 13) do satélite GOES 13, em que a primeira fileira é referente ao dia 14, a segunda,15 e a terceira ao dia 16 de fevereiro de 2022 às 00, 06,12 e 18 UTC, respectivamente.....49

Figura 18 - Divergência do fluxo de umidade integrado na coluna em diferentes níveis de pressão ($kg\ m/s$), em hachurado, e vetores do fluxo integrado na vertical (km/h) para os dias 14,15 e 16 de fevereiro, representados pela primeira, segunda e terceira coluna, respectivamente. O ponto vermelho representa a localização da cidade de Petrópolis, RJ.....50

Figura 19 - Cisalhamento do vento (diferença entre a velocidade do vento em 500 hPa e 1000 hPa, em m/s), em hachurado, divergência dos ventos em 250 hPa maiores que $0.5(s^{-1})$, em linhas laranjas, e altura geopotencial em 250 hPa (m^2/s^2), em linhas pretas, para os dias 14, 15 e 16 de fevereiro, representados pela primeira, segunda e terceira coluna, respectivamente. O ponto preto representa a localização da cidade de Petrópolis, RJ.....51

Figura 20 - Umidade relativa (soma da umidade relativa em 850 hPa e 500 hPa, dado em porcentagem), a altura geopotencial em 500 hPa (m^2/s^2), em linhas vermelhas, e a velocidade vertical ômega menores que $-0.2 \text{ (Pa.s}^{-1}\text{)}$, em linhas cianos, para os dias 14,15 e 16 de fevereiro, representados pela primeira, segunda e terceira coluna, respectivamente. O ponto preto representa a localização da cidade de Petrópolis,RJ.....52

Figura 21 - Energia Potencial Disponível para Convecção (CAPE, em $J.kg^{-1}$), em shaded, o cisalhamento vertical negativo (diferença entre a velocidade do vento em 500 hPa e 1000 hPa, em m/s), em linhas vermelhas, e o cisalhamento positivo (diferença entre a velocidade do vento em 500 hPa e 1000 hPa, em m/s), em linhas azuis, para os dias 14,15 e 16 de fevereiro, representados pela primeira, segunda e terceira coluna, respectivamente. O ponto vermelho representa a localização da cidade de Petrópolis, RJ.....53

Figura 22- Jatos (intensidade do vento acima de 30 m/s) em 250 hPa, em hachurado, pressão a nível médio do mar (hPa), em linhas contínuas pretas, e a espessura da camada (diferença entre a altura geopotencial em 500 e 1000 hPa, em gpm), representada pelas linhas pontilhadas em vermelho, para os dias 19,20 e 21 de março, representados pela primeira, segunda e terceira coluna, respectivamente. O ponto vermelho representa a localização da cidade de Petrópolis, RJ.....55

Figura 23 - Imagens do canal Infravermelho (CH 13) do satélite GOES 13, em que a primeira fileira é referente ao dia 19, a segunda,20 e a terceira ao dia 21 de março de 2022 às 00, 06,12 e 18 UTC, respectivamente.....56

Figura 24 - Divergência do fluxo de umidade integrado na coluna em diferentes níveis de pressão ($kg \text{ m/s}$), em hachurado, e vetores do fluxo integrado na vertical (km/h) para os dias 19,20 e 21 de março, representados pela primeira, segunda e terceira coluna,

respectivamente. O ponto vermelho representa a localização da cidade de Petrópolis,RJ.....57

Figura 25 - Cisalhamento do vento(diferença entre a velocidade do vento em 500 hPa e 1000 hPa, em m/s), em hachurado, divergência dos ventos em 250 hPa maiores que $0.5(s^{-1})$, em linhas laranjas, e altura geopotencial em 250 hPa (m^2/s^2), em linhas pretas, para os dias 19,20 e 21 de março, representados pela primeira, segunda e terceira coluna, respectivamente. O ponto preto representa a localização da cidade de Petrópolis,RJ.....58

Figura 26 - Umidade relativa (soma da umidade relativa em 850 hPa e 500 hPa, dado em porcentagem), a altura geopotencial em 500 hPa (m^2/s^2), em linhas vermelhas, e a velocidade vertical ômega menores que $-0.2(Pa.s^{-1})$, em linhas cianos, para os dias 19,20 e 21 de março, representados pela primeira, segunda e terceira coluna, respectivamente. O ponto preto representa a localização da cidade de Petrópolis,RJ.....59

Figura 27 - Energia Potencial Disponível para Convecção (CAPE, em $J.kg^{-1}$), em shaded, o cisalhamento vertical negativo (diferença entre a velocidade do vento em 500 hPa e 1000 hPa, em m/s), em linhas vermelhas, e o cisalhamento positivo (diferença entre a velocidade do vento em 500 hPa e 1000 hPa, em m/s), em linhas azuis, para os dias 19,20 e 21 de março, representados pela primeira, segunda e terceira coluna, respectivamente. O ponto vermelho representa a localização da cidade de Petrópolis, RJ.....60

Figura 28 - Gráficos de (a) temperatura mínima média e climatologia, (b) temperatura máxima média e climatologia e (c) precipitação média e climatologia para o período de verão 2021/2022.....62

Figura 29 - Gráfico da temperatura mínima ($^{\circ}C$) com a validação, em linha amarela, do prognóstico do previsor com antecedência de 48

horas, em linha azul, e 72 horas, em linha vermelha, para o verão de 2021/2022 para a cidade de Itajubá.....64

Figura 30 - Gráfico da temperatura máxima (°C) com a validação, em linha amarela, do prognóstico do previsor com antecedência de 24 horas, em linha azul, 48 horas, em linha vermelha, e 72 horas, em linha verde, para o verão de 2021/2022 para a cidade de Itajubá.....65

Figura 31 - Gráfico da precipitação (mm) com a validação, em barras amarelas, do prognóstico do previsor com antecedência de 24 horas, em linha azul, 48 horas, em linha vermelha, e 72 horas, em linha verde, para o verão de 2021/2022 para a cidade de Itajubá.....66

Figura 32 - Gráfico da precipitação (mm) com a validação, em barras amarelas, do prognóstico do previsor com antecedência de 24 horas, em linha azul, 48 horas, em linha vermelha, e 72 horas, em linha verde, para os meses: (a) dezembro, (b) janeiro, (c) fevereiro e (d) março, de 2021/2022 para a cidade de Itajubá.....67

Figura 33 - Mapas interativos com os sistemas atmosféricos que causaram os eventos extremos em (a) Brumadinho em 08 de janeiro, (b) Muriaé em 09 de fevereiro, (c) Petrópolis em 15 de fevereiro e (d) Petrópolis em 20 de março.....69

LISTA DE TABELAS

- TABELA 1 - Informações (volume de chuva, danos ocorridos e reportagens) sobre os eventos extremos de precipitação ocorridos em Petrópolis, nos dias 15 de fevereiro e 20 de março, em Muriaé, no dia 09 de fevereiro, e em Brumadinho, em 12 de fevereiro de 2022.....19
- TABELA 2 - Informações sobre o órgão responsável, resolução horizontal, níveis verticais e o horizonte de previsão dos modelos ECMWF,GFS,WRF,COSMO e ICON, usados na elaboração de boletins meteorológicos em Itajubá.....27
- TABELA 3 - Tipos de tempestades em função da Energia Potencial Disponível para Convecção (CAPE, em J/kg) e cisalhamento do vento (em m/s) calculado na camada de 500 e 1.000 hPa.....29
- TABELA 4 - Informações sobre a classificação de precipitação de acordo com o volume diário previsto, separado em sem restrições, observação, atenção, alerta e emergência, de acordo com faixas de precipitação.....30
- TABELA 5 - Informações sobre a classificação de precipitação de acordo com a intensidade da precipitação, sendo medido em mm/h , separado em fraca, moderada, forte e extrema.....31
- TABELA 6 - Disposição dos dados de previsão do tempo para as temperaturas mínimas, máximas e precipitação para Itajubá no horizonte de 03 dias e validação (valores observados na estação meteorológica).....31
- TABELA 7 - Resumo dos casos de eventos extremos de precipitação com as cidades de estudo, os valores de cisalhamento vertical do vento

(m/s), índice CAPE (J/kg), a classificação do tipo de tempestade e a presença de ZCAS.....61

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

hPa - Hectopascal

CH - Channel, canal em inglês

ZCAS - Zona de Convergência do Atlântico Sul

Cb - Cumulonimbus

h - Horas

mm - Milímetros

ZCAS - Zona de Convergência do Atlântico Sul

km - quilômetros

S - Sul

O - Oeste

mgp - medida de geopotencial, metros geopotencial

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

UNIFEI - Universidade Federal de Itajubá

Cemaden - Centro de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais

PNMM - Pressão ao nível médio do Mar

CAPE - Energia potencial disponível para a convecção

J/kg - Joules por quilograma

MG - Minas Gerais

RJ - Rio de Janeiro

CPTEC - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos

UTC - *Universal Time Coordinated*, tempo universal coordenado em inglês

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE TABELAS.....	xiv
LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS.....	...xv
1. INTRODUÇÃO	18
2. MATERIAL E MÉTODOS	24
2.1. ÁREA DE ESTUDO	24
2.2. Dados	24
2.2.1 Imagens de Satélite	25
2.2.2 Reanálise ERA5	25
2.2.3 Dados de Modelos Numéricos	26
2.2.4 Dados da Estação Meteorológica da UNIFEI	27
2.2.5 Dados de Pluviômetro	28
2.3. METODOLOGIA	28
2.3.1 Eventos Extremos no Sudeste do Brasil e Análise Sinótica	28
2.3.2 Etapas da Previsão do Tempo e Validação para Itajubá	29
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
3.1 Análise Sinótica dos Eventos Extremos de Precipitação	32
3.1.1 Caso de Brumadinho em 08/01/2022	32
3.1.2 Caso de Muriaé em 09/02/2022	39
3.1.3 Caso de Petrópolis em 15/02/2022	46
3.1.4 Caso de Petrópolis em 20/03/2022	53
3.2 Validação da previsão do tempo para a cidade de Itajubá e comparação de modelos de previsão do tempo	61
4. CONCLUSÃO	68
5. REFERÊNCIAS	70

1. INTRODUÇÃO

Na região sudeste do Brasil e, conseqüentemente, em Itajubá, cidade localizada no sul do Estado de Minas Gerais (MG), o período de outubro a março é o da estação chuvosa, que é influenciada pela convecção local e pelo suprimento de umidade proveniente da Amazônia e do oceano Atlântico Sul. A combinação da convecção com a umidade transportada pelos ventos de baixos níveis da atmosfera é essencial para a formação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) (SILVA *et al.*, 2019).

A ZCAS é uma banda de nebulosidade que se estende desde o sul da Amazônia, passa pelo centro-oeste e sudeste do Brasil e chega ao oceano Atlântico (KOUSKY, 1988; QUADRO, 1994). A estacionariedade da ZCAS pode ser influenciada pela presença de sistemas frontais que chegam até o sudeste brasileiro (CAVALCANTI 2009; SILVA *et al.*, 2019). Assim, a ZCAS é um dos principais sistemas atmosféricos responsáveis pela sequência de dias nublados e chuvosos na área entre o sul da Amazônia, regiões centro-oeste e sudeste do Brasil e oceano Atlântico adjacente. Em alguns períodos, a chuva diária atinge valores elevados, muito acima da climatologia, configurando eventos extremos do tempo, o que afeta as cotas dos rios e a população que reside em áreas de risco. Além disso, episódios de ZCAS podem causar deslizamento de terra causando o soterramento de residências e o óbito de pessoas (BARCELLOS *et al.*, 2019).

O crescimento descontrolado dos centros urbanos acarreta grandes problemas socioambientais e diversas famílias vêm sofrendo com as cheias e inundações ano após ano (PINHEIRO, 2005). Não só o crescimento desordenado, mas a liberação, por parte do setor governamental, para construção de áreas urbanas em região de encosta ou em várzea de rio é um grande problema já que tais áreas são locais potenciais para a ocorrência de desastres associados à chuva extrema.

No verão de 2021/2022 (meses de dezembro de 2021 e janeiro e fevereiro de 2022), a região sudeste do Brasil foi afetada por vários episódios de eventos extremos diários de precipitação. Nesse período, Petrópolis, cidade localizada no Estado do Rio de Janeiro, foi uma das mais afetadas com os elevados totais pluviométricos registrados em 15 de fevereiro de 2022, que

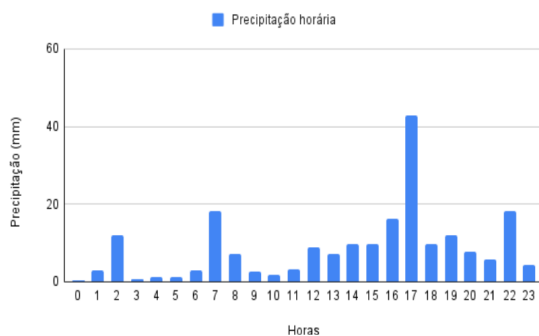
resultaram em deslizamentos de terra e no óbito de 233 pessoas (PORTO,2022). Um mês depois, em 20 de março de 2022, Petrópolis foi novamente assolada por outro evento extremo de precipitação que causou enchentes, inundações e deslizamento de terra, que resultaram em 5 mortes (BARBON,2022). Antes dos episódios em Petrópolis, a cidade de Brumadinho, integrante da região metropolitana de Belo Horizonte, também foi atingida por um episódio de chuva extrema, que afetou a sua população no dia 12 de janeiro de 2022 (G1,2022). Outro caso a ser ressaltado é o das cidades da Zona da Mata, com ênfase em Muriaé, que enfrentaram enchentes e deslizamentos no dia 09 de fevereiro (G1,2022). As principais informações dos episódios de chuva extrema em cada um dos municípios mencionados estão resumidas na Tabela 1, enquanto a precipitação horária registrada no dia dos eventos está apresentada na Figura 01.

Tabela 01 - Informações (volume de chuva, danos ocorridos e reportagens) sobre os eventos extremos de precipitação ocorridos em Petrópolis, nos dias 15 de fevereiro e 20 de março de 2022, em Muriaé, no dia 09 de fevereiro de 2022, e em Brumadinho, em 12 de janeiro de 2022.

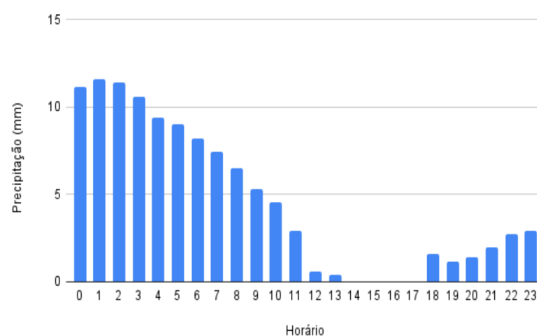
Data	Local	Total de chuva Acumulada (mm)	Precipitação climatológica mensal (mm)	Estragos	Links de Jornais
08/01/2022	Brumadinho/MG	206,56 (em 24 horas)/ 131 (em 7 horas)	263	ruas alagadas	encurtador.com.br/goqH5
09/02/2022	Muriaé/MG	110,93 (em 24 horas)/ 95,21 (em 11 horas)	150	ruas alagadas	encurtador.com.br/FM RX1
15/02/2022	Petrópolis/RJ	260 (em 24 horas)/ 259,4 (em 3 horas)	250	233 mortes e 4 pessoas desaparecidas	encurtador.com.br/gOT36
20/3/2022	Petrópolis/RJ	358,6 (em 24 horas)/ 215,8 (em 2 horas)	253	ruas alagadas, 5 mortes e 4 pessoas desaparecidas	encurtador.com.br/gOT36

Figura 01 - Precipitação horária (mm) em (a) Brumadinho no dia 08/01/22, em que sua climatologia para o mês de janeiro é de 263 mm, (b) Muriaé no dia 09/02/22, cuja climatologia para o mês de fevereiro é de 150 mm, (c) Petrópolis no dia 15/02/22, cuja climatologia para o mês de fevereiro é de 250 mm, e (d) Petrópolis no dia 20/03/22, com climatologia para o mês de março de 253 mm. Fonte dos dados: Cemaden

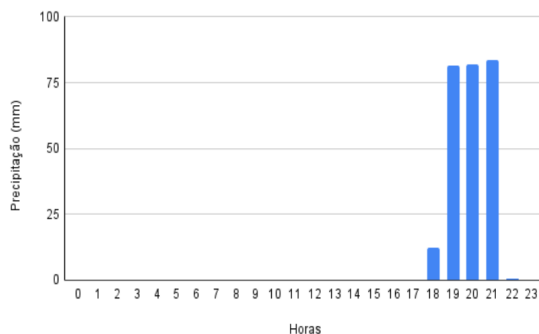
a. Precipitação horária para o dia 08/01 em Brumadinho



b. Precipitação horária para o dia 09/02 em Muriaé



c. Precipitação horária para o dia 15/02 em Petrópolis



d. Precipitação horária para o dia 20/03 em Petrópolis

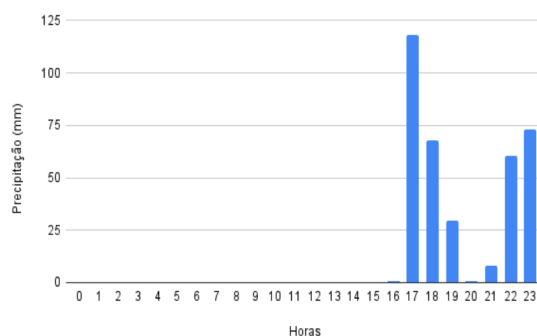
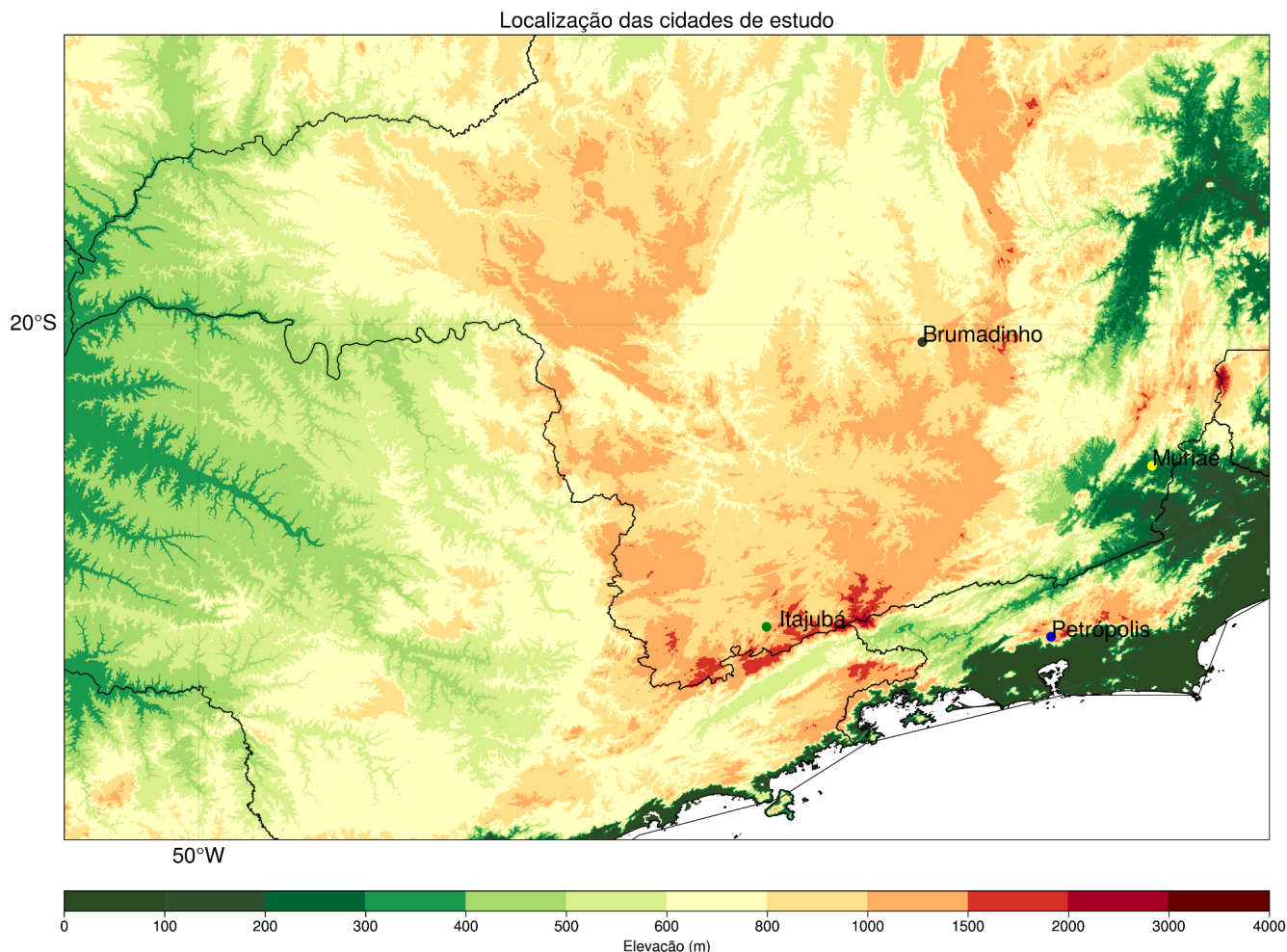


Figura 02 - Topografia da região sudeste do Brasil (metros)Localização do município de Itajubá (ponto verde), Brumadinho (ponto preto), Petrópolis (ponto azul) e Muriaé (ponto amarelo) em relação à região sudeste do Brasil. Os dados de topografia foram obtidos pelo GEBCO
 Fonte:GEBCO (2021) (<https://download.gebco.net>)



No período de verão 2021/2022, o município de Itajubá registrou casos de desmoronamento de parte de um barranco na madrugada do dia 31 de dezembro e 02 de janeiro, mas só uma árvore acabou sendo afetada . Além disso, ocorreu um deslizamento no bairro Nossa Senhora de Fátima decorrente do grande volume de precipitação, no dia 10 de janeiro. Em todos os casos citados, não houve vítimas e nenhuma ocorrência de alagamentos ou inundações foi registrada pela Defesa Civil de Itajubá (PREFEITURA DE ITAJUBÁ, 2022). Nesse sentido, para qualquer localidade, informações da previsão de tempo são importantes, já que a maior parte das atividades humanas são regidas pelas condições de tempo meteorológico e para a preparação da população em casos de previsão de eventos extremos. Vale a pena destacar o que significa tempo em meteorologia. Esse é um termo usado

para definir o estado momentâneo da atmosfera enquanto a previsão de tempo é a previsão com horizonte temporal de até duas semanas (YNOUE *et al.*, 2017).

Em Itajubá, a previsão de tempo é essencial para auxiliar nos prognósticos do nível do rio Sapucaí, principalmente no verão, que é a estação chuvosa no sudeste do Brasil (FERREIRA e REBOITA, 2022). O rio Sapucaí atravessa o município e é responsável por episódios de inundação e impactos socioeconômicos, onde há relatos de cheias desde 1821 (PINHEIRO, 2005). A inundação mais severa foi a de 2000, pois atingiu 89% da área do bairro Boa Vista e causou grandes prejuízos para a cidade (MARTINS, 2022). Segundo Climanálise (2000), esse evento esteve associado com um episódio de ZCAS. Em janeiro de 2017, o ribeirão José Pereira, localizado próximo ao Campus da UNIFEI, transbordou e este evento estava associado à termodinâmica local e à convergência de umidade na região (RODRIGUES *et al.*, 2019), como no caso de 2000. Já Martins (2022) simulou os impactos socioeconômicos em Itajubá em casos de inundação usando diferentes cotas de elevação do nível do rio Sapucaí, considerando os prejuízos, por metro quadrado, para toda cidade e comparou com um imóvel de área de $106,44 \text{ m}^2$. Com isso, até a cota 841 metros, o nível do rio é considerado normal na cidade de Itajubá. Para a cota de 844 metros, o prejuízo médio para toda a cidade de Itajubá é de R\$3.443,18, para a cota de 848 metros, o prejuízo estimado é de R\$11.508,48. O estudo também indica que os bairros com maiores prejuízos estão localizados próximo do rio Sapucaí, como o bairro Varginha e Porto Velho.

A Prefeitura Municipal de Itajubá e os docentes do Instituto de Recursos Naturais da Universidade Federal de Itajubá desde 2017 possuem um convênio para trabalharem em conjunto no monitoramento do nível do rio Sapucaí e para fornecer previsões de tempo para a população (comunicação pessoal com a profa. Michelle Reboita). A previsão de tempo é elaborada com base na análise de previsões de diferentes modelos atmosféricos disponíveis por centros internacionais de meteorologia e por um modelo de mesoescala, executado em modo operacional, no Centro de Estudos e Previsão do Tempo e Clima de Minas Gerais (CEPreMG). Os prognósticos gerados são disponibilizados no sítio da prefeitura e do CEPreMG (<https://meteorologia.unifei.edu.br>) e reportados

diariamente na rádio Panorama - FM de Itajubá.

Diante de toda a exposição prévia, este trabalho tem por objetivo: (a) identificar sistemas atmosféricos presentes na ocorrência de quatro eventos extremos de precipitação ocorridos na região sudeste do Brasil entre dezembro de 2021 a março de 2022 e que chamaram a atenção da mídia (Tabela 01) e (b) validar os prognósticos de tempo elaborados para a cidade de Itajubá, sul de Minas Gerais, Itajubá com antecedência de 12, 24 e 48 horas.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Área de estudo

A região de estudo é o sudeste do Brasil, que compreende os Estados de São Paulo, Rio de Janeiro, Minas Gerais e Espírito Santo (Figura 1). Todos os estados, exceto Minas Gerais, são banhados pelo oceano Atlântico. A região sudeste possui uma área de 924.620 km² de extensão territorial.

A região sudeste possui relevo acidentado e clima de monção, que é caracterizado por um período úmido e outro seco bem definido (Teodoro et al., 2021; Ferreira e Reboita, 2022). A partir da primavera, quando ocorre uma intensificação da radiação solar que atinge o Hemisfério Sul, assim como um maior transporte de umidade das baixas latitudes, a estação chuvosa começa a se estabelecer (Reboita et al., 2022).

Localizado no sul do Estado de Minas Gerais está o município de Itajubá (22°25' S e 45°27'O; Figura 01), a 856 metros acima do nível do mar. O município faz parte da bacia hidrográfica do Rio Sapucaí, sendo este o rio que atravessa o município (Figura 02).

Figura 03 - Imagem aérea da cidade de Itajubá mostrando o rio Sapucaí atravessando a cidade (Fonte: Google Maps)



2.2. Dados

Diferentes tipos de dados são utilizados neste estudo: (a) dados de satélite canal infravermelho (13.35 μ) e (b) reanálise ERA 5 do *European Centre for Medium-Range Weather Forecast* (ECMWF), ambos para os períodos dos eventos extremos citados na Tabela 01. Para a realização da previsão do tempo

para Itajubá, utilizam-se dados de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) e de precipitação (mm) de diferentes modelos numéricos de previsão de tempo, sendo GFS, WRF, ECMWF, COSMO e ICON. A validação da previsão é feita com os dados da estação meteorológica da Universidade Federal de Itajubá, assim como dados da estação pluviométrica do Centro de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais. Todos os conjuntos de dados são explicados na sequência.

2.2.1 Imagens de Satélite

São utilizados dados provenientes do *Geostationary Operational Environmental Satellite* (GOES-16), disponíveis no acervo de imagens do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) (<http://satelite.cptec.inpe.br/acervo/goes16.formulario.logic>). Esse satélite possui resoluções de 2 km e as imagens são geradas a cada 10 minutos (OMM). O canal utilizado no presente estudo é o infravermelho termal, canal 13.

O canal infravermelho termal tem como produto a temperatura de brilho (T_b), que é a região do espectro eletromagnético de emissão de calor. Dessa forma, quanto mais intenso for o brilho da nuvem, mais fria ela será e possuirá um número alto de partículas de gelo. Além disso, esse canal possibilita verificar o desenvolvimento vertical das nuvens baixas, como cumulus (Mattos, 2009) bem como nuvens altas, tipo cirrus. Para a identificação dos tipos de nuvens observa-se o valor da temperatura de brilho, uma cumulus possui em seu interior temperaturas entre -40°C e -80°C .

2.2.2 Reanálise ERA5

O uso dos dados da reanálise do ERA5 (Hersbach, 2016) tem por objetivo auxiliar na descrição do ambiente atmosférico, em escala sinótica, nos eventos estudados no verão de 2021/2022. Os dados da ERA5 são horários e para diferentes níveis atmosféricos. Esses dados são obtidos através da plataforma do Copernicus e estão dispostos de acordo com variáveis em nível de superfície e em diferentes níveis de pressão (<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-pressure-levels?tab=form>).

As variáveis selecionadas para o estudo são: vento zonal e meridional (m/s), velocidade vertical do vento (Pa/s). Assim como, o geopotencial (m^2/s^2), a

Energia Potencial Disponível para Convecção (CAPE)(J/kg), a umidade relativa do ar (%) e, por último, a pressão ao nível médio do mar (Pa).

2.2.3 Dados de Modelos Numéricos

Os dados de previsão numérica são obtidos de modelos meteorológicos disponibilizados por diversos centros de pesquisa internacionais e nacionais.

O Sistema de Previsão Global (*Global Forecast System - GFS*) é um sistema para previsão de tempo do *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP). Esse modelo possui resolução horizontal de 28 km e o horizonte de previsão é dezesseis dias. Além disso, esse modelo possui 64 níveis verticais (Saha *et al.*, 2010). O modelo do ECMWF é executado pelo *European Centre for Medium-Range Weather Forecast*, com 25 km de resolução horizontal, com 137 níveis verticais e com horizonte de previsão para 10 dias (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, 2010). O modelo ICON é originário do serviço meteorológico alemão, possui resolução horizontal de 13 km, com 60 níveis verticais e um horizonte de previsão de 7 dias.

O COSMO faz parte de um consórcio de países como a Itália, Alemanha, Suíça, Grécia, Romênia, Polônia e Rússia, e é um modelo de previsão não hidrostático, com uma resolução horizontal de 7 km e para um período de até 174 horas de prognóstico (INMET,2018).

O *Weather Research and Forecasting Model (WRF)* é um modelo de mesoescala que serve para estudos de casos regionalizados e para previsão operacional de tempo. Esse modelo foi implementado no Centro de Estudos e Previsão de Tempo e Clima de Minas Gerais - CEpreMG da Universidade Federal de Itajubá (Campos *et al.*, 2016).

A Tabela 02 mostra de forma resumida as principais características dos modelos descritos anteriormente.

Tabela 02 - Informações sobre o órgão responsável, resolução horizontal, níveis verticais e o horizonte de previsão dos modelos ECMWF,GFS,WRF,COSMO e ICON, usados na elaboração de boletins meteorológicos em Itajubá

Modelo	Responsável	Resolução Horizontal (km)	Níveis Verticais	Horizonte de previsão (dias)	Links
ECMWF	ECMWF	25	137	10	https://www.ecmwf.int/en/forecasts
GFS	NCEP	28	64	16	https://www.ncei.noaa.gov/products?vid=parameters
WRF	NCAR,NOAA,NCEP,FSL,FAWA	20	45	5	https://meteorologia.unifei.edu.br/modelos/meteorograma
COSMO	-	7	60	7	https://vime.inmet.gov.br
ICON	DWD	13	-	7	https://www.dwd.de/EN/weather/weather_world/suedamerika/wetter_suedamerika_norde.html

2.2.4 Dados da Estação Meteorológica da UNIFEI

Os dados utilizados são provenientes da estação meteorológica da UNIFEI(wunderground.com/dashboard/pws/IITAJUB5), que está localizada nas coordenadas 22.413 S latitude e 45.452 O longitude, em uma altitude de 850 metros. A estação se encontra dentro dos domínios da UNIFEI e é monitorada

pelos técnicos do Instituto de Recursos Naturais. As variáveis utilizadas para a validação da previsão do tempo são: temperatura máxima (que em geral ocorre por volta das 15 horas local), temperatura mínima (que ocorre por volta das 07 horas local), e precipitação acumulada das 00 às 00 horas.

2.2.5 Dados de Pluviômetro

O Centro de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden) fornece dados de precipitação diária e horária e possui estações pluviométricas espalhadas pelo país. Seus dados possuem um intervalo de tempo de 10 em 10 minutos. Os produtos da estação 313240401A do bairro Estiva, localizada nas coordenadas 22.4123 S latitude e 45.4358 O longitude, serviram para preencher falhas de dados em dias que a estação meteorológica da UNIFEI estava inoperante (http://sjc.salvar.cemaden.gov.br/resources/graficos/interativo/grafico_CEMADEN.php?idpcd=9348).

2.3. METODOLOGIA

2.3.1 Eventos Extremos no Sudeste do Brasil e Análise Sinótica

Com base nas informações registradas nos noticiários, selecionaram-se os eventos mostrados na Tabela 01 para uma descrição sinótica a fim de documentar os padrões que contribuem para eventos extremos de precipitação na região sudeste e possível identificação de um padrão comum.

Para a análise sinótica foram elaborados os seguintes campos atmosféricos:

(a) jatos em 250 hPa, pressão a nível médio do mar (PNMM) e espessura da camada entre 500 e 1000 hPa. Esse campo permite a identificação de sistemas frontais, a influência do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul, assim como o comportamento do Jato Subtropical e Polar.

(b) cisalhamento vertical da intensidade do vento entre 500 e 1000 hPa, divergência dos ventos em 250 hPa e altura geopotencial em 250 hPa, que têm por objetivo indicar os mecanismos para que induzem movimentos

ascendentes, assim como verificar se tem influência de sistemas meteorológicos como jatos de altos níveis.

(c) velocidade vertical ômega, umidade média entre 850 e 500 hPa e altura geopotencial em 500 hPa. Esse campo tem por objetivo mostrar a presença de movimentos ascendentes na região de estudo, assim como a concentração de umidade, sendo indicativos da zona de convergência de umidade e da ZCAS sobre o continente. Com a altura geopotencial, que representa a altura real de uma superfície de pressão atmosférica acima da superfície terrestre, em que é o resultado da divisão do geopotencial por 9,8, é possível verificar a presença de cavados e cristas.

(d) fluxo de umidade integrado na coluna mostra as regiões com convergência e divergência de umidade .

(e) Cisalhamento vertical do vento entre 500 e 1000 hPa e Energia Potencial Disponível para a Convecção (CAPE), em conjunto servem para verificar o potencial para a ocorrência de tempestades, como mostra a Tabela 03.

Tabela 03 - Tipos de tempestades em função da Energia Potencial Disponível para Convecção (CAPE, em J/kg) e cisalhamento do vento (em m/s) calculado na camada de 500 e 1.000 hPa

Fonte: Joe *et al.* (2014)

Cisalhamento do vento (m/s) / CAPE (J/kg)	<10,3	10,3 - 23,15	>20,6
<1.000	Comum	Comum ou multicélulas	Comum ou supercélula
1.000 - 2.500	Comum com alguns traços severos	Multicélulas	Supercélula
>2.500	Comum com alguns traços severos	Multicélulas	Supercélula

2.3.2 Etapas da Previsão do Tempo e Validação para Itajubá

Aqui é descrito o procedimento seguido para a realização diária da previsão de tempo para a cidade de Itajubá para os horizontes de 12, 24 e 48 horas.

Passo 1: O trabalho é iniciado com uma análise sinótica dos horários

anteriores ao do momento da previsão das variáveis espessura da camada em 500-1000 hPa, dos jatos em 250 hPa, da pressão ao nível médio do mar, assim como da anomalia de temperatura em 850 hPa obtidas do sítio meteoblue (https://www.meteoblue.com/pt/tempo/mapas/itajubá_brasil_3460834#coords=4/-22.43/-45.45&map=seaLevelPressure~hourly~auto~MSL~none) e do Atmos Albany (https://www.atmos.albany.edu/student/abentley/realtime/anom.php?domain=northamer&variable=500g_anom), respectivamente. Esses sítios compilam a informação dos modelos atmosféricos descritos na seção 2.2.3.

Passo 2: Com base no conhecimento da atmosfera e com as informações dos campos atmosféricos previstos pelos modelos é analisada a evolução temporal de sistemas meteorológicos nos três dias futuros. Com essa informação são escritos boletins diários, que descrevem brevemente o estado da atmosfera para o dia atual e dos prognósticos para os dois dias futuros e dos valores previstos para as temperaturas mínima e máxima diária e o volume de precipitação para Itajubá. A previsão da precipitação é apresentada seguindo faixas de ocorrência, já que é bastante difícil prognosticar o volume exato a ser precipitado. A classificação foi desenvolvida pela aluna Fabiana Bartolomei em colaboração com o Bacharel Vinícius Lucyrio e a professora Michelle Simões Reboita e é mostrada na Tabela 04. Para dizer se a precipitação será fraca, moderada ou intensa, é usada a Tabela 05 disponibilizada pelo Centro de Meteorologia de Bauru (IPMet/UNESP). Ambas as tabelas foram elaboradas para classificar a precipitação para todo o Brasil, porém com um foco especial para a região sudeste.

Tabela 04 - Informações sobre a classificação de precipitação de acordo com o volume diário previsto, separado em sem restrições, observação, atenção, alerta e emergência, de acordo com faixas de precipitação. Classificação desenvolvida por Vinícius Lucyrio, Michelle Reboita e Fabiana Bartolomei

Classificação	Sem restrições	Observação	Atenção	Alerta	Emergência
Volume (mm)	0 até 5	5 até 20	20 até 40	40 até 75	acima de 75
Faixas	0 - 1, 1 - 3 e 3 - 5	5 - 10, 10 - 15, 15 - 20	20-30,30-40	40-50, 50-75	75-100,100-150,150-200, 200-300

Tabela 05 - Informações sobre a classificação de precipitação de acordo com a intensidade da precipitação, sendo medido em mm/h, separado em fraca, moderada, forte e extrema

Fonte: IPMet (<https://www.ipmetradar.com.br/2radarCidades.php>)

Classificação	Fraca	Moderada	Forte	Extrema
Intensidade (mm/h)	0,5 a 6	7 a 20	21 a 75	75 a 200

Os valores previstos para as temperaturas e precipitação são registrados numa tabela (tabela 06), em que é separada por data e intervalo de 12, 24 e 48 horas, em que os espaços em branco representam ou dia sem previsão ou falta de dados. Na mesma tabela também é inserida a validação das três variáveis de interesse, ou seja, a informação que foi registrada pela estação meteorológica descrita no item 2.2.4.

Tabela 06 - Disposição dos dados de previsão do tempo para as temperaturas mínimas, máximas e precipitação para Itajubá no horizonte de 03 dias e validação (valores observados na estação meteorológica)

	Temp. Min.		Temp. Máx			Prec			Validação		
	+48h	+72h	+24h	+48h	+72h	+24h	+48h	+72h	Tmin	Tmax	Prec
05/11/2021	15	15	31	31	31	1	1	0	16	31,5	0
06/11/2021	13	13	32	31	31	0	0	1	15,3	31,3	0
07/11/2021	16	15	31	31	30	0	2	2	16,6	31,0	0
08/11/2021	16	17	29	28	26	5	7	7	16,8	30,0	3,1
09/11/2021	17	18	27	26	28	7	7	10	17,8	28,8	0,2
10/11/2021	17	16	28	27	25	2	5	5	17,6	29,2	0

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise Sinótica dos Eventos Extremos de Precipitação

Essa seção apresenta as características da atmosfera em escala sinótica associadas à ocorrência de eventos extremos de precipitação em cada uma das localidades apresentadas na Tabela 01.

3.1.1 Caso de Brumadinho em 08/01/2022

O evento extremo de precipitação em Brumadinho, MG, ocorreu nos dias 07, 08 e 09 de janeiro de 2022. O G1 (2022) noticiou que 1.638 famílias foram afetadas pelas chuvas desde o início de janeiro de 2022 até o dia 12 de janeiro de 2022, tendo 887 desalojadas e 305 desabrigados ([A poucos dias de completar 3 anos da tragédia da Vale, moradores de Brumadinho sofrem com a chuva | Minas Gerais | G1](#)). A precipitação acumulada para o dia 08 de janeiro foi de 206 mm (Figura 01), sendo que em 7 horas (das 14h até 22h) já havia chovido mais de 130 mm, ou seja, durante menos que a metade de um dia choveu aproximadamente a metade da média climatológica do mês, que é de 263 mm baseada em dados do período 30 anos obtidos do Climatempo ([Climatologia - Brumadinho - BR](#)).

Para compreender o ambiente em que o evento extremo de precipitação do dia 08/01/2022 ocorreu, são apresentados os seguintes campos atmosféricos: (a) jatos em 250 hPa juntamente com as linhas de espessuras 500/1000 hPa e pressão ao nível médio do mar (figura 04), (b) imagem de satélite no canal infravermelho (figura 05), (c) fluxo de umidade integrado do nível 100 hPa ao nível 950 hPa e vetores de fluxo de umidade (figura 06), (d) cisalhamento vertical do vento entre 500 e 1000 hPa, divergência de massa no nível 250 hPa e altura geopotencial no nível 250 hPa (figura 07), (e) a umidade relativa em 500 hPa com o ômega e altura geopotencial entre 850 e 500 hPa (figura 08) e (f) a energia potencial disponível para convecção e cisalhamento do vento em 500 e 1000 hPa (figura 09) entre os dias 07, 08 e 09 de janeiro, o que mostra o período antes e depois do evento extremo. A mesma sequência de figuras e número de dias analisados também são usados na análise dos outros casos.

No dia 07 de janeiro há um sistema de alta pressão no sul do Brasil, indicado pela isóbara central de 1018 hPa, e uma área de baixa pressão localizada no oceano, próximo ao litoral do Rio de Janeiro, com valor de 1009 hPa, que está associada a uma estrutura frontal sobre o oceano Atlântico (Figura 04). Essa área de baixa pressão é importante para induzir o transporte de umidade proveniente da Amazônia para o sul de MG, o que é indicado pela trajetória de vetores na Figura 06, além disso observa-se que a divergência do fluxo de umidade acompanha o deslocamento da frente fria. O Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) indicou um episódio de ZCAS iniciado no dia 06 e teve duração de aproximadamente 5 dias, com término no dia 11 de janeiro (CPTEC, 2022).

No dia 08, a Figura 06 também mostra que o transporte de umidade do interior do Brasil converge para a região da frente fria, o que consequentemente afeta o Estado de MG. O suprimento de umidade associado com o aquecimento da superfície continental contribuem para o desenvolvimento de movimentos ascendentes na atmosfera (figura 08), que levam à formação de nuvens com grande desenvolvimento vertical desde o norte do Brasil até o sudeste (figura 05) e, consequentemente, para a ocorrência de chuva. Sobre a região sudeste também se nota divergência de massa em 250 hPa, que está relacionada à presença de um cavado em 250 hPa sobre a região de São Paulo no 08 de janeiro (figura 07 - f,g,h,i,j). Esse padrão descrito que ocorre sobre Brumadinho causa instabilidade atmosférica que pode ser sintetizada pelo índice CAPE. No dia 08, o CAPE mostrou os valores abaixo de 400 às 0000 UTC, 0600 UTC e 1200 UTC, no entanto às 1800 UTC, o índice apresentou valor de 400 em Brumadinho (figura 09 - e,f,g,h). A combinação da instabilidade com o cisalhamento vertical do vento na camada entre 500 e 1000 de 5 *m/s* e 10 *m/s* produzem um ambiente ideal para o desenvolvimento das tempestades. Ainda com essas duas variáveis é possível classificar o ambiente como tempestade comum (Tabela 03). Nesse mesmo dia, havia pouco movimento divergente em altos níveis às 0600 e 1200 (figura 07 - f e g), implicando em pouco suporte para a convergência do ar em baixos níveis em Brumadinho (figura 08 - f e g). Além disso, verifica-se que o fluxo de umidade se manteve sobre a região metropolitana de Belo Horizonte desde às 0600 UTC.

O dia 09 é marcado pelo enfraquecimento da frente fria e, consequentemente, do sistema de baixa pressão, como mostra na Figura 05. No entanto, os movimentos divergentes em 250 hPa ainda presentes (figura 07), o que é reflexo do levantamento de ar (variável ω) visto na Figura 08. Além disso, é possível verificar que a umidade acima de 80% e os movimentos ascendentes parecem não ser suficientes para gerar instabilidade, já que o CAPE está com valor abaixo de 400 J/kg, o que representa um valor baixo para ocasionar tempestades severas e de grande proporção (figura 09).

Figura 04 - Jatos (intensidade do vento acima de 30 m/s) em 250 hPa, em hachurado, pressão a nível médio do mar (hPa), em linhas contínuas pretas, e a espessura da camada (diferença entre a altura geopotencial em 500 e 1000 hPa, em gpm), representada pelas linhas pontilhadas em vermelho, para os dias 07, 08 e 09 de janeiro, representados pela primeira, segunda e terceira coluna, respectivamente. O ponto vermelho representa a localização da cidade de Brumadinho, MG. Nas figuras a letra B indica o centro de baixa pressão, o A indica a alta pressão e também é mostrada a posição da frente fria e frente quente.

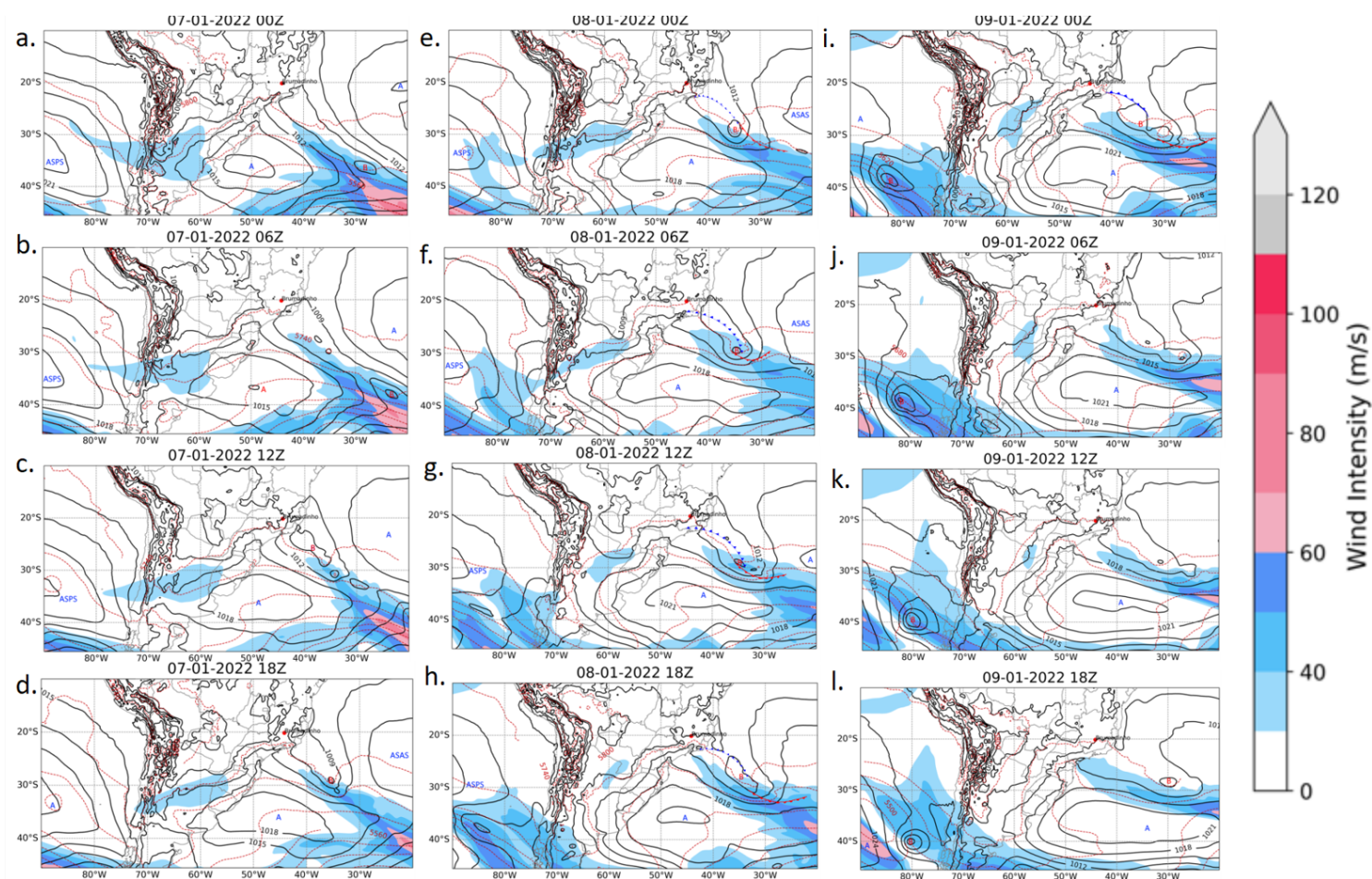


Figura 05 - Imagens do canal infravermelho (CH 13) do satélite GOES 13, em que a primeira fileira é referente ao dia 07, a segunda, 08 e a terceira ao dia 09 de janeiro de 2022 às 00, 06, 12 e 18 UTC, respectivamente.

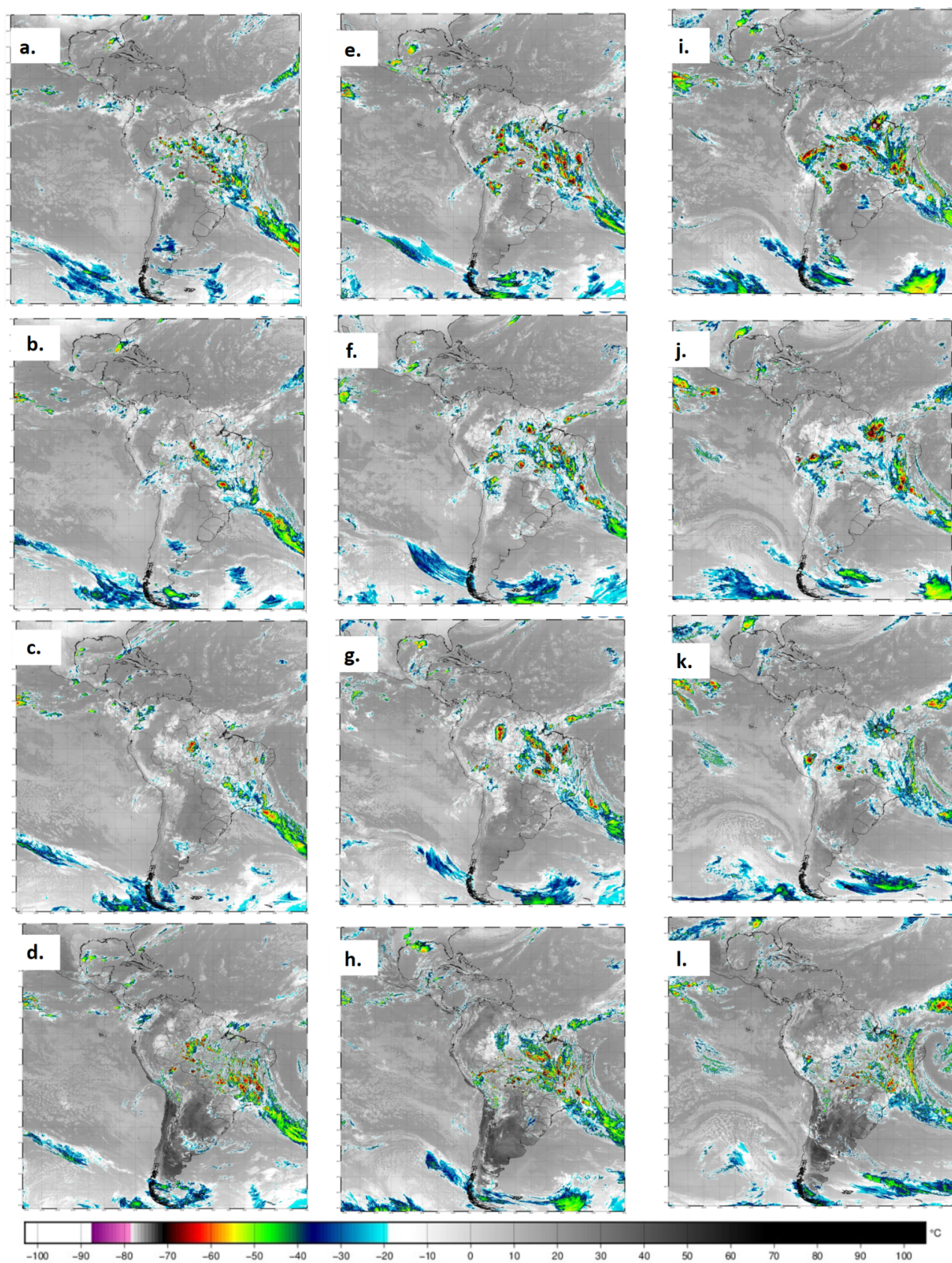


Figura 06 - Divergência do fluxo de umidade integrado na coluna em diferentes níveis de pressão (kg m/s), em hachurado, e vetores do fluxo integrado na vertical (km/h) para os dias 07,08 e 09 de janeiro, representados pela primeira, segunda e terceira coluna, respectivamente.

O ponto vermelho representa a localização da cidade de Brumadinho, MG.

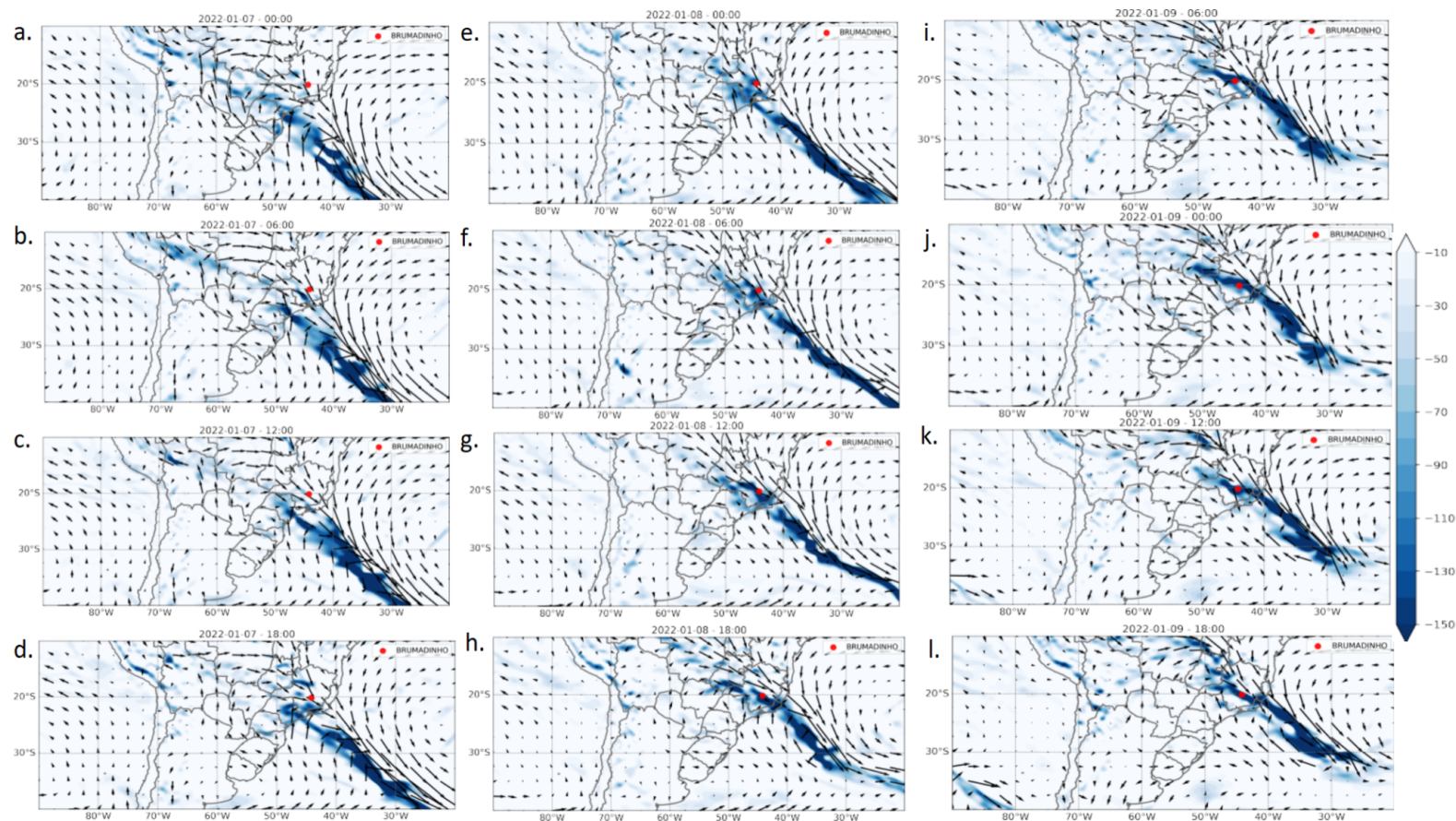


Figura 07 - Cisalhamento vertical do vento (diferença entre a velocidade do vento em 500 hPa e 1000 hPa, em m/s), em hachurado, divergência dos ventos em 250 hPa maiores que $0,5 (s^{-1})$, em linhas laranjas, e altura geopotencial em 250 hPa (m/s), em linhas pretas, para os dias 07,08 e 09 de janeiro, representados pela primeira, segunda e terceira coluna, respectivamente. O ponto preto representa a localização da cidade de Brumadinho, MG.

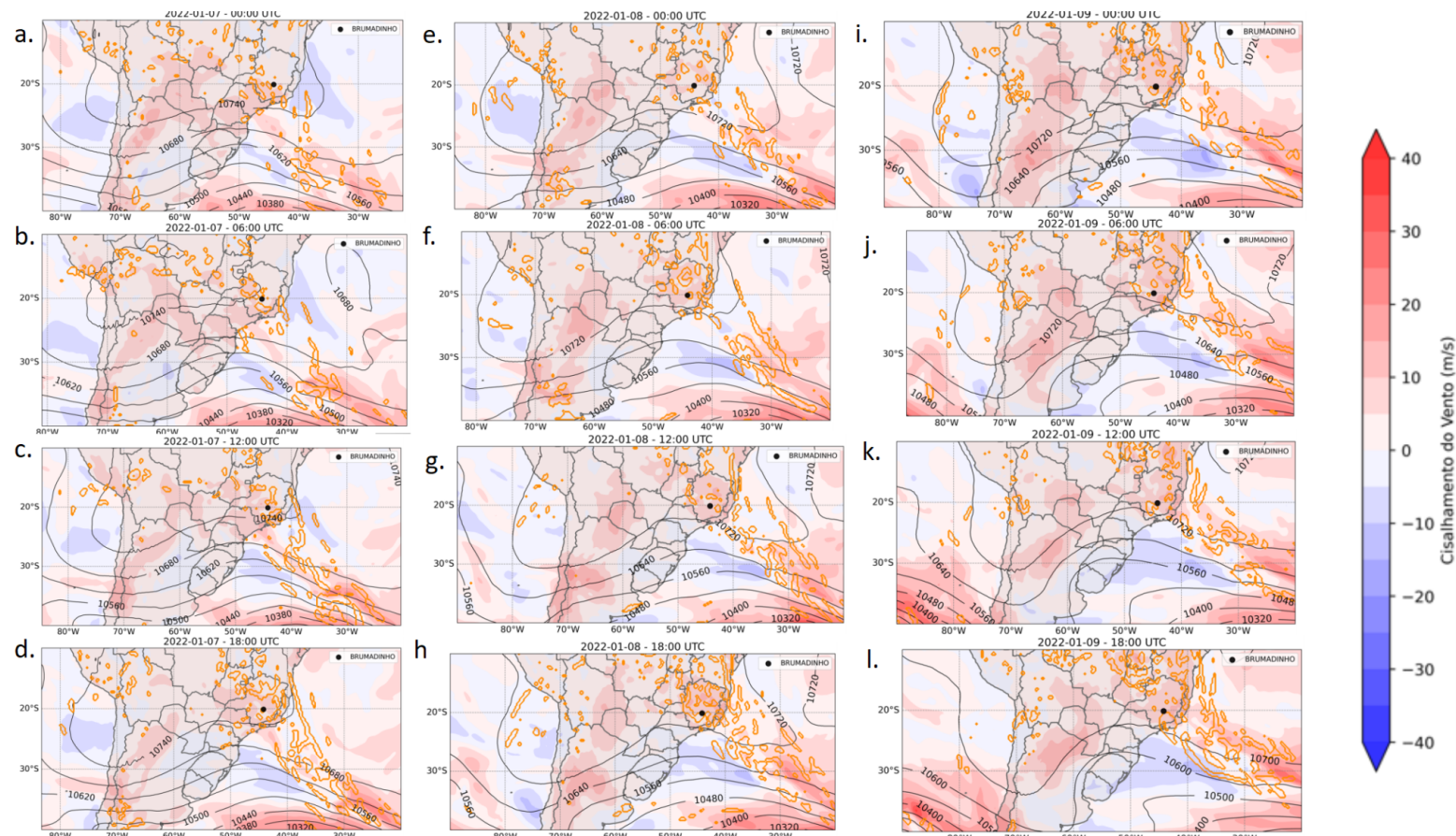


Figura 08- Umidade relativa (soma da umidade relativa em 850 hPa e 500 hPa, dado em porcentagem), a altura geopotencial em 500 hPa (m/s), em linhas vermelhas, e a velocidade vertical ômega menores que $-0.2 (Pas^{-1})$, em linhas azuis, para os dias 07,08 e 09 de janeiro, representados pela primeira, segunda e terceira coluna, respectivamente. O ponto preto representa a localização da cidade de Brumadinho, MG.

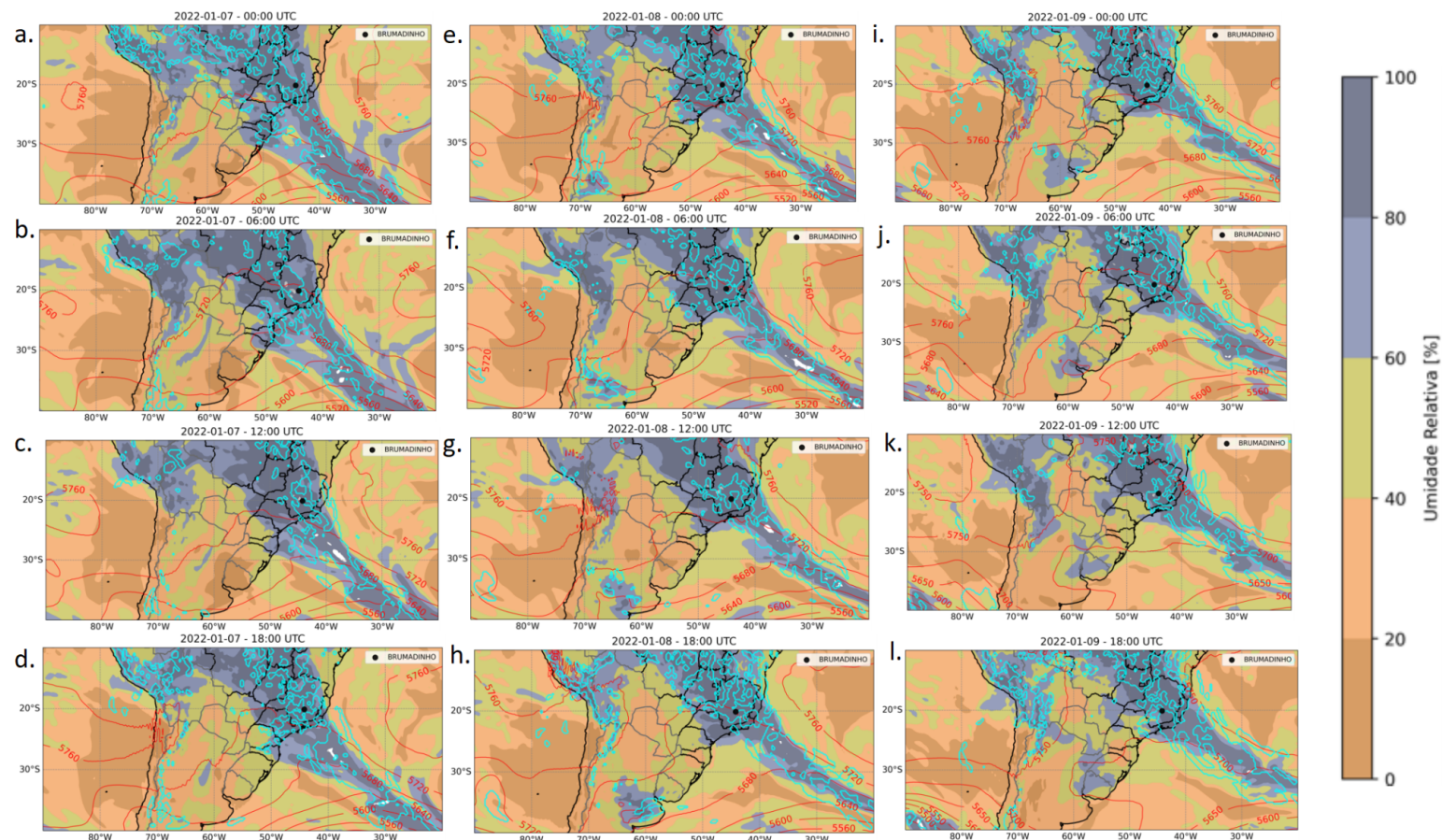
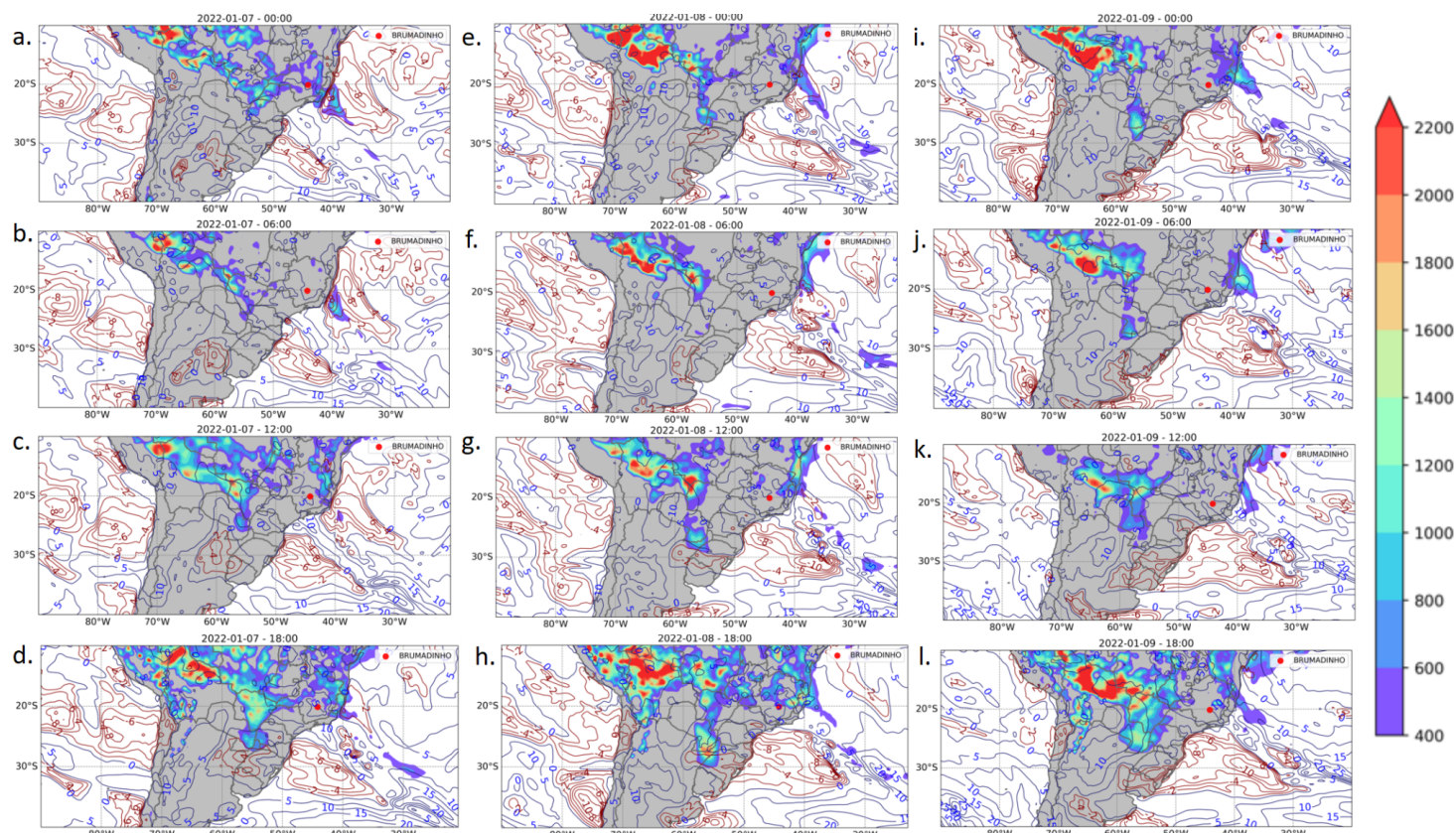


Figura 09 - Energia Potencial Disponível para Convecção (CAPE, em Jkg^{-1}) em colorido, o cisalhamento vertical do vento entre 500 e 1000 hPa (m/s) sendo os valores negativos representados em linhas azuis e os positivos em linhas vermelhas, para os dias 07,08 e 09 de janeiro, representados pela primeira, segunda e terceira coluna, respectivamente. O ponto vermelho representa a localização da cidade de Brumadinho, MG.



3.1.2 Caso de Muriaé em 09/02/2022

O evento de chuva extrema em Muriaé ocorreu no dia 09 de fevereiro, mas como no caso anterior também são apresentados o dia prévio e posterior ao evento. De acordo com o G1 (2022), os moradores da cidade da Zona da Mata ficaram ilhados em suas casas ([Muriaé decreta situação de emergência por causa das chuvas; moradores ilhados recebem alimentos em barcos dos bombeiros | Zona da Mata | G1](#)). O volume de precipitação para este dia foi de aproximadamente 111 mm, sendo que a sua climatologia para o mês de fevereiro é de 150 mm com base nos dados de um período de 30 anos disponibilizado pela Climatempo ([Climatologia - Muriaé - BR](#)).

Às 0000 UTC do dia 08 de fevereiro, há dois núcleos de baixa pressão próximos ao litoral de Santa Catarina e Paraná, que é indicado pela isóbara com valor de 1009 hPa e é acompanhado por uma frente fria (Figura 10). Esse

sistema também tem assinatura no campo de nebulosidade na imagem de satélite (Figura 11), em que a nebulosidade se estende em uma faixa desde o sudeste do Brasil até o oceano Atlântico. Os núcleos das nuvens localizadas sobre o leste de Minas Gerais no dia 08 de fevereiro às 1800 UTC (Figura 11 - d) possuem temperatura de brilho de, aproximadamente, -70°C , ou seja, uma nuvem temperatura muito fria, o que representa uma Cumulonimbus (*Cb*). Esse padrão de nebulosidade permanece até às 0600 UTC do dia 09 de fevereiro (Figura 11 - f). Nuvens *Cb* estão relacionadas com condições de instabilidade da atmosfera e com disponibilidade de umidade. Sobre esse segundo fator, a figura 12 mostra convergência do fluxo de umidade no sul de MG entre 100 hPa até 950 hPa. O transporte de umidade é favorecido pelo Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul.

Nos horários 1800 UTC do dia 08 de fevereiro e 0000 UTC do dia 09 de fevereiro, há o CAPE com valor entre 400 a 1000 J/kg e cisalhamento vertical com valores entre 5 e 10 m/s (Figura 15), o que colabora para a ocorrência de tempestades. De acordo com a tabela 03, a tempestade é classificada como comum.

Nos dias 08, 09 e 10 de fevereiro há um escoamento da Amazônia para o sudeste do Brasil, o que é mostrado através dos vetores do vento na Figura 13. A presença de uma frente fria, que ajuda na canalização de umidade, o que contribui para a ocorrência de um padrão de ZCAS, que se estende permanece do dia 08 até o dia 11 de fevereiro (Climatempo, 2022). O CPTEC também menciona em seu boletim técnico que a circulação anticiclônica associada ao Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul contribui para a convergência de umidade, em 850 hPa, para a região de MG. Isso pode ser visto pelos vetores mostrado juntamente com o fluxo de umidade, em que há um sentido anti horário no oceano (Figura 12). A divergência em 250 hPa (Figura 13) pode ser um mecanismo para os movimentos ascendentes mostrados na figura 14 sobre o sul de MG.

Figura 10- Jatos (intensidade do vento acima de 30 m/s) em 250 hPa, em hachurado, pressão a nível médio do mar (hPa), em linhas contínuas pretas, e a espessura da camada (diferença entre a altura geopotencial em 500 e 1000 hPa, em gpm), representada pelas linhas pontilhadas em vermelho, para os dias 08,09 e 10 de fevereiro, representados pela primeira, segunda e terceira coluna, respectivamente. O ponto vermelho representa a localização da cidade de Muriaé, MG. Nas figuras, a frente fria é retratada por sua simbologia, o B representa o sistema de baixa pressão e o A, alta pressão.

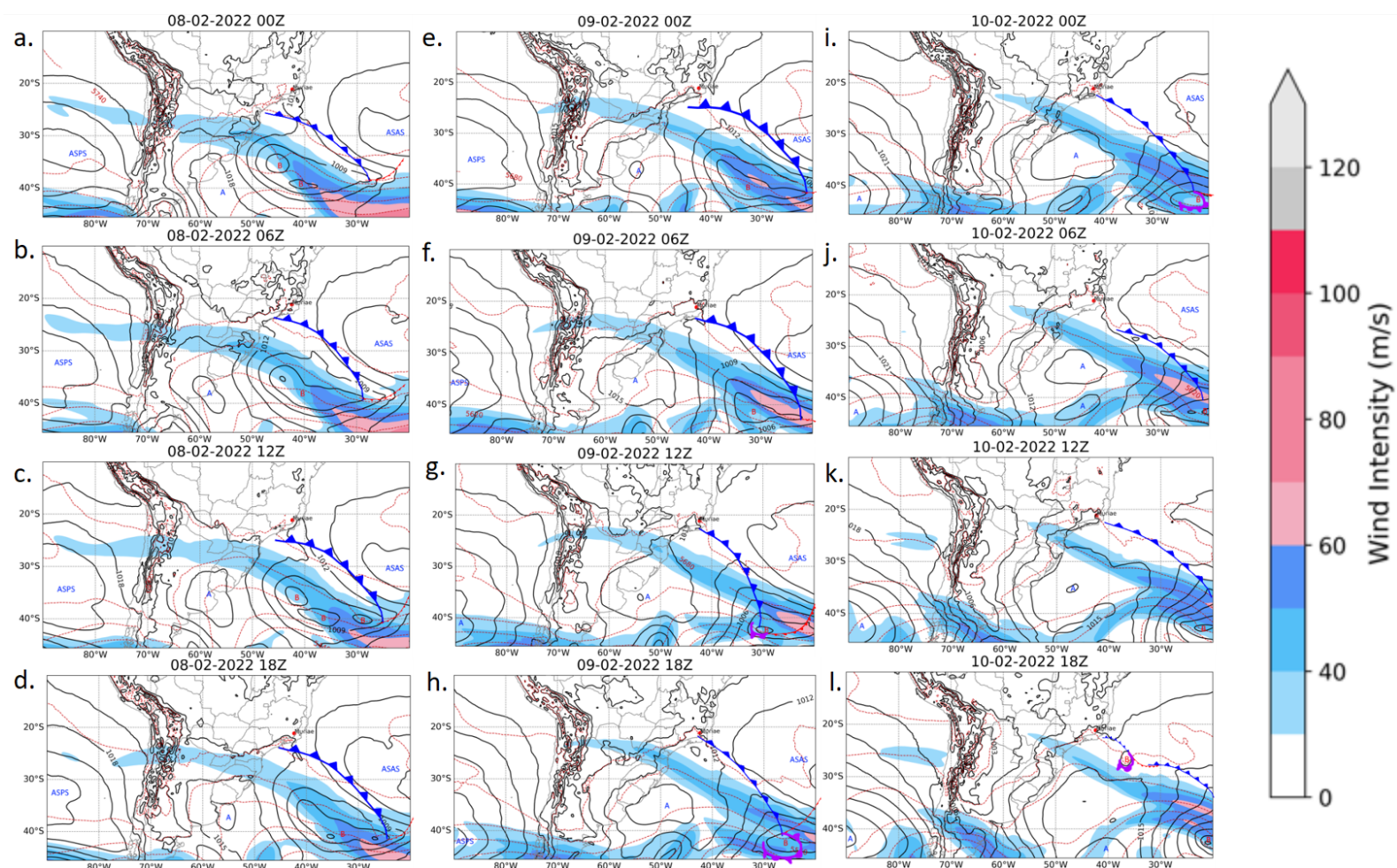


Figura 11- Imagens do canal Infravermelho (CH 13) do satélite GOES 13, em que a primeira fileira é referente ao dia 08, a segunda, 09 e a terceira ao dia 10 de fevereiro de 2022 às 00, 06, 12 e 18 UTC, respectivamente.

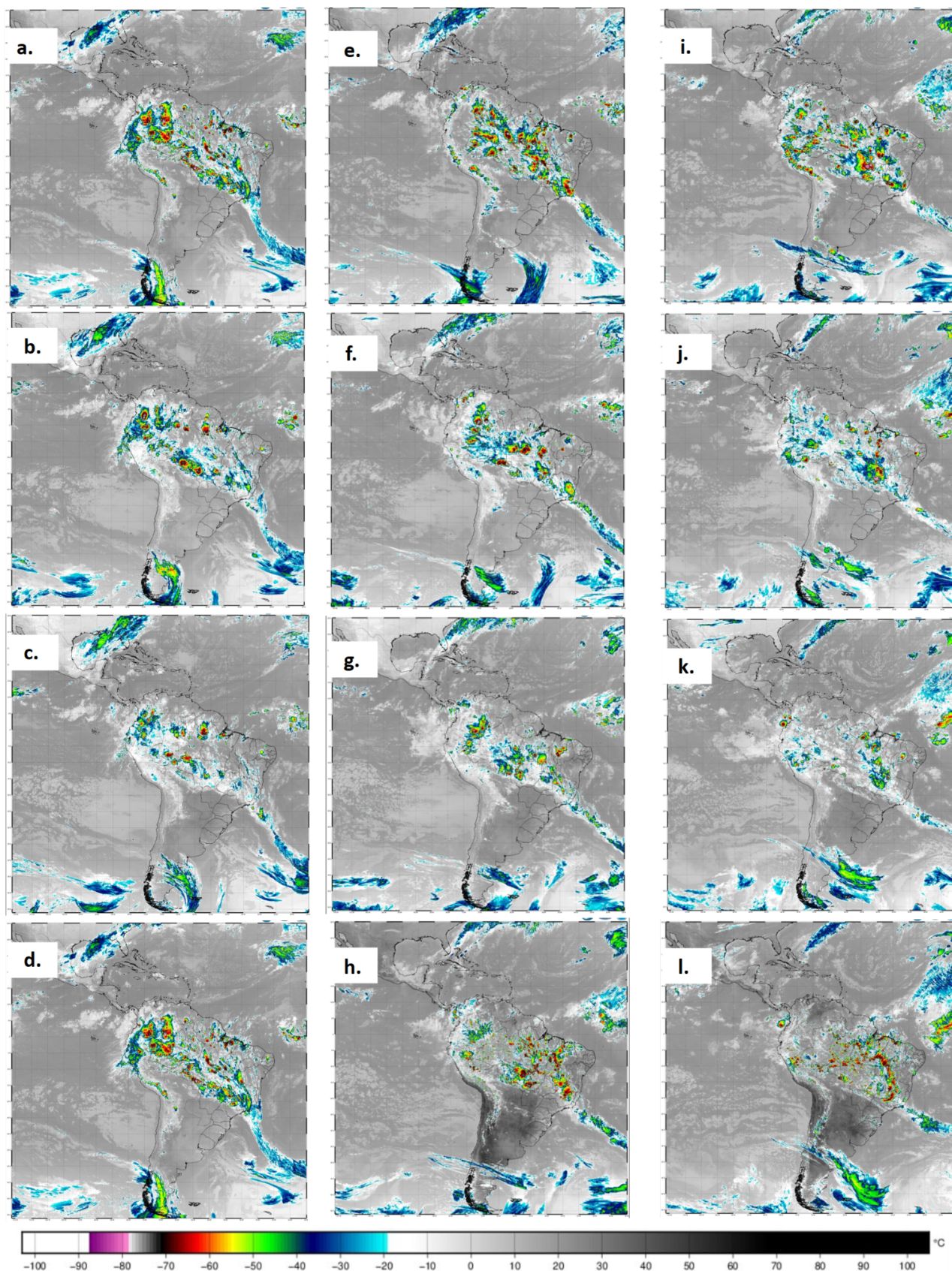


Figura 12- Divergência do fluxo de umidade integrado na coluna em diferentes níveis de pressão (kg m/s), em hachurado, e vetores do fluxo integrado na vertical (km/h) para os dias 08,09 e 10 de fevereiro, representados pela primeira, segunda e terceira coluna, respectivamente. O ponto vermelho representa a localização da cidade de Muriaé, MG.

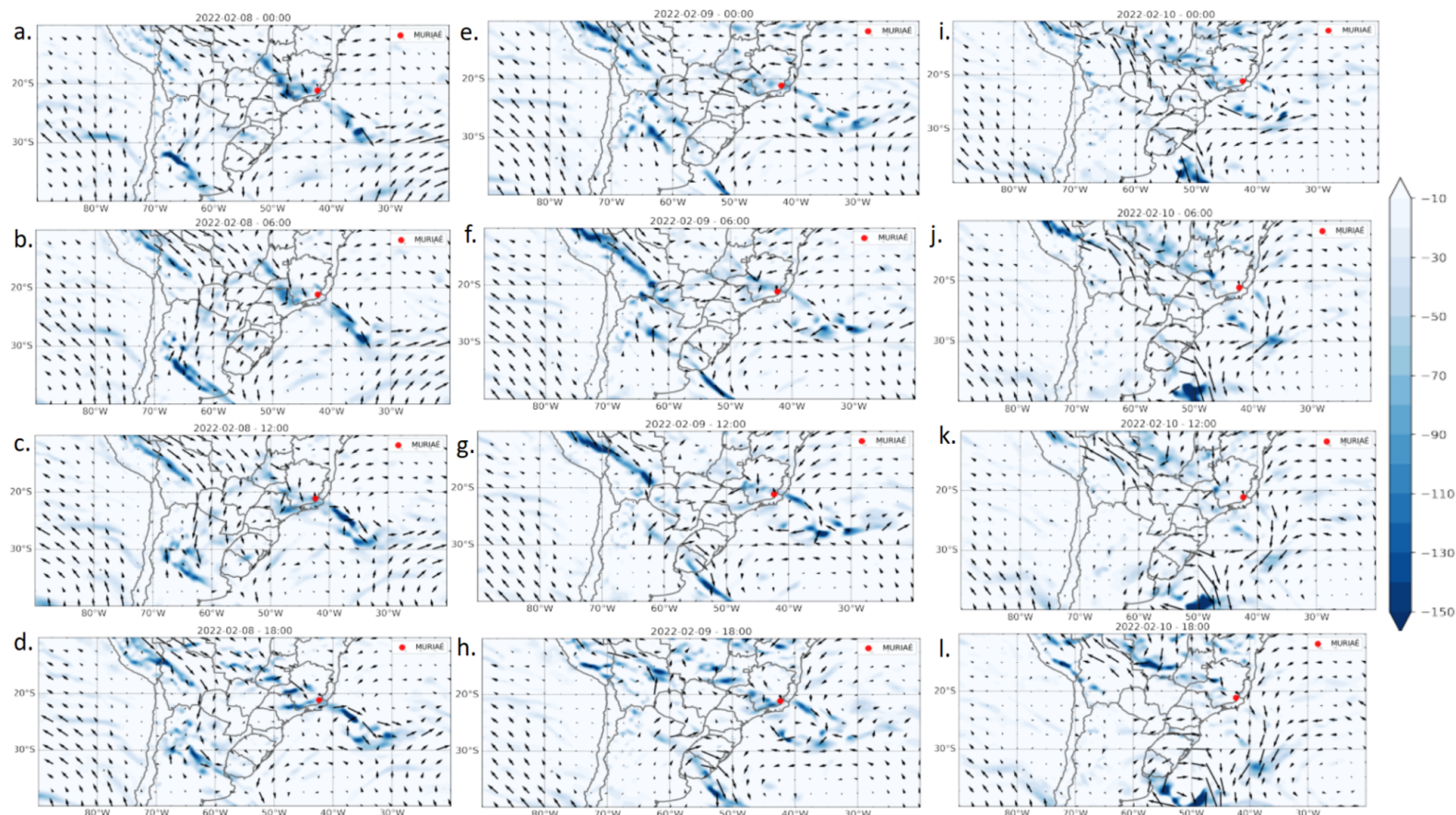


Figura 13 - Cisalhamento do vento(diferença entre a velocidade do vento em 500 hPa e 1000 hPa, em m/s), em hachurado, divergência dos ventos em 250 hPa maiores que $0.5(s^{-1})$, em linhas laranjas, e altura geopotencial em 250 hPa (m/s), em linhas pretas, para os dias 08,09 e 10 de fevereiro, representados pela primeira, segunda e terceira coluna, respectivamente. O ponto preto representa a localização da cidade de Muriaé, MG.

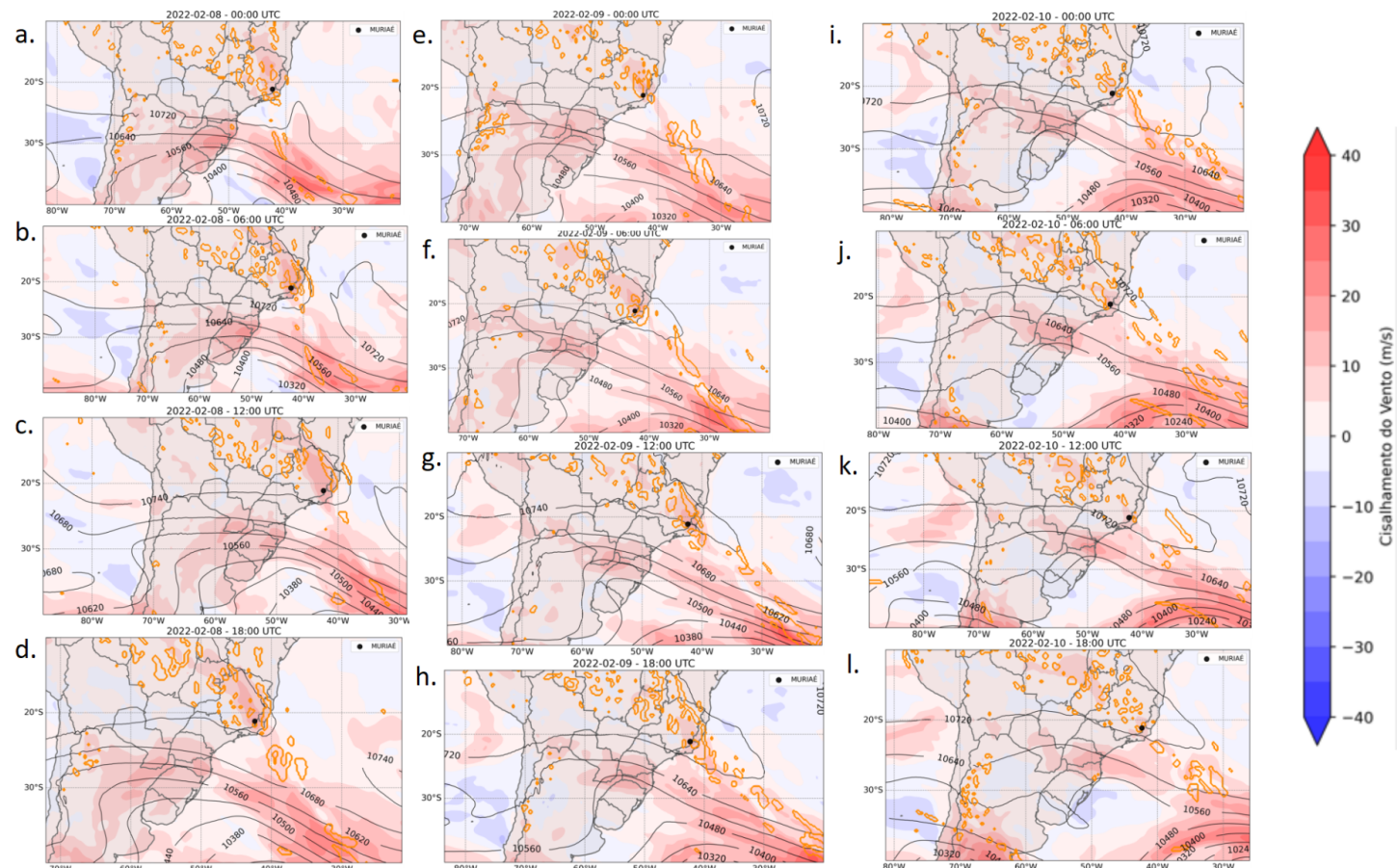


Figura 14 - Umidade relativa (soma da umidade relativa em 850 hPa e 500 hPa, dado em porcentagem), a altura geopotencial em 500 hPa (m/s), em linhas vermelhas, e a velocidade vertical ômega menores que $-0.2 (Pa.s^{-1})$, em linhas cianos, para os dias 08,09 e 10 de fevereiro, representados pela primeira, segunda e terceira coluna, respectivamente. O ponto preto representa a localização da cidade de Muriaé, MG.

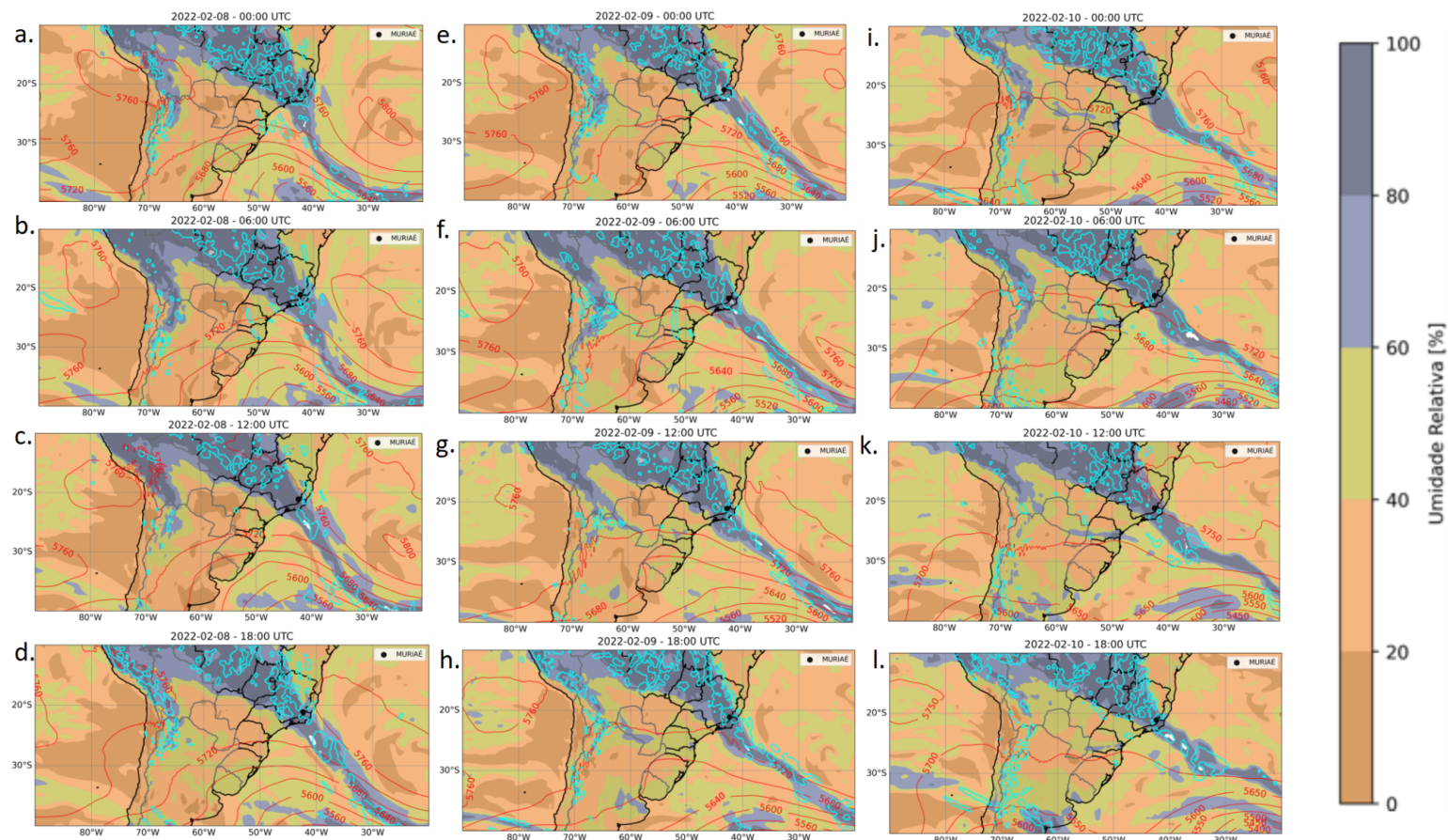
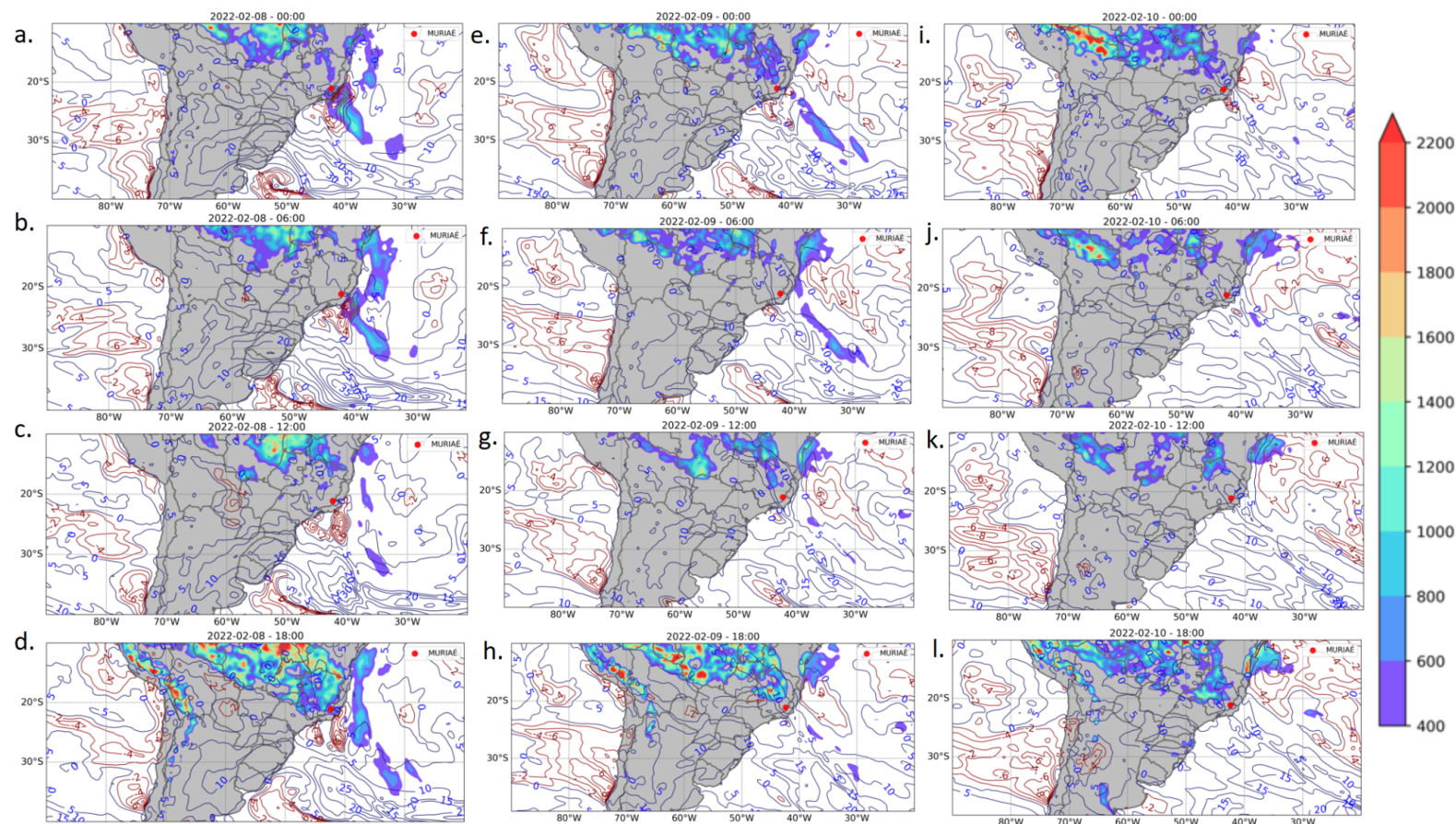


Figura 15 - Energia Potencial Disponível para Convecção (CAPE, em Jkg^{-1}), em shaded, o cisalhamento vertical negativo (diferença entre a velocidade do vento em 500 hPa e 1000 hPa, em m/s), em linhas vermelhas, e o cisalhamento positivo (diferença entre a velocidade do vento em 500 hPa e 1000 hPa, em m/s), em linhas azuis, para os dias 08,09 e 10 de fevereiro, representados pela primeira, segunda e terceira coluna, respectivamente. O ponto vermelho representa a localização da cidade de Muriaé, MG.



3.1.3 Caso de Petrópolis em 15/02/2022

Um dos eventos extremos que mais chamou a atenção da sociedade brasileira foi o caso de Petrópolis no dia 15 de fevereiro de 2022. De acordo com Puentes (2022), como resultado deste evento, 233 pessoas vieram a óbito e mais de 600 pessoas ficaram desabrigadas, mesmo depois de um mês do dia do evento. ([Tragédia em Petrópolis completa um mês e mais de 600 seguem desabrigados](#)). Para um intervalo de 3 horas (das 18h até 21h), o volume de chuva foi de aproximadamente 259 mm, que ultrapassou a climatologia do mês de fevereiro, sendo essa de 250 mm para o mês de fevereiro com base no exposto pela Climatempo ([Climatologia - Petrópolis - BR](#)).

Às 0000 UTC do dia 14 de fevereiro de 2022 há um sistema de baixa pressão acoplado com uma frente fria localizada próximo do litoral de Santa Catarina. Esse sistema avança pelo litoral de Santa Catarina, Paraná e do sudeste nos horários posteriores, como apresentado na figura 16. Às 1800 UTC do mesmo dia, é possível observar o Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul mais deslocado para o oceano em relação às 0000 UTC, o que colabora para o fortalecimento do sistema frontal atuante na costa sul de São Paulo (Figura 16-d). A intensificação da frente colabora para a ocorrência de levantamento de ar (Figura 20) e é sustentada pela divergência em 250 hPa (Figura 19), que mostra a região do sistema de baixa pressão. A instabilidade sobre a região de Minas Gerais, Espírito Santo, Bahia e Rio de Janeiro se intensificou a partir 1800 UTC, com um valor CAPE entre 1.400 e 1.600 J/kg . O índice CAPE em conjunto com o cisalhamento do vento colabora para a classificação do tipo de tempestade (Figura 21). Para o mesmo horário, tem um cisalhamento de 5 a 10 m/s , o que representa uma tempestade comum com traços severos (Tabela 3).

Observa-se que os movimentos divergentes e o cisalhamento vertical do vento (Figura 19) muda de posição conforme a frente fria avança pelo continente no dia 15 de fevereiro. Um sistema de alta pressão, associado a uma massa de ar frio, se desloca para Petrópolis às 1800 UTC (Figura 16 - h), que faz com que haja levantamento do ar quente e, isso associado com a disponibilidade de umidade (acima de 80%) é importante para a geração da nebulosidade (Figura 20 - h). Para sustentar tais afirmações, observa-se as imagens de satélite na Figura 17, em que há pequenos sistemas convectivos formados na porção sul do Rio de Janeiro. Vale observar que a frente fria avançou próximo ao litoral fluminense. Ainda no dia 15 de Fevereiro, o CAPE apresenta valores de 1.600 e 1.800 J/kg às 0000 UTC, 1.000 e 1.4000 J/kg às 0600 UTC, entre 400 e 600 J/kg às 1200 UTC e entre 400 e 600 J/kg às 1800 UTC (Figura 21 - e,f,g,h), ou seja, a região de Petrópolis mostrou propícia à tempestades. O cisalhamento vertical foi de 5 m/s para os quatro horários sinóticos. Com isso, é possível classificar a tempestade como precipitação comum com alguns traços severos.

No dia 16 de fevereiro, a frente fria está deslocada para o oceano e, com o estabelecimento da massa de ar fria de origem polar, a umidade relativa da região retorna para abaixo de 60% a partir das 0600 UTC (Figura 20 - j,k,l). Além disso, verifica-se uma diminuição nos movimentos ascendentes, por já não

possuir mecanismos que os favoreçam, para às 0600, 1200 e 1800 UTC. Isso é confirmado pela diminuição dos movimentos divergentes em 250 hPa (figura 19) e pelo índice CAPE, cujo os valores estão abaixo de 400 J/kg .

Figura 16- Jatos (intensidade do vento acima de 30 m/s) em 250 hPa, em hachurado, pressão a nível médio do mar (hPa), em linhas contínuas pretas, e a espessura da camada (diferença entre a altura geopotencial em 500 e 1000 hPa, em gpm), representada pelas linhas pontilhadas em vermelho, para os dias 14,15 e 16 de fevereiro, representados pela primeira, segunda e terceira coluna, respectivamente. O ponto vermelho representa a localização da cidade de Petrópolis, RJ.

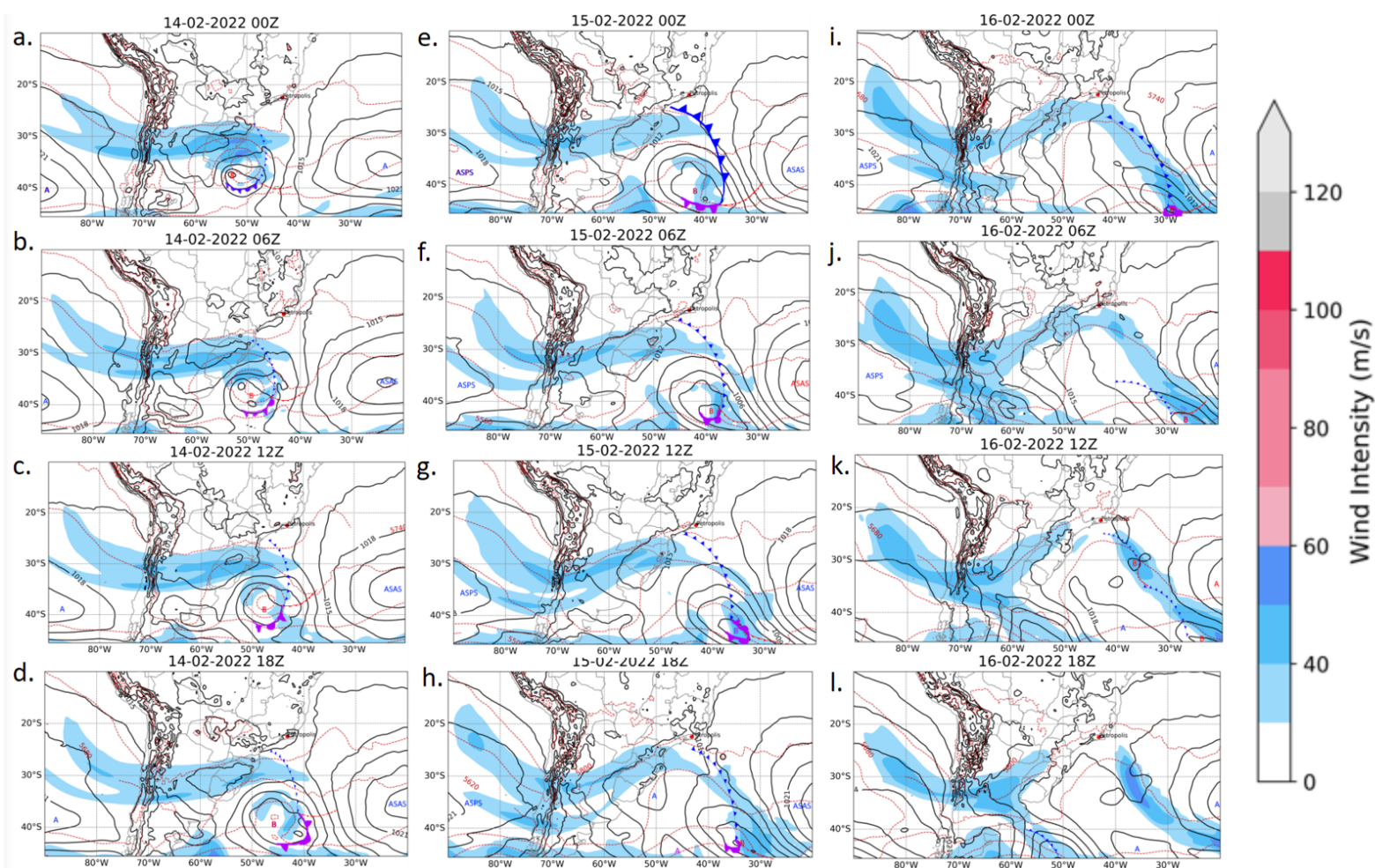


Figura 17 - Imagens do canal Infravermelho (CH 13) do satélite GOES 13, em que a primeira fileira é referente ao dia 14, a segunda, 15 e a terceira ao dia 16 de fevereiro de 2022 às 00, 06, 12 e 18 UTC, respectivamente.

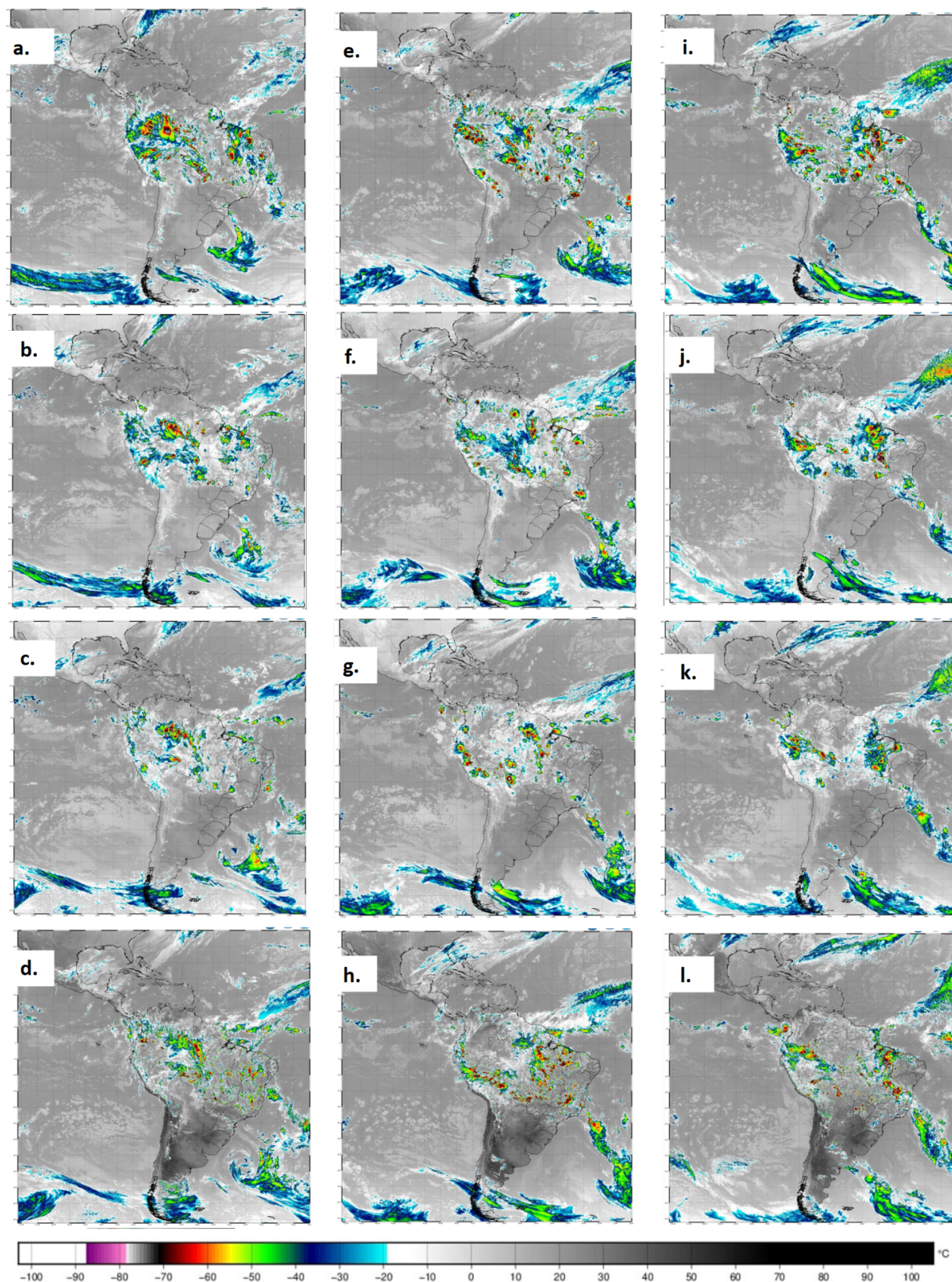


Figura 18 - Divergência do fluxo de umidade integrado na coluna em diferentes níveis de pressão (kg m/s), em hachurado, e vetores do fluxo integrado na vertical (km/h) para os dias 14,15 e 16 de fevereiro, representados pela primeira, segunda e terceira coluna, respectivamente. O ponto vermelho representa a localização da cidade de Petrópolis,RJ.

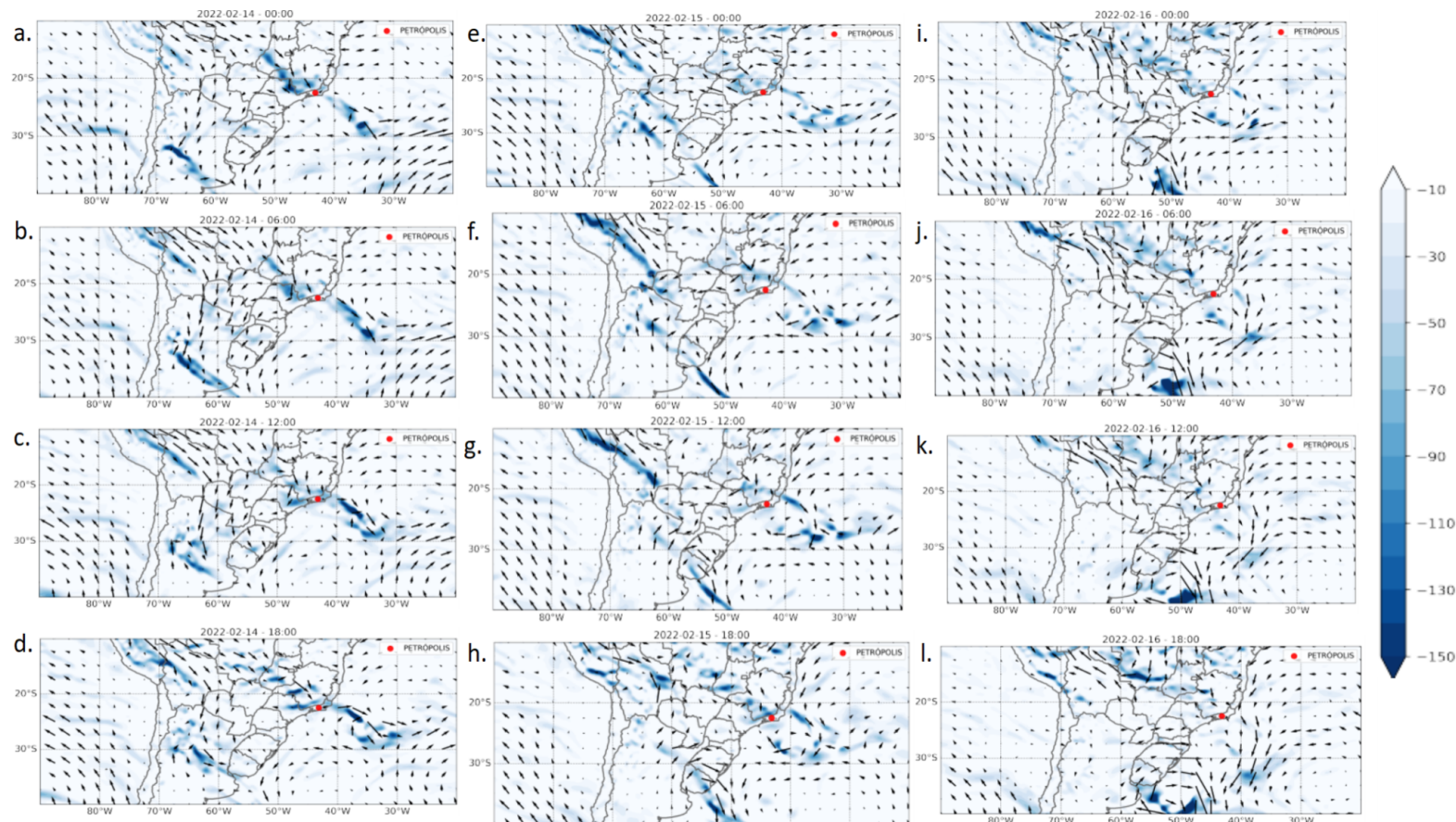


Figura 19 - Cisalhamento do vento (diferença entre a velocidade do vento em 500 hPa e 1000 hPa, em m/s), em hachurado, divergência dos ventos em 250 hPa maiores que $0.5(s^{-1})$, em linhas laranjas, e altura geopotencial em 250 hPa (m/s), em linhas pretas, para os dias 14, 15 e 16 de fevereiro, representados pela primeira, segunda e terceira coluna, respectivamente. O ponto preto representa a localização da cidade de Petrópolis, RJ.

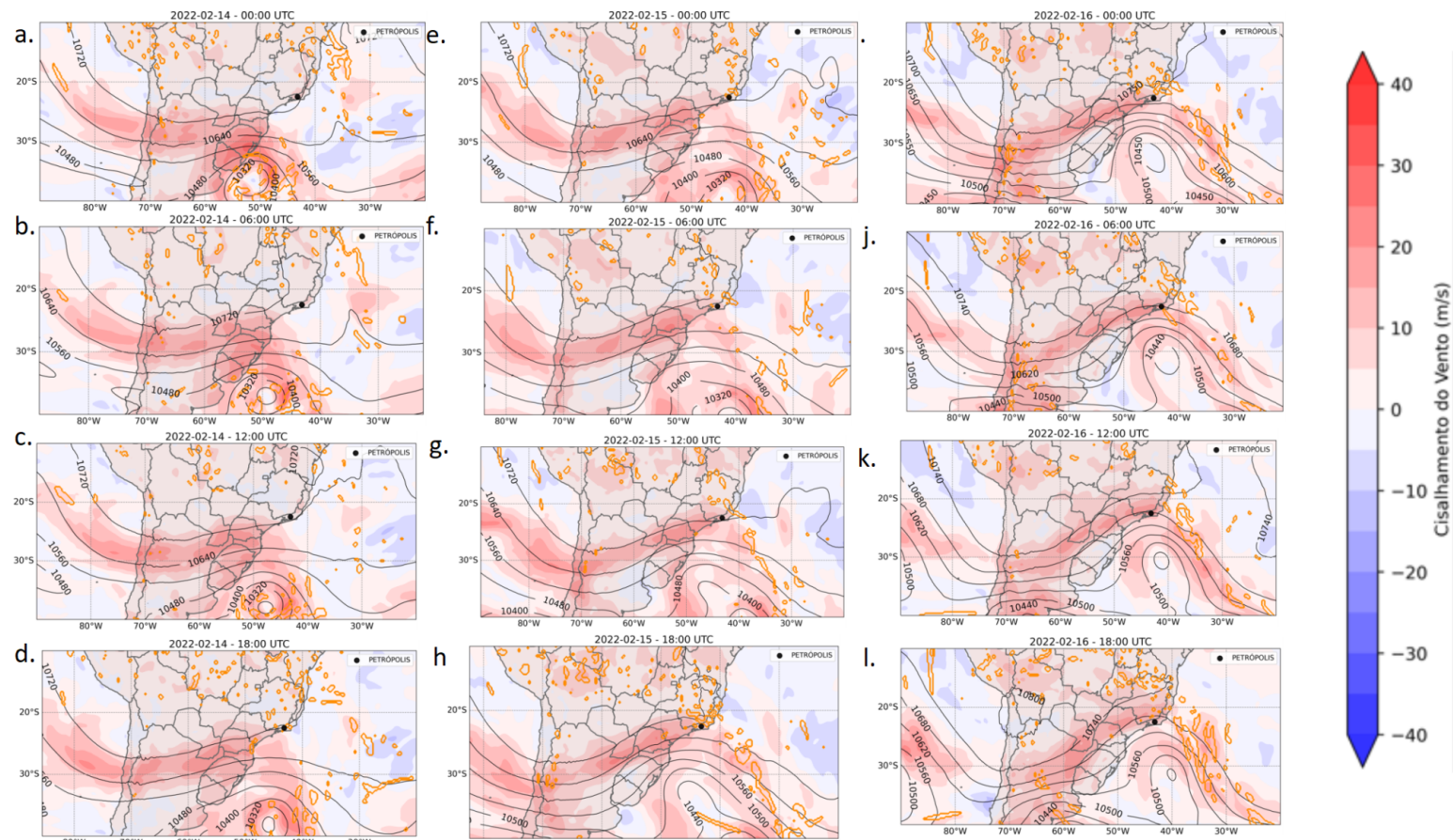


Figura 20 - Umidade relativa (soma da umidade relativa em 850 hPa e 500 hPa, dado em porcentagem), a altura geopotencial em 500 hPa (m/s), em linhas vermelhas, e a velocidade vertical ômega menores que $-0.2 \text{ (Pa. s}^{-1}\text{)}$, em linhas cianos, para os dias 14,15 e 16 de fevereiro, representados pela primeira, segunda e terceira coluna, respectivamente. O ponto preto representa a localização da cidade de Petrópolis,RJ.

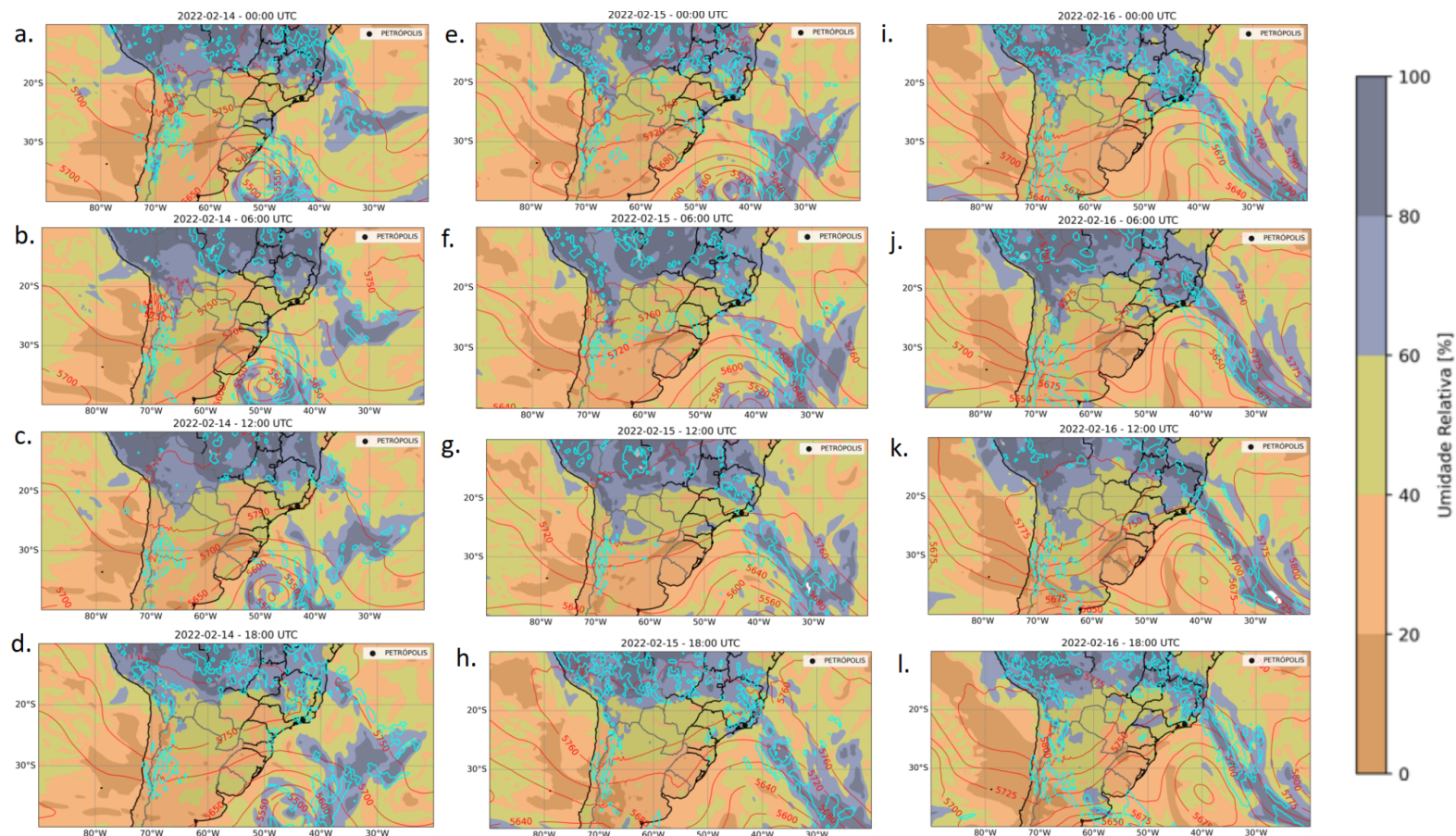
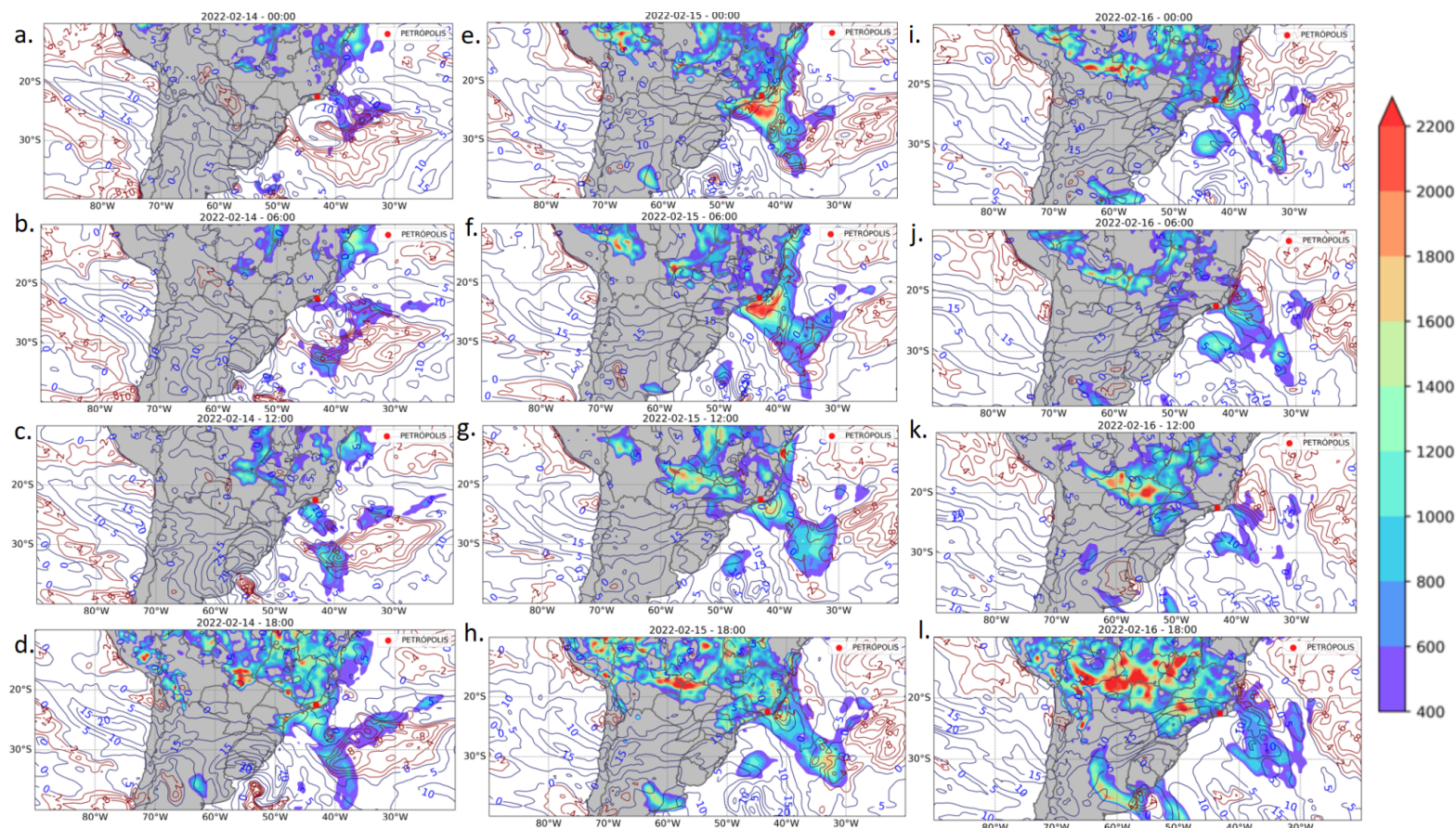


Figura 21- Energia Potencial Disponível para Convecção (CAPE, em $J \cdot kg^{-1}$), em shaded, o cisalhamento vertical negativo (diferença entre a velocidade do vento em 500 hPa e 1000 hPa, em m/s), em linhas vermelhas, e o cisalhamento positivo (diferença entre a velocidade do vento em 500 hPa e 1000 hPa, em m/s), em linhas azuis, para os dias 14, 15 e 16 de fevereiro, representados pela primeira, segunda e terceira coluna, respectivamente. O ponto vermelho representa a localização da cidade de Petrópolis, RJ.



3.1.4 Caso de Petrópolis em 20/03/2022

Um mês após o evento extremo que atraiu a atenção nacional, a cidade de Petrópolis foi cenário de outro evento extremo de precipitação no dia 20 de março, com um volume de chuva registrado aproximadamente 216 mm em duas horas (das 17h até às 19h), sendo que a climatologia para o mês é de 253 mm de um período de 30 anos de dados observados pela Climatempo([Climatologia - Petrópolis - BR](#)). De acordo com o portal G1, ocorreram cinco mortes por deslizamento de terra, além disso quatro pessoas desaparecidas ([Chuva de domingo em Petrópolis teve o maior volume da história num período de 24h | Região Serrana | G1](#)).

Às 0600 UTC no dia 19 de março de 2022, há uma frente fria, localizada na região sul do Brasil, acoplada com o sistema de baixa pressão, cuja isóbara de 1006 hPa (Figura 22). No dia 19 de março, a umidade relativa se encontra abaixo de 40% na região de Petrópolis, mas há transporte de umidade (Figura 24) da Amazônia para São Paulo e sul do Brasil. A umidade associada aos movimentos ascendentes na atmosfera mostrados pela variável ω (Figura 26) são um ambiente ideal para a formação de nuvens. Às 1800 UTC, é possível observar pelas imagens de satélite um aglomerado de nuvens com grande desenvolvimentos verticais (*Cb*) na região do Paraná e São Paulo, uma vez que a temperatura de brilho é de cerca de -70°C e -60°C (Figura 23 - d). Os movimentos ascendentes na atmosfera em parte estão associados com a aproximação da frente fria com o ar quente da região litorânea que gera instabilidade sobre a região adjacente. Com isso, o índice CAPE reforça a perturbação na atmosfera com valores entre 800 e 2.200 J/kg , no entanto, sobre a região de Petrópolis, o índice apresenta valores abaixo de 400 J/kg .

O dia 20 de março é marcado pela passagem da frente fria e a entrada da massa de ar frio de origem polar, com a isóbara de 1027 hPa. Petrópolis é influenciada pelo fluxo de umidade tanto de noroeste, quanto de nordeste, vindo do oceano (figura 24 - e,f). Além disso, observa-se que a faixa de umidade acompanha o deslocamento da frente fria a partir das 1200 UTC. Porém, às 1800 UTC a umidade aumenta para 60%, assim como aumenta a quantidade de movimento ascendente nesta região (Figura 26 - h) bem como a divergência em 240 hPa (Figura 25 - h). Vale ressaltar que às 0000 UTC, o índice de instabilidade apresentou valores de 1.200 a 2.200 J/kg no sul do estado do Rio de Janeiro, mas às 0600 UTC, 1200 UTC e 1800 UTC, apresentou valores de 400 a 1.000 J/kg , o que determina a tempestade. Para classificar qual o tipo de tempestade, considera-se o cisalhamento vertical, que se encontra abaixo de 5 m/s (figura 27 - e,f,g,h). Pela tabela 03, essa tempestade às 0000 UTC é considerada comum com alguns traços severos, mas a partir das 0600 UTC retorna a ser apenas comum.

A alta pós-frontal predomina no sul e no sudeste brasileiro desde as 0000 UTC do dia 21 de março, com isóbara de 1.027 hPa (Figura 22). Além disso, verifica-se uma diminuição do movimento ascendente sobre a região de Petrópolis ao longo do dia, assim como a partir das 1800 UTC, a umidade

retorna para abaixo de 60% (Figura 26). Com um cisalhamento do vento baixo e com o índice CAPE abaixo de 400 J/kg (Figura 27), é possível verificar a estabilidade atmosférica da massa de ar atuante sobre a região.

Figura 22 - Jatos (intensidade do vento acima de 30 m/s) em 250 hPa, em hachurado, pressão a nível médio do mar (hPa), em linhas contínuas pretas, e a espessura da camada (diferença entre a altura geopotencial em 500 e 1000 hPa, em gpm), representada pelas linhas pontilhadas em vermelho, para os dias 19,20 e 21 de março, representados pela primeira, segunda e terceira coluna, respectivamente. O ponto vermelho representa a localização da cidade de Petrópolis, RJ.

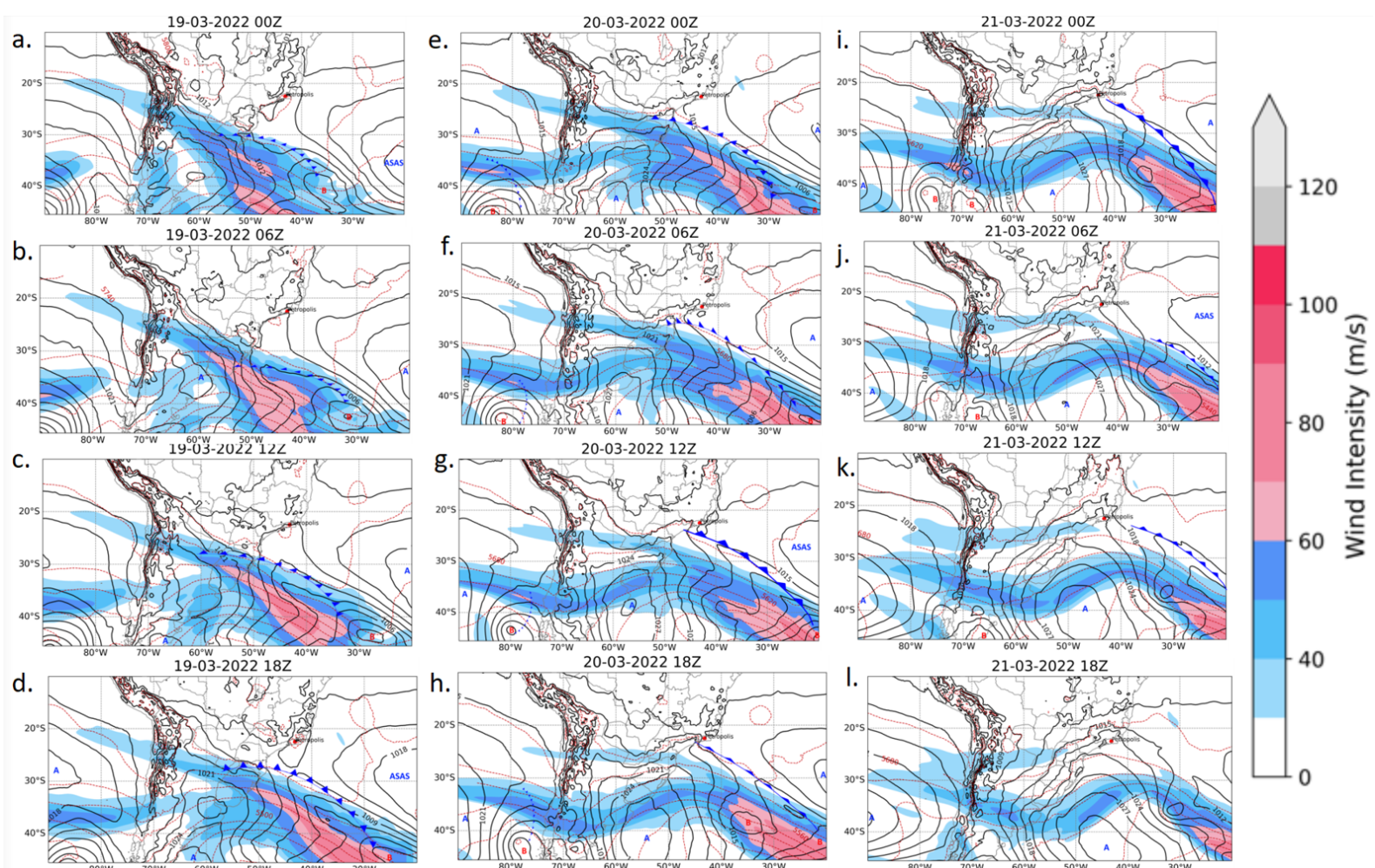


Figura 23 - Imagens do canal Infravermelho (CH 13) do satélite GOES 13, em que a primeira fileira é referente ao dia 19, a segunda, 20 e a terceira ao dia 21 de março de 2022 às 00, 06, 12 e 18 UTC, respectivamente.

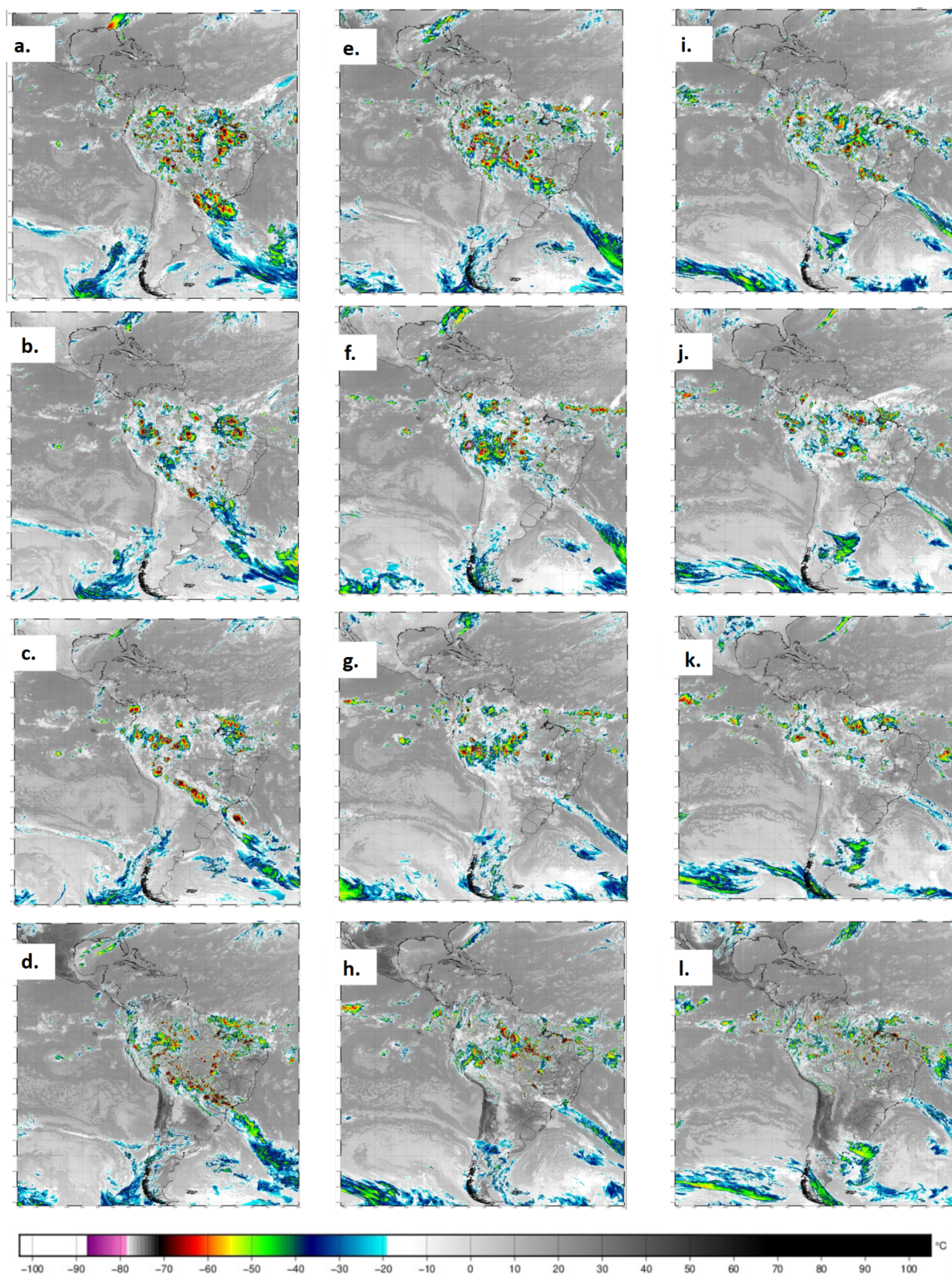


Figura 24 - Divergência do fluxo de umidade integrado na coluna em diferentes níveis de pressão (kg m/s), em hachurado, e vetores do fluxo integrado na vertical (km/h) para os dias 19,20 e 21 de março, representados pela primeira, segunda e terceira coluna, respectivamente.

O ponto vermelho representa a localização da cidade de Petrópolis,RJ.

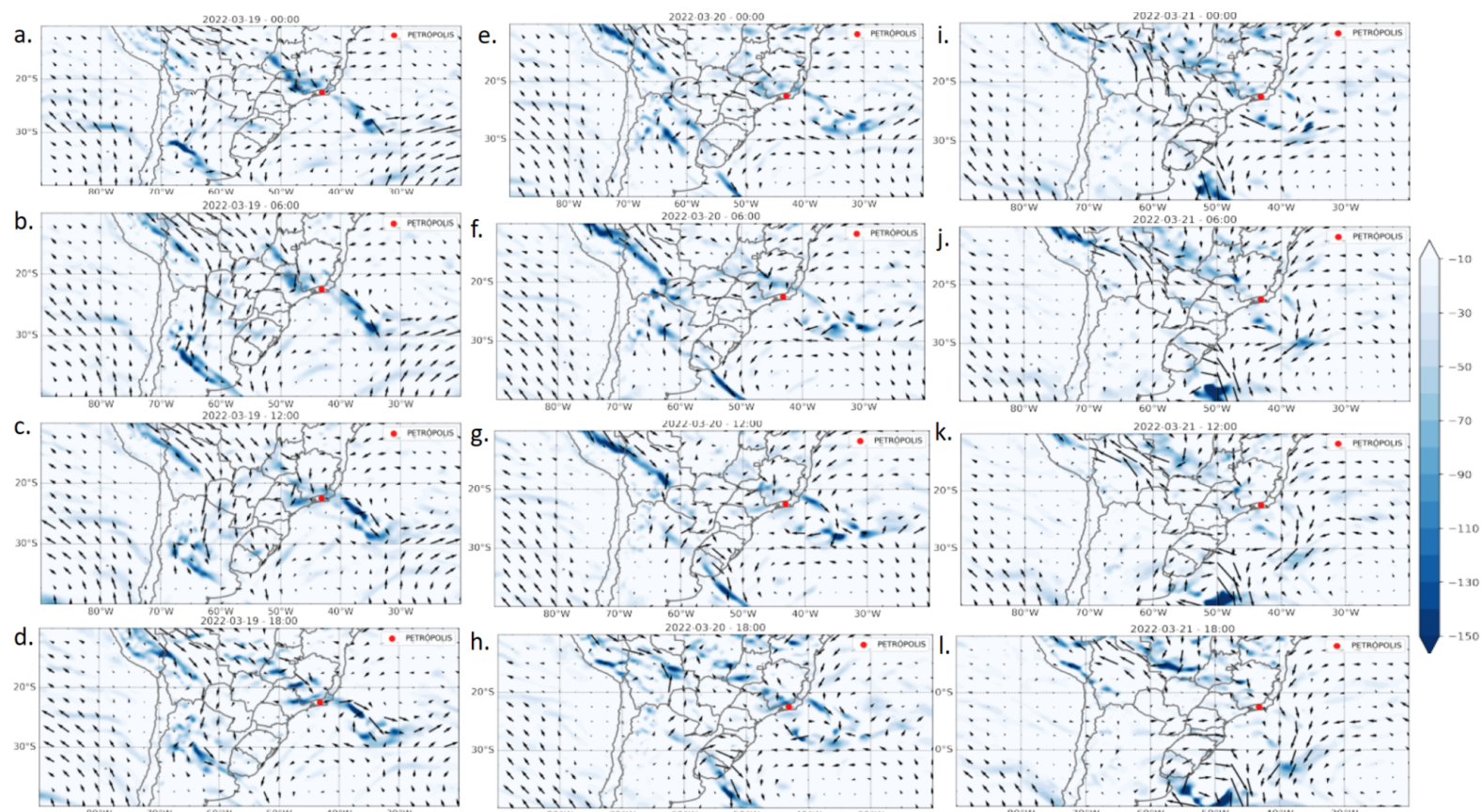


Figura 25- Cisalhamento do vento(diferença entre a velocidade do vento em 500 hPa e 1000 hPa, em m/s), em hachurado, divergência dos ventos em 250 hPa maiores que $0.5(s^{-1})$, em linhas laranjas, e altura geopotencial em 250 hPa (m/s), em linhas pretas, para os dias 19,20 e 21 de março, representados pela primeira, segunda e terceira coluna, respectivamente. O ponto preto representa a localização da cidade de Petrópolis,RJ.

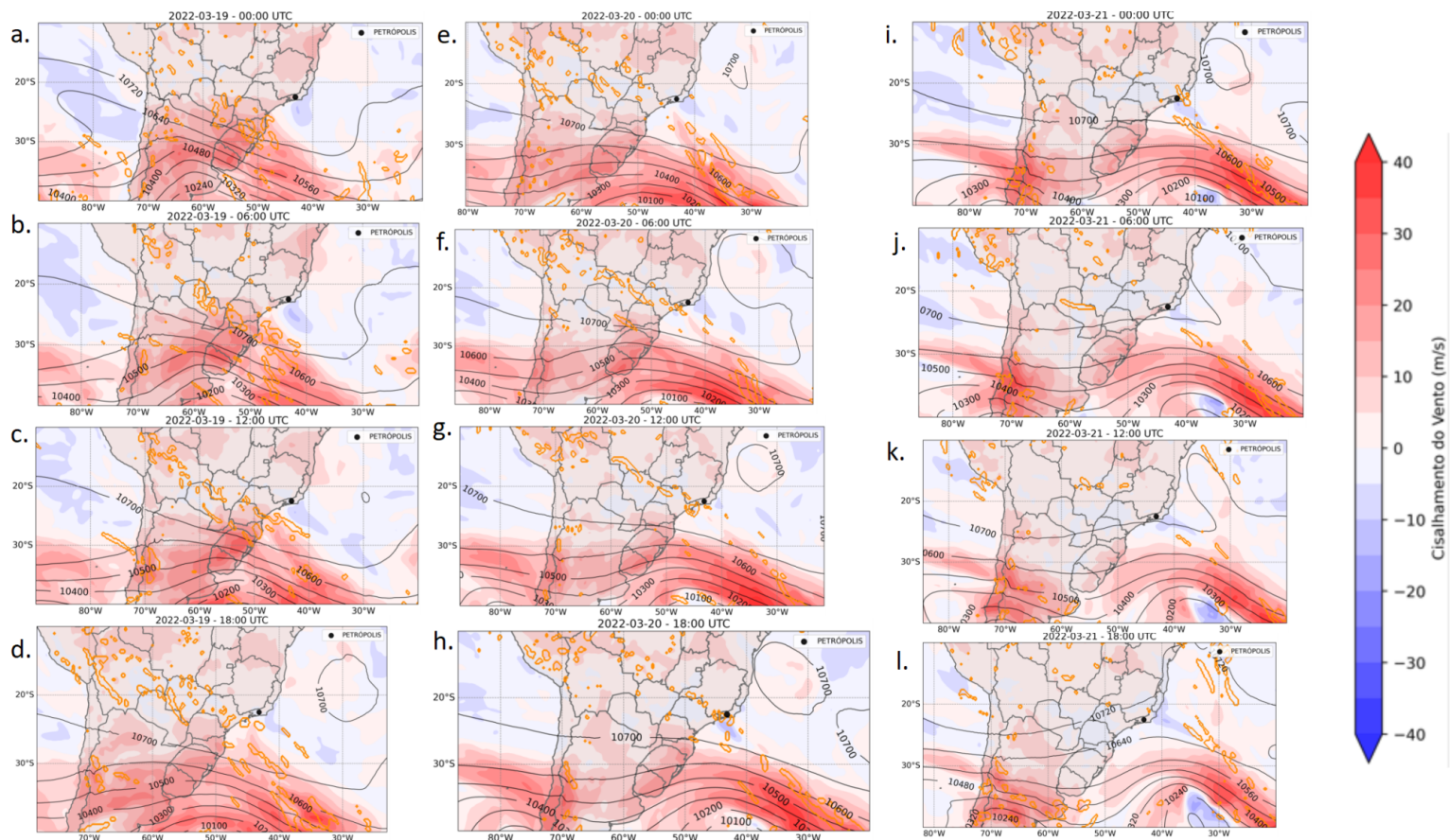


Figura 26- Umidade relativa (soma da umidade relativa em 850 hPa e 500 hPa, dado em porcentagem), a altura geopotencial em 500 hPa (m/s), em linhas vermelhas, e a velocidade vertical ômega menores que $-0.2 (Pa.s^{-1})$, em linhas cianas, para os dias 19,20 e 21 de março, representados pela primeira, segunda e terceira coluna, respectivamente. O ponto preto representa a localização da cidade de Petrópolis,RJ.

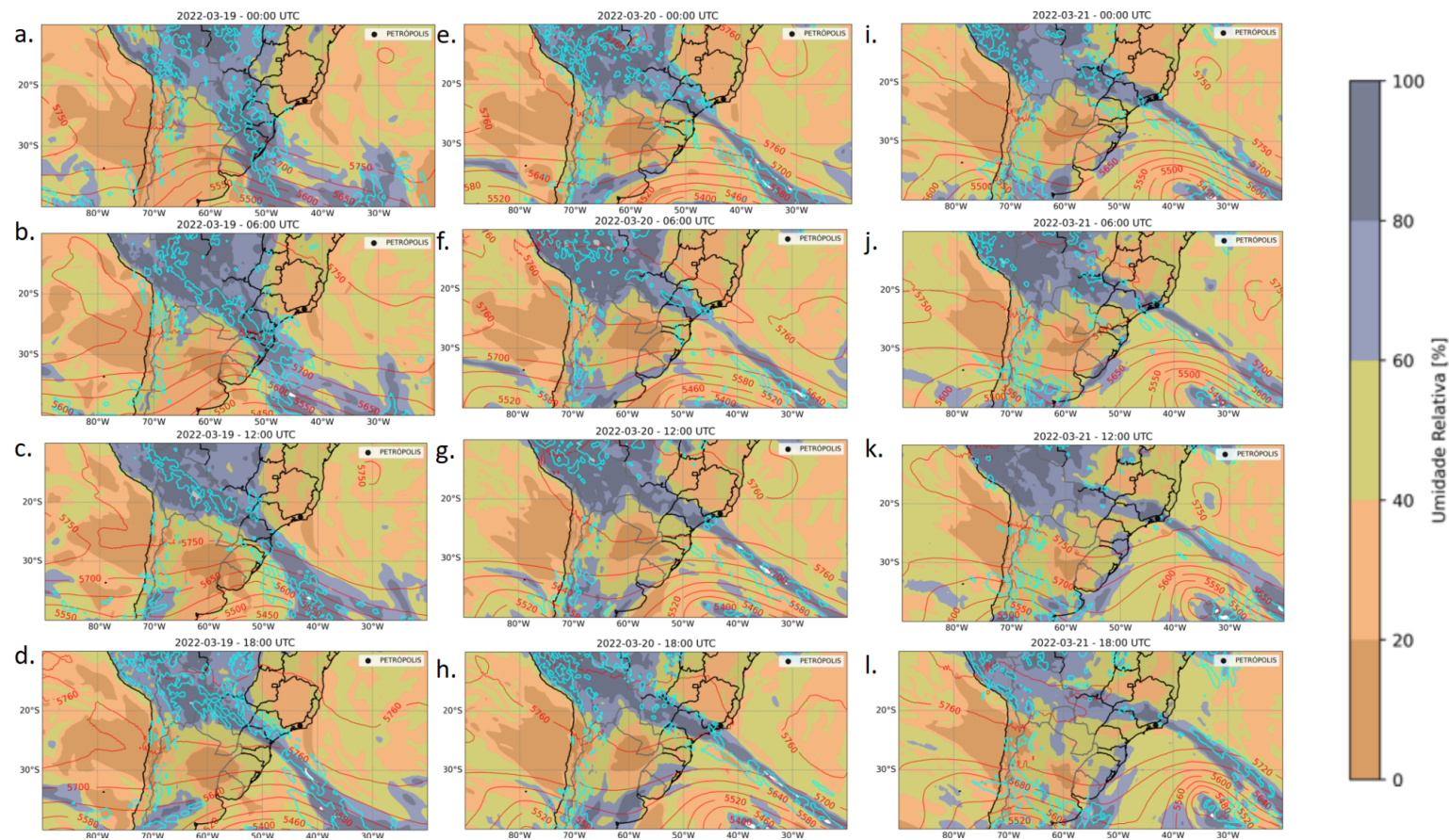
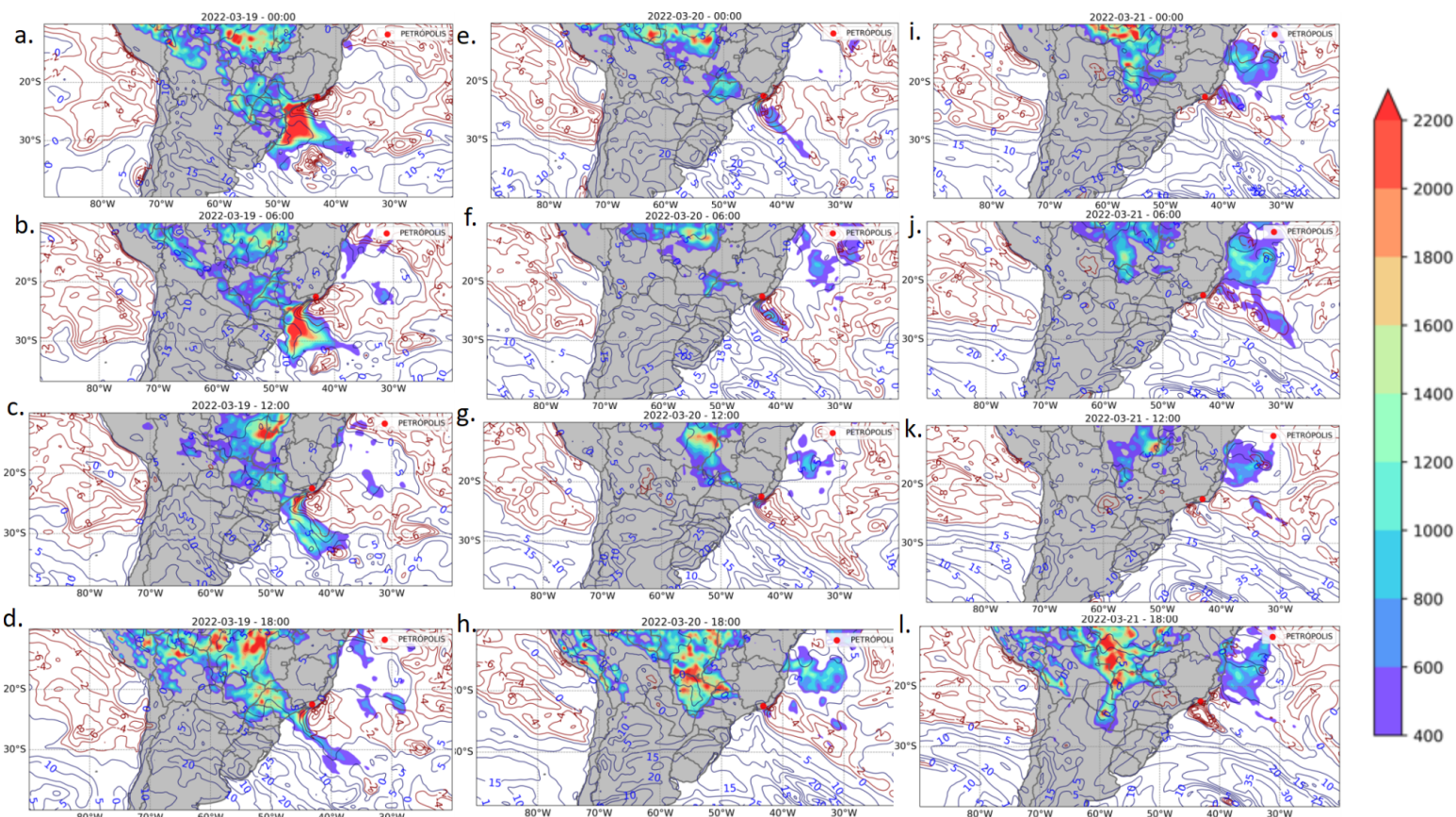


Figura 27- Energia Potencial Disponível para Convecção (CAPE, em $J \cdot kg^{-1}$), em shaded, o cisalhamento vertical negativo (diferença entre a velocidade do vento em 500 hPa e 1000 hPa, em m/s), em linhas vermelhas, e o cisalhamento positivo (diferença entre a velocidade do vento em 500 hPa e 1000 hPa, em m/s), em linhas azuis, para os dias 19,20 e 21 de março, representados pela primeira, segunda e terceira coluna, respectivamente. O ponto vermelho representa a localização da cidade de Petrópolis, RJ.



Com base no exposto, foi feita uma síntese para cada caso com seus valores de cisalhamento vertical do vento, índice CAPE, tipo de tempestade e presença de ZCAS, como mostra a tabela 07.

Tabela 07 - Resumo dos casos de eventos extremos de precipitação com as cidades de estudo, os valores de cisalhamento vertical do vento (m/s), índice CAPE (J/kg), a classificação do tipo de tempestade e a presença de ZCAS

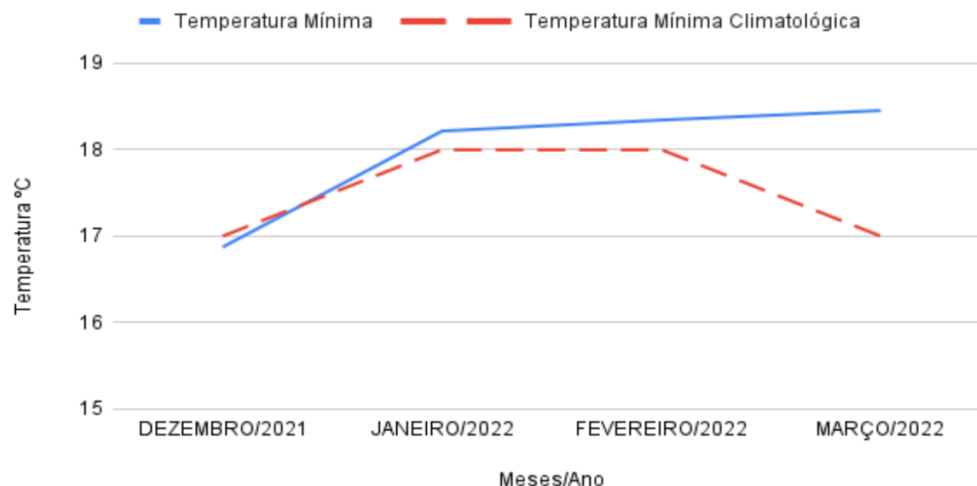
Cidade (data)	Cisalhamento Vertical do Vento (m/s)	CAPE (J/kg)	Tipo de tempestade	Presença de ZCAS
Brumadinho (08/01/2022)	Entre 5 e 10	400	Tempestade comum	Sim
Muriae (09/02/2022)	Entre 5 e 10	Entre 400 e 1.000	Tempestade Comum	Sim
Petrópolis (15/02/2022)	Entre 5 e 10	Entre 1.400 e 1.600	Tempestade Comum com Traços Severos	Não
Petrópolis (20/03/2022)	Abaixo de 5	Entre 1.200 e 2.000	Tempestade Comum com Traços Severos	Não

3.2 Validação da previsão do tempo para a cidade de Itajubá e comparação de modelos de previsão do tempo

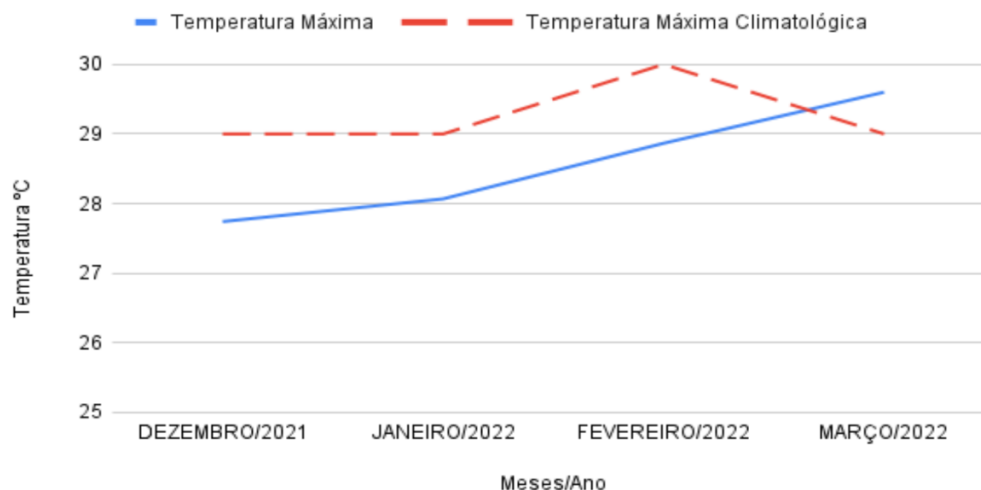
As variáveis de maior interesse em uma previsão de tempo são: temperatura mínima e máxima e precipitação. Inicialmente é apresentada uma comparação das médias mensais do verão 2021/2022 em relação à climatologia mensal no período de 2010 a 2021. A média da temperatura mínima de janeiro a março de 2022 se manteve mais quente do que a média climatológica, enquanto a média da temperatura máxima foi abaixo da climatologia exceto no mês de março. Esse padrão é indicativo do predomínio de nebulosidade, onde as temperaturas mínimas não reduzem tanto em função do efeito estufa, ou seja, o calor não é perdido para o espaço em virtude da nebulosidade, mas ao mesmo tempo as nuvens dificultam a entrada da energia solar na atmosfera e, assim, a máxima é menor. Esse fato é suportado pela figura da precipitação em janeiro, mas não nos outros meses. Isso porque a ocorrência de nebulosidade não implica necessariamente em precipitação. Em relação a precipitação, considera-se que a região de Itajubá teve influência da ZCAS no final de dezembro e no mês de janeiro, em que a cidade apresentou volumes de chuva acima do que é comum. No entanto, a cota do Rio Sapucaí permaneceu na condição normal.

Figura 28- Gráficos de (a) temperatura mínima média e climatologia, (b) temperatura máxima média e climatologia e (c) precipitação média e climatologia para o período de verão 2021/2022

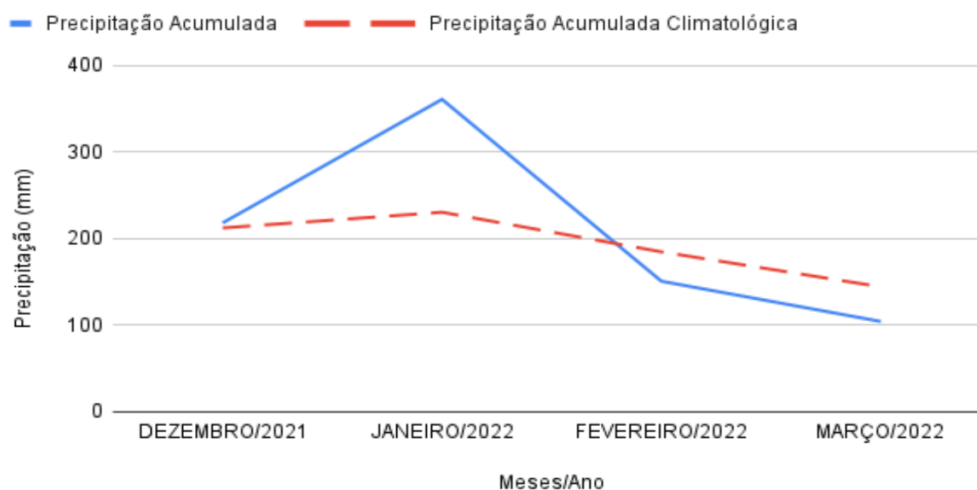
a. Temperatura mínima média mensal para o verão de 2021/2022 e a climatologia



b. Temperatura máxima média mensal para o verão de 2021/2022 e a climatologia



c. Precipitação média mensal para o verão de 2021/2022 e a climatologia



Nessa etapa é apresentada a validação das previsões realizadas para Itajubá. São validados o predictor realizados diariamente para a Defesa Civil com antecedência de 24 horas e 48 horas para a temperatura mínima (figura 32), enquanto o prognóstico com antecedência de 12 horas, 24 horas e 48 horas para a temperatura máxima e precipitação (figura 35 e figura 38). O prognóstico de 12 horas não inclui a temperatura mínima porque quando o boletim meteorológico é confeccionado, a mínima do dia já foi registrada, uma vez em que a temperatura mínima ocorre por volta das 7 horas local.

Para avaliar a qualidade das previsões, foram calculadas duas estatísticas: correlação de Pearson e viés absoluto. A correlação de Pearson mede a relação estatística de conjuntos de dados, em que varia de -1, representando uma correlação negativa perfeita, e 1, uma correlação positiva perfeita. Enquanto o viés absoluto representa um erro sistemático de duas variáveis, ou seja, é a média da diferença entre ambos e quanto mais próximo de 0, mais se aproxima ambos os dados.

Na Figura 29 é mostrada a temperatura mínima prevista para 24 e 48 horas. Há uma correlação de Pearson de 0.578 e 0.620 para 24 e 48 horas respectivamente e um viés médio de aproximadamente -0.005. Portanto, as previsões de 48 horas são as com melhor performance. O mesmo foi realizado para a temperatura máxima e precipitação.

Há uma correlação de Pearson de 0.807, 0.758 e 0.631 para 12, 24 e 48 horas respectivamente e um viés absoluto de -0.221 para a temperatura máxima, como mostra a figura 30. Dessa forma, os prognósticos de 12 horas são os com desempenho mais eficiente.

É possível observar uma similaridade com a precipitação (figura 31), em que a correlação de Pearson foi de 0.654, 0.606 e 0.474 para 12, 24 e 48 horas, no entanto o viés médio é de 0.980. Com isso, as previsões de 12 horas são as que melhor representam o estado esperado da atmosfera.

Nota-se que o viés indica uma diferença entre os prognósticos com os dados observados. A temperatura mínima é a variável que melhor apresenta uma proximidade do prognóstico médio com os dados observados, enquanto a precipitação é o que apresenta uma pior proximidade. Esse resultado está relacionado com a dificuldade que se encontra ao prever a precipitação, já que esta variável pode ser regida por sistemas locais que os modelos não

consideram, como a presença de nuvens convectivas, assim como a presença de um relevo montanhoso próximo a região.

Figura 29- Gráfico da temperatura mínima (°C) com a validação, em linha amarela, do prognóstico do previsor com antecedência de 48 horas, em linha azul, e 72 horas, em linha vermelha, para o verão de 2021/2022 para a cidade de Itajubá

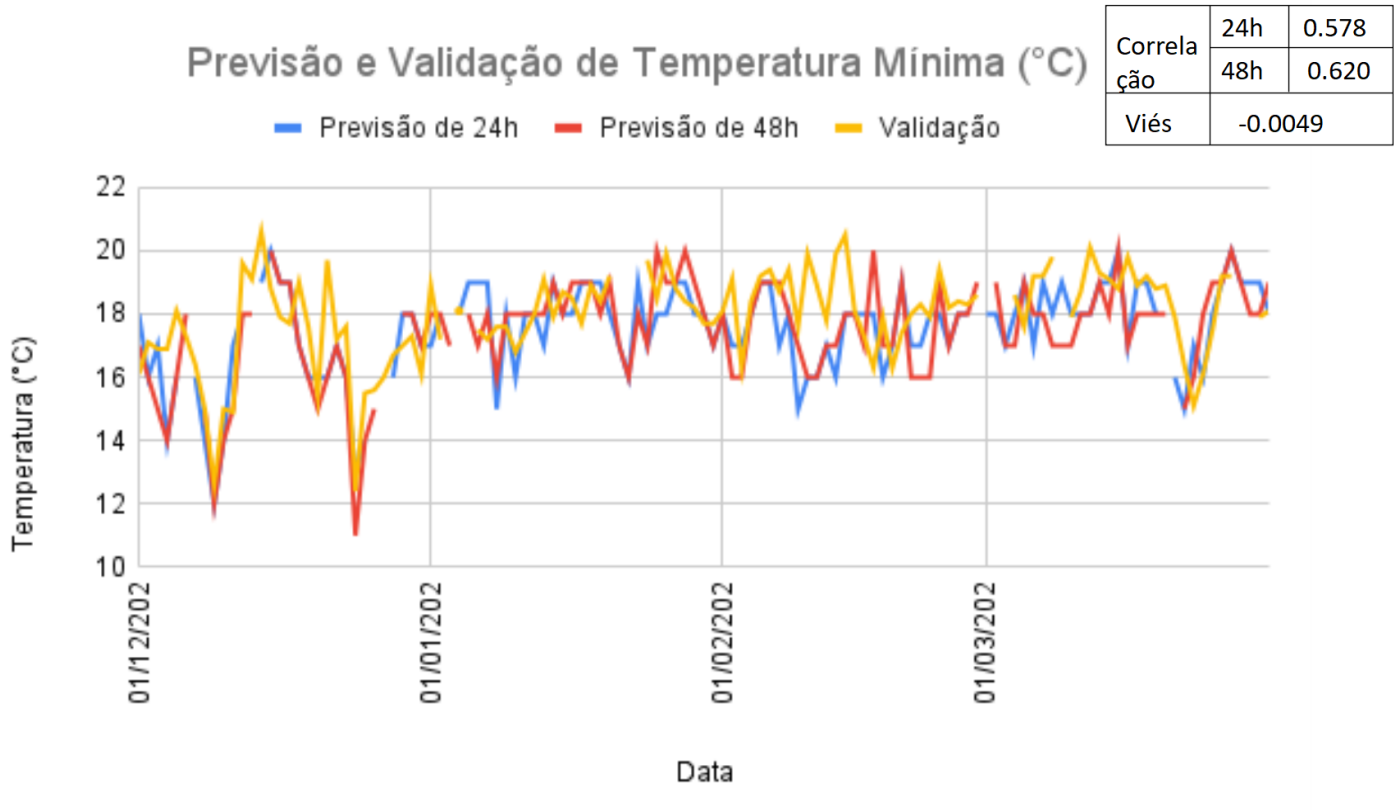


Figura 30- Gráfico da temperatura máxima (°C) com a validação, em linha amarela, do prognóstico do predictor com antecedência de 24 horas, em linha azul, 48 horas, em linha vermelha, e 72 horas, em linha verde, para o verão de 2021/2022 para a cidade de Itajubá

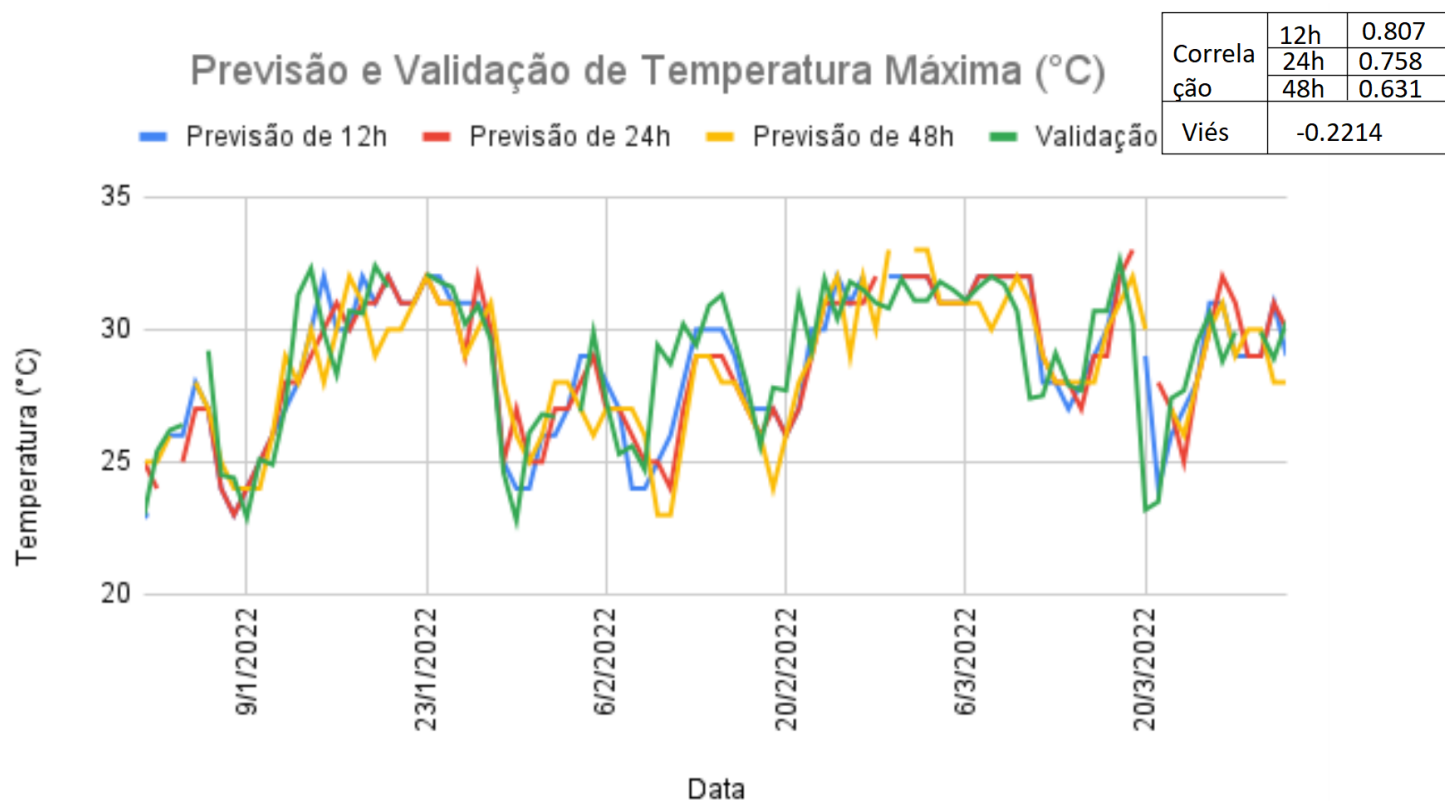


Figura 31- Gráfico da precipitação (mm) com a validação, em barras amarelas, do prognóstico do previsor com antecedência de 24 horas, em linha azul, 48 horas, em linha vermelha, e 72 horas, em linha verde, para o verão de 2021/2022 para a cidade de Itajubá

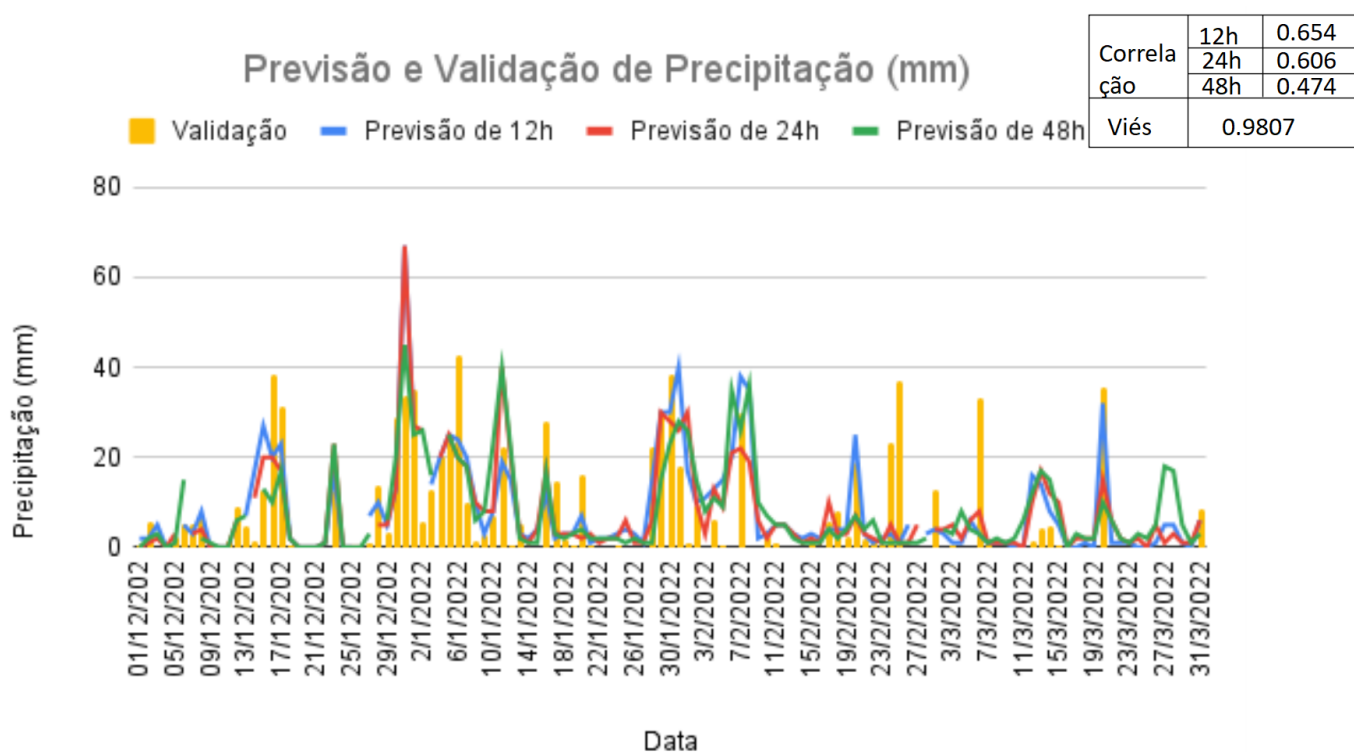
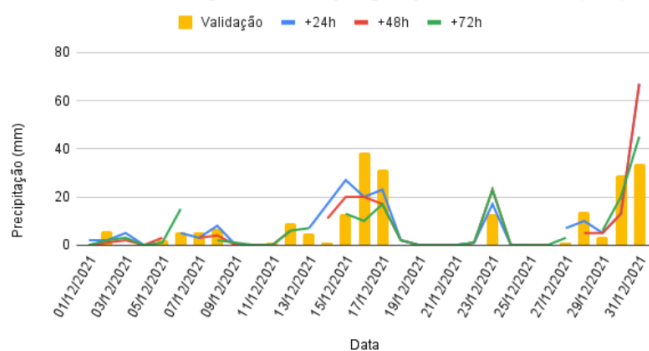
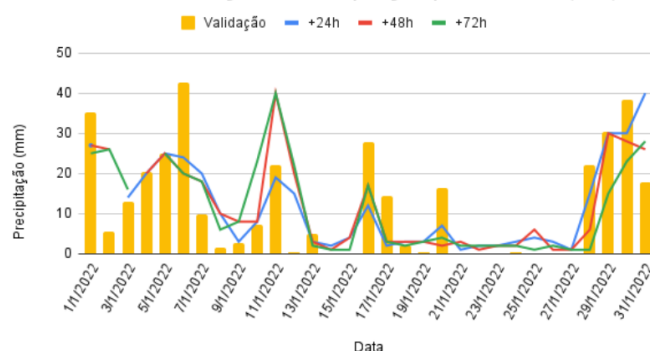


Figura 32- Gráfico da precipitação (mm) com a validação, em barras amarelas, do prognóstico do previsor com antecedência de 24 horas, em linha azul, 48 horas, em linha vermelha, e 72 horas, em linha verde, para os meses: (a) dezembro,(b) janeiro, (c) fevereiro e (d) março, de 2021/2022 para a cidade de Itajubá

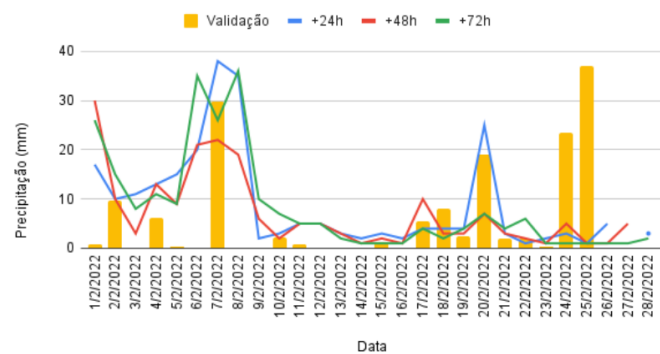
a. Previsão e Validação de Precipitação para Dezembro (mm)



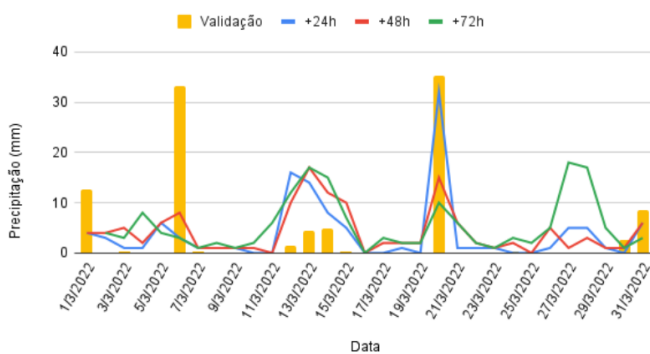
b. Previsão e Validação de Precipitação para Janeiro (mm)



c. Previsão e Validação de Precipitação para Fevereiro (mm)



d. Previsão e Validação de Precipitação para Março (mm)



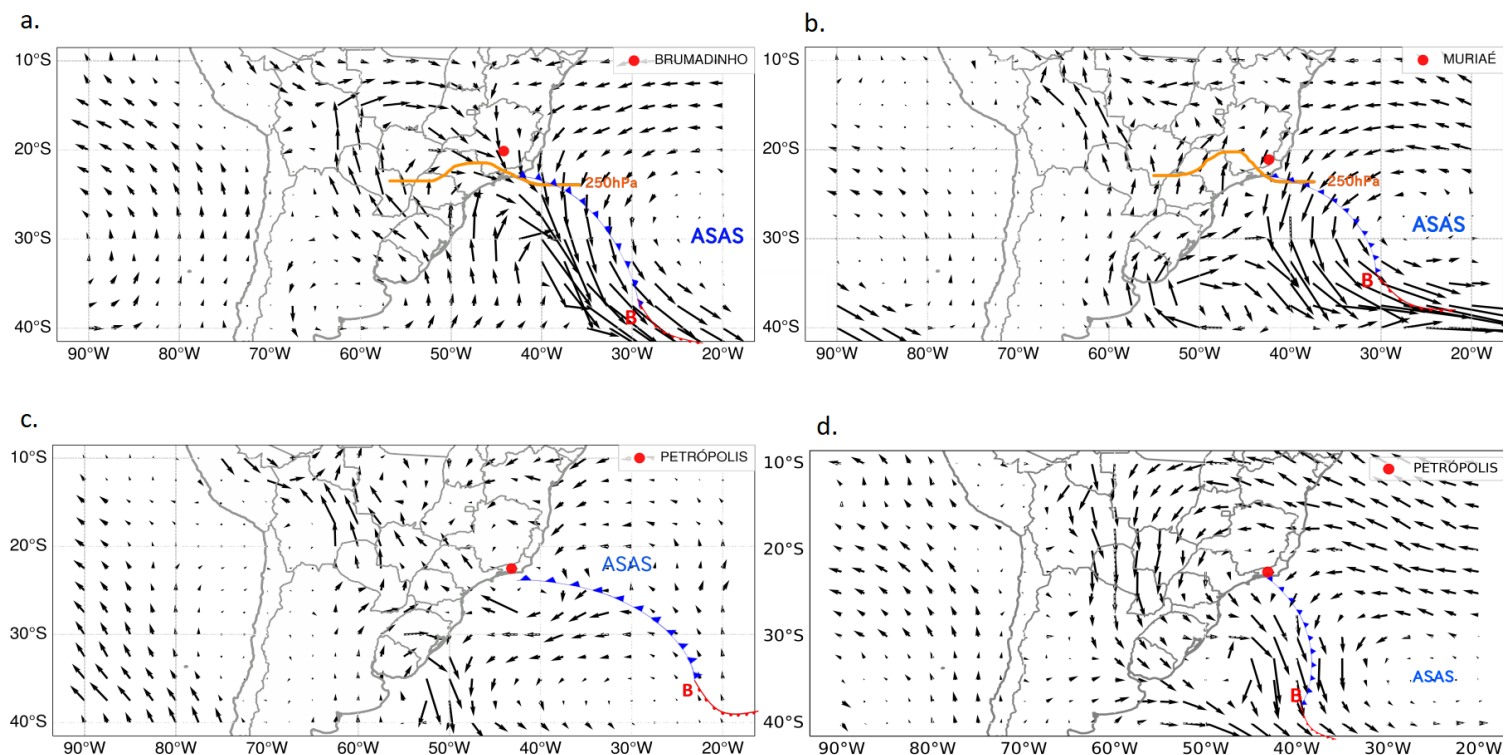
4. CONCLUSÃO

Esse estudo avaliou quatro eventos extremos de precipitação ocorridos no sudeste do Brasil no verão 2021/2022. A característica comum desses eventos é a passagem de uma frente fria que ajuda a organizar a canalização de umidade para o sudeste do Brasil (Figura 33). Em Brumadinho e Muriaé ainda há ocorrência da Zona de Convergência do Atlântico Sul, assim como a presença de um cavado em 250 hPa. Enquanto em Petrópolis, a topografia e o vento úmido e quente do oceano colaboraram para uma região com maior instabilidade. Vale ressaltar que, além da precipitação, tais desastres naturais são consequências de falta de infraestrutura urbana, tais como precarização de moradias, construção de casas em solos desgastados e fragilidade em um planejamento hídrico e urbano.

Em relação à previsão feita para a cidade de Itajubá, pode-se constatar que em casos de grandes quantidades de nebulosidade, os modelos tendem a superestimar ou subestimar a temperatura local, independente se é a mínima ou a máxima. Sendo que a previsão para 48 horas se mostrou mais eficiente para a temperatura mínima, enquanto para a previsão de 12 horas foi mais coerente para a precipitação e temperatura máxima. Porém, de forma geral, a previsão realizada mostrou-se bastante certa e coerente com o que foi observado. Existe uma dificuldade em estimar a precipitação, considerando a somatória de fatores que influenciam e regem a atmosfera no período de verão, tais como sistemas convectivos, assim como as limitações geográficas dos modelos, em que são globais e não localizados. Além disso, o volume de precipitação foi alto durante o mês de Janeiro decorrente de diversos eventos de ZCAS e de frente fria presenciado em desastres naturais citados anteriormente.

Propõe-se trabalhos futuros visando avaliar quais modelos possuem uma melhor previsibilidade para a cidade de Itajubá e o sul de Minas, assim como uma maior abrangência no quesito de eventos extremos, a fim de abordar também cenários com geadas severas e períodos de estiagem, para quantificar os danos de pequenos agricultores locais.

Figura 33- Mapas interativos com os sistemas atmosféricos que causaram os eventos extremos em (a) Brumadinho em 08 de janeiro, (b) Muriaé em 09 de fevereiro, (c) Petrópolis em 15 de fevereiro e (d) Petrópolis em 20 de março



5. REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, Laura Thebit *et al.* Aspectos morfométricos relacionados ao estudo de enchentes na Bacia do Rio Sapucaí, Minas Gerais. **Nativa**, Mato Grosso, v. 5, n. 3, p. 169 - 174, Maio - Junho 2017.
- BARCELLOS, Deise Rodrigues *et al.* Classificação de Eventos Extremos de Precipitação quanto sua Intensidade, Persistência e Abrangência na Região das ZCAS. **Metodologias e Aprendizado**, Santa Catarina, v. 2, p. 76 - 81, 2019.
- CAMPOS, Bruno *et al.* Sistema numérico-operacional de previsão de tempo para a região sul de Minas Gerais: comparação com dados observados (The numeric-operational weather forecast system for the southern region of the Minas Gerais state: comparisons with observed data). **Revista Brasileira de Geografia Física**, Itajubá, v. 9, n. 4, p. 1017 - 1029, Agosto 2016. DOI <https://doi.org/10.5935/1984-2295.20160070>. Disponível em: <<https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/233801>>. Acesso em: 9 ago. 2022.
- CLIMATEMPO. ZCAS e chuva volumosa. **A primeira semana do ano termina com ZCAS e chuva volumosa no BR**. São Paulo, 5 jan. 2022. Disponível em: <<https://www.climatempo.com.br/noticia/2022/01/05/primeira-semana-do-ano-termina-com-zcas-e-chuva-volumosa-no-br-3674#:~:text=A%20Zona%20de%20Convergência%20do.co,m%20alto%20potencial%20para%20transtornos>>. Acesso em: 22 jun. 2022.
- CLIMATEMPO. ZCAS e chuva volumosa. **Pela quarta vez em 2022, BR terá influência da ZCAS**. São Paulo, 7 fev. 2022. Disponível em: <<https://www.climatempo.com.br/noticia/2022/02/07/pela-quarta-vez-em-2022-br-tera-influencia-da-zcas-4175#:~:text=Os%20meteorologistas%20da%20Climatempo%20alertam,de%20terça%20a%20sexta-feira>>. Acesso em: 22 jun. 2022.
- CPTEC. Centro de Previsão de Tempo e Estudo Climático. *In*: INPE. **Centro de Previsão de Tempo e Estudo Climático: Boletim Técnico**. Cachoeira Paulista, 2022. Disponível em: <<https://tempo.cptec.inpe.br/boletimtecnico/pt>>. Acesso em: 18 ago. 2021.
- CPTEC, 2000. Climanálise, v.15, n. 1, Janeiro/2000. Disponível em: <<http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/0100/zcas.html>>. Acesso em: 3 de novembro de 2022.
- COPERNICUS. **Acerca do Copernicus**. Copernicus. Europa, 201?. Disponível em: <<https://www.copernicus.eu/pt-pt/acerca-do-copernicus>>. Acesso em: 17 maio 2022.
- EUROPEAN CENTRE FOR MEDIUM-RANGE WEATHER FORECASTS. About us. **ECMWF**. Europa, 201?. Disponível em: <<https://www.ecmwf.int/en/about/who-we-are>>. Acesso em: 3 abr. 2022.
- FERREIRA, Glauber W. S.; REBOITA, Michelle S. A New Look into the South America Precipitation Regimes: Observation and Forecast. **Atmosphere**, [s. l.], v. 13, n. 6, p. 1-33, 26 maio de 2022. DOI <https://doi.org/10.3390/atmos13060873>. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2073-4433/13/6/873/html>>. Acesso em: 1 abr. 2022.

G1. **Chuva de domingo em Petrópolis teve o maior volume da história num período de 24h.** G1, Petrópolis, 21 mar. 2022. Região Serrana. Disponível em: <<https://g1.globo.com/rj/regiao-serrana/noticia/2022/03/21/chuva-de-domingo-em-petropolis-teve-o-maior-volume-da-historia-num-periodo-de-24h.ghtml>> Acesso em: 17 abril 2022.

G1. **Muriaé decreta situação de emergência por causa das chuvas; moradores ilhados recebem alimentos em barcos dos bombeiros** . G1, Muriaé, 21 mar. 2022. Zona da Mata. Disponível em: <<https://g1.globo.com/mg/zona-da-mata/noticia/2022/02/09/muriae-decreta-situacao-de-emergencia-por-causa-das-chuvas-moradores-ilhados-recebem-alimentos-em-barcos-dos-bombeiros.ghtml>> Acesso em: 17 abril 2022.

G1. **A poucos dias de completar 3 anos da tragédia da Vale, moradores de Brumadinho sofrem com a chuva** . G1, Brumadinho, 21 mar. 2022. Minas Gerais. Disponível em: <<https://g1.globo.com/mg/minas-gerais/noticia/2022/01/12/a-poucos-dias-de-completar-3-anos-de-rompimento-de-barragem-moradores-de-brumadinho-sofrem-com-a-chuva.ghtml>> Acesso em: 17 abril 2022.

GLAZER , Russell; TORRES-ALAVEZ, Jose-Abraham. **Assessing Changes to Severe Storm Environments: A Plan for assessing the expected changes to Regional Severe Storm Environments under GW using RegCM CORDEX simulations**. Itália, 2019. Transparência.

HERSBACH, H.. Operational global reanalysis: progress, future directions and synergies with NWP. **ERA Report Series**, no.27, ECMWF, UK , 2016.

INMET. Previsão Numérica: Modelo. *In*: Instituto Nacional de Meteorologia. **Instituto Nacional de Meteorologia**. 2018. Disponível em: <<https://portal.inmet.gov.br/servicos/previsao-numerica-modelo>>. Acesso em: 20 abr. 2022.

JOE, Paul *et al.*. Automated Processing of Doppler Radar Data for Severe Weather Warnings. **Doppler Radar Observations** : Weather Radar, Wind Profiler, Ionospheric Radar, and Other Advanced Applications, p. 33 - 74, 2012.

JOHNS, Robert H. Some Wind and Instability Parameters Associated With Strong and Violent Tornadoes. **American Geophysical Union**, Missouri, ano 2, p. 583-590, 1993. KOUSKY, V. E. Pentad outgoing longwave radiation climatology for the South American sector. **Revista Brasileira de Meteorologia - RBMet**, v. 3, p. 217-231, 1988.

MARTINS, Alessandro Marques. **Impactos Socioeconômicos de inundações do Rio Sapucaí no Município de Itajubá**. Orientador: Prof Dr Benedito Claudio da Silva. 2022. 79 p. Tese (Mestrado em Engenharia Hídrica) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2022.

MATTOS, Enrique Vieira. **RELAÇÕES DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DAS NUVENS CONVECTIVAS COM AS DESCARGAS ELÉTRICAS**. Orientador: Dr. Luiz Augusto Toledo Machado. 2009. 250 p. Tese (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2009.

OMM. Details for instrument ABI. *In: Instrument ABI*. 2.7. Suíça, entre 2011 e 2022. Disponível em: <<https://space.oscar.wmo.int/instruments/view/abi>>. Acesso em: 13 jul. 2022.

PENNA, Ana Caroline. **Caracterização dos Fluxos de Umidade Sobre o Sudeste do Brasil: Clima Presente e Futuro**. Orientador: Dr. Roger Rodrigues Torres. 2017. 118 p. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2017.

PINHEIRO, Mario Vitor. **Avaliação Técnica e Histórica das Enchentes em Itajubá - MG**. Orientador: Alexandre Augusto Barbosa. 2005. 122 p. Tese (Mestrado em Engenharia de Energia) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2005.

PREFEITURA DE ITAJUBÁ (Itajubá). Defesa Civil de Itajubá. N°030/2021. Relatório de ocorrência de danos e riscos, Itajubá: Defesa Civil de Itajubá, 2021.

PREFEITURA DE ITAJUBÁ (Itajubá). Defesa Civil de Itajubá. N°003/2022. Relatório de ocorrência de danos e riscos, Itajubá: Defesa Civil de Itajubá, 2021.

PUENTE, Beatriz. **Tragédia em Petrópolis completa um mês e mais de 600 seguem desabrigados**. CNN, Rio de Janeiro, 15 mar. 2022. Disponível em: <<https://www.cnnbrasil.com.br/nacional/petropolis-tragedia-completa-um-mes-e-mais-de-600-seguem-desabrigados/>>. Acesso em: 29 mar. 2022.

QUADRO, Mário Francisco Leal. **Estudo de episódios de Zonas de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) sobre a América do Sul**. Orientador: Magda Luzimar de Abreu. 1993. 97 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1994.

REBOITA, Michelle Simões *et al.* Ciclo de vida do sistema de monção da América do Sul: clima presente e futuro. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Pernambuco, v. 15, n. 01, p. 343-358, 2022.

REBOITA, Michelle Simões *et al.* The South Atlantic Subtropical Anticyclone: Present and Future Climate. **Frontiers in Earth Science**, v. 7, p. 8, 2019.

RODRIGUES, João Pedro Silva *et al.* Estudo de um caso de transbordamento do Ribeirão José Pereira em Itajubá- Minas Gerais. **Revista Brasileira de Climatologia**, São Paulo, ano 15, v. 25, p. 661 - 677, novembro 2019. DOI 10.5380/abclima.v25i0.65308. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/339344505_ESTUDO_DE_UM_CASO_DE_TRANSBORDAMENTO_DO_RIBEIRAO_JOSE_PEREIRA_EM_ITAJUBA_MINAS_GERAIS>. Acesso em: 3 nov. 2022.

SAHA, Suranjana *et al.* The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. **American Meteorological Society**, 91, p. 1015 - 1057, 2010. Disponível em: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/91/8/2010bams3001_1.xml>. Acesso em: 29 junho 2022.

SANTOS, Ana Carolina Nascimento *et al.* Simulação hidrológica na Bacia do Rio Sapucaí com o modelo hidrológico distribuído utilizando precipitação observada e dados do produto MERGE. **XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS**, Foz do Iguaçu, ed. 23, p. 1 - 10, 2019.

SHERBURN, Keith D. *et al.* Composite Environments of Severe and Nonsevere High-Shear, Low-CAPE Convective Events. **American Meteorological Society**, Carolina do Norte, p. 1899 - 1927, 2016.

SHERBURN, Keith D. *et al.* Climatology and Ingredients of Significant Severe Convection in High-Shear, Low-CAPE Environments. **American Meteorological Society**, Suíça, v. 29, p. 854 - 877, 2014. DOI 10.1175/WAF-D-13-00041.1. Disponível em: <https://journals.ametsoc.org/view/journals/wefo/29/4/waf-d-13-00041_1.xml>. Acesso em: 2 out. 2022.

SILVA, João Pedro Rodrigues *et al.* Caracterização da Zona de Convergência do Atlântico Sul em campos atmosféricos recentes. **Revista Brasileira de Climatologia**, São Paulo, ano 15, v. 25, p. 355 - 377, 2019.

STULL, Roland. **Instability, Cape and Updrafts**. Canadá, 11 abr. 2020. Transparência.

STULL, Roland. **Wind Shear in the Environment**. Canadá, 11 abr. 2020. Transparência.

TEODORO, Thales Alves *et al.* Climate Change Impacts on the South American Monsoon System and Its Surface–Atmosphere Processes Through RegCM4 CORDEX-CORE Projections. **Earth Systems and Environment**, v. 20, p. 825–847, 27 out. 2021.

Ynoue, Rita Yuri *et al.* **Meteorologia: Noções Básicas**. 1. ed. atual. Brasil: Oficina de Textos, 2017. 184 p. ISBN 9788579752636.