



Revista Brasileira de Geografia Física

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



Avaliação do modelo Weather Research and Forecasting (WRF) na simulação operacional de um evento de frente fria no sudeste do Brasil

Aline Aquino de Araujo¹, Denis William Garcia², Juliano dos Reis Monteiro³, Thales Victor Miguel⁴, Bruno de Campos⁵, Vanessa Silveira Barreto Carvalho⁶ e Michelle Simões Reboita⁷

¹ Graduanda em Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Itajubá, Instituto de Recursos Naturais, Av. BPS 1303, bairro Pinheirinho, CEP 37500-903, Itajubá, Minas Gerais. (35) 3629-1703. (35) 9102-5193, alineaaraujo@outlook.com. ² Graduando em Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Itajubá, Instituto de Recursos Naturais, Av. BPS 1303, bairro Pinheirinho, CEP 37500-903, Itajubá, Minas Gerais. (35) 3629-1703. (35) 9102-5193, denis.william2203@gmail.com. ³ Graduando em Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Itajubá, Instituto de Recursos Naturais, Av. BPS 1303, bairro Pinheirinho, CEP 37500-903, Itajubá, Minas Gerais. (35) 3629-1703. (35) 9102-5193, juliano.rmonteiro@gmail.com. ⁴ Graduando em Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Itajubá, Instituto de Recursos Naturais, Av. BPS 1303, bairro Pinheirinho, CEP 37500-903, Itajubá, Minas Gerais. (35) 3629-1703. (35) 9102-5193, thalesvictormiguel@gmail.com. ⁵ Mestrando em Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Itajubá, Instituto de Recursos Naturais, Av. BPS 1303, bairro Pinheirinho, CEP 37500-903, Itajubá, Minas Gerais. (35) 3629-1703. (35) 9102-5193, bcampos.f90@gmail.com. ⁶ Docente da Universidade Federal de Itajubá, Instituto de Recursos Naturais, Av. BPS 1303, bairro Pinheirinho, CEP 37500-903, Itajubá, Minas Gerais. (35) 3629-1703. (35) 9102-5193, vanessa.silveira@unifei.edu.br. ⁷ Docente da Universidade Federal de Itajubá, Instituto de Recursos Naturais, Av. BPS 1303, bairro Pinheirinho, CEP 37500-903, Itajubá, Minas Gerais. (35) 3629-1703. (35) 9102-5193, mireboita@unifei.edu.br.

Artigo recebido em 31/05/2022 e aceito em 05/09/2022

RESUMO

A região sudeste do Brasil é afetada o ano todo por sistemas transientes como as frentes frias. A incursão de sistemas frontais, além de afetar o dia a dia da população, pode causar danos e prejuízos a diversos setores da sociedade. Um modelo que é utilizado operacionalmente para a previsão de tempo no sul de Minas Gerais desde 2014 no Centro de Estudos de Previsão de Tempo e Clima de Minas Gerais (CEPreMG) da Universidade Federal de Itajubá é o *Weather Research and Forecast* (WRF). Em 2019, em decorrência da disponibilidade de dados do *Global Forecast System* (GFS) com maior resolução horizontal para a geração das condições iniciais e de fronteira necessárias como entrada ao modelo e do aumento da capacidade computacional disponível para as simulações, foram implementadas alterações no sistema em operação no CEPreMG. Assim, este estudo objetiva avaliar o desempenho do WRF na simulação de um sistema frontal que atuou no sudeste do Brasil em agosto de 2021. De forma geral, o modelo WRF simulou corretamente a posição e tempo de atuação do sistema, mas com algumas diferenças na intensidade. Isso não representa propriamente um problema uma vez que a resolução do WRF e dos dados usados na validação são diferentes.

Evaluation of the Weather Research and Forecasting (WRF) model in the operational simulation of a cold weather event in southeastern Brazil

ABSTRACT

The southeastern region of Brazil is affected throughout the year by transient systems such as cold fronts. The incursion of frontal systems, in addition to affecting the daily life of the population, can cause damage and losses to various sectors of the society. A model that has been operationally used for weather forecasting in the southern region of Minas Gerais since 2014 at the Minas Gerais Weather and Climate Forecast Studies Center (CEPreMG) at the Federal University of Itajubá is the *Weather Research and Forecast* (WRF). In 2019, due to the availability of higher horizontal resolution data from the *Global Forecast System* (GFS) to generate the initial and boundary conditions necessary as inputs to the model and due to the increase in the computational capacity available, changes were implemented in the operational forecast system at CEPreMG. Thus, this study aims to evaluate the performance of the WRF in the simulation of a frontal system that was registered in the southeastern of Brazil in August 2021. In general, WRF model correctly simulated the position and evolution of the system, but with some differences regarding the intensity. This is not really a problem since the resolution of the WRF and the data used in the validation are different.

Introdução

A região sudeste do Brasil (SEB) é afetada o ano todo por sistemas transientes como as frentes frias (Escobar et al., 2019; Gan et al., 2020; Ferreira e Albuquerque Cavalcanti, 2022, p. 16). Esses sistemas, caracterizados pelo contraste térmico entre massas de ar de diferentes propriedades térmicas (Bjerknes e Solberg, 1922), causam grandes modificações no tempo das regiões onde atuam. Escobar et al. (2019) mostraram que a média anual da atuação de frentes frias de origem polar, no Estado de São Paulo, é de 25 sistemas. A passagem desses sistemas sobre o Brasil geralmente está associada à configuração de ciclones extratropicais na costa sul-americana. A formação de ciclones, de acordo com Reboita e Marafon (2021), são mais frequentes no inverno austral, tendo como principais mecanismos de gênese os contrastes de temperatura do ar e a presença de correntes de jato em altos níveis da atmosfera (Ahrens & Henson, 2021). Já Silva et al. (2014), ao elaborarem uma climatologia de frentes frias no sul de Minas Gerais sem diferenciar os tipos de frentes, obtiveram que as frentes frias são responsáveis por 56% do total da precipitação na primavera, enquanto a contribuição decresce para 27% durante o verão.

O SEB é o principal polo econômico do país e concentra a maior parte da população brasileira com cerca de 90 milhões de habitantes (IBGE, 2020). A economia da região é diversificada, tendo contribuição dos setores agrícola, industrial, de comércio e de serviços. Portanto, a incursão de sistemas frontais, além de afetar o dia a dia da população, pode causar danos e prejuízos significativos a diversos setores da economia. Logo, para minimizar os impactos destes sistemas, os modelos de previsão de tempo devem ser eficientes na previsão das frentes frias. Um modelo que é utilizado para a previsão de tempo no sul de Minas Gerais em modo operacional no Centro de Estudos de Previsão de Tempo e Clima de Minas Gerais (CEPreMG; Campos et al., 2016), na Universidade Federal de Itajubá, é o *Weather Research and Forecast* (WRF; Skamarock et al., 2019). Esse modelo é utilizado para simulações de diversos eventos climáticos (Feng et al., 2019), inclusive eventos de mesoescala onde resolve equações tridimensionais de Euler. Além disso é possível caracterizar diversas condições físicas e numéricas para um determinado conjunto de dados (Gonzalez Alonso-de-Linaje et al., 2019; Skamarock et al., 2008). É importante que o modelo contenha alta resolução pois resoluções grosseiras não representam bem

eventos de precipitação extrema (Wehner et al. 2014, 2020). Em 2014 foi implementado no CEPreMG, inicialmente, sendo dirigido a partir dos resultados do *Global Forecast System* (GFS; Campos et al., 2016) com resolução horizontal de 0,5° e com três grades aninhadas com resolução horizontal de 27, 9 e 3 km, respectivamente. Esse sistema de previsão foi denominado de Sistema Numérico-Operacional de Previsão de Tempo do Sul de Minas Gerais (SiNOPT) por Campos et al. (2016).

A primeira versão do SiNOPT foi avaliada por Campos et al. (2016), que verificaram: (a) bons resultados para a previsão da temperatura do ar e umidade relativa a 2 metros de altura; e (b) resultados satisfatórios para a precipitação acumulada mensal. Dessa forma, os autores consideraram o sistema de previsão como uma ferramenta eficiente. Contudo, em 2019, em decorrência da disponibilidade de dados do GFS com maior resolução horizontal, isto é 0,25° e do aumento da capacidade computacional disponível para as simulações, foram implementadas alterações no sistema em operação considerando: (a) uma nova versão do modelo WRF (versão 4.0), (b) um domínio maior do que o inicialmente considerado e (c) apenas duas grades aninhadas com resolução horizontal de 12 e 3 km.

Como ainda não foram realizados estudos para validar as novas configurações do SiNOPT, o objetivo do presente estudo é avaliar a performance da nova versão do WRF instalada no CEPreMG na simulação de um sistema frontal que atuou no sudeste do Brasil em agosto de 2021, com a intenção de se verificar a capacidade do modelo WRF usado no estudo na caracterização de frentes frias.

Metodologia

Período de estudo e dados utilizados

Para verificar a habilidade do WRF em simular fenômenos meteorológicos de escala sinótica foi selecionado um evento de frente fria que atingiu o sudeste do Brasil entre os dias 27 e 28 de agosto de 2021. Para uma breve descrição sinótica da evolução da frente fria durante o período de interesse, foram utilizadas as cartas sinóticas do Centro de Previsão de Tempo e Clima (CPTEC) e do Centro de Hidrografia da Marinha do Brasil. Também foram utilizados para a avaliação dos resultados obtidos a partir do WRF, os dados da reanálise ERA5 do Centro Europeu de Previsão do Tempo de Médio Prazo (da sigla em inglês, ECMWF; Herbash et al., 2020), com

resolução de 0,25° x 0,25° de latitude/longitude e 37 níveis verticais em coordenadas de pressão. As variáveis atmosféricas e os respectivos níveis de pressão utilizados estão listadas na Tabela 1.

Tabela 1: Variáveis meteorológicas do modelo WRF e da reanálise do ERA5.

Variáveis Atmosféricas	Unidades	Níveis de pressão (hPa)
Geopotencial (convertido posteriormente para altura geopotencial)	$\text{m}^2 \text{s}^{-2}$	500, 700 e 850
Umidade relativa	%	500
Temperatura	°C	700 e 850
Componente zonal e meridional (convertido posteriormente para magnitude)	m s^{-1}	700 e 850

Para a avaliação da precipitação associada ao sistema frontal, foram considerados os dados obtidos da análise de chuva do *Climate Prediction Center* (CPC), a qual fornece dados diários de precipitação a partir de uma análise global pertencente ao Projeto de Precipitação Unificada da agência americana *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA). Os dados foram obtidos no website: <https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.cpc.global_precip.html>.

Configurações do Modelo WRF

Os resultados das simulações geradas pelo SiNOPT, em operação no CEPreMG, foram utilizados neste estudo. O SiNOPT realiza previsões diárias para 72 horas com o modelo WRF para a região Sul do estado de Minas Gerais sendo as primeiras 24 horas da simulação descartadas das análises com o propósito de eliminar erros de “spin-up”. Os resultados diários são disponibilizados para o público em geral e podem ser obtidos em: <<https://meteorologia.unifei.edu.br/modelos/>>.

As condições iniciais e de fronteira necessárias são provenientes das rodadas operacionais do modelo global GFS, com resolução horizontal de 0,25° e resolução temporal de 3 horas. O modelo foi configurado com duas grades aninhadas com resolução espacial horizontal de 12 km (d01) e 3 km (d02), conforme Figura 1, utilizando 42 níveis verticais em ambas. As parametrizações aplicadas foram WSM3 (microfísica de nuvens; Hong et al., 2004), Grell-Freitas (convecção cumulus, ativa somente para d01; Grell e Freitas, 2014), RRTM (radiação de onda-longa; Mlawer et al., 1997), Dudhia (radiação de onda-curta; Dudhia, 1989), Yonsei University (camada limite planetária; Hong et al., 2006), e Noah Land Surface Model (camada de superfície; Niu et al., 2011; Yang et al., 2011).

Uma vez que o objetivo deste estudo é analisar a representatividade do modelo WRF em simular um evento de escala sinótica, apenas os resultados obtidos para a grade 1 das variáveis listadas na Tabela 1 foram considerados para as análises.

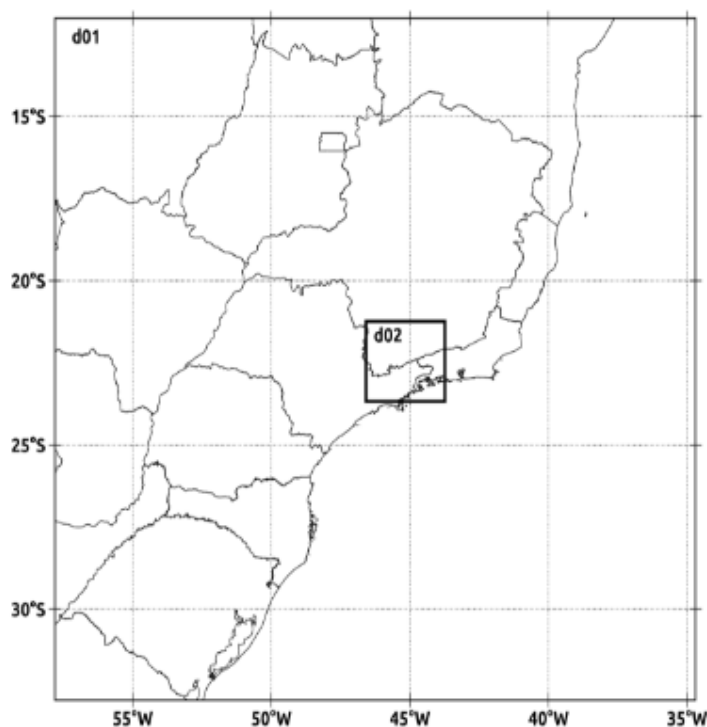


Figura 1: Área de estudo e configuração das grades do WRF, sendo: grade 1 (d01) de 12 km e a grade 2 (d02) de 3 km.

Análises realizadas

Primeiramente, com base nas cartas sinóticas, foi realizada uma descrição meteorológica para a caracterização da evolução e deslocamento do sistema frontal estudado. Em seguida, a partir dos dados provenientes de reanálise do ERA5 e da precipitação do CPC, foram gerados mapas, através do *software* GrADS, a fim de comparar os campos meteorológicos das reanálises com os resultados do modelo WRF. Os mapas gerados correspondem a: i) função frontogenética, evidenciando as áreas propícias a frontogênese (valores positivos) e frontólise (valores negativos); ii) precipitação (mm/dia); iii) umidade relativa do ar e altura geopotencial em 500 hPa e iv) temperatura em 925 hPa e magnitude do vento em 850 hPa.

A função frontogenética usada no estudo segue a de Petterssen (1956) e foi calculada para os níveis de 850 e 700 hPa e feito a média destes dois níveis. A função frontogenética de Petterssen é dada pela equação:

$$F = \frac{1}{2} |\nabla \theta_E| (D \cos 2\gamma - \delta)$$

onde:

$|\nabla \theta_E|$: é o módulo do gradiente de temperatura potencial equivalente.

D : resultante horizontal de deformação.

γ : ângulo entre o eixo de dilatação e o gradiente de temperatura.

δ : divergência.

Resultados e discussões

Análise Sinótica, Função frontogenética e vetores do vento em 850 hPa

A Figura 2 mostra a passagem de um sistema frontal no Sudeste do Brasil entre os dias 27 a 28 de agosto de 2021 nas cartas sinóticas de superfície do CPTEC/INPE (Figura 2A, 2C, 2E e 2G). Vale destacar que essa é uma apresentação apenas para contextualização da frente fria, já que a identificação do sistema usa a subjetividade do previsor de tempo e pode divergir de outros campos atmosféricos e imagens de satélite. Na Figura 2A (27/08/2021 - 0000 UTC) nota-se o posicionamento da frente fria, com característica semi-estacionária, sobre a maior parte do Estado de São Paulo. Na retaguarda da frente fria, predomina o ar mais frio. Já na Figura 2C (27/08/2021 - 1200 UTC), se comparada a do horário anterior, se percebe a desconfiguração do sistema frontal sobre o interior do país, predominando apenas sobre o

estado de São Paulo e o oceano Atlântico. Sobre o Rio Grande do Sul, predomina a alta pressão pós-frontal. Na Figura 2E (28/08/2021 - 0000 UTC), há o desaparecimento do ramo estacionário sobre São Paulo e, ao mesmo tempo, a frente fria avança em direção ao sul de Minas Gerais. Por fim, na Figura 2G, há o aparecimento do ramo estacionário. Além disso, nota-se a presença da alta pressão pós-frontal deslocada a leste (em relação às figuras anteriores)

sobre o oceano Atlântico. A Figura 2 também apresenta as cartas sinóticas produzidas pela Marinha do Brasil (Figura 2B, 2D, 2F e 2H). Notam-se algumas diferenças em relação às cartas do CPTEC como, exemplo, na Figura 2B a frente fria localiza-se mais para sul do que na carta do CPTEC e nos demais campos, atuando no interior do continente, enquanto no CPTEC a frente só atua sobre uma pequena parte do sudeste.

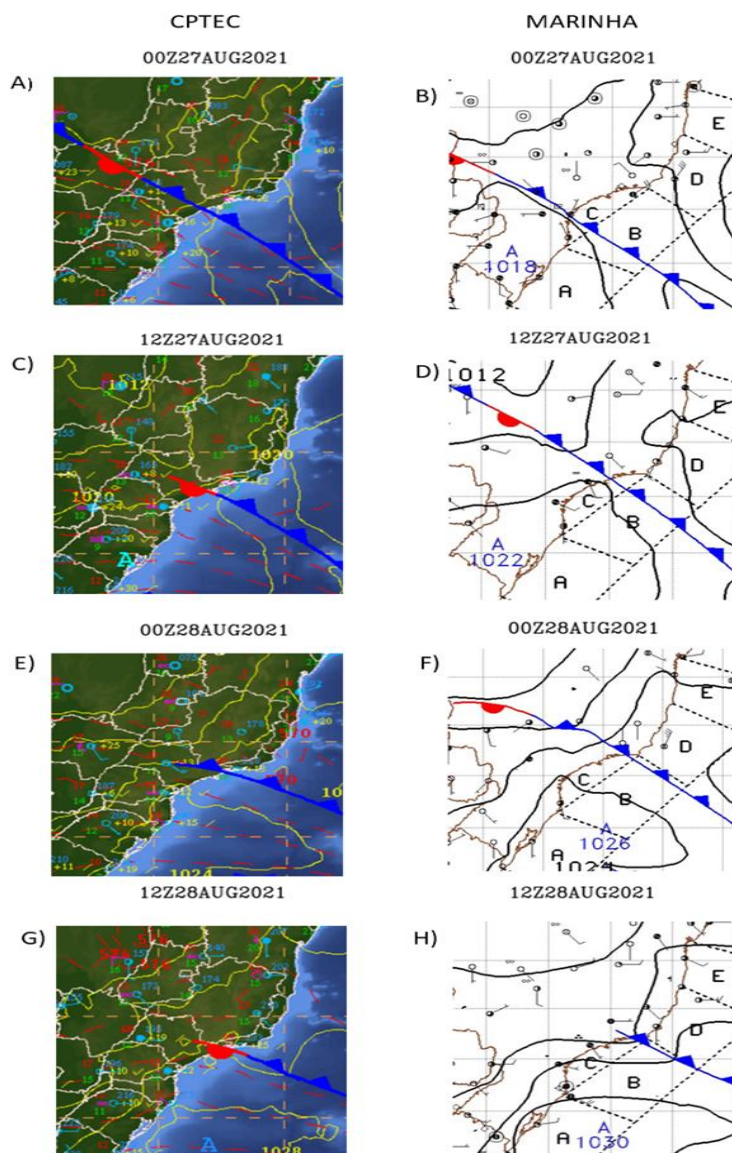


Figura 2: Cartas sinóticas de superfície do CPTEC/INPE (2A, 2C, 2E e 2G) e da Marinha do Brasil (2B, 2D, 2F e 2H), sendo que (A) e (B) 0000 UTC do dia 27 de agosto de 2021 (C) e (D) 1200 UTC do dia 27 de agosto de 2021; (E) e (F) 0000 UTC do dia 28 de agosto de 2021; (G) e (H) 1200 UTC do dia 28 de agosto de 2021.

A comparação das cartas sinóticas com a evolução da função frontogenética e dos vetores de direção e magnitude do vento em 850 hPa nos dias 27 e 28 de agosto de 2021 mostra maior

similaridade entre a simulação e as cartas da Marinha do Brasil. Além disso, uma comparação é realizada com a reanálise ERA5. No modelo WRF às 0000 UTC do dia 27, os máximos valores

positivos da função frontogenética indicam que a frente fria estende-se do norte do Paraná em direção ao oceano Atlântico (Figura 3A) e essa característica é menos configurada na ERA5 (Figura 3B). Às 1200 UTC do dia 27, a função frontogenética mostra uma intensificação no Estado do Mato Grosso do Sul e na borda entre Paraná e São Paulo, ficando a posição da frente fria muito mais configurada no WRF do que na ERA5 (Figura 3C e 3D). Às 0000 UTC do dia 28 (Figura 3E), a frente fria estende-se do sul de Mato Grosso, passa pelo sul de São Paulo e oceano Atlântico no WRF. Na ERA5 (Figura 3F), a frente ocupa posição similar, embora menos caracterizada no campo da função frontogenética. Semelhante aos

resultados encontrados por Andretta (2018), observa-se que locais onde se encontram os valores elevados de precipitação correspondem simultaneamente aos locais de frontogênese positiva. Por fim, às 1200 UTC do dia 28, WRF e ERA5 mostram a frente muito bem configurada entre o noroeste de São Paulo e o oceano Atlântico. Em síntese, em função da maior resolução horizontal do modelo WRF, a posição da frente fria é mais bem identificada do que na ERA5. Por outro lado, ambos os dados indicaram posição similar para a frente fria ao longo dos dias 27 e 28, enquanto o modelo WRF se mostrou mais conciso com as cartas sinóticas da Marinha.

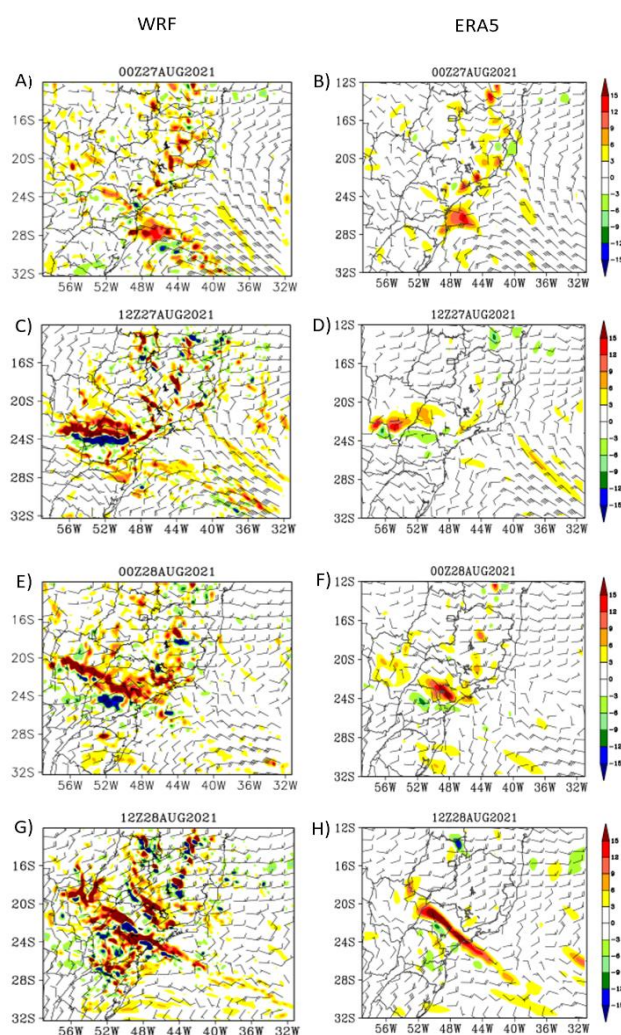


Figura 3: Evolução da função frontogenética ($10^{-10} \text{ K m}^{-1} \text{ s}^{-1}$; preenchido) e vento em 850 hPa (vetores). Valores positivos (negativos) indicam frontogênese (frontólise). Comparação entre o modelo WRF (3A, 3C, 3E e 3G) e dados de reanálise do ERA-5 (3B, 3D 3F e 3H), sendo que (A) e (B) 0000 UTC do dia 27 de agosto de 2021 (C) e (D) 1200 UTC do dia 27 de agosto de 2021; (E) e (F) 0000 UTC do dia 28 de agosto de 2021; (G) e (H) 1200 UTC do dia 28 de agosto de 2021.

Precipitação

Os valores do acumulado de precipitação diária durante a passagem da frente fria sobre a região Sul e Sudeste do país são mostrados na Figura 3. O modelo WRF é comparado com a análise de chuva do CPC, que é considerada a observação. Em ambos os conjuntos, a precipitação do dia atual corresponde ao acumulado das 1200 UTC do dia anterior às 1200 UTC do dia atual. Destaca-se que o importante é a localização da chuva no modelo WRF, pois em termos de intensidade, ambos os conjuntos irão ser diferentes em função da resolução horizontal, da qual o modelo com resolução grosseira tende a ter uma maior dificuldade em representar eventos extremos de precipitação (Wehner et al. 2014, 2020). No dia 28 de agosto, os dados do CPC (Figura 3B) mostram uma faixa de precipitação com valores entre 10 e 20 mm registrados entre o norte do Paraná e o norte de São Paulo, enquanto a chuva aparece concentrada numa faixa mais a sul no WRF. A localização da precipitação no CPC é tomada como correta e se destaca aqui que os modelos atmosféricos utilizam parametrizações para fazer a previsão da precipitação. Logo, erros são esperados.

Campos Sinóticos

Na Figura 4 é apresentada a altura geopotencial e a umidade relativa para o nível de 500hPa. O modelo WRF simula as variáveis atmosféricas com padrão e intensidade similar à reanálise.

A maior diferença encontrada no campo de umidade relativa é registrada na Figura 4C-D. Onde na figura do ERA5 notamos maiores valores de umidade relativa entre as coordenadas 56o W e 24o S do que comparados ao WRF.

A banda com maior umidade relativa auxilia a identificar a posição da frente fria. Já o campo de altura geopotencial é um indicativo da temperatura entre 1000 e 500 hPa, com estes dois parâmetros encontra-se a frente fria sobre a região do Paraná e sul de São Paulo (Figura 4A) e, consequentemente, o campo de altura geopotencial possuem valores menor ao comparar com a região dianteira da frente fria. Isso ocorre, pois o ar frio avança após passagem da frente fria, fazendo com que a espessura da camada diminua e a altura geopotencial tenha menor valor.

Ao observar o dia 28 de agosto às 1200Z (Figura 4G e 4H), nota-se que a espessura da camada possui maior valor em comparação com a figura 4A, desta maneira indicando que a região antes ocupada por uma massa de ar fria, está perdendo força e aumentando sua espessura, o que caracteriza um aumento da temperatura em superfície.

Em comparação com os dados do ERA5, o campo de altura geopotencial do modelo WRF, obteve maior diferença entre as figuras 4E e 4F, onde o WRF indica que próximo a frente fria há grande variação na espessura da camada, o que não é indicado pelo ERA5.

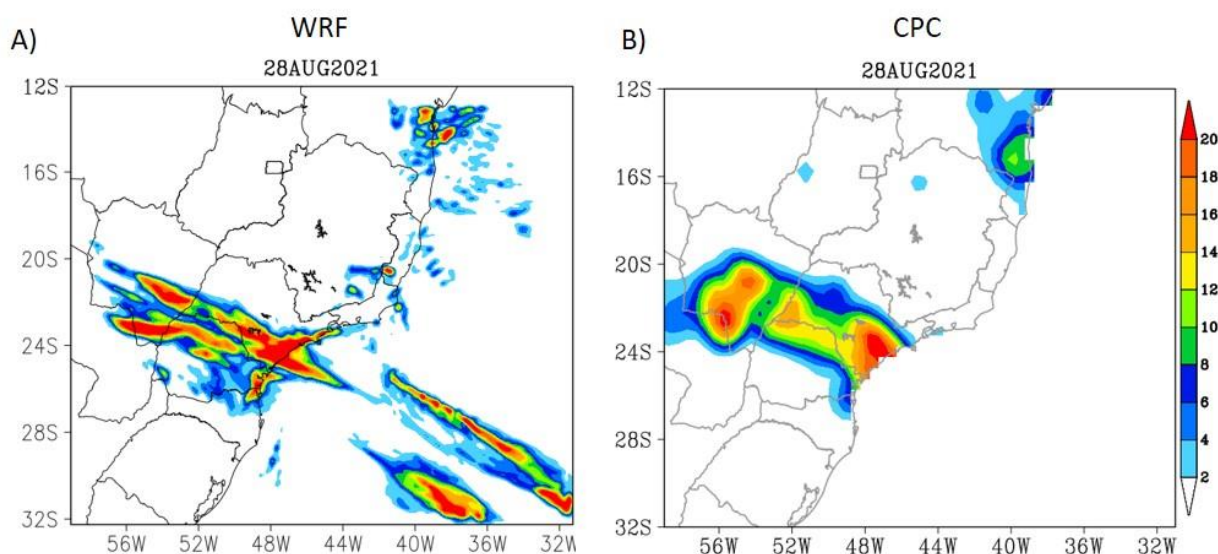
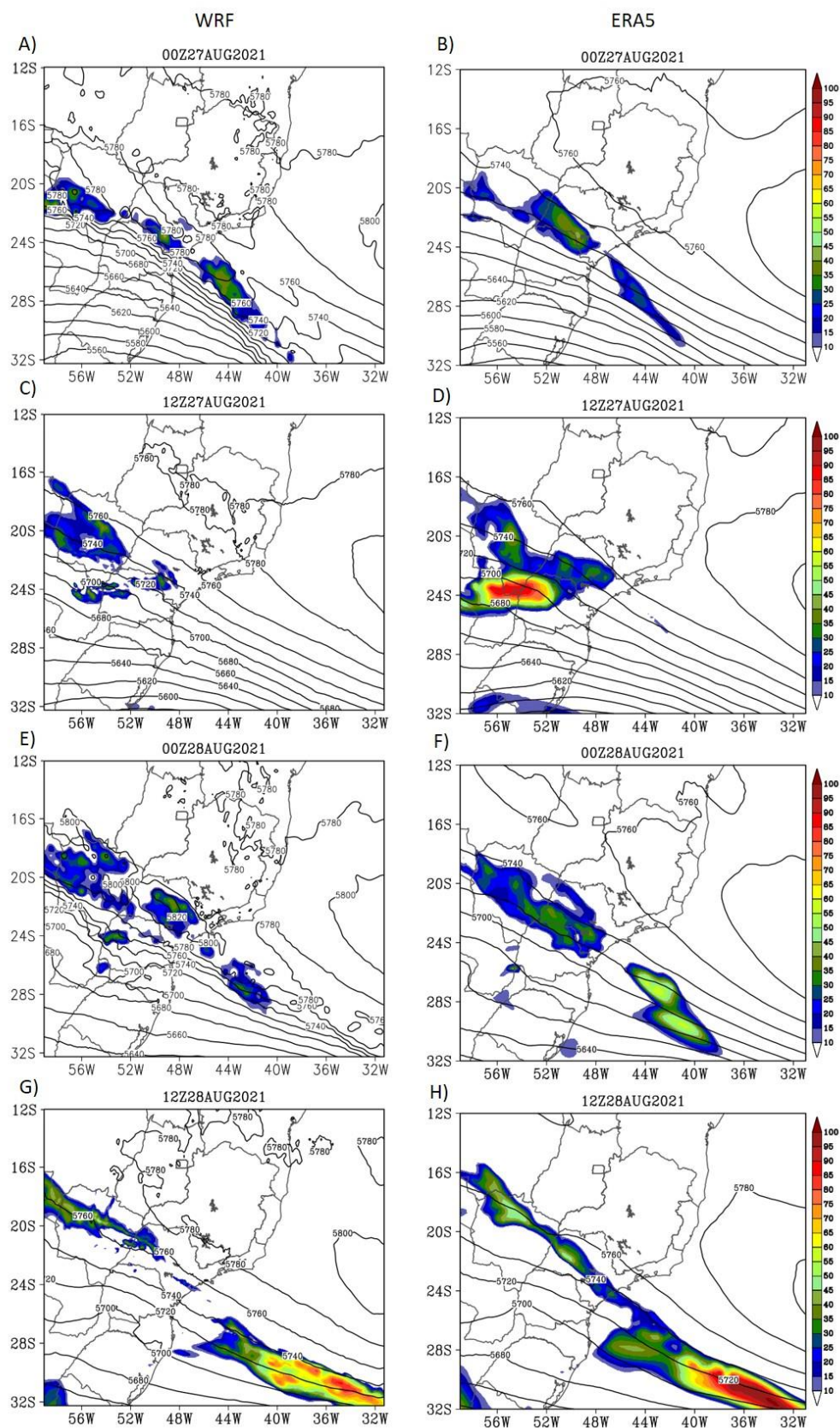


Figura 3: Precipitação (mm). Comparação entre o modelo WRF (à esquerda) e dados do CPC (à direita), sendo que (a) e (b) representa o acumulado de precipitação 28 de agosto de 2021 às 1200 UTC.



Às 0000 UTC do dia 27, ambos WRF e ERA-5 mostram a convergência dos vetores de vento em 850 hPa no norte do Estado do Paraná, o que é mais um indicativo da posição da frente fria. Além disso, a norte e a sul da região de convergência predominam massas ar quente e fria, respectivamente, o que destaca o contraste térmico que é um dos principais mecanismos de gênese dos ciclones (Ahrens & Henson, 2021). Às 1200 UTC já há ventos de quadrante sul sobre o sul de São Paulo, indicando que a frente já está nesse setor. No dia 28 é mais evidente o escoamento de sul e sudeste sobre São Paulo e ao mesmo tempo a redução das temperaturas sobre esse Estado. Às 1200 UTC do dia 28 nota-se uma redução da temperatura sobre o interior de Minas Gerais, indicando que a frente teve reflexos também nesta região.

Na Figura 6, é possível observar o viés da temperatura calculada a partir da diferença entre a temperatura simulada pelo modelo e os dados da ERA-5. O WRF apresenta valores superiores de temperatura no período noturno, o que indica que o modelo superestima os dados observados neste período. Esta diferença se mostrou mais evidente na Figura 6A, onde se encontrava a frente fria, que estava localizada próximo a região sul do Mato Grosso do Sul, diferença no em torno de 5 °C podem ser encontrados. No entanto, para a região do Sul de Minas Gerais, o modelo WRF superestimou a temperatura apenas para o dia 28 de agosto às 0000 UTC. Desta maneira, pode-se dizer que o modelo previu de forma coerente as temperaturas da região.

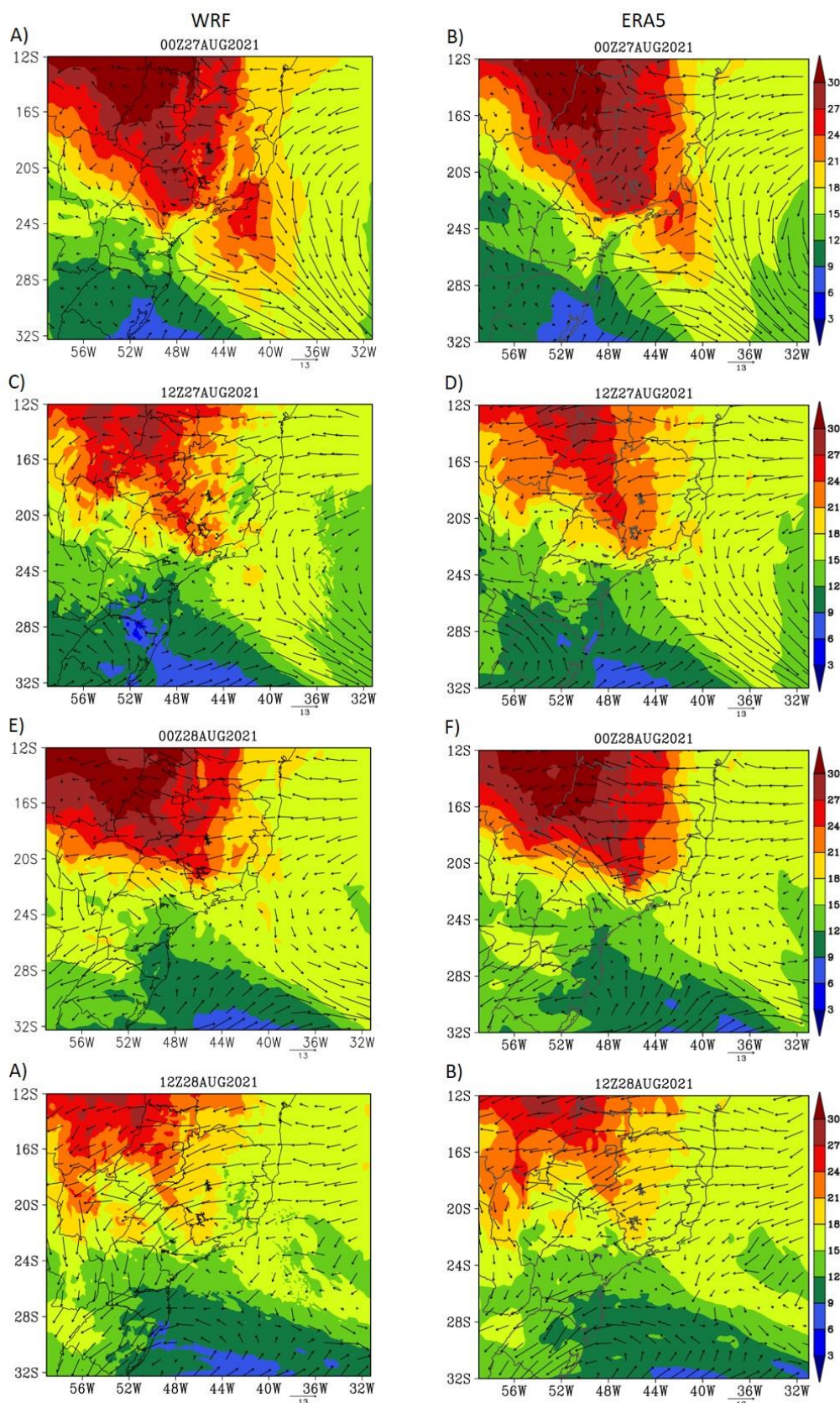


Figura 5: Temperatura (°C) em 925 hPa (preenchido) e magnitude e direção do vento em 850 hPa (vetores). Comparação entre o modelo WRF (coluna à esquerda) e dados de reanálise do ERA-5 (coluna à direita), sendo que (a) e (b) 0000 UTC do dia 27 de agosto de 2021; (c) e (d) 1200 UTC do dia 27 de agosto de 2021; (e) e (f) 0000 UTC do dia 28 de agosto de 2021; (g) e (h) 1200 UTC do dia 28 de agosto de 2021.

Figura 6: Diferença de Temperatura do Ar (0C) simulada pelo WRF na d01 e os dados ERAS para (a) 0000 UTC do dia 27 de agosto de 2021; (c) 1200 UTC do dia 27 de agosto de 2021 (b) 0000 UTC do dia 28 de agosto de 2021; e (d) 1200 UTC do dia 28 de agosto de 2021

Na Figura 7, as imagens geradas do viés de temperatura representam apenas uma porção da grade 1 para destaque da região sul de Minas Gerais. Com isso percebe-se que durante o horário noturno, o modelo WRF faz um prognóstico de temperatura maior do que o dado de reanálise do ERA-5.

Como dito anteriormente, há grande possibilidade desta diferença ocorrer devido a sensibilidade do WRF em questão da temperatura. Para o horário das 1200 UTC, surgem alguns pontos onde há diferença negativa de temperatura, ou seja, o modelo WRF previu que as temperaturas seriam menores do que o registrado.

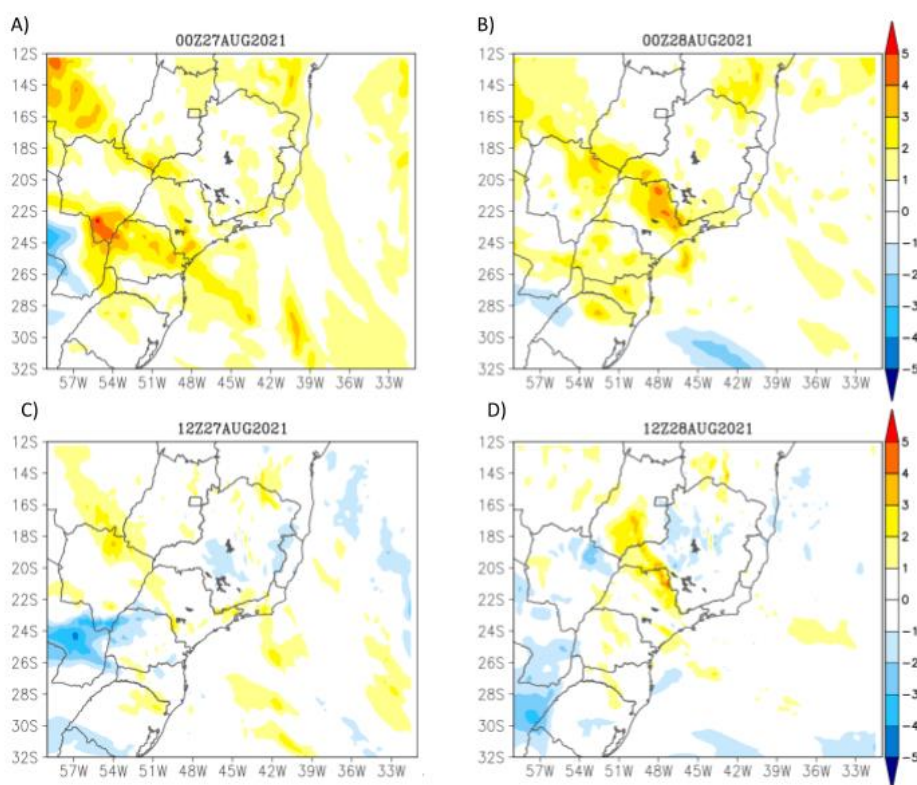


Figura 7: Diferença de Temperatura do Ar (0C) simulado pelo WRRF na d02 e os dados do ERAS para (a) 0000 UTC do dia 27 de agosto de 2021; (c) 1200 UTC do dia 27 de agosto de 2021; (b) 0000 UTC do dia 28 de agosto de 2021; e (d) 1200 UTC do dia 28 de agosto de 2021.

Conclusão

Este estudo teve como principal objetivo avaliar o desempenho do modelo WRF em simular a atuação de um sistema frontal no Sudeste do Brasil entre os dias 27 e 28 de agosto de 2021. Para isso, foram utilizados dados meteorológicos da reanálise ERA5 e de precipitação do CPC/NOAA a fim de comparar e validar a representação do modelo supracitado. Os resultados indicam que, em geral, o modelo consegue representar a posição e o deslocamento do sistema frontal e também a localização dos mínimos e máximos das variáveis consideradas, exceto no caso da precipitação. Conclui-se que o modelo WRF representa de forma coerente as condições atmosféricas de escala sinótica sendo, portanto, uma ferramenta útil para a previsão de tempo.

Agradecimentos

Os autores agradecem a coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pelo apoio financeiro necessário para a realização deste trabalho.

Referências

- Ahrens, C. D., Henson, R., 2021. *Meteorology today: an introduction to weather, climate, and the environment*. Cengage learning.
- Alvarenga, L. A., 2012. Precipitação no sudeste brasileiro e sua relação com a Zona de Convergência do Atlântico Sul. *Revista Agrogeoambiental*, 4.
- Andrade, K. M., 2005. *Climatologia e comportamento dos sistemas frontais sobre a América do Sul*. Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Meteorologia. INPE – Instituto Nacional de Pesquisa Espacial. São José dos Campos.
- Andretta, T. A., 2018. Investigation of WRF Microphysics Schemes and Dynamics During an Extreme Precipitation Event in East Idaho. *The Open Atmospheric Science Journal*, 12.
- Bjernes, J., Solberg, H., 1922. Life cycle of cyclones and the polar front theory of atmospheric circulation. *Geophys. Publ.*, 3, 4-18.
- Campos, B., Carvalho, V. S. B., 2015. Sistema numérico-operacional de previsão de tempo para a Região Sul de Minas Gerais: Avaliação dos resultados preliminares. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/2784108>
- Campo S. B., Carvalho, V. S. B., Reboita, M. S., 2016. Sistema numérico-operacional de previsão de tempo para a região Sul de Minas Gerais: comparação com dados observados. *Revista Brasileira de Geografia Física* 9, 1017-1029.
- Cardoso, N. K., Souza, R., Comin, A., 2013. Avaliação do Modelo WRF em Relação à Temperatura do Ar e Pressão Atmosférica devido à Passagem de uma Frente Fria sobre a Ilha Deception, Antártica. *Ciência e Natura*, 410-413.
- Carvalho, D. J. S., 2009. *Otimização do modelo numérico de previsão do tempo WRF no contexto de previsão e produção de energia eólica*. Dissertação de Mestrado em Meteorologia e Oceanografia Física - Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal.
- Corte-Real, J. A. M., 2015. A importância da previsão do tempo na prevenção de riscos meteorológicos. *Finisterra*, L, 100, p. 97-105.
- Cotton, W.R.; Anthes, R.A., 1989. *Storms and Cloud Dynamics*. Academic Press, San Diego.
- Dametto, G. S.; Rocha, R. P. Características climáticas dos sistemas frontais na cidade de São Paulo. Disponível em: <https://docplayer.com.br/14813316-Characterísticas-climáticas-dos-sistemas-frontais-na-cidade-de-sao-paulo-guilherme-santini-dametto1-e-rosméri-porfírio-da-rocha2.html>. Acesso em: 25 de setembro de 2021.
- Demaria, M., 1985. Linear response of stratified tropical atmosphere to convection forcing. *Journal of Atmospheric Sciences*, 42, 1944-1959.
- Dudhia, J., 1989 Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model. *Journal of the atmospheric sciences*, 46, 3077-3106.
- Escobar, G.C.J.; Reboita, M.S.; Souza, A., 2019. Climatology of surface baroclinic zones in the coast of Brazil. *Atmosfera*, 32, 129-141.
- Ferreira, N. J., & de Albuquerque Cavalcanti, I. F., 2022. *Sistemas meteorológicos atuantes no Brasil*. Oficina de Textos.
- Feng, Y., Min, J., Zhuang, X., & Wang, S., 2019. Ensemble sensitivity analysis-based ensemble transform with 3D rescaling initialization method for storm-scale ensemble forecast. *Atmosphere*, 10, 24. <https://doi.org/10.3390/atmos10010024>

- Gan, M. A., Ferreira, S. H., Costa, K. R. D., Reboita, M. S., & Piva, E. D., 2020. Ciclones em Superfície nas Latitudes Austrais. Parte III: Energética. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 35, 281-300.
- Gonzalez Alonso-de-Linaje, N., Mattar, C., & Borvarán, D., 2019. Quantifying the wind energy potential differences using different WRF initial conditions on Mediterranean coast of Chile. *Energy*, 188, 116027. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116027>
- Grell, G.A., Freitas, S. R., 2014. A scale and aerosol aware stochastic convective parameterization for Weather and air quality modeling. *Atmospheric chemistry and physics*, 14, 5233–5250.
- Guzmán-Rodríguez, L., Anabor, V., Puhales, F., 2018. Impacto dos esquemas parametrização convectiva do modelo WRF na previsão da precipitação, previsão determinística vs. previsão por conjunto. *Acta de las Jornadas Científicas de la Asociación Meteorológica Española*, 1.
- Gutman, G. J.; Schwerdtfeger, W., 1965. The role of latent and sensible heat for the development of a high pressure system over the subtropical Andes, in the summer. Springer-Verlag.
- Hong, S. Y., Dudhia, J., Chen, S.H., 2004. A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation. *American Meteorological Society*, 132, 103-120.
- Hong, S.Y., Noh, Y., Dudhia, J., 2006. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Monthly Weather review*, 134, 2318-2341.
- Houze, R.A.Jr., 1977. Structure and dynamics of a tropical squall-line system. *Monthly Weather Review*, 105, 1540-1567.
- Jatobá, B. R. G. et al., 2017. Avaliação do potencial eólico para a cidade de Craíbas-AL utilizando o modelo meteorológico WRF em alta resolução. *Revista brasileira de energias renováveis*, 6, 787-810.
- Kalnay, E., 2003. *Atmospheric modeling, data assimilation and predictability*. Nova York: Cambridge University Press.
- Mächel, H.; Kapala, A.; Flohn, H., 1998. Behaviour of the centres of action above the Atlantic since 1881. Part I: Characteristics of seasonal and interannual variability. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 18, 1-22.
- Maddox, R. B., 1980. Mesoscale Convective Complexes. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 61, 1374-1387.
- Martins, R. C. G., 2014. Estudo da sensibilidade do modelo WRF às parametrizações de microfísica de nuvens e à assimilação de dados observados. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Campina Grande.
- Mlawer, E. J., Taubman, S.J. Brown, P.D. Iacono, M.J., Clough, S.A., 1997. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *Journal of geophysical research*, 102, 16,663-16,682.
- Morales, W. A., 2013. Convergência do fluxo de umidade verticalmente integrada e os prognósticos do modelo WRF. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pelotas.
- NCAR - UCAR. National Center for Atmospheric Research - University Corporation for Atmospheric Research, 2021. The Weather Research and Forecasting Model (WRF). Disponível em: <https://www.mmm.ucar.edu/weather-research-and-forecasting-model>. Acesso em: 27 de setembro de 2021.
- Niu, G.Y. et al., 2011. The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah-MP): 1. Model description and evaluation with local-scale measurements. *Journal of geophysical research*, 116, 1-19.
- Palmen, E.; Newton, C. W., 1969. *Atmospheric Circulation Systems*. Academic Press, New York. 13, 471-522.
- Pedroso, D. et al., 2013. Climatologia da função frontogênica sobre a América do Sul em um cenário de clima presente e futuro. *Ciência e Natura*, 187-189.
- Petterssen, S., 1956. *Weather Analysis and Forecasting*. 1 Motion Motion Systems. McGraw-Hill.
- Powers, J. G. et al., 2017. The weather research and forecasting model: Overview, system efforts, and future directions. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98, 1717-1737.
- Ramos, D. N. S., Fernandez, J. P. R., Fisch, G. F., 2016. Sensibilidade de parametrizações de camada limite planetária através do WRF Single-Column Model para o Centro de Lançamento de Alcântara. *Ciência e Natura*, 38, 435-441.
- Reboita, M. S. et al., 2016. Causas da Semi-Aridez do Sertão Nordestino. *Revista Brasileira de Climatologia*, 19.

- Reboita, M. S. et al., 2019. The South Atlantic subtropical anticyclone: present and future climate. *Frontiers in Earth Science*, 7, 8.
- Reboita, M. S., & Marrafon, V. H., 2021. Ciclones Extratropicais: o que são, climatologia e impactos no Brasil. *Terræ Didática*, 17.
- Richardson, L. F., 1922. Weather prediction by numerical process. Cambridge university press.
- Silva, L. J.; Reboita, M. S.; Da Rocha, R. P., 2014. Relação da Passagem de Frentes Frias na Região Sul de Minas Gerais com a Precipitação e Eventos de Geadas. *Revista Brasileira de Climatologia*, [S.l.], v. 14. ISSN 2237-8642. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/36314/23311>. Acesso em: 01 maio 2022. doi:<http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v14i1.36314>.
- Silva, N. P., 2018. Estudo dos Mecanismos Vinculados ao Estabelecimento de um Evento de ZCAS Através de Simulações com o Modelo WRF. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.
- Skamarock, W. C., J. B., 2012. A multiscale nonhydrostatic atmospheric model using centroidal Voronoi tessellations and C-grid staggering. *Monthly Weather Review*, 140, 3090–3105.
- Sun, X., Cook, K. H., Vizzy, E. K., 2017. The South Atlantic subtropical high: climatology and interannual variability. *Journal of Climate*, 30, 3279-3296.
- Tsuchiya, M., 1985. Evidence of a double-cell subtropical gyre in the South Atlantic Ocean. *Journal of Marine Research*, 43, 57-65.
- Virji, H., 1982. An estimate of the summertime tropospheric vorticity budget over South America. *Monthly Weather Review*, 110, 217-224.
- Wehner, M. F., Reed, K. A., Li, F., Bacmeister, J., Chen, C. T., Paciorek, C., ... & Jablonowski, C. (2014). The effect of horizontal resolution on simulation quality in the Community Atmosphere Model, CAM 5.1. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 6(4), 980-997.
- Wehner, M., P. Gleckler, and J. Lee., 2020. Characterization of long period return values of extreme 893 daily temperature and precipitation in the CMIP6 models: Part 1, model evaluation. *Weather and Climate Extremes*, 30, 100283.
- World Meteorological Organization. Secretariat., 1988. Technical Regulations. Volume 1: General Meteorological Standards and Recommended Practices.