



# Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgf>



## Eventos Extremos de Precipitação no Sudeste do Brasil: Verão 2021/2022

Fabiana da Rocha Bartolomei<sup>1</sup>; João Gabriel Martins Ribeiro<sup>2</sup>; Michelle Simões Reboita<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Graduanda em Ciências Atmosféricas, Instituto de Recursos Naturais, Universidade Federal de Itajubá, [fabi.bartolomei@unifei.edu.br](mailto:fabi.bartolomei@unifei.edu.br), 0009-0005-8728-1080; <sup>2</sup>Doutorando em Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Instituto de Recursos Naturais, Universidade Federal de Itajubá, [gabrielmr472@unifei.edu.br](mailto:gabrielmr472@unifei.edu.br), 0000-0002-9854-8693; <sup>3</sup>Professora do curso de Ciências Atmosféricas do Instituto de Recursos Naturais, Universidade Federal de Itajubá, [reboita@unifei.edu.br](mailto:reboita@unifei.edu.br), 0000-0002-1734-2395

Artigo recebido em 02/04/2023 e aceito em 26/09/2023

### RESUMO

No período de dezembro de 2021 a março de 2022, o sudeste do Brasil foi afetado por eventos extremos de precipitação que culminaram em episódios de calamidade pública e óbitos. Os quatro casos de maior repercussão midiática foram os registrados em Brumadinho - MG (08 de janeiro), Petrópolis - RJ (15 de fevereiro e 20 de março) e Muriaé - MG (09 de fevereiro). Diante desse contexto, o objetivo do estudo é descrever o ambiente em escala sinótica que propiciou a ocorrência de cada um dos eventos extremos de precipitação mencionados. Para tanto, a principal base de dados utilizada é a reanálise ERA5. Já a metodologia baseia-se na análise sinótica dos campos atmosféricos. Entre os resultados têm-se que a característica comum nos quatro eventos extremos é a passagem de uma frente fria próximo à costa sudeste do Brasil, que contribui para a canalização da umidade em tal região e que, associada ao aquecimento local, levam à ocorrência das tempestades.

Palavras-chave: Precipitação diária, frentes, ZCAS, eventos extremos, Petrópolis, Rio de Janeiro, Minas Gerais

## Extreme Precipitation Events in Southeast Brazil: Summer 2021/2022

### ABSTRACT

From December 2021 to March 2022, Southeast Brazil was affected by extreme precipitation events that culminated in episodes of public calamity and deaths. The four most widely publicized cases were recorded in Brumadinho - MG (January 8), Petrópolis - RJ (February 15 and March 20), and Muriaé - MG (February 9). In this context, the objective of the study is to describe the synoptic-scale environment that led to the occurrence of each extreme event. The main database used is the ERA5 reanalysis, and the methodology is based on synoptic analysis of atmospheric fields. The results show that the common characteristic in all four extreme events was the passage of a cold front near the Southeast coast of Brazil, which contributed to the channeling of moisture in the region, and when combined with local heating, led to the occurrence of storms.

Keywords: Daily precipitation, fronts, SACZ, extreme events, Petrópolis, Rio de Janeiro, Minas Gerais

### Introdução

O clima da região sudeste do Brasil é caracterizado por uma estação chuvosa entre outubro a março e outra seca entre abril a setembro, sendo que a maior parte da chuva ocorre nos meses de dezembro a fevereiro (Ferreira e Reboita, 2022). As chuvas na estação úmida são influenciadas pela convecção local e pelo suprimento de umidade proveniente da região amazônica e do oceano Atlântico Sul. Essa combinação é essencial para a formação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS; Silva, Reboita, Escobar, 2019), que 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 Sul (Carvalho et al., 2004; Silva, Reboita, Escobar, 2019). As frentes frias também são responsáveis pela precipitação na região sudeste e influenciam na manutenção e na característica estacionária da ZCAS (Nieto-Ferreira et al., 2011; Escobar e Reboita, 2022), contribuindo para dias consecutivos nublados e chuvosos. Muitos dos eventos extremos de precipitação registrados no país ocorrem na região de atuação da ZCAS, mas os locais mais impactados são aqueles em situação de vulnerabilidade.

Eventos extremos de precipitação diária são eventos em que o volume da precipitação registrado em 24 horas excede um determinado

limiar que, em geral, é obtido com a análise estatística das séries temporais de precipitação do local em estudo (Reis et al., 2018). Já locais vulneráveis são aqueles em que há a ocupação urbana descontrolada (Rossatto, 2021) e/ou em áreas de risco como em regiões de encosta ou em várzea de rio, que são alvos potenciais a problemas associados com deslizamentos de terra e inundações, respectivamente. No Brasil, alguns episódios de eventos extremos de precipitação que podem ser lembrados são os casos de 1976 e 2000. Em 1976, a Região Metropolitana de São Paulo registrou acumulados de precipitação superiores a 250 mm nos dias 29 e 30 de janeiro, o que causou inundações (Alves et al., 2006). No ano de 2000, várias cidades do sul de Minas Gerais receberam totais elevados de precipitação nos primeiros dias do ano. Esse episódio foi decorrente da atuação da ZCAS e foi o responsável por um dos piores casos de inundação já registrados no município de Itajubá - MG (Reboita et al., 2017).

O verão de 2021/2022 foi anormalmente úmido no sudeste do Brasil (Pezzi et al., 2023). Em vários locais, as anomalias positivas de precipitação tiveram contribuição de eventos extremos diários de chuva. Quatro episódios tiveram grande repercussão na mídia, isto é, os ocorridos em Brumadinho - MG (08 de janeiro), Muriaé - MG (09 de fevereiro) e Petrópolis - RJ (15 de fevereiro e 20 de março).

Petrópolis, cidade localizada no Estado do Rio de Janeiro, foi a mais afetada, pois a chuva registrada no dia 15 de fevereiro de 2022 causou deslizamentos de terra e inundações que levaram 233 pessoas a óbito. Um mês depois, em 20 de março, Petrópolis foi novamente assolada por outro evento extremo de precipitação que também causou enchentes, inundações e deslizamentos de terra, que resultaram em 5 mortes (Puente, 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 08 de janeiro de 2022 (G1, 2022a). No mês de fevereiro de 2022, as cidades da Zona da Mata também foram afetadas pelas chuvas, sendo Muriaé uma das mais prejudicadas pelas enchentes e deslizamentos de terra registrados no dia 09 de fevereiro de 2022 (G1, 2022b).

Diante desse contexto, o objetivo do estudo é descrever o ambiente em escala sinótica que propiciou a ocorrência de cada um dos quatro eventos extremos de precipitação na região sudeste no verão 2021/2022 que tiveram grande repercussão na mídia.

## Metodologia

### Área de Estudo

A área de estudo compreende os municípios de Brumadinho (MG), Muriaé (MG) e Petrópolis (RJ), conforme mostra a Figura 1. Os três municípios se localizam em área de topografia complexa e a altitude de cada localidade é 881, 209 e 838 metros, respectivamente.

### Dados

Para caracterizar a distribuição diária da precipitação nos eventos extremos em análise foram obtidos dados horários de precipitação do Centro de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais (CEMADEN, <http://www2.cemaden.gov.br/mapainterativo/>). Foram utilizadas as estações sob número 330390604G (denominada São Sebastião) em Petrópolis; 310900609A (denominada Inhotim) em Brumadinho e 314390603A (denominada Safira) em Muriaé. Os valores climatológicos de precipitação (médias do período de 30 anos) usados no estudo foram obtidos da empresa Climatempo.

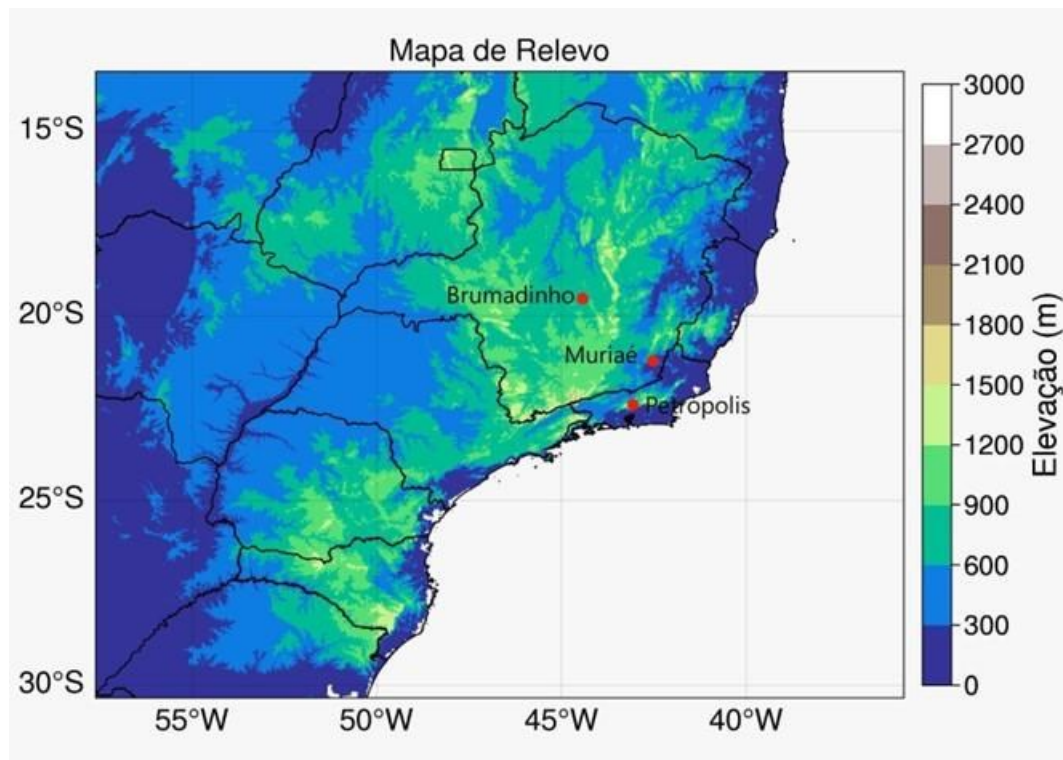


Figura 1. Topografia da região sudeste do Brasil (metros) e localização de Brumadinho, Muriaé e Petrópolis. A topografia foi obtida de GEBCO (2021).

Para a análise do ambiente sinótico de cada evento extremo de precipitação foram obtidos dados da reanálise ERA5 do *European Centre for Medium-Range Weather Forecast* (ECMWF, Hersbach et al., 2020). Esses dados são disponibilizados com frequência horária e para diferentes níveis da atmosfera. As variáveis utilizadas foram: componentes zonal e meridional do vento ( $\text{m s}^{-1}$ ), velocidade vertical do vento ( $\text{Pa s}^{-1}$ ), geopotencial ( $\text{m}^2 \text{s}^{-2}$ ), Energia Potencial Disponível para Convecção (CAPE) ( $\text{J kg}^{-1}$ ), umidade relativa do ar (%) e pressão ao nível médio do mar (Pa).

#### Análises

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) convergência do fluxo de umidade integrado na coluna entre 1000 e 100 hPa para mostrar as

regiões com convergência e divergência de umidade;

(c) cisalhamento vertical do vento horizontal entre 500 e 1000 hPa, divergência de massa em 250 hPa e altura geopotencial em 250 hPa, que têm por objetivo indicar os mecanismos que induzem movimentos ascendentes na atmosfera;

(d) velocidade vertical ômega em 500 hPa, umidade relativa 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 ZCAS. Com a altura geopotencial (variável geopotencial dividida por  $g = 9,8 \text{ m s}^{-1}$ ), é possível verificar a presença de cavados e cristas na atmosfera, que são configurações que influenciam a formação de nuvens e precipitação;

(e) cisalhamento vertical do vento horizontal entre 500 e 1000 hPa e CAPE; em conjunto essas duas variáveis servem para verificar o potencial para a ocorrência de tempestades, como indica a Tabela 1.

**Tabela 1.** Tipos de tempestades em função da Energia Potencial Disponível para Convecção (CAPE, em  $\text{J kg}^{-1}$ ) e cisalhamento vertical do vento horizontal (em  $\text{m s}^{-1}$ ) calculado na camada de 500 e 1000 hPa. Fonte: Joe et al. (2012).

| CAPE ( $\text{J kg}^{-1}$ ) | Cisalhamento vertical do vento horizontal ( $\text{m s}^{-1}$ ) |                       |                      |
|-----------------------------|-----------------------------------------------------------------|-----------------------|----------------------|
|                             | < 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          |

Para ocorrência de tempestades é necessário que as parcelas de ar que ascendem na atmosfera continuem ascendendo e isso caracteriza a instabilidade atmosférica, o que pode ser medido através da variável CAPE. Ao mesmo tempo, a atmosfera deve mostrar um perfil vertical de intensidade do vento que aumente com o distanciamento da superfície (cisalhamento vertical do vento horizontal). Esse aumento é crucial entre 1000 e 500 hPa, pois ele não irá deixar as correntes ascendentes e subsidentes se anularem. Assim, a tempestade pode ser mantida.

## Resultados e discussão

### Caracterização Geral dos Eventos Extremos em Estudo

Uma síntese dos eventos extremos de precipitação diária estudados é apresentada na Tabela 2 enquanto a Figura 2 mostra a evolução da chuva horária no período de 24 horas. Em Brumadinho, o volume de chuva registrado em 24 horas, no dia 08 de janeiro de 2022, foi de 206,56 mm que representa 78% do total climatológico do mês de janeiro. Esse evento extremo foi responsável por inundações. Segundo o G1 (2022a), mais de 1.638 famílias foram afetadas pelas chuvas entre os dias 01 e 12 de janeiro de 2022. Além disso, foi registrado o desalojamento de 887 pessoas e 305 desabrigadas.

Em Muriaé foi registrado no dia 09 de fevereiro 110,93 mm de chuva em 24 horas, correspondendo a cerca de 74% do que era esperado para o mês. Conforme o portal G1 (2022b), os moradores ficaram ilhados em suas casas por alguns dias.

Um dos eventos extremos que mais chamou a atenção da sociedade brasileira foi o caso

de Petrópolis no dia 15 de fevereiro de 2022, em que a chuva de 260 mm em 24 horas correspondeu a 104% da precipitação climatológica mensal. De acordo com Puente (2022), esse evento contribuiu para o óbito de 233 pessoas e para que mais de 600 ficassem desabrigadas, mesmo depois de um mês da ocorrência do evento.

Após um mês, a cidade de Petrópolis foi cenário de outro evento extremo de precipitação no dia 20 de março de 2022, com um volume de 358,6 mm em 24 horas, correspondendo a 141% do valor esperado para o mês. O portal G1 (2022c) reportou a ocorrência de cinco mortes por deslizamento de terra e o desaparecimento de quatro pessoas.

As próximas seções descrevem os aspectos meteorológicos que contribuíram para a ocorrência desses quatro eventos extremos de precipitação.

### Caso de Brumadinho: 08/01/2022

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 3), (b) convergência do fluxo de umidade integrado na vertical e vetores de fluxo de umidade (Figura 4), (c) cisalhamento vertical do vento horizontal entre 500 e 1000 hPa, divergência de massa no nível 250 hPa e altura geopotencial no nível 250 hPa (Figura 5), (d) umidade relativa média entre 850 e 500 hPa, ômega em 500 hPa e altura geopotencial em 500 hPa (Figura 6) e (e) CAPE e cisalhamento vertical do vento horizontal entre 500 e 1000 hPa (Figura 7) nos dias 07, 08 e 09 de janeiro, englobando o período prévio e posterior ao evento em estudo. A mesma sequência de figuras e número de dias analisados serão usados na análise dos outros casos.

**Tabela 2.** Informações (volume de chuva, danos ocorridos e reportagens) sobre os eventos extremos de precipitação ocorridos em Brumadinho, no dia 08 de janeiro de 2022, em Muriaé, no dia 09 de fevereiro de 2022 e em Petrópolis, nos dias 15 de fevereiro e 20 de março de 2022.

| Data       | Local           | Total de chuva acumulada (mm)              | Precipitação climatológica mensal (mm) | Impactos Sociais                     |
|------------|-----------------|--------------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------|
| 08/01/2022 | Brumadinho / MG | 206,56 (em 24 horas) / 131 (em 7 horas)    | 263                                    | ruas alagadas                        |
| 09/02/2022 | Muriaé / MG     | 110,93 (em 24 horas) / 95,21 (em 11 horas) | 150                                    | ruas alagadas                        |
| 15/02/2022 | Petrópolis / RJ | 260 (em 24 horas) / 259,4 (em 3 horas)     | 250                                    | 233 mortes e 4 pessoas desaparecidas |
| 20/03/2022 | Petrópolis / RJ | 358,6 (em 24 horas) / 215,8 (em 2 horas)   | 253                                    | 5 mortes e 4 pessoas desaparecidas   |

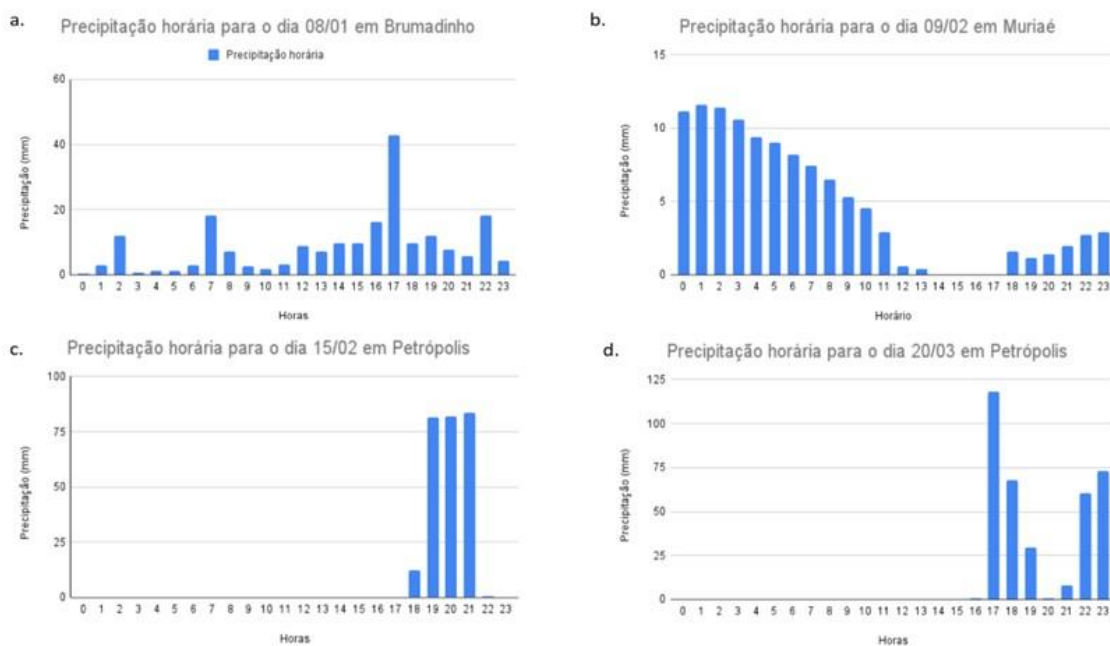


Figura 2. Precipitação (mm) horária (UTC) em (a) Brumadinho no dia 08/01/22 para comparação com a climatologia do mês de janeiro que é de 263 mm, (b) Muriaé no dia 09/02/22, cuja climatologia para o mês de fevereiro é de 150 mm, (c) Petrópolis no dia 15/02/22, em que a climatologia para o mês de fevereiro 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 horários de precipitação: CEMADEN. Os valores climatológicos foram obtidos do portal da Climatempo.

No dia 07 de janeiro, há um sistema de alta pressão entre o sudeste da América do Sul e o oceano Atlântico com isóbara central de 1018 hPa e a norte deste, na costa sudeste do Brasil, há um sistema de baixa pressão com isóbara central de 1009 hPa (Figura 3a-d) que, posteriormente, leva ao desenvolvimento das frentes fria e quente mostradas no dia 08 de janeiro (Figura 3e). Essas frentes, como são regiões de gradientes horizontais

de temperatura do ar (indicados pela variável espessura da camada), estão acopladas com os jatos em altos níveis (Figura 3e-h).

O sistema de baixa pressão na costa da região sudeste do país é importante para induzir o transporte de umidade proveniente da Amazônia para a região sudeste do Brasil, bem como o do Atlântico tropical pelos ventos do setor oeste do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul,

conforme mostrado através da trajetória dos vetores do fluxo de umidade integrado na vertical na Figura 4a-l. Na Figura 5a-h, uma característica de relevância é o predomínio de divergência de massa em altos níveis da atmosfera desde o dia 07, suportada no dia 08 pela presença de um cavado (Figura 5e-h). A divergência em níveis médios e altos é importante para induzir/fortalecer os movimentos ascendentes na atmosfera, o que é mostrado pela variável ômega na Figura 6a-l. Com suprimento de ar quente e úmido em baixos níveis, aquecimento da superfície continental e o suporte para a ascensão do ar na região sudeste, há favorecimento para o desenvolvimento de nebulosidade e precipitação. Além disso, no dia 08, a frente fria chega ao sul de Minas Gerais (Figura 3g) colaborando para a continuidade da convergência do fluxo de umidade sobre a região (Figura 4g).

A combinação das características descritas contribui para a instabilidade do ar (parcelas de ar conseguem se manter em ascendência) em Brumadinho, o que pode ser mostrado pela variável CAPE (Figura 7a-l). No dia 08, o CAPE mostrou valores abaixo de 400 entre 0000 e 1200 UTC, mas às 1800 UTC o índice foi mais acentuado, chegando a 600 até 1000 (Figura 7a-h). A combinação da instabilidade (CAPE de 600 às 1800 UTC) com o cisalhamento vertical do vento horizontal ( $10 \text{ m s}^{-1}$  às 1800 UTC) contribuem para a formação de tempestades classificadas como comuns conforme a Tabela 1. Conforme mostrado na Figura 2a, a chuva foi mais concentrada entre 1600 e 1800 UTC. Um fato que também deve ser considerado é que a região de Brumadinho já estava sendo afetada por chuvas desde o início de janeiro, deixando a área mais vulnerável para um episódio de chuva extrema.

Uma análise global das Figuras 3 a 7 indicam um padrão atmosférico associado à ZCAS similar ao descrito em Silva et al. (2019), pois (a) a altura geopotencial em níveis médios e altos mostra um cavado sobre o sul do Brasil e cercanias do nordeste e uma crista nas cercanias da região sudeste e oceano Atlântico, (b) a circulação

atmosférica em altos níveis (figura não mostrada) indica a presença da Alta da Bolívia, (c) em baixos níveis há convergência do escoamento proveniente da Amazônia e do oceano Atlântico Sul tropical sobre o continente, (d) uma banda com movimentos ascendentes e umidade atmosférica desde o sul da Amazônia até o sudeste do Brasil. As análises realizadas concordam com a informação divulgada pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudo Climático (CPTEC) da ocorrência de ZCAS entre os dias 01 a 08. Em adição, as figuras mostram que no dia 09, o padrão similar à ZCAS ainda se mantém.

### **Caso de Muriaé: 09/02/2022**

No dia 08 de fevereiro de 2022, há um ciclone que se estende da costa do Rio Grande do Sul para o oceano e associado à baixa tem-se uma frente fria que se estende até a fronteira do Paraná com São Paulo às 0000 UTC (Figura 8a). Essa frente se desloca para norte chegando próxima de Muriaé às 1800 UTC do dia 09 de fevereiro (Figura 8h). Entretanto, os maiores volumes de chuva no dia 09 não ocorreram na chegada da frente na região de estudo, mas sim durante o ambiente pré-frontal, como mostra a Figura 2b em que os maiores acumulados horários de precipitação foram registrados entre 0000 e 1100 UTC.

O ambiente pré-frontal (até a chegada da frente na região de estudo) é caracterizado pelo suprimento de umidade proveniente, principalmente, do interior do continente e pela convergência deste sobre São Paulo e o sul de Minas Gerais (Figura 9a-h). Em níveis altos da atmosfera esse período mostra predomínio de um cavado sobre o sul do Brasil, uma crista na região sudeste e domínio de divergência de massa desde o sul da Amazônia até a região da crista (Figura 10 a-h). Essa divergência é decorrente do forçamento no topo da atmosfera do ar que ascende devido ao aquecimento da superfície e, consequente, convecção. De fato, os movimentos ascendentes na mesma região de divergência são mostrados na Figura 11a-h juntamente com o domínio de uma atmosfera mais úmida comparada às áreas ao redor.



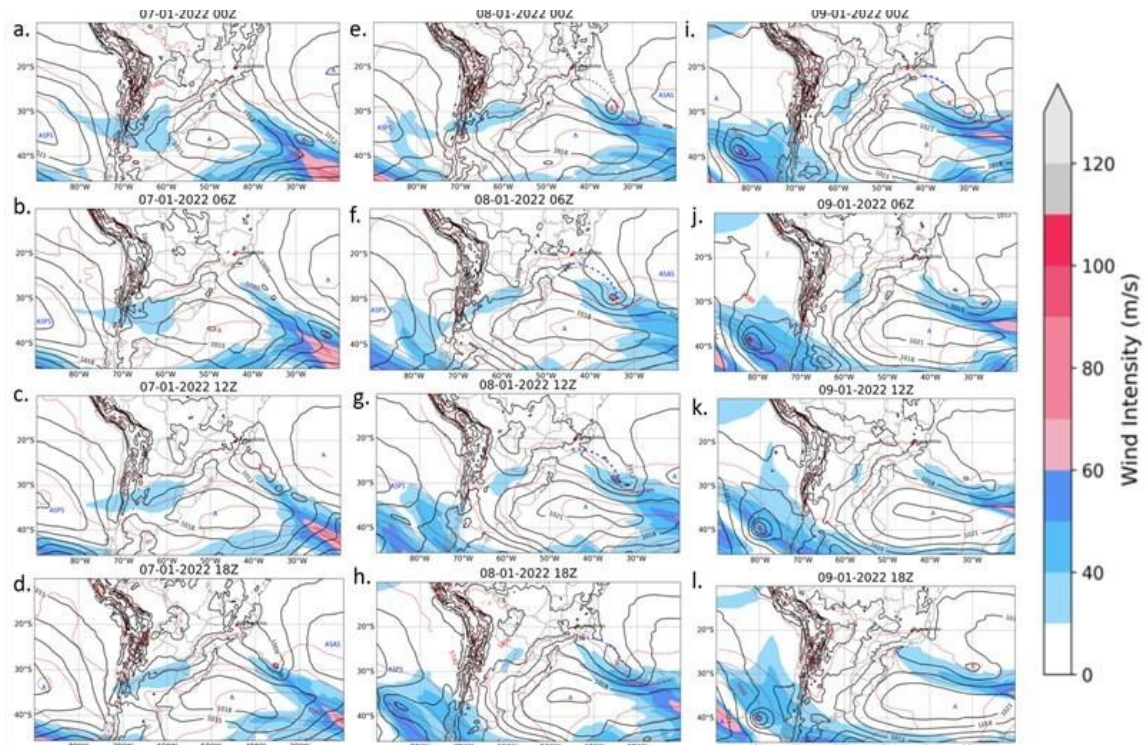


Figura 3. Jatos (intensidade do vento acima de  $30 \text{ m s}^{-1}$ ) em 250 hPa, em hachurado, pressão a nível médio do mar (hPa), em linhas contínuas pretas e espessura da camada (diferença entre a altura geopotencial em 500 e 1000 hPa, em gpm), representada pelas linhas pontilhadas em vermelho, para os quatro horários sinóticos padrão (0000, 0600, 1200 e 1800 UTC) nos dias 07, 08 e 09 de janeiro. O ponto vermelho representa a localização da cidade de Brumadinho, MG. Nas figuras a letra B indica o centro de baixa pressão, A indica a alta pressão, a linha azul com triângulos mostra a localização da frente fria e a linha vermelha com semicírculos, a frente quente.

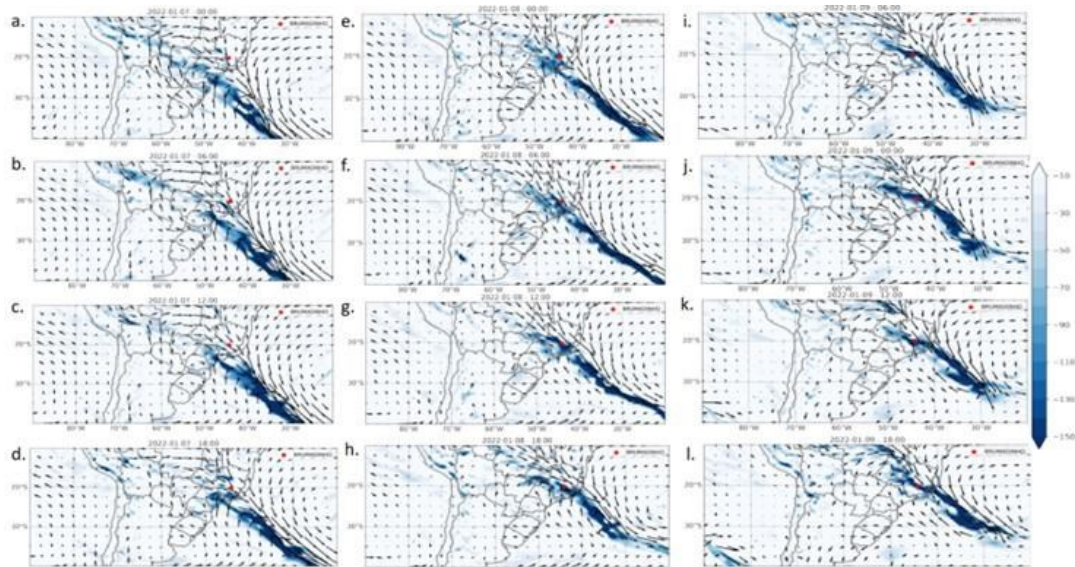


Figura 4. Divergência do fluxo de umidade integrado na vertical ( $\text{kg m s}^{-1}$ ), em hachurado, e vetores do fluxo de umidade integrado na vertical ( $\text{m s}^{-1}$ ) para os dias 07, 08 e 09 de janeiro. O ponto vermelho representa a localização da cidade de Brumadinho, MG.



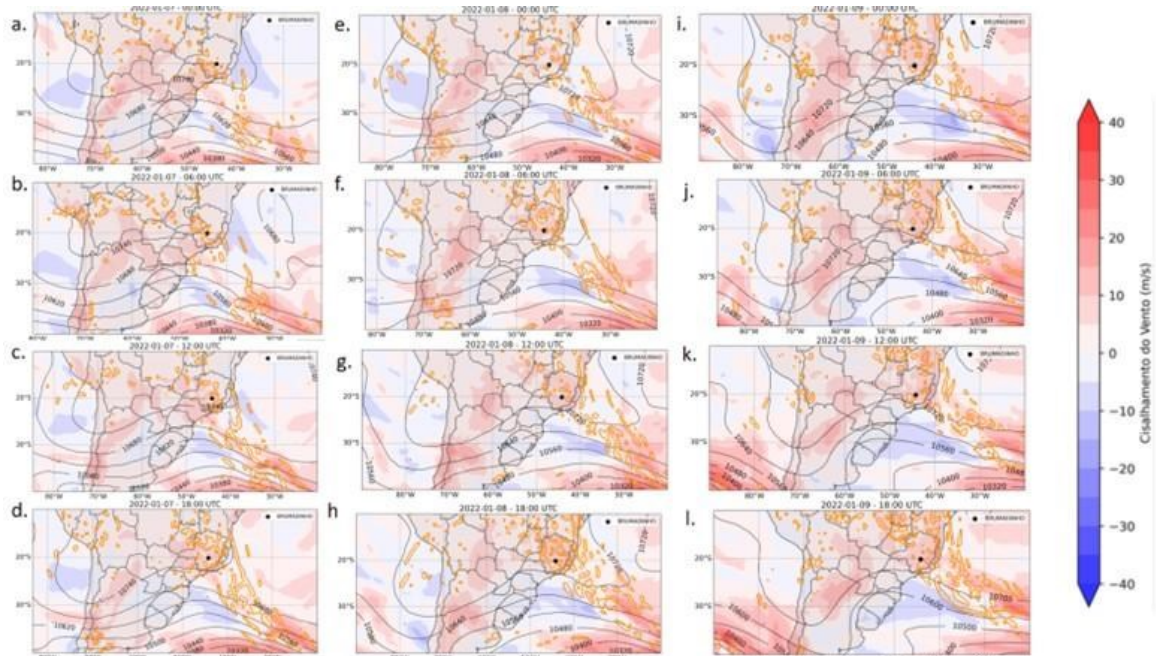


Figura 5. Cisalhamento vertical do vento horizontal (diferença entre a velocidade do vento em 500 hPa e 1000 hPa, em  $\text{m s}^{-1}$ ), em hachurado, divergência de massa em 250 hPa maior que  $0,5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ , em linhas laranjas, e altura geopotencial em 250 hPa (gpm), em linhas pretas, para os dias 07, 08 e 09 de janeiro. O ponto preto representa a localização da cidade de Brumadinho, MG.

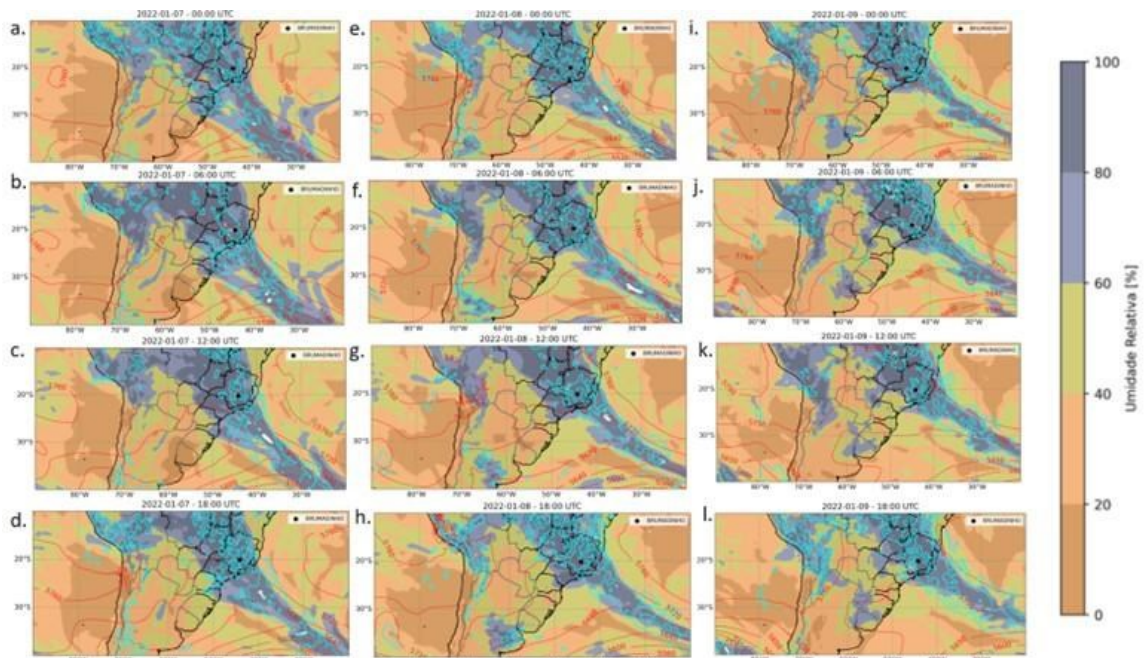


Figura 6. Umidade relativa média entre 850 e 500 hPa (%), altura geopotencial em 500 hPa (gpm), em linhas vermelhas, e velocidade vertical ômega menor que  $-0.2 \text{ Pa s}^{-1}$ , em linhas azuis, para os dias 07, 08 e 09 de janeiro. O ponto preto representa a localização da cidade de Brumadinho, MG.



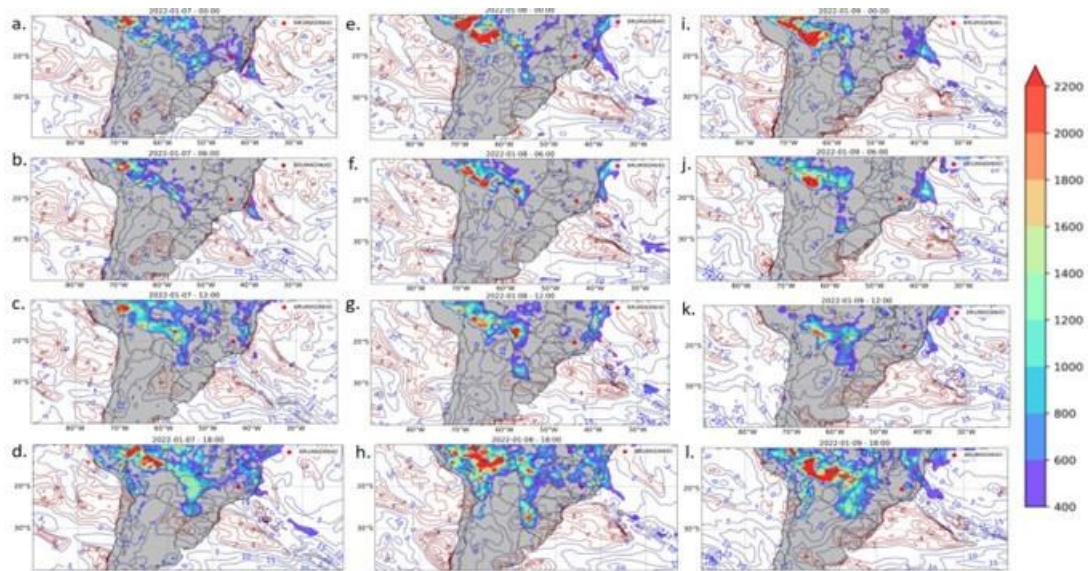


Figura 7. CAPE maior do que  $400 \text{ J kg}^{-1}$  em colorido e cisalhamento vertical do vento horizontal entre 500 e 1000 hPa ( $\text{m s}^{-1}$ ) sendo os valores negativos representados em linhas vermelhas e os positivos em linhas azuis escuras, para os dias 07, 08 e 09 de janeiro. O ponto vermelho representa a localização da cidade de Brumadinho, MG.

A instabilidade da atmosfera pode ser indicada pelo CAPE. Esse mostrou valores de cerca de  $400 \text{ J kg}^{-1}$  às 0000 UTC na região de Muriaé no dia 08, depois enfraqueceu e voltou a intensificar, atingindo o máximo às 1800 UTC. Padrão similar ocorreu no dia 09 (Figura 12e-h). Entretanto, o CAPE às 1800 UTC foi menor do que  $400 \text{ J kg}^{-1}$  (note que na figura só são apresentados os valores superiores a  $400 \text{ J kg}^{-1}$ ). Considerando os valores de CAPE e do cisalhamento vertical do

vento ao longo do dia 09 (Figura 12e-h), as tempestades ocorridas podem ser classificadas como comuns conforme a Tabela 1.

Todas as características da atmosfera destacadas nessa seção indicam ocorrência de ZCAS no período estudado (08 a 10 de fevereiro). A Climatempo (2022) também indicou a ocorrência de um evento de ZCAS iniciando no dia 08 e se dissipando no dia 11 de fevereiro.

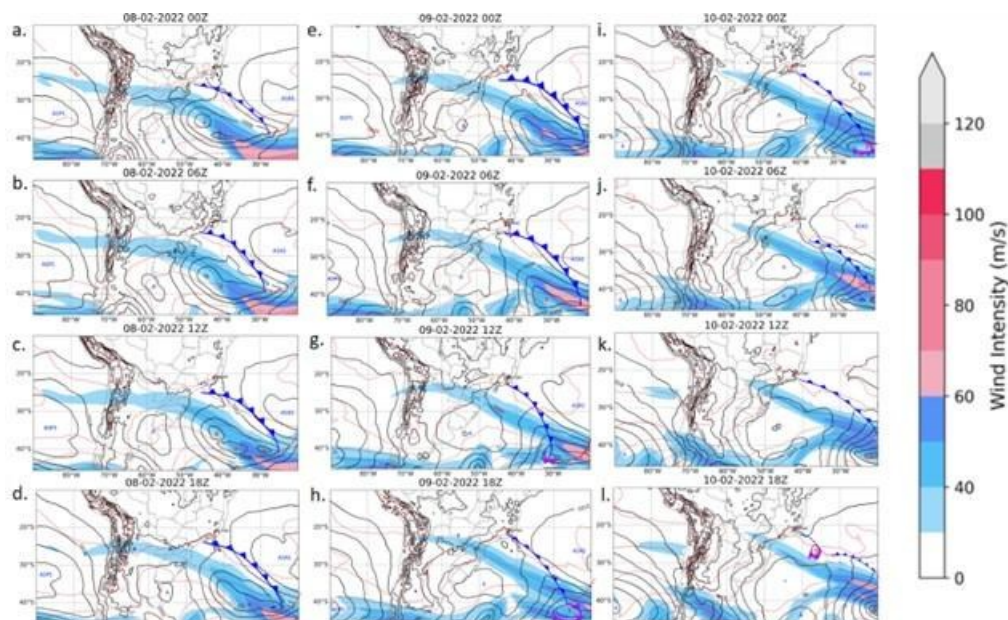


Figura 8. Jatos (intensidade do vento acima de  $30 \text{ m s}^{-1}$ ) em 250 hPa, em hachurado, pressão a nível médio do mar (hPa), em linhas contínuas pretas e espessura da camada (diferença entre a altura geopotencial em 500 e 1000 hPa, em gpm), representada pelas linhas pontilhadas em vermelho, para os quatro horários sinóticos padrão (0000, 0600, 1200 e 1800 UTC) nos dias 08, 09 e 10 de fevereiro. O ponto vermelho representa a localização da cidade de Muriaé, MG. Nas figuras a letra B indica o centro de baixa pressão, A indica a alta pressão, a linha azul com triângulos mostra a localização da frente fria e a linha vermelha com semicírculos, a frente quente.



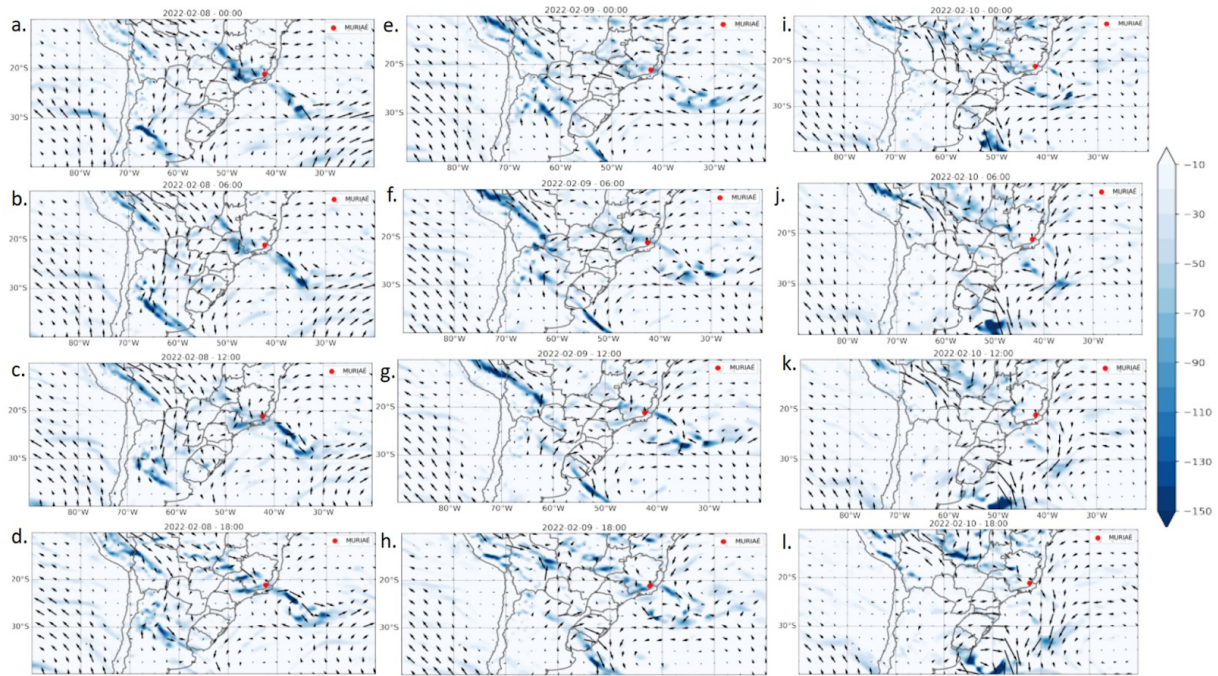


Figura 9. Divergência do fluxo de umidade integrado na vertical ( $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ ), em hachurado, e vetores do fluxo de umidade integrado na vertical ( $\text{m s}^{-1}$ ) para os dias 08, 09 e 10 de fevereiro. O ponto vermelho representa a localização da cidade de Muriaé, MG.

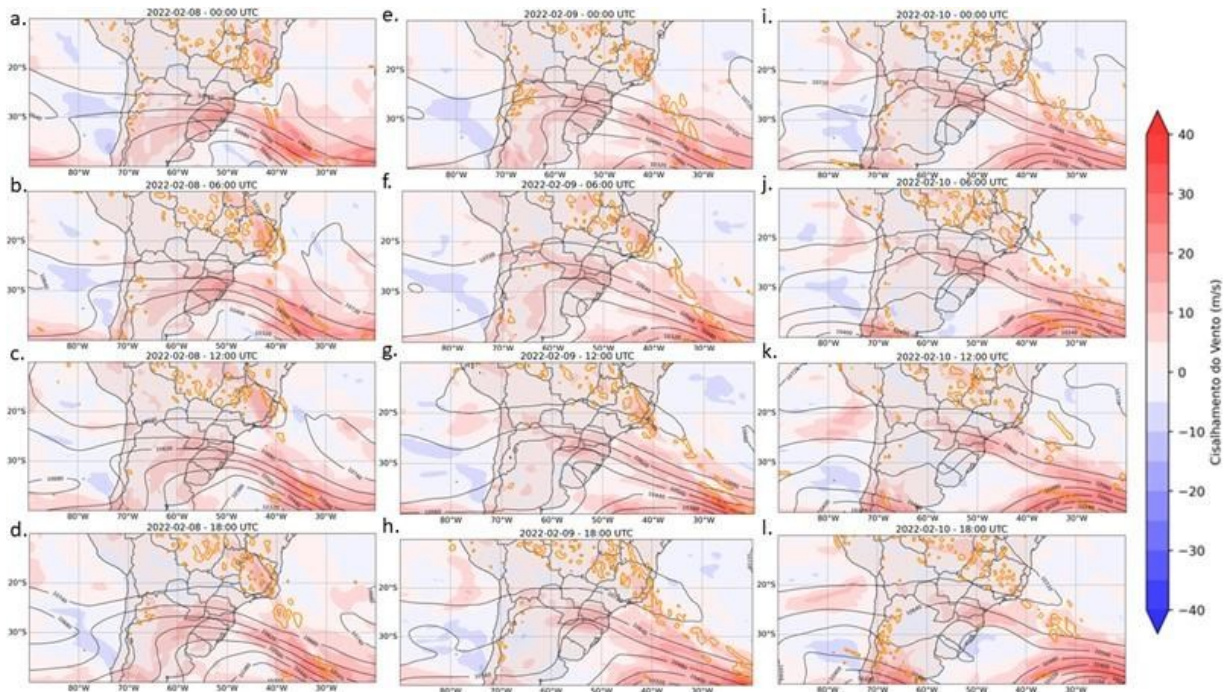


Figura 10. Cisalhamento vertical do vento horizontal (diferença entre a velocidade do vento em 500 hPa e 1000 hPa, em  $\text{m s}^{-1}$ ), em hachurado, divergência de massa em 250 hPa maior que  $0,5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ , em linhas laranjas, e altura geopotencial em 250 hPa (gpm), em linhas pretas, para os dias 08, 09 e 10 de fevereiro. O ponto preto representa a localização da cidade de Muriaé, MG.



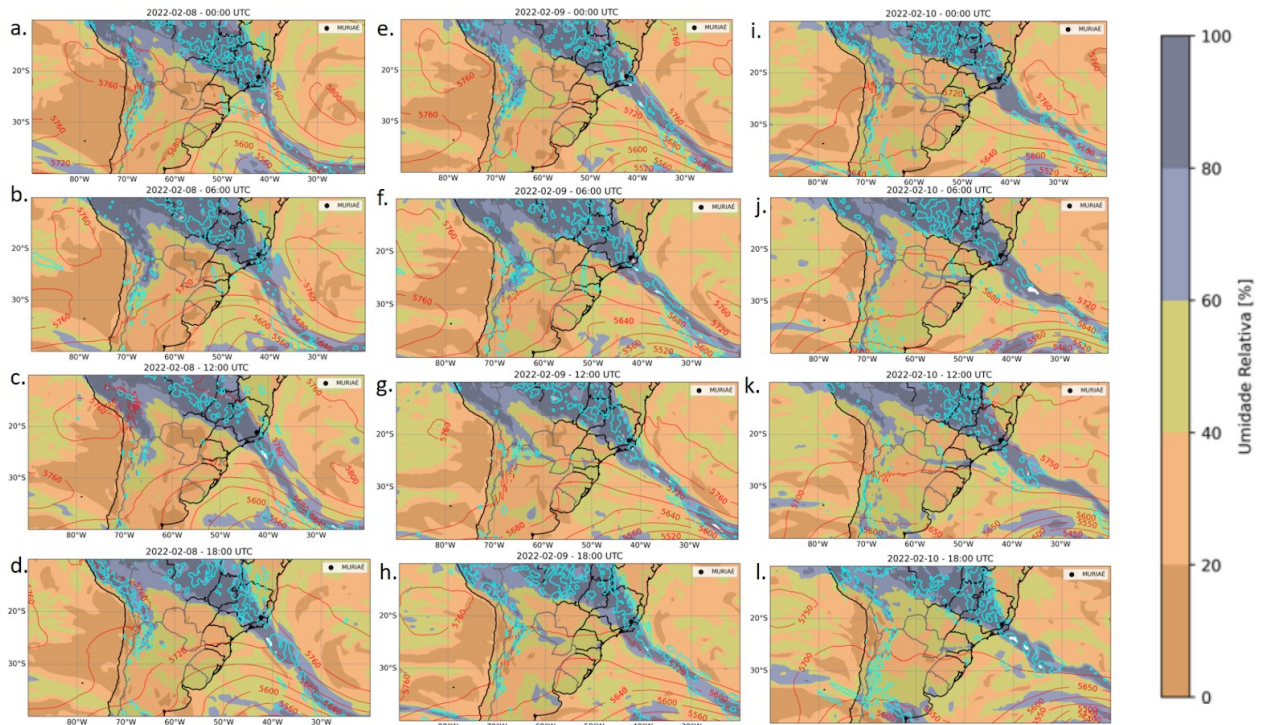


Figura 11. Umidade relativa média entre 850 e 500 hPa (%), altura geopotencial em 500 hPa (gpm), em linhas vermelhas, e velocidade vertical ômega menor que  $-0.2 \text{ Pa s}^{-1}$ , em linhas azuis, para os dias 08, 09 e 10 de fevereiro. O ponto preto representa a localização da cidade de Muriaé, MG.

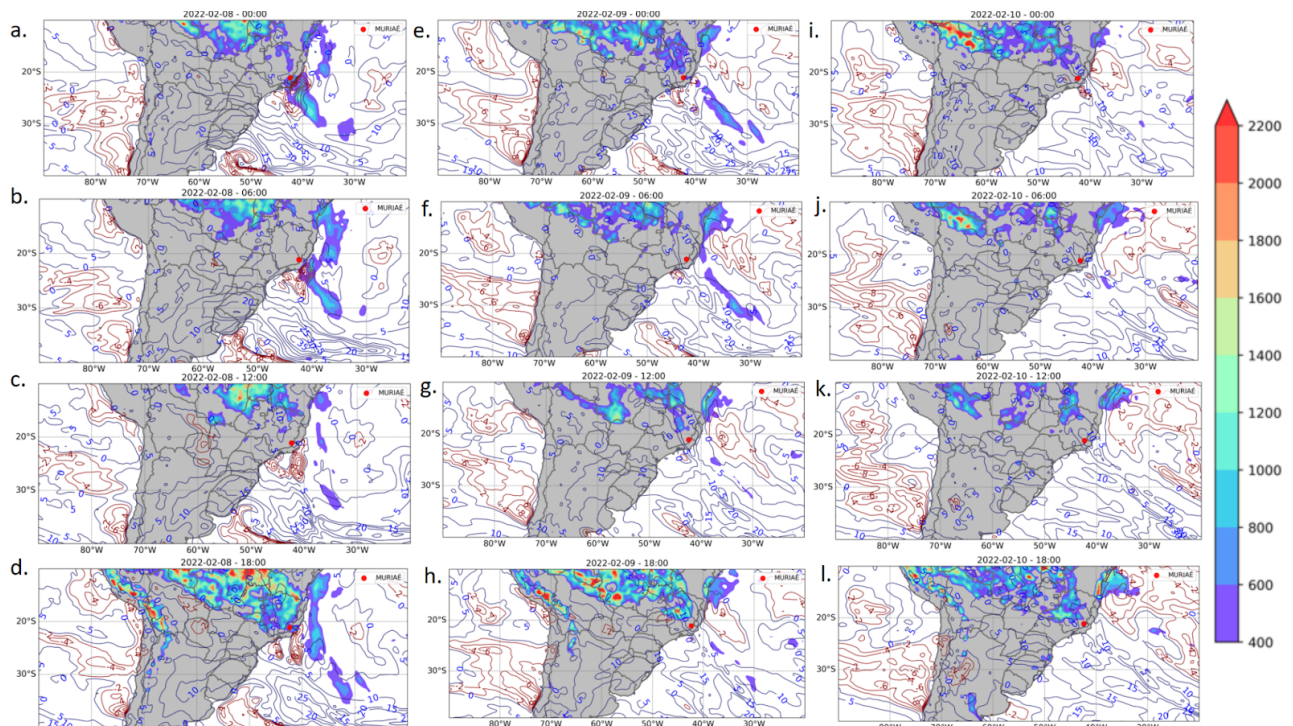


Figura 12. CAPE maior do que  $400 \text{ J kg}^{-1}$  em colorido e cisalhamento vertical do vento horizontal entre 500 e 1000 hPa ( $\text{m s}^{-1}$ ) sendo os valores negativos representados em linhas vermelhas e os positivos em linhas azuis escuras, para os dias 08, 09 e 10 de fevereiro. O ponto vermelho representa a localização da cidade de Muriaé, MG.

### Caso de Petrópolis: 15/02/2022

No dia 14 de fevereiro de 2022 há um ciclone extratropical localizado próximo às latitudes do sul do Brasil e Uruguai, mas sobre o oceano. O ramo frontal da onda ciclônica se

estende até a costa de Santa Catarina às 0000 UTC e chega à costa de São Paulo às 1800 UTC do mesmo dia (Figura 13a-d). O ciclone e a frente são cercados a leste pelo Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul. A convergência entre os ventos da



alta pós-frontal com os do anticiclone subtropical ajuda a fortalecer o sistema frontal (figura não mostrada). Já a frente fria é um mecanismo de levantamento de ar, portanto, facilitador do desenvolvimento de nuvens. Os movimentos ascendentes na atmosfera na região da frente fria são mostrados através da variável ômega na Figura 16a-d.

Desde o dia 14, a região entre o norte de São Paulo, sul de Minas Gerais e Rio de Janeiro é dominada por convergência do fluxo de umidade integrado na coluna, deixando a região úmida, como mostrado na Figura 14a-h, e é facilitadora de movimentos ascendentes, como mostra a variável ômega (Figura 16a-h). No dia 15 de fevereiro, o transporte de umidade para a região de Petrópolis é facilitado pela aproximação da frente fria, que sendo uma região de baixa pressão, induz o escoamento para seu local (Figura 14e-h).

A combinação da aproximação da frente fria na região de estudo (Figura 13e-h) com a

convergência do fluxo de umidade (Figura 16e-h), com o calor típico da estação e suporte de um cavado em níveis médios da atmosfera (Figura 15e-h) aparece como o fator que propiciou o desenvolvimento de nuvens e precipitação em Petrópolis. Ademais, as características descritas indicam episódio de ZCAS e isso concorda com as notícias divulgadas, por exemplo, pelo CEMADEN (2022).

Conforme mostrado na Figura 2c, a chuva se concentrou entre 1800 e 2100 UTC no dia 15 de fevereiro. Ao longo de todo o dia, a atmosfera foi muito instável, como mostrado pelos valores de CAPE na Figura 17e-i. Às 0600 UTC desse dia, o CAPE tinha valores entre 1400 e 1600 J kg<sup>-1</sup>. Para o mesmo horário, o cisalhamento vertical do vento era de 5 a 10 m s<sup>-1</sup>, indicando tempestade comum com traços severos segundo a Tabela 01.

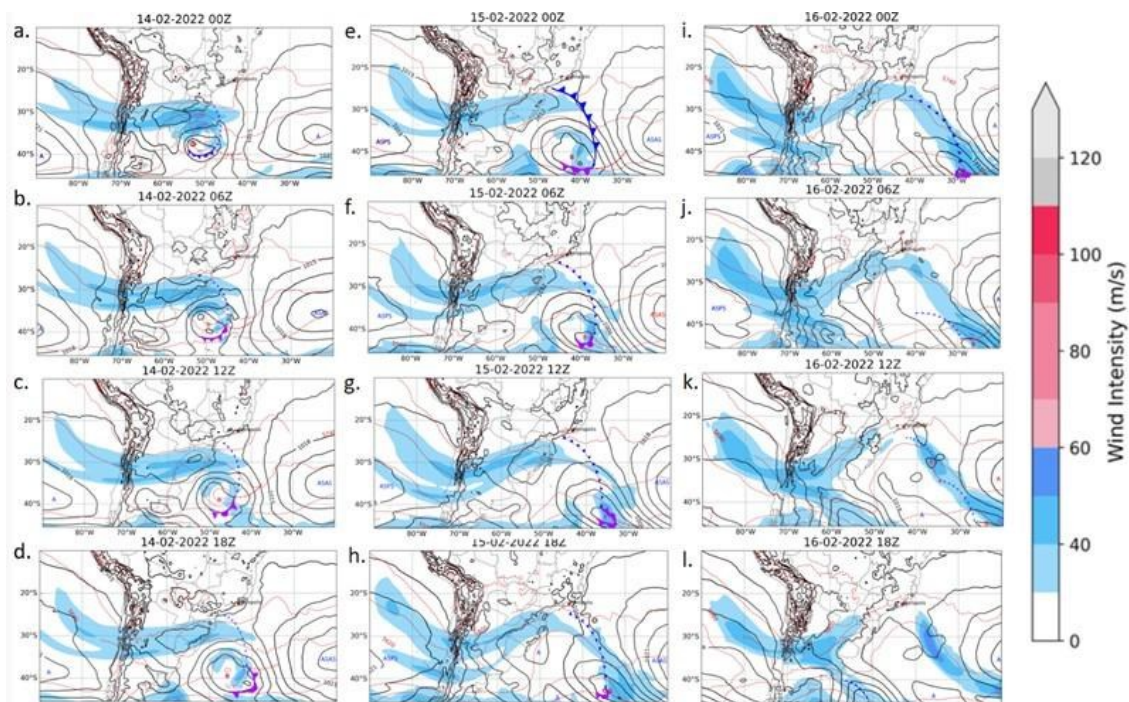


Figura 13. Jatos (intensidade do vento acima de 30 m s<sup>-1</sup>) em 250 hPa, em hachurado, pressão a nível médio do mar (hPa), em linhas contínuas pretas e espessura da camada (diferença entre a altura geopotencial em 500 e 1000 hPa, em gpm), representada pelas linhas pontilhadas em vermelho, para os quatro horários sinóticos padrão (0000, 0600, 1200 e 1800 UTC) nos dias 14, 15 e 16 de fevereiro. O ponto vermelho representa a localização da cidade de Petrópolis, RJ. Nas figuras a letra B indica o centro de baixa pressão, A indica a alta pressão, a linha azul com triângulos mostra a localização da frente fria e a linha vermelha com semicírculos, a frente quente.



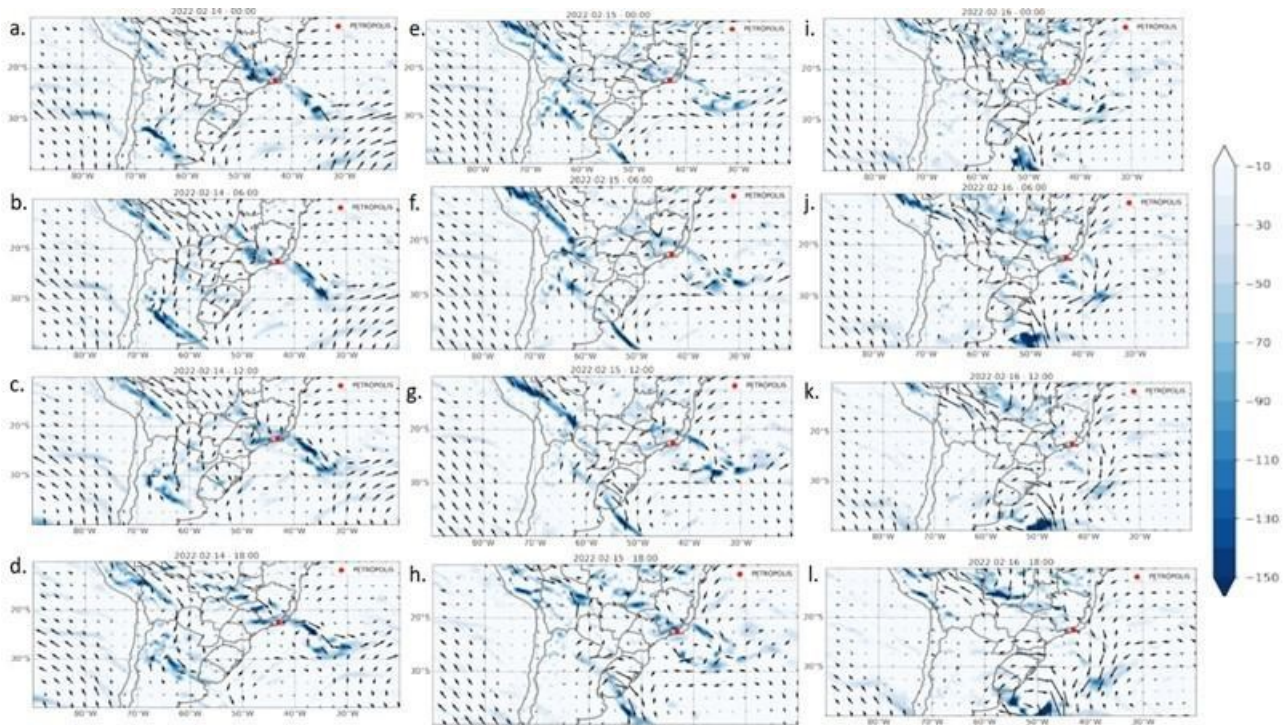


Figura 14. Divergência do fluxo de umidade integrado na vertical ( $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ ), em hachurado, e vetores do fluxo de umidade integrado na vertical ( $\text{m s}^{-1}$ ) para os dias 14, 15 e 16 de fevereiro. O ponto vermelho representa a localização da cidade de Petrópolis, RJ.

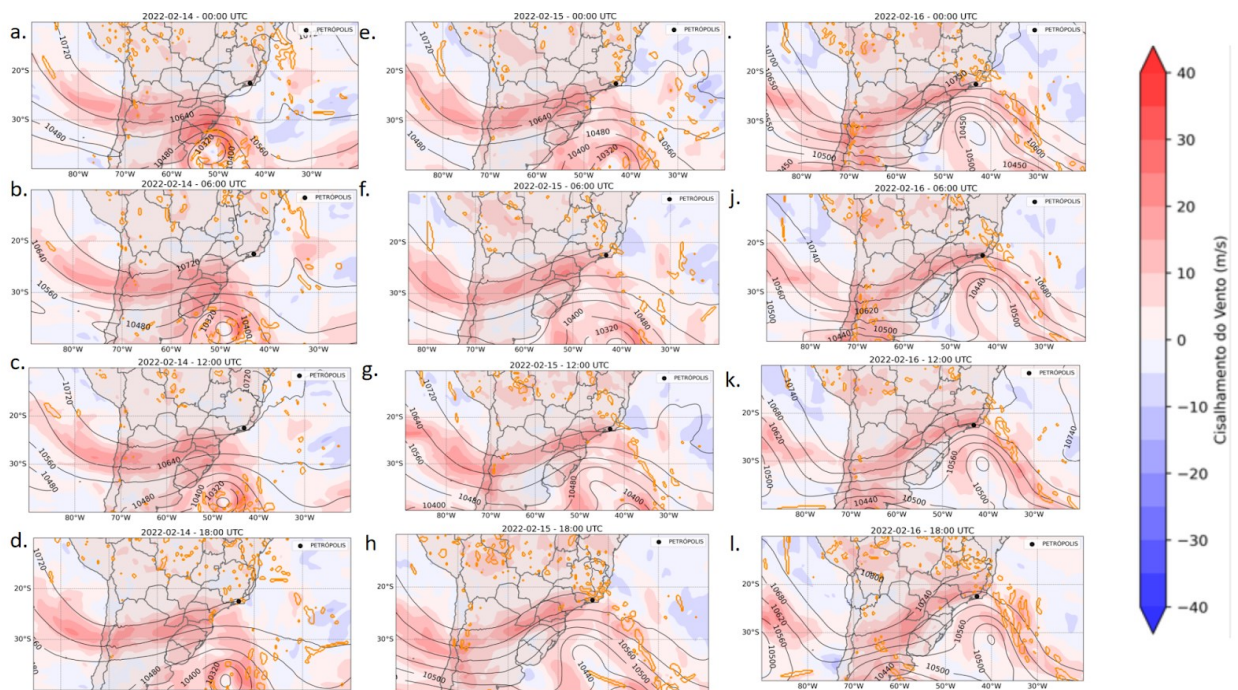


Figura 15. Cisalhamento vertical do vento horizontal (diferença entre a velocidade do vento em 500 hPa e 1000 hPa, em  $\text{m s}^{-1}$ ), em hachurado, divergência de massa em 250 hPa maior que  $0,5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ , em linhas laranjas, e altura geopotencial em 250 hPa (gpm), em linhas pretas, para os dias 14, 15 e 16 de fevereiro. O ponto preto representa a localização da cidade de Petrópolis, RJ.



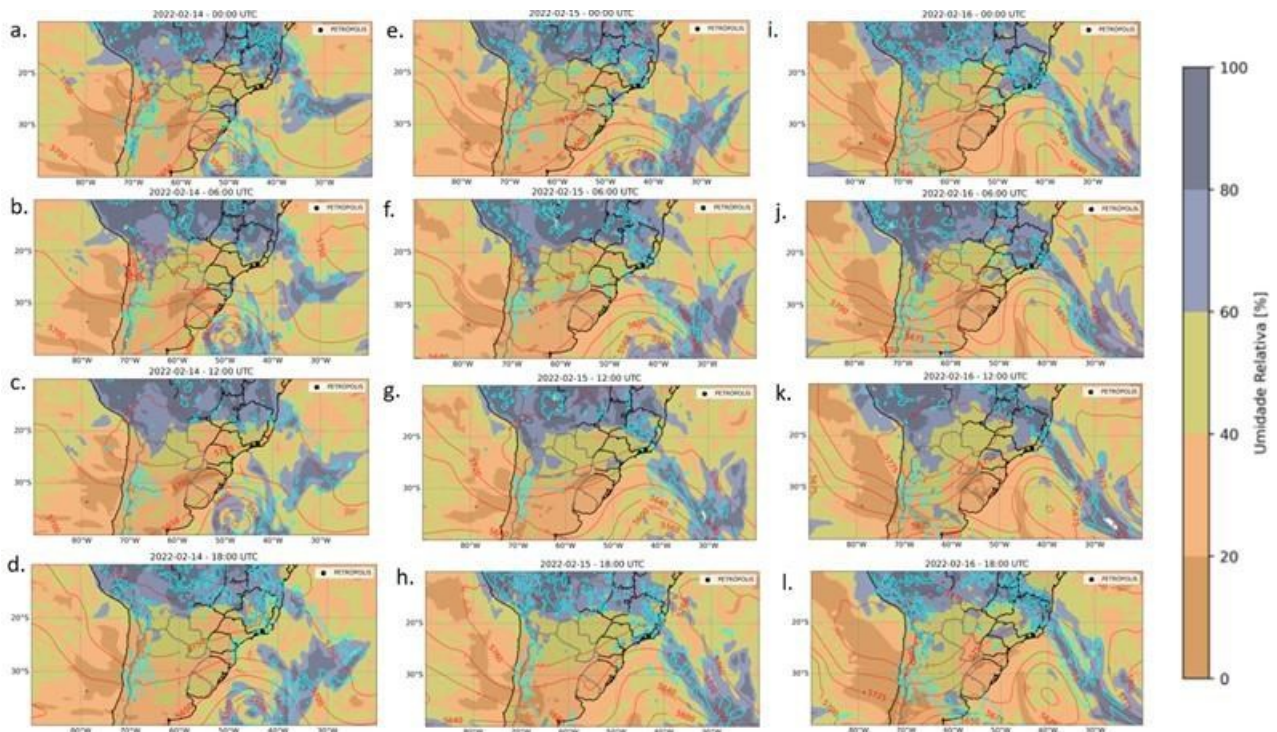


Figura 16. Umidade relativa média entre 850 e 500 hPa (%), altura geopotencial em 500 hPa (gpm), em linhas vermelhas, e velocidade vertical ômega menor que  $-0.2 \text{ Pa s}^{-1}$ , em linhas azuis, para os dias 14, 15 e 16 de fevereiro. O ponto preto representa a localização da cidade de Petrópolis, RJ.

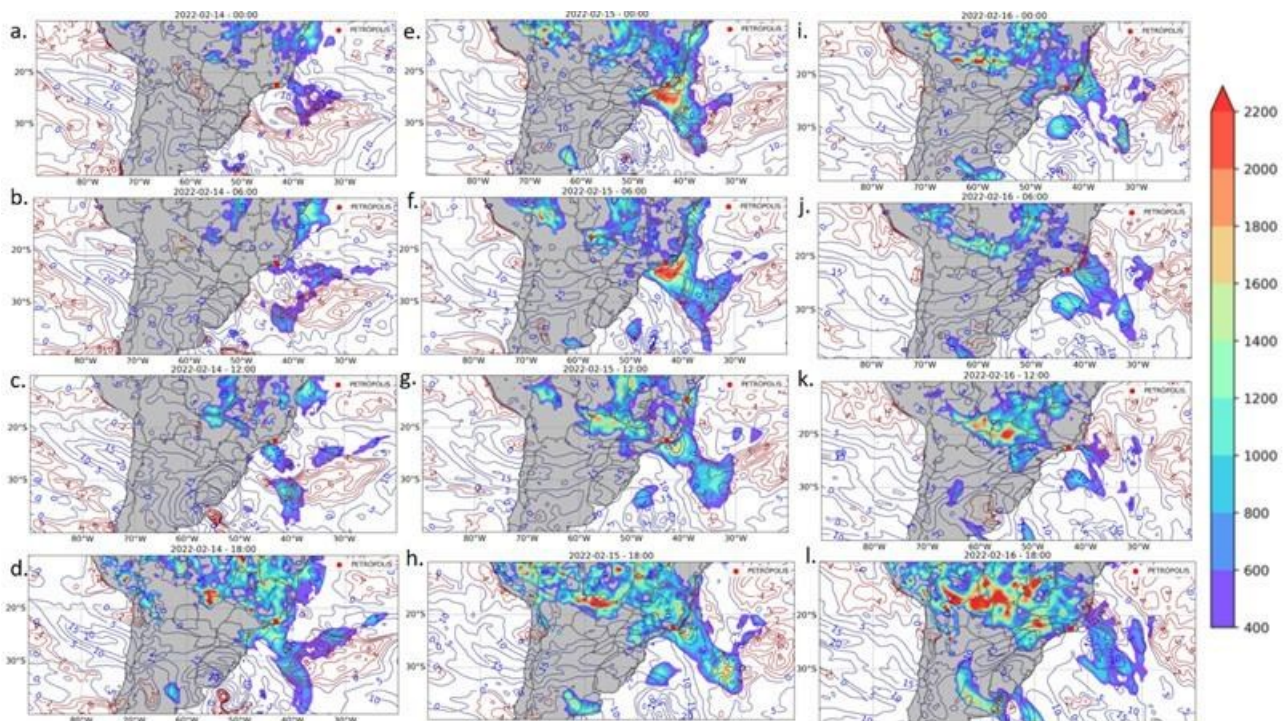


Figura 17. CAPE maior do que  $400 \text{ J kg}^{-1}$  em colorido e cisalhamento vertical do vento horizontal entre 500 e 1000 hPa ( $\text{m s}^{-1}$ ) sendo os valores negativos representados em linhas vermelhas e os positivos em linhas azuis escuras, para os dias 14, 15 e 16 de fevereiro. O ponto vermelho representa a localização da cidade de Petrópolis, RJ.

Ainda segundo o CEMADEN, numa análise mais regionalizada (chamada de mesoescala), tem-se que a frente fria não era forte o suficiente para o ar frio enfraquecer a instabilidade atmosférica e nem tão fraca a modo de não mudar a direção dos ventos sobre a região

de estudo. Assim, a frente fria contribuiu para ventos de quadrante sul na região de Petrópolis que interagiram com a topografia. Como os ventos de quadrante sul ficaram perpendiculares à região montanhosa favoreceram a combinação de nuvens orográficas e convectivas que tiveram



características estacionárias sobre a região montanhosa e que perduraram por um período de cerca de três horas, que é bem superior ao do ciclo de vida de nuvens convectivas (~40 min).

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 sobre a região de estudo, a umidade relativa decresce para 60% a partir das 0600 UTC (Figura 16). Além disso, verifica-se uma diminuição nos movimentos ascendentes (Figura 16j-l), por já não possuir mecanismos que os favoreçam (ausência de divergência de massa em níveis médios e altos – Figura 15j-l - e CAPE – Figura 17j-l).

Em suma, a chuva que assolou Petrópolis teve contribuição da escala sinótica e de mesoescala. Portanto, se não tivesse ocorrido o acoplamento dessas escalas e o posicionamento que as nuvens tiveram sobre a região, talvez o evento tivesse sido menos severo.

No dia 19 de março de 2022, há uma frente fria localizada na região sul do Brasil, acoplada com um sistema de baixa pressão sobre o oceano, cuja isóbara central é de 1006 hPa (Figura 18a-d). A frente fria contribui para que a umidade relativa sobre o continente se concentre entre a Amazônia e a região continental próxima à frente (Figura 21a-d). Por outro lado, na região de Petrópolis a umidade relativa é baixa (< 40%), mas é interessante notar que há convergência do fluxo de umidade sobre a região (Figura 19a-d).

O dia 20 de março é marcado pela chegada da frente fria em Petrópolis por volta das 1800 UTC (Figura 18h). Com a aproximação da frente fria, há registro de chuva entre 1700 e 2300 UTC (Figura 2d), isto é, a precipitação inicia ainda no período pré-frontal. Como o ambiente sinótico do evento de março se assemelha ao de fevereiro, exceto por não ter a ZCAS configurada (o que também foi constatado nas cartas sinóticas do CPTEC), sugere-se que o processo de mesoescala também seja similar ao ocorrido no evento extremo do mês anterior. Ressalta-se aqui que uma análise de mesoescala não foi realizada, por não ser o foco do estudo.

### Caso de Petrópolis: 20/03/2022

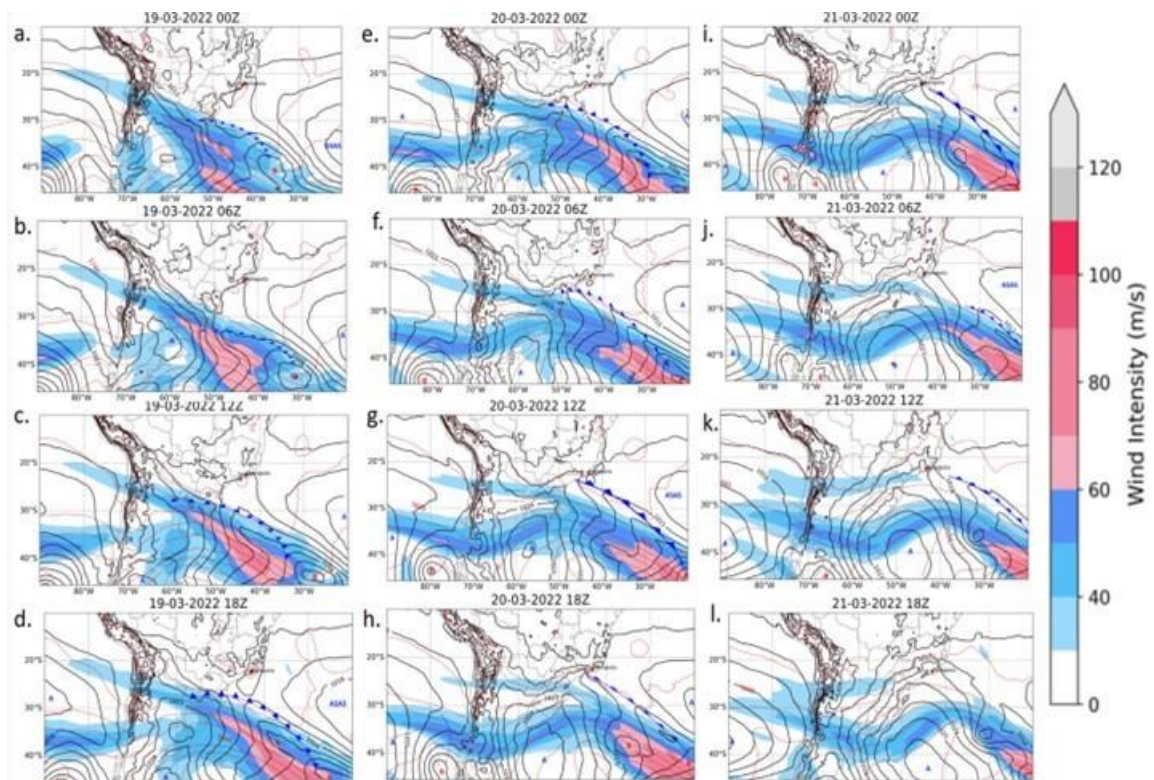


Figura 18. Jatos (intensidade do vento acima de  $30 \text{ m s}^{-1}$ ) em 250 hPa, em hachurado, pressão a nível médio do mar (hPa), em linhas contínuas pretas e espessura da camada (diferença entre a altura geopotencial em 500 e 1000 hPa, em gpm), representada pelas linhas pontilhadas em vermelho, para os quatro horários sinóticos padrão (0000, 0600, 1200 e 1800 UTC) nos dias 19, 20 e 21 de março. O ponto vermelho representa a localização da cidade de Petrópolis, RJ. Nas figuras a letra B indica o centro de baixa pressão, A indica a alta pressão, a linha azul com triângulos mostra a localização da frente fria e a linha vermelha com semicírculos, a frente quente.



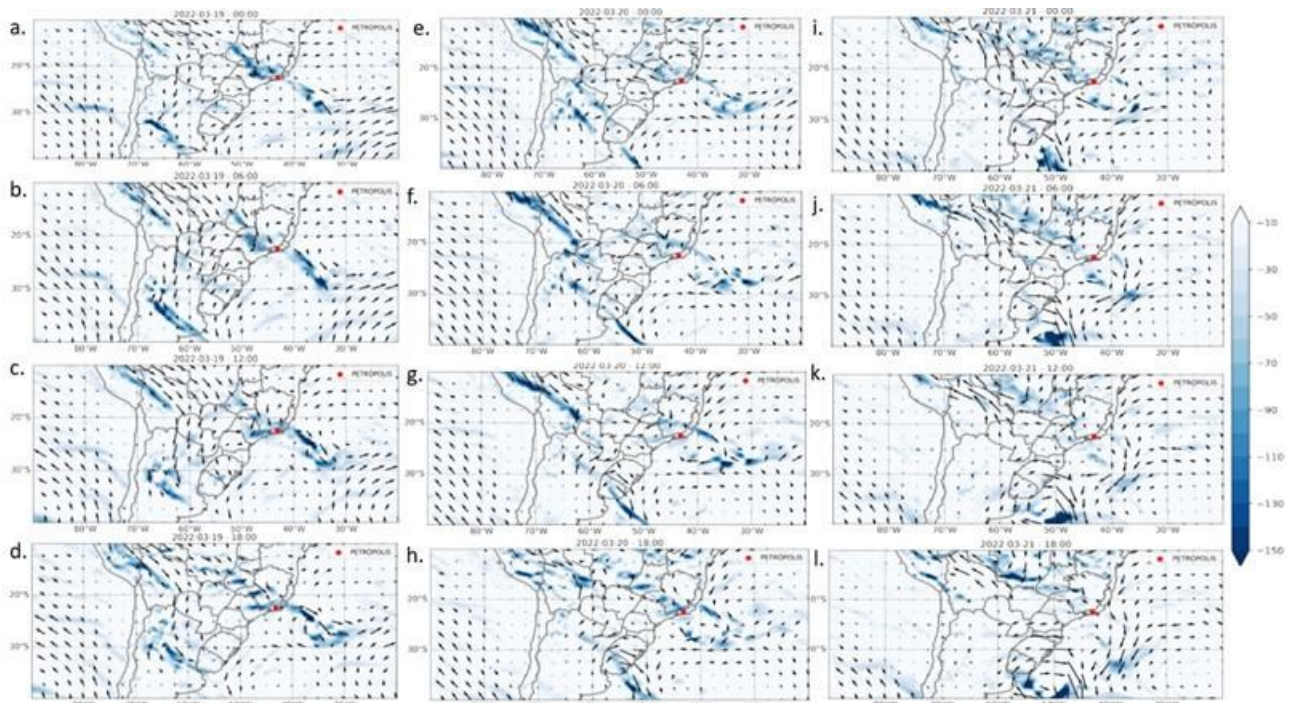


Figura 19. Divergência do fluxo de umidade integrado na vertical ( $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$ ), em hachurado, e vetores do fluxo de umidade integrado na vertical ( $\text{m s}^{-1}$ ) para os dias 19, 20 e 21 de março. O ponto vermelho representa a localização da cidade de Petrópolis, RJ.

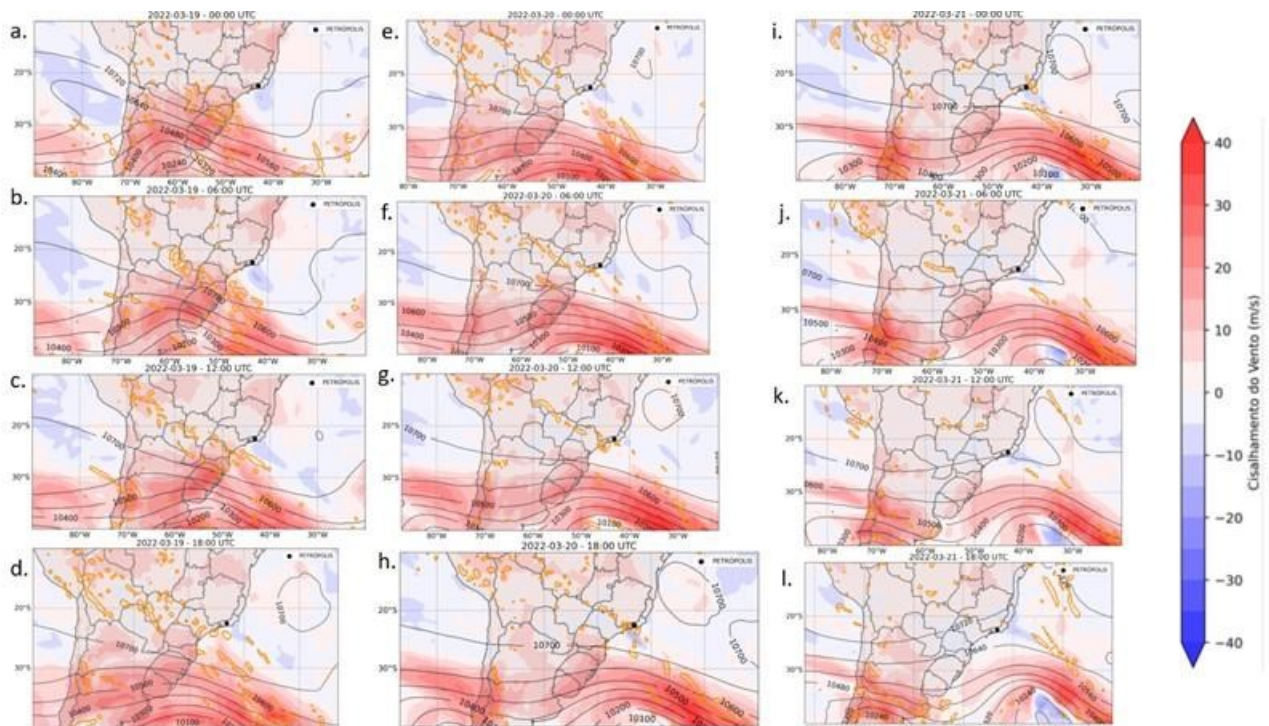


Figura 20. Cisalhamento vertical do vento horizontal (diferença entre a velocidade do vento em 500 hPa e 1000 hPa, em  $\text{m s}^{-1}$ ), em hachurado, divergência de massa em 250 hPa maior que  $0,5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ , em linhas laranjas, e altura geopotencial em 250 hPa (gpm), em linhas pretas, para os dias 19, 20 e 21 de março. O ponto preto representa a localização da cidade de Petrópolis, RJ.



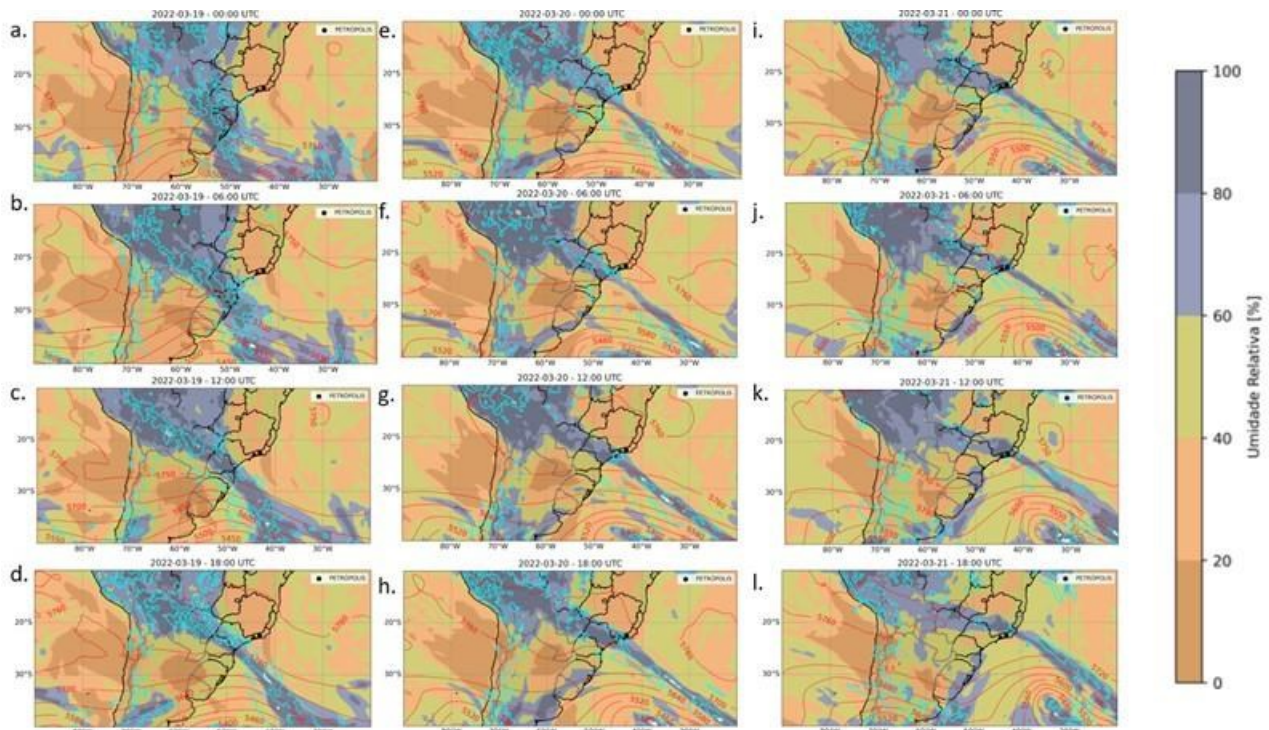


Figura 21. Umidade relativa média entre 850 e 500 hPa (%), altura geopotencial em 500 hPa (gpm), em linhas vermelhas, e velocidade vertical ômega menor que  $-0.2 \text{ Pa s}^{-1}$ , em linhas azuis, para os dias 19, 20 e 21 de março. O ponto preto representa a localização da cidade de Petrópolis, RJ.

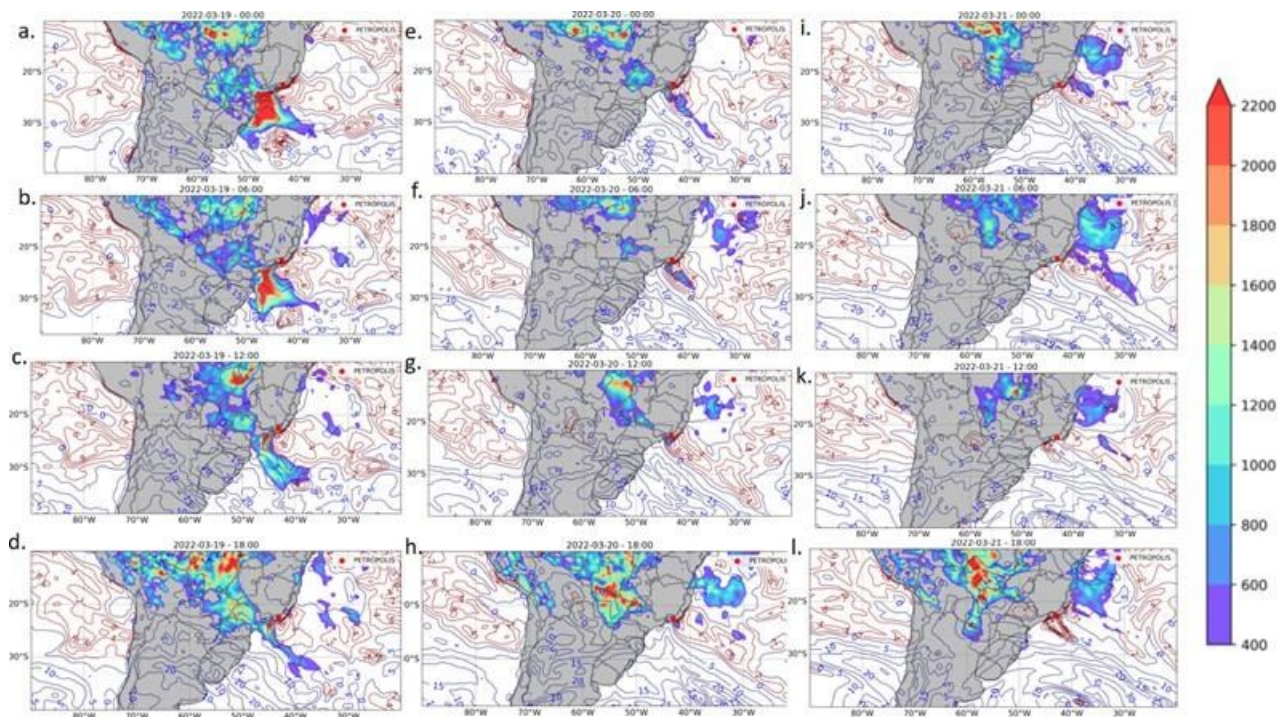


Figura 22. CAPE maior do que  $400 \text{ (J kg}^{-1}\text{)}$  em colorido e cisalhamento vertical do vento horizontal entre 500 e 1000 hPa ( $\text{m s}^{-1}$ ) sendo os valores negativos representados em linhas vermelhas e os positivos em linhas azuis escuras, para os dias 19, 20 e 21 de março. O ponto vermelho representa a localização da cidade de Petrópolis, RJ.

A Figura 20e-h mostra que a divergência de massa em 250 hPa predominou ao longo do dia 20 e, em grande parte, associada à perturbação dos movimentos ascendentes na atmosfera (Figura 21e-h) decorrentes da instabilidade convectiva. Uma forma de quantificar a instabilidade é pela

variável CAPE e essa, entre 0600 UTC e 1800 UTC, apresentou valores de 400 a  $1000 \text{ J kg}^{-1}$  (Figura 22f-h). Já o cisalhamento vertical do vento horizontal foi de  $5 \text{ m s}^{-1}$  e essas duas variáveis indicam ocorrência de tempestades comuns (Tabela 1).

No dia 21, a alta pós-frontal predomina no sul e no sudeste brasileiro e há diminuição dos movimentos ascendentes sobre a região de Petrópolis. Com o cisalhamento do vento baixo de  $10 \text{ m s}^{-1}$  e com o índice CAPE abaixo de  $400 \text{ J kg}^{-1}$  (Figura 22i-l), há domínio de estabilidade sobre a região.

## Conclusões

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 convergência de umidade sobre as áreas em estudo. Apenas o caso do evento extremo em março de 2022 em Petrópolis que não teve presença de ZCAS.

Vale ressaltar que a precipitação é um evento natural, mas a vulnerabilidade das regiões é o fator que leva aos problemas socioeconômicos. A vulnerabilidade é consequência, muitas vezes, da falta de infraestrutura urbana, como precarização de moradias, construção de casas em solos desgastados e fragilidade em um planejamento hídrico e urbano. Portanto, a ausência de medidas protetivas aos eventos extremos por parte dos governos é o principal responsável pelas consequências negativas à sociedade.

**Agradecimentos:** os autores agradecem aos centros que disponibilizaram os dados usados no estudo e à CAPES, CNPq e FAPEMIG pelo suporte financeiro.

## Referências

Alves, A. P. et al., 2006. A percepção do caos urbano, as enchentes e as suas repercussões nas políticas públicas da Região Metropolitana de São Paulo. *Saúde e Sociedade*, São Paulo 15, 3, 145-161. DOI 10.1590/S0104-12902006000300012. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/sausoc/a/kvt9y8RZycK7V4GtVYMbNnQ/?lang=pt>>. Acesso em: 23 mar. 2023.

Carvalho, L. M. V.; Jones, C.; Liebmann, B., 2004. The South Atlantic Convergence Zone: persistence, intensity, form, extreme precipitation and relationships with intraseasonal activity. *J. Climate* 17, 88-108.

CEMADEN, 2022. Reunião de Impactos: Março/2022. São José dos Campos. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=0jOCkx1>

CZeA&ab\_channel=REUNIÃO DE IMPACTO SCENADEN>. Acesso em: 7 mar. 2023.

Climatempo, 2022. ZCAS e chuva volumosa. Pela quarta vez em 2022, BR terá influência da ZCAS. São Paulo. 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, 2022. Centro de Previsão de Tempo e Estudo Climático. In: INPE. Centro de Previsão de Tempo e Estudo Climático: Boletim Técnicos. Cachoeira Paulista. Disponível em: <<https://tempo.cptec.inpe.br/boletimtecnico/pt>>. Acesso em: 18 ago. 2021.

Escobar, G. C. J., Reboita, M. S., 2022. Relationship between daily atmospheric circulation patterns and South Atlantic Convergence Zone (SACZ) events. *Atmósfera* 35, 1, 1-25.

Ferreira, G. W., Reboita, M. S., 2022. A new look into the South America precipitation regimes: Observation and Forecast. *Atmosphere* 13, 6, 873.

G1, 2022a. A poucos dias de completar 3 anos da tragédia da Vale, moradores de Brumadinho sofrem com a chuva. G1, Brumadinho. 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.

G1, 2022b. Muriaé decreta situação de emergência por causa das chuvas; moradores ilhados recebem alimentos em barcos dos bombeiros. G1, Muriaé. 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, 2022c. Chuva de domingo em Petrópolis teve o maior volume da história num período de 24h. G1, Petrópolis. 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.



- Hersbach, H.; Bell, B.; Berrisford, P.; Hirahara, S.; Horanyi, A.; Muñoz-Sabater, J.; Nicolas, J.; Peubey, C.; Radu, R.; Schepers, D., 2020. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 146, 1999–2049.
- Joe, P. et al, 2012. Automated Processing of Doppler Radar Data for Severe Weather Warnings. *Doppler Radar Observations: Weather Radar, Wind Profiler, Ionospheric Radar, and Other Advanced Applications*, 33-74.
- Nieto-Ferreira, R., Rickenbach, T. M., Wright, E. A., 2011. The role of cold fronts in the onset of the monsoon season in the South Atlantic convergence zone. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 137, 657, 908-922.
- Pezzi, L. P. et al., 2023. Oceanic SACZ produces an abnormally wet 2021/2022 rainy season in South America. *Scientific Reports*, [s. l.], 1455, 13, 26. DOI 10.1038/s41598-023-28803-w. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/s41598-023-28803-w>> Acesso em: 21 mar. 2023.
- Puente, B., 2022. Tragédia em Petrópolis completa um mês e mais de 600 seguem desabrigados. CNN, Rio de Janeiro. Disponível em: <<https://www.cnnbrasil.com.br/nacional/petropolis-tragedia-completa-um-mes-e-mais-de-600-seguem-desabrigados/>>. Acesso em: 29 mar. 2022.
- Reis, A. L., Silva, M. S., Regis, M. V., Silveira, W. W., Souza, A. C., Reboita, M. S., Silveira, V.. 2018. Climatologia e eventos extremos de precipitação no estado de Minas Gerais (Climatology and extreme rainfall events in the state of Minas Gerais). *Revista Brasileira de Geografia Física* 11, 2, 652-660.
- Reboita, M. S. et al., 2017. Caracterização Atmosférica quando da Ocorrência de Eventos Extremos de Chuva na Região Sul de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Climatologia*, Itajubá, 13, 21, 20-37.
- Rossatto, S. D. L., 2021. Os impactos socioambientais das enchentes e inundações e sua relação com o processo de ocupação urbana irregular às margens do córrego Urutago no município de Francisco Beltrão-PR. Disponível em: <<https://repositorio.uninter.com/bitstream/handle/1/664/Da%20Luz%20Rossatto%2C%20Sandra.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 2 out. 2022.
- Silva, J. P. R., Reboita, M. S., Escobar, G. C. J., 2019. Caracterização da Zona de Convergência do Atlântico Sul em campos atmosféricos recentes. *Revista Brasileira de Climatologia* 25.
- Stull, R., 2020. *Instability, Cape and Updrafts*. Canadá. Transparência.
- Stull, R., 2020. *Wind Shear in the Environment*. Canadá. Transparência.