



Formação e intensificação de sistemas causadores de precipitação e temperaturas mínimas extremas em todo o Brasil no fim do outono de 2022.

Paulo Vítor de Albuquerque Mendes¹, Katyelle Ferreira da Silva Bezerra¹, Natalia Fedorova²

¹Graduando em meteorologia pelo Instituto de Ciências Atmosféricas - ICAT, Universidade Federal de Alagoas - UFAL, CEP: 57072-900; Maceió - (AL), Brasil, paulo.vda.mendes@gmail.com; katyelle.silva@icat.ufal.br ²Professora Doutora, Instituto de Ciências Atmosféricas - ICAT, Universidade Federal de Alagoas - UFAL, CEP: 57072-900; Maceió - (AL), Brasil, nataliabras@gmail.com.

Artigo recebido em 29/07/2023 e aceito em 26/05/2024

RESUMO

A passagem de frentes frias entre o Sul e Nordeste do Brasil (NEB) provocou vários fenômenos adversos no fim do outono de 2022. Este estudo, a análise sinótica e termodinâmica da formação, intensificação e impactos dos sistemas e fenômenos associados às frentes frias entre Maio e o início de Junho de 2022.

Foram identificados sete ciclones em atividade na América do Sul, cinco deles responsáveis por fenômenos adversos em todo o Brasil. Quatro extremidades frontais associadas a ciclones acoplados à Corrente de Jato Subtropical, Jato de Baixos Níveis e Zona de Convergência Intertropical atingiram a região costeira do NEB. Durante a passagem dos ciclones mais intensos foram identificadas precipitações de até 176,6 mm/dia, temperaturas de até -7,7 °C, rajadas de vento de até 28,6 m/s e 8 eventos de geada registrados pelas estações do INMET. Também foram observados acumulados mensais de precipitação acima das médias históricas para o mês de Maio em algumas regiões do Brasil, causados principalmente por CCMs em extremidades frontais próximas às estações de João Pessoa - PB (714,2 mm/mês), Recife - PE (786,3 mm/mês), Maceió - AL (579,0 mm/mês), Cametá - PR (544,7 mm/mês) e Vacaria - RS (427,8 mm/mês).

Synoptic analysis of cyclones associated with adverse phenomena in Brazil in may of 2022

ABSTRACT

The passage of cold fronts associated with baroclinic cyclones from the south to the northeast of Brazil (NEB) caused several adverse phenomena in May 2022. This study aimed at the synoptic and thermodynamic analysis of the formation, intensification and side effects of the systems and phenomena that occurred between 05/01/22 and 06/10/22. Seven active cyclones were identified in South America, five of them responsible for adverse phenomena throughout Brazil. Four frontal edges reached the NEB coastal region, the main causes were frontal regenerations, originated from couplings with the Jet Streams, the Low Level Jet and the Intertropical Convergence Zone. During the passage of the most intense cyclones, precipitations up to 176.6 mm/day, temperatures up to -7.7 °C and wind gusts up to 28.6 m/s were observed, with 8 frost events recorded by the stations of the INMET. Accumulated precipitation above the historical averages for the May month were also observed in some regions of Brazil, mainly driven by MCCs at the front edges in the stations of João Pessoa - PB (714.2mm/month), Recife - PE (786, 3 mm/month), Maceió - AL (579.0 mm/month), Cametá - PR (544.7 mm/month) and Vacaria - RS (427.8 mm/month).

Introdução

Ciclones baroclínicos ou extratropicais são um dos sistemas meteorológicos que mais influenciam o clima na América do Sul. O processo de desenvolvimento dos ciclones é denominado ciclogênese, onde ciclones baroclínicos formam-se como ondas ao longo de frentes e oclusões instantâneas ou a partir de um cavado pré-existente a sotavento de montanhas, posteriormente apresentando oclusão como ciclones de núcleo frio (Avila et al., 2016; Pettersen e Smebye, 1971; Zillman e Price, 1972).

Na América do Sul, as ciclogêneses podem ser observadas com maior frequência durante o outono e inverno, havendo também variação interanual com a maior quantidade de eventos ocorrendo em anos de El Niño (Gan e Rao, 1991; Necco, 1982). Os pontos com maior frequência de ciclogêneses na América do Sul encontram-se nas seguintes regiões: áreas próximas ao Uruguai, com maior frequência de ciclogêneses no inverno, associadas a influência dos Andes e instabilidade baroclínica; áreas próximas ao sul da Argentina, com maior frequência de ciclogêneses no verão, associadas a instabilidade baroclínica do escoamento de oeste; e áreas compreendidas entre a costa leste, sul e sudeste do Brasil, com maior frequência de eventos no verão (Gan e Rao, 1991; Sinclair, 1995; Hoskins e Hodges, 2005; Reboita et al., 2005, 2010).

Os maiores impactos causados pela passagem dos ciclones baroclínicos são decorrentes das mudanças no tempo causadas pelas frentes frias. Estas são causadoras de intensas chuvas convectivas seguidas de aumento na pressão atmosférica, queda brusca na temperatura, aumento na força do vento e variação em sua direção (Rodrigues et al., 2004).

Uma das formas mais comuns de se estimar os danos causados por rajadas de vento é a utilização da escala Beaufort, onde danos mais significativos de rajadas de vento podem ser observados acima de 7 graus, causando os seguintes eventos:

7 e 8 graus - ondas com até 6 metros de altura, agitação de galhos de árvores e aumento da resistência do ar contra o vento;

9 graus - ondas com até 6 metros de altura e pequenos danos às árvores e telhados de casas;

10 graus - ondas com até 9 metros e danos consideráveis às casas e estruturas;

11 graus - ondas com até 12 metros e danos generalizados em árvores e construções;

12 graus - ondas com mais de 14 metros e danos generalizados na região atingida.

Na América do Sul as frentes frias deslocam-se majoritariamente para leste, alterando o tempo com frequência nas regiões Sul e Sudeste do Brasil (Gemiacki, 2005). O avanço de frentes frias e sua nebulosidade residual também é observado com frequência nas latitudes tropicais. A chegada de frentes frias nessas regiões ocorre durante a passagem de sistemas com amplas penetrações continentais, variando com frequências variando mensalmente e atingindo principalmente as regiões entre 5°S e 25°S (Lemos e De Calbete, 1996; Molion e Bernardo 2002).

No Nordeste brasileiro (NEB) a passagem de sistemas frontais ocasiona principalmente a intensificação da precipitação, possuindo grande importância no transporte de umidade e formação de chuva (Molion e Bernardo 2002; Pontes Da Silva et al., 2011). A identificação da passagem de sistemas frontais sobre o NEB pode ser melhor realizada através da análise nos campos de água precipitável, temperatura potencial equivalente (θ_e) e advecção da θ_e (Fedorova et al., 2016).

O ano de 2022 foi marcado por intensas precipitações, rajadas de vento e geadas causadas principalmente pela influência de ciclones e seus respectivos sistemas frontais. No mês de maio foram identificadas 3 ondas de frio, apresentando anomalias de até -7 °C, e 18 casos de geada nas regiões Sul e Sudeste do Brasil, sendo 5 intensos, 5 fracos e 8 moderados (SEAPA/INMET, 2022). Também foram observadas precipitações acima das médias históricas em 10 municípios do Brasil, com desvios de até 469,2 mm registrados no NEB (SEAPA/INMET, 2022).

No estado de Santa Catarina, foram registradas três mortes e ao menos 44 mil pessoas prejudicadas em decorrência das fortes chuvas no mês de maio (Lesnal, 2022). Na região nordeste a influência da passagem das frentes frias foi marcada por chuvas fortes, alagamentos e deslizamentos de terra. Afetando especialmente os estados de Alagoas e Pernambuco, com 132 mortes registradas e 53.434 pessoas afetadas até o início de julho (Lesnal, 2022).

Os objetivos deste trabalho são analisar os processos de formação de ciclones causadores de

fenômenos adversos no Brasil em maio de 2022 e identificar sistemas e fenômenos associados à passagem de suas respectivas frentes.

Material e métodos

Para aquisição dos dados foram utilizadas reanálises dos National Centers for Environment Prediction / National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR). Esses dados estão dispostos numa grade global de 2,5° x 2,5°, em 17 níveis de pressão na vertical e resolução temporal de 6 horas. Foram utilizadas as seguintes variáveis: componentes zonal (u) e meridional (v) do vento (m.s-1), altura geopotencial (z, em mgp), temperatura do ar (T, em K), pressão reduzida ao nível médio do mar (PNMM, em hPa), água precipitável (mm) e umidade relativa do ar (%).

Os dados de superfície foram coletados através do Banco de dados do INMET onde foram selecionados dados diários de temperatura mínima (°C) e precipitação acumulada (mm) de todas as estações do país para o período entre 01/05/22 e 10/06/22.

Também foram utilizadas imagens do canal 7 (3.90 μm) do satélite goes 16 (Geostationary Operational Environmental Satellite), obtidas da Divisão de Satélites Ambientais do Instituto de Pesquisas Espaciais (DSA/INPE).

A espessura da camada 1000-500 hPa foi calculada através da diferença entre os valores de altura geopotencial registrados para os dois níveis. Para fins de melhor compreensão das imagens a unidade utilizada para espessura da camada foi Hm (hectômetros).

A temperatura potencial equivalente foi calculada através das seguintes expressões:

$$= T_{\theta_e} + \left(\frac{2,501 \cdot 10^6}{1004} \cdot r \right) \cdot \left(\frac{\left(\frac{1000}{p} \right)^{\left(\frac{287}{1004} \right)}}{10} \right) \quad 1)$$

$$r = \frac{Rh \cdot R}{100 \cdot p} \quad 2)$$

$$R = 621,97 \cdot \frac{q}{p-q} \quad 3)$$

$$q = 6,1173 \cdot e^{\left[\frac{2,501 \cdot 10^6}{461,50} \cdot \left(\frac{1}{273,16 \cdot T} \right) \right]} \quad 4)$$

Onde Rh é a umidade relativa (%), T é a temperatura (°K) e p é o nível de pressão (hPa).

Resultados e discussão

Análise geral do processo

Foram identificados sete ciclones atuando sobre a América do Sul no mês de maio, cinco deles apresentando influência direta sobre a ocorrência de fenômenos adversos no Brasil.

O primeiro ciclone (C1) formou-se no Sul do Atlântico (40-50°S, 25-15°W) às 00z do dia 3 de maio (figura 1), na extremidade do cavado de um ciclone na costa da Antártica e da Corrente de Jato Subtropical (CJST). Deslocando-se para leste em estágio de onda e atingindo sua fase jovem no centro sul do Atlântico (40-45°S, 5-0°W) às 00z do dia 4 de maio sem causar grandes alterações no tempo do Brasil.

O segundo ciclone (C2) formou-se na divisa entre o Sudoeste do Pará, Argentina e Paraguai (25-30°S, 55-60°W) às 18z do dia 2 de maio próximo à extremidade do cavado de C1 e centro da CJST (figura 2). A formação do centro de C2 ocorreu de baixos níveis até o nível 850 hPa porém não foram observados movimentos ciclônicos na cobertura de nuvens até às 12z do dia 3 de maio, quando o centro de C2 já havia atingido o nível 700 hPa.

O deslocamento de C2 para leste iniciou-se às 00z do dia 4 de maio, mesmo momento em que o centro de C2 alcançou o nível 500 hPa, demonstrando estágio de desenvolvimento máximo e acoplado-se à Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) através do Jato de Baixos Níveis (JBN), evidenciado pelo campo de água precipitável durante boa parte do processo.

Entre os dias 4 e 7 de maio C2 atravessou as regiões Sul e Sudeste, atingindo principalmente o Sul do Brasil. O centro de C2 alcançou o nível 250 hPa com intensidade fraca às 18z do dia 5 de maio (figura 3), dissipando-se nas 6 horas

posteriores e mantendo-se abaixo desse nível durante o restante do processo.

A extremidade frontal de C2 chegou ao Sul da Bahia com intensidade fraca às 06z do dia 7 de maio, mantendo seu acoplamento à ZCIT e formando a Corrente de Jato do Nordeste Brasileiro (CJNEB) durante o restante do processo (figura 4). A frente de C2 atravessou todo o nordeste brasileiro sem causar alterações significativas na nebulosidade e precipitação, ocasionando um leve deslocamento na ZCIT para sul durante os últimos momentos de acoplamento com a CJNEB (06z do dia 10 de maio) também evidenciado pelo campo de água precipitável (figura 4-d).

O terceiro ciclone (C3) formou-se no Sul do Pacífico (50-55°S, 95-100°W) às 12z do dia 6 de maio na extremidade do cavado de um ciclone na costa da Antártica e extremidade sul da corrente de jato polar (CJP). Atravessou para o Atlântico (55-70°S, 60-70°W) às 06z do dia 9 de maio, regenerando-se durante o processo e injetando umidade em um centro de baixa pressão em formação no noroeste da Argentina. Seu centro não atingiu o nível 250 hPa e apresentou influência na circulação e termodinâmica da região observada até o dia 15 de maio, sem alterações significativas no tempo do Brasil.

O quarto ciclone (C4) formou-se no Noroeste da Argentina (30-35°S, 65°-70°W) às 18z do dia 8 de maio na extremidade da CJST, do cavado de C3 e abaixo de um Vórtice Ciclônico de Altos Níveis (VCAN) originário do oceano Pacífico. O VCAN que deu origem a C4 (VCAN1) formou-se no período anterior ao mês de maio, na região central do Pacífico Sul, deslocando-se na direção sul, da CJST para a Corrente de Jato Polar (CJP) com velocidade aproximada de 5 graus/dia (figura 2). Às 18z do dia 2 de maio o VCAN1 uniu-se à CJP (25-35°S, 100-110°W), deslocando-se para leste como um cavado com velocidade aproximada de 7,5 graus/dia (figura 5).

Às 18z do dia 3 de maio o centro do VCAN1 apresentou regeneração no nível 500 hPa, levando consigo uma linha de nuvens cirrus e crescendo novamente até o nível 200 hPa. O centro do VCAN1 regenerado uniu-se a um ciclone barotrópico (figura 6) em baixos níveis às 00z do dia 7 de maio na costa noroeste do Chile (15-30°S, 90-75°W), atravessando os andes com uma onda de ar frio, acoplando-se ao cavado de C3 e formando

um novo centro em baixos níveis na região central da Argentina (30-35°S, 70-65°W) às 18z do dia 8 de maio. Entre os dias 9 e 10 de maio o centro do VCAN apresentou enfraquecimento em altos níveis, unindo-se à extremidade da CJST e dissipando-se durante a intensificação do centro em baixos níveis. A instabilidade baroclínica também se intensificou durante esse processo, formando efetivamente o centro de baixa pressão do C4.

A frente fria do C4 chegou ao Brasil em seu estágio de desenvolvimento máximo às 00z do dia 10 de maio, apresentando acoplamento à ZCIT através do JBN e atingindo as regiões Sul e Sudeste do Brasil inicialmente com nuvens estratiformes. Durante a passagem pelo Brasil, o C4 apresentou duas regenerações, deslocando-se para sudeste. A massa de ar frio de C4 penetrou até o sudeste do Brasil, com sua extremidade frontal atingindo a região central da Bahia (figura 9) e sendo substituída pela extremidade frontal de C5 após o desacoplamento com a ZCIT às 00z do dia 17 de maio.

O quinto ciclone (C5) formou-se na região central do pacífico Sul (25-35°S, 110-120°W), na extremidade frontal do C3 e da CJST, apresentando uma regeneração e centro fechado até o nível 850 hPa às 6z do dia 9 de maio (figura 7). O centro de C5 dissipou-se novamente às 12z do dia 10 de maio, deslocando-se para leste como um cavado com velocidade aproximada de 13 graus/dia e formando um novo centro fechado no sul do Chile (45-55°S, 80-70°W) de baixos níveis até 500 hPa às 12z do dia 12 de maio.

O centro regenerado do C5 atravessou para o oceano Atlântico acoplado a C4 e a extremidade frontal de um ciclone na costa da Antártica entre os dias 12 e 14 de maio (figura 8), dissipando-se novamente no dia 13 e formando um novo centro fechado de baixos níveis até o nível 250 hPa na costa sudeste da Argentina (40-50°S, 65-55°W) às 12z do dia 14 de maio (figura 8-d). Parte da extremidade frontal de C5 associada à CJST atravessou os andes mais ao norte (30-35°S, 70-75°W) formando um Complexo Convectivo de Mesoescala (CCM) na fronteira entre o Paraguai e a Argentina às 06z do dia 14 de maio.

O CCM formado pelo C5 formou um novo centro de baixa pressão no Sul do Brasil, causando nuvens de convecção profunda, acoplando-se à

extremidade frontal de C5 e formando oclusão instantânea (figura 9) juntamente com uma nova regeneração de C5 entre os dias 14 e 17 de maio. Durante o processo de oclusão instantânea a extremidade frontal de C5 atravessou as regiões Sul, Sudeste e Nordeste do Brasil, acoplando-se à CJNEB acima do estado de Alagoas e causando linhas de instabilidade e CCMs em regiões da Bahia, Sergipe e Alagoas.

A frente de C5 sofreu uma nova regeneração às 00z do dia 19 de maio, causando convecção profunda sobre a costa da Bahia. O acoplamento entre a frente regenerada e a ZCIT estimulou a formação de CCMs nas regiões Norte e Nordeste do Brasil, atingindo principalmente os estados de Alagoas, Amapá, Bahia, Ceará, Maranhão, Piauí e Sergipe. A CCM mais intensa (figura 10) ocorreu no leste do Nordeste, entre os estados de Alagoas, Bahia e Sergipe, durando aproximadamente 6 horas e formando uma nova CCM nos estados de Pernambuco e Paraíba com a umidade residual de sua dissipação. A frente regenerada de C5 permaneceu acoplada à ZCIT até às 6z do dia 24 de maio, continuando a alimentar sistemas causadores de precipitação através da circulação do Anticiclone subtropical do Atlântico Sul (ASAS) até o fim do período observacional.

O sexto ciclone (C6) formou-se no Sul do pacífico (35-40°S, 95-85°W) em conjunto com um ciclone na costa da Antártica (75-85°S, 80-90°W) às 18z do dia 15 de maio devido à instabilidade baroclínica e influência da extremidade da CJP (figura 9). Deslocou-se levemente para oeste entre os dias 15 e 18 de maio, unindo-se à extremidade frontal de outro ciclone na costa da Antártica às 12z do dia 18 de Maio. Após a dissipação, deslocou-se para leste como uma onda sinótica formando um novo centro na costa sudeste do Chile (35-45°S, 80-90°W) às 12z do dia 19 de maio que se dissipou nas 6 horas seguintes ao se acoplar ao cavado de um novo ciclone na costa da Antártica. A nebulosidade residual de C6 atravessou os andes como um prolongamento de uma onda de Rossby (OR1), atingindo o sul do Brasil às 00z do dia 25 de Maio e formando alguns CCMs e centros de baixa pressão com duração inferior a 6 horas na região.

Às 00z do dia 26 a OR1 (figura 11 - a e b) se acoplou ao JBN, causando nuvens convectivas e CCMs sobre as regiões sul e sudeste do Brasil. A

extremidade da OR1 se desacoplou após atingir o Espírito Santo devido à formação de um anticiclone na região.

Uma segunda onda de Rossby (OR2) acoplada ao mesmo ciclone na costa da Antártica atingiu o sul do Brasil às 06z do dia 27 de maio, acoplando-se ao JBN e causando novas CCMs e precipitações convectivas no sul do Brasil (figura 11-c). A influência da OR2 sobre o Brasil ocorreu até o dia 28 de maio, quando uma terceira onda de Rossby (figura 11-d) do mesmo ciclone iniciou a formação do ciclone C7 entre a extremidade do cavado do ciclone na costa da Antártica e as CCMs formadas pelo JBN.

O sétimo ciclone (C7) Formou-se no Sul do Atlântico (45°S a 50°S, 35°W a 45°W) às 00z do dia 30 de Maio na extremidade de uma onda de Rossby acoplada à extremidade do JBN e extremidade sul da CJP. Durante a formação da frente fria de C7 ocorreu um processo de oclusão instantânea que atingiu as regiões Sul, Sudeste e Centro Oeste do Brasil (figura 12). A frente regenerada de C7 deslocou-se por toda a costa leste do Brasil sem ocorrência de fenômenos intensos na maioria dos estados. Às 18z do dia 5 de Junho a frente renegada de C7 acoplou-se à ZCIT ao atingir o estado do Sergipe, causando precipitações intensas nos estados de Alagoas e Paraíba antes de dissipar às 00z do dia 8 de Junho.

Fenômenos Identificados

Durante o mês de Maio diversos municípios apresentaram precipitações acima das médias históricas em decorrência da passagem de ciclones e fenômenos associados, sendo eles: João Pessoa - PB (714,2 mm/mês), Recife - PE (786,3 mm/mês), Maceió - AL (579,0 mm/mês), Cametá - PR (544,7 mm/mês) e Vacaria - RS (427,8 mm/mês) (SEAPA/INMET, 2022).

A passagem da frente fria de C2 ocasionou precipitações intensas nas regiões Sul e Sudeste do Brasil (tabela 10), onde se destacaram os estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul com precipitações acumuladas acima de 90 mm/dia em diversas estações. Também foram registradas precipitações acima de 50 mm/dia em estados do Norte do Brasil como Amazonas e Pará devido a CCMs formadas na extremidade frontal de C2.

Entre os dias 4 e 5 de maio, durante a passagem da frente fria de C2, foram observadas

quatro rajadas de vento com intensidade de até 9 graus na escala Beaufort (tabela 17) no estado do Rio de Janeiro. A rajada de vento mais intensa ocorreu no dia 5 de Maio na estação de Itatiaia - RJ, com ventos de até 23m/s.

Também foram observados dois casos de rajadas de vento (tabela 18) no Norte do Brasil durante a passagem das CCMs associadas à frente fria de C2. Ambos os eventos ocorreram no estado do Pará entre os dias 7 e 8 de Maio, com o mais significativo ocorrendo na estação de Conceição do Araguaia - PA no dia 8 de maio, com velocidade de rajada de 21,9m/s.

Durante a passagem da massa de ar frio associada a C2 foram registradas (tabela 6) temperaturas abaixo de 10 graus em diversas estações nos estados do Sul, Sudeste e Centro Oeste do Brasil, com as menores temperaturas mínimas ocorrendo em Itatiaia - RJ (0,7°C), Santa Maria - RS (1,3°C), São Joaquim - SC (2,5°C), e Maria da Fé - MG (4,6°C), sendo reportada geada no evento ocorrido em São Joaquim.

A frente fria de C4 causou precipitações acumuladas (tabela 11) mais amenas nas regiões Sul e Sudeste do Brasil, com precipitação máxima de 35,0 mm identificada na capital do Rio de Janeiro. Nos estados do Pará e Amazonas foram registrados acumulados diários de precipitação superiores a 50 mm durante o acoplamento entre a extremidade frontal e a ZCIT. Novamente a passagem da massa de ar frio resultou em temperaturas mínimas abaixo de 10 graus (tabela 7) em boa parte das regiões Sul, Sudeste, e Centro Oeste destacando-se as estações de Itatiaia - RJ (-3,1°C), Bom Jardim da Serra - SC (2,9°C) e Bom Jesus - RS (3,8°C). Não foram identificadas rajadas de vento acima de 7 graus na escala Beaufort associadas à passagem de C4.

A passagem da frente fria de C5 causou precipitações acumuladas (tabela 13) moderadas nas regiões Sul e Sudeste do Brasil, destacando-se os estados do Rio de Janeiro (74,6 mm/dia), Rio Grande do Sul (43,6 mm/dia) e Pará (30,6 mm/dia). Também foram registradas precipitações acumuladas diárias intensas no estado do Acre (89,6 mm/dia) devido a formação de CCM na extremidade da frente secundária de C5 e precipitações acumuladas moderadas nos estados do Piauí (59,2 mm/dia), Maranhão (53,8 mm/dia) e Alagoas (36,6 mm/dia) devido a formação de uma

ccm na extremidade da frente regenerada de C5. Os estados da Bahia e Sergipe também foram atingidos pela CCM, porém não possuíam dados de precipitação para as regiões atingidas no período. Novamente foram observadas diversas estações com temperaturas abaixo de 10°C (tabela 8), com maior ocorrência de temperaturas abaixo de 1°C nas regiões Sul, Sudeste e Centro Oeste, destacando-se as estações de Itatiaia -RJ (-7,7°C), Morro da Igreja - SC (-2,9°C) e Maria da Fé - MG (-0,9°C).

Entre os dias 16 e 19 de Maio, durante a passagem da frente fria de C5, foram observados 62 eventos de rajadas de vento (tabela 19) com intensidade superior a 7 graus na escala Beaufort, atingindo principalmente as regiões Sul e Sudeste do Brasil. A rajada de vento mais intensa ocorreu na estação de São José dos Ausentes - RS, com velocidade máxima de 26,6 m/s, configurando 10 graus de intensidade na escala Beaufort.

A passagem das massas de ar frio associadas aos ciclones C5 e C6 ocasionaram uma onda de frio com duração de oito dias (entre os dias 16 e 23) nas regiões Sul, Sudeste e Centro Oeste do Brasil, com vinte casos potenciais de Geadas e oito casos confirmados através de estações convencionais nos estados do Rio Grande do Sul e Paraná, sendo quatro fracas, três moderadas e uma forte (SEAPA/INMET, 2022). Dentre as regiões atingidas pela massa de ar frio a que mais se destacou foi a estação de Gama-DF, onde foi registrada a menor temperatura mínima desde o início das medições durante a passagem do C5 (19/05).

A passagem da primeira onda de Rossby causou acumulados diários de precipitação intensos (tabela 14) na região sul do Brasil, em sua maioria ocorridos entre os dias 25 e 30 de Maio. No dia 29 de Maio CCMs provenientes da primeira onda de Rossby atingiram o Sul do Brasil, causando acumulados diários de precipitação de 94,4 mm/dia em Santo Augusto - RS, 84,8 mm/dia em Passo Fundo - RS e 71,2 mm/dia em Vacaria - RS.

Entre os dias 25 e 29 de Maio também foram observados 11 eventos de rajadas de vento (tabela 20) com intensidade superior a 7 graus na escala Beaufort, todos eles ocorridos no Sul do Brasil. A rajada de vento mais intensa ocorreu na estação de Bom Jardim da Serra - Morro da Igreja

- SC com velocidade máxima de rajada de 28,6 m/s, configurando 11 graus na escala Beaufort.

As passagens da segunda onda de Rossby e do ciclone C7 causaram acumulados diários de precipitação intensos (tabela 15) nas regiões Sul, Sudeste e Nordeste do Brasil entre os dias 30 de Maio e 8 de Junho. As maiores precipitações das regiões Sul e Sudeste do Brasil ocorreram entre os dias 30 de Maio e 2 de Junho devido a passagem da extremidade frontal nas estações de Inácio Martins - PR (92,6 mm/dia), Curitiba - PR (75,4 mm/dia) e Itapoa - SC (67,8). A região Nordeste também apresentou precipitações intensas entre os dias 6 e 8 de Junho devido à extremidade frontal da frente regenerada de C7, que causou precipitações de 50,4 mm/dia em Maceió - AL e 49,8 mm/dia em Marauí -BA.

Entre os dias 30 de Maio e 4 de Junho, durante a passagem da segunda onda de Rossby e do ciclone C7, foram observados 7 eventos de rajadas de vento (tabela 21) com intensidade superior a 7 graus na escala Beaufort, todos eles ocorridos nas regiões Sul e Sudeste do Brasil. A rajada de vento mais intensa ocorreu no dia 30 de Maio, na estação de Japira - PR, com velocidade máxima de rajada de 22,4 m/s, configurando 9 graus na escala Beaufort.

A passagem das massas de ar frio associadas às duas ondas de Rossby e ao ciclone C7 também causaram temperaturas mínimas abaixo de 10°C (tabela 9) entre os dias 30 de Maio e 5 de junho nas regiões Sul e Sudeste do Brasil. As menores temperaturas mínimas foram de -4,3°C em Itatiaia - RJ, -0,6°C em São José dos Ausentes - RS e 0°C em Bom Jardim da Serra - Morro da Igreja SC.

Conclusões

Entre os dias 01/05/2022 e 10/06/2022 foram identificados sete ciclones atuando sobre a América do Sul, cinco deles influenciaram diretamente a ocorrência de fenômenos adversos sobre o território brasileiro. Dentre os ciclones que atingiram o Brasil, quatro (C2, C4, C5 e C7) apresentaram extremidades frontais sobre as regiões Norte e Nordeste, com dois deles responsáveis (C5 e C7) por precipitações intensas e acima de valores mensais históricos (C5) nos estados de Alagoas, Paraíba e Pernambuco.

As principais regiões ciclogênicas observadas foram:

- (1) - Sul do Atlântico (C1, 40-50°S, 25-15°W) e (C7, 45°S a 50°S, 35°W a 45°W);
- (2) - Divisa entre Brasil, Argentina e Paraguai (C2, 25-30°S, 55-60°W);
- (3) - Sul do Pacífico (C3, 50-55°S, 95-100°W) e (C6, 35-40°S, 95-85°W);
- (4) - Noroeste da Argentina (C4, 30-35°S, 65°-70°W);
- (5) - Região central do Pacífico Sul (C5, 25-35°S, 110-120°W).

As gênese e regenerações dos ciclones observados ocorreram devido a:

- (1) - instabilidade baroclínica abaixo de extremidades das Correntes de Jato Subtropical (CJST) e Polar (CJP) (todos os ciclones);
- (2) - instabilidade baroclínica na extremidade dos cavados de frentes frias (C1, C2, C3 e C5).
- (3) passagem de um VCAN do tipo Palmén através dos Andes (C4);
- (4) - instabilidade baroclínica na extremidade de ondas de Rossby (C7).

A intensificação dos ciclones e zonas frontais mais influentes ocorreu devido ao:

- (1) - Acoplamento com as correntes de jato (todos os ciclones);
- (2) - Acoplamento com a ZCIT através do JBN e/ou CJNEB (C2, C4 e C5);
- (3) - Aporte de umidade e ar frio através de cavados originários do oceano pacífico (C3, C4, C5 e C7);
- (4) - Assimilação de Complexos Convectivos de Mesoescala (CCMs) em processos de oclusão instantânea (C5 e C7).

Durante a passagem dos ciclones que atingiram a região Nordeste (C2, C4, C5 e C7) ocorreram os seguintes fenômenos:

- (1) Temperaturas mínimas abaixo de 5° C e geadas na região centro-sul do Brasil;
- (2) Precipitações intensas devido à passagem de frentes frias;
- (4) Precipitações intensas devido ao acoplamento de extremidades frontais às correntes de jato, CJNEB e JBN;

(5) Precipitações diárias de até 176,60 mm devido a formação de CCMs em extremidades frontais registradas no Nordeste do Brasil;

(6) Rajadas de vento com velocidades de até 28 m.s^{-1} na região Centro-sul do Brasil.

Os estados mais atingidos pela passagem de C2 foram: Santa Catarina, Rio Grande do Sul e Minas Gerais. Com maiores precipitações acumuladas diárias de 119,60 mm (A814 - SC), 98,20 mm (A880 - RS) e 60,00 mm (A521 - MG) entre os dias 3 e 5 de Maio. Também foram observados quatro casos de rajadas de vento no estado do Rio de Janeiro com velocidades de até 23 m/s.

Os estados mais atingidos pela passagem de C4 foram: Mato Grosso, Pará e Santa Catarina. Com maiores precipitações acumuladas diárias de 36,60 mm (A905 - MT), 33,80 mm (A245 - PA) e 28,20 mm (A895 - SC).

A passagem de C5 (entre 14 e 21 de Maio) causou diversos fenômenos adversos no Brasil. Com precipitações intensas no Nordeste, rajadas de vento e temperaturas abaixo de zero na região Centro-Sul.

CCMs formadas na extremidade frontal de C5 resultaram em acumulados diários de precipitação com valores de 176,60 mm em Pernambuco (A348), 69,80 mm em Alagoas (A371) e 62,40 mm na Bahia (A458). Com ocorrência de enchentes e deslizamentos nos dois primeiros estados.

As estações convencionais e relatórios do INMET identificaram uma onda de frio entre os dias 16 e 23 de maio juntamente com oito casos de geada relacionados ao ciclone C5. Os estados mais afetados foram Minas Gerais, Mato Grosso do Sul e Pará com quatro casos registrados em cada um entre os dias 19 e 20 de maio. Também foi observada neve nas Serras Gaúcha e Catarinense, com temperaturas abaixo de zero em ambos os casos. Também foram observados 62 casos de rajadas de vento entre 7 e 10 graus na escala Beaufort nas regiões Sul e Sudeste do Brasil.

A primeira Onda de Rossby (OR1) atingiu principalmente os estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Pará. Com maiores acumulados diários de precipitação de 94,40 mm (A805 - RS), 67,60 mm (A898 - SC) e 41,00 mm (A886 - RS).

Os estados Rio Grande do Sul e Santa Catarina também foram atingidos por intensas

rajadas de vento durante a passagem da OR1. Com rajadas entre 9 e 11 graus na escala beaufort e maiores valores de 28,60 m/s (A845 - SC) e 22,30 m/s (A852 - RS) para cada estado.

A segunda onda de Rossby (OR2) atingiu principalmente o Paraná e Santa Catarina. Com maiores precipitações acumuladas de 92,60 mm (A823 - PR) e 67,80 mm (A851 - SC) para cada estado. Também foram registradas rajadas de vento entre 8 e 9 graus na escala beaufort, com maiores valores de 22,40 m/s (A871 - PR) e 20,30 m/s (A845 - SC) para cada estado.

O sétimo ciclone (C7) apresentou influência majoritária na região Nordeste. Com acumulados diários de precipitação de 50,4 mm em Alagoas (A303), 49,8 mm na Bahia (A438) e 28,8 mm na Paraíba (A310). Também foram observados 7 eventos de rajada de vento entre 7 e 9 graus na escala Belfort nas regiões Sul e Sudeste do Brasil, com maior valor de 22,4 m/s em Japira - PR.

Entre a permanência da OR2 e passagem do C7 também foram observadas temperaturas abaixo de 5 graus na região centro-sul do Brasil, atingindo principalmente Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Rio de Janeiro. As menores temperaturas relacionadas a esses sistemas para cada estado foram $-1,7^{\circ}\text{C}$ (A829 - RS), $-0,4^{\circ}\text{C}$ (A635 - RJ) e $-0,2^{\circ}\text{C}$ (A815 - SC).

Referências

- Ávila, V. D., Nunes, A. B., & Alves, R. C. M. (2016). Análise de um caso de ciclogênese explosiva ocorrido em 03/01/2014 no sul do Oceano Atlântico. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 9(4), 088–1099.]
- Fedorova, N., Levit, V., & da Cruz, C. D. (2016). On frontal zone analysis in the tropical region of the Northeast Brazil. *Pure and Applied Geophysics*, 173, 1403–1421.
- Gan, M. A., & Rao, V. B. (1991). Surface cyclogenesis over South America. *Monthly Weather Review*, 119, 1293–1302.
- Lemos, C. F., & Calbete, N. O. (1996). Sistemas frontais que atuaram no Brasil de 1987 a 1995. *Climanálise Especial Edição Comemorativa de 10 Anos - MCT/INPE/CPTEC*, outubro.
- Lesnal, A. (2022, dezembro 4). Veja os principais desastres causados por chuvas em 2022 no Brasil. *Metrópoles**. Disponível em: <https://www.metrópoles.com/brasil/veja-os->

principais-desastres-causados-por-chuvas-em-2022-no-brasil

- Rodrigues, M. L. G., Franco, D., & Sugahara, S. (2004). Climatologia de frentes frias no litoral de Santa Catarina. *Revista Brasileira de Geofísica*, 22(2), 135–151.
- SEAPA/INMET. (2022). Eventos extremos de maio de 2022 no Brasil. Disponível em: https://portal.inmet.gov.br/uploads/notastecnicas/Nota_EventosExtremos_Brasil_Maio20221.pdf
- Hoskins, B. J., & Hodges, K. I. (2005). A new perspective on Southern Hemisphere storm tracks. *Journal of Climate*, 18, 4108–4129.
- Molion, L. C. B., & Bernardo, S. O. (2002). Uma revisão da dinâmica das chuvas no Nordeste Brasileiro. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 17(1), 1–10.
- Necco, G. (1982). Comportamiento de vórtices ciclónicos en el área sudamericana durante el FGGE: Ciclogênese. *Meteorológica*, 13, 7–19.
- Pettersen, S., & Smebye, S. J. (1971). On the development of extratropical cyclones. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 97, 457–482.
- Pontes da Silva, B. F., Fedorova, N., Levit, V., & Peresetsky, A. (2011). Sistemas sinóticos associados às precipitações intensas no Estado de Alagoas. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 26(3), 295–310.
- Reboita, M. S., Rocha, R. P., & Ambrizzi, T. (2005). Climatologia de ciclones sobre o Atlântico Sul utilizando métodos objetivos na detecção destes sistemas. In **IX Congresso Argentino de Meteorologia**, Buenos Aires, Argentina: Anais. Buenos Aires: CONGREMET.
- Reboita, M. S., da Rocha, R. P., Ambrizzi, T., & Sugahara, S. (2010). South Atlantic Ocean cyclogenesis climatology simulated by regional climate model (RegCM3). *Climate Dynamics*, 35, 1331–1347.
- Sinclair, M. R. (1995). A climatology of cyclogenesis for the Southern Hemisphere. *Monthly Weather Review*, 123, 1601–1619.
- Zillman, J. W., & Price, P. G. (1972). On the thermal structure of mature Southern Ocean cyclones. *Aust. Meteor*, 20, 34–48.