



Análise da previsibilidade de eventos extremos de precipitação no Sul de Minas Gerais a partir do uso de índices de instabilidade

Geovane Carlos Miguel^{1,7}, Hernan Willian Silva Chadud^{2,7}, Alysson Fernando Ribeiro^{3,7}, Iara Stéfani Carneiro da Silva^{3,7}, Dayane Nascimento Figueredo^{3,7}, Vanessa Silveira Barreto Carvalho^{4,7}, Enrique Vieira Mattos^{5,7}, Michelle Simões Reboita^{6,7}

¹ Graduando em Ciências Atmosféricas. geovanecarlos.miguel@gmail.com, ORCID: 0009-0005-1008-8952. ² Graduando em Ciências Atmosféricas. hernanwschadud@gmail.com, ORCID: 0009-0006-5987-0344. ³ Graduando em Ciências Atmosféricas. alyssonfrb@gmail.com, ORCID: 0000-0003-1948-2006. ⁴ Docente da Universidade Federal de Itajubá, Instituto de Recursos Naturais. vanessa.silveira@unifei.edu.br, ORCID: 0000-0001-7177-6381. ⁵ Docente da Universidade Federal de Itajubá, Instituto de Recursos Naturais. enrique@unifei.edu.br, ORCID: 0000-0002-9590-3709. ⁶ Docente da Universidade Federal de Itajubá, Instituto de Recursos Naturais. mireboita@unifei.edu.br, ORCID: 0000-0002-1734-2395. ⁷ Universidade Federal de Itajubá, Instituto de Recursos Naturais, Universidade Federal de Itajubá, Av. BPS 1303, bairro Pinheirinho, CEP 37500-903, Itajubá, Minas Gerais

Artigo recebido em 14/05/2024 e aceito em 21/06/2024

RESUMO

Na região Sul do Estado de Minas Gerais (SMG), eventos extremos de precipitação são comumente responsáveis por inúmeros impactos socioambientais. Nesse contexto, melhorar a previsibilidade desses eventos é de extrema utilidade para a preparação e resposta de órgãos governamentais como a defesa civil. Uma vez que a precipitação é uma variável parametrizada dentro dos modelos de previsão numérica do tempo, sua previsibilidade tem muitas incertezas, não sendo adequada a elaboração de previsões baseadas apenas nessa variável. Por isso, outros proxies podem ser utilizados para ocorrência de chuvas e tempestades. Dentre estes, pode-se destacar o uso de índices de instabilidade, que são calculados a partir de variáveis básicas como a temperatura e umidade de camadas atmosféricas. Assim, o objetivo deste estudo é avaliar a performance de quatro índices de instabilidade (CAPE, K, TT e SWEAT) para a previsão de quatro eventos extremos de precipitação registrados entre o período 2021 a 2022 no SMG. Os valores dos índices de instabilidade foram extraídos e/ou calculados a partir das previsões dos modelos Global Forecast System (GFS), para todos os casos selecionados, e do Weather Research and Forecasting Model (WRF), para um caso específico. Os índices K e TT tiveram um bom desempenho na previsão da ocorrência de tempestades, dessa forma, sendo úteis nas previsões no SMG. Embora, em algumas situações, os valores dos índices CAPE e SWEAT indicaram a possibilidade de eventos extremos, ainda há necessidade de adaptação dos limiares utilizados com esses índices na classificação da severidade de eventos extremos na região.

Palavras chaves: tempo severo, índices de instabilidade, previsão numérica do tempo, GFS, WRF.

Analysis of the predictability of extreme precipitation events in the south of Minas Gerais using instability indices

ABSTRACT

In the south region of the State of Minas Gerais (SMG), extreme precipitation events are commonly responsible for numerous socio-environmental impacts. In this context, improving the predictability of these events is extremely useful for the preparation and response of government agencies such as civil defense. Since precipitation is a parameterized variable within numerical weather prediction models, its predictability has many uncertainties, making it inadequate for forecasting based solely on this variable. Therefore, other proxies can be used for the occurrence of rain and storms, and one of them is the use of instability indices, which are calculated from basic variables such as temperature and humidity in atmospheric layers. Thus, the objective of this study is to evaluate the performance of four instability indices (CAPE, K, TT, and SWEAT) for the prediction of four extreme precipitation events recorded between 2021 and 2022 in SMG. The instability index values were extracted and/or calculated from the forecasts of the Global Forecast System (GFS) models for all selected cases and the Weather Research and Forecasting Model (WRF) for a specific case. The K and TT

indices performed well in predicting the occurrence of storms, thus proving useful in SMG forecasts. Although, in some situations, the values of CAPE and SWEAT indices indicated the possibility of extreme events, there is still a need for adaptation of the thresholds used with these indices in classifying the severity of extreme events in the region.

Keywords: severe weather, instability índices, numerical weather prediction, GFS, WRF.

Introdução

No Brasil, a ocorrência de desastres naturais está relacionada a eventos extremos e/ou eventos severos de precipitação. De acordo com Ynoue et al. (2023), eventos extremos de tempo podem ser definidos como a variação inesperada dos estados atmosféricos, desencadeada por condições meteorológicas de macro, meso e microescala como os sistemas de alta ou baixa pressão, frentes quentes ou frias, sistemas convectivos de mesoescala e padrões termodinâmicos que ocorrem em curtos períodos de duração, de horas a dias e até algumas semanas. Para Marchezini et al. (2023), evento severo de tempo é a nomenclatura utilizada para nomear eventos meteorológicos que envolvem a produção de relâmpagos, precipitação intensa, granizo e ventos fortes em superfície que causam danos à sociedade. Atualmente, eventos extremos e/ou severos têm sido frequentemente observados, especialmente na região sudeste do país, onde tais eventos são provocados, principalmente, pela atuação de sistemas frontais, sistemas convectivos de mesoescala isolados e pela Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) (Bartolomei et al., 2023; Freitas et al., 2022; Lima et al., 2010). O Atlas Brasileiro de Desastres Naturais (UFSC, 2013) estima que cerca de 127 milhões de pessoas foram afetadas por desastres naturais no período entre 1991 e 2012, sendo que cerca de 45% destas foram atingidas por enxurradas, inundações, vendavais, granizo, deslizamentos de terra, tornados e alagamentos.

Na região sudeste do Brasil, onde reside 41,8% da população do país (IBGE, 2023), extremos de precipitação, especialmente nos últimos anos, foram responsáveis por alagamentos e deslizamentos de terra que levaram a grandes perdas materiais, econômicas e diversas mortes (Freitas et al., 2022; Vasconcelos e Cavalcanti, 2010). Na região Sul do Estado de Minas Gerais (SMG), por exemplo, o verão de 2021/2022, em especial, causou diversos impactos e prejuízos em decorrência de chuvas fortes (Bartolomei et al., 2023). No dia 08 de novembro de 2021, por

exemplo, 30 mm de precipitação em 40 minutos e ventos fortes causaram alagamentos, destruíram casas e derrubaram árvores no município de Santa Rita do Sapucaí (G1, 2021). Em 17 de dezembro de 2021, 52 mm de precipitação registrados em Itajubá, de acordo com o Boletim Meteorológico Mensal do Centro de Estudos de Previsão de Tempo e Clima de Minas Gerais (CEPreMG) da Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI; CEPreMG, 2023), foram responsáveis por alagamentos em trechos da rodovia BR-459 (EM, 2021). No dia 31 de março de 2022, a precipitação intensa (77 mm em 40 min) causou alagamentos e fez o asfalto ceder em Monte Sião – MG (G1, 2021). Em 27 de fevereiro de 2023, entre às 16 horas e 17 horas foram registrados 59 mm de precipitação pelo pluviômetro do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN), em operação no bairro da Estiva, em Itajubá (CEPreMG, 2023). A tempestade, com duração de aproximadamente 30 minutos, foi responsável pelo transbordamento do Ribeirão José Pereira, pela interdição da avenida Benedito Pereira Santos, e por queda de árvores e postes de energia, além de inundações em ruas, na Universidade Federal de Itajubá, na Faculdade de Medicina e no plenário municipal, desalojando 9 pessoas em Itajubá e 19 no município de Pedralva (Conexão Itajubá, 2023; G1, 2023).

Vale ressaltar que a climatologia da região sudeste é caracterizada pela ocorrência do sistema de monção, isto é, apresenta estação seca e úmida bem definidas (Reboita et al., 2018; 2023), com a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) sendo um importante sistema precipitante durante o verão e os sistemas frontais durante o inverno (Reboita et al., 2012; Alvarenga, 2012). A distribuição espacial e temporal da precipitação, além dos fatores geográficos como, por exemplo, a topografia, a latitude e o uso da terra podem ser responsáveis por desastres naturais (Alvarenga, 2012). Nesse contexto, esforços vêm sendo feitos por centros operacionais e de pesquisa para melhorar a previsibilidade dos eventos extremos de

chuva uma vez que, quanto melhor a previsão do tempo (atmosférico), maior o tempo (cronológico) para prevenção, preparação e resposta dos órgãos responsáveis, conforme estabelecido pelo Alinhamento Estratégico 2021 - 2030 do Instituto Nacional de Meteorologia, no item 3.2.b. “Aprimorar os Modelos de Previsão Numérica de Tempo, [...] possibilitando a melhoria das Previsões de Tempo nas várias escalas temporais” (INMET, 2021; Freitas et al., 2022). No SMG, o Centro de Estudos e Previsão de Tempo e Clima de Minas Gerais (CEPreMG) da UNIFEI busca aprimorar a previsão numérica do tempo realizada com o modelo Weather Research and Forecasting (WRF) como relatado por Araujo et al. (2023) Campos et al. (2016).

É importante destacar também estudos que indicam o aumento na intensidade e frequência de eventos extremos de precipitação para o futuro no país (Groisman et al., 2005; Reboita et al., 2018, 2022; Pedron et al., 2017), o que justifica a realização de testes de sensibilidade como os realizados por Araujo et al. (2023), Campos et al. (2023) e Garcia et al. (2023) e também, a avaliação do uso de indicadores, como os índices de instabilidade, para melhorar a qualidade das previsões do tempo realizadas. Os índices de instabilidade fornecem valores que podem indicar ou não a ocorrência de eventos extremos, que, muitas vezes, podem ser severos (Ferreira e Reboita, 2020). Vale ressaltar que as tempestades severas estão associadas com a ocorrência de queda de granizo, raios e rajadas de vento (Nascimento, 2005), o que pode levar a danos socioambientais. Os índices de instabilidade são, em sua maioria, desenvolvidos com base no perfil vertical de

temperatura, umidade e, em alguns casos, vento (Ferreira et al., 2016). Destaca-se que, na literatura, diversos estudos propõem o uso de índices de instabilidade como proxies para previsão de eventos de precipitação (Arora et al., 2023; Alvarenga, 2012; Hallak; Filho, 2012; Silva et al., 2018).

Nesse contexto, o presente estudo tem como objetivo avaliar a performance dos índices de instabilidade previstos pelos modelos numéricos Global Forecast System (GFS) e WRF para a previsão de eventos extremos de precipitação ocorridos no SMG. Vale ressaltar que neste estudo não será avaliada a habilidade do modelo em prever as variáveis utilizadas para o cálculo dos indicadores uma vez que diversos estudos para a região já foram realizados nesse sentido e revelam a habilidade dos modelos GFS (Filho et al., 2022) e WRF (Araujo et al., 2023; Campos et al., 2016; Garcia et al., 2023).

Metodologia

Área e Períodos de Estudo

Para a avaliação da performance dos índices de instabilidade, foram selecionados quatro eventos de precipitação intensa registrados no SMG (Tabela 1). Essa seleção foi realizada a partir de informações de eventos extremos e severos ocorridos na região. Foram priorizados eventos de precipitação que ultrapassaram o limiar de 50 mm de chuva por dia, o que caracteriza a ocorrência de eventos extremos de precipitação na região de acordo com Reis et al. (2018).

Tabela 1. Síntese de informações sobre os eventos selecionados.

Eventos	Data	Municípios Atingidos	Precipitação em mm/min	Danos causados	Referência
C1	27/10/2021	Itajubá	55 mm em 120 min	Sem Informação	Clima ao vivo, 2021
C2	08/11/2021	Santa Rita do Sapucaí	30 mm em 40 min	Casas destelhadas e quedas de árvores	G1, 2021
C3	17/12/2021	Itajubá	44 mm em 120 min	Rodovia alagada	EM, 2021
C4	31/03/2022	Monte Sião e Ipuiuna (MG)	77 mm em 40 min	Cedimento de asfalto e rodovia alagada	G1, 2022

Dados

Dados observados

Para a caracterização dos quatro eventos selecionados, foram utilizados dados de estações meteorológicas distribuídas nas regiões de estudo, obtidos a partir da plataforma Weather Underground (disponível em: www.wunderground.com/dashboard/pws/IITAJUB5) e da Agência Nacional de Águas (ANA, disponível em: <https://www.snirh.gov.br/hidroweb>) (Figura 1). Também foram utilizadas cartas sinóticas da Marinha do Brasil (disponível em: [https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-smm-](https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-smm-cartas-sinoticas/cartas-sinoticas)

[cartas-sinoticas/cartas-sinoticas](https://www.marinha.mil.br/chm/dados-do-smm-cartas-sinoticas/cartas-sinoticas)) e da Divisão de Previsão de Tempo e Clima (DIPTC) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, 2023) (disponível em: <http://img0.cptec.inpe.br/~rgptimg/Produtos-Pagina/Carta-Sinotica/Analise/>), além de imagens do satélite GOES 16 (Geostationary Operational Environmental Satellite 16) (disponível em GOES16, <http://satellite.cptec.inpe.br/acervo/goes16.formulario.logic>).

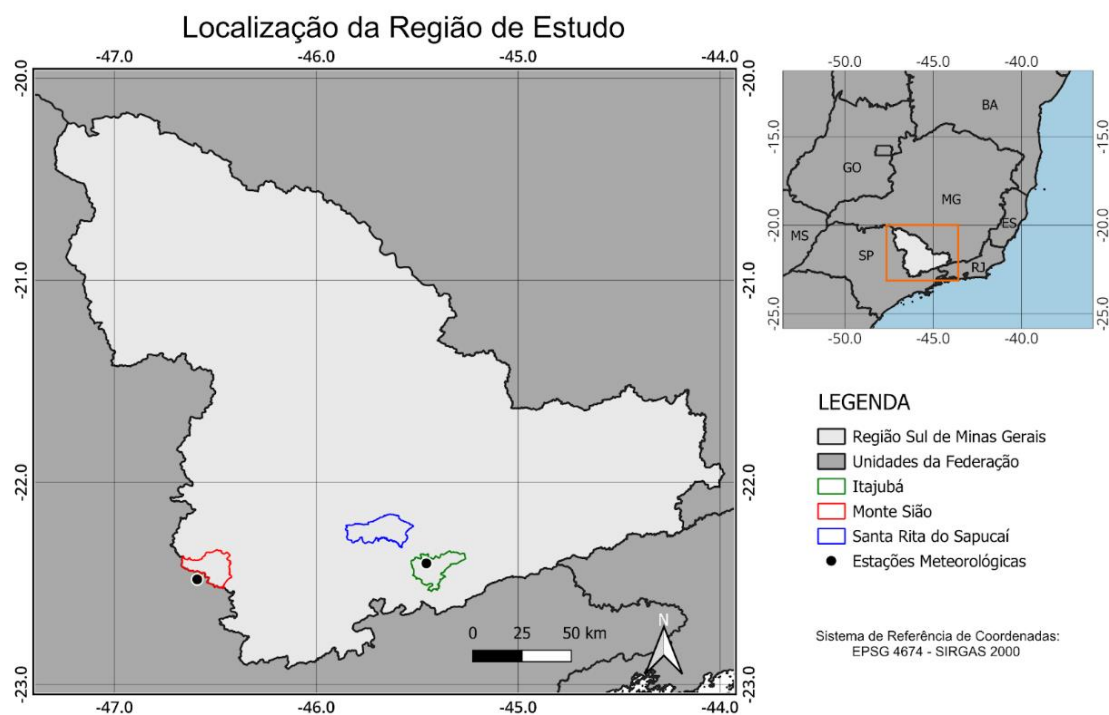


Figura 1. Localização da região de estudo. A cidade de Santa Rita do Sapucaí é delimitada na figura com um contorno de cor azul, Itajubá em cor verde e Monte Sião de cor vermelha. As estações meteorológicas utilizadas estão indicadas em pontos de coloração preta.

Previsões Numéricas do GFS

Para os casos apresentados na Tabela 1, foram utilizadas as previsões realizadas com 0,25° de resolução espacial do Global Forecast System (GFS) do National Center for Environmental Prediction (NCEP). Foram consideradas as

simulações realizadas com horizontes de quatro dias antes do evento, três dias antes do evento, dois dias antes do evento, um dia antes do evento e no dia do evento. Por exemplo, para o C1 ocorrido no dia 27/10/2021, foram considerados os resultados

das rodadas dos dias: (a) 23/10/2022 para 120 horas, (b) 24/10/2021 para 96 horas, (c) 25/10/2021 para 72 horas, (d) 26/10/2021 para 48 horas e (e) 27/10/2021 para 24 horas. Dessa forma, foi verificado, com qual antecedência os índices de instabilidade revelam o potencial para o desenvolvimento de tempestades severas na região. Para calcular os índices de instabilidade, com exceção do índice de Energia Potencial Disponível para a Convecção (Convective Available Potential Energy - CAPE) cujos valores são disponibilizados de forma direta, foram utilizadas as variáveis de temperatura do ar nos níveis de 850, 700 e 500 hPa, umidade relativa do ar nos níveis de 850 e 700 hPa e as componentes zonal e meridional do vento nos níveis de 850 e 500 hPa, de 6 em 6 horas, que foram obtidas a partir do site eletrônico <https://rda.ucar.edu/datasets/ds084-1/>.

Experimento Numérico

Uma vez que os resultados das saídas do modelo operacional no CEPReMG (WRF) não são armazenados, uma simulação seguindo a mesma configuração utilizada na operação foi realizada. Dessa forma, foi possível avaliar o desempenho deste na previsão dos índices de instabilidade e seu potencial para a previsão de tempestades na região. Devido ao esforço computacional necessário para a realização da simulação de todos os casos considerados, apenas um caso (C1) foi selecionado para esta análise. Não foi considerada nenhuma condição específica para a seleção do C1.

Nesse sentido, uma única simulação foi realizada para o período de 26 a 28 de outubro de 2021 (referente ao C1). As condições iniciais e de fronteira requeridas pelo modelo foram fornecidas a partir das próprias previsões do GFS. Às 12 horas iniciais da simulação foram descartadas para eliminar o efeito de spin-up do modelo. Para a simulação, foi considerada a grade de 3 km de resolução espacial (WRF-G2), centrada sobre o município de Itajubá (latitude 22,4269 °S e longitude 45,453 °W). A configuração seguida no modelo seguiu a utilizada no CEPReMG em caráter operacional conforme descrito por Araujo et al. (2023). Assim como para o GFS, os resultados da CAPE, da temperatura do ar nos níveis de 850, 700 e 500 hPa, da umidade relativa do ar nos níveis de

850 e 700 hPa e das componentes zonal e meridional do vento nos níveis de 850 e 500 hPa, foram extraídos do modelo WRF-G2, e posteriormente, foram utilizados para obtenção dos índices de instabilidade.

Índices de Instabilidade

Os índices de instabilidade: K, TT e o SWEAT, foram calculados, a partir das previsões do GFS, para os casos (C1, C2, C3 e C4), e para a previsão do WRF-G2 para o caso C1. Já o índice CAPE, foi diretamente extraído dos modelos GFS e WRF-G2. Todos estes índices foram calculados ou, no caso da CAPE, obtidos para o horário das 15 horas local (18 Z) do dia de ocorrência do evento. Vale ressaltar que, em média, esse horário registra o máximo aquecimento da baixa atmosfera e está associado com condições de maior instabilidade diurna. Os indicadores foram calculados para todo o SMG. A partir desses, para a avaliação dos resultados, foram extraídos os valores das variáveis necessárias referentes ao ponto de grade mais próximos às coordenadas centrais do município onde os eventos foram registrados. A Tabela 2 sintetiza a metodologia de cálculo, além das vantagens e desvantagens de cada um dos índices considerados.

Vale destacar que o valor obtido a partir do cálculo do índice K permite avaliar a probabilidade de ocorrência de tempestades conforme apresentado na Tabela 3. De acordo com Peppier (1988), quanto maior o valor do índice K, maior é o potencial para ocorrência de tempestades.

O índice TT considera a diferença de temperatura entre 850 hPa (próximo à superfície) e 500 hPa (média troposfera), o lapse rate, e o teor de umidade entre 850 hPa e 500 hPa. A probabilidade de convecção profunda tende a aumentar com o aumento do lapse rate e do teor de umidade da atmosfera (ECMWF, 2023). A associação entre os valores do TT e o potencial para desenvolvimento de tempestades é apresentado na Tabela 4. A grande limitação do índice TT está em sua dependência da umidade em 850 hPa, uma vez que a atmosfera pode estar úmida abaixo desse nível, o que não é captado pelo índice (NWS, 2023).

O índice Severe Weather Threat (SWEAT), desenvolvido por Robert Miller, avalia o potencial para eventos meteorológicos severos ao incorporar informações cinéticas e termodinâmicas em um índice, por meio de parâmetros. Estes parâmetros incluem umidade em baixos níveis, instabilidade, velocidades do vento em baixos e médios níveis e advecção de ar quente. Por ser válido apenas para o hemisfério norte, é necessário fazer considerações especiais para sua aplicação no hemisfério sul conforme descrito por Nascimento (2005). Os valores de orientação para indicar a

possibilidade de tempestades severas são apresentados na Tabela 6.

A CAPE representa a quantia de energia potencial disponível para acelerar verticalmente a parcela ou o trabalho que uma parcela exerce no ambiente. Variações nas condições de superfície (temperatura, umidade relativa ou taxa de mistura) têm efeitos na CAPE e no desenvolvimento de tempestades convectivas (Eltahir e Pal, 1996, Donner e Phillips, 2003). A relação entre os valores de CAPE e as condições atmosféricas é apresentada na Tabela 5.

Tabela 2. Equações e vantagens e desvantagens da utilização dos índices de instabilidade selecionados.

Índice	Equação	Vantagem	Desvantagem	Fonte
K	$T_{850} - T_{500} + Td_{850} - (T_{700} - Td_{700})$	Utilizado para prever chuvas fortes por utilizar camadas úmidas em seu cálculo	Como ele inclui a depressão do ponto de orvalho em 700 hPa, o ar seco neste nível, contribui para valor de K mais baixo.	Peppier, 1988; Hallak, 2012; NWS, 2023.
TT	$T_{850} + Td_{850} - 2T_{500}$	Mede a energia potencial disponível para desenvolvimento convectivo utilizando a temperatura virtual do ambiente e de uma parcela que ascende adiabaticamente na atmosfera.	A não consideração de camadas de ar úmido abaixo de 850 hPa. Não deve ser analisada de forma isolada devido à taxa de variação vertical de temperatura.	Miller, 1972; Peppier, 1988; NWS, 2023.
CAPE	$g \int_{Z_{NCE}}^{Z_{NPE}} g \frac{T_P - T_{AR}}{T_{AR}}$	Utilizado para analisar o potencial de tempestade severa. Este índice combina informações da estrutura termodinâmica e cinemática da atmosfera.	Valor de CAPE maior que zero não é condição suficiente para ocorrência de tempestade uma vez que este não considera o mecanismo de disparo para convecção; contudo, é uma condição para a ocorrência de precipitação convectiva	Moncrieff, Miller, 1976.
SWEAT	$20(TT - 49) + 12Td_{850} + V_{850} + V_{500} + 125\{sen diffdir + 0,2\}$	Utilizado para analisar o potencial de tempestade severa. Este índice combina informações da estrutura termodinâmica e cinemática da atmosfera.	O SWEAT foi desenvolvido para prever tempestades severas, logo pode ser impreciso na previsão de tempestades ordinárias.	NWS, 2023; Nascimento, 2005; Schultz, 1989.

Onde: T e Td (em °C) se referem às temperaturas do ar e de ponto de orvalho, respectivamente, no nível de pressão representado pelo número ao lado (850 hPa, 700 hPa e 500 hPa); g corresponde à aceleração da gravidade no nível do mar (9,8m. s⁻²); TP se refere à temperatura da parcela de ar (K); TAR corresponde a temperatura do ar ambiente (K); ZNCE o Nível de Condensação Livre (NCE, em m); ZNPE é o Nível de Perda

de Equilíbrio (m); V é a velocidade do vento no nível de pressão representado; diffdir é o módulo da diferença entre a direção do vento nos níveis de 500 hPa e 850 hPa.

Tabela 3. Relação entre o índice K e a ocorrência de tempestades, avaliado para latitudes médias nos Estados Unidos.

Índice K	Probabilidade de Ocorrência de Tempestades (PT, %)
$K < 15$	$PT \cong 0\%$
$15 \leq K \leq 20$	$PT < 20\%$
$20 \leq K \leq 25$	$20\% \leq PT \leq 40\%$
$25 \leq K \leq 30$	$40\% \leq PT \leq 60\%$
$30 \leq K \leq 35$	$60\% \leq PT \leq 80\%$
$35 \leq K \leq 40$	$80\% \leq PT \leq 90\%$
$K > 40$	$PT > 90\%$

Fonte: Hallak, 2012.

Tabela 4. Relação entre o índice Total Totals (TT) e a ocorrência de tempestades, para latitudes médias.

Índice TT	Probabilidade
$TT < 45$	Improvável convecção
$45 < TT < 50$	Possível tempestade
$50 < TT < 55$	Mais provável ocorrência de tempestades, possivelmente severas
$TT > 55$	Tempestades severas mais prováveis

Fonte: Miller, 1972.

Tabela 5. Relação entre o valor da CAPE e as condições atmosféricas.

CAPE (J kg^{-1})	Situação
$1000 < \text{CAPE} < 2500$	Instabilidade alta
$\text{CAPE} > 2500$	Instabilidade acentuada
$\text{CAPE} > 4000$	instabilidade extrema

Fonte: Nascimento, 2005.

Tabela 6. Relação entre o valor da SWEAT e as condições atmosféricas.

SWEAT	Situação
> 300	Potencial para tempestades severas
> 400	Potencial para tornados

Fonte: Miller, 1972.

Resultados e discussão

Caracterização dos Eventos Extremos de Precipitação

A Figura 2 apresenta as condições atmosféricas nos dias dos eventos extremos de precipitação a partir de cartas sinóticas de superfície e imagens de satélite. Nos eventos C1 (Figura 2a) e C2 (Figura 2b) há precipitação intensa associada a um cavado invertido em superfície sobre a região, que organiza convergência em superfície e movimentos

ascendentes, que se associam à atmosfera instável típica do período de estudo. Já os eventos C3 (Figura 2c) e C4 (Figura 2d) estiveram associados com a presença de sistemas frontais frios. O campo de nebulosidade associado a cada evento é mostrado nas Figuras 2b, 2d, 2f e 2h.

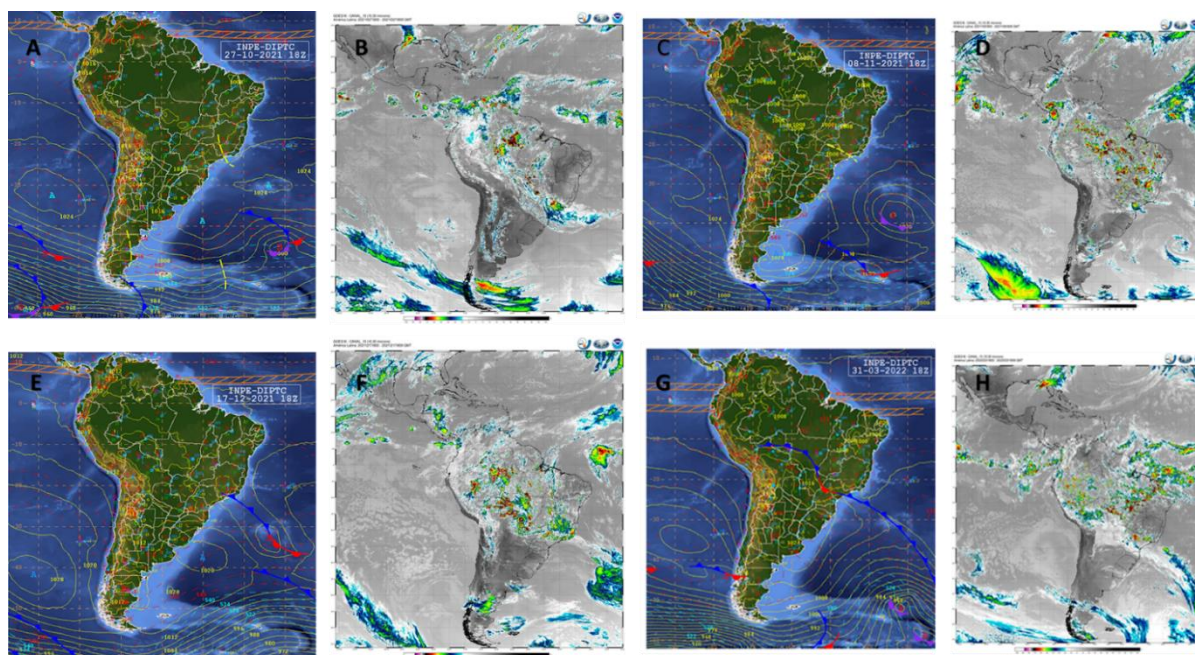


Figura 2. Cartas sinóticas de superfície e as imagens do satélite GOES 16 (canal 13 da banda do infravermelho - 8,4 μm) para os quatro casos de estudo. As Figuras 2a e 2b representam o C1, as Figuras 2c e 2d representam o C2, as Figuras 2e e 2f representam o C3 e as Figuras 2g e 2h representam o C4. Fonte: CPTEC INPE, 2023.

O C1 teve início por volta das 16 horas (hora local) e os maiores acumulados de precipitação ocorreram entre as 16 e 17 horas (hora local) (Figura 3a). Para o C2, segundo o G1 (2021), o evento registrou ocorrência de granizo, além de registro de 78,5 mm de precipitação em 24 horas na estação localizada em Varginha no Sul/Sudoeste de MG, a cerca de 100 km de Santa Rita do Sapucaí. Os dados de precipitação associados ao evento não foram encontrados nas bases de dados disponíveis e, por isso, não foram utilizados. No C3, foi observado deslizamento de

terra, pontos de alagamento e quedas de árvores (EM, 2021). A chuva teve início às 14 horas e o maior volume ocorreu entre as 15 e 17 horas (Figura 3b). Em relação ao C4, a Defesa Civil de Monte Sião registrou cerca de 77 mm precipitação em menos de uma hora (G1, 2022), enquanto na estação pluviométrica da ANA situada em Águas de Lindóia, no Estado de São Paulo, a mais próxima do local, foram registrado cerca de 37,2 mm de precipitação entre as 14 e 15 horas (hora local) (Figura 3c).

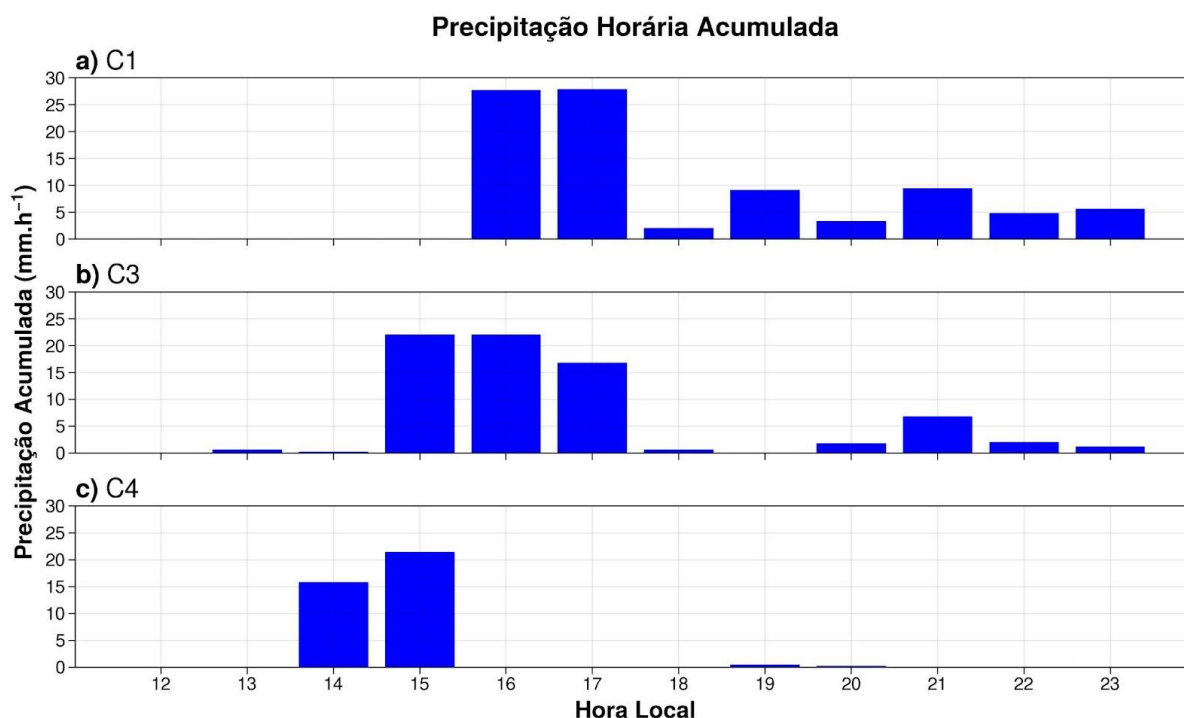


Figura 3. Precipitação acumulada por hora dos casos (Figura 3a) C1, dia 27 de outubro de 2021, (Figura 3b) C3, dia 17 de dezembro de 2021 e (Figura 3c) C4, dia 31 de março de 2022, a partir das 12 horas (hora local). Observação: Não foram encontrados bases de dados disponíveis para o C2. Fonte: Estação Meteorológica Automática - UNIFEI; Estação Pluviométrica - ANA, 2023.

Índices de Instabilidade

Análises das previsões do GFS

Nessa seção, os resultados dos índices de instabilidade calculados a partir das previsões do modelo GFS são apresentados (Tabela 7) e discutidos. Vale ressaltar que as previsões correspondem a quatro dias, três dias, dois dias e um dia antes do evento, além da previsão realizada no próprio dia do evento. Os resultados para o índice K, quando comparados ao exposto na Tabela 3, revelam a probabilidade de ocorrência de tempestades superior a 60% em todos os casos considerados mesmo quatro dias antes da ocorrência do evento, o que destaca sua habilidade de uso para a previsão de fenômenos dessa natureza na região. Vale mencionar que, para os eventos C1, C2 e C3, as previsões para o índice K inicializadas um dia antes do evento indicam probabilidade de ocorrência de tempestades acima de 80%. Diversos estudos como Menezes et al. (2006), Tyagi et al. (2011) e Bondyopadhyay e Mohapatra (2023) também obtiveram altos valores do índice K

associados com tempestades severas para diferentes regiões do mundo. Vale ressaltar que, segundo Sánchez et al. (2008), o índice K é um bom indicador da umidade atmosférica em baixos e médios níveis, um dos fatores necessários para a formação de tempestades, e que é típico de ambientes tropicais (Nascimento, 2005).

Em relação ao índice TT, os resultados divergem dependendo do caso considerado. Por exemplo, as previsões inicializadas um dia antes do evento, mostram que para o C1 o valor foi de 44 (Tabela 7), indicando condição improvável de convecção, já no C2 foi observado o valor de 51 (Tabela 7), indicando de acordo com a Tabela 4, uma provável ocorrência de tempestades severas. Entretanto, ressalta-se que todos os casos, em algum momento, apresentaram valores superiores a 45, valor de referência a partir do qual há indicativo para a ocorrência de tempestade (Tabela

4). Vale ressaltar que Henry (1999) constatou a ocorrência de convecção mesmo com esse índice abaixo do limiar de 45, enquanto Nascimento (2005) e da Silva et al. (2021) revelaram que valores acima de 40 já indicam ambientes favoráveis à ocorrência de tempestades. Nesse estudo, por exemplo, o limiar de 40 foi superado em todas as previsões e casos considerados. Mesmo 4 dias antes do dia do evento, os valores do TT já eram superiores a 40. Dentre os casos, apenas o C2 apresentou valores acima de 45 (Tabela 7) em todas as previsões consideradas, inclusive com valores acima de 50 (Tabela 7), indicando maior probabilidade de ocorrência de tempestades, possivelmente severas, um dia antes do evento e na simulação realizada no próprio dia do evento.

A CAPE em geral apresentou valores superiores a 1000 J/kg (Tabela 7), principalmente, nas previsões realizadas para o dia do evento, indicando de acordo com a Tabela 5, condições de instabilidade alta. Apesar do C2 apresentar valores acima de 1000 J/Kg nas simulações realizadas a partir de dois dias antes do evento, a maioria dos casos oscilou entre valores ligeiramente acima e abaixo de 1000 J/kg. Isso indica uma dificuldade na utilização desse índice para a previsão de eventos de precipitação extrema na região. Segundo Stensrud e Wandishin (2000), ao avaliarem a previsão de CAPE associada ao ensemble do NCEP para a América do Norte, o modelo previu melhor os casos de baixos valores de CAPE quando comparados aos casos com valores elevados, em geral, associados aos eventos de tempestades severas. Castorina et al. (2023) e Sun et al. (2023) também indicaram, através de simulações com os modelos WRF, para a Itália, e GFS, para a América do Norte, respectivamente, que as previsões de CAPE, em geral, subestimam os valores observados, o que pode dificultar sua utilização para a previsão de tempestades severas. Ressalta-se que como a CAPE depende da temperatura e da umidade da coluna de ar, logo, problemas na representação da variação vertical destas variáveis por parte dos modelos numéricos influencia diretamente seus resultados.

Mesmo considerando a adaptação do cálculo do SWEAT proposta para o hemisfério sul por Nascimento (2005), os valores obtidos a partir da previsão do GFS não revelaram bons resultados

para a detecção do potencial convectivo da atmosfera em dias de eventos extremos no SMG. Apenas os valores obtidos a partir das previsões realizadas 4 dias antes do evento para o C1 e C3, e 2 dias antes do evento para o C3 apresentaram resultados acima do limiar de 300 (Tabela 7), indicando de acordo com a Tabela 6, um potencial para tempestades severas. Em um estudo sobre a ocorrência de eventos extremos no sudeste do Brasil durante a estação seca de 2016, Rehbein et al. (2018) revelaram que o SWEAT também não atingiu o valor do limiar proposto para a detecção de tempo severo na região que compreende o Estado de São Paulo e estados vizinhos. Todos esses resultados indicam a necessidade de uma avaliação mais específica a respeito do uso do SWEAT no Brasil para a verificação e, caso necessário, revisão dos limiares propostos originalmente para a previsão de extremos nos Estados Unidos.

A partir de dois dias antes dos eventos estudados, observa-se uma tendência de convergência nos índices de instabilidade (K, TT e CAPE), indicando condições favoráveis para a formação de tempestades. Esses resultados destacam que, à medida que se aproxima do dia do evento, torna-se mais fácil identificar a ocorrência de tempestades, contribuindo para as previsões meteorológicas.

Dentre os casos analisados, os índices de instabilidade apresentaram melhor performance na previsão do evento C2. Nesse contexto, para ilustrar a distribuição espacial dos indicadores avaliados sobre a região SMG, a Figura 4 apresenta os resultados obtidos para o C2, com base na saída do modelo GFS inicializada no dia do evento (08 de novembro de 2021 às 00 UTC). É possível verificar valores dos índices de instabilidade K, TT e CAPE que indicam a possibilidade de ocorrência de tempestades na maior parte da região. Apenas o SWEAT não revelou valores superiores ao limiar de 250 em nenhuma área no SMG, o que indica a inaptidão desse índice para a previsão de tempestades na região.

Tabela 7. Valores dos índices K, TT, CAPE e SWEAT calculados a partir dos dados das previsões do GFS de acordo com o caso estudo e o tempo de antecedência da previsão em relação ao dia do evento meteorológico. Observação: As marcações em negrito indicam resultados acima dos limiares pré-estabelecidos para ocorrência de tempestades.

Indicadores	K				TT			
Simulação disparada às 00 Z	C1	C2	C3	C4	C1	C2	C3	C4
4 dias antes	35,7	33,9	36,2	37,7	41,5	46,3	44,5	45,4
3 dias antes	34	37,5	35,8	34,3	43,5	48,3	45,3	42,9
2 dias antes	36,2	38,1	34,4	32,4	43,5	49,4	44,7	45,8
1 dia antes	37,3	40,4	39,5	31,8	43,7	50,6	45,3	44,5
Dia do evento	38,7	40,5	38,2	34,1	46,9	50,4	44,3	45,9

Indicadores	CAPE				SWEAT			
Simulação disparada às 00 Z	C1	C2	C3	C4	C1	C2	C3	C4
4 dias antes	58	437	665	1004	316	180	344	196
3 dias antes	260	1144	1006	695	173	188	252	193
2 dias antes	234	1268	1243	1088	183	192	300	193
1 dia antes	340	1592	1073	985	174	189	205	187
Dia do evento	1058	1122	775	1096	191	185	201	191

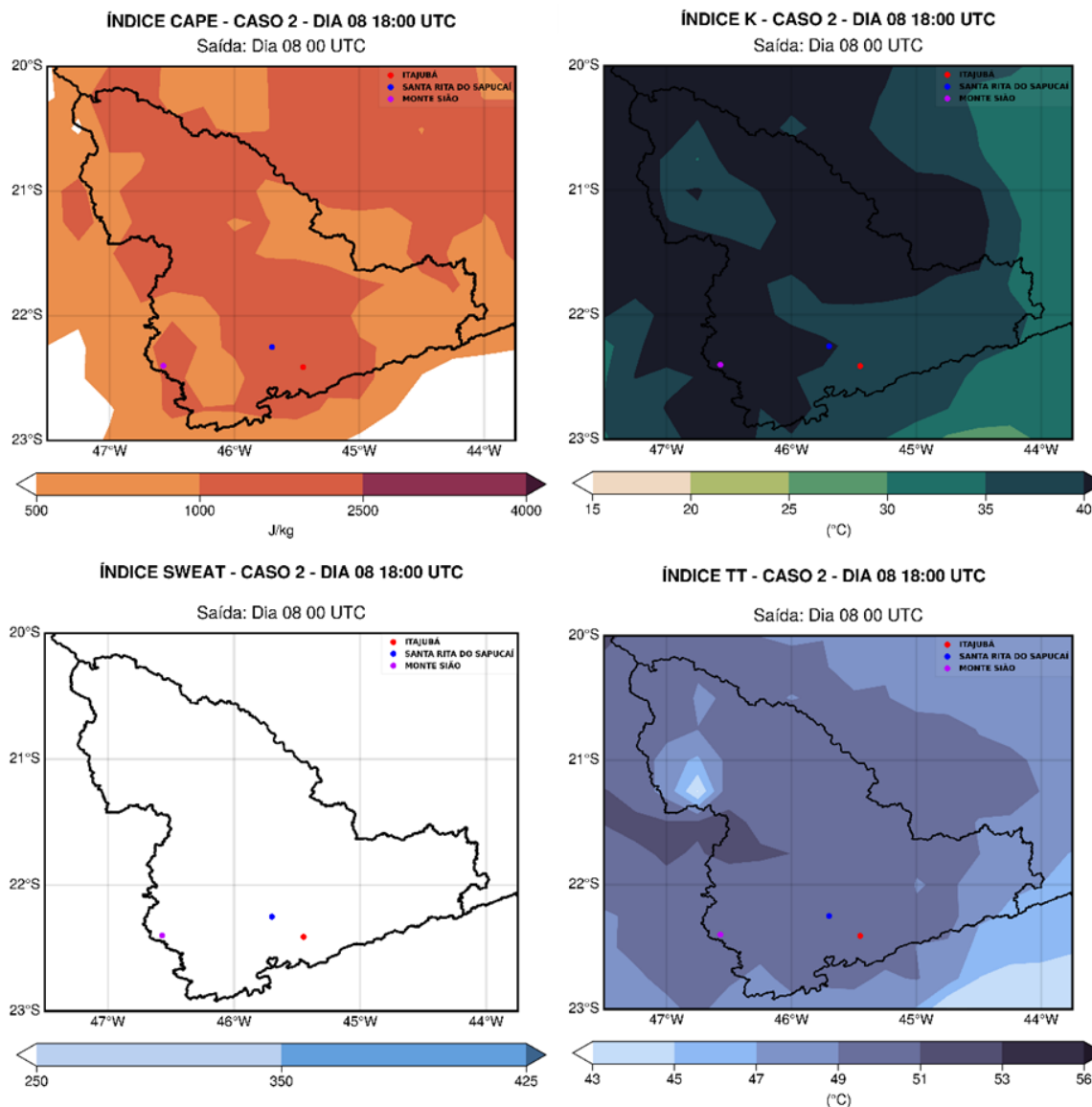


Figura 4. Prognóstico dos índices de instabilidade do dia 08 de novembro de 2021 do modelo GFS, às 00 UTC, para às 18 UTC do dia do evento do C2, 08 de novembro de 2021.

Índices de instabilidade a partir dos resultados do WRF

Os índices de instabilidade, calculados (K, TT e SWEAT) e obtido (CAPE) a partir dos resultados do experimento numérico realizado com o modelo WRF-G2, revelaram resultados próximos aos verificados com o GFS na rodada disparada dois dias antes ao C1 (Tabela 8). A avaliação da previsão inicializada no dia 25 para o dia 27 de outubro de 2021 às 18 Z (C1) mostra que

o WRF previu valores ligeiramente mais elevados dos índices K e TT, e ligeiramente inferiores para o CAPE e SWEAT. Vale ressaltar que, para o C1, o CAPE e SWEAT não apresentam valores indicativos relativos à ocorrência de tempestades em ambos os modelos, entretanto a ocorrência de tais eventos é indicada pelos valores do índice K e TT. Contudo, apesar dos modelos não

apresentarem grande variação quando analisadas as previsões pontuais para Itajubá, a distribuição espacial dos resultados (Figura 5) revela valores de CAPE acima dos limiares definidos como indicadores da possibilidade de tempestades em parte da Serra da Mantiqueira, próximo ao município de Itajubá. O próprio SWEAT revelou valores acima de 250 em diversas áreas da região.

Foram observados, valores máximos de K acima de 40 e de TT acima de 47 em parte do SMG. Esses resultados podem auxiliar os previsores na tomada de decisão quanto à emissão de alertas de chuva forte, potencializando o preparo e a resposta das autoridades e minimizando prejuízos e riscos à população.

Tabela 8. Prognóstico do dia 25 de outubro de 2021 dos modelos GFS, WRF-G2, às 00 UTC, para às 18 UTC do dia do evento do C1, 27 de outubro de 2021. Observação: As marcações em **negrito** indicam resultados acima dos limiares pré-estabelecidos para ocorrência de tempestades.

Modelo	CAPE (J kg ⁻¹)	K (°C)	SWEAT	TT (°C)
GFS	234	36,2	183	43,5
WRF-G2	151,6	38,6	151	46,8

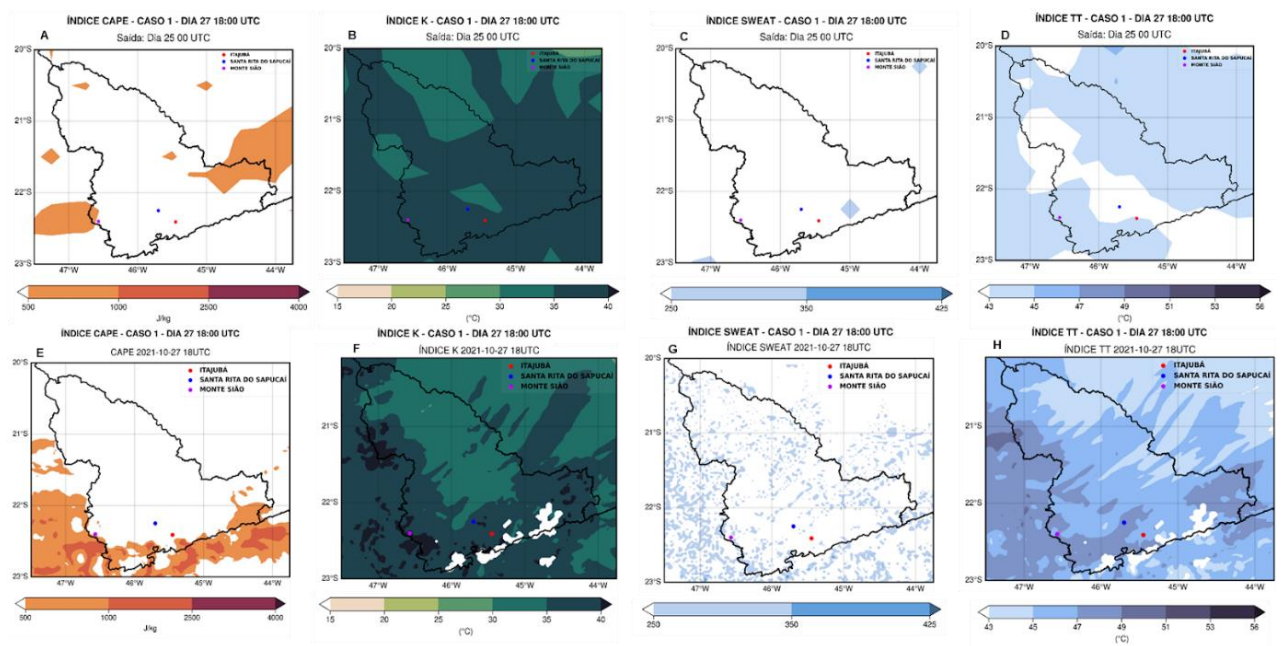


Figura 5. Prognóstico dos índices de instabilidade do dia 25 de outubro de 2021 dos modelos GFS (figuras superiores, A, B, C e D) e WRF-G2 (figuras inferiores, E, F, G e H), às 00 UTC, para às 18 UTC do dia do evento do C1, 27 de outubro de 2021.

Vale ressaltar que os resultados apresentados neste estudo, especialmente, para os índices CAPE e SWEAT indicam a necessidade de revisão dos limiares para indicar o potencial de formação de tempestades no SMG. Outros estudos também indicam essa necessidade (Nascimento, 2005, Cordeiro et al., 2013, Costa, 2014, Carmo et al., 2017). Pereira et al. (2014), analisaram em

estudo realizado em Porto Alegre, Rio Grande do Sul, que a ocorrência de eventos de granizo deve estar associada às seguintes condições, como TT > 50, K > 24 e SWEAT > 270. Para o C2, por exemplo, quando granizo foi registrado, os valores obtidos de TT e K atendem essa recomendação.

Conclusões

Este estudo teve como objetivo avaliar a previsibilidade de eventos extremos de precipitação no SMG a partir do uso dos índices de instabilidade CAPE, K, TT e SWEAT obtidos dos modelos GFS e WRF-G2. A partir das previsões do GFS inicializadas 4, 3, 2, 1 dia(s) antes dos eventos selecionados e no próprio dia quando estes foram registrados, revelaram que, com exceção do SWEAT, os demais índices utilizados conseguiram indicar o potencial para a ocorrência de eventos extremos de precipitação no SMG. Embora a severidade das tempestades tenha sido subestimada pelos valores dos índices CAPE, pode se constatar que o indicativo de instabilidade a partir do CAPE (>1000) ocorreu apenas nos prognósticos mais próximos ao dia do evento. Para todos os casos considerados, o SWEAT não apresentou valores acima dos limiares que indicam tempestades severas. Nota-se que, para o C2, o qual houve registro da ocorrência de granizo, os valores dos prognósticos mais próximos ao dia do evento dos índices K (>40) e TT (>50) se mantiveram mais altos do que verificado para os demais casos. Quando considerados os resultados obtidos com o modelo WRF-G2 (dois dias antes do evento) para o C1 revelaram valores para Itajubá, município onde o evento ocorreu, condizentes com os verificados com o GFS. Em geral, valores de CAPE superiores a 1000, de K > 35 e TT > 45 (ou próximos a 45) indicaram a ocorrência de eventos extremos na região.

Com base nas análises realizadas nesse estudo, sugere-se a utilização dos índices K e TT como ferramentas para a previsão de tempestades no SMG. Embora que, para alguns dos casos e simulações consideradas, os valores de CAPE indicaram a possibilidade da formação de eventos extremos de precipitação, os resultados obtidos neste estudo demonstram a necessidade de adaptação dos valores para classificação da severidade eventos extremos na região. O mesmo deve ser considerado no caso da utilização do SWEAT para a previsão na região. Futuramente, sugerem-se também mais estudos de modo a se caracterizar a previsibilidade, a partir dos índices de instabilidade, de eventos de tempestades mais severos e/ou com granizo.

Agradecimentos

Os autores agradecem às instituições que disponibilizaram os dados utilizados neste estudo, incluindo o NCEP, CEPReMG, ANA e UNIFEI e às agências FAPEMIG, CAPES e ao CNPq.

Referências

- Alvarenga, L. A., 2012. Precipitação no sudeste brasileiro e sua relação com a Zona de Convergência do Atlântico Sul. *Revista Agrogeoambiental* [online]. Disponível: <https://agrogeoambiental.ifsuldeminas.edu.br/index.php/Agrogeoambiental/article/view/452/435>. Acesso: 30 nov. 2022.
- Araujo, A. A., Garcia, D. W., Monteiro, J. R., Miguel, T. V., Campos, B., Silveira, V., Reboita, M. S., 2023. Avaliação do modelo Weather Research and Forecasting (WRF) na simulação operacional de um evento de frente fria no sudeste do Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física* [online] 16. Disponível: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/254272/43757>. Acesso: 18 abr. 2023.
- Arora, K.; Ray, K.; Ram, S.; Mehajan, R., 2023. The Role of Instability Indices in Forecasting Thunderstorm and Non-Thunderstorm Days across Six Cities in India. *Climate* [online] 11. Disponível: <https://doi.org/10.3390/cli11010014>. Acesso: 17 jun. 2024.
- Bartolomei, F. da R., Ribeiro, J. G. M., Reboita, M. S., 2023. Eventos Extremos de Precipitação no Sudeste do Brasil: Verão 2021/2022. *Revista Brasileira de Geografia Física* [online] 16. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/index.php/rbgfe/article/view/258053/44563>. Acesso: 27 nov. 2023.
- Bondyopadhyay, S., & Mohapatra, M. 2023. Determination of suitable thermodynamic indices and prediction of thunderstorm events for Eastern India. *Meteorology and Atmospheric Physics* [online] 135. Disponível: <https://doi.org/10.1007/s00703-022-00942-1>. Acesso: 18 jun. 2024.
- Campos, B. de; Carvalho, V. S. B.; Mattos E. V. 2023. Assessment of cloud microphysics and cumulus convection schemes to model

- extreme rainfall events over the Paraíba do Sul River Basin. Urban Climate [online] 51. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101618>. Acesso: 17 jun. 2024.
- Campos, de B.; Reboita, M. S.; Carvalho, V. S. B.; Dias, C., 2016. Circulações Locais Induzidas pela Topografia no Vale do Paraíba e na Serra da Mantiqueira: um estudo de caso para o período entre os dias 16 e 22 de agosto de 2010. Revista Brasileira de Geografia Física [online] 9. Disponível: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v9.3.p753-765>. Acesso: 25 nov. 2022.
- Carmo, L. F. R. do, Miranda, V. F. V. de, Souza, R. C. de. Análise e Cálculo dos Índices de Instabilidade para Eventos de Chuva de Granizo no Rio Grande do Sul. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, 8., 2017, Santos. Anais [...]. Santos: INPE, 2017. Disponível: <http://marte2.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/marte2/2017/10.27.15.56.57/doc/thisInformationItemHomePage.html>. Acesso: 28 dez. 2023.
- Castorina, G.; Caccamo, M. T.; Magazú, S. 2019. Study of convective motions and analysis of the impact of physical parametrization on the WRF-ARW forecast model. Classe di Scienze Fisiche, Matematiche e Naturali [online] 97. Disponível: <https://doi.org/10.1478/AAPP.97S2A19>. Acesso: 17 nov. 2023.
- Clima ao vivo, Chuva forte atinge Itajubá/MG. 27/10/2021. Disponível em: <https://www.climaaovivo.climatempo.com.br/videos/chuva-forte-atinge-itajuba-mg-27-10-21>. Acesso: 29 nov. 2022.
- Conexão Itajubá, A chuva do dia 27/02/2023 em Itajubá. 27/02/2023. Disponível em: <https://conexaoitajuba.com.br/a-chuva-do-dia-27-02-2023-em-itajuba/>. Acesso: 7 mar. 2023.
- Cordeiro, E. S., Silva, N. M. da, Vladimir Levit, & Fedorova, N. (2013). Análise Termodinâmica e Frequência de Trovoadas entre os Anos de 2008 a 2012 em Maceió, Alagoas (Thermodynamic Analysis and Frequency of Thunderstorms in the Years 2008 to 2012 in Maceió, Alagoas). Revista Brasileira De Geografia Física [online] 6. Disponível: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v6.5.p1208-1226>. Acesso: 17 jun. 2024.
- Costa, M. N. de M. Episódio de Tempo Severo em Brasília-DF: Importância de Fatores Locais no Desenvolvimento de Convecção Profunda. 2014. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2014.
- Dooner, L.J., Phillips, V.T., 2003. Boundary layer control on convective available potential energy: Implications for cumulus parameterization. Journal of Geophysical Research [online] 108. Disponível: <https://doi.org/10.1029/2003JD003773>. Acesso: 20 mar. 2023.
- European Centre for Medium-Range Weather Forecasts - ECMWF. Parameter details. Disponível: <https://codes.ecmwf.int/grib/param-db/?id=260123>. Acesso: 11 nov. 2023.
- Eltahir, E. A. B., Pal, J. S., 1996. The relationship between surface conditions and subsequent rainfall in convective storms. Journal of Geophysical Research [online] 101. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/96JD01380>. Acesso em: 22 mar. 2023.
- Estado de Minas – E M, Motoristas se arriscam em rodovia alagada após chuva forte em Itajubá. 17/12/2021. Disponível: https://www.em.com.br/app/noticia/gerais/2021/12/17/interna_gerais,1332297/motoristas-se-arriscam-em-rodovia-alagada-apos-chuva-forte-em-itajuba.shtml. Acesso: 10 mar. 2023.
- Ferreira, C.; Reboita, M. S. Índices De Instabilidade: O Que São E Para Que Servem? Clube de Autores, 2020.
- Ferreira, R.; Reboita, M. S.; Herdies, D.; Beneti, C., 2016. Tendência dos índices de instabilidade na América do Sul. Ciência e Natura [online] 38. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/2179460X19839>. Acesso em: 18 nov. 2022.
- Filho, R. A. de O., Carvalho, V. S. B., & Reboita, M. S., 2022. Evaluating the Global Forecast System (GFS) for energy management over Minas Gerais State (Brazil) against in-situ observations. Atmosfera [online] 35. Disponível:

- <https://doi.org/10.20937/atm.52916>. Acesso: 18 nov. 2022.
- Freitas, A. A. de; Oda, P. S. S.; Teixeira, D. L. S.; Mattos, E. V.; Bastos, I. R. R.; Nery, T. D.; Metodiev, D., Santos, A. P. P. dos, Gonçalves, W. A., 2022. Meteorological conditions and social impacts associated with natural disaster landslides in the Baixada Santista region from March 2nd-3rd, 2020. Urban Climate [online] 42. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2022.101110>. Acesso em: 10 mar. 2023.
- Garcia, D. W.; Reboita, M. S.; Carvalho, V. S. B. 2023. Evaluation of WRF Performance in Simulating an Extreme Precipitation Event over the South of Minas Gerais, Brazil. Atmosphere [online] 14. Disponível: <https://doi.org/10.3390/atmos14081276>. Acesso: 18 jun. 2024.
- Groisman, P. Y.; Knight, R. W.; Easterling, D. R.; Karl, T. R.; Hegerl, G. C.; Razuvaev, V. N., 2005. Trends in Intense Precipitation in the Climate Record. Journal of Climate [online] 18. Disponível em: <https://doi.org/10.1175/JCLI3339.1>. Acesso em 29 nov 2022.
- G1, Chuva deixa quase 30 moradores desalojados em Itajubá e Pedralva, MG. 28/02/2023. Disponível: <https://g1.globo.com/mg/sul-de-minas/noticia/2023/02/28/chuva-deixa-moradores-desalojados-no-sul-de-minas.ghtml>. Acesso: 8 mar. 2023.
- G1, Chuva faz asfalto ceder, deixa estragos e causa alagamentos em cidades do sul de Minas. 31/03/2022. Disponível em: <https://g1.globo.com/mg/sul-de-minas/noticia/2022/03/31/chuva-faz-asfalto-ceder-deixa-estragos-e-causa-alagamentos-em-cidades-do-sul-de-minas.ghtml>. Acesso em: 29 nov. 2022.
- G1, Chuva que caiu em 24 horas no Litoral Norte foi o maior registro da história do Brasil. 20/02/2023. Disponível em: <https://g1.globo.com/sp/vale-do-paraiba-regiao/noticia/2023/02/20/chuva-que-caiu-em-24-horas-no-litoral-norte-foi-o-maior-registro-da-historia-diz-governo-de-sao-paulo.ghtml>. Acesso: 5 mar. 2023.
- G1, Defesa civil aponta que mais de 100 árvores caíram e 12 casas foram destelhadas pelas chuvas em Santa Rita do Sapucaí, MG. 09/11/2021. Disponível em: <https://g1.globo.com/mg/sul-de-minas/noticia/2021/11/09/defesa-civil-aponta-que-mais-de-100-arvores-cairam-e-12-casas-foram-destelhadas-pelas-chuvas-em-santa-rita-do-sapucaí-mg.ghtml>. Acesso em: 29 nov. 2022.
- G1, Forte chuva alaga ruas, inunda casas e até salas da Unifei, em Itajubá, MG. 27/02/2023. Disponível em: <https://g1.globo.com/mg/sul-de-minas/noticia/2023/02/27/forte-chuva-alaga-ruas-inunda-casas-e-ate-salas-da-unifei-em-itajuba-mg.ghtml>. Acesso em: 8 mar. 2023.
- G1, Tragédia do litoral de SP: corpo de desaparecido é encontrado, e número de mortes sobe para 65. 26/02/2023. Disponível em: <https://g1.globo.com/sp/vale-do-paraiba-regiao/noticia/2023/02/26/tragedia-do-litoral-de-sp-corpo-do-ultimo-desaparecido-e-encontrado-e-numero-de-mortes-sobe-para-65.ghtml>. Acesso em: 5 mar. 2023.
- Hallak, R.; Filho, A. J. P., 2012. Análise de desempenho de índices de instabilidade atmosférica na previsão de fenômenos convectivos de mesoescala na região metropolitana de São Paulo entre 28 de janeiro e 04 de fevereiro de 2004. Revista Brasileira de Meteorologia [online] 27. Disponível: <https://www.scielo.br/j/rbmet/a/dqMD7my6wpnk849HQKYV6Qc/?lang=pt#>. Acesso: 17 nov. 2022.
- Henry, N. L., (1999). A static stability index for low-topped convection. Weather Forecast 15:246–265
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, Censo Demográfico. 2023. Disponível: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/trabalho/22827-censo-demografico-2022.html?edicao=35938>. Acesso: 28 nov. 2023.
- Lima, K. C.; Satyamurty, P.; Fernández, J. P. R., 2010. Large-scale atmospheric conditions associated with heavy rainfall episodes in Southeast Brazil. Theoretical and Applied Climatology [online] 101. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00704-009-0207-9>. Acesso em: 11 mar. 2023.

- Marchezini, V.; Cunningham, C.; Dolif, G.; Camarinha, P. I.; ODA, P.; Lacerda, R. O que são eventos extremos? Uma reflexão sobre as diferentes perspectivas do termo. *ClimaCom – Desastres* [online], Campinas, ano 10, n°. 25. nov. 2023. Disponível: <https://climacom.mudancasclimaticas.net.br/o-que-sao-eventos-extremos/>. Acesso 27 de nov. 2023.
- Menezes, W. F., Lima, D. R., Mourão, C. E., Lima, G. D., & SA, F. C. E. (2006). A study of simulated instability indices and its behavior over Rio de Janeiro. *Anais do Proceedings of*, 8, 1849-1955.
- Miller, R. C. Notes on analysis and severe storm forecasting procedures of the Air Force Global Weather Central, Technical Report 200. Air Weather Service, United States Air Force, Washington, maio 1972, 190 p. Disponível em: https://chubasco.niu.edu/projects/miller/tr200_intro-chapter_3.pdf. Acesso em: 20 nov. 2022.
- Moncrieff, M.; Miller, M. The dynamics and simulation of tropical cumulonimbus and squall lines. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, [s.l.], v. 102, n. 432, p. 373-394, abr. 1976. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/qj.49710243208>. Acesso em: 15 nov. 2022.
- Nascimento, E. L., 2005. Previsão de tempestades severas utilizando-se parâmetros convectivos e modelos de mesoescala: uma estratégia operacional adotável no Brasil? *Revista Brasileira de Meteorologia* [online] 20. Disponível em: https://moodle.ufsc.br/pluginfile.php/3990070/mod_resource/content/1/PREVIS%C3%83O%20DE%20TEMPESTADES%20SEVERAS%20UTILIZANDO-%20PAR%C3%82METROS%20CONVECTIVOS%20E%20MODELOS%20DE%20MESOESCALA%20UMA%20ESTRAT%C3%89GIA%20OPERACIONAL%20ADOT%C3%81VEL%20NO%20BRASIL.pdf. Acesso em: 20 mar. 2023.
- National Weather Service - NWS. Convective Season Environmental Parameters and Indices. National Weather Service, National Oceanic and Atmospheric Administration, Louisville, Disponível: <https://www.weather.gov/lmk/indices>. Acesso: 31 nov. 2023.
- Pedron, I.T., Dias, M. A. F. S., Dias, S. P.; Carvalho, L., Freitas, E., 2017. Trends and variability in extremes of precipitation in Curitiba - Southern Brazil. *International Journal of Climatology* [online] 37. Disponível: <https://doi.org/10.1002/joc.4773>. Acesso: 4 maio 2023.
- Pereira, S. et al. Avaliação dos índices de instabilidade para a precipitação de granizo ocorrida em maio de 2013 em Porto Alegre, RS. In: *Salão de Iniciação Científica e de Inovação Tecnológica*, 3., 2014, Porto Alegre. *Anais [...]*. Porto Alegre: Fundação Estadual de Pesquisa Agropecuária - Fepagro, 2014. Disponível: <https://www.agricultura.rs.gov.br/upload/arquivos/202112/16150248-anais-iii-sicit-2014.pdf>. Acesso: 28 dez. 2023.
- Peppier, R. A. A review of static stability indices and related thermodynamic parameters. *Climate & Meteorology Section, Illinois State Water Survey Division, Champaign*, n. 104, out. 1988. Disponível: <https://www.isws.illinois.edu/pubdoc/MP/ISWSMP-104.pdf>. Acesso: 28 dez. 2023.
- Reboita, M. S.; Krusche, N.; Ambrizzi, T.; Rocha, R. P., 2012. Entendendo o tempo e o clima na América do Sul. *Terra e Didática* [online] 8. Disponível: <https://repositorio.furg.br/handle/1/4742>. Acesso: 20 abr. 2023.
- Reboita, M. S.; Gan, M. A.; Rocha, R. P.; Ambrizzi, T., 2010. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. *Revista Brasileira de Meteorologia* [online] 25. Disponível: <https://doi.org/10.1590/S0102-77862010000200004>. Acesso: 27 nov. 2022.
- Reboita, M. S.; Marrafon, V. H. A.; Llopart, M.; Rocha, R. P., 2018. Cenários de mudanças climáticas projetados para o estado de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Climatologia* [online]. Disponível: <https://ojs.ufgd.edu.br/index.php/rbclima/article/download/14063/7304>. Acesso: 13 abr. 2023.

- Reis, A. L.; Silva, M. S.; Regis, M. V.; Silveira, W. W.; Sousa, A. C.; Reboita, M. S.; Carvalho, V. S. B., 2018. Climatologia e eventos extremos de precipitação no estado de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Geografia Física* [online] 11. Disponível: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe/article/view/234146>. Acesso: 15 abr. 2023.
- Rehbein, A. et al. (2018). Severe Weather Events over Southeastern Brazil during the 2016 Dry Season. *Advances in Meteorology*, v. 2018, p. 1–15. Disponível: <https://doi.org/10.1155/2018/4878503>. Acesso: 04 dez. 2023.
- Sánchez, J. L., López, L., Bustos, C., Marcos, J. L., & García-Ortega, E. (2008). Short-term forecast of thunderstorms in Argentina. *Atmospheric research*, 88(1), 36-45.
- Schueltz, P. 1989. Relationships of Several Stability Indices to Convective Weather Events in Northeast Colorado. *Weather and Forecasting* [online] 4. Disponível: [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(1989\)004<0073:ROSSIT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(1989)004<0073:ROSSIT>2.0.CO;2). Acesso: 16 jun. 2024.
- Silva, F. P. da et al. 2019. Evaluation of atmospheric thermodynamics and dynamics during heavy-rainfall and no-rainfall events in the metropolitan area of Rio de Janeiro, Brazil. *Meteorol Atmos Phys* [online]131. Disponível: <https://doi.org/10.1007/s00703-017-0570-5>. Acesso: 18 jun. 2024.
- Silva, F. P. da et al. 2019. Synoptic thermodynamic and dynamic patterns associated with Quitandinha River flooding events in Petropolis, Rio de Janeiro (Brazil). *Meteorology and Atmospheric Physics* [online] 131. Disponível: <https://doi.org/10.1007/s00703-018-0609-2>. Acesso: 5 mar. 2023.
- Stensrud, D. J. & Wandishin, M. S. 2000. The Correspondence Ratio in Forecast Evaluation. *Wea. Weather and Forecasting* [online] 15. Disponível: [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(2000\)015%3C0593:TCRIFE%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(2000)015%3C0593:TCRIFE%3E2.0.CO;2). Acesso: 16 jun. 2024.
- Sun, X. et al. 2023. A Case Study Investigating the Low Summertime CAPE Behavior in the Global Forecast System. *Weather and Forecasting* [online] 39. Disponível: <https://doi.org/10.1175/WAF-D-22-0208.1>. Acesso: 16 jun. 2024.
- Tyagi, B., Naresh Krishna, V. & Satyanarayana, A.N.V. 2011. Study of thermodynamic indices in forecasting pre-monsoon thunderstorms over Kolkata during STORM pilot phase 2006–2008. *Natural Hazards* [online] 56. Disponível: <https://doi.org/10.1007/s11069-010-9582-x>. Acesso: 16 jun. 2024.
- UFSC. Universidade Federal de Santa Catarina, 2013. 2ª Edição do Atlas Brasileiro de Desastres Naturais - 1991 a 2012. Florianópolis.
- Ynoue, R. Y. et al. *Meteorologia*. São Paulo: USP/Univesp/Edusp, 2014.