



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

**AVALIAÇÃO DAS PREVISÕES DE ALTÍSSIMA RESOLUÇÃO EM REGIÃO
DE TOPOGRAFIA COMPLEXA**

Pedro Paganoto Foligno

Relatório Final de Iniciação Científica do
programa PIBIC/INPE, orientado
pela PhD. Chou Sin Chan e Dra. Claudine
Pereira Dereczynski, com colaboração de
Anna Carolina Bazzanela

INPE

São José dos Campos

2023

RESUMO

No dia 15 de fevereiro de 2022, ocorreu no município de Petrópolis (RJ), um dos eventos de maiores taxas de chuva registradas que desencadeou em desastres naturais no município. De acordo com dados da Defesa Civil, foram registradas mais de 230 mortes e 4 mil desabrigados. No dia do evento, foram registradas 176 ocorrências, sendo 148 por deslizamentos de terra e as demais por alagamento ou transbordamento de rios. Dados do Instituto Estadual do Ambiente (INEA) da estação do Alto da Serra mostram que o acumulado de chuvas nesta data atingiu cerca de 200 mm em 2 horas, sendo que o valor da média mensal de fevereiro equivale a 238,2 mm/mês. O objetivo deste trabalho é elaborar uma análise sinótica deste caso para identificar os fatores dinâmicos e termodinâmicos responsáveis pela ocorrência do evento. Dados de pressão atmosférica ao nível médio do mar, vento, temperatura do ar e umidade em superfície e altura geopotencial, vento, ômega, em diversos níveis da troposfera foram obtidos com a reanálise ERA5 para o período de 13 a 17 de fevereiro de 2022. Os resultados indicaram que o evento foi provocado pela passagem de um sistema frontal (SF), associado à presença de um cavado na média troposfera, promovendo áreas de levantamento do ar em superfície. Tal SF, ao interagir com o ar quente e úmido presente na área de estudo, associado ao Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul, geraram forte instabilidade, intensificada pela orografia da região. Apesar das previsões indicarem chuva no local devido a passagem de uma frente fria, o montante acumulado de chuva observada não foi bem previsto, mesmo na versão de 1km, de altíssima resolução espacial.

Palavras-Chave: Estudo de Caso, Chuvas Extremas, Modelo Eta, Petrópolis

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Acumulados de volume de chuvas (mm/h) registrados pelas estações do CEMADEN e do INMET no dia 15 de Fevereiro de 2022.

Figura 2 - Imagens de Refletividade (dBZ) do radar Pico do Couto entre as 18:40 UTC e 21:30 UTC do dia 15 de Fevereiro de 2022.

Figura 3 - Imagens realçadas do canal Infravermelho do Satélite GOES-16 atualizadas a cada 10 minutos entre às 19:00 GMT e 21:50 GMT do estado do Rio de Janeiro e a cidade de Petrópolis (indicada com um ponto vermelho) para o dia 15 de fevereiro de 2022.

Figura 4 - Pressão Atmosférica ao Nível Médio do Mar (hPa) referente aos horários 00, 06, 12 e 18 UTC do dia 15 de fevereiro de 2022.

Figura 5 - Umidade específica (g/kg, sombreado) e vento (vetor, m/s) em 850 hPa, referente aos horários 00, 06, 12 e 18 UTC do dia 15 de fevereiro de 2022.

Figura 6 - Altura Geopotencial (metros, isolinhas) e vento (m/s, vetor) em 500 hPa referente aos horários 00, 06, 12 e 18 UTC do dia 15 de fevereiro de 2022. Ventos de intensidade superior a 14 m/s estão sombreados.

Figura 7 - Intensidade (m/s) e direção do vento (m/s, vetor) em 250 hPa referente aos horários 00, 06, 12 e 18 UTC do dia 15 de fevereiro de 2022.

Figura 8 - Previsões de precipitação acumulada de 24 h (mm/dia) válidas para as 00Z do dia 16 de fevereiro de 2023, geradas a partir do Modelo Eta - 8 km, para diferentes horizontes de previsão.

Figura 9 - Precipitação acumulada de 72 h (mm/72h) válida para 00Z do dia 17 de fevereiro de 2023: (a) observação MERGE, (b) Previsão do Modelo Eta - 1 km.

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul
CEMADEN	Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais
INEA	Instituto Estadual do Ambiente
PNMM	Pressão a Nível Médio do Mar
SF	Sistema Frontal

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos Gerais e Específicos	2
2. DADOS E METODOLOGIA	2
2.1 Dados	2
2.2 Modelo Eta	3
3. RESULTADOS PRELIMINARES	4
3.1 Observação das Chuvas	4
3.2 Análise das Condições Sinóticas	7
3.3 Avaliação Preliminar das Previsões	10
4. CONCLUSÃO	12
4.1 Próximos Passos	12
4.2 Agradecimentos	12
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	13

1 INTRODUÇÃO

Previsões de altíssima resolução consistem em processos avaliativos de previsões do tempo com uma resolução espacial alta, permitindo características mais detalhadas de uma região de estudo. Áreas com características de grande variabilidade espacial são constantemente utilizadas como referencial para a realização de estudos com modelos, tais como o modelo regional Eta

Este modelo, desenvolvido pela Universidade de Belgrado, juntamente ao Instituto de Hidrometeorologia da Iugoslávia, instalado pelo Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos em 1996, tem a finalidade de complementar a previsão numérica de tempo realizada em anos anteriores com o modelo circulação geral atmosférica, tal conceito é de grande importância para regiões de notável variabilidade espacial, tais como o Sudeste do Brasil.

O período mais úmido do Sudeste é diretamente influenciado pelo regime de monção da América do Sul, e cerca de 80% do volume de chuva anual é registrado no período de março a outubro (Alves et al., 2002), período em que os sistemas meteorológicos na região se encontram intensos, assim como chuvas recorrentes.

Em um desses exemplos temos o caso ocorrido no dia 15 de fevereiro de 2022, onde fortes chuvas atingiram o município de Petrópolis no estado do Rio de Janeiro, deixando mais de 230 mortes e 4 mil desabrigados na região, conforme dados da Defesa Civil do município petropolitano.

Alcântara et al (2023) relata que o município já foi impactado por 1161 eventos catastróficos entre 1940 e 1990, sendo a sua maioria causado por chuvas torrenciais. Segundo dados do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN), foram registrados 250 mm de chuva entre 16:20 e 19:20 GMT, em uma região que possui a climatologia mensal de 185 mm para o mês de fevereiro.

Considerando os impactos citados anteriormente, busca-se identificar quais fatores influenciaram diretamente o evento, seja em termos sinóticos ou dinâmicos, urge uma necessidade de interpretar a atmosfera e os seus comportamentos antes do incidente. Conforme temos uma visão das condições antecedentes à tragédia, é de extrema valia compreender as causas e consequências da situação meteorológica, tal qual ações preventivas com o intuito de mitigar eventuais danos e vítimas em um novo evento.

1.1 Objetivos Gerais e Específicos

Este trabalho tem como objetivo avaliar as previsões de altíssima resolução em eventos extremos na região Serrana do Rio de Janeiro.

O trabalho tem como objetivos específicos:

1. Estudar o caso das chuvas extremas ocorrido no dia 15 de fevereiro de 2022, no município de Petrópolis-RJ; e
2. Avaliar o desempenho das previsões do modelo Eta para as regiões de topografia complexa no Estado do Rio de Janeiro.

2 DADOS E METODOLOGIA

2.1 Dados

Neste estudo foram utilizados os dados de reanálise do ERA5 (HERSBACH et al. 2019), desenvolvidos pelo Centro Europeu de Previsão do Tempo a Médio Prazo (ECMWF), consistem num método o qual os dados observados são combinados com dados dos modelos numéricos para representar de modo coeso as condições atmosféricas gerais. As variáveis utilizadas foram a Pressão a Nível Médio do Mar (PNMM), para níveis de superfície. Para diferentes níveis de pressão, foram analisadas as componentes zonal e meridional, U e V respectivamente, do vento para os níveis de 250, 500 e 850 hPa, velocidade do vento, também nos mesmos níveis e altura geopotencial, este para 500 hPa, além da umidade específica em 850 hPa. Utilizando esses dados para examinar a situação no bairro de Petrópolis no dia 15 de fevereiro e nos dias antecessores e sucessores proporcionam a compreensão dos mecanismos que foram diretamente responsáveis ocorrido na região, tendo um papel essencial em fornecer informações confiáveis e úteis para o entendimento dos padrões durante o fenômeno.

Além dos dados de reanálise, também foram utilizados dados de estações pluviométricas do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN) e do Instituto Estadual do Meio Ambiente (INEA), os quais demonstram

sua utilidade por meio do fornecimento de maneira direta e em tempo real, auxiliando na análise do impacto e eventuais áreas mais afetadas.

O uso dos dados também possui serventia na percepção de eventuais estudos climáticos na região, os quais encontram-se presentes por meio de padrões que podem ou não ser constantes ou sazonais na região.

Também se utilizou -se dados do satélite GOES-16, no canal Infravermelho, do dia 13 até o dia 17 do segundo mês do ano de 2022, assim como os horários padrões de observação em UTC, ou seja, 00, 06, 12 e 18.

A análise desses parâmetros tem como objetivo, a detecção de alterações na temperatura de brilho, ou seja, a presença e a altura de nuvens na região, e dos padrões convectivos que podem evoluir durante ou ao longo dos dias.

2.2 Modelo Eta

As previsões de altíssima resolução do estudo de caso foram provenientes do Modelo Eta/INPE, a 1 km de resolução.

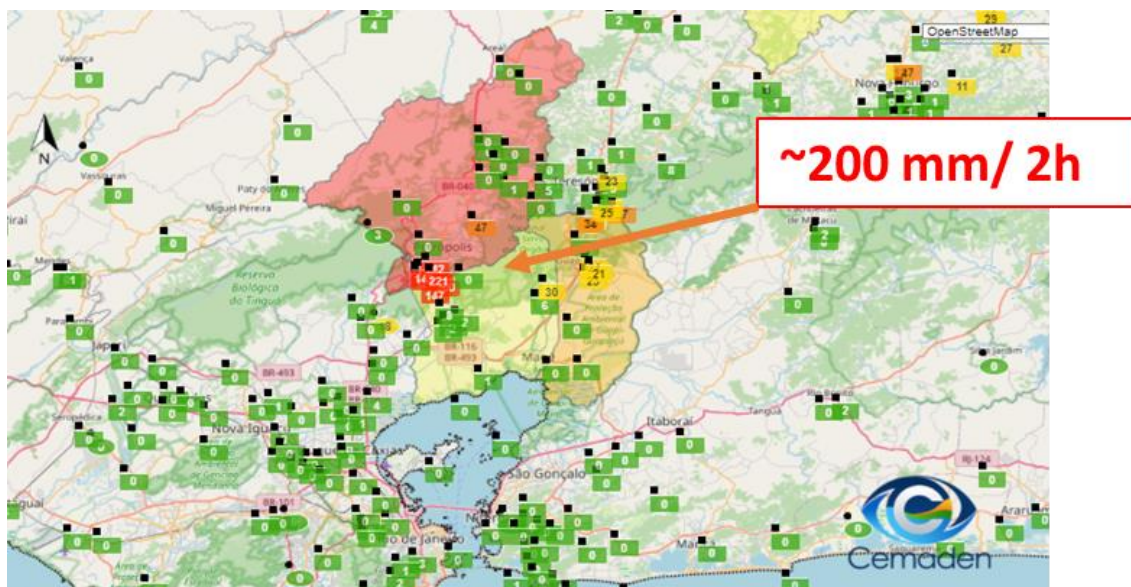
O modelo Eta/INPE é um modelo atmosférico, estado da arte (MESINGER et al, 2012; GOMES et al., 2023) baseado em equações de conservação de massa, energia e momentum. O modelo representa os principais processos atmosféricos que incluem a geração de nuvens e chuva, a turbulência atmosférica, os processos de transferência radiativa na atmosfera pelas ondas curtas e longas, os processos de interação entre a atmosfera-vegetação-solo. A coordenada vertical eta dá o nome ao modelo. Esta coordenada procura corrigir o problema dos modelos. Uma versão do modelo Eta na resolução de 1 km foi desenvolvida e fornece diariamente previsões para uma região que cobre o Vale do Paraíba e região litorânea. A condição de contorno lateral utiliza as previsões do modelo Eta -8km, que por sua vez utiliza as previsões do modelo americano GFS. A topografia é construída a partir do esquema topografia envelope (“envelope topography”) que estima a média das topografias máximas de subgrade. O mapa de solo, vegetação (ou uso do solo), e máscara oceano-terra foram geradas em maior resolução para adequar a altíssima resolução espacial do modelo.

3 RESULTADOS PRELIMINARES

3.1 Observação das chuvas

Analisando dados de precipitação registrados pelas estações do INMET e CEMADEN para o dia 15 de Fevereiro, nota-se na área marcada por vermelho, onde localiza-se o município de Petrópolis, um valor confiável de aproximadamente 200 mm em cerca de 2 horas na parte sul. Geograficamente, a região é dividida em 5 distritos, sendo o 1º distrito, região em que se identificou os maiores índices de chuva no dia, e o local em que se encontra a maior parte populacional da cidade. Ao analisar as estações localizadas ao centro-leste e norte do território, observamos valores bem inferiores em comparação à região do 1o distrito. Sendo assim, podemos chegar à conclusão do evento ter sido intenso, conforme as altas taxas, e localizado, devido às regiões muito próximas terem registrado valores abaixo ao observado na parte mais populacional da região.

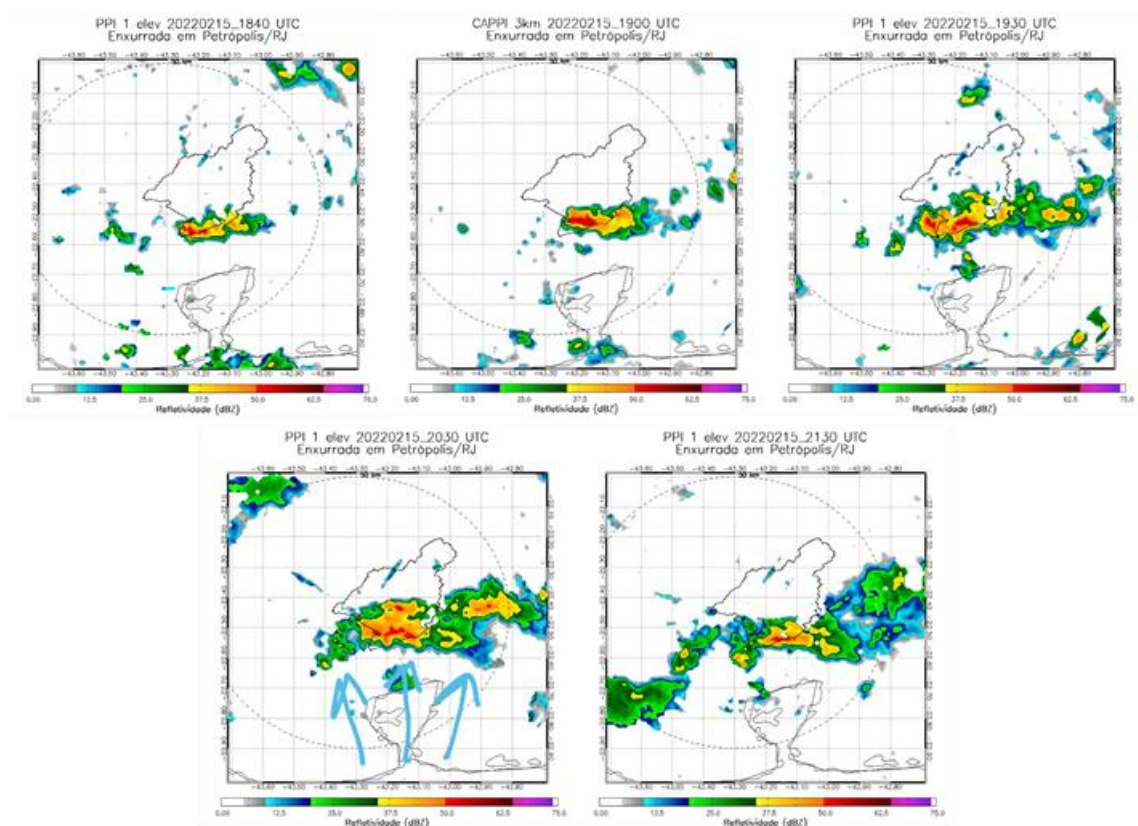
Figura 1 - Acumulados de volume de chuvas (mm/h) registrados pelas estações do CEMADEN e do INMET no dia 15 de fevereiro de 2022.



Analisando imagens do radar na região do Pico do Couto em Petrópolis-RJ, registramos a presença de hidrometeoros na atmosfera, tais como gotas de chuvas, que apesar de estarem em uma distribuição pequena durante as 18:40 UTC, vão crescendo até ocuparem uma grande parte da região às 21:30 UTC.

Em relação a intensidade dessas chuvas, o radar nos mostra ter sido muito intensa e local, conforme as áreas com cores mais quentes, que são representadas pelos valores mais altos na legenda, e que chegam a mais de 50 mm/h irem se expandido na região sul do município até ocupar uma extensão considerável durante às 20:30 UTC, conforme indicado pelas setas em azul, onde uma grande parte registra valores de refletividade superiores a 30 mm/h, indicando uma chuva bastante intensa. Com essas informações, podemos concluir que a precipitação observada na região foi bastante intensa e de curta duração, expandindo-se de modo gradual e constante a partir das 18:40 UTC até às 21:30.

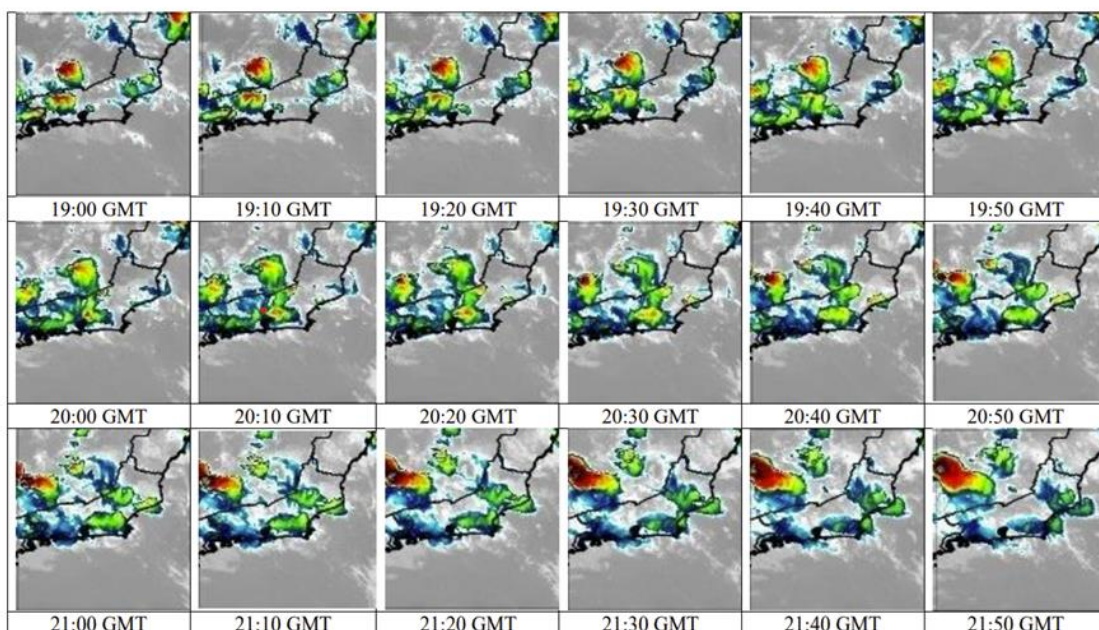
Figura 2 - Refletividade (dBZ) do radar Pico do Couto entre as 18:40 UTC e 21:30 UTC do dia 15 de Fevereiro de 2022



Analisando as imagens do satélite para o estado do Rio de Janeiro, realçadas com cores em relação a cobertura de nuvens, observamos um núcleo de chuva se aproximando da Região Serrana, onde se localiza a cidade de Petrópolis às 19:00 GMT, a partir das 20:10 GMT se expande em todo território oeste fluminense, 10 minutos após, esse núcleo volta a se deslocar para leste, em direção a Região Metropolitana do estado, onde se posiciona ao fim desta observação.

Com relação a sua intensidade, vemos que este núcleo se aproximando tem um caráter intenso baseando em suas cores mais quentes, contudo, diferente do indicado na Figura 2, esse núcleo perde a intensidade, embora encontra-se estacionado no local durante todo o período de observação. Com essas informações, podemos chegar aos resultados que a intensa precipitação ocorrida no local não foi percebida pelo satélite geostacionário, diferente dos dados observadas pelo radar no Pico Couto na Figura 2, entretanto, ambos instrumentos captaram a presença do núcleo de chuva na região durante todo o período observado.

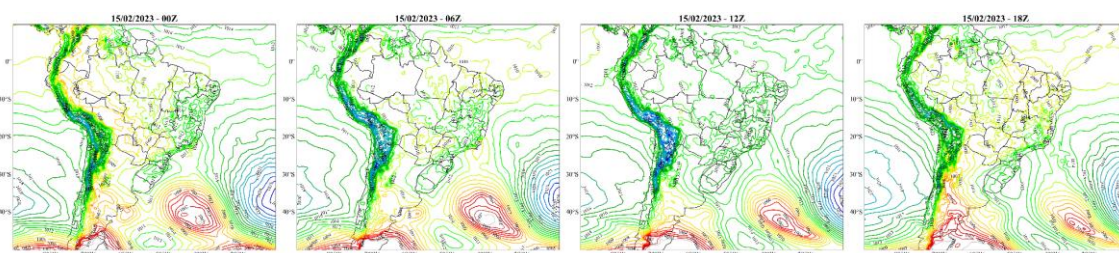
Figura 3 - Imagens realçadas do IV do Satélite GOES-16 atualizadas a cada 10 minutos entre às 19:00 GMT e 21:50 GMT do estado do Rio de Janeiro e a cidade de Petrópolis (indicada com um ponto vermelho) para o dia 15 de fevereiro de 2022.



3.2 Análise das condições sinóticas

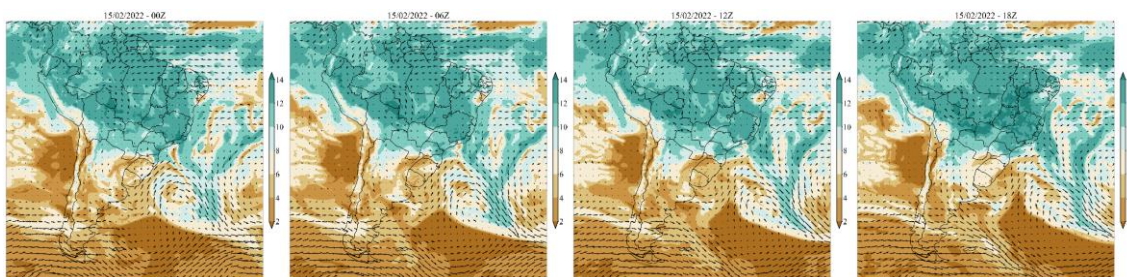
Na Figura 4 são apresentados a PNMM referente aos horários 00, 06, 12 e 18 UTC do dia 15 de fevereiro de 2022. Nota-se a presença de um sistema de baixa pressão em torno de 45°S. Nos horários de 12 e 18 UTC, verifica-se a presença de um cavado em superfície acoplado a esse sistema, que se estende de 20°S a 25°S sobre os estados do RJ, ES e sul de MG.

Figura 4 - Pressão Atmosférica ao Nível Médio do Mar (hPa) referente aos horários 00, 06, 12 e 18 UTC do dia 15 de fevereiro de 2022.



Na Figura 5, onde são apresentados os campos de umidade específica e a direção do vento em 850 hPa, nota-se que o cavado em superfície recebeu suporte de umidade de norte e noroeste em baixos níveis. Além disso, nota-se a existência de um transporte de umidade de sudoeste sobre o estado do RJ.

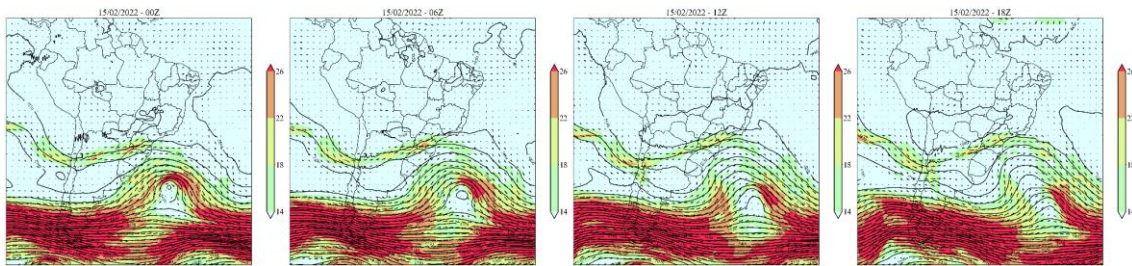
Figura 5 - Umidade específica (g/kg, sombreado) e vento (vetor, m/s) em 850 hPa, referente aos horários 00, 06, 12 e 18 UTC do dia 15 de fevereiro de 2022.



As instabilidades observadas em superfície foram favorecidas pela passagem de um cavado em médios níveis, como é possível observar através da análise da Figura 6, onde é apresentada a altura geopotencial em 500 hPa, além da intensidade e direção do

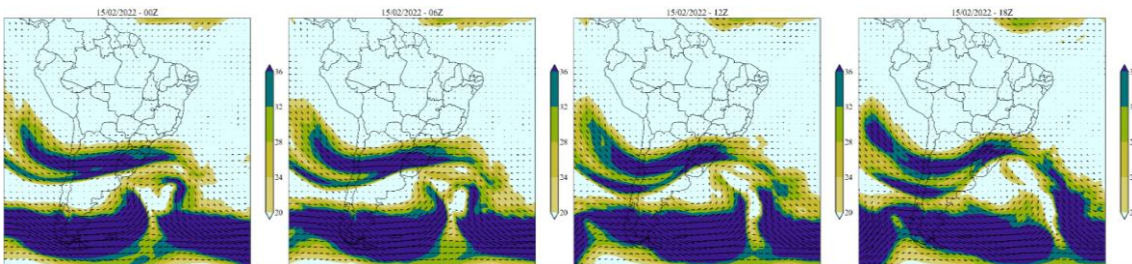
vento no mesmo nível. Através da análise desses campos, é evidente que no dia evento havia o suporte dinâmico e termodinâmico necessário para o favorecimento das instabilidades observadas sobre o estado do RJ e que podem ter contribuído para as chuvas intensas no município de Petrópolis. A estação Alto da Serra registrou acumulados de 142,8 mm entre 16:00 e 17:30, uma hora e trinta minutos após o início da precipitação na região, condizente com a passagem do cavado em médios níveis.

Figura 6 - Altura Geopotencial (metros, isolinhas) e vento (m/s, vetor) em 500 hPa referente aos horários 00, 06, 12 e 18 UTC do dia 15 de fevereiro de 2022. Ventos de intensidade superior a 14 m/s estão sombreados.



Na figura 7, observamos a presença de jatos de altos níveis localizados sobre a região subtropical do hemisfério sul, onde por meio da entrada equatorial, nota-se um favorecimento da convecção em níveis de superfície, propiciando a formação de áreas de instabilidade e movimento ascendente, que associado ao cavado em médios níveis, ocorre uma intensificação das condições presentes na atmosfera em níveis acima.

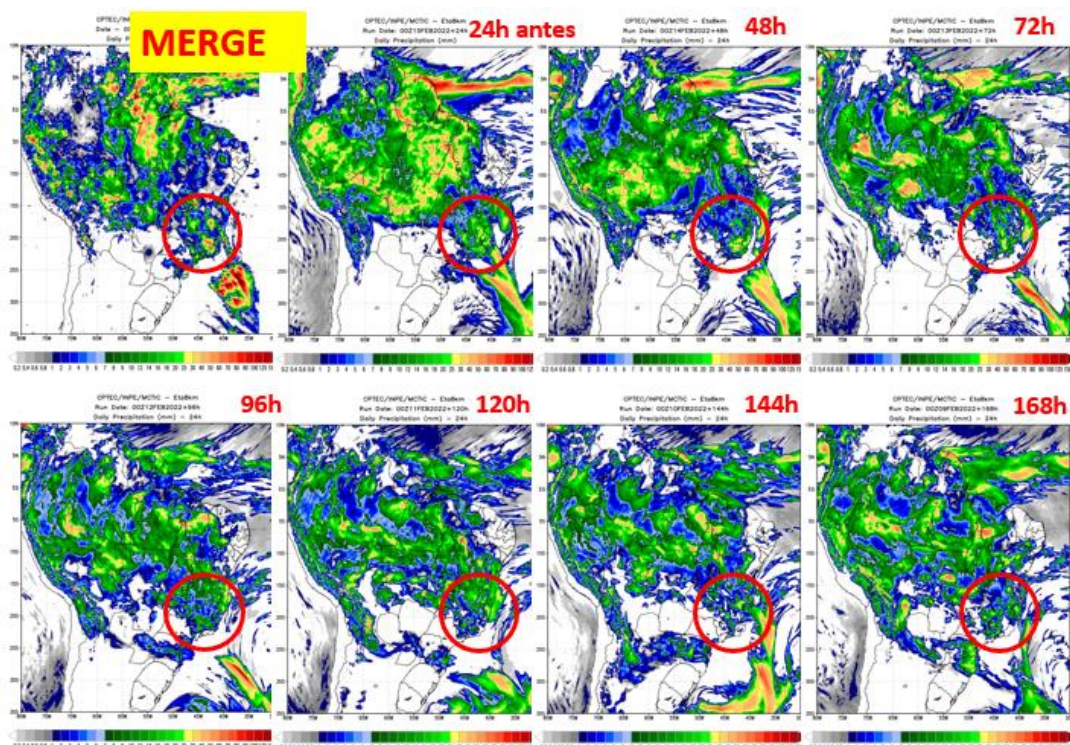
Figura 7 - Figura 4.4 - Intensidade (m/s) e direção do vento (m/s, vetor) 250 hPa referente aos horários 00, 06, 12 e 18 UTC do dia 15 de fevereiro de 2022.



3.3 Avaliação preliminar das previsões

Analisando as previsões do Modelo Eta - 8 km em comparativo ao observado pelo MERGE (ROZANTE et al. 2010), podemos perceber que em horizontes maiores que 72 horas, a previsão do modelo subestima o total de chuva para a região, contudo, a partir de 3 dias para o caso, o modelo passa a indicar altos acumulados de chuva para a região em que situa Petrópolis, circulada em vermelho na Figura 8. Em 24 horas antes do evento, o modelo se aproxima da observação MERGE, subestimando a intensidade das chuvas.

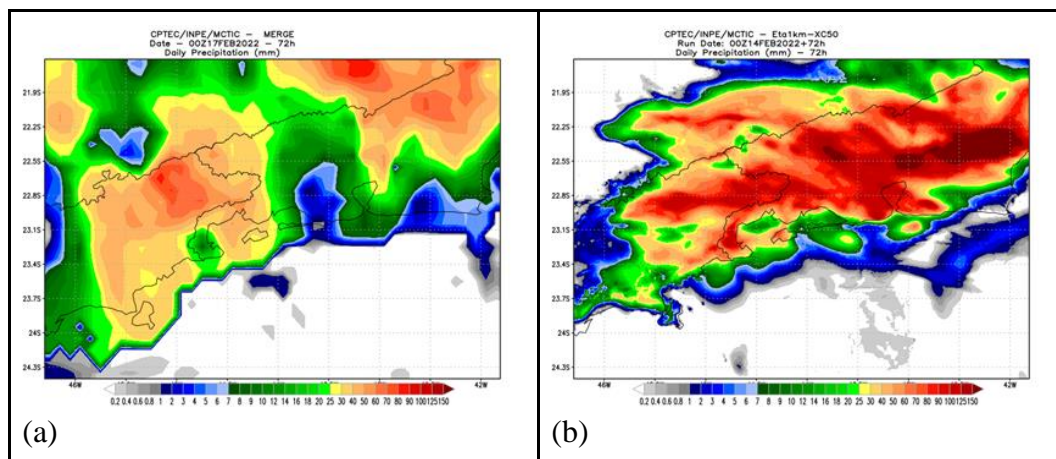
Figura 8 - Previsões de precipitação acumulada de 24h (mm/dia) válidas para as 00Z do dia 16 de fevereiro de 2023, geradas a partir do Modelo Eta - 8 km, para diferentes horizontes de previsão.



Ao analisarmos a previsão do Modelo Eta - 1 km para o dia 17 de fevereiro de 2022, podemos notar que os acumulados de chuva observados pelo MERGE foram superestimados pelo Eta. Entretanto, não se encontra incluso os dados de altas taxas de

chuva por parte das estações do INEA e CEMADEN nestas observações do MERGE. O modelo apresenta uma relativa dificuldade para a previsão para este dia, produzindo chuva distribuída por um longo intervalo, culminando em valores mais altos embora, mais próximos do ocorrido.

Figura 9 - Precipitação acumulada de 72 h (mm/72h) válida para 00Z do dia 17 de fevereiro de 2023: (a) observação MERGE, (b) Previsão do Modelo Eta - 1 km.



3.4 Próximos Passos

Como próximos passos deste trabalho, as seguintes atividades serão realizadas:

- Aprofundar a avaliação das previsões para o caso estudado.
- Coletar observações de estações localizadas na área do modelo Eta 1km.
- Ampliar a avaliação para outras estações do ano.
- Ampliar a avaliação para outras áreas.
- Realizar experimentos numéricos de sensibilidade do Modelo Eta.

3.5 Agradecimentos

Agradecimento especial ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e ao CNPQ pelo apoio ao trabalho, desenvolvido com bolsa CNPq PIBIC/CNPq/INPE 163051/2022-4.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

GOMES, J.L. CHOU, S.C.; MESINGER, F.; LYRA, A.A. *et al.*, 2023: Manual do Worketa v.1.4.2. INPE. São José dos Campos, SP. 138pp. <<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34T/48G6PU5>>

Hersbach H et al. (2019) Global reanalysis: goodbye ERA-Interim, hello ERA5. ECMWF newsletter, 159, 17. <https://doi.org/10.21957/vf291hehd7>

MESINGER, F. CHOU, S.C.; GOMES, J.L.; JOVIC, D.; BASTOS, P.; BUSTAMANTE, J.F.; et al. 2012. An upgraded version of the Eta model. **Meteorology and Atmospheric Physics**, 116, 63–79. doi: <<https://doi.org/10.1007/s00703-012-0182-z>>

ROZANTE, J. R. *et al.* Combining TRMM and surface observations of precipitation: Technique and validation over South America. *Wea. Forecasting*, v. 25, n. 3, p. 885-894, 2010. DOI: 10.1175/2010WAF2222325.1.

Alcântara, E., Marengo, J. A., Mantovani, J., Londe, L. R., San, R. L. Y., Park, E., Lin, Y. N., Wang, J., Mendes, T., Cunha, A. P., Pampuch, L., Seluchi, M., Simões, S., Cuartas, L. A., Goncalves, D., Massi, K., Alvalá, R., Moraes, O., Filho, C. S., Mendes, R., and Nobre, C.: Deadly disasters in southeastern South America: flash floods and landslides of February 2022 in Petrópolis, Rio de Janeiro, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 23, 1157–1175, <https://doi.org/10.5194/nhess-23-1157-2023>, 2023.

Alves, L. M., Chou, S. C., & Lyra, A. A. (2002). The Brazil Current and the atmospheric boundary layer in a regional climate model. *Journal of Climate*, 15(8), 890-902.