



Descrição das condições atmosféricas associadas a um ciclone explosivo observado no Sudeste da América do Sul em junho/julho de 2020

Ana Lucia da Silva Nascimento¹, Nicole Cristine Laureanti¹, Tiago Bentes Mandú², Giovana Deponte Galetti², Diego Rhamon Reis Da Silva², Marcelo Enrique Seluchi³

¹Doutoranda em Meteorologia, Programa de Pós-Graduação em Meteorologia do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Rodovia Presidente Dutra, km 40, Cachoeira Paulista/SP, CEP 12630-970. analuciasne@gmail.com (autor correspondente). ²Mestrando em Meteorologia, Programa de Pós-Graduação em Meteorologia do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Rodovia Presidente Dutra, km 40, Cachoeira Paulista/SP, CEP: 12630-970. ³Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais, Estrada Dr. Altino Bondensan, 500, Eugênio de Melo, São José dos Campos/SP, CEP: 12247-016.

Artigo recebido em 10/05/2021 e aceito em 21/02/2022

RESUMO

A atuação de um ciclone explosivo próximo da costa sudoeste da América do Sul entre junho/julho de 2020 trouxe grandes prejuízos socioeconômicos para essa região. A previsibilidade limitada devido ao rápido aprofundamento da pressão em superfície, motivou o desenvolvimento deste trabalho, que tem como objetivo contribuir com informações que possam ser utilizadas para os setores de tomadas de decisão. A descrição sinótica foi feita através de dados de reanálise do *European Centre for Medium Range Weather Forecasts*, as respostas observacionais de variáveis meteorológicas foram obtidas a partir das estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia e imagens de satélite do GOES-16. A ciclogênese foi observada às 11UTC do dia 29 de junho de 2020 e apresentou uma queda de pressão de 35hPa nas primeiras 16 horas, com taxa de decaimento de 2,2 hPa/h, chegando ao valor de 969 hPa no centro do ciclone. Nas horas seguintes, foi observado um aumento no valor da pressão em 3 hPa, chegando ao valor de 972 hPa em 24h. O ambiente pré-ciclogênético contribuiu para a formação de uma intensa linha de estabilidade na região centro-norte do Rio Grande do Sul, e no decorrer de todo o dia se propagou por toda a área de Santa Catarina e Paraná e por parte de Mato Grosso do Sul e São Paulo; causando rajadas de vento que ultrapassaram 100 km/h. As principais características relacionadas a ciclogênese e rápida intensificação foram um intenso escoamento do Jato de Baixos Níveis, intensa convecção, gradiente de temperatura e difluência em altos níveis em toda a região de atuação do ciclone explosivo. O sistema provocou intensas rajadas de vento na costa da região sul do Brasil, que ultrapassaram 116 km/h, além de grandes acumulados de precipitação.

Palavras-chave: Ciclone extratropical, estudo de caso, América do Sul, ciclone bomba

Description of atmospheric conditions associated with an explosive cyclone observed in Southeast South America in June / July 2020

ABSTRACT

The action of an explosive cyclone near the southwest coast of South America between June/July 2020 has brought great socioeconomic damage to this region. The limited predictability due to the rapid deepening of pressure and surface, motivated the development of this work, which aims to contribute with information that can be used for the decision-making sectors. The synoptic description was made through reanalysis data from the *European Centre for Medium Range Weather Forecasts*, the observational responses of meteorological variables were obtained from the meteorological stations

of the National Institute of Meteorology, atmospheric sounding and satellite images of GOES-16. The cyclogenesis observed at 11UTC on June 29, 2020 and showed a pressure drop of 35 hPa in the first 16 hours, with a decay rate of 2.2 hPa/h, reaching the value of 969 hPa in the center of the cyclone. In the following hours, an increase in the pressure value was observed in 3 hPa, reaching the value of 972 hPa in 24h. The pre-cyclogenetic environment contributed to the formation of an intense instability line in the north-central region of Rio Grande do Sul, and throughout the day it displaced throughout the area of Santa Catarina and Paraná and by Mato Grosso do Sul and São Paulo; causing wind gusts that exceeded 100 km/h. The main characteristics related to cyclogenesis and rapid intensification were an intense flow of the Low Levels Jet, intense convection, temperature gradient and diffluence at high levels throughout the explosive cyclone." The system caused intense wind gusts off the coast of southern Brazil, which exceeded 116km/h, as well as large accumulated precipitation. The main characteristics related to cyclogenesis and rapid intensification were an intense flow of the Low Levels Jet, intense convection, temperature gradient and diffluence at high levels in acting region the explosive cyclone. The system caused intense wind gusts off the coast of southern Brazil, which exceeded 116km/h, as well as a final large accumulated precipitation.

Keywords: Extratropical cyclone, case study, South America, cyclone bomb

Introdução

A região sul da América do Sul (AS) é diretamente influenciada pela passagem de diversos sistemas meteorológicos transientes. Dentre esses sistemas destacam-se os ciclones extratropicais (CE) (Gan e Rao, 1991). Tais fenômenos são comumente associados com a formação de precipitação intensa, rajadas de vento, bruscas mudanças na temperatura e ressaca na costa dos continentes, fatores que podem causar diversos prejuízos sociais e econômicos (Dorneles et al., 2020).

Segundo o modelo conceitual de Bjerknes e Solberg (1922), o ciclo de vida de um CE é caracterizado pelas seguintes fases: pré-ciclogênese, desenvolvimento, oclusão e decaimento. De acordo com o apresentado pelos autores, durante a pré-ciclogênese, tem-se um intenso gradiente horizontal de temperatura em superfície e a inversão no sentido dos ventos, gerado por ondas frontais, propiciando o rebaixamento da pressão. A fase de desenvolvimento é marcada pela intensa atividade baroclínica e redução acentuada na pressão, gerando a formação e evolução de nebulosidade na forma de vírgula, gancho e/ou mais espiralada (Reboita et al., 2017).

O decaimento de um CE se inicia pela oclusão do mesmo, que representa o

estágio em que o ar frio passa a estar presente na região do centro de mínima pressão, no lugar do ar quente (Bjerknes e Solberg, 1922). A partir dessa etapa, a inexistência de um gradiente de temperatura acaba por desintensificar o sistema. O decaimento de um CE é marcado pela presença de atividade barotrópica, ou seja, durante este estágio os cavados em altos e baixos níveis estão em fase. Neste momento, o gradiente de temperatura já é menor e a vortacidade também já não influencia na intensidade do ciclone, que perde intensidade, deslocando-se com menor velocidade.

Segundo Gan e Rao (1991) e Sinclair (1994), a AS possui duas regiões com maior probabilidade de formação de CE, que são denominadas como regiões ciclogênicas. A primeira está localizada próxima ao Uruguai e é influenciada pela Cordilheira dos Andes, sendo mais intensa no inverno e associada à instabilidade baroclínica. A segunda região situa-se sobre o Golfo de São Matias, na costa leste central da Argentina, associada à instabilidade baroclínica do escoamento de oeste e com maior atuação no verão. A posição das regiões ciclogênicas também foi determinada por outros autores. Os trabalhos de Reboita et al. (2005, 2010) e Hoskins e Hodges (2005) apontam a presença de três regiões ciclogênicas, sendo uma na costa sul e sudeste do BR,

uma no Uruguai, na foz do rio da Prata e outra na costa sul da Argentina. Já Allen et al. (2001) apontou outra região ciclogênica no extremo sul da AS.

Diversos autores vêm estudando os mecanismos e interações que favorecem direta ou indiretamente a formação e intensificação dos CE na AS desde a década de 60 (Satyamurty et al., 1990; Gan, 1992; Gan e Rao 1994; Seluchi, 1995; Seluchi et al., 2001; Vera et al., 2002; Reboita, 2010). Dentre eles, estão a presença de cavados e baixas frias em níveis altos da troposfera que se deslocam do oceano Pacífico em direção ao oceano Atlântico, a influência do Jato Subtropical (presença de divergência), influência do transporte de calor e umidade pela Alta Subtropical do Atlântico Sul e pelo escoamento do Jato de Baixos Níveis (JBN), a frequente presença de regiões baroclínicas e a influência da Cordilheira dos Andes, entre outros.

Os Ciclones Bomba ou Ciclones Explosivos (CEEx) são um tipo de CE caracterizados por um rápido aprofundamento da pressão em superfície no seu centro, proporcionando um intenso gradiente de pressão em seu entorno. Os CEEx possuem maior ocorrência no sul da AS e no sudoeste do Atlântico Sul, devido principalmente ao efeito orográfico da cordilheira dos Andes e também do fluxo de calor latente e sensível, associados a interação oceano-atmosfera (Bittencourt et al., 2013; Jiaxiang et al., 2020). Comparados aos CE, os CEEx apresentam eventos ainda mais severos, principalmente em regiões costeiras e em alto mar, locais de maior recorrência. De

acordo com sua definição, esse aprofundamento deve ser maior do que 1 Bergeron, o que corresponde a uma queda de 1 hPa/h em um período de 24 horas para uma latitude de referência de 60° (Sanders e Gyakum, 1980). De forma geral, o Bergeron (B) vai depender da latitude, de modo que $1 B = 24 \text{ hPa} \times [\text{sen}(\Phi)/\text{sen}(60^\circ)]$, onde Φ é a latitude da posição média do ciclone em um período de 24h.

Segundo Roeber (1974), Reboita (2008), Allen et al. (2010), Bittencourt et al. (2013) e Ávila et al. (2016), os CEEx são um fenômeno raro na região continental da AS; os autores constataram ainda que é observada uma maior ocorrência nos meses mais frios, sendo eles junho, julho e agosto, onde a formação preferencial se restringe ao sul de 27°S, cujo início da trajetória e fase explosiva ocorrem sobre o oceano.

Durante os dias 29 de junho e 02 de julho de 2020 um CEEx se desenvolveu na região continental da AS, afetando particularmente a Região Sul do Brasil. Esse evento causou graves danos, principalmente em função dos ventos intensos associados à formação de uma intensa Linha de Instabilidade (LI), além dos altos acumulados pluviométricos. A passagem do CEEx causou a perda de 10 vidas (G1, 2020) e grandes prejuízos econômicos e sociais (Giehl, et al., 2020; De Negreiros et al., 2021). Diante do exposto, o objetivo desse estudo é ilustrar as condições sinóticas associadas à formação e rápida intensificação do CEEx, com ênfase no seu estágio inicial de formação, fases de desenvolvimento e decaimento.

Material e métodos

As análises sinóticas foram realizadas utilizando a reanálise da quinta geração do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ERA5) (C3S, 2017). Esses dados possuem resolução temporal de 1 hora e resolução espacial de 0,25° de latitude e longitude. As variáveis meteorológicas analisadas foram: pressão

ao nível médio do mar (PNMM), espessura da camada entre 1000 e 500 hPa, componentes U e V do vento e sua magnitude nos níveis de 850 hPa e 250 hPa, altura geopotencial em 500 hPa, advecção de temperatura no nível de 850 hPa e velocidade vertical nos níveis baixos, médios e altos da atmosfera.

Para dar suporte às análises sinóticas e acompanhar a convecção associada ao ciclone, foram utilizadas imagens do satélite GOES-16, disponibilizadas pelo Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC/INPE), que já vêm com as devidas calibrações e conversões dos dados de radiâncias em temperatura de brilho (TB), em Kelvin (posteriormente convertidos para Celsius). Para este estudo foram processadas imagens dos canais 2 (visível - 0,64 μm) e 13 (infravermelho térmico - 10,35 μm) a cada 10 minutos.

Com o intuito de complementar a análise do CEx, foram utilizados dados diários de precipitação acumulada (em 24

horas) e rajadas do vento de nove estações meteorológicas de superfície posicionadas dentro da área de atuação do CE, cuja localização está contida na Figura 1. Tais registros foram disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), a partir do Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP).

O período de obtenção dos dados de precipitação foi entre os dias 29 de junho de 2020 e 01 de julho de 2020. Para análise das rajadas de vento avaliou-se um período maior, de 27 de junho a 04 de julho de 2020, uma vez que a propagação da LI e a dinâmica dos ventos perduraram por mais tempo.

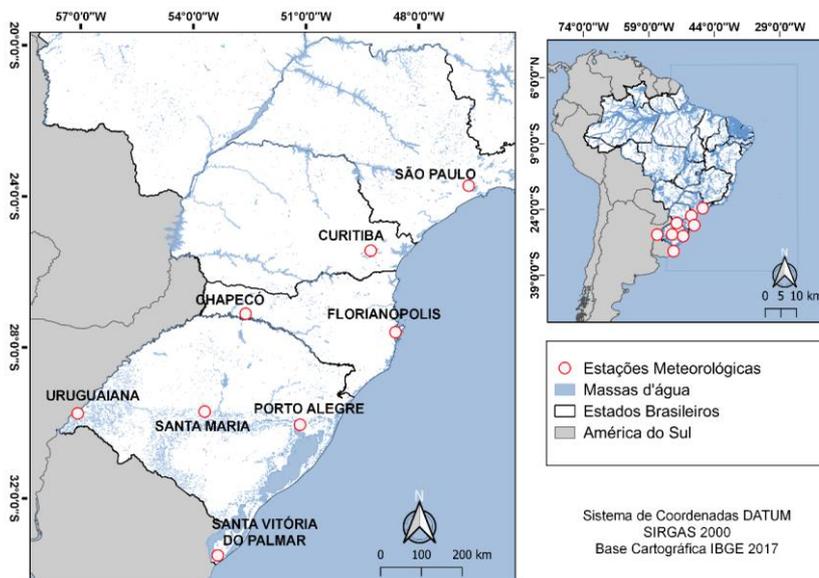


Figura 1. Distribuição espacial das estações meteorológicas utilizadas no estudo. Fonte: Autores (2020).

Resultados e discussão

É fundamental na caracterização de um ciclone extratropical observar os estágios característicos do seu ciclo de desenvolvimento. Essa evolução será discutida nas seções a seguir, onde os estágios estão divididos em pré-ciclogênese, ciclogênese e maturidade, e

processo de oclusão e decaimento, conforme encontrados na literatura.

Estágio Inicial

O ambiente sinótico pré-ciclogênético foi caracterizado pela Figura 2, a partir de campos de linhas de corrente e magnitude do vento em 250 hPa e espessura da camada entre 1000 e 500 hPa para duas datas específicas: 29 de junho às

18h UTC e 30 de junho às 07h UTC. Observa-se sobre toda a região norte da Argentina, sul da Bolívia e Paraguai a intensificação de uma ampla região de baixa pressão, durante o dia 29 e madrugada/manhã do dia 30 de junho de 2020 (Figuras 2a e 2b). Essa baixa pressão está relacionada à presença da Baixa do Noroeste Argentino (BNOA), cujo desenvolvimento decorre principalmente da subsidência orográfica forçada, provocada pela interação de cavados nos níveis médios-altos com a Cordilheira dos Andes (Seluchi et al., 2011; Escobar et al., 2011). Concomitantemente, há presença de dois cavados observados em 250 hPa (Figura 2c): um localizado a oeste (na região de 10°S e 50°W) e outro de menor amplitude localizado a leste (na região de 30°S e 65°W) da Cordilheira dos Andes, a partir do dia 29 de junho de 2020. Com o deslocamento do cavado para leste, ocorre

o aprofundamento e a intensificação do cavado de menor amplitude (Figura 2d), e a intensificação do ramo norte do Jato Polar (JPN), evidenciando a presença de um significativo gradiente térmico.

Observou-se também uma intensa divergência corrente abaixo do cavado em altos níveis a partir do dia 29 de junho (Figuras 2c e 2d, quadrado vermelho), configuração que favorece a convergência de massa em superfície e movimentos ascendentes (Reboita et al., 2017) que se estendem desde níveis mais baixos na atmosfera (observados com mais detalhes nas Figura 4 e na Figura 6). Nota-se também uma inclinação horizontal e negativa no cavado em altos níveis, o que segundo Cossetin et al. (2016), está associada à intensificação de movimentos ascendentes e conseqüentemente à sistemas sinóticos com maior severidade.

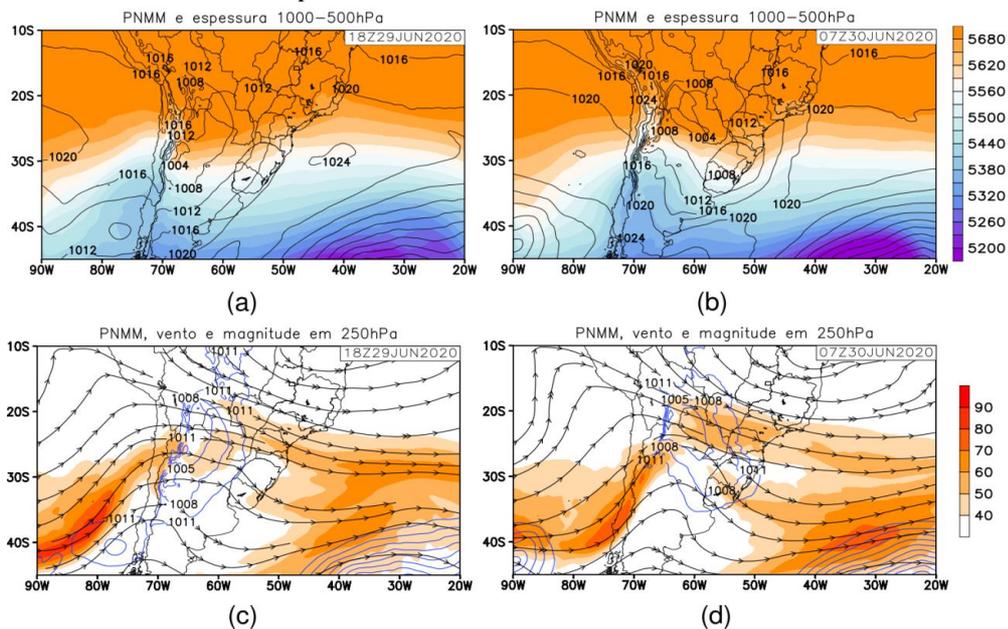


Figura 2. Caracterização da evolução da fase pré-ciclogênica, durante os dias 29 de junho as 18h UTC (a e c, conforme legenda) e 30 de junho as 07h UTC (b e d). Campos de (a, b) espessura da camada (500-1000 hPa, sombreado em m.g.p) com isolinhas de PNMM (linhas contínuas pretas) e (c, d) linha de corrente e magnitude do vento (sombreado m.s⁻¹) no nível de 250 hPa e isolinha.

Na Figura 3 são apresentados o escoamento e a magnitude do vento (Figuras 3a e 3c), assim como a advecção horizontal de temperatura em 850 hPa (Figuras 3b e 3d). Nas datas apontadas anteriormente foi observado um intenso Jato de Baixos Níveis (JBN) (variando entre 22 e 27 ms⁻¹) direcionado no sentido NO/SE, o que canalizou o escoamento quente e úmido. O calor e a umidade transportados pelo JBN contribuíram tanto

para a queda da pressão em superfície, através do aumento da espessura na baixa troposfera; quanto para o aumento da energia potencial convectiva. Por outro lado, a liberação de calor latente devido à precipitação (ver Figura 4) teve o papel de diminuir a pressão em superfície (Vera et al., 2002; Campetella e Vera, 2002), e, dessa forma, intensificar o sistema.

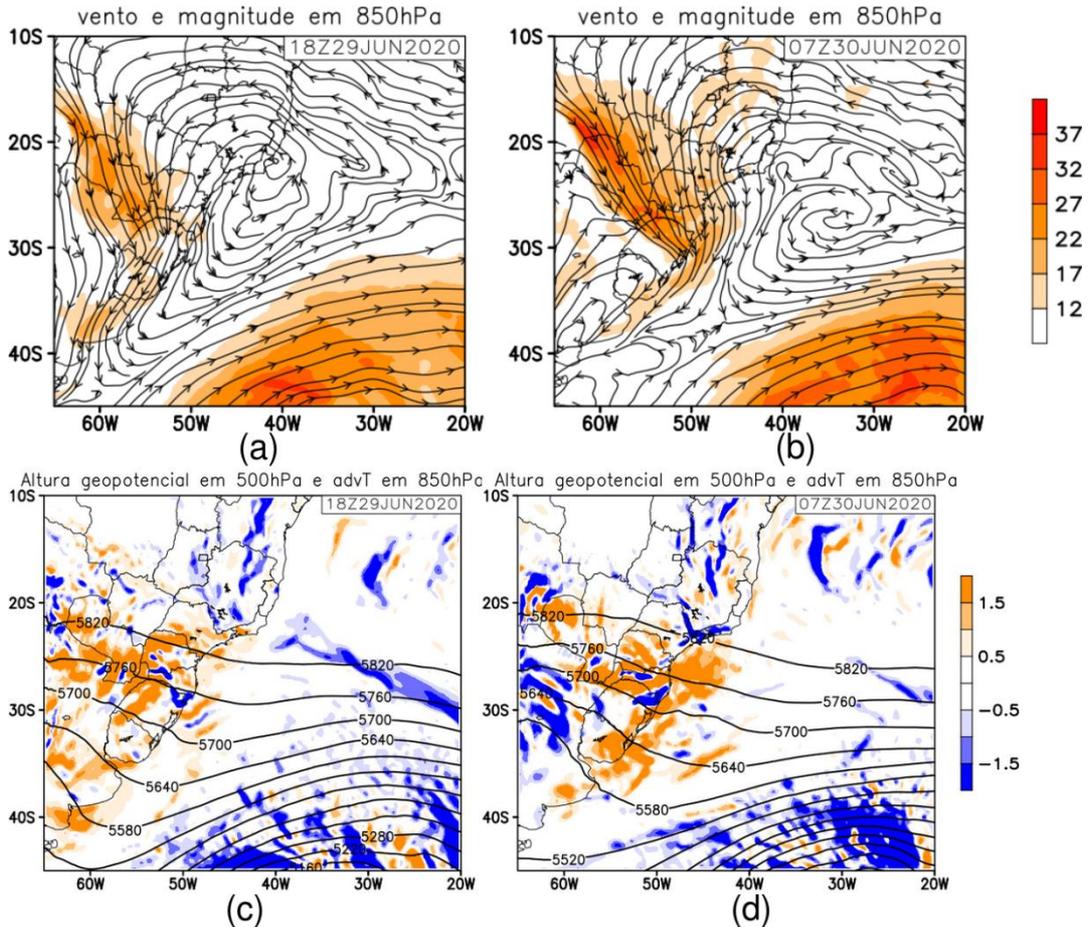


Figura 3. Campos de (a, b) linhas de corrente e magnitude do vento em 850 hPa (em m.s⁻¹) e (c, d) altura geopotencial em 500 hPa (linhas contínuas pretas) e advecção horizontal de temperatura em 850 hPa (sombreado, advT, °C/s x 10⁴). A intensidade do vento e da advecção são dadas pela barra de cores verticais. As figuras são para as mesmas datas da caracterização da fase pré-ciclogênica.

A difluência observada em altitude (Figuras 2a e 2b), somada ao

escoamento em baixos níveis e ao intenso gradiente de temperatura (Figura 3)

contribuíram em grande parte para o desenvolvimento da intensa convecção, localizada a oeste do RS e no setor norte do Uruguai, durante a madrugada do dia 29 de junho e manhã do dia 30 de junho (Figura 4). Segundo Seluchi e Saulo (1998), Piva (2001) e Oda (2005), a liberação de calor latente devido ao processo de precipitação é um dos principais fatores para o início e rápido

aprofundamento de um CE. Observando as imagens do movimento vertical (ω) em conjunto com as imagens de satélite, na Figura 4, percebe-se que as áreas com movimento vertical ascendente (valores negativos, cores quentes) coincidem com as áreas de intensa convecção nas imagens de satélite (tons de amarelo a vermelho), região onde o ciclone ainda encontrava-se incipiente (Figura 4c).

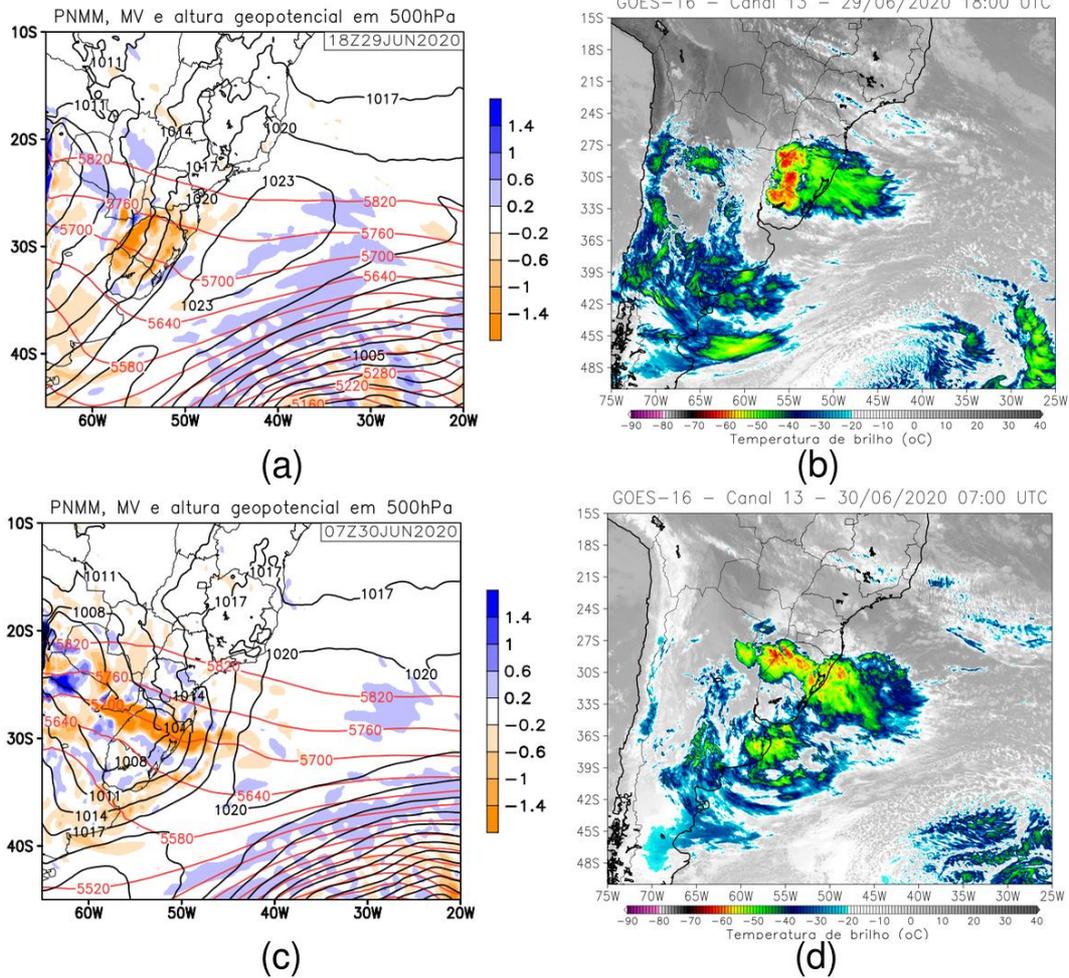


Figura 4. Painéis da esquerda: campos com isolinhas de PNMM (linhas contínuas pretas), altura geopotencial (linhas contínuas em vermelho) e movimento vertical (MV) em 500 hPa (sombreado, ω em Pa/s), cuja intensidade é dada pela barra de cores. Valores negativos (positivos) indicam correntes ascendentes (descendentes) de ar. Painéis da direita: imagens do satélite GOES-16, do canal 13 (infravermelho termal), indicando intensa convecção na região de intenso movimento vertical ascendente. As figuras são para as mesmas datas da caracterização da fase pré-ciclônica.

No decorrer da tarde e da noite do dia 30 de junho, a forte convecção associada ao cavado de onda relativamente

curta, assim como o avanço do ramo frio do sistema ciclônico, contribuiu para a formação de uma LI que se propagou sobre

a região norte da região do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná (Figura 5). Estações meteorológicas automáticas do INMET registraram rajadas de vento que chegaram a 90 km/h em Florianópolis e

108 km/h em Chapecó durante o dia 30/06 (INMET, 2020). Uma análise mais detalhada das respostas observacionais será tratada na seção 3.4.

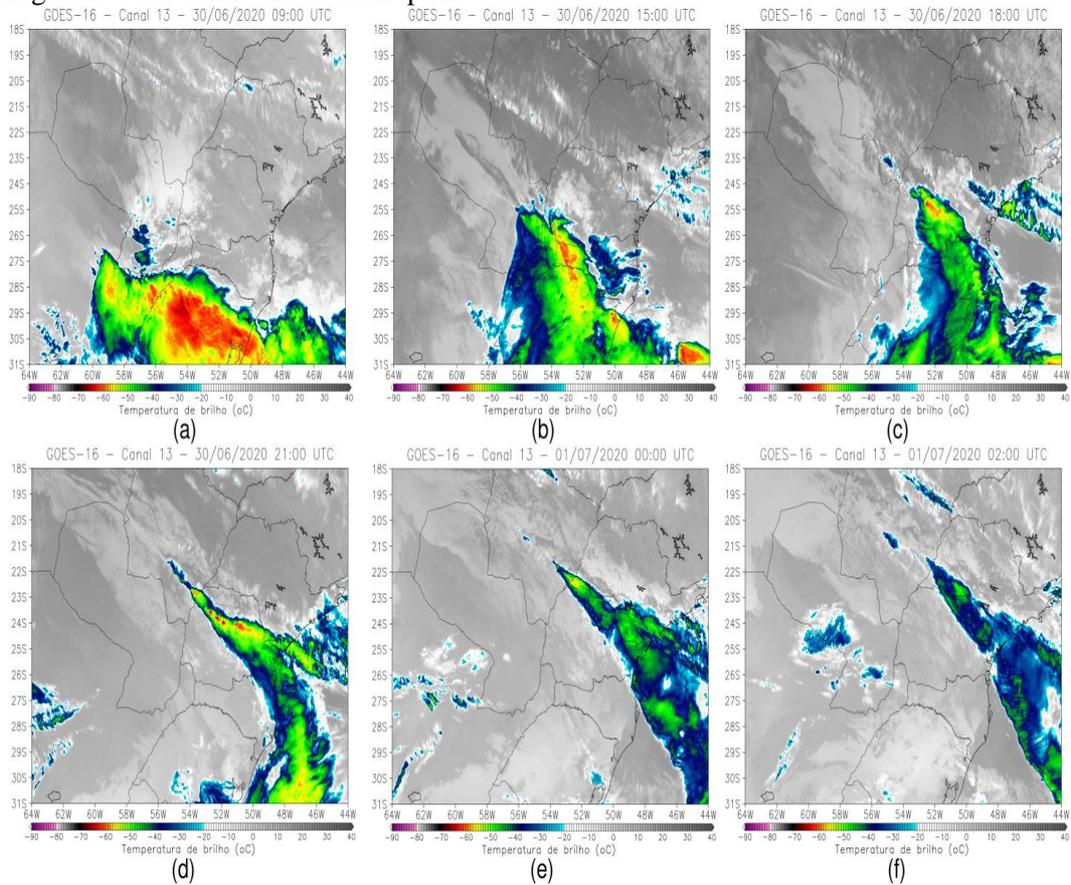


Figura 5. Imagens do satélite GOES-16 do canal 13 (infravermelho termal - a, b, c, d, e, f), indicando a formação (a) e a propagação (b a f) de uma linha de instabilidade sobre a região Sul e parte de São Paulo e Mato Grosso do Sul no dia 30 de junho de 2020.

Outro interessante registro da fase inicial do CE é mostrado na Figura 6, com cortes verticais de movimento vertical. Para a situação antecedente ao registro de difluência (12h UTC de 29 de junho), se observa o início dos movimentos verticais sobre o continente (aproximadamente em 55°W), associados ao transporte de calor e umidade que já ocorria através do JBN (não mostrado).

Nos momentos subsequentes, a intensidade do movimento vertical atinge valores altos e homogêneos por uma vasta dimensão longitudinal, abrangendo várias camadas atmosféricas. Aliado à intensa convecção e à teoria de conservação de massa, esse levantamento esteve associado à formação da difluência nos altos níveis e ao rebaixamento de pressão em superfície (Figura 2).

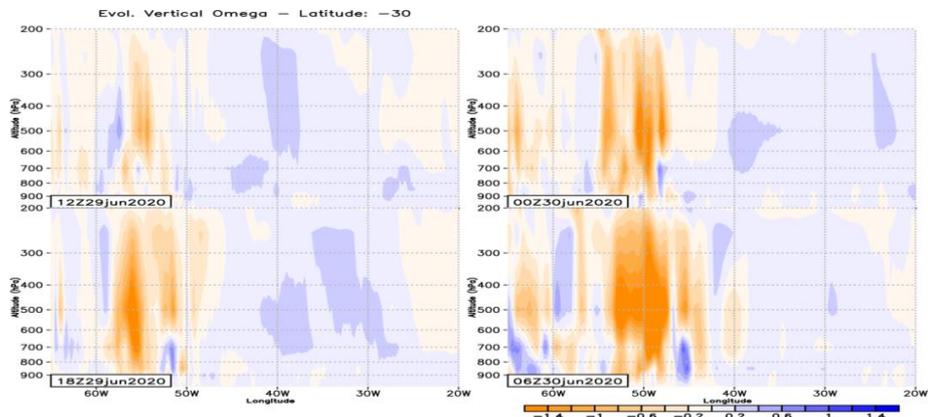


Figura 6. Seção vertical com a magnitude do movimento vertical (ômega, Pa/s) para a latitude de 30°S, dentro do domínio longitudinal da América do Sul em quatro diferentes instantes. Valores negativos (positivos) indicam movimento ascendente (descendente) e a intensidade é dada pela escala de cores. As figuras são para as mesmas datas da caracterização da fase pré-ciclogênica.

Maturidade

Na Figura 7 é apresentado o Diagrama de Hovmöller da PNMM e da altura geopotencial no nível de 500 hPa na latitude de 35°S, ao longo do domínio longitudinal da AS; onde o contínuo e rápido desenvolvimento do ciclone pode ser observado. A partir de 00h UTC do dia 30 de junho, é observada uma amplificação e deslocamento para leste da região de divergência corrente abaixo do cavado transiente em 250 hPa, abrangendo toda região sul do Brasil (não mostrado). O cavado em altitude é refletido no nível de 500hPa, conforme mostrado na Figura 7, influenciado desde o sul da Argentina até a metade oeste do Uruguai e Rio Grande do Sul.

A ciclogênese é observada a partir das 12h UTC do dia 30 de junho, quando surgem isolinhas fechadas de PNMM com pressão centrada em 1005 hPa em torno de 55°W. Durante os demais horários do dia,

a baixa pressão se intensifica rapidamente e se desloca no sentido E/SE, seguindo a advecção de temperatura em superfície e vorticidade (não mostrado). Vale salientar que às 10h UTC do dia 01 de julho ocorreu o fechamento de uma segunda região de baixa pressão (992 hPa) próximo à costa do Rio Grande do Sul (~50°W), perdurando por algumas horas.

Como mencionado, um CEx é caracterizado por uma queda de pelo menos 1 hPa/h durante 24h para a latitude de referência de 60°S (Sanders e Gyakum, 1980). No caso deste estudo, foi observada uma queda de 35 hPa no centro do ciclone (chegando a 969 hPa, ~45°W) durante o período de 16h (~2,2 hPa/h), entre os dias 30 de junho às 13h UTC e 01 de julho às 05h UTC. Nas horas seguintes, foi observado um aumento no valor da pressão no centro do ciclone em 3hPa, chegando então ao valor de 972 hPa em 24h (~1,4 hPa/h).

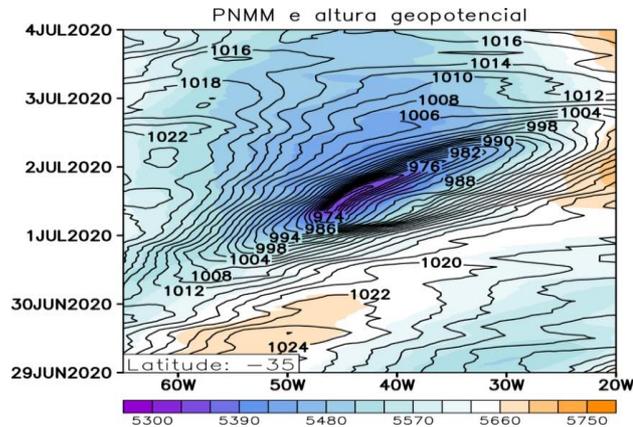


Figura 7. Diagrama de Hovmöller representando a variação temporal de PNMM (em isolinhas pretas) e altura geopotencial no nível de 500 hPa (em cores) entre os dias 29 de junho e 04 julho de 2020 para a latitude de 35°S, dentro do domínio da América do Sul (65°W-30°W). As isolinhas representam a variação de PNMM e têm espaçamento de 2hPa; já as cores representam a espessura.

As modificações provocadas durante a fase de ciclogênese e maturação também são observadas nos altos níveis da atmosfera. A Figura 8 relaciona as anomalias zonais de temperatura para cada nível com a componente vertical do vento (ω) em dois momentos específicos. No primeiro momento, tem-se a situação inicial de ciclogênese, registrada pela Figura 7 como a situação das 12h UTC do dia 30 de junho de 2020. Nesse estágio, o ciclone apresenta forte baroclinia e encontra-se em processo de intensificação.

Por essa razão, apesar de existir movimento vertical ascendente, este ainda

apresenta menor intensidade se comparado ao momento posterior.

Em contraste, a situação com pleno desenvolvimento do ciclone, às 05h UTC do dia 01 de julho de 2020 (Figura 8), corresponde a um padrão muito mais intenso de movimento vertical ascendente. Nesse estágio, as forças termodinâmicas estão em pleno desenvolvimento e a camada tem composição de temperatura mais homogênea, devido ao processo de maturação.

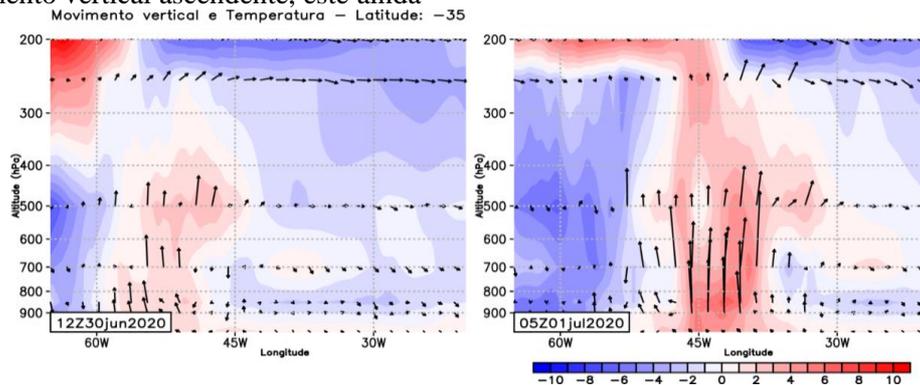


Figura 8. Seção vertical da anomalia zonal de temperatura média do ar (°C) e movimento vertical (Pa/s) na latitude de 35°S. A anomalia considera a média de temperatura para cada nível vertical, dentro do domínio da América do Sul. O movimento vertical é indicado pelas componentes zonal (m/s) e vertical (Pa/s) do vento. A componente vertical do vento foi multiplicada por -100, assim o tamanho das setas representa valores relativos.

Oclusão e Decaimento

Cerca de 22 horas após sua formação, o CEx já havia atingido o estágio de oclusão, como pode ser observado nas imagens de satélite da Figura 9. No amanhecer do dia 01 de julho de 2020, é possível observar a curvatura da nebulosidade e o centro de baixa pressão, com o setor ocluso, o ponto triplo, o ramo frio e o ramo quente assinalados (Figura 9a). Segundo Reboita et al. (2017), após o início da oclusão de um CE, ainda existe energia potencial disponível, que decresce à medida que o ar quente esfria adiabaticamente e os movimentos verticais são suprimidos.

Ainda nos dias 01 e 02 de julho de 2020, observa-se o afastamento do ciclone

da costa brasileira e seu enfraquecimento, com a baixa oclusa cada vez mais distante dos ramos frontais (Figura 10). Entretanto, apesar do seu deslocamento para o oceano, sua borda oeste causou ventos intensos sobre na costa do Rio Grande do Sul, onde as rajadas chegaram a 116 km/h em Santa Vitória do Palmar, 83 km/h em Rio Grande e 63 km/h em Porto Alegre (Figura 12a). No dia 02, o CEx já está fora do domínio da imagem, porém, observa-se sobre o oceano uma segunda baixa pressão, de fraca intensidade, que se formou atrás do CEx, e muitas nuvens no oceano, composta por células abertas, indicando a passagem de ar frio sobre o oceano mais quente (Figuras 10b e 10c).

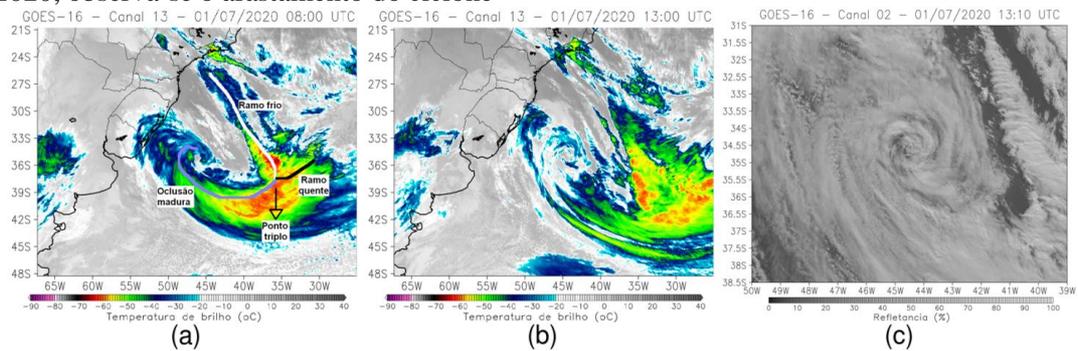


Figura 9. Imagens do satélite GOES-16, do canal 13 (infravermelho termal - a, b; visível - c), indicando a oclusão do ciclone.

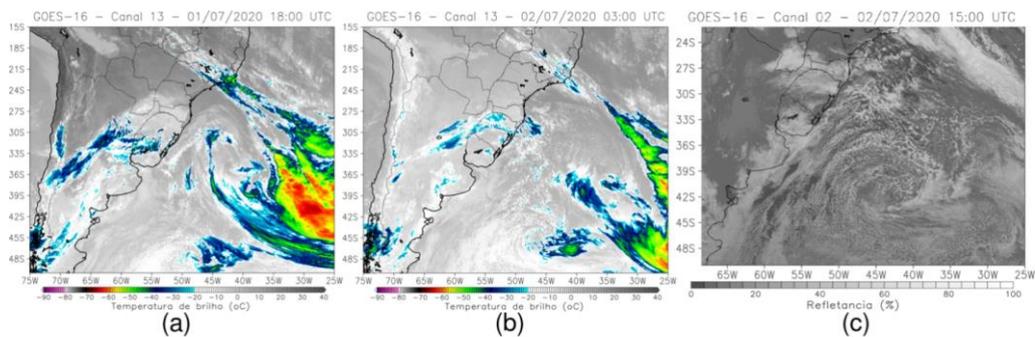


Figura 10. Imagens do satélite GOES-16, do canal 13 (infravermelho termal - a, b; visível - c), indicando a continuidade da oclusão do ciclone e seu afastamento do Brasil.

O momento de decaimento pode ainda ser observado nas Figuras 8 e 12. Ao longo do dia 01 de julho, depois de alcançar a longitude de 50°W, o desenvolvimento do ciclone se torna

vertical (Figura 8), ou seja, os centros tanto de menor altura geopotencial quanto de menor PNMM estão em fase com relação a seus centros de mais baixa intensidade. Concomitantemente, na Figura 11, para o

dia 01 de julho tem-se que o núcleo do ciclone localizado em 50°W é frio o que contribui para a supressão dos movimentos verticais ascendentes. A

partir deste momento, o deslocamento é mais lento, mas ainda está predominantemente na direção para leste (Figura 7).

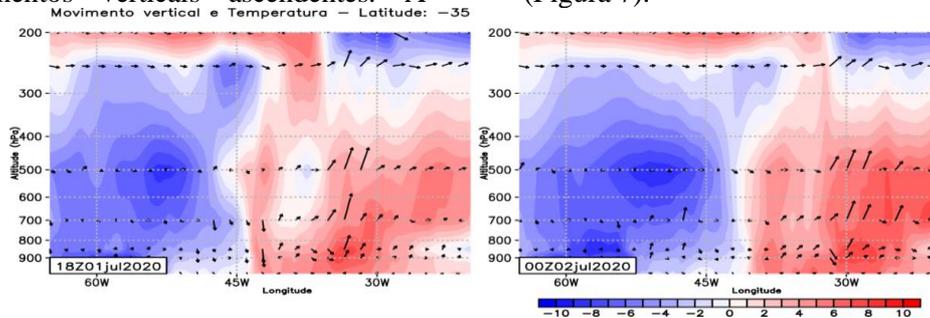


Figura 11. Seção vertical da anomalia zonal de temperatura média do ar (°C) e movimento vertical (Pa/s) na latitude de 35°S. A anomalia considera a média de temperatura para cada nível vertical, dentro do domínio da América do Sul. O movimento vertical é indicado pelas componentes zonal (m/s) e vertical (Pa/s) do vento. A componente vertical do vento foi multiplicada por -100, assim o tamanho das setas representa valores relativos.

Respostas Observacionais

Como pode ser observado na Tabela 1, no dia 29 de junho de 2020, a precipitação foi observada somente em Uruguaiana e Chapecó, durante a fase pré-ciclogênica (9,2 e 7,0 mm/dia). Entretanto, com a intensificação do escoamento ocasionado pelo JBN e dos movimentos verticais ascendentes durante os dias de 30 de junho (Figura 4) e 01 de julho de 2020, foram registrados os maiores acumulados de precipitação, destacando-se os 83,8 mm/dia observados

em Porto Alegre e 79 mm/dia observados em Santa Maria no dia 30 de junho, ocasionados pela banda de nebulosidade associada à ciclogênese, que intensificou a atividade convectiva principalmente no estado do Rio Grande do Sul (Figura 9). No dia 02 de julho somente Santa Maria apresentou alguma precipitação, porém ainda ficando abaixo dos níveis observados nos dois dias anteriores. A intensa precipitação registrada nas cidades atuou como um importante forçante para o desenvolvimento do CEx.

Tabela 1. Registros pluviométricos de estações meteorológicas localizadas em algumas das áreas de atuação do CEx. Acumulados de precipitação em mm/dia

Cidades	29/jun	30/jun	01/jul	02/jul
São Paulo-SP	0,4	0	0,2	0
Chapecó-PR	7,0	0	0,8	0
Curitiba-PR	0	13,6	12,7	0
Florianópolis-SC	0,4	22,8	0	0
Porto Alegre-RS	0	83,8	34,9	0
Rio Grande-RS	0,4	29,6	16,4	0
Santa Maria-RS	0	79,8	19,8	2,6
Santa Vitoria do Palmar-RS	0	6,2	24,8	0
Uruguaiana-RS	9,2	2,4	0	0

A Figura 12 mostra a evolução temporal das rajadas de vento na escala diária e horária. É possível observar a influência do processo de formação do CEx (pré-ciclogênese) nas rajadas máximas de vento observadas durante a tarde e o início da noite do dia 30 de junho em Chapecó, Curitiba e Florianópolis, associadas à propagação da LI. Também é observado que os máximos em todas as cidades ocorrem durante a atuação do ciclone.

Com a intensificação e deslocamento do CEx para o oceano, as maiores rajadas de vento foram observadas na costa do Rio Grande do Sul, principalmente nas cidades de Santa Vitória do Palmar e Rio Grande, durante a madrugada do dia 01 de julho. Segundo a Defesa Civil do Estado, cerca de 19 municípios sofreram algum efeito, dentre eles 921 danos em edificações e 1.119 pessoas desalojadas (DC/RS, 2020)

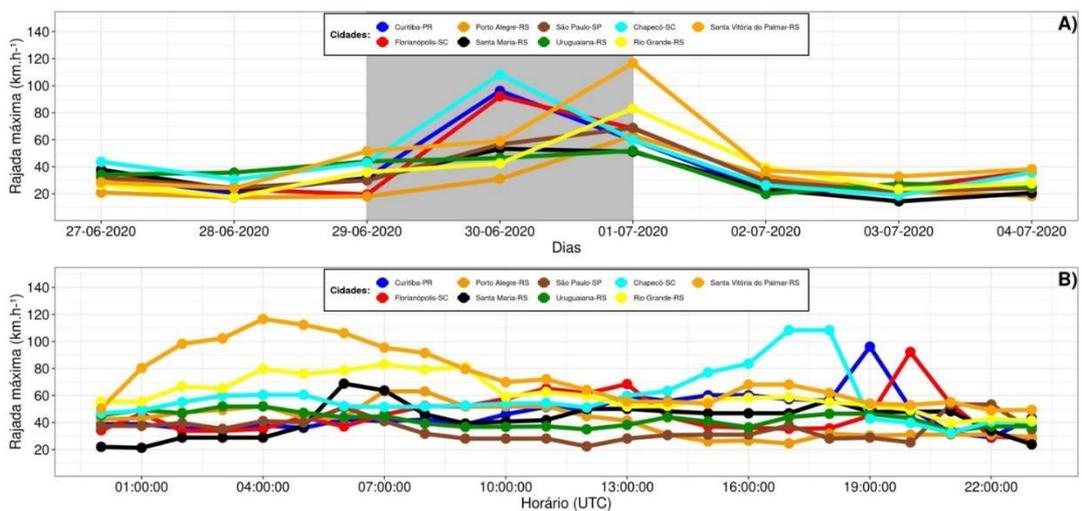


Figura 12. Velocidade média A) diária e B) horária do vento. A caixa cinza em A) demarca o período de ocorrência do CEx.

Conclusões

A formação e passagem do CEx no Sul do Brasil em junho/julho de 2020 causou prejuízos econômicos e sociais principalmente para os estados localizados no Sul do Brasil.

- Como consequência do evento ocorreram 12 mortes e estima-se que os prejuízos chegaram a R\$ 277 milhões em Santa Catarina (G1, 2020).
- As forçantes de grande escala forneceram suporte dinâmico e térmico para formação de sistemas de escala sub-sinótica e de mesoescala.

- As fortes rajadas de vento e as intensas precipitações foram causadas em parte por uma LI, associada à fase pré-ciclogênica do CEx que se formou no começo do dia 30 de junho de 2020, na parte centro-norte do Rio Grande do Sul, e no decorrer de todo o dia se propagou por toda a área de Santa Catarina e Paraná e por parte de Mato Grosso do Sul e São Paulo.
- A formação e rápida intensificação do CE resultou de diversos fatores, como o intenso escoamento do JBN associado a intensificação de movimentos

verticais por toda a troposfera, intenso gradiente vertical e horizontal de temperatura, e deslocamento e amplificação de um cavado em altos níveis para leste. Tais processos contribuíram para a intensa convecção observada, principalmente na porção sul do Brasil durante o dia 30 de junho. Essas características promoveram ainda a liberação de calor latente através dos processos convectivos, que contribuíram para a intensificação e a formação da baixa pressão com valores de 1005 hPa ainda no continente.

- e) A menor pressão observada no centro do CEx foi de 969 hPa, nas primeiras 16h de formação do CE, apresentando uma taxa de decaimento de 2,2 hPa/h.

Referências

- Allen, J. T., Pezza, A. B., Black, M. T. 2002. Explosive cyclogenesis: A global climatology comparing multiple reanalysis. *Journal of Climate*, v. 23, n. 24, p. 6468-6484, 2010 and a comparison with Northern Hemisphere events. *Monthly Weather Review*, 130, 2188-2209, 2002
- Ávila, V. D., Nunes, A. B., Alves, R. D. C. M. 2016. Análise de um caso de ciclônese explosiva ocorrido em 03/01/2014 no sul do oceano Atlântico. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 9(04), 1088-1099
- Ávila, V. D. Estudo de Ciclôneses Explosivas no Atlântico Sul. 166f. Tese (Doutorado em Meteorologia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018
- Bitencourt, D. P., Fuentes, M. V., Cardoso, C. S. 2013. Climatologia de ciclones explosivos para a área ciclogênica da América do Sul. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 28, 43-56.
- Bjerknes, J. 1951. Extratropical cyclones. In *Compendium of Meteorology* (p. 577-598). American Meteorological Society, Boston, MA
- Bluestein, H. B. 1993. Synoptic-dynamic meteorology in midlatitudes. Volume II: Observations and theory of weather systems. New York: Oxford University Press. 594p
- Ciclone bomba é considerado o maior desastre com ventos da história de Santa Catarina. Portal G1 de notícias. Disponível em: 04 de julho 11 de 2020. URL: <https://g1.globo.com/jornal-nacional/noticia/2020/07/04/ciclone-bomba-e-considerado-o-maior-desastre-com-ventos-da-historia-de-santa-catarina.ghtml>
- Copernicus Climate Change Service (C3S): ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate, Copernicus Climate Change Service Climate Data Store (CDS), 2017
- Cossetin, F., Nunes, A.B., Teixeira, M.S., 2016. Análise do movimento vertical sob duas configurações de

- altos níveis da troposfera. *Ciência e Natura* [online] 38. Disponível: <https://dx.doi.org/10.5902/2179460X20281>
- Defesa Civil do Estado do Rio Grande do Sul - DC/RS. Eventos Adversos em Andamento - Boletim 01/07/20 - Manhã. Disponível em: <https://estado.rs.gov.br/upload/arquivo/s/eventos-adversos-01-07-2020-11hs-ciclone.pdf> Porto Alegre: DC/RS, Defesa Civil do Estado do Rio Grande do Sul, 2020
- De Negreiros, R., Salvador, D. Impactos do Ciclone Bomba na bananicultura do Norte Catarinense. 2021. *Agropecuária Catarinense*, 34(3), 12-15. Disponível em: <https://publicacoes.epagri.sc.gov.br/RAC/article/view/1227>
- Dorneles, V. R., Riquetti, N. B., Nunes, A. B. 2020. Forçantes dinâmicas e térmicas associadas a um caso de precipitação intensa sobre o Rio Grande do Sul, Brasil. *Revista Brasileira de Climatologia*, 16(23), 220-232. <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v26i0.58162>
- Escobar, G. C. J., Seluchi, M. E. 2012. Classificação sinótica dos campos de pressão atmosférica na América do Sul e sua relação com as baixas do chaco e do noroeste argentino. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 27(3), 365-375. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862012000300011>
- Friedman, R. M. 1993. *Appropriating the weather: Vilhelm Bjerknes and the construction of a modern meteorology*. Cornell University Press
- Gan, M. A., Rao, V. B. 1991. Surface cyclogenesis over South America. *Monthly Weather Review*, 119(5), 1293-1302
- Giehl, A. L., De Luca, F. V., Padrão, G. de A., Reiter, J. M. W., Alves, J. R., Mondardo, M. Gugel, J. T. Goulart Junior, R., Marcondes, T. 2020. Efeitos socioeconômicos causados pelo ciclone extratropical no estado de Santa Catarina em 2020. 318. Disponível em: <https://publicacoes.epagri.sc.gov.br/DOC/article/view/1076> (Acessado: 5fevereiro2022)
- Gobato, R., Heidari, A. 2020. Cyclone Bomb Hits Southern Brazil in 2020. *Journal of Atmospheric Science Research*, Volume, 3(03)
- Holton, J. R., 1992: *An Introduction to Dynamic Meteorology*, 3 ed. Academic Press, San Diego
- Lim, E. P., Simmonds, I. Explosive cyclone development in the Southern Hemisphere
- Jiaxiang, G., Shoshiro, M., Roberts, M. J., Haarsma, R. Influence of model resolution on bomb cyclones revealed by HighResMIP-PRIMAVERA simulations. 2020. *Environ. Res. Lett.* 15. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ab88fa/pdf>
- Mendes, D., Souza, E. P., Marengo, J. A., Mendes, M. C. 2010. Climatology of extratropical cyclones over the South American-southern oceans sector. *Theoretical and applied climatology*, 100(3-4), 239-250
- Mendes, D., Souza, E. P., Trigo, I. F., Miranda, P. M. A. On precursors of South American cyclogenesis. *Tellus A*. 59(1), 114-121
- Oda, T. O. 2005. *Efeitos da Distribuição Espaço-Temporal da Temperatura do Mar no Desenvolvimento de Ciclones Extratropicais*. Tese de Doutorado em Meteorologia, UFRJ, Rio de Janeiro, 125p
- Piva, E. 2005. *Cavados em Médios Níveis no Hemisfério Sul: Climatologia, Energética e Ciclogênese em Superfície*. Tese de Doutorado em Meteorologia, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 205p
- Reboita, M. S., Gan, M. A., Rocha, R. P. D., Custódio, I. S. 2017. Ciclones em Superfície nas Latitudes Austrais: Parte I - Revisão Bibliográfica. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 32(2), 171-

186. <https://doi.org/10.1590/0102-77863220010>
- Reboita, M. S., Gan, M. A., Rocha., R. P. D.; Ambrizzi, T. 2010. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. *Revista brasileira de meteorologia*, 25(2), 185-204
- Roeber, P. J.1984. Statistical analysis and updated climatology of explosive cyclones. *Monthly Weather Review*, 112(8), 1577-158
- Sanders, F., Gyakum J. R. 1980. Synoptic-dynamic climatology of the “Bomb”. *Monthly Weather Review*, 108(10), 1589-1606
- Seluchi, M. E.; Saulo, A. C. 1998. Possible mechanisms yielding an explosive coastal cyclogenesis over South America: experiments using a limited area model. *Aust. Met. Mag.*, 47, 309-320
- Seluchi, M. E.; Saulo, A. C. 2012. Baixa do Noroeste Argentino e Baixa do Chaco: características, diferenças e semelhanças. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 27(1), 49-60. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862012000100006>