



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS - UFAL
CAMPUS A. C. SIMÕES
INSTITUTO DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
CURSO DE METEOROLOGIA

PAULO VÍTOR DE ALBUQUERQUE MENDES

**INVASÕES INTER-HEMISFÉRICAS DE SISTEMAS COM ESCALA SINÓTICA EM
ALTOS NÍVEIS SOBRE O ATLÂNTICO TROPICAL E SUA ASSOCIAÇÃO A
FENÔMENOS ADVERSOS NO NORDESTE DO BRASIL**

Maceió
2024

PAULO VÍTOR DE ALBUQUERQUE MENDES

**INVASÕES INTER-HEMISFÉRICAS DE SISTEMAS COM ESCALA SINÓTICA EM
ALTOS NÍVEIS SOBRE O ATLÂNTICO TROPICAL E SUA ASSOCIAÇÃO A
FENÔMENOS ADVERSOS NO NORDESTE DO BRASIL**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Instituto de Ciências
Atmosféricas - ICAT da Universidade
Federal de Alagoas, como requisito parcial à
obtenção do título de Bacharel em
Meteorologia.

Orientadora: Profa. Dra. Natalia Fedorova

Maceió

2024

Catálogo na Fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico

Bibliotecário: Marcelino de Carvalho Freitas Neto – CRB-4 – 1767

M538i Mendes, Paulo Vítor de Albuquerque.

Invasões inter-hemisféricas de sistemas com escala sinótica em altos níveis sobre o atlântico tropical e sua associação a fenômenos adversos no Nordeste do Brasil / Paulo Vítor de Albuquerque Mendes. – 2024.

106 f. : il.

Orientadora: Natalia Fedorova.

Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Meteorologia) –
Universidade Federal de Alagoas. Instituto de Ciências Atmosféricas. Maceió,
2024.

Bibliografia: f. 101-106.

1. Teleconexões atmosféricas - Atlântico Sul, Oceano. 2. Vórtices ciclônicos -
Altos níveis. 3. Anticiclones - Altos níveis. I. Título.

CDU: 551.515(812/813)

AGRADECIMENTOS

- Primeiramente, agradeço aos meus pais e meu irmão por todo o apoio e compreensão ao longo desta jornada;
- A minha orientadora Profa Natalia Fedorova e ao Prof Vladimir Levit, pela amizade, compreensão, experiências e conhecimento transmitido. A produção deste trabalho não seria possível sem sua orientação e análise minuciosa;
- A minha parceira Rayane Macena, pelo carinho, incentivo e paciência para ouvir minhas incessantes observações sobre os temas abordados;
- Aos meus amigos Millikan e Mário pela companhia, experiências e apoio aos projetos desenvolvidos;
- Aos membros da banca avaliadora Matheus Lyra e Vinícius Pinho pela paciência, conselhos e auxílio para a finalização deste trabalho;
- Aos demais professores do Instituto de Ciências Atmosféricas (ICAT) da Universidade Federal de Alagoas, pelos conhecimentos e experiências compartilhadas;
- Aos demais funcionários do ICAT pelo excelente serviço, ajuda e esclarecimento de dúvidas.

RESUMO

Este trabalho objetivou identificar os processos de formação e as influências de: 1) cavados em altos níveis do Hemisfério Norte (CAN-HN), 2) Vórtices Ciclônicos em Altos Níveis (VCANs) em baixas latitudes e 3) Centros com Circulação Anticiclônica em altos níveis (CCAs) sobre a circulação e ocorrência de fenômenos adversos no Nordeste do Brasil. As análises gerais foram realizadas de forma diária, às 0Z, do período entre 1991 e 2020, a partir de imagens de satélite e reanálises do ERA5. A contagem dos casos foi realizada para o período entre 2011 e 2020. Casos típicos de cada sistema foram selecionados para a identificação dos fenômenos associados. As informações sobre os fenômenos foram obtidas a partir de estações de superfície e mensagens do código METAR. Os principais resultados são: 1) Invasões de CAN-HN sobre o Hemisfério Sul ocorreram durante a passagem de sistemas frontais e VCANs do Hemisfério Norte. O máximo de invasões de CAN-HN foi observado durante o verão austral, no mês de janeiro. 2) A presença de CAN-HN modificou a formação, posicionamento e intensidade dos VCANs em baixas latitudes. Alterações no regime de precipitação foram observadas devido à interação entre VCANs e CAN-HN. O deslocamento de VCANs demonstrou relação com o posicionamento e intensidade das cristas dos anticiclones subtropicais nos dois hemisférios. 3) CCAs formados durante o verão austral, na extremidade dos CAN-HN, intensificaram o deslocamento e formação de nuvens convectivas no setor oeste dos VCANs. CCAs formados entre o fim do outono e início da primavera austral apresentaram processos distintos e foram classificados como Anticiclones em Altos Níveis. Anticiclones formados a partir de uma crista zonal em altos níveis sobre o Atlântico Sul tiveram máximo no mês de agosto, deslocamento para oeste e amplificam-se através da passagem de sistemas frontais do hemisfério Sul na costa oeste da África. Anticiclones formados a partir de perturbações no Pacífico tiveram máximo no mês de junho, deslocamento para leste e características similares às da Alta da Bolívia. A presença dos Anticiclones sobre o NEB foi marcada por bom tempo, com ocorrência de precipitação fraca na região de confluência entre os dois tipos de anticiclone ou após a dissipação dos sistemas.

Palavras-chave: Teleconexões Atmosféricas do Atlântico Sul, Vórtices Ciclônicos em Altos Níveis, Anticiclones em Altos Níveis.

ABSTRACT

This work aimed to identify the formation processes and influences of: 1) Upper Tropospheric Troughs from the Northern Hemisphere (UTT-NH), 2) Upper Tropospheric Cyclonic Vortexes (UTCVs) at low latitudes and 3) Upper Tropospheric Anticyclonic Centers (UTACs) on circulation and occurrence of adverse phenomena in Northeast Brazil. General analyzes were carried out daily, at 0Z, from 1991 to 2020, based on satellite images and ERA5 reanalyses. The number of cases were registered for the period between 2011 and 2020. Typical cases from each system were selected to identify associated phenomena. Information about the phenomena was obtained from surface stations and METAR code messages. The main results are: 1) UTT-NH invasions over the Southern Hemisphere occurred during the passage of frontal systems and UTCVs from the Northern Hemisphere. The maximum UTT-NH invasions were observed during the southern summer, in January. 2) The presence of UTT-NH modified the formation, positioning and intensity of UTCVs at low latitudes. Changes in the precipitation regime were observed due to the interaction between UTCVs and UTT-NH. The displacement of UTCVs showed a relationship with the positioning and intensity of the ridges of subtropical anticyclones in both hemispheres. 3) UTACs formed during the austral summer, in the edge of an UTT-NH, intensified the displacement and formation of convective clouds in the western sector of the UTCVs. UTACs formed between the end of autumn and the beginning of the austral spring showed distinct processes and were classified as High Level Anticyclones. Anticyclones formed from a zonal ridge at the upper troposphere over the South Atlantic peaked in August, moved westward and formed due to the amplification of the ridge after the passage of frontal systems on the west coast of Southern Africa. Anticyclones formed from disturbances in the Pacific had a maximum in June, displacement to the east and were similar to the Bolivian High. The presence of Anticyclones over the NEB was marked by good weather, with the occurrence of weak precipitation in the region of confluence between the two types of anticyclone or after their dissipation.

Keywords: Atmospheric Teleconnections on South Atlantic, Upper Tropospheric Cyclonic Vortexes, Upper tropospheric Anticyclones.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplo de acoplamento entre ZCIT e ZCAS com influência sobre o NEB.....	9
Figura 2 - Área de estudo (a, b) e localização das estações de superfície (b, c).....	14
Figura 3 - Invasão de um sistema frontal do Hemisfério Norte sobre a América do Sul no dia às 0Z do dia 20 de março de 2020. Campos utilizados: Linhas de corrente em 250 hPA e Imagens de satélite nos canais do infravermelho (IR) e vapor d'água (WV); Zona de convergência intertropical identificada pelo símbolo padrão; Linhas roxas: Frente Oclusa; Linhas vermelhas: Frentes quentes; Linhas azuis: Frentes frias.....	20
Figura 4 - Processo de invasão de CAN-HN sobre o norte da América do Sul e Norte da África a partir de imagens de satélite às 0Z dos dias 5 (a), 7 (b), 8 (c) e 10 (d) de janeiro de 2009. Campos utilizados: Imagens de satélite (Knapp, K. R. et al, 2011) nos canais do Infravermelho (em cima) e Vapor d'água realçado (em baixo). Círculo vermelho com setas: Vórtice Ciclônico em Altos Níveis; Linhas azuis: Frentes frias; Linhas roxas: Frente Oclusa; Linhas vermelhas: Frentes quentes.....	24
Figura 5 - Processo de invasão de CAN-HN sobre o norte da América do Sul e Norte da África a partir dos campos sinóticos às 0Z dos dias 8 (a), 10 (b), 12(c) e 14(d) de janeiro de 2009.....	25
Figura 6 - Processo de invasão de CAN-HN sobre o Atlântico Sul a partir de imagens de satélite às 0Z dos dias 16 (a), 18 (b), 21 (c) e 23 (d) de janeiro de 2009.....	26
Figura 7 - Processo de invasão de CAN-HN sobre o Atlântico Sul a partir dos campos sinóticos às 0Z dos dias 16 (a), 18 (b), 21(c) e 23(d) de janeiro de 2009.....	27
Figura 8 - Processo inicial de invasão de CAN-HN sobre o Hemisfério Sul a partir de imagens de satélite às 0Z dos dias 6 (a), 8 (b), 10 (c) e 12 (d) de janeiro de 2016.....	28
Figura 9 - Processo inicial de invasão de CAN-HN entre o Norte e Nordeste do Brasil a partir dos campos sinóticos às 0Z dos dias 12 (a), 14 (b), 16(c) e 19(d) de janeiro de 2016.....	29
Figura 10- Processo final de invasão de CAN-HN entre o Norte e Nordeste do Brasil a partir de imagens de satélite às 0Z dos dias 17 (a), 20 (b), 24 (c) e 30 (d) de janeiro de 2016.....	30
Figura 11 - Processo de invasão de CAN-HN entre o Norte e Nordeste do Brasil a partir dos campos sinóticos às 0Z dos dias 21 (a), 25 (b), 27(c) e 30(d) de janeiro de 2016.....	31
Figura 12 - Processo de formação do Vórtice Ciclônico em Altos Níveis do Hemisfério Sul na extremidade de cavados frontais de ambos os hemisférios a partir de imagens de satélite às 0Z dos dias 10 (a), 12 (b), 14 (c) e 15 (d) de janeiro de 2004.....	39
Figura 13 - Processo de formação do Vórtice Ciclônico em Altos Níveis do Hemisfério Sul na extremidade de cavados frontais de ambos os hemisférios a partir de campos Sinóticos às 0Z dos dias 10 (a), 12 (b), 14 (c) e 15 (d) de janeiro de 2004.....	40
Figura 14 - Processo de deslocamento do Vórtice Ciclônico em Altos Níveis do Hemisfério Sul na extremidade de cavados frontais de ambos os hemisférios a partir de imagens de satélite às 0Z dos dias 18 (a), 20 (b), 22(c) e 24(d) de janeiro de 2004.....	41
Figura 15 - Processo de deslocamento do Vórtice Ciclônico em Altos Níveis do Hemisfério Sul na extremidade de cavados frontais de ambos os hemisférios a partir de campos Sinóticos às 0Z dos dias 18 (a), 20 (b), 22(c) e 24(d) de janeiro de 2004.....	42
Figura 16 - Processo de dissipação do Vórtice Ciclônico em Altos Níveis do Hemisfério Sul na extremidade de cavados frontais de ambos os hemisférios a partir de imagens de satélite às 0Z dos dias 26 (a), 28 (b), 30(c) de janeiro e 1(d) fevereiro de 2004.....	43
Figura 17 - Processo de dissipação do Vórtice Ciclônico em Altos Níveis do Hemisfério Sul na extremidade de cavados frontais de ambos os hemisférios a partir de campos Sinóticos às 0Z dos dias 26 (a), 28 (b), 30(c) de janeiro e 1(d) fevereiro de 2004.....	44
Figura 19 - Processo de formação do Vórtice Ciclônico em Altos Níveis do Hemisfério Sul formado entre dois cavados frontais do Hemisfério Norte a partir dos campos sinóticos às 0Z dos dias 18 (a), 22 (b), 23 (c) e 24 (d) de janeiro de 2013.....	47

Figura 20 - Processo de deslocamento do Vórtice Ciclônico em Altos Níveis do Hemisfério Sul formado entre dois cavados frontais do Hemisfério Norte a partir de imagens de satélite às 0Z dos dias 26 (a), 28 (b), 30 (c) de janeiro e 1 (d) fevereiro de 2013.....	48
Figura 21 - Processo de deslocamento do Vórtice Ciclônico em Altos Níveis do Hemisfério Sul formado entre dois cavados frontais do Hemisfério Norte a partir dos campos sinóticos às 0Z dos dias 26 (a), 28 (b), 30 (c) de janeiro e 1 (d) fevereiro de 2013.....	49
Figura 22 - Processo de regeneração do Vórtice Ciclônico em Altos Níveis do Hemisfério Sul formado entre dois cavados frontais do Hemisfério Norte a partir de imagens de satélite às 0Z dos dias 2 (a), 4 (b), 6 (c) e 8 (d) de fevereiro de 2013.....	50
Figura 23 - Processo de regeneração do Vórtice Ciclônico em Altos Níveis do Hemisfério Sul formado entre dois cavados frontais do Hemisfério Norte a partir dos campos sinóticos às 0Z dos dias 2 (a), 4 (b), 6 (c) e 8 (d) de fevereiro de 2013.....	51
Figura 24 - Processo de dissipação do Vórtice Ciclônico em Altos Níveis do Hemisfério Sul formado entre dois cavados frontais do Hemisfério Norte a partir de imagens de satélite às 0Z dos dias 10(a), 12(b), 14(c) e 16(d) de fevereiro de 2013.....	51
Figura 25 - Processo de dissipação do Vórtice Ciclônico em Altos Níveis do Hemisfério Sul formado entre dois cavados frontais do Hemisfério Norte a partir dos campos sinóticos às 0Z dos dias 10(a), 12(b), 14(c) e 16(d) de fevereiro de 2013.....	52
Figura 26 - Processo de formação do vórtice com circulação horária em altos níveis entre dois anticiclones em altos níveis do Hemisfério Sul a partir de imagens de satélite às 0Z dos dias 16 (a), 18 (b), 20 (c) e 22 (d) de junho de 2013.....	54
Figura 27 - Processo de formação do vórtice com circulação horária em altos níveis entre dois anticiclones em altos níveis do Hemisfério Sul a partir dos campos sinóticos às 0Z dos dias 16 (a), 18 (b), 20 (c) e 22 (d) de junho de 2013.....	55
Figura 28 - Processo de dissipação do vórtice com circulação horária em altos níveis entre dois anticiclones em altos níveis do Hemisfério Sul a partir de imagens de satélite às 0Z dos dias 26 (a), 28 (b), 30 (c) de junho e 2 (d) julho de 2013.....	56
Figura 29 - Processo de dissipação do vórtice com circulação horária em altos níveis entre dois anticiclones em altos níveis do Hemisfério Sul a partir dos campos sinóticos às 0Z dos dias 26 (a), 28 (b), 30 (c) de junho e 2 (d) julho de 2013.....	57
Figura 30 - Células convectivas a partir de imagens de satélite às 0Z dos dias 29 (a) de junho e 3 (b) julho de 2013.....	58
Figura 31 - Células convectivas a partir dos campos sinóticos às 0Z dos dias 29 de junho (em cima) e 3 julho (embaixo) de 2013.....	59
Figura 32 - Processo de formação do anticiclone em altos níveis a partir de uma Crista Zonal no Atlântico Sul nos campos sinóticos às 0Z dos dias 20 (a), 21 (b), 22 (c) 23 (d) de agosto de 2014...	69
Figura 33 - Desenvolvimento da primeira tempestade tropical a partir de imagens de satélite às 0Z dos dias 23 (a), 24 (b), 25(c) e 26(d) agosto de 2014.....	70
Figura 34 - Processo de deslocamento do anticiclone em altos níveis a partir de uma Crista Zonal no Atlântico Sul nos campos sinóticos às 0Z dos dias 24 (a), 25 (b), 26 (c) 27 (d) de agosto de 2014.....	71
Figura 35 - Processo de dissipação do anticiclone em altos níveis a partir de uma Crista Zonal no Atlântico Sul nos campos sinóticos às 0Z dos dias 28 (a), 29 (b), 30 (c) 31 (d) de agosto de 2014...	72
Figura 36 - Desenvolvimento da segunda tempestade tropical a partir de imagens de satélite às 0Z dos dias 27 (a), 28 (b), 29(c) e 30(d) agosto de 2014.....	73
Figura 37 - Processo de formação do anticiclone em altos níveis a partir de uma perturbação no pacífico Sul através dos campos sinóticos às 0Z dos dias 19(a), 21(b), 23 (c) e 25(d) de junho de 2014.....	75

Figura 38 - Processo de dissipação do anticiclone em altos níveis a partir de uma perturbação no pacífico Sul através dos campos sinóticos às 0Z dos dias 19(a), 21(b), 23 (c) e 25(d) de junho de 2014.....	77
Figura 39- Processo inicial da formação de um vórtice com circulação anti-horária na extremidade de um cavado frontal do Hemisfério Norte em 250 hPa com invasão no Hemisfério Sul a partir de imagens de satélite às 0Z dos dias 5 (a), 7 (b), 9 (c) e 11 (d) de fevereiro de 2009.....	79
Figura 40 - Processo inicial da formação de um vórtice com circulação anti-horária na extremidade de um cavado frontal do Hemisfério Norte em 250 hPa com invasão no Hemisfério Sul a partir dos campos sinóticos às 0Z dos dias 5 (a), 7 (b), 9 (c) e 11 (d) de fevereiro de 2009.....	80
Figura 41- Processo de Formação de um vórtice com circulação anti-horária na extremidade de um cavado frontal do Hemisfério Norte em 250 hPa com invasão no Hemisfério Sul a partir de imagens de satélite às 0Z dos dias 13(a), 14(b), 15(c) e 16(d) de fevereiro de 2009.....	81
Figura 42 - Processo final da formação de um vórtice com circulação anti-horária na extremidade de um CAN-HN com invasão no Hemisfério Sul a partir dos campos sinóticos às 0Z dos dias 13(a), 14(b), 15(c) e 16(d) de fevereiro de 2009.....	82
Figura 43 - Processo de dissipação de um vórtice com circulação anti-horária na extremidade de um CAN-HN com invasão no Hemisfério Sul a partir de imagens de satélite às 0Z dos dias 17(a), 19(b), 21(c) e 23(d) de fevereiro de 2009.....	83
Figura 44 - Processo de dissipação de um vórtice com circulação anti-horária na extremidade de CAN-HN com invasão no Hemisfério Sul a partir dos campos sinóticos às 0Z dos dias 17(a), 19(b), 21(c) e 23(d) de fevereiro de 2009.....	84
Figura 45- Processo adicional da formação de um vórtice com circulação anti-horária na extremidade de um CAN-HN com invasão no Hemisfério Sul a partir de imagens de satélite às 0Z dos dias 24(a) e 26(b) de fevereiro e 1(c) e 5(d) de março de 2009.....	85
Figura 46 - Processo adicional da formação de um vórtice com circulação anti-horária na extremidade CAN-HN com invasão no Hemisfério Sul a partir dos campos sinóticos às 0Z dos dias 24(a) e 26(b) de fevereiro e 1(c) e 5(d) de março de 2009.....	86
Figura 47 - Processo da formação e dissipação de um centro com circulação anti-horária na extremidade de um CAN-HN com invasão sobre o Hemisfério Sul a partir dos campos sinóticos às 0Z dos dias 16(a), 19(b), 21 (c) e 24(d) de março de 2004.....	87
Figura 48- Processo da formação e dissipação de um centro com circulação anti-horária na extremidade de um CAN-HN com invasão sobre o Hemisfério Sul a partir de imagens de satélite às 0Z dos dias 16(a), 19(b), 21 (c) e 24(d) de março de 2004.....	88

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Totais (em azul) e médias (vermelho) mensais para invasões de Cavados em Altos Níveis do Hemisfério Norte sobre o Hemisfério Sul	18
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Contagem e médias mensais das invasões de Cavados em Altos Níveis do Hemisfério Norte sobre o Hemisfério Sul	19
Tabela 2 - Contagem e médias mensais da formação de VCANs associada à presença de um Cavado em Altos Níveis do Hemisfério Norte com Invasão no Hemisfério Sul	36
Tabela 3 - Contagem e médias mensais da formação de VCANs associada à presença de dois Cavados em Altos Níveis do Hemisfério Norte com Invasões no Hemisfério Sul .	37
Tabela 4 - Contagem e médias mensais da formação de VCANs associada à presença de um Cavado em Altos Níveis do Hemisfério Sul entre dois anticiclones em altos níveis do Hemisfério Sul	38
Tabela 5 - Contagem e médias mensais da formação de centros com circulação anti-horária em altos níveis associados à extremidade de uma crista zonal em altos níveis no atlântico Sul	66
Tabela 6 - Contagem e médias mensais da formação de centros com circulação anti-horária em altos níveis originados no Oceano Pacífico	67
Tabela 7 - Contagem e médias mensais da formação de centros com circulação anti-horária em altos níveis associados à invasão de Cavados em Altos Níveis do Hemisfério Norte	69

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AB - Alta da Bolívia

ASAS - Alta Subtropical do Atlântico Sul

CAN - Cavado em Altos Níveis

Cb - Cumulonimbus

CJNEB - Corrente de Jato do Nordeste do Brasil

CJP - Corrente de Jato Polar

CJST - Corrente de Jato Subtropical

HN - Hemisfério Norte

HS - Hemisfério Sul

Kt - velocidade do vento em nós

TCU - Torres de Cumulus

VCAN - Vórtice Ciclônico de Altos Níveis

Z - Horário Zulu, equivalente às Coordenadas Universais de Tempo

ZCAS - Zona de Convergência do Atlântico Sul

ZCIT - Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO.....	1
1.1 - Objetivos.....	2
1.1.1 - Geral.....	2
1.1.2 - Específicos.....	2
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1 - Sistemas frontais.....	3
2.1.1 Processo de Oclusão e formação de cavados em altos níveis.....	4
2.2 - Anticiclones.....	5
2.2.1 - Alta subtropical do Atlântico Sul.....	6
2.2.2 - Alta da Bolívia.....	8
2.3 - Vórtices ciclônicos em Altos Níveis.....	9
2.4 - Correntes de Jato.....	12
3 - METODOLOGIA.....	15
3.1 - Área de estudo.....	15
3.2 - Dados utilizados.....	16
3.3 - Identificação e contagem dos sistemas sinóticos.....	17
4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	19
4.1 - Invasões de Cavados em Altos Níveis do Hemisfério Norte sobre o Atlântico Sul.....	19
4.1.1 - Contagem e resumo dos casos.....	19
4.1.2 - Invasões de CAN-HN sobre o Hemisfério Sul em janeiro de 2009.....	25
4.1.3 - Invasões de CAN-HN sobre o Nordeste do Brasil entre janeiro e fevereiro de 2016.....	29
4.2 - Vórtices Ciclônicos em Altos Níveis sobre o Atlântico Tropical.....	36
4.2.1 - Contagem e resumo dos casos.....	36
4.2.2 - Formação de VCAN associada a um CAN no Hemisfério norte e um CAN no Hemisfério Sul em janeiro de 2004.....	40
4.2.3 - Formação de VCAN associada a dois CANs no Hemisfério norte e um CAN no Hemisfério Sul entre janeiro e fevereiro de 2013.....	47
4.2.4 - Formação de VCAN associada a anticiclones em altos níveis em junho de 2013.....	57
4.3 - Centros com circulação anti-horária em altos níveis no Hemisfério Sul..	65
4.3.1 - Contagem e resumo dos casos.....	65
4.3.2 - Formação de Anticiclones em Altos Níveis a partir de uma crista zonal sobre o Atlântico Sul em agosto de 2014.....	71
4.3.3 - Formação de Anticiclones em Altos Níveis a partir de uma perturbação no Pacífico Sul em junho de 2020.....	78
4.3.4 - Formação de centros com circulação anti-horária em altos níveis a partir de invasões de CAN-HN no Hemisfério Sul em fevereiro de 2009.....	82
4.3.4 - Formação de centros com circulação anti-horária em altos níveis a	

partir de invasões de CAN-HN no Hemisfério Sul em março de 2004.....	90
5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	93
5.1 - Invasões de Cavados em Altos Níveis do Hemisfério Norte sobre o Atlântico Sul.....	93
5.1.1 - Norte da América do Sul (80°W - 50°W):.....	94
5.1.2 - Norte e Nordeste do Brasil (50°W - 20°W):.....	95
5.1.3 - Atlântico Sul (20°W - 10°E):.....	95
5.1.4 - Norte da África (10°E - 40°E):.....	95
5.1.5 - Informações adicionais.....	96
5.2 - Vórtices Ciclônicos em Altos Níveis sobre o Atlântico Tropical.....	96
5.2.1 - Presença de cavados com invasões tropicais em ambos os hemisférios:.....	96
5.2.2 - Presença de dois cavados do Hemisfério Norte com invasão a sul de 10°N:.....	97
5.2.3 - Formação entre dois anticiclones em altos níveis:.....	97
5.2.4 - Informações adicionais.....	97
5.3 - Centros com circulação anti-horária em altos níveis no Hemisfério Sul..	98
5.3.1 - Formação na extremidade de uma Crista Zonal sobre o Atlântico Sul....	98
5.3.2 - Formação a partir de perturbações ou regeneração de anticiclones originados no pacífico tropical.....	99
5.3.3 - Formação a partir da extremidade de cavados em altos níveis do Hemisfério Norte com invasões sobre o Hemisfério Sul.....	99
5.5 - Contribuições.....	100
5.6 Sugestões para trabalhos futuros.....	100
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	101

1 - INTRODUÇÃO

As interações entre sistemas sinóticos do Atlântico Norte e a circulação em altos níveis na América do Sul ainda são pouco exploradas pela literatura científica, com algumas observações ocasionais ocorrendo em estudos sobre a atuação de sistemas sinóticos nas regiões Norte e Nordeste (NEB) do Brasil.

A associação entre Vórtices Ciclônicos em Altos Níveis e a Corrente de Jato Subtropical do Hemisfério Norte pode ser observada através da presença de movimentos ascendentes, intensificação na velocidade do vento e acoplamentos com a Corrente de Jato do Nordeste do Brasil (Repinaldo, 2010). A alteração destas variáveis pode modificar o posicionamento e intensidade dos Vórtices Ciclônicos em Altos Níveis, proporcionando eventos de precipitação extrema ou eventos de seca sobre o NEB.

A presença de frentes oclusas sobre o Atlântico Tropical Norte proporciona a formação de cavados profundos, que podem ser observados entre médios e altos níveis (Vasques, 1994; Fedorova, 2008). A invasão desses cavados em regiões tropicais pode causar alterações no posicionamento e continuidade da Corrente de Jato Subtropical do Hemisfério Norte e, por consequência, modificar a circulação em altos níveis sobre o Hemisfério Sul.

Desta forma, os principais objetivos deste trabalho são: Identificar os processos de invasão de cavados em altos níveis do Hemisfério Norte sobre o Hemisfério Sul, Identificar a associação entre Vórtices Ciclônicos em Altos Níveis do Hemisfério Sul e cavados em altos níveis do Hemisfério Norte, identificar os processos de formação e desenvolvimento de anticiclones em altos níveis sobre o atlântico Tropical Sul e observar os principais fenômenos adversos associados a cada um destes sistemas.

1.1 - Objetivos

1.1.1 - Geral

O objetivo deste trabalho é investigar a influência de invasões de Cavados em Altos Níveis do Hemisfério Norte (CAN-HN), Vórtices Ciclônicos em Altos Níveis (VCAN) e centros com circulação anti-horária em altos níveis no Atlântico Sul sobre a ocorrência de sistemas sinóticos associados a fenômenos adversos no Nordeste do Brasil.

1.1.2 - Específicos

- Descrever os processos e identificar a influência de invasões Cavados em Altos Níveis do Hemisfério Norte sobre o Nordeste do Brasil;
- Caracterizar os processos e identificar a influência de Vórtices Ciclônicos em Altos Níveis, originados no Atlântico Tropical sobre o Nordeste do Brasil;
- Demonstrar e identificar a influência de anticiclones e outros sistemas de circulação anti-horária em altos níveis originados no Atlântico tropical sobre o Nordeste do Brasil;
- Realizar estudos de caso para processos típicos dos sistemas supracitados.

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - Sistemas frontais

Sistemas Frontais (SF) formam-se no limite entre duas massas de ar devido às diferenças de temperatura, umidade e densidade (Vasques, 1994; Fedorova, 2008). A zona frontal é a região onde a diferença de temperatura entre as duas massas de ar é mais evidente, e pode ser identificada através do aumento na quantidade de linhas nos campos de temperatura e espessura da camada geopotencial (Vasques, 1994; Fedorova, 2008). A identificação dos SF também pode ser feita através da presença de bandas de nebulosidade nas imagens de satélite e presença de cavados nos campos de pressão ao nível médio do mar e modificações na velocidade e direção dos ventos causadas pela circulação ciclônica entre as massas de ar (Vasques, 1994). A formação de ciclones extratropicais também é observada durante o desenvolvimento dos SF.

A classificação dos Sistemas Frontais pode ser feita de acordo com as características da região de encontro entre suas massas de ar, sendo classificados como:

I - Frente Fria: Formada no limite entre uma massa de ar frio que se desloca em direção a massas de ar relativamente mais quentes (Vasques, 1994). Uma banda de nebulosidade associada ao levantamento da massa de ar quente sobre a massa de ar frio pode ser observada na zona frontal. A presença desses sistemas está associada à maior parte dos eventos de precipitação, variações de temperatura e rajadas de vento nas regiões Sul e Sudeste do Brasil com a ocorrência média variando entre 35 a 10 casos respectivamente entre as duas regiões (Cavalcanti e Kousky, 2003). Frentes frias especialmente intensas podem apresentar invasões sobre a região Nordeste do Brasil, intensificando eventos de precipitações e alterando o posicionamento de sistemas sinóticos que atuam sobre a região .

II - Frente Quente: Formada no limite entre massas de ar quente que se deslocam em direção a massas de ar relativamente mais frias (Vasques, 1994).

III - Frente Estacionária: Também chamada de frente quase estacionária, é formada por massas de ar sem deslocamento aparente (Vasques, 1994). Frentes estacionárias podem apresentar dissipação ou se tornarem um dos dois tipos anteriores de frentes a depender do deslocamento das massas de ar em sua periferia (Fedorova, 2008). A presença de frentes estacionárias na costa leste do Brasil pode propiciar a convergência de umidade entre a região amazônica e o Atlântico Sul formando ou intensificando a Zona de Convergência do Atlântico Sul (Silva et al., 2019).

IV - Frente Oclusa: Formada a partir do encontro entre frentes frias e frentes quentes, normalmente após a frente fria, que se desloca com maior velocidade, alcançar a zona frontal da frente quente (Vasques, 1994). Frentes oclusas podem apresentar dois processos de formação a depender das características observadas nas massas de ar em sua periferia (Vasques, 1994; Fedorova, 2008). O processo de formação das frentes oclusas (oclusão) está associado à presença de sistemas frontais com invasões sobre latitudes tropicais.

2.1.1 Processo de Oclusão e formação de cavados em altos níveis

A oclusão fria ocorre quando a massa de ar frio na retaguarda da frente fria é mais fria do que a massa de ar na vanguarda da frente quente. A passagem da frente fria eleva a massa de ar quente, mantendo a frente fria e criando uma região de baixa pressão. A formação de um cavado profundo pode ser observada na retaguarda da frente oclusa (Vasques, 1994; Fedorova, 2008).

A oclusão quente ocorre quando a massa de ar frio na retaguarda da frente fria é relativamente mais quente do que a massa de ar frio na vanguarda da frente quente. Nesse caso, a frente fria é elevada sobre a massa de ar quente mantendo a frente quente próxima à superfície, criando uma região de baixa pressão. A formação de um cavado profundo pode ser observada na vanguarda da frente oclusa (Vasques, 1994; Fedorova, 2008).

2.2 - Anticiclones

Anticiclones são sistemas sinóticos de alta pressão e podem ser identificados através da presença de centros com circulação anticiclônica fechada ou pela presença de isóbaras com maior pressão na região central e menor pressão na periferia. A presença destes sistemas geralmente está associada a condições de atmosfera estável, com precipitação e fenômenos adversos associados principalmente à formação de nuvens estratiformes e formação de névoa ou nevoeiros (Fedorova, 2008).

Os anticiclones ocorrem em dois principais tipos sendo eles migratórios e semipermanentes. Anticiclones migratórios normalmente apresentam variações zonais de temperatura na sua região central (baroclinia) e estão majoritariamente associados ao setor oeste de ondas de Rossby, durando em média entre 2 a 6 dias (Sinclair, 1996; Ioannidou e Yau, 2008; Pepler et al., 2018). Já os anticiclones semipermanentes possuem pouca variação de temperatura em sua região central (barotrópia) e podem ser observados climatologicamente como regiões de divergência nos subtropicais (Chen et al., 2001; Ynoue et al., 2017).

Anticiclones barotrópicos de núcleo quente (semipermanentes) geralmente estão associados a dois tipos de estrutura vertical, sendo elas: presença de circulação anticiclônica e divergência em altos níveis e baixas pressões e convergência em baixos níveis, geralmente associada a anticiclones sobre os continentes (Vasques, 1994; Fedorova, 2008), e presença de circulação anticiclônica, subsidência e divergência entre baixos níveis, geralmente associada aos anticiclones subtropicais presentes sobre os oceanos (He et al., 2017).

Anticiclones baroclínicos de núcleo frio (migratórios) estão associados ao setor oeste de ondas de Rossby e podem ser observados na retaguarda de ciclones barotrópicos sobre as regiões subtropicais e polares do Hemisfério Sul (Vasques, 1994; Fedorova, 2008). Segundo Vasquez (1994) o processo de formação dos anticiclones baroclínicos ocorre a partir da intensificação da zona baroclínica em uma massa de ar frio, normalmente associada à retaguarda de sistemas frontais. A presença de convergência na vanguarda de uma crista em altos níveis e confluência no fluxo das correntes de jato podem intensificar o processo. A dissipação do sistema normalmente ocorre devido à subsidência de ar quente e aquecimento da superfície, o processo reduz o gradiente térmico entre as massas de ar que compõem o anticiclone, formando um

anticiclone barotrópico de núcleo quente que pode ser absorvido pelas altas subtropicais (Fedorova et al., 2023).

2.2.1 - Alta subtropical do Atlântico Sul

A Alta subtropical do Atlântico Sul (ASAS) é um anticiclone barotrópico de núcleo quente tipicamente localizado na região subtropical do oceano Atlântico Sul, entre 33 - 27°S e 14 - 0°W. O posicionamento da ASAS varia consideravelmente ao longo do ano, com a posição mais Noroeste observada durante o inverno austral (27°S, 14°W em agosto) e a posição mais Sudeste observada durante o verão austral (33°S, 0° em fevereiro) (Fedorova et al., 2023). A intensidade da ASAS também varia ao longo do ano, com menor intensidade observada no mês de janeiro (1020 hPa) e maior intensidade observada no mês de julho (1024 hPa) (Hastenrath e Lamb, 1977).

Verticalmente, a ASAS é observada como um anticiclone barotrópico de núcleo quente, com subsidência e ar quente ocorrendo em sua região central sobre toda a troposfera (Vasques, 1994; Fedorova, 2008). Em superfície, a ASAS pode ser observada como um centro fechado em isóbaras (linhas de mesma pressão), enquanto em altos níveis é caracterizada pela presença de uma crista com inclinação zonal (Reboita et al., 2019).

Os principais mecanismos relacionados à formação, enfraquecimento e deslocamento da ASAS estão associados à circulação de Hadley, devido às diferenças entre o aquecimento das regiões tropicais, subtropicais e polares, e à intrusão de anticiclones baroclínicos na retaguarda de ondas de Rossby (Hastenrath, 1985, Fedorova et al., 2023).

A variação no posicionamento e intensidade da ASAS apresenta efeitos significativos sobre a ocorrência de sistemas meteorológicos no Brasil, principalmente devido à alterações na direção e intensidade dos ventos alísios e na ocorrência de bloqueios na passagem de sistemas frontais (Hastenrath, 1985; Silva et al., 2014; Sun et al., 2017; Reboita et al., 2019). A formação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), também é diretamente influenciada pelas variações no posicionamento da ASAS, uma vez que se forma a partir das condições de bloqueio (Fedorova et al., 2023). O posicionamento de Vórtices Ciclônicos em Altos Níveis também pode ocorrer na periferia da ASAS (Fedorova et al., 2023).

Durante o inverno a ASAS se aproxima da costa leste do Brasil e apresenta maior expansão zonal, com seu setor oeste alcançando a região Sudeste do Brasil e propiciando redução na convecção e precipitação (Reboita et al., 2010; Silva et al., 2014; Correa et al., 2018; Reboita et al., 2019). Já no verão a ASAS se encontra mais afastada da costa brasileira e com menor expansão zonal, contribuindo com a precipitação no Brasil através de sua circulação e convergência de umidade sobre o Atlântico Sul (Reboita et al., 2016, 2019). Estes efeitos são ainda mais notórios na região Nordeste do Brasil (NEB), uma vez que boa parte dos sistemas associados à precipitação e transporte de umidade no NEB estão associados à circulação dos alísios.

Correlações entre a variação da pressão ao nível médio do mar, temperatura e velocidade do vento foram observadas por Gilliland e Keim (2018) durante episódios de reposicionamento do ASAS em relação à sua posição climatológica. A pressão ao médio do mar e o posicionamento latitudinal da Zona de Convergência Intertropical demonstraram correlação positiva com a variação longitudinal do ASAS, aumentando conforme o centro do sistema se deslocava para norte e diminuindo conforme o centro se deslocava para sul. A temperatura em superfície apresentou correlação com a variação longitudinal do ASAS, aumentando conforme o sistema se posicionava mais a leste de sua posição climatológica e diminuindo conforme o sistema se posicionava a oeste. Já a velocidade do vento aumentou com o posicionamento do ASAS a oeste de sua posição climatológica, com aumento nos ventos sendo observado sobre o NEB durante o posicionamento sul da ASAS.

Alterações no regime de precipitação também podem ser observadas na costa do NEB devido às variações na intensidade e posicionamento dos ventos alísios (Lima, 1991). O reposicionamento da ASAS propicia a formação de correntes de vento dominantes que variam sua direção de Leste/Nordeste durante o verão para Sudeste durante o inverno (Servain e Lukas, 1990), formando correntes de ar que com escoamento perpendicular à costa leste do NEB. Essa variação no posicionamento dos alísios propicia o encontro entre as massas de ar oceânicas e continentais durante a formação da brisa terrestre, favorecendo a formação da zona de convergência noturna na costa do NEB e conseqüentemente causando eventos de precipitação local (Fedorova, 2023).

2.2.2 - Alta da Bolívia

A Alta da Bolívia (AB), é um anticiclone barotrópico de núcleo quente que pode ser observado climatologicamente durante o verão sobre a região central da América do Sul, entre Altiplano Boliviano e os Andes Centrais 20-10 °S e 70-50 °W (Virji, 1981; Lenters e Cook, 1997; Chen e Weng 1999; Sotelo, 2021), podendo variar sua posição a depender da liberação de calor latente e precipitação em regiões próximas à Amazônia (Gandu e Geisler, 1991; Figueroa et al., 1995; Lenters e Cook, 1997). Os principais efeitos da circulação da AB estão relacionados ao escoamento meridional do vento, observado na alta troposfera durante o verão, e aumentos na precipitação associados à presença de sistemas sinóticos na periferia da AB (Gandu e Silva Dias, 1998; Sotelo, 2021).

Verticalmente, a AB pode ser observada como uma região de divergência e circulação anticiclônica que se estende entre a média e a alta troposfera, a presença de centros de baixa pressão e convergência pode ser observada em baixos níveis nas regiões próximas ao sistema (Lenters e Cook, 1997).

O processo de gênese da AB é associado à passagem de ondas de Rossby (Silva Dias et al., 1983) e liberação de calor sensível entre as regiões do Altiplano Boliviano e Sul da Amazônia (Silva Dias et al., 1983; Figueroa et al., 1995; Lenters e Cook, 1997), que propiciam a circulação anticiclônica em médios e altos níveis e movimentos ascendentes em baixos níveis sobre a região, propiciando a formação do anticiclone.

A circulação da AB é normalmente associada à formação e posicionamento de alguns sinóticos que possuem influência sobre a precipitação no NEB, sendo eles:

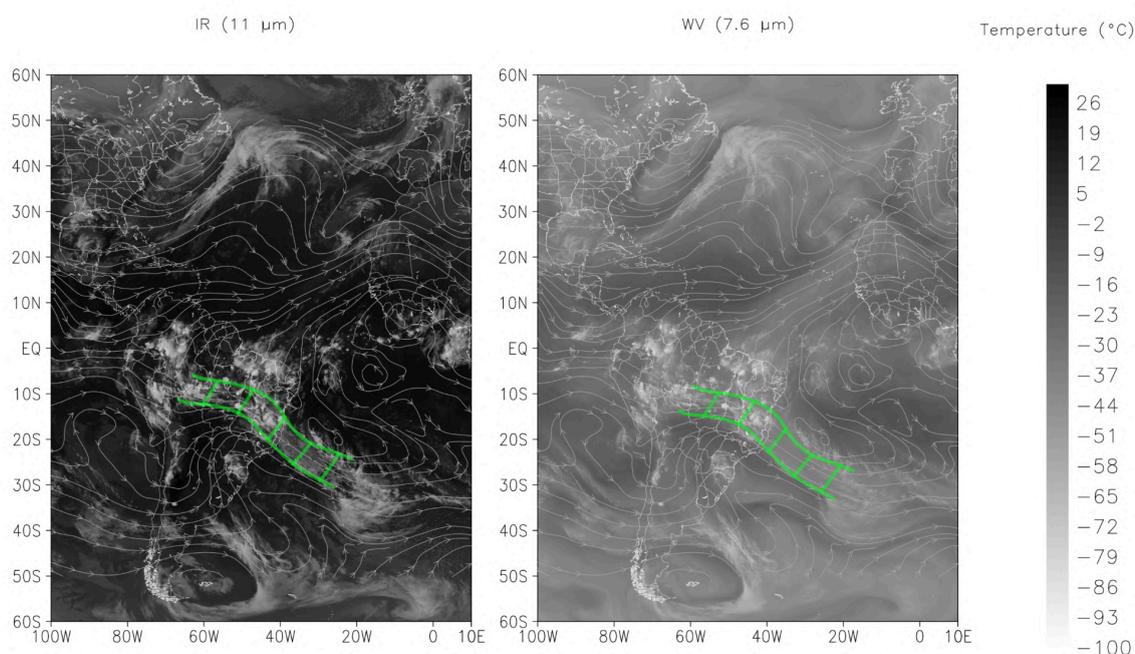
I - Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS): Formada pela presença de uma frente estacionária na região de confluência entre a Alta da Bolívia e o Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul. A circulação da Alta da Bolívia contribui com a convergência de umidade proveniente da região amazônica no setor oeste da frente estacionária, atrasando a dissipação do sistema e propiciando a formação da ZCAS. A formação meridional da ZCAS pode contribuir para a precipitação nos estados do Sul do NEB (Lyra., 2022). O transporte de umidade para os demais estados do NEB também pode ocorrer através da circulação de anticiclones, VCANs ou acoplamentos entre a ZCAS e a Zona de Convergência Intertropical (Lyra., 2022).

II - Vórtices Ciclônicos em Altos Níveis (VCANs): A associação entre a Alta da Bolívia e VCANs pode ser observada climatologicamente em modelos propostos por diversos

autores (Lenters e Cook, 1997; Chen e Weng 1999), sob o nome de Cavado do Nordeste ou Baixa do Nordeste do Brasileiro. A confluência entre a circulação da Alta da Bolívia e dos VCANs propicia o transporte da umidade proveniente das regiões Norte e Sudeste do Brasil para o NEB, alimentando processos convectivos que afetam principalmente o Sertão Nordestino (Repinaldo., 2010; Lyra., 2022).

III - Sistemas Frontais (SF): A invasão de sistemas frontais com inclinação meridional sobre o Nordeste do Brasil pode ocorrer devido a variações no posicionamento da Alta da Bolívia. Este processo é similar ao descrito no item (I), porém apresenta menor duração e intensidade.

Figura 1 - Exemplo de acoplamento entre ZCIT e ZCAS com influência sobre o NEB



2.3 - Vórtices ciclônicos em Altos Níveis

Os Vórtices ciclônicos em Altos Níveis (VCAN) são sistemas de escala sinótica e possuem como principal característica a presença de circulação ciclônica fechada e núcleo frio em altos níveis (Gan, 1982). A presença de VCANs geralmente está associada a chuvas intensas ou dias secos devido a formação de nuvens causadoras de precipitação em sua periferia e bom tempo associado à subsidência do ar em seu centro (Kousky e Gan, 1981).

VCANs possuem diferentes características a depender de sua região de formação, sendo classificados como tipo Palmén e Palmer (Frank, 1970). VCANs do tipo Palmén tem origem nos subtropicais e formam-se durante todo o ano, com maior ocorrência durante o solstício de inverno (Simpson, 1952). Já VCANs do tipo Palmer se originam na região tropical e formam-se principalmente entre os meses da primavera e outono (Frank, 1970; Kousky e Gan, 1981). No Nordeste do Brasil (NEB) há predominância da influência de VCANs do tipo Palmer, com maior ocorrência durante o verão austral e maior número de casos observados no mês de janeiro devido ao escoamento anticiclônico observado na alta troposfera sobre a América do Sul (Kousky e Gan, 1981).

A formação de VCANs pode ocorrer tanto sobre regiões oceânicas (faixa tropical do Oceano Atlântico Sul) quanto sobre regiões continentais (costa leste do Brasil), com cerca de 85% dos processos de formação ocorrendo sobre o oceano (Repinaldo, 2010 apud Ramirez, 1997). No NEB, a presença de VCANs com origem oceânica é mais comum durante os meses do verão austral, enquanto VCANs com origem continental formam-se majoritariamente durante a primavera e outono austrais, com máximos nos meses de setembro e abril respectivamente (Ramirez, 1997).

Os principais modelos conceituais para a gênese de VCANs com influência sobre o NEB são:

I - Formação Clássica: Proposta por Kousky e Gan (1981), os vórtices formam-se no setor leste de uma crista amplificada proveniente da Alta da Bolívia (AB). A amplificação da crista ocorre devido à advecção do ar quente, deslocado a partir da entrada de um sistema frontal nos subtropicais. A convecção causada pelo sistema frontal contribui para a liberação do calor latente, intensificando a crista da AB e formando um VCAN a partir do cavado em seu setor leste.

II - Formação Alta: Proposta por Ramirez (1999), está associada à presença do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) e da Zona de Convergência do Atlântico Sul. A formação do VCAN ocorre como resultado da presença de um cavado nos setores norte/nordeste do Anticiclone.

III - Formação africana 1: Proposta por Paixão e Gandu (2000), a formação de VCANs a partir deste processo está associada à intensificação da convecção sobre a África, que dá

origem a um par de anticiclones em altos níveis. A região de bifurcação no setor oeste entre os dois anticiclones aparentemente induz o aprofundamento de um cavado entre os Hemisférios Norte e Sul, propiciando a formação de um VCAN no Hemisfério Sul.

IV - Formação africana 2: Proposta por Paixão e Gandu (2000), está associada ao desacoplamento de um cavado oriundo da região Sudoeste do Saara, que se intensifica com deslocamento para oeste após a separação de seu escoamento original. A formação do VCAN a partir deste processo apresenta mais influência sobre o extremo leste do NEB.

A formação de VCANs a partir do modelo clássico representa um percentual de aproximadamente 46% das ocorrências de VCANs sobre o NEB, com aproximadamente 18% de ocorrência para cada um dos demais processos (Paixão e Gandu, 2000). Outro mecanismo de formação de VCANs está associado a eventos de intrusão durante a quebra de ondas de Rossby que transportam massas de ar dos subtropicais para os trópicos, misturando o ar tropical ao subtropical (Barbosa, 2006).

Verticalmente, os VCANs são caracterizados pela presença de movimentos descendentes de ar frio em seu centro e movimentos ascendentes de ar quente em sua periferia (Kousky e Gan, 1981). A presença do VCAN é mais frequente no nível 200 hPa e sua profundidade máxima predominante varia sazonalmente atingindo o nível 400 hPa durante o verão e 300 hPa durante os equinócios, sem profundidade significativa durante o inverno (Morais, 2016).

Em média, VCANs possuem uma duração de aproximadamente 7,1 dias (Ramirez, 1997), com maior duração média observada durante os meses do verão austral (9,5 a 10,6 dias) e menor durante os meses da primavera austral (4,6 a 6 dias) e demais estações do ano (4,6 a 7,6 dias) (Coutinho, 2008). VCANs com dissipação rápida podem ocorrer com durações que variam entre algumas horas e de 1 a 3 dias, sendo mais frequentes quando comparados aos de maior duração (Morais et al., 2020).

A dissipação dos VCANs ocorre majoritariamente devido à presença de convecção abaixo ou nas redondezas do seu centro, sendo mais comum após o deslocamento do sistema para regiões continentais (Gan, 1982; Morais et al., 2020). A convecção no centro do VCAN, causada principalmente pelo aquecimento da superfície devido à ausência de nebulosidade, aumenta a pressão em altos níveis, interrompendo os movimentos

descendentes do ar e dissipando a circulação (Fedorova et al., 2023). Durante o processo de dissipação, o centro do VCAN pode se aprofundar até médios ou baixos níveis, sendo este um indicativo de sua duração e intensidade (Frank, 1970; Ramirez et al., 1999).

Durante seu período de atuação, o centro do VCAN pode apresentar deslocamento zonal ou permanecer estacionário (Cavalcanti et al., 2009). VCANs que possuem apenas circulação em altos níveis tendem a se deslocar em direção ao leste, enquanto VCANs de maior profundidade apresentam deslocamento majoritariamente para oeste (Fedorova, 2008). O deslocamento dos VCANs também pode ser classificado como regular ou irregular, sendo o primeiro tipo associado à presença de anticiclones em altos níveis e da Zona de Convergência do Atlântico Sul no setor Sul do VCAN e o segundo tipo associado à invasão de cavados de latitudes médias associados a sistemas frontais e uma bifurcação inter hemisférica (Ramirez et al., 1997).

No Nordeste do Brasil, a presença de VCANs está associada a eventos extremos de precipitação e fenômenos adversos associados à formação de Cumulonimbus como trovoadas, rajadas de vento e queda de granizo (Kulivoc e Rudnev, 1980; Gan, 1982; Glickman, 2000; Brito et al., 2011; Knight e Knight, 2021).

2.4 - Correntes de Jato

As Correntes de Jato (CJ) são regiões da alta troposfera que apresentam máximos na velocidade do vento e escoamento oeste quase zonal, com pequenas regiões de maiores velocidades e variações na circulação. As CJ podem ser observadas em ambos os hemisférios a partir dos campos de linhas de corrente e velocidade do vento acima do nível 500 hPa. A intensidade e a circulação das CJ aumentam proporcionalmente conforme se aumenta o nível vertical da observação (Fedorova, 2008). A presença de nebulosidade com textura filamentosa (nuvens cirrus) e eixo quase perpendicular ao escoamento também pode ser utilizada para a identificação das correntes de jato através de imagens de satélite (Fedorova, 2008; Fedorova et al., 2023).

Climatologicamente, a presença das CJ pode ser notada em duas regiões distintas, posicionadas nos limites entre as regiões polares e subtropicais (70°S, 35°S) e entre as regiões subtropicais e tropicais (35°S, 20°S) (Reiter, 1969).

O posicionamento e intensidade das Correntes de Jato variam ao longo do ano, com o posicionamento mais ao norte sendo observado durante o inverno e o posicionamento

mais ao sul sendo observado durante o verão em ambos os Hemisférios. A presença de sistemas sinóticos em altos e médios níveis também pode alterar a circulação das CJ em menores escalas temporais, descontinuando, intensificando ou reposicionando a circulação de correntes em diferentes níveis verticais.

As principais CJ que apresentam influências sobre o posicionamento de sistemas sinóticos na região Nordeste do Brasil (NEB) São:

I - Correntes de Jato subtropicais (CJST): Ocorrem no limite entre os subtrópicos e regiões tropicais, sendo observados em latitudes próximas a 30° nos Hemisférios Norte e Sul (Hastenrath, 1991; Pezzi e Cavalcanti, 1994;). A posição das CJSTs varia ao longo do ano, com o posicionamento mais próximo aos trópicos (cerca de 20° N/S) ocorrendo durante o inverno e o posicionamento mais próximo aos pólos (cerca de 35° N/S) ocorrendo durante o verão. A principal influência das CJSTs sobre o Nordeste do Brasil estão relacionadas à intensificação de ciclones baroclínicos e ao posicionamento meridional de sistemas frontais (Palmén, 1949). A invasão de cavados em altos níveis associados a sistemas frontais intensos dos Hemisférios Norte ou Sul pode intensificar a vorticidade em alguns pontos das CJSTs, propiciando a formação e intensificação de Vórtices Ciclônicos em Altos Níveis sobre o Atlântico Tropical.

II - Corrente de Jato do Nordeste do Brasil (CJNEB): Ocorre na costa Leste do Brasil e se estende entre a região equatorial e o limite entre as regiões tropical e subtropical. A posição e o eixo da CJNEB variam de acordo com seu tipo de formação, ocorrendo entre $50^\circ\text{W} - 20^\circ\text{W}$ e $20^\circ\text{S} - 0^\circ\text{S}$. A formação da CJNEB está associada à regiões de confluência e difluência entre sistemas sinóticos que ocorrem em regiões próximas ao Nordeste do Brasil, com as formações mais comuns ocorrendo devido à presença de confluência entre a circulação da Alta da Bolívia ou Alta Subtropical do Atlântico Sul e Vórtices Ciclônicos em Altos Níveis ou Cavados em Altos Níveis (VCAN). O acoplamento entre a CJNEB e as CJSTs de ambos os Hemisférios pode ser observado em alguns casos durante o verão austral. A associação entre a ocorrência da CJNEB e a presença de outros sistemas sinóticos dificulta a classificação exata da influência que a CJNEB possui sobre a ocorrência de precipitação e fenômenos adversos no Nordeste do Brasil, entretanto, alguns autores sugerem que a presença do sistema pode contribuir para processos de convecção profunda na periferia de VCANs (Djuric D, 1994; Fedorova e

Lyra, 2017) e em outros processos associados à precipitações intensas no NEB (Pontes da Silva et al., 2011).

3 - METODOLOGIA

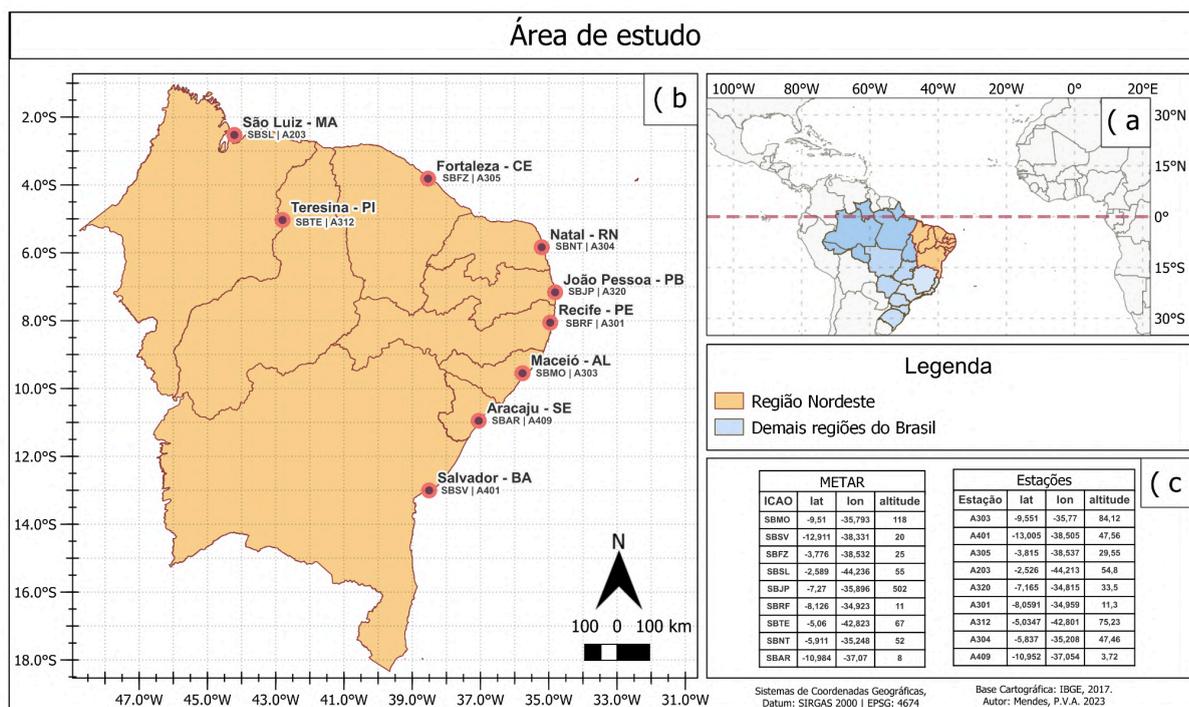
3.1 - Área de estudo

A identificação dos sistemas foi realizada a partir de duas principais áreas de estudo, de modo a verificar a interação entre os sistemas de escala sinótica em ambos os hemisférios e a ocorrência de fenômenos adversos no Nordeste do Brasil.

A primeira área de estudo (figura 2 - a) compreendeu toda a região do Atlântico tropical, abrangendo boa parte do Oeste da África, América do Sul, América Central e parte do Pacífico Oeste (100°W, 40°E ; 35°S, 35°N). A visualização dos campos sinóticos nesta região foi utilizada para a identificação dos sistemas frontais, Vórtices Ciclônicos em Altos Níveis e centros com circulação anticiclônica em altos níveis em ambos os hemisférios.

A segunda área de estudo (figura 2 - b, c) compreendeu apenas o território do Nordeste do Brasil (50°W, 35°W ; 20°S, 0°S) e foi utilizada para a visualização da interação entre os sistemas de escala sinótica e sistemas de menores escalas, através das imagens de satélite e observações nas estações de superfície.

Figura 2 - Área de estudo (a, b) e localização das estações de superfície (b, c)



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

3.2 - Dados utilizados

Para as análises dos campos Sinóticos foram utilizadas séries de reanálises do ERA5 (disponível em: <https://cds.climate.copernicus.eu>), desenvolvido pelo *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), com resolução espacial de 0,25° de latitude e longitude.

Foram utilizados os seguintes campos meteorológicos:

- Pressão ao nível Médio do Mar (hPa);
- Precipitação total em superfície (mm);
- Espessura da camada (hm), calculada através da diferença entre o geopotencial (m^2/s^2) nos níveis 1000 e 500 hPa;
- Temperatura do ar no nível 850 hPa (°C);
- Velocidade zonal e Meridional do vento (m/s) nos níveis 1000, 850, 500 e 250 hPa;
- Velocidade vertical (Pa/s) do vento no nível 500 hPa;
- Vorticidade potencial ($Km^2/kg*s$) no nível 250 hPa;
- Anomalia da temperatura do ar (°C), calculada a partir da média aritmética para cada ponto de grade, utilizando a climatologia 1991-2020 (nível 850 hPa).

A identificação dos sistemas sinóticos por meio de imagens de satélite foi realizada a partir de composições dos satélites GOES e METEOSAT do Global ISCCP B1 *Browse System* (GIBBS) (Knapp, 2011), disponibilizadas pela *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) (disponível em: <https://www.ncdc.noaa.gov/gibbs>). As imagens possuem resolução espacial de 0,07 graus e foram analisadas de forma diária nos

campos do Infravermelho (11 μm) e vapor d'água (6,7 μm) para às 0 Z do período entre 1991 e 2020. Imagens adicionais com resolução temporal de 3 horas foram utilizadas para a confirmação de sistemas com menor duração nos estudos de caso.

Alterações em variáveis meteorológicas de superfície e ocorrências de fenômenos adversos durante o período de atuação dos sistemas observados foram identificadas a partir de séries temporais de estações meteorológicas automáticas do INMET (disponível em: <https://bdmep.inmet.gov.br>) e mensagens do código METAR (disponível em: <https://mesonet.agron.iastate.edu>) para as principais estações e aeroportos nas capitais da região Nordeste do Brasil. As listas com a identificação e localização das estações e aeroportos utilizados podem ser observadas nas figuras 1 b e c.

3.3 - Identificação e contagem dos sistemas sinóticos

A análise geral dos sistemas sinóticos foi realizada majoritariamente através de figuras com composições dos campos de vorticidade potencial no nível 250 hPa, linhas de corrente nos níveis 500 e 250 hPa, e composições de imagens de satélite (Knapp, 2011) nos campos do o Infravermelho (11 μm) e vapor d'água (6,7 μm) para as 0Z de cada dia entre os anos de 1991 e 2020.

A contagem dos casos foi realizada para os últimos dez anos de dados, entre 2011 e 2020. Foram considerados apenas os sistemas que apresentaram duração igual ou superior a 24h e atenderam os critérios que serão descritos nos próximos parágrafos.

Para a identificação dos Cavados em Altos Níveis do Hemisfério Norte foram consideradas regiões contínuas de contornos com circulação anti-horária nos campos das linhas de corrente e/ou com vorticidade potencial positiva. A classificação das invasões ocorreu de acordo com a latitude na extremidade do cavado, sendo considerados apenas cavados com invasões em escala sinótica nas latitudes ao Sul de 15°N. Adicionalmente, a identificação da origem e sistemas associados aos Cavados em Altos Níveis do Hemisfério Norte foi feita a partir da visualização dos campos de linhas de corrente nos níveis 1000 e 850 hPa e espessura da camada geopotencial entre os níveis 1000 e 500 hPa.

A identificação dos Vórtices Ciclônicos em Altos Níveis (VCANs) foi feita a partir de centros com circulação ciclônica (horária no Hemisfério Sul e anti Horária no Hemisfério

Norte) das linhas de corrente e vorticidade potencial (positiva no Hemisfério Norte e negativa no Hemisfério Sul) seguindo a metodologia proposta por Ramirez (1999). Sistemas com circulação ciclônica em regiões entre 5°S e 5°N foram identificados apenas com o sentido de sua circulação (horária ou anti horária) devido às diferenças entre as definições clássicas dos VCANs e as características observadas sobre a região equatorial.

De forma análoga, os centros com circulação anticiclônica em altos níveis foram identificados a partir da circulação anticiclônica (anti-horária no Hemisfério Sul e horária no Hemisfério Norte) das linhas de corrente e vorticidade potencial (negativa no Hemisfério Norte e positiva no Hemisfério Sul). Sistemas com circulação anticiclônica em regiões entre 5°S e 5°N foram identificados apenas com o sentido de sua circulação (horária ou anti-horária) devido às diferenças entre as definições clássicas de anticiclones e as características observadas sobre a região equatorial. Sistemas com circulação anticiclônica posicionados nas regiões climatológicas da Alta da Bolívia, Anticiclone subtropical do Atlântico Sul e Anticiclone Subtropical do Atlântico Norte foram classificados de acordo com a literatura.

4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

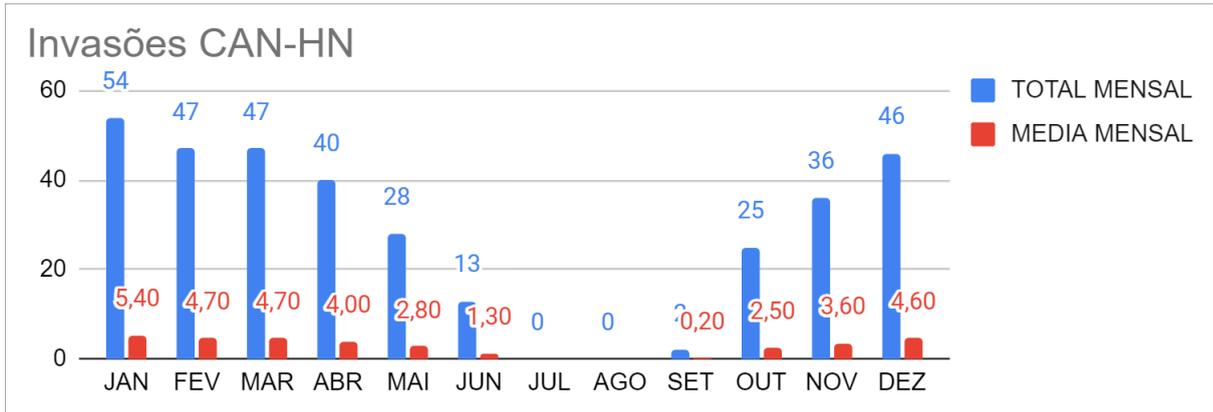
Três sistemas com características distintas e interações com sistemas sinóticos do Nordeste do Brasil (NEB) foram selecionados para as análises, sendo eles: Cavados em Altos Níveis do Hemisfério Norte (HN) com invasões sobre o Hemisfério Sul (HS), Vórtices Ciclônicos em Altos Níveis Formados e outros sistemas com circulação horária em altos níveis formados entre 20°N e 20°S, Anticiclones em altos níveis e outros sistemas com circulação anti-horária formados entre 5°N e 20°S. Os sistemas anteriormente citados, suas descrições gerais e seus respectivos estudos de caso serão descritos nas seções a seguir.

4.1 - Invasões de Cavados em Altos Níveis do Hemisfério Norte sobre o Atlântico Sul

4.1.1 - Contagem e resumo dos casos

A ocorrência de Cavados em Altos Níveis do Hemisfério Norte (CAN-HN) com invasões sobre o Hemisfério Sul entre 2011 e 2020 foi observada em toda a extensão do Atlântico Tropical, Norte da América do Sul e Norte da África, com o maior número de invasões ocorrendo durante o verão austral (entre dezembro a março). A maior quantidade de invasões foi observada no mês de janeiro (54 invasões), com uma média mensal de 5,4 invasões durante o período observacional. A menor quantidade de invasões durante o inverno esteve associada à presença de cristas e centros com circulação anticiclônica sobre o Atlântico Norte e Atlântico Sul, bem como ao posicionamento polar dos ciclones do Hemisfério Norte.

Gráfico 1 - Totais (em azul) e médias (vermelho) mensais para invasões de Cavados em Altos Níveis do Hemisfério Norte sobre o Hemisfério Sul

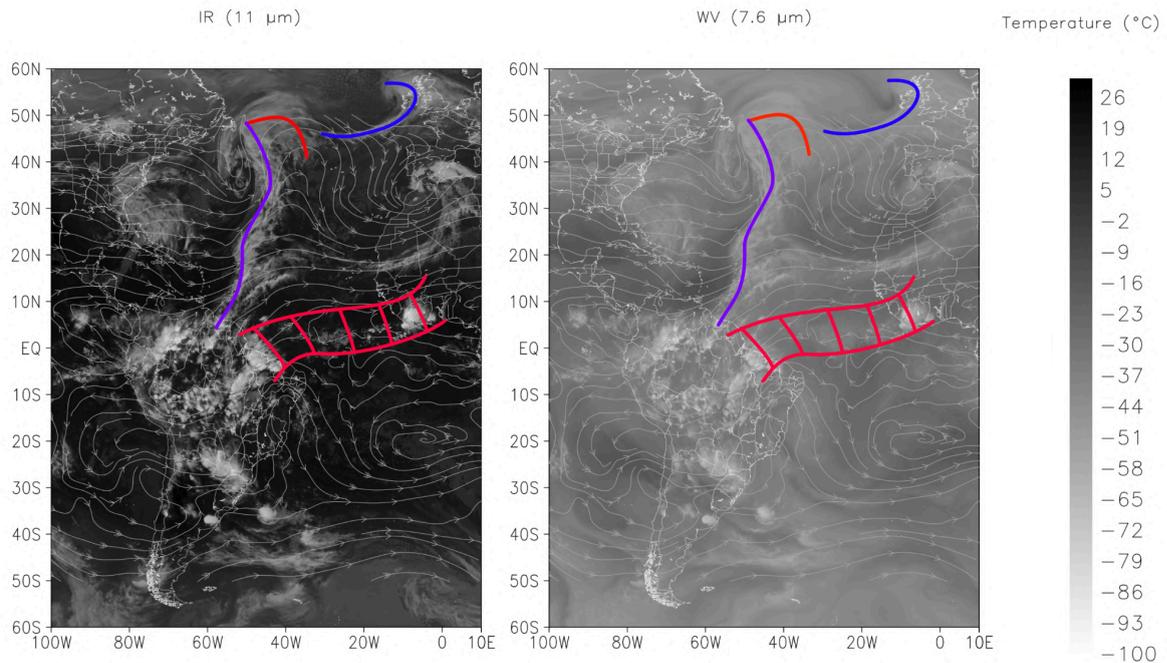


Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

A presença de CAN-HN com invasões ao sul de 15°N esteve majoritariamente associada à passagem de frentes frias ou frentes oclusas sobre o Atlântico Norte (figura 3). Invasões mais duradouras estiveram associadas à presença de Sistemas com circulação anti-horária (ciclônica no Hemisfério Norte) em 500 hPa sob os cavados em Altos Níveis e a presença de anticiclones (circulação horária no Hemisfério Norte) posicionados sobre a costa leste da América Central (80°W - 40°W) e sobre o Norte da África (20°W - 20°E). Em alguns casos, a circulação dos anticiclones em altos níveis foi observada até baixos níveis.

Invasões sequenciais de diferentes CAN-HN (figuras 4 e 5) em uma mesma região e invasões sequenciais do mesmo CAN-HN em diferentes latitudes também foram observadas durante a regeneração de ciclones intensos em regiões próximas ao norte da África e ao Mar Mediterrâneo (30°N - 50°N, 20°W - 10°E).

Figura 3 - Invasão de um sistema frontal do Hemisfério Norte sobre a América do Sul no dia às 0Z do dia 20 de março de 2020. Campos utilizados: Linhas de corrente em 250 hPA e Imagens de satélite nos canais do infravermelho (IR) e vapor d'água (WV); Zona de convergência intertropical identificada pelo símbolo padrão; Linhas roxas: Frente Oclusa; Linhas vermelhas: Frentes quentes; Linhas azuis: Frentes frias.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

As invasões de CAN-HN apresentaram diminuição durante as estações de transição. Os valores mínimos foram observados durante o inverno austral, com um total de 15 casos para todo o período (Tabela 1).

A diminuição no número de eventos nas estações de transição e no inverno austral estiveram associadas à presença de cristas meridionais e de pequenos anticiclones em altos níveis sobre toda a região tropical do Atlântico Norte. A presença destes sistemas impediu a entrada de CAN-HN em latitudes ao sul de 20°N. Outro fator que contribuiu para a redução dos CAN-HN durante o inverno austral foi o reposicionamento dos ciclones extratropicais no Hemisfério Norte para regiões polares.

Em alguns casos, entre o fim do outono e início da primavera austral, foram observadas invasões de CAN-HN e associadas à passagem de tempestades e ciclones

tropicais no Atlântico Norte. Devido à menor escala espacial e rápida dissipação este tipo de invasão não foi considerado durante a contagem.

Tabela 1 - Contagem e médias mensais das invasões de CAN-HN sobre o Hemisfério Sul.

	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	TOTAL MENSAL	MÉDIA MENSAL
JAN	6	4	6	7	3	6	5	5	5	7	54	5,40
FEV	8	5	3	8	3	4	3	4	4	5	47	4,70
MAR	7	2	5	4	5	3	4	7	6	4	47	4,70
ABR	4	3	5	4	3	4	5	4	3	5	40	4,00
MAI	2	3	3	5	1	3	4	2	2	3	28	2,80
JUN	1	1	2	0	1	1	2	1	1	3	13	1,30
JUL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
AGO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SET	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	2	0,20
OUT	3	3	4	1	3	2	1	3	2	3	25	2,50
NOV	1	7	4	4	5	3	2	5	2	3	36	3,60
DEZ	4	8	5	3	3	5	6	5	3	4	46	4,60
TOTAL ANUAL	36	36	39	36	27	31	32	36	28	37	TOTAL 338	MÉDIA 33,80

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

A observação dos CAN-HN foi mais eficiente através dos seguintes campos sinóticos:

- Presença de cavados com circulação anti-horária no campo de linhas de corrente e vorticidade positiva entre os níveis 500 e 250 hPa. A invasão dos CAN-HN sobre a América do Sul foi observada com maior intensidade no nível 500 hPa;
- Presença de linhas meridionais com vorticidade positiva entre 15°N e 0°N.
- Presença de cavados no campo de espessura, entre as camadas 1000 e 500, na vanguarda dos cavados em altos níveis;

Em casos mais intensos, a visualização também é possível através dos seguintes campos:

- Linhas meridionais no campo de precipitação total entre 0 e 1 mm;
- Bandas de nebulosidade com inclinação meridional, coloração cinza e textura majoritariamente deslustrada ou granulosa em imagens de satélite no campo do infravermelho;
- Formação de bandas de nebulosidade com inclinação meridional, coloração branca e textura filamentosa entre a extremidade de sistemas frontais do hemisfério Norte e a Zona de Convergência Intertropical ou Corrente de Jato Subtropical do Hemisfério Norte em imagens de satélite no campo do infravermelho.
- Presença de linhas de umidade com tonalidade cinza claro (ciano nas imagens realçadas) entre a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e a extremidade frontal de ciclones no Hemisfério Norte em imagens de satélite no campo do vapor d'água. CAN-HN com invasões a leste de 10°W também podem ser identificados através de linhas de umidade com a mesma tonalidade entre a ZCIT e o mediterrâneo ou Leste da Ásia.

Durante a visualização destes campos foram observadas quatro regiões com invasões recorrentes de CAN-HN e diferentes efeitos sobre a formação de sistemas em altos níveis no Atlântico Sul e Nordeste do Brasil, sendo elas:

- Norte da América do Sul (80°W - 50°W) - Ocorre com maior frequência entre os meses de dezembro e fevereiro devido à presença de Vórtices Ciclônicos em Altos Níveis sobre o Atlântico tropical. Invasões ocorridas nessa região normalmente são acompanhadas pela formação de Anticiclones do Hemisfério Norte na retaguarda do cavado e dissipação, ou deslocamento para oeste de VCANs no Hemisfério Sul;
- Norte e Nordeste do Brasil (50°W - 20°W) - Ocorre com maior frequência entre os meses de fevereiro e abril devido à presença de VCANs do Hemisfério Sul ou anticiclones do Hemisfério Norte sobre o Nordeste do

Brasil. Invasões ocorridas nesta região normalmente são acompanhadas da intensificação ou formação de VCANs do Hemisfério Sul na vanguarda do cavado e formação de centros com circulação anti horária em altos níveis na extremidade de cavados com invasões abaixo da linha do equador;

- Atlântico Sul (20°W - 10°E) - Ocorre devido à presença de VCANs intensos do Hemisfério Sul ou anticiclones intensos do Hemisfério Norte no Norte da América do Sul e Norte da África. Invasões ocorridas nessa região podem ser acompanhadas pela formação de linhas com nebulosidade meridional entre a ZCIT e o cavado frontal do Hemisfério Norte, centros com circulação anti horária em altos níveis no Hemisfério Sul e VCANs semi-estacionários de grande extensão territorial em regiões próximas à linha do equador;
- Norte da África (10°E - 40°E) - Ocorrem após a invasão em uma das três regiões citadas anteriormente devido ao deslocamento de sistemas de pressão em altos níveis ou perturbações na Corrente de Jato Subtropical do Hemisfério Norte. Invasões ocorridas nessa região normalmente são acompanhadas pela formação de anticiclones em altos níveis no Hemisfério Sul a partir da extremidade do cavado frontal, formação de centros convectivos sobre a ZCIT e formação de bandas de nebulosidade entre a ZCIT do Atlântico e sistemas frontais no Norte da Europa;

As principais Influências de CAN-HN sobre o Nordeste do Brasil (NEB) foram observadas devido à formação, regeneração e deslocamento de Vórtices Ciclônicos em Altos Níveis sobre a costa leste do NEB, com precipitação atingindo principalmente as regiões do Sertão e Norte do NEB. A Formação de centros convectivos e outros tipos de tempestades intensas também foi observada na vanguarda de cavados frontais mais intensos, muitas vezes ocorrendo em conjunto com a formação e reposicionamento meridional da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) sobre o NEB devido ao reposicionamento dos VCANs.

Em alguns casos, foi observada a formação de centros com circulação anti-horária em altos níveis na extremidade de CAN-HN com invasões a Sul de 5°N. O acoplamento destes sistemas à retaguarda de VCANs ocorreu em conjunto com a formação de nuvens

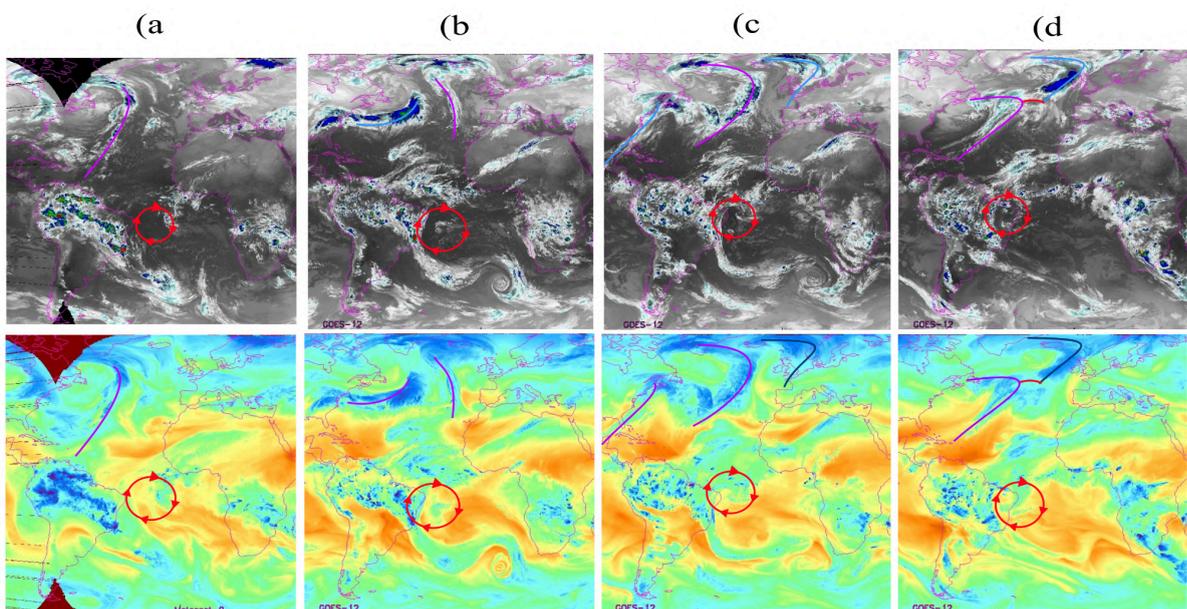
convectivas e precipitações intensas sobre o NEB, principalmente quando a invasão dos CAN-HN ocorreu entre 30°W e 10°W.

4.1.2 - Invasões de CAN-HN sobre o Hemisfério Sul em janeiro de 2009

Em janeiro de 2009, foram observadas cerca de doze invasões de Cavados em Altos Níveis do Hemisfério Norte (CAN-HN) em baixas latitudes e sobre o Hemisfério Sul. As longitudes de ocorrência dessas invasões apresentaram características distintas que foram compartilhadas em boa parte dos casos observados nas demais datas analisadas para a descrição geral dos casos.

O Processo das invasões iniciou-se entre os dias 5 e 7 de janeiro (figuras 4 e 5), com a passagem de um CAN-HN associado a um ciclone na periferia da Corrente de Jato Polar do Hemisfério Norte (CJP-HN). Perturbações na Corrente de Jato Subtropical do Hemisfério Norte (CJST-HN) e intensificação de cavados com invasões a sul de 15°N foram observadas nos níveis 500 e 250 hPa durante o início do processo.

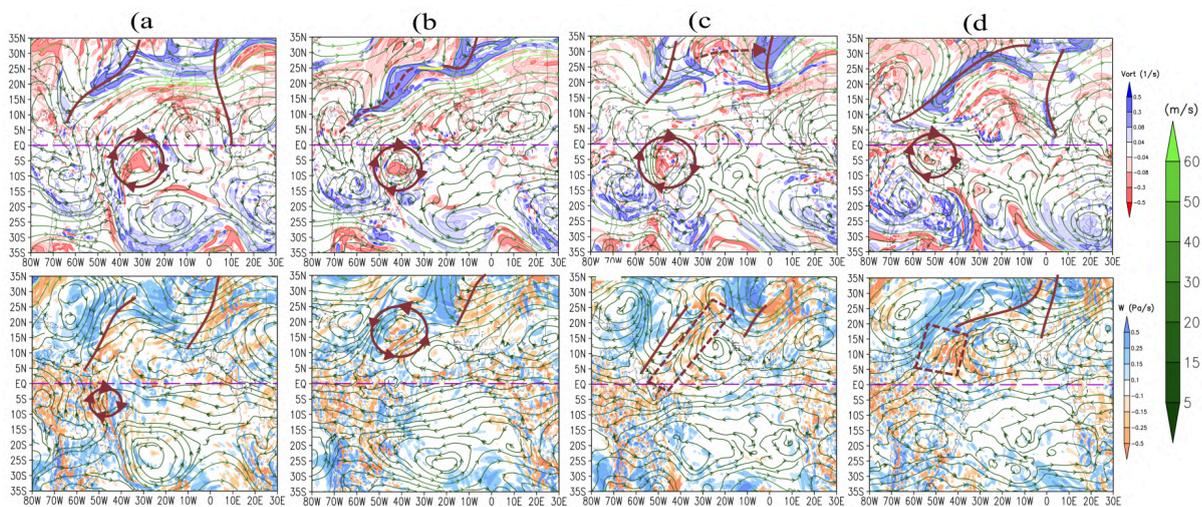
Figura 4 - Processo de invasão de CAN-HN sobre o norte da América do Sul e Norte da África a partir de imagens de satélite às 0Z dos dias 5 (a), 7 (b), 8 (c) e 10 (d) de janeiro de 2009. Campos utilizados: Imagens de satélite (Knapp, K. R. et al, 2011) nos canais do Infravermelho (em cima) e Vapor d'água realçado (em baixo). Circulo vermelho com setas: Vórtice Ciclônico em Altos Níveis; Linhas azuis: Frentes frias; Linhas roxas: Frente Oclusa; Linhas vermelhas: Frentes quentes.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

A primeira invasão do mês, com CAN-HN a sul de 5°N, foi observada entre os dias 8 e 10 de janeiro (figura 4 - c e d), em conjunto com a gênese de um novo ciclone na costa leste do Canadá (entre 40°N - 50°N, 60°W - 40°W). Invasões a sul de 5°N também foram observadas a partir de CAN-HN associados ao primeiro ciclone, que permaneceu com sua extremidade localizada no norte da África durante o mesmo período.

Figura 5 - Processo de invasão de CAN-HN sobre o norte da América do Sul e Norte da África a partir dos campos sinóticos às 0Z dos dias 8 (a), 10 (b), 12(c) e 14(d) de janeiro de 2009. Campos utilizados: Vorticidade potencial em 250 hPa (em cima), velocidade vertical em 500 hPa (em baixo) e linhas de corrente e magnitude do vento (em ambos os níveis). Círculo vermelho com setas: Vórtice Ciclônico em Altos Níveis; Linha tracejada: Cavado subtropical acoplado a um cavado polar; Linhas vermelhas: Cavados em Altos níveis; Polígono tracejado: Regiões de confluência e movimentos ascendentes do ar; Seta tracejada: Deslocamento dos sistemas.

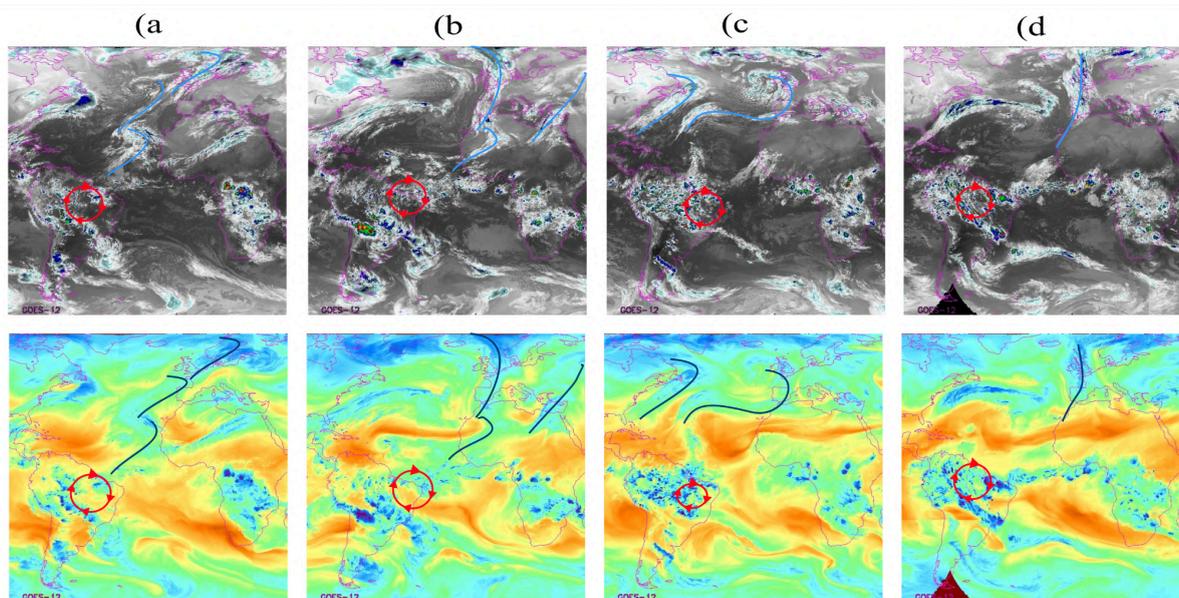


Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Entre os dias 9 e 10 de janeiro, foram observadas (figura 5 - a e b) a formação de um vórtice com circulação ciclônica no nível 500 hPa, entre a metade do cavado frontal e sua extremidade Sul (10°N - 20°N, 50°W - 40°W). O vórtice permaneceu na região até o dia 11 de janeiro, quando foi dissipado em conjunto com o cavado frontal em altos níveis após a dissipação do seu ciclone de origem na costa oeste da Europa.

Durante esse processo a formação de um Vórtice ciclônico em Altos Níveis (VCAN) de baixas latitudes foi observada entre os dois CAN-HN, visíveis no dia 7 ($10^{\circ}\text{S} - 5^{\circ}\text{N}$, $30^{\circ}\text{W} - 20^{\circ}\text{W}$). O VCAN formado nesta região se deslocou para oeste, inibindo a precipitação sobre o Nordeste do Brasil (NEB) e o acoplamento de sistemas frontais do Hemisfério Sul à Zona de Convergência Intertropical. O VCAN permaneceu na vanguarda do CAN-HN ($10^{\circ}\text{S} - 0^{\circ}\text{S}$, $60^{\circ}\text{W} - 40^{\circ}\text{W}$) até o momento de sua dissipação, quando atravessou do Hemisfério Sul para o Norte na retaguarda do CAN-HN (figura 6).

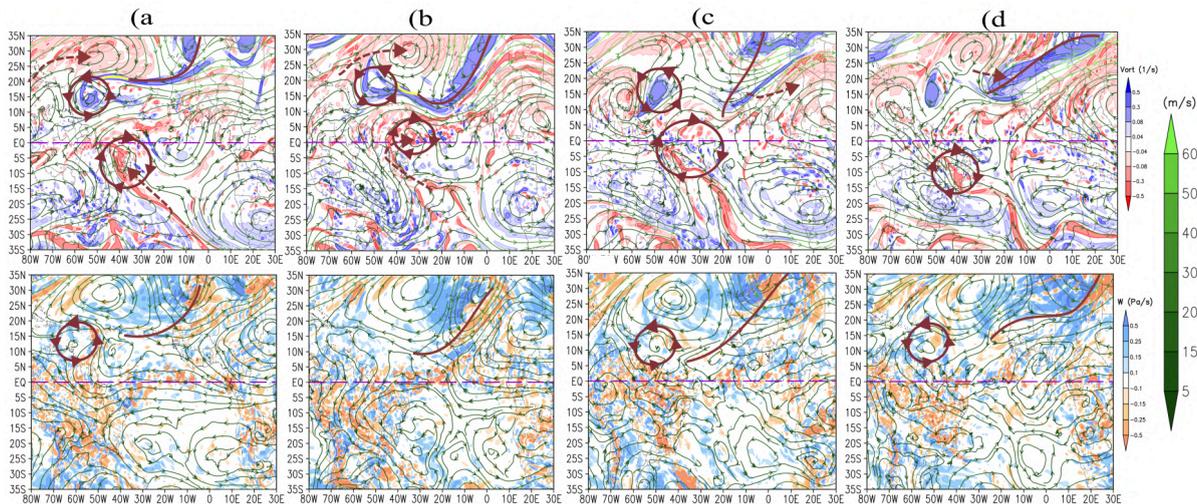
Figura 6 - Processo de invasão de CAN-HN sobre o Atlântico Sul a partir de imagens de satélite às 0Z dos dias 16 (a), 18 (b), 21 (c) e 23 (d) de janeiro de 2009. Campos utilizados: Imagens de satélite (Knapp, K. R. et al, 2011) nos canais do Infravermelho (em cima) e Vapor d'água realçado (em baixo). Círculo vermelho com setas: Vórtice Ciclônico em Altos Níveis; Linhas azuis: Frentes frias; Linhas vermelhas: Frentes quentes.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Entre os dias 12 e 15 de janeiro, ocorreu a invasão de um novo CAN-HN com extremidade a sul de 5°N , na região entre 60°W e 50°W . Um novo vórtice com circulação ciclônica em 500 hPa (figura 5 - c e d) formou-se na região entre a extremidade Sul e o restante do CAN-HN ($10^{\circ}\text{N} - 20^{\circ}\text{N}$, $60^{\circ}\text{W} - 50^{\circ}\text{W}$), havendo também a regeneração e formação de um novo VCAN sobre a costa leste do NEB ($15^{\circ}\text{S} - 5^{\circ}\text{N}$, $40^{\circ}\text{W} - 30^{\circ}\text{W}$).

Figura 7 - Processo de invasão de CAN-HN sobre o Atlântico Sul a partir dos campos sinóticos às 0Z dos dias 16 (a), 18 (b), 21(c) e 23(d) de janeiro de 2009. Campos utilizados: Vorticidade potencial em 250 hPa (em cima), velocidade vertical em 500 hPa (em baixo) e linhas de corrente e magnitude do vento (em ambos os níveis). Círculo vermelho com setas: Vórtice Ciclônico em Altos Níveis; Linhas vermelhas: Cavados em Altos níveis; Seta tracejada: Deslocamento dos sistemas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

O deslocamento do CAN-HN para leste iniciou-se no dia 16 (figura 7), após a formação de um anticiclone no Atlântico Norte e aprofundamento do vórtice com circulação ciclônica em 500 hPa para 250 hPa. A extremidade do cavado frontal se desacoplou do vórtice, deslocando-se para leste e permanecendo sobre o Atlântico Sul (entre 30°W e 10°W) até o dia 25 de janeiro, quando dissipou devido ao deslocamento de um VCAN do hemisfério Sul para a região entre 5°S e 5°N. Um novo cavado apresentou invasão em longitudes próximas ao NEB no dia 31, logo após a dissipação do anterior.

Os processos de invasão de CAN-HN em janeiro de 2009, indicaram a formação, intensificação e deslocamento de VCANs como o principal fator de modificação do tempo sobre o Nordeste. O posicionamento dos CAN-HN sobre o Norte da América do Sul (entre 80°W e 50°W) ocorreu em conjunto com o posicionamento de VCANs sobre o NEB, inibindo a formação de nuvens convectivas e invasões de sistemas frontais do Hemisfério Sul na região.

A presença de CAN-HN sobre o Atlântico Sul (entre 20°W e 10°E), ocorreu em conjunto com a dissipação de VCANs no NEB ou deslocamento de VCANs formados na região para noroeste, permitindo invasões e acoplamentos de sistemas frontais do Hemisfério Sul com a ZCIT sobre o Meio-norte e Sertão do NEB. A formação de nuvens

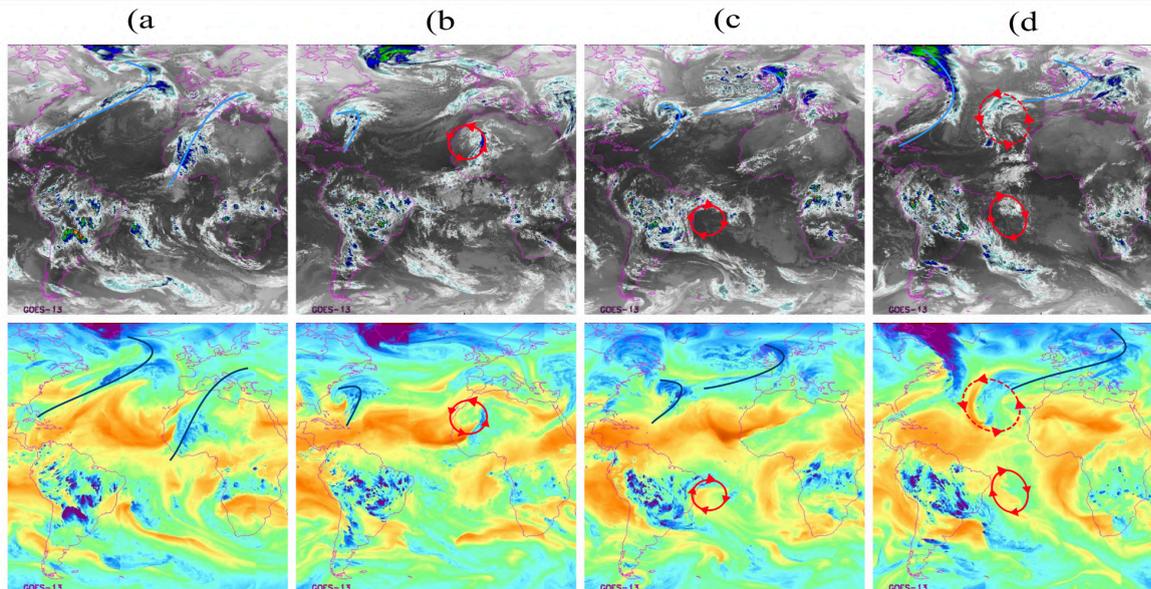
convectivas também foi observada em regiões de convergência entre o VCAN, a Alta da Bolívia e os CAN-HN. Processos similares foram observados durante as invasões sobre o Norte da África (entre 10°E e 30°E).

4.1.3 - Invasões de CAN-HN sobre o Nordeste do Brasil entre janeiro e fevereiro de 2016

Invasões sequenciais de CAN-HN entre o Norte e Nordeste (NEB) do Brasil foram observadas nos meses de janeiro e fevereiro de 2016. O início do processo deu-se entre os dias 6 e 12 (figura 8) de janeiro, com uma ciclogênese na América Central (entre 15°N - 20°N e 100°W - 80°W). O ciclone do Hemisfério Norte formado nessa região deslocou-se para nordeste entre os dias 6 e 8 de janeiro, até se acoplar ao cavado frontal de um outro ciclone na periferia da Corrente de Jato Polar do Hemisfério Norte (CJP-HN).

O ciclone do hemisfério Norte passou a se deslocar para sudeste a partir do dia 9 de janeiro (figura 8 - b e c), quando atingiu o nível 500 hPa, entre 30°N - 40°N e 80°W - 60°W. Durante este processo foram observados dois cavados meridionais na Corrente de Jato Subtropical do Hemisfério Norte (CJST-HN), um na posição do ciclone e outro associado à formação de centros com circulação ciclônica (anti-horária no HN) entre os níveis 500 e 250 hPa, na costa oeste do Senegal (entre 15°N-20°N e 20°W-10°W).

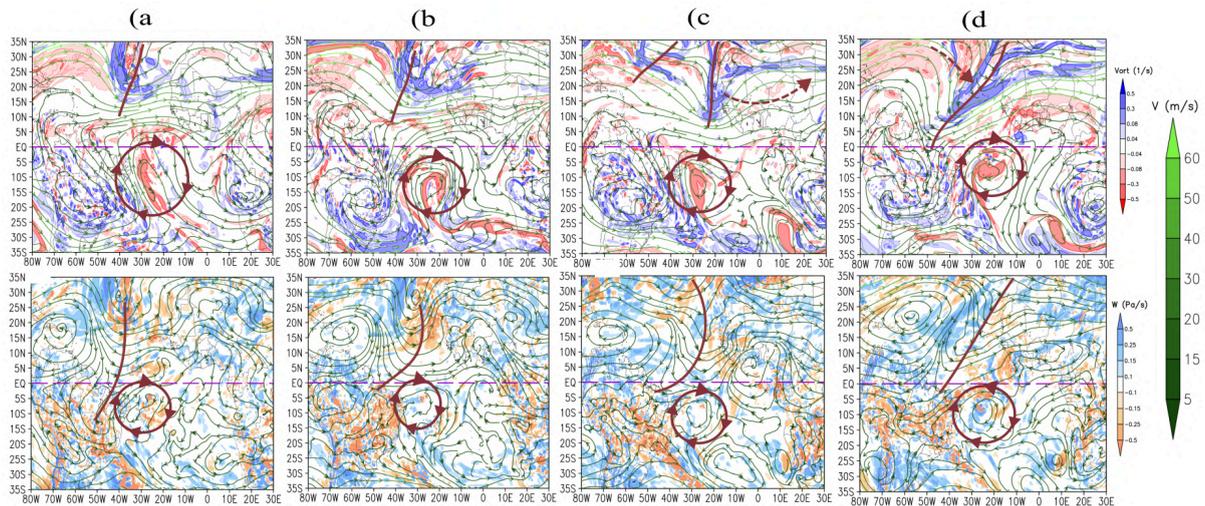
Figura 8 - Processo inicial de invasão de CAN-HN sobre o Hemisfério Sul a partir de imagens de satélite às 0Z dos dias 6 (a), 8 (b), 10 (c) e 12 (d) de janeiro de 2016. Campos utilizados: Imagens de satélite (Knapp, K. R. et al, 2011) nos canais do Infravermelho (em cima) e Vapor d'água realçado (em baixo). Círculo vermelho com setas: Vórtice Ciclônico em Altos Níveis; Círculo vermelho tracejado: Ciclone em baixos níveis; Linhas azuis: Frentes frias.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

A profundidade máxima do Ciclone foi atingida entre os dias 11 e 12 de janeiro (figura 8 - c e d), em conjunto com a formação de dois cavados com invasões a sul de 15°N na CJST-HN. O cavado associado ao ciclone do hemisfério Norte apresentou maior invasão no nível 500 hPa, onde pôde ser observado entre 25°N e 5°S, com extremidade próxima ao centro da Alta da Bolívia no nível 250 hPa (figura 9 - a e b). Durante este processo também foi observado o enfraquecimento na nebulosidade do ciclone do Hemisfério Norte e a regeneração e deslocamento para norte de um Vórtice Ciclônico em Altos Níveis na costa leste do NEB (figura 8 - b e c).

Figura 9 - Processo inicial de invasão de CAN-HN entre o Norte e Nordeste do Brasil a partir dos campos sinóticos às 0Z dos dias 12 (a), 14 (b), 16(c) e 19(d) de janeiro de 2016. Campos utilizados: Vorticidade potencial em 250 hPa (em cima), velocidade vertical em 500 hPa (em baixo) e linhas de corrente e magnitude do vento (em ambos os níveis). Círculo vermelho com setas: Vórtice Ciclônico em Altos Níveis; Linhas vermelhas: Cavados em Altos níveis; Seta tracejada: Deslocamento dos sistemas.

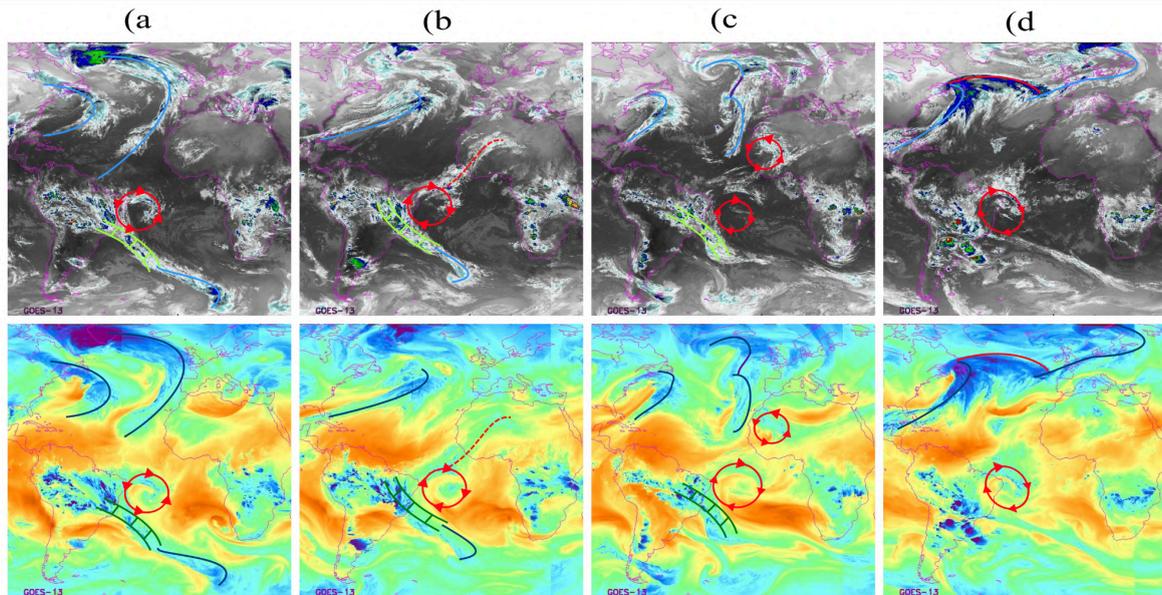


Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Após o dia 12 de janeiro, o ciclone do Hemisfério Norte mudou novamente de direção, deslocando-se para nordeste e enfraquecendo durante o processo. A invasão do cavado frontal em altos níveis a Sul de 10°N deu-se após o enfraquecimento do ciclone do Hemisfério Norte, quando um novo cavado frontal originado de um ciclone na periferia da CJP-HN invadiu a região entre os dias 14 e 16 de janeiro (figura 9 - b e c).

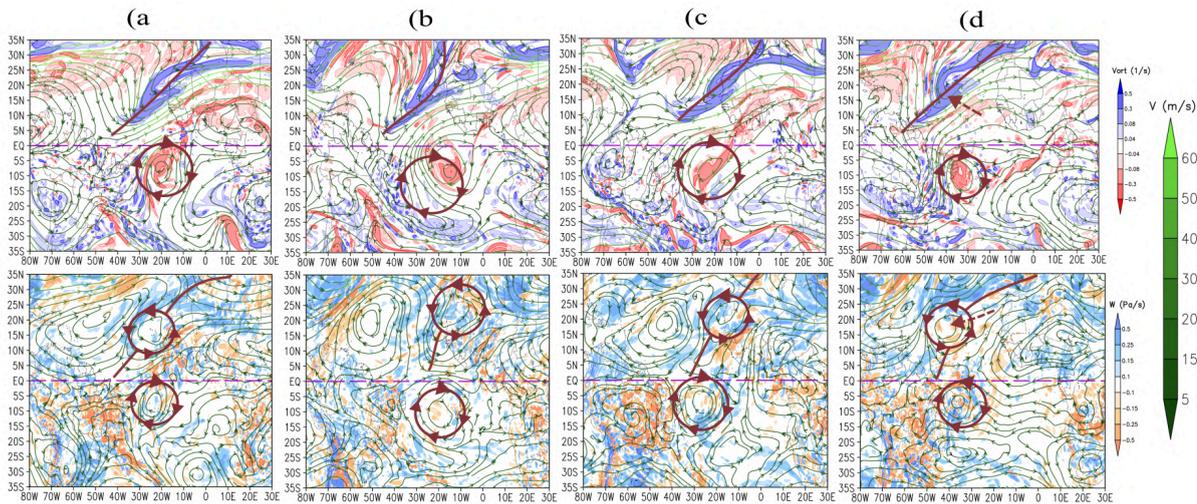
A presença do cavado frontal pôde ser observada com pouca variação zonal em 250 hPa, entre os dias 18 e 26 de janeiro, devido à invasão sequencial de outros quatro cavados associados a ciclones na CJP-HN. Durante esse período, o VCAN formado na costa leste do NEB também manteve-se na mesma região, deslocando-se cerca de dois graus para Leste a cada novo acoplamento (figuras 8 e 9).

Figura 10- Processo final de invasão de CAN-HN entre o Norte e Nordeste do Brasil a partir de imagens de satélite às 0Z dos dias 17 (a), 20 (b), 24 (c) e 30 (d) de janeiro de 2016. Campos utilizados: Imagens de satélite (Knapp, K. R. et al, 2011) nos canais do Infravermelho (em cima) e Vapor d'água realçado (em baixo). Círculo vermelho com setas: Vórtice Ciclônico em Altos Níveis; Linhas roxas: Frente Oclusa; Linhas vermelhas: Frentes quentes; Linha tracejada: vanguarda do cavado; ZCAS identificada pelo símbolo padrão.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Figura 11 - Processo de invasão de CAN-HN entre o Norte e Nordeste do Brasil a partir dos campos sinóticos às 0Z dos dias 21 (a), 25 (b), 27(c) e 30(d) de janeiro de 2016. Campos utilizados: Vorticidade potencial em 250 hPa (em cima), velocidade vertical em 500 hPa (em baixo) e linhas de corrente e magnitude do vento (em ambos os níveis). Círculo vermelho com setas: Vórtice Ciclônico em Altos Níveis; Linhas vermelhas: Cavados em Altos níveis; Seta tracejada: Deslocamento dos sistemas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

O início do processo de dissipação ocorreu no dia 27 janeiro (figuras 10 e 11), quando o cavado frontal em altos níveis se deslocou para leste, enfraquecendo e dissipando sobre o norte da África. A formação de um nova invasão com processo similar foi observada entre 60°W e 50°W, no dia 30 de janeiro (figuras 10 e 11 - d) e permaneceu ocorrendo com regenerações até o dia 20 de fevereiro. Durante o processo de dissipação, o VCAN na costa leste do NEB passou a se deslocar para oeste, acoplado-se ao novo cavado. A formação de nuvens convectivas foi observada a leste do VCAN e em torno da Alta da Bolívia durante todo o processo (figuras 8 e 10).

A análise das mensagens do código METAR indicou a presença dos seguintes sistemas sobre as capitais dos estados no Nordeste do Brasil:

Aracaju - SE: Trovoada e precipitação associadas a Cumulonimbus (Cb) nos dias 4, 29 e 30 de janeiro e dia 3 de fevereiro, quando a cidade estava sob os setores sudoeste e sudeste da região central dos VCANs. A presença de dois cavados em altos níveis do Hemisfério Norte com invasões sobre o norte da América do Sul e Atlântico Sul foi observada nos setores leste e oeste do VCAN no primeiro dia dos eventos de trovoada. A

formação de Névoa úmida associada a precipitação foi observada nos dias 9, 10, 18 e 23 de janeiro, durante os dias de aproximação ou afastamento da extremidade do VCAN sobre a cidade. A formação de torres de cumulus foi identificada durante todo o período de permanência dos VCANs.

Fortaleza – CE: Rajadas de vento nos dias 8(30 kt) e 31(23 kt) de janeiro e 1 (21 kt) de fevereiro, quando a cidade estava sob o setor norte do VCAN. Um evento de nevoeiro (visibilidade abaixo de 1 km) foi identificado no dia 1 de fevereiro. A presença de torres de cumulus foi observada durante os dias de aproximação ou afastamento entre o setor norte do VCAN e a cidade.

João Pessoa – PB: Trovoada e precipitação associada a Cb no dia 14 de janeiro, quando a cidade estava sob a região de difluência entre a Alta da Bolívia e o setor oeste do VCAN. Ainda no dia 14, foi observada a presença de cavados frontais em ambos os hemisférios sobre a ZCIT na região entre a alta da Bolívia e o VCAN. Também foram observadas rajadas de vento nos dias 12 (21kt), 23 (17kt) e 29 (32kt) de janeiro e 5 (24kt) de fevereiro, quando havia a presença de cavados frontais em ambos os hemisférios entre o VCAN e a região central do Brasil ou presença de um centro com circulação anti-horária originado no hemisfério norte no setor leste do VCAN.

Maceió – AL: Trovoada e precipitação associada a Cb no dia 29 de janeiro, quando a cidade estava ao setor oeste da região central do VCAN. A invasão de dois cavados do hemisfério norte em altos níveis também foi observada sobre os setores leste e oeste do VCAN durante o evento de trovoada. A formação de névoa úmida associada a precipitação foi observada nos dias 9, 12, 16, 18, 21, 22, 29 e 31 de janeiro e 2 de fevereiro, quando a cidade estava sob a região de difluência entre o VCAN e a Alta da Bolívia ou de cristas meridionais associadas à invasão de cavados em altos níveis do hemisfério norte. Duas rajadas de vento foram observadas nos dias 23 (27kt) e 27 (24kt) de janeiro sob as mesmas condições descritas anteriormente.

Natal – RN: Trovoada e precipitação associada a Cb nos dias 14 e 31 de janeiro quando a cidade estava sob a região de difluência entre o VCAN e a Alta da Bolívia ou de cristas meridionais associadas à invasão de cavados em altos níveis do hemisfério norte. A invasão de dois cavados do hemisfério norte em altos níveis também foi observada

sobre os setores leste e oeste do VCAN durante os eventos de trovoada. Rajadas de vento foram observadas nos dias 8 (23kt), 18 (18kt) e 22 (22kt) de janeiro sob as mesmas condições descritas anteriormente. A presença de névoa úmida foi identificada nos dias 28 de dezembro e 2, 8, 13, 14 e 24 de janeiro sob as mesmas condições citadas anteriormente.

Recife – PE: Trovoada e precipitação associadas a Cb nos dias 29 de dezembro e 29 e 30 janeiro com condições similares às descritas para Maceió-AL. Rajadas de vento nos dias 22 (21kt) e 29 (35kt) de janeiro durante o afastamento e aproximação do VCAN respectivamente. Dois eventos de névoa úmida foram observados nos dias 12 e 29 de janeiro sob condições similares às descritas em outras cidades. A formação de torres de cumulus foi observada durante todo o período de atividade dos VCANs.

São Luiz – MA: Eventos de trovoada e precipitação associadas a Cb no dia 19 de janeiro e rajadas de vento nos dias 28 (26kt) de dezembro e 5 (26kt), 8 (30kt) e 29 (23kt), ambos sob condições similares às descritas em Natal – RN. A formação de torres de cumulus foi observada durante todo o período de atividade dos VCANs.

Salvador – BA: Eventos de trovoada e precipitação associadas a Cb nos dias 4, 23 e 30 de janeiro e Névoa úmida nos dias 6, 21 e 23 de janeiro e 2 de fevereiro na extremidade de sistemas frontais do Hemisfério Sul e sob condições similares às descritas para Maceió-AL. A formação de torres de cumulus foi observada durante todo o período de atividade dos VCANs.

Teresina – PI: Trovoada e precipitação associadas a Cb nos dias 6, 3, 13, 14 e 23 de janeiro e entre os dias 1 e 5 de fevereiro sob condições similares às descritas em Natal – RN. A formação de torres de cumulus foi observada durante todo o período de atividade dos VCANs

4.2 - Vórtices Ciclônicos em Altos Níveis sobre o Atlântico Tropical

4.2.1 - Contagem e resumo dos casos

A formação de Vórtices Ciclônicos em Altos níveis sobre o Atlântico Tropical esteve associada a processos já descritos na literatura (Kousky e Gan, 1981; Ramirez 1999; Paixão e Gandu, 2000) atuando em conjunto com três diferentes processos.

O deslocamento dos VCANs geralmente ocorreu em direção a regiões com invasão de sistemas frontais dos Hemisférios Norte, Sul ou de ambos os Hemisférios, com o deslocamento mais comum sendo observado para na direção oeste.

A presença de cristas em baixos níveis associadas aos anticiclones subtropicais dos Hemisférios Norte e Sul também demonstraram influência sobre o posicionamento dos VCANs. De forma geral, os VCANs apresentaram deslocamento para a região onde a crista em baixos níveis dos anticiclones subtropicais do Hemisfério Sul ou Norte apresentou maior intensidade sobre os trópicos ou maior proximidade ao centro do VCAN. O deslocamento dos VCANs também foi observado em direção a regiões com cristas no campo de espessura da camada geopotencial entre os níveis 1000 e 500 hPa.

A presença de Vórtices Ciclônicos em Altos e Médios níveis nas regiões entre 15°N e 0°N contribuiu principalmente para a interrupção na circulação da Corrente de Jato Subtropical do Hemisfério Norte e intensificação de alguns cavados em altos e médios níveis do Hemisfério Norte. As condições descritas anteriormente contribuíram para a formação, intensificação e deslocamento de VCANs sobre o Atlântico Sul.

A presença de Cavados em Altos Níveis (CAN) localizados nos Hemisférios Norte e Sul foi crucial para os processos de formação, desenvolvimento e deslocamento dos VCANs, sendo observada em todos os VCANs com duração superior a um dia formados durante o verão austral entre 2011 e 2020.

4.2.1.1 - VCANs associados à presença de um cavado em altos níveis nos Hemisférios Norte e Sul

As formações mais comuns, associadas aos processos de formação Clássica e Alta, ocorreram de forma simultânea à presença de no mínimo um Cavado em Altos Níveis do Hemisfério Norte (CAN-HN) com invasão sobre o Hemisfério Sul, e no mínimo um Cavado em Altos níveis do Hemisfério Sul (CAN-HS) com invasão sobre os trópicos. A circulação fechada dos VCANs formou-se na extremidade do CAN-HS e na vanguarda (setor leste) do CAN-HN durante o processo de invasão.

O maior número de casos de VCAN com formação durante este processo foi observado durante o verão austral, com máximos entre os meses de janeiro (20 casos) e fevereiro (21 casos). Nenhum caso deste processo foi observado durante o inverno austral devido à redução na quantidade de invasões de CAN-HN.

Tabela 2 - Contagem e médias mensais da formação de VCANs associada à presença de um Cavado em Altos Níveis do Hemisfério Norte com Invasão no Hemisfério Sul.

		2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020		TOTAL MENSAL	MÉDIA MENSAL
	JAN	3	1	3	2	1	1	1	3	4	1		20	2,00
	FEV	1	4	2	2	2	2	1	0	4	3		21	2,10
	MAR	0	0	4	1	1	2	2	2	0	0		12	1,20
	ABR	1	1	0	0	1	0	1	1	0	1		6	0,60
	MAI	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0		1	0,10
	JUN	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0
	JUL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0
	AGO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0
	SET	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0
	OUT	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0		2	0,20
	NOV	0	1	2	3	2	0	2	0	1	2		13	1,30
	DEZ	3	2	1	1	2	4	2	2	1	2		20	2,00
TOTAL ANUAL		8	9	13	9	11	9	9	8	10	9		TOTAL 95	MÉDIA 9,50

Este processo de formação ocorreu majoritariamente a partir de invasões entre o Norte da América do Sul e a região central do Atlântico (60°W-10°W). VCANs formados sob estas condições deslocaram-se majoritariamente para oeste ou permaneceram na costa leste do NEB. Em alguns casos foram observadas intensificações de VCANs após a formação de centros com circulação anti-horária entre o setor leste do VCAN e a extremidade de um CAN-HN com invasão sobre o Hemisfério Sul.

4.2.1.2 - VCANs formados entre dois cavados em altos níveis do Hemisfério Norte e um cavado em Altos níveis do Hemisfério Sul

A formação de VCANs associados a este processo foi menos frequente, com apenas 17 casos registrados entre 2011 e 2020 (Tabela 3). O maior número de casos foi observado durante o verão austral, com quatro casos identificados nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro. Nenhum caso foi identificado durante o inverno austral.

O processo de formação de VCANs a partir de dois CAN-HN esteve majoritariamente associado às formações africana I e II. A invasão de dois CAN-HN entre o Atlântico central e o Norte de África intensificou a circulação horária na região entre os dois cavados, propiciando a formação de VCANs.

VCANs formados a partir deste processo apresentaram pouco deslocamento, permanecendo próximos ao Atlântico central ou costa leste do NEB durante o processo, principalmente em invasões duradouras ou sequenciais de CAN-HN. O aumento do tamanho e redução no deslocamento de VCANs já formados também foi observado sob as mesmas condições.

Tabela 3 - Contagem e médias mensais da formação de VCANs associada à presença de dois Cavados em Altos Níveis do Hemisfério Norte com Invasões no Hemisfério Sul.

		2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020		TOTAL MENSAL	MÉDIA MENSAL
	JAN	1	1	0	1	0	0	0	1	0	0		4	0,40
	FEV	1	0	1	0	0	0	0	1	0	1		4	0,40
	MAR	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0		3	0,30
	ABR	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1		1	0,10
	MAI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0
	JUN	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0
	JUL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0
	AGO	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0
	SET	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0
	OUT	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0
	NOV	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0		1	0,10
	DEZ	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0		4	0,40
TOTAL ANUAL		3	2	2	1	1	1	0	2	3	2		TOTAL	MEDIA
													17	1,70

4.2.1.3 - VCANs formados por um CAN-HS entre dois anticiclones em altos níveis do Hemisfério Sul.

Observada principalmente em VCANs de curta duração formados entre o outono, inverno e primavera do hemisfério Sul (maio a outubro). O número de casos associados a esse processo de formação foi o segundo menor, com o número máximo de ocorrências sendo observado no mês de outubro (8 casos). Apenas uma ocorrência foi identificada durante o verão austral (tabela 4).

Tabela 4 - Contagem e médias mensais da formação de VCANs associada à presença de um Cavado em Altos Níveis do Hemisfério Sul entre dois anticiclones em altos níveis do Hemisfério Sul.

		2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020		TOTAL MENSAL	MÉDIA MENSAL
	JAN	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0
	FEV	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0
	MAR	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0		1	0,10
	ABR	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0
	MAI	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0		2	0,20
	JUN	1	1	1	0	1	0	1	0	0	0		5	0,50
	JUL	1	0	1	0	0	0	1	0	1	1		5	0,50
	AGO	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1		4	0,40
	SET	1	1	1	0	1	0	1	1	0	0		6	0,60
	OUT	1	1	0	0	1	1	1	2	1	0		8	0,80
	NOV	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1		2	0,20
	DEZ	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0
TOTAL ANUAL		4	4	3	1	5	2	6	3	2	3		TOTAL 33	MÉDIA 3,30

A formação destes sistemas ocorreu na extremidade de cavados frontais do Hemisfério Sul com invasões sobre o Hemisfério Norte, sendo análoga à formação de anticiclones em altos níveis através do mesmo processo no Hemisfério Sul. As definições de formação de VCANs clássica e alta foram as que mais se assimilaram a esse processo.

O deslocamento de VCANs formados sob estas condições ocorreu de forma errática quando comparado a outros VCANs, com maior intensidade para a direção Norte. A formação de tempestades tropicais e furacões do Hemisfério Norte entre 50°W e 20°W foi observada cerca de três dias após as invasões entre os hemisférios.

VCANs formados a partir desse processo não indicaram grandes efeitos sobre o Nordeste do Brasil devido à presença dos anticiclones necessários para a sua formação.

Precipitações fracas com características estratiformes e desvios para norte na circulação da Zona de Convergência Intertropical foram observados durante a passagem desses sistemas. Em raríssimos casos foram observadas formações de Sistemas Convectivos de Mesoescala sobre o Sertão e Norte do Nordeste do Brasil, provavelmente associados à convergência entre o cavado frontal e os anticiclones que originaram o VCAN.

4.2.2 - Formação de VCAN associada a um CAN no Hemisfério norte e um CAN no Hemisfério Sul em janeiro de 2004

O processo de formação do Vórtice Ciclônico em Altos Níveis (VCAN) iniciou-se entre os dias 4 e 12 de janeiro de 2004, com a passagem de uma frente fria sobre o Atlântico Sul. A presença de um VCAN com menor duração foi identificada previamente na região central do Atlântico Sul ($30^{\circ}\text{W} - 10^{\circ}\text{W} - 15^{\circ}\text{S} - 0^{\circ}\text{S}$), entre os dias 4 e 6 de janeiro, na vanguarda de dois cavados frontais presentes nos Hemisférios Norte (HN) e Sul (HS).

O cavado frontal do HS apresentou acoplamento à corrente de Jato Subtropical (CJST-HS) e ao Jato de Baixo Níveis (JBN) entre os dias 1 e 5 de janeiro, possuindo características similares à Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) até o momento de dissipação do VCAN.

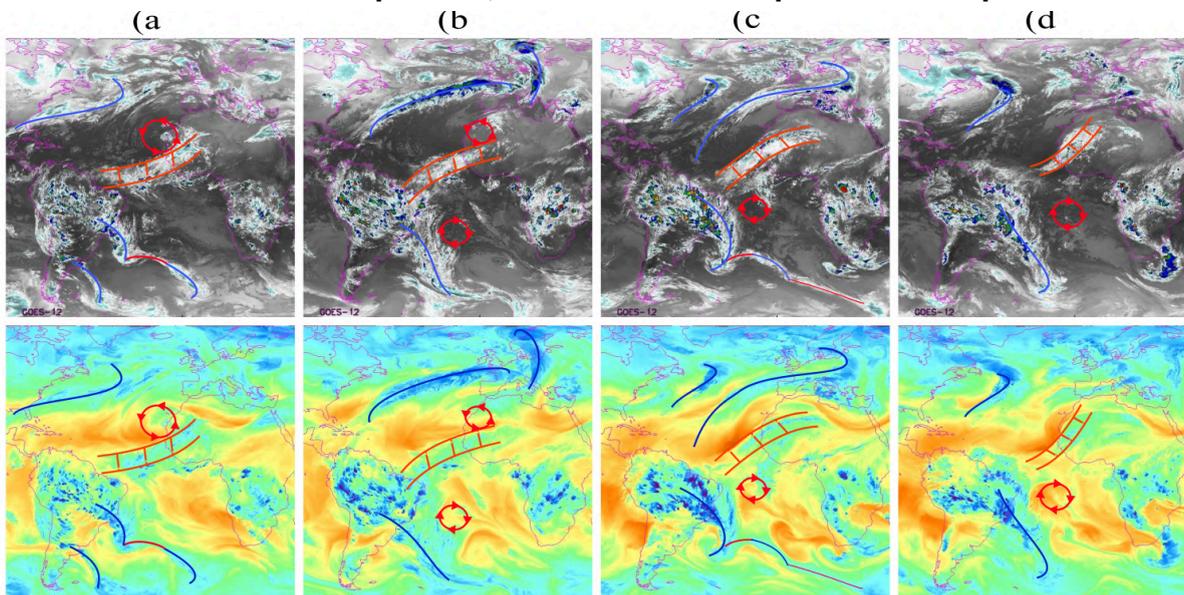
O primeiro VCAN deslocou-se para o Sul, acompanhando a vanguarda do Cavado frontal do HS e dissipando no dia 6 de janeiro, logo após o desacoplamento entre o Cavado Frontal do HS e o JBN. O processo de dissipação ocorreu de forma simultânea à invasão de dois novos cavados frontais do Pacífico para o Atlântico, entre os dias 4 e 7 de janeiro, ambos apresentando acoplamento às Correntes de Jato Subtropicais dos seus respectivos Hemisférios. A região de dissipação do VCAN ($40^{\circ}\text{W} - 10^{\circ}\text{W}, 25^{\circ}\text{S} - 0^{\circ}\text{S}$) permaneceu com perturbações ciclônicas em altos níveis durante todo o processo.

Entre os dias 7 e 10 de janeiro (figuras 12 e 13 - a), o cavado frontal do HN iniciou o processo de formação de um novo VCAN sobre o Atlântico Norte (VCAN-ATN), na costa Oeste da África ($30^{\circ}\text{W}, 0^{\circ}\text{W} ; 15^{\circ}\text{N}, 30^{\circ}\text{N}$), o sistema apresentou um centro com circulação visível nos níveis 500 e 250 hPa e espessura da camada geopotencial entre os níveis 1000 e 500 hPa. Durante este processo foi possível observar a formação de uma banda de nebulosidade com textura majoritariamente granulosa e filamentosa, indicando a presença de nuvens dos tipos cirrus e cirro cumulus, entre a Zona de Convergência

Intertropical (ZCIT) e o Norte da África, no setor Leste do VCAN-HN ($40^{\circ}\text{W} - 0^{\circ}\text{W}$, $0^{\circ}\text{N} - 30^{\circ}\text{N}$) nas imagens de satélite.

O VCAN-ATN, deslocou-se em direção ao Norte da Europa entre os dias 10 e 13 de janeiro (figuras 12 e 13 - a e b), formando um cavado com invasão sobre o Norte da América do Sul ($60^{\circ}\text{W} - 30^{\circ}\text{W}$), ao sul de 0°N e 10°N entre os níveis 500 e 250 hPa respectivamente. Durante este processo também foi observada a intensificação de cristas meridionais em baixos níveis sobre o Atlântico Norte e Sul ($30^{\circ}\text{W} - 0^{\circ}\text{W}$; $35^{\circ}\text{S} - 35^{\circ}\text{N}$) nos campos de pressão ao nível médio do mar e espessura da camada Geopotencial entre os níveis 1000 e 500 hPa. A ZCIT apresentou um leve desvio para Norte e diminuição na quantidade de células convectivas após a dissipação do VCAN-HN (figura 12).

Figura 12 - Processo de formação do Vórtice Ciclônico em Altos Níveis do Hemisfério Sul na extremidade de cavados frontais de ambos os hemisférios a partir de imagens de satélite às 0Z dos dias 10 (a), 12 (b), 14 (c) e 15 (d) de janeiro de 2004. Campos utilizados: Imagens de satélite (Knapp, K. R. et al, 2011) nos canais do Infravermelho (em cima) e Vapor d'água realçado (em baixo). Círculo vermelho com setas: Vórtice Ciclônico em Altos Níveis; Linhas azuis: Frentes frias; Linhas vermelhas: Frentes quentes; ZCIT identificada pelo símbolo padrão.

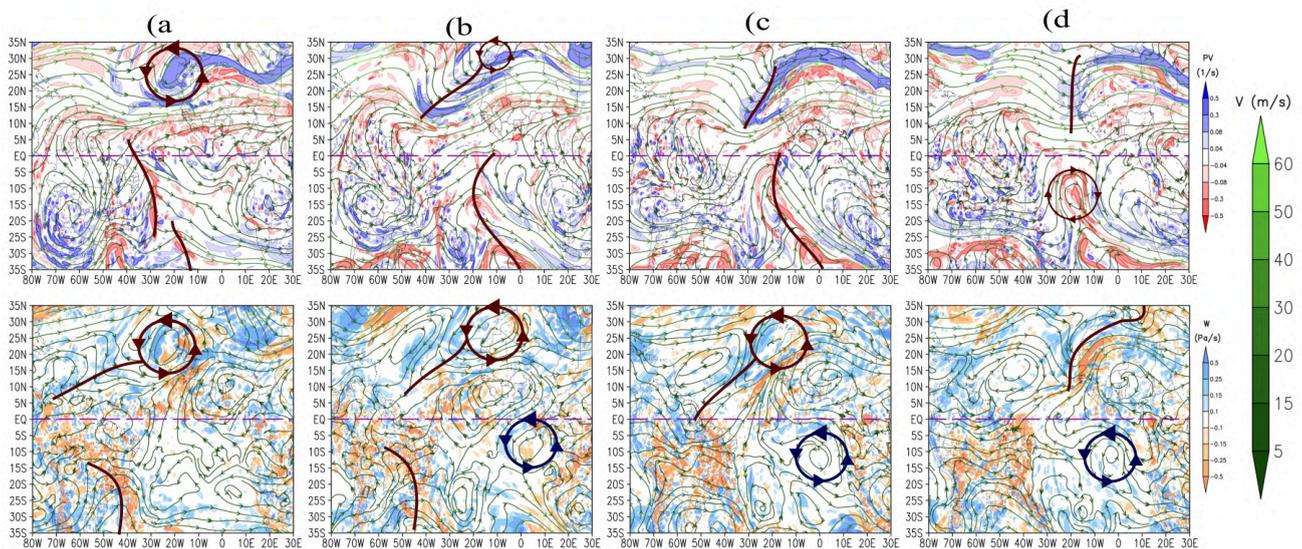


Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

O VCAN-ATN, deslocou-se em direção ao Norte da Europa entre os dias 10 e 13 de janeiro (figuras 12 e 13 - a e b), formando um cavado com invasão sobre o Norte da América do Sul ($60^{\circ}\text{W} - 30^{\circ}\text{W}$), ao sul de 0°N e 10°N entre os níveis 500 e 250 hPa respectivamente. Durante este processo também foi observada a intensificação de cristas

meridionais em baixos níveis sobre o Atlântico Norte e Sul (30°W - 0°W ; 35°S - 35°N) nos campos de pressão ao nível médio do mar e espessura da camada Geopotencial entre os níveis 1000 e 500 hPa. A ZCIT apresentou um leve desvio para Norte e diminuição na quantidade de células convectivas após a dissipação do VCAN-HN (figura 12).

Figura 13 - Processo de formação do Vórtice Ciclônico em Altos Níveis do Hemisfério Sul na extremidade de cavados frontais de ambos os hemisférios a partir de campos Sinóticos às 0Z dos dias 10 (a), 12 (b), 14 (c) e 15 (d) de janeiro de 2004. Campos utilizados: Vorticidade potencial em 250 hPa (em cima), velocidade vertical em 500 hPa (em baixo) e linhas de corrente e magnitude do vento (em ambos os níveis). Círculo azul com setas: Sistemas com circulação anti-horária em altos níveis; Círculo vermelho com setas: Vórtice Ciclônico em Altos Níveis; Linhas vermelhas: Cavados em Altos Níveis.



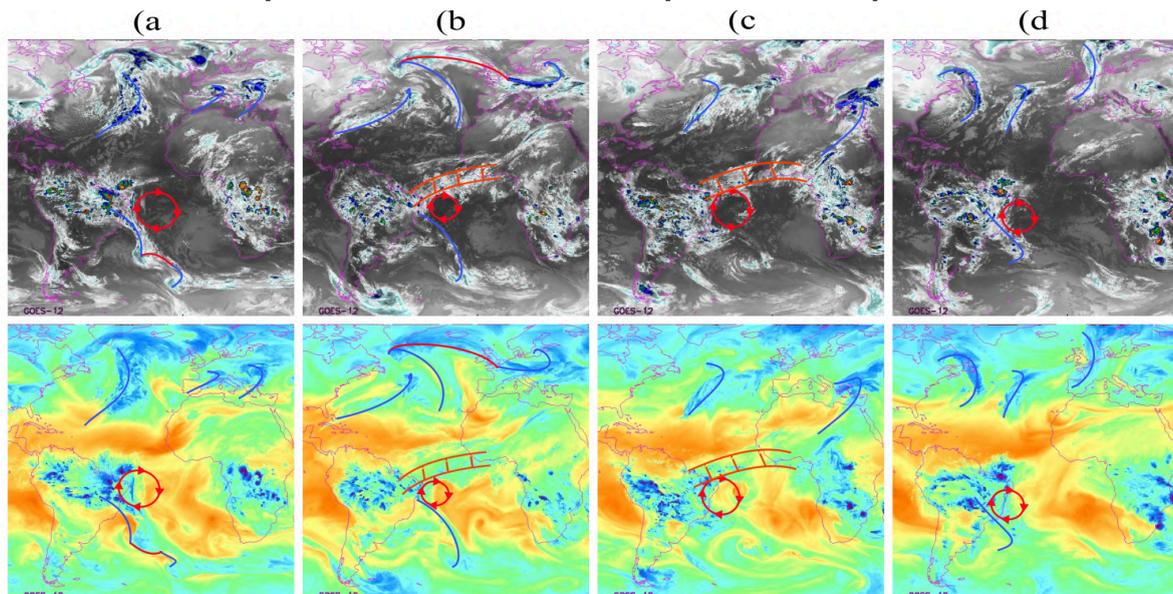
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

A formação de um novo VCAN na região central do Atlântico Sul (VCAN-ATS) (30°W, 10°W ; 20°S, 5°S) foi observada entre os dias 13 e 15 de janeiro (figuras 12 e 13 - b, c e d). O VCAN-HS formou-se entre a extremidade do cavado associado ao VCAN do Hemisfério Norte e a extremidade de um cavado frontal no Hemisfério Sul. A formação do VCAN-ATS também foi observada através da intensificação das cristas meridionais nos Hemisférios Sul e Norte no campo de Pressão ao Nível Médio do Mar e a formação de um centro fechado no Hemisfério Sul no campo de espessura da camada geopotencial entre os níveis 1000 e 500 hPa.

O ciclone que deu origem ao cavado do HS formou-se na costa Leste do Sudeste do Brasil (50°W , 30°W ; 30°S , 20°S), ligeiramente ao norte das ciclogêneses usuais. A presença do ciclone nesta região deslocou a ZCAS para o Sul do NEB, intensificando a precipitação sobre toda a região (figura 12 - a). O ciclone se deslocou rapidamente para o sul entre os dias 13 e 14 de janeiro, dissipando pouco antes do dia 15 após ultrapassar a latitude de 45°S . A banda de nebulosidade associada aos cavados frontais do ciclone (figuras 12 e 13) permaneceu entre o NEB e o Sul da África (50°W - 45°E , 50°S - 5°S) até o dia 17 de janeiro, quando dissipou após a formação de um novo ciclone sobre o Atlântico Central (40°W - 20°W , 40°S - 30°S).

O centro do VCAN-ATS se intensificou entre os dias 15 e 17 de janeiro (figuras 12 - d e 14 - a), apresentando um leve deslocamento para oeste após a dissipação do cavado em altos níveis do HN e desacoplamento do cavado frontal do HS. Durante este período, dois novos sistemas frontais foram observados se deslocando do Pacífico para o Atlântico nos Hemisférios Norte e Sul.

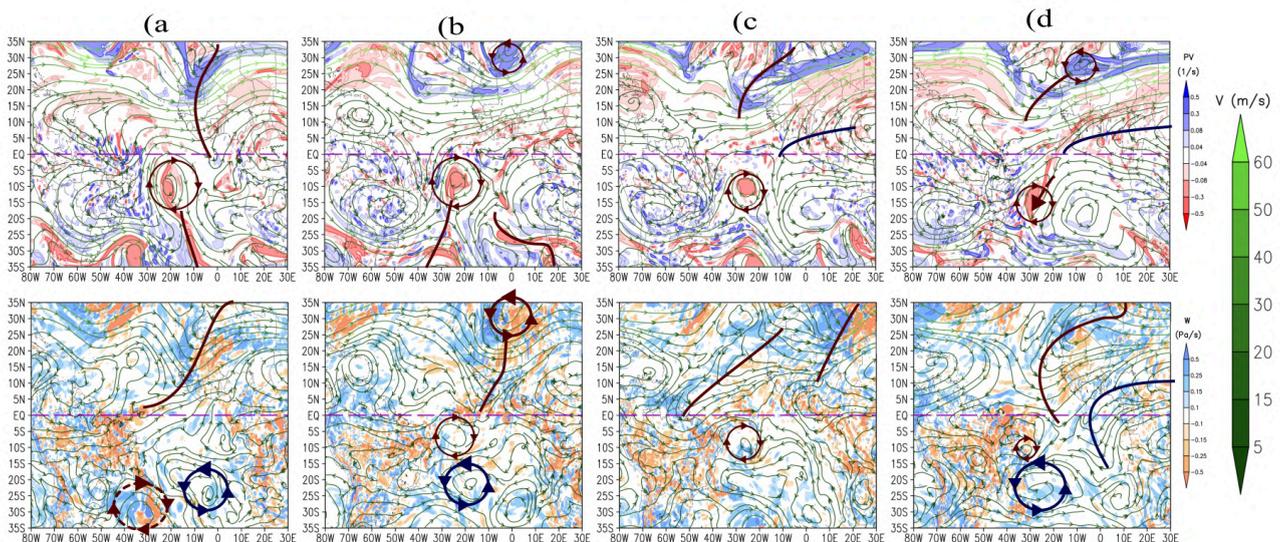
Figura 14 - Processo de deslocamento do Vórtice Ciclônico em Altos Níveis do Hemisfério Sul na extremidade de cavados frontais de ambos os hemisférios a partir de imagens de satélite às 0Z dos dias 18 (a), 20 (b), 22(c) e 24(d) de janeiro de 2004. Campos utilizados: Imagens de satélite (Knapp, K. R. et al, 2011) nos canais do Infravermelho (em cima) e Vapor d'água realçado (em baixo). Círculo vermelho com setas: Vórtice Ciclônico em Altos Níveis; Linhas azuis: Frentes frias; Linhas vermelhas: Frentes quentes; ZCIT identificada pelo símbolo padrão.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

O início do deslocamento (figuras 14 e 15) do VCAN-ATS ocorreu entre os dias 18 e 22 de janeiro, quando o sistema deslocou-se com velocidade de aproximadamente $2,5^{\circ}\text{W}/\text{dia}$ para a região entre as extremidades dos novos cavados frontais sobre o Atlântico Norte e Sul. As cristas nos campos de pressão ao nível médio do Mar e espessura da camada geopotencial entre 1000 e 500 hPa também se deslocaram para Oeste em fase com o VCAN-ATS.

Figura 15 - Processo de deslocamento do Vórtice Ciclônico em Altos Níveis do Hemisfério Sul na extremidade de cavados frontais de ambos os hemisférios a partir de campos Sinóticos às 0Z dos dias 18 (a), 20 (b), 22(c) e 24(d) de janeiro de 2004. Campos utilizados: Vorticidade potencial em 250 hPa (em cima), velocidade vertical em 50 hPa (em baixo) e linhas de corrente e magnitude do vento (em ambos os níveis). Círculo azul com setas: Sistemas com circulação anti-horária em altos níveis; círculo vermelho com setas: Vórtice Ciclônico em Altos Níveis; Linhas vermelhas: Cavados em Altos Níveis.



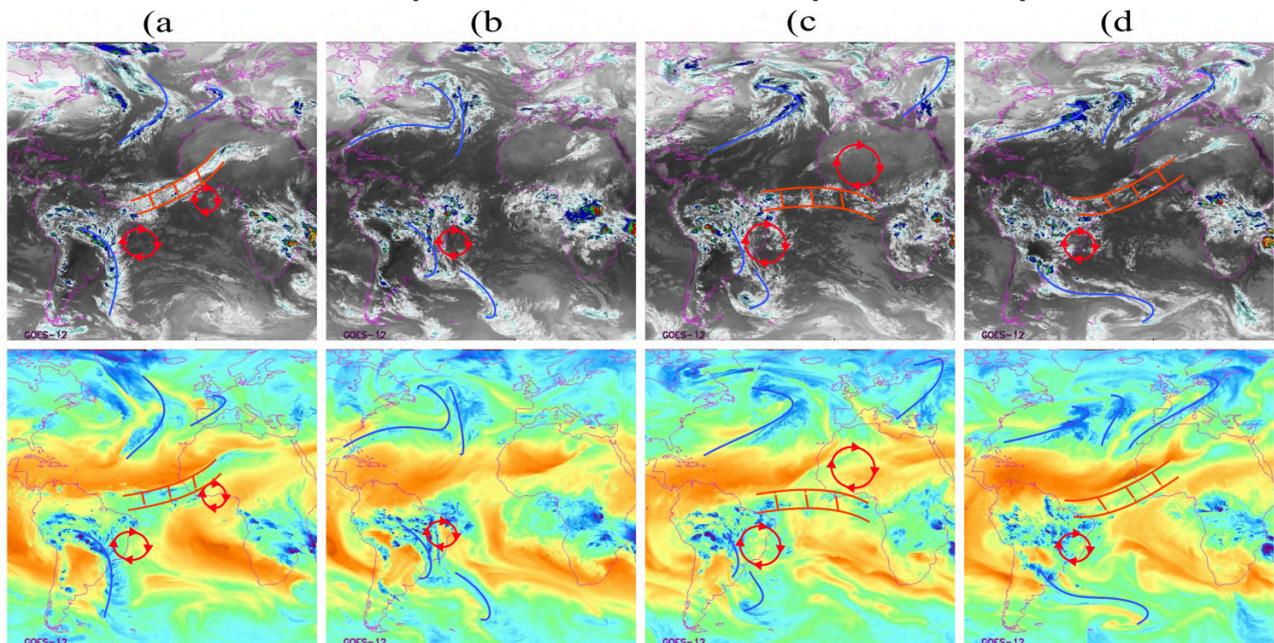
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

O primeiro processo de dissipação do VCAN-ATS ocorreu entre os dias 23 e 27 de janeiro (figuras 16 e 17), logo após ao desacoplamento entre um cavado frontal no Norte da África e a ZCIT (70°S , 10°E ; 5°S , 30°N) nos níveis 500 e 250 hPa. O VCAN-ATS se deslocou para sudoeste, acoplando-se a um novo cavado frontal do Hemisfério Sul e dissipando seus centros nos campos de linhas de corrente e espessura da camada geopotencial entre os níveis 1000 e 500 hPa no entre os dias 24 e 26 de janeiro.

O deslocamento para oeste de um pequeno centro com circulação anticiclônica foi observado sobre o Atlântico Sul durante o processo de dissipação do VCAN-ATS. Este sistema formou-se através do desacoplamento da extremidade de uma crista zonal observada entre o Sul da África e a região central do Atlântico Sul (30°W, 10°E ; 25°S, 15°S) após a passagem do cavado frontal do HS que estava acoplado ao VCAN anteriormente. O sistema com circulação anticiclônica apresentou centros fechados entre os níveis 250 e 500 hPa (figura 15), com a presença de uma fraca região de divergência das linhas de corrente e anomalias negativas da temperatura no nível 850 hPa no setor leste do sistema (0°E, 10°E; 30°S, 15°S).

O centro com circulação anticiclônica se deslocou para oeste (figura 15 - a e b) com a mesma velocidade observada no VCAN-ATS e se dissipou no dia 27 de janeiro, pouco após retornar para sua posição de origem. A dissipação do sistema intensificou a crista zonal sobre o Atlântico Sul, o que pode ter contribuído para a dissipação e deslocamento do VCAN-ATS.

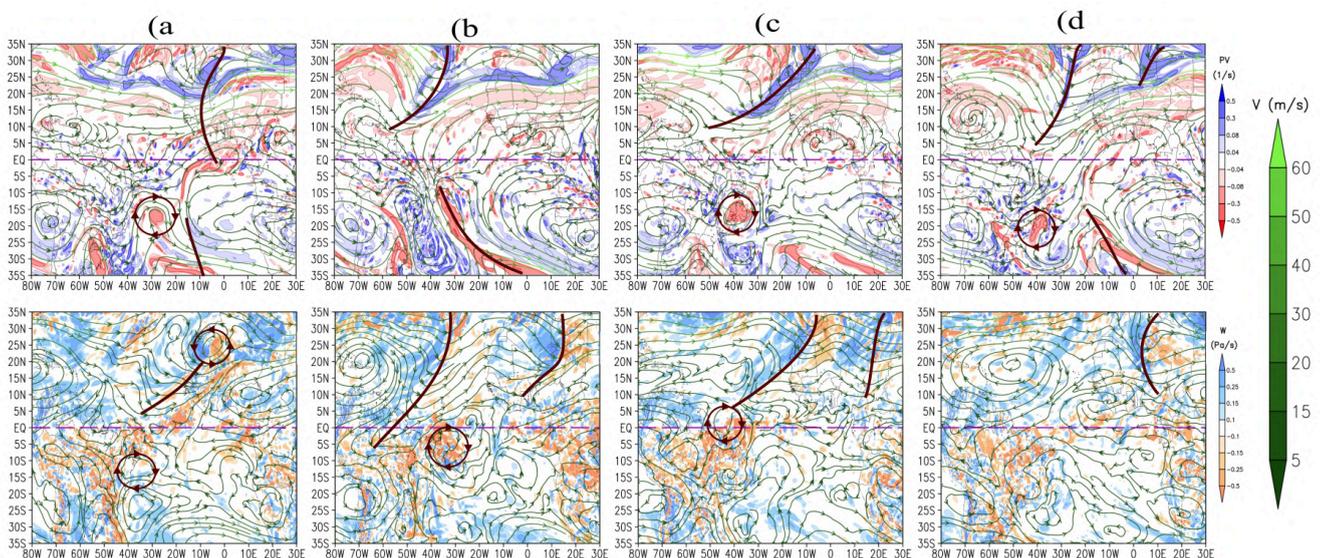
Figura 16 - Processo de dissipação do Vórtice Ciclônico em Altos Níveis do Hemisfério Sul na extremidade de cavados frontais de ambos os hemisférios a partir de imagens de satélite às 0Z dos dias 26 (a), 28 (b), 30(c) de janeiro e 1(d) fevereiro de 2004. Campos utilizados: Imagens de satélite (Knapp, K. R. et al, 2011) nos canais do Infravermelho (em cima) e Vapor d'água realçado (em baixo). Círculo vermelho com setas: Vórtice Ciclônico em Altos Níveis; Linhas azuis: Frentes frias; Linhas vermelhas: Frentes quentes; ZCIT identificada pelo símbolo padrão.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

O VCAN-ATS apresentou uma regeneração entre os dias 27 e 28 de janeiro (figuras 16 e 17) após acoplar-se a um cavado frontal sobre o Atlântico Sul (30°W, 10°W; 35°S, 10°S). A presença de um cavado do Hemisfério Norte com invasão sobre a América do Sul foi observada novamente entre os níveis 500 e 250 hPa pouco antes da regeneração do sistema (figuras 16 e 17 - a). O VCAN-ATS permaneceu na costa leste do Brasil durante o restante do mês de janeiro e início de fevereiro, dissipando e regenerando novamente em processos similares aos descritos anteriormente. A presença de cavados do Hemisfério Norte com invasões sobre a América do Sul nos níveis 500 e 250 hPa foi observada durante demais os eventos de formação e regeneração de VCANs no verão de 2004.

Figura 17 - Processo de dissipação do Vórtice Ciclônico em Altos Níveis do Hemisfério Sul na extremidade de cavados frontais de ambos os hemisférios a partir de campos Sinóticos às 0Z dos dias 26 (a), 28 (b), 30(c) de janeiro e 1(d) fevereiro de 2004. Campos utilizados: Vorticidade potencial em 250 hPa (em cima), velocidade vertical em 500 hPa (em baixo) e linhas de corrente e magnitude do vento (em ambos os níveis). Círculo vermelho com setas: Vórtice Ciclônico em Altos Níveis; Linhas vermelhas: Cavados em Altos Níveis.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

A análise das estações de superfície em janeiro de 2004, indicou a presença de precipitação quase diária sobre as capitais do NEB com intensidade entre 0 e 10 mm a partir do dia 12 de janeiro, pouco após a formação do primeiro VCAN no Atlântico Sul.

Eventos de precipitação entre 20 e 60 mm foram observados sobre a maioria das capitais entre os dias 14 e 21 de janeiro, momento onde o segundo VCAN do atlântico Sul se encontrava na costa leste do NEB (30°W, 10°W; 15°S, 0°S). As composições de imagens de satélite indicaram a presença de um sistema frontal com inclinação meridional como o principal sistema responsável pela precipitação sobre o NEB durante o período. Ressalta-se que este sistema frontal estava associado a um ciclone barotrópico do HS formado anormalmente ao norte (ref) durante a invasão de um cavado frontal do Hemisfério Norte sobre a América do Sul.

Nos processos de dissipação e regeneração do VCAN-HS, entre os dias 24 e 31, foram observadas regiões de intensa divergência em altos níveis sobre o Norte do NEB. A presença destas regiões ocorreu em conjunto com a formação de diversas Sistemas células convectivas com deslocamento de sudoeste para nordeste em boa parte do território brasileiro, com maior influência na precipitação das regiões do Meio Norte e Sertão do NEB. Outro sistema frontal com curvatura meridional associado a um ciclone do HS formado anormalmente ao norte foi observado durante o fim deste processo.

Durante o processo de formação e deslocamento do segundo VCAN-HS foram observadas quedas de até 2 hPa na pressão atmosférica, quedas de até 2°C na temperatura máxima, e quedas na velocidade do vento na maioria das capitais do NEB, observadas principalmente nas cidades costeiras. Todas as variáveis supracitadas apresentaram aumento após a dissipação ou afastamento dos VCANs observados.

4.2.3 - Formação de VCAN associada a dois CANs no Hemisfério norte e um CAN no Hemisfério Sul entre janeiro e fevereiro de 2013

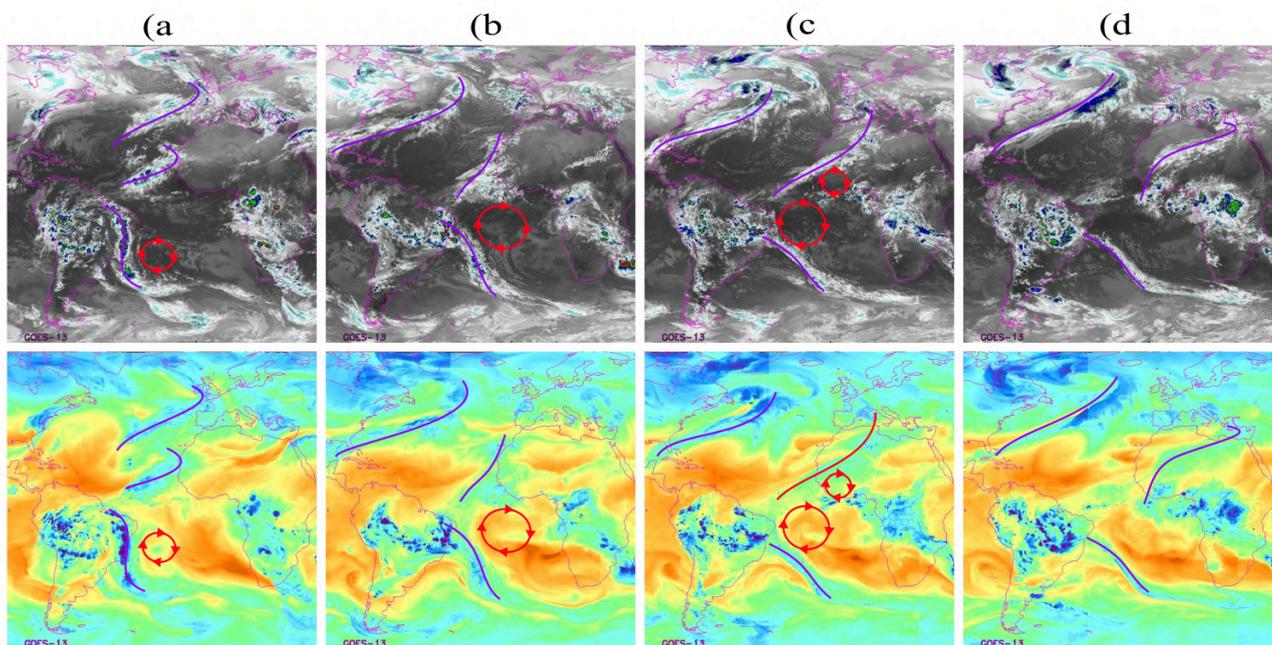
O processo de formação do Vórtice Ciclônico em Altos Níveis (VCAN) iniciou-se no dia 18 de janeiro de 2013 (figuras 18 e 19 - a), com a dissipação de um VCAN do Hemisfério Sul (HS) sobre o Atlântico, que ocorreu em conjunto com a invasão de um cavado frontal do Hemisfério Norte (HN) sobre o norte da América do Sul (entre 80°W e 50°W).

No início do processo foi observada a presença de duas cristas zonais, associadas a anticiclones barotrópicos na costa oeste da África no nível 250 hPa. A crista zonal do HN apresentou invasão sobre o Atlântico Sul na região de dissipação do VCAN (entre

30°W e 20°W), enquanto a crista zonal do HS invadiu o Atlântico Norte sobre a região entre a vanguarda do cavado do VCAN e a crista zonal do HN (entre 20°W e 10°W). A presença de massas de ar quente e convergência nas linhas de corrente também foi observada abaixo de ambas as cristas zonais no nível 850 hPa.

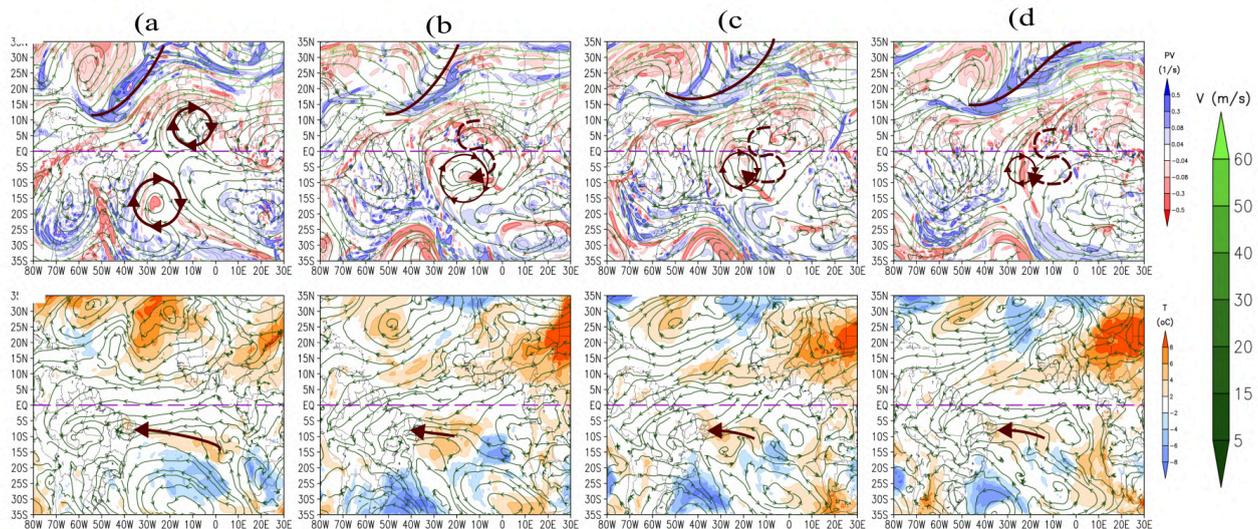
Ambas as cristas zonais se deslocaram para o Sul entre os dias 19 e 21 de janeiro (figuras 18 e 19 - a e b) devido ao deslocamento da região de invasão do cavado frontal do HN e formação de um VCAN no Hemisfério Norte (entre 10°N, 25°N e 50°W, 30°W), sendo observada também uma segunda invasão sobre o norte da África (entre 0°W e 30°E).

Figura 18 - Processo de formação do Vórtice Ciclônico em Altos Níveis do Hemisfério Sul formado entre dois cavados frontais do Hemisfério Norte a partir de imagens de satélite. Campos utilizados: Imagens de satélite (Knapp, K. R. et al, 2011) nos campos do Infravermelho (em cima) e Vapor d'água realçado (em baixo) às 0Z dos dias 18 (a), 22 (b), 23 (c) e 24 (d) de janeiro de 2013. Círculo vermelho com setas: Vórtice Ciclônico em Altos Níveis; Linhas azuis: Frentes frias; Linhas roxas: Frente oclusa.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Figura 19 - Processo de formação do Vórtice Ciclônico em Altos Níveis do Hemisfério Sul formado entre dois cavados frontais do Hemisfério Norte a partir dos campos sinóticos às 0Z dos dias 18 (a), 22 (b), 23 (c) e 24 (d) de janeiro de 2013. Campos utilizados: Vorticidade potencial em 250 hPa (em cima), anomalia da temperatura do ar em 850 hPa (em baixo) e linhas de corrente e magnitude do vento (em ambos os níveis). Círculo vermelho com setas: Vórtice Ciclônico em Altos Níveis; Linhas vermelhas: Cavados em Altos Níveis; Seta tracejada: Deslocamento dos sistemas; Seta preenchida: Deslocamento das massas de ar.



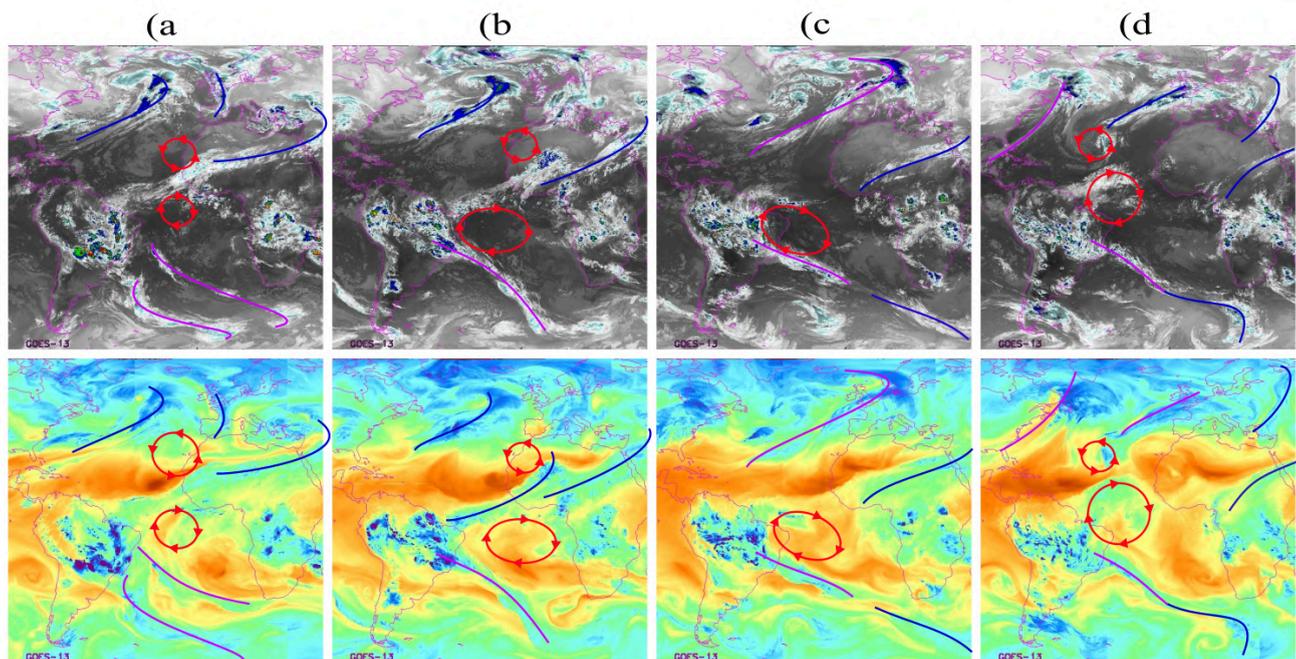
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Na região entre as duas invasões foi observada a formação de dois vórtices na extremidade das cristas zonais. O Vórtice formado na extremidade da crista zonal do HN apresentou circulação ciclônica entre os níveis 500 e 250 hPa, com uma fraca circulação no nível 850 hPa caracterizando um VCAN, já o vórtice formado na extremidade da crista zonal do HS apresentou circulação anticiclônica entre os mesmos níveis. A massa de ar quente observada sobre a região no nível 850 hPa permaneceu abaixo do centro fechado do VCAN durante todo o processo.

Os dois vórtices em altos níveis se deslocaram para oeste entre os dias 22 e 23 de janeiro (figuras 18 e 19 - b e c), iniciando o processo de dissipação após a formação de outro sistema com circulação ciclônica sobre o Hemisfério Norte na retaguarda do VCAN no Hemisfério Sul (VCAN-HS) (entre 0°N, 10°N e 10°W, 10°E). A perturbação que deu origem ao sistema se formou na região de confluência entre o cavado de um VCAN do Hemisfério Norte e a extremidade de um cavado do Hemisfério Sul (entre 10°S, 10°N e 40°W, 30°W).

O centro do VCAN-HS apresentou sua primeira dissipação no dia 24 de janeiro (figuras 18 e 19 - c e d), com a invasão de um novo cavado do HN sobre a América do Sul no nível 500 hPa (entre 60°W e 50°W). O centro formou-se novamente no dia 26, na região entre um cavado frontal do Hemisfério Sul e um cavado em altos níveis do Hemisfério Norte com invasão ao sul de 15°N (entre 5°S, 5°N e 30°W, 20°W). Durante o processo de regeneração novas massas de ar quente foram observadas deslocando-se do oeste da África para a região abaixo do sistema.

Figura 20 - Processo de deslocamento do Vórtice Ciclônico em Altos Níveis do Hemisfério Sul formado entre dois cavados frontais do Hemisfério Norte a partir de imagens de satélite às 0Z dos dias 26 (a), 28 (b), 30 (c) de janeiro e 1 (d) fevereiro de 2013. Campos utilizados: Imagens de satélite (Knapp, K. R. et al, 2011) nos canais do Infravermelho (em cima) e Vapor d'água realçado (em baixo). Círculo vermelho com setas: Vórtice Ciclônico em Altos Níveis; Linhas azuis: Frentes frias; Linhas roxas: Frente Oclusa; Linhas vermelhas: Frentes quentes.

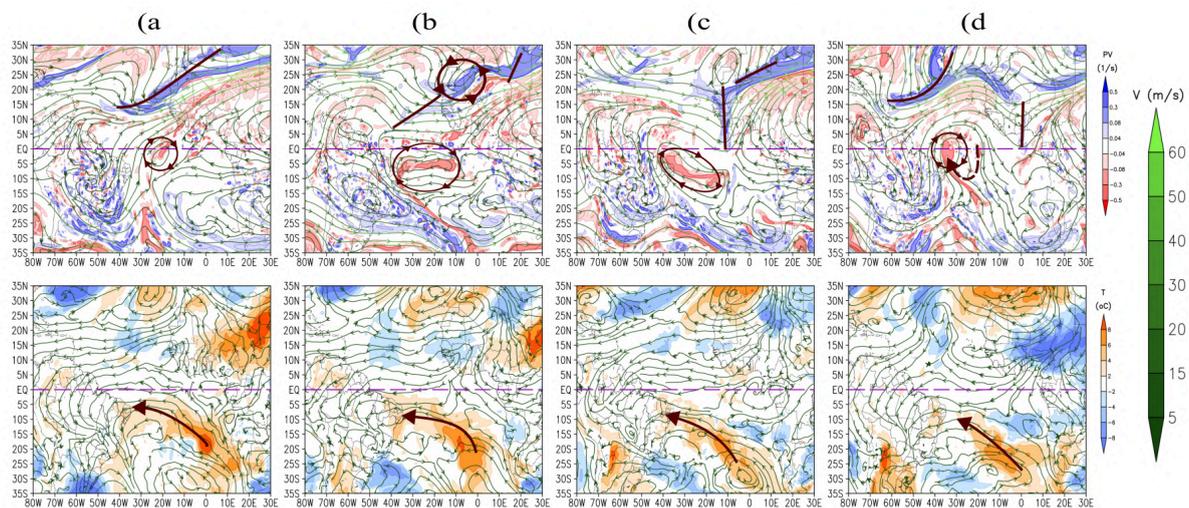


Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Após a regeneração, entre os dias 27 de janeiro e 02 de fevereiro (figuras 20 e 21 - a e b), o vórtice com circulação ciclônica apresentou um formato achatado com aparência de duas circulações distintas. A circulação na vanguarda (leste) do vórtice se deslocou para sul, dissipando ao se aproximar de um sistema frontal do HS, enquanto a circulação na retaguarda do vórtice (oeste) se deslocou para norte formando um novo centro mais

homogêneo acima da linha do Equador (entre 40°W e 20°W). Novamente foram observadas invasões de dois cavados do hemisfério Norte, na Vanguarda e Retaguarda do Vórtice, e a presença de um cavado frontal do Hemisfério Sul na retaguarda do vórtice.

Figura 21 - Processo de deslocamento do Vórtice Ciclônico em Altos Níveis do Hemisfério Sul formado entre dois cavados frontais do Hemisfério Norte a partir dos campos sinóticos às 0Z dos dias 26 (a), 28 (b), 30 (c) de janeiro e 1 (d) fevereiro de 2013. Campos utilizados: Vorticidade potencial em 250 hPa (em cima), anomalia da temperatura do ar em 850 hPa (em baixo) e linhas de corrente e magnitude do vento (em ambos os níveis). Círculo azul com setas: Sistemas com circulação anti-horária em altos níveis; Círculo vermelho com setas: Vórtice Ciclônico em Altos Níveis; Linhas vermelhas: Cavados em Altos Níveis; Seta tracejada: Deslocamento dos sistemas. Setas preenchidas: deslocamento da massa de ar.



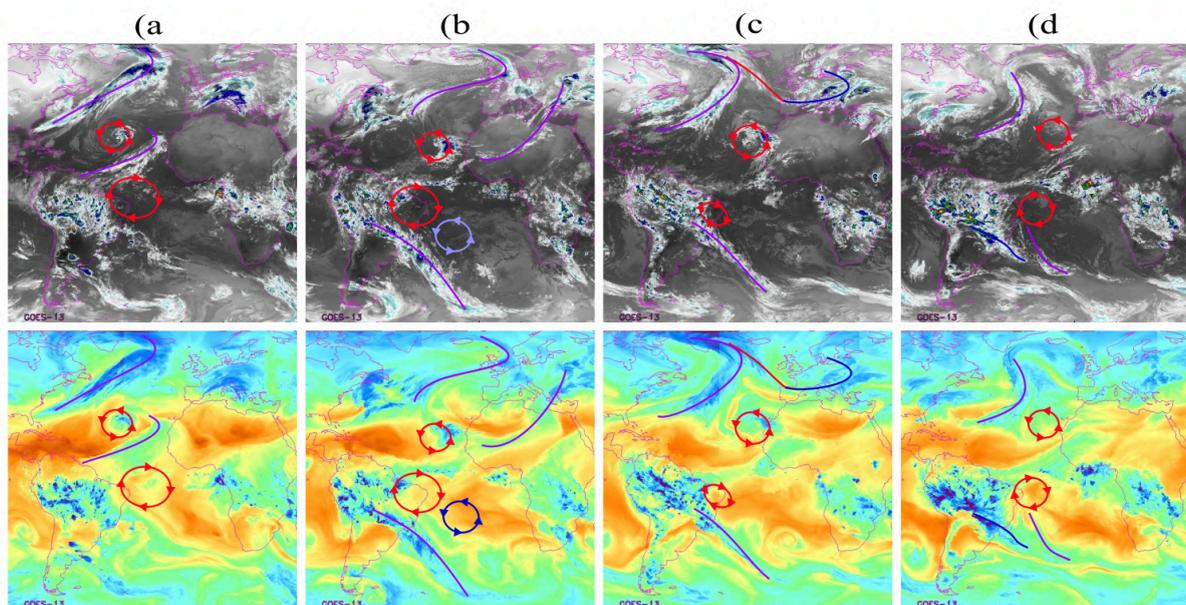
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

O vórtice com circulação ciclônica formado no dia 2 de fevereiro, deslocou-se novamente para Sul, atingindo o Nordeste do Brasil (NEB) durante o deslocamento para leste dos cavados em sua retaguarda. O sistema permaneceu sobre o Atlântico Sul entre os dias 4 e 15 de fevereiro, apresentando as características de um VCAN convencional. Durante este período o sistema apresentou deslocamento para leste quando acoplado à sistemas frontais do Hemisfério Sul e para oeste quando houveram invasões de cavados frontais do Hemisfério Norte.

O sistema dissipou novamente sobre o estado da Bahia, no dia 15 de fevereiro, após a formação de um vórtice com circulação anti-horária originado na extremidade de um cavado frontal do Hemisfério Norte. Novos VCANs foram formados a partir da região de dissipação destes sistemas pelo restante do verão

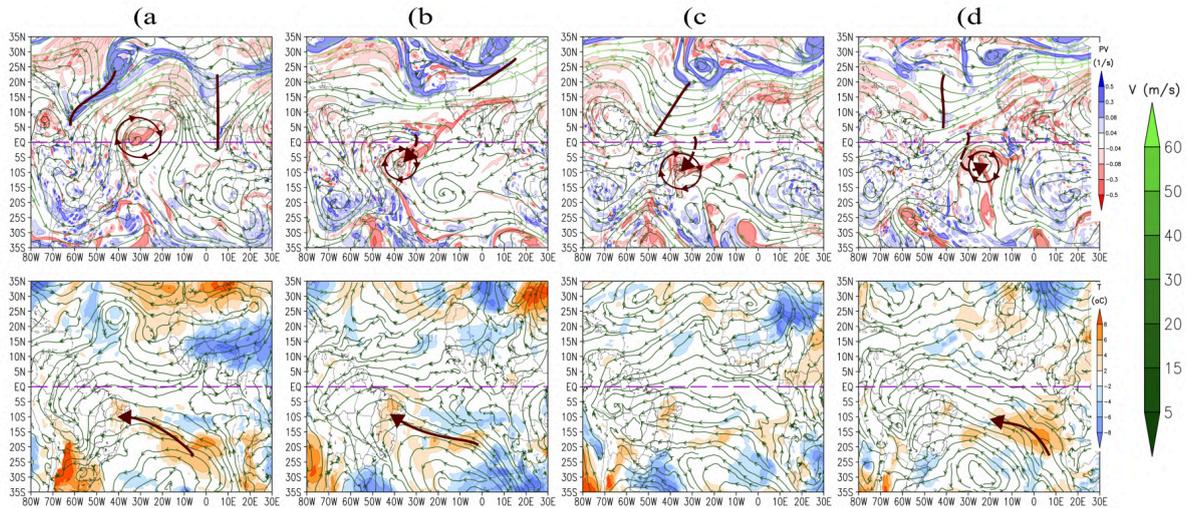
O posicionamento do VCAN na região entre 30°W e 20°W propiciou a invasão de sistemas frontais do Hemisfério Sul sobre o NEB, favorecendo aumentos na temperatura e formação de nuvens convectivas sobre o Sertão. As demais regiões do NEB foram atingidas quando o VCAN assumiu posições a sul de 10°S na mesma longitude.

Figura 22 - Processo de regeneração do Vórtice Ciclônico em Altos Níveis do Hemisfério Sul formado entre dois cavados frontais do Hemisfério Norte a partir de imagens de satélite às 0Z dos dias 2 (a), 4 (b), 6 (c) e 8 (d) de fevereiro de 2013. Campos utilizados: Imagens de satélite (Knapp, K. R. et al, 2011) nos canais do Infravermelho (em cima) e Vapor d'água realçado (em baixo). Círculo vermelho com setas: Vórtice Ciclônico em Altos Níveis; Linhas azuis: Frentes frias; Linhas roxas: Frente oclusa; Linhas vermelhas: Frentes quentes.



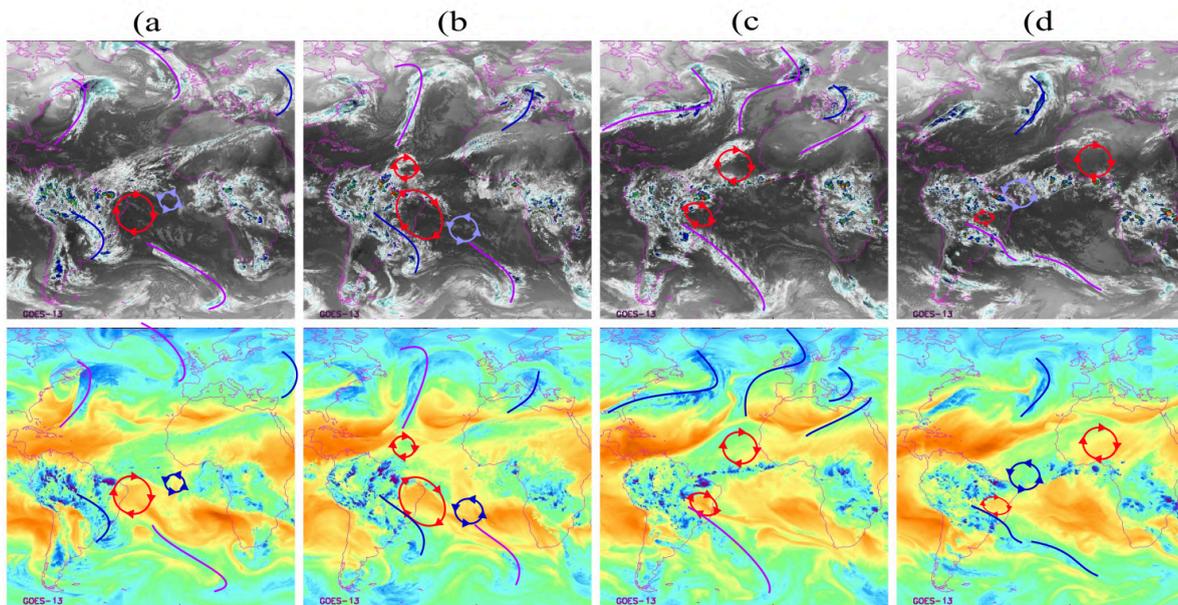
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Figura 23 - Processo de regeneração do Vórtice Ciclônico em Altos Níveis do Hemisfério Sul formado entre dois cavados frontais do Hemisfério Norte a partir dos campos sinóticos às 0Z dos dias 2 (a), 4 (b), 6 (c) e 8 (d) de fevereiro de 2013. Campos utilizados: Vorticidade potencial em 250 hPa (em cima), anomalia da temperatura do ar em 850 hPa (em baixo) e linhas de corrente e magnitude do vento (em ambos os níveis). Círculo vermelho com setas: Vórtice Ciclônico em Altos Níveis; Linhas vermelhas: Cavados em Altos Níveis; Seta tracejada: Deslocamento dos sistemas; Setas preenchidas: deslocamento da massa de ar.



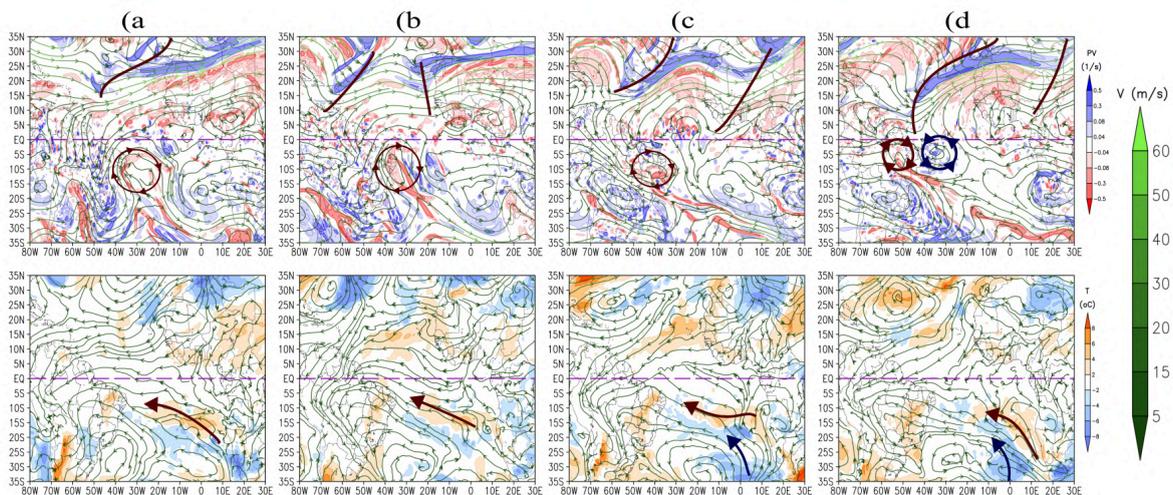
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Figura 24 - Processo de dissipação do Vórtice Ciclônico em Altos Níveis do Hemisfério Sul formado entre dois cavados frontais do Hemisfério Norte a partir de imagens de satélite às 0Z dos dias 10(a), 12(b), 14(c) e 16(d) de fevereiro de 2013. Campos utilizados: Imagens de satélite (Knapp, K. R. et al, 2011) nos canais do Infravermelho (em cima) e Vapor d'água realçado (em baixo). Círculo vermelho com setas: Vórtice Ciclônico em Altos Níveis; Linhas azuis: Frentes frias; Linhas roxas: Frente oclusa; Linhas vermelhas: Frentes quentes.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Figura 25 - Processo de dissipação do Vórtice Ciclônico em Altos Níveis do Hemisfério Sul formado entre dois cavados frontais do Hemisfério Norte a partir dos campos sinóticos às 0Z dos dias 10(a), 12(b), 14(c) e 16(d) de fevereiro de 2013. Campos utilizados: Vorticidade potencial em 250 hPa (em cima), anomalia da temperatura do ar em 850 hPa (em baixo) e linhas de corrente e magnitude do vento (em ambos os níveis). Círculo azul com setas: Sistemas com circulação anti-horária em altos níveis; Círculo vermelho com setas: Vórtice Ciclônico em Altos Níveis; Linhas vermelhas: Cavados em Altos Níveis; Seta tracejada: Deslocamento dos sistemas. Setas preenchidas: deslocamento da massa de ar.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Durante os processos de regeneração e deslocamento zonal do VCAN não foram observados eventos significativos de precipitação sobre o NEB, porém houve diversos episódios de aquecimento em toda a Costa Leste do Brasil no nível 850 hPa. Estes episódios de aquecimento estavam associados principalmente a fluxos zonais com origem na costa oeste da África (a norte de 15°S) e bloqueios na passagem de sistemas frontais do Hemisfério Sul abaixo da circulação central do VCAN.

A análise das mensagens do código METAR indicou a presença dos seguintes sistemas sobre as capitais dos estados no Nordeste do Brasil:

Aracaju - SE: Evento de rajada de vento com 22 kt durante o acoplamento entre o VCAN e o centro de circulação anti-horária em altos níveis no dia 15 de fevereiro. A formação de torres de cumulus foi observada quando a cidade se encontrava sob o centro em deslocamento e setor Sul do VCAN nos dias 6, 13, 14 e 15 de fevereiro.

Fortaleza – CE: Precipitação e trovoadas associadas à Cb no dia 15 de fevereiro, durante o acoplamento entre o VCAN e o centro de circulação anti-horária em altos níveis. A formação de torres de cumulus foi observada quando a cidade se encontrava sob os setores Oeste e Norte do VCAN nos dias 24 de janeiro, 14 e 15 e 17 de fevereiro.

João Pessoa – PB: Rajada de vento com 28 kt no dia 10 de fevereiro, pouco antes do centro do VCAN se deslocar sobre a cidade a partir do leste.

Maceió – AL: Rajadas de vento nos dias 20 (26 kt), 29 (24 kt) e 31 (22 kt) de janeiro e 5 (22 kt), e 16 (24 kt) de fevereiro, nos dias de aproximação e afastamento da periferia do VCAN sobre a cidade. Ocorrências de chuva associada à névoa úmida nos dias 1, 4, 8 e 9 de fevereiro, quando a cidade se encontrava sob os setores Sul e Oeste do VCAN.

Natal – RN: Ocorrência de precipitação e trovoadas associada à Cb logo após a dissipação do centro com anti-horária em altos níveis nos dias 17 e 18 de fevereiro.

Recife – PE: Formação de torres de cúmulos nos dias 3, 5, 8 e 18 de fevereiro, quando a cidade estava sob a periferia da região central do VCAN.

São Luiz – MA: Precipitação e trovoadas associadas à Cb nos dias 2, 9, 10, 12, 13, 14 e 18 de fevereiro, quando a cidade estava sob a influência de correntes de confluência em altos níveis nos setores Sul, Oeste e Norte do VCAN. Ocorrência de uma rajada de vento com 25 kt no dia 11 de fevereiro, quando a cidade estava sob a região de transição entre o setor oeste e central do VCAN.

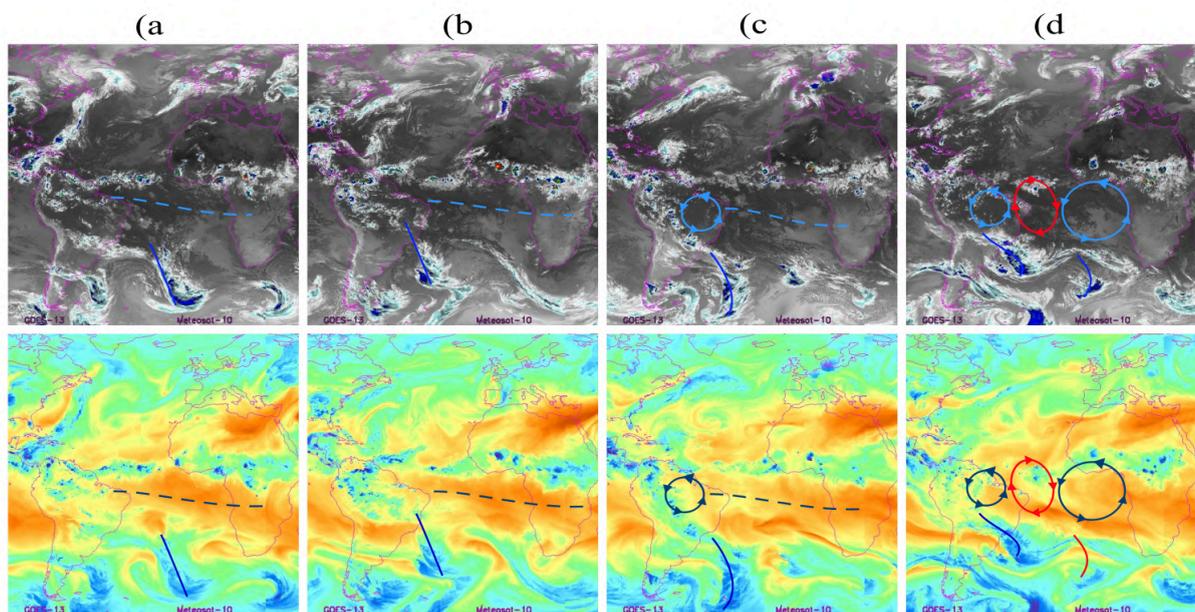
Salvador – BA: Precipitação e trovoadas associadas à Cb nos dias 21 e 22 de janeiro, quando a cidade estava na região de confluência entre a periferia de um sistema frontal e setor oeste do VCAN. A presença de uma crista meridional entre os dois sistemas também foi observada no nível 250 hPa. A formação de torres de cumulus foi observada enquanto a cidade estava sob os setores Oeste e Sul do VCAN.

Teresina – PI: Precipitação e trovoadas associadas à Cb nos dias 24 de janeiro, quando estava sob a periferia da região de acoplamento entre Cavados frontais de ambos os Hemisférios e a ZCIT, 9 de fevereiro, quando estava sob uma crista em altos níveis no setor oeste do VCAN, e entre os dias 12 e 18 de fevereiro, quando estava sob a periferia dos setores oeste e norte do VCAN. A formação de algumas torres de cumulus foi observada entre os dias 6 e 18 de fevereiro.

4.2.4 - Formação de VCAN associada a anticiclones em altos níveis em junho de 2013

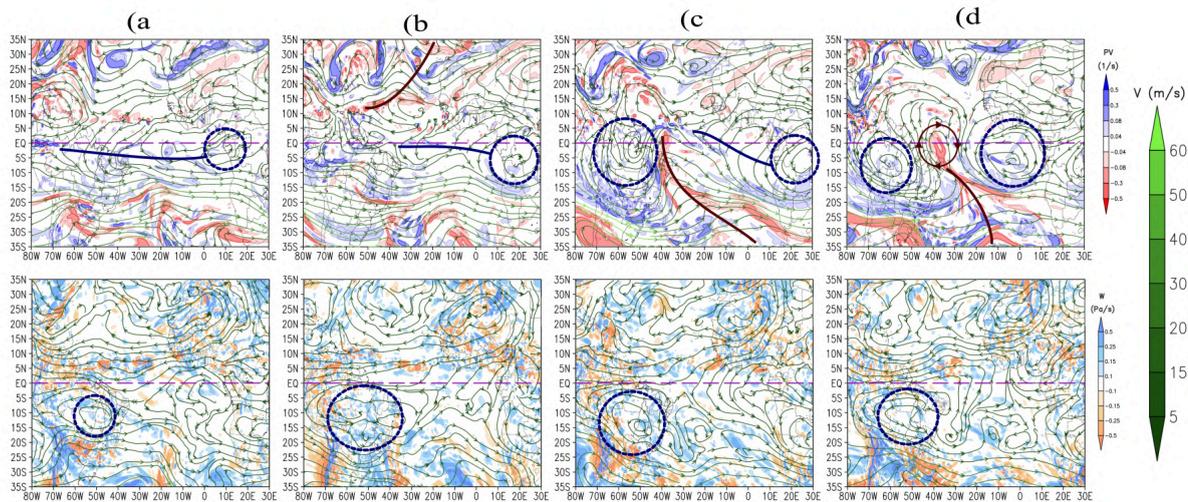
O início do processo ocorreu entre os dias 16 e 20 de junho de 2013 (figura 26), com a passagem de um sistema frontal do Pacífico Sul para o Atlântico Sul. A invasão do cavado frontal sobre o Brasil iniciou um processo ciclogênético na periferia do estado de Minas Gerais (entre 25°S, 15°S e 50°W, 40°W), intensificando a vorticidade em altos níveis sobre toda a costa leste do Brasil.

Figura 26 - Processo de formação do vórtice com circulação horária em altos níveis entre dois anticiclones em altos níveis do Hemisfério Sul a partir de imagens de satélite às 0Z dos dias 16 (a), 18 (b), 20 (c) e 22 (d) de junho de 2013. Campos utilizados: Imagens de satélite (Knapp, K. R. et al, 2011) nos canais do Infravermelho (em cima) e Vapor d'água realçado (em baixo). Círculo azul com setas: Sistemas com circulação anti-horária em altos níveis; Círculo vermelho com setas: Vórtice Ciclônico em Altos Níveis; Linhas azuis: Frentes frias; Linha azul tracejada: Crista Zonal em Altos níveis.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Figura 27 - Processo de formação do vórtice com circulação horária em altos níveis entre dois anticiclones em altos níveis do Hemisfério Sul a partir dos campos sinóticos às 0Z dos dias 16 (a), 18 (b), 20 (c) e 22 (d) de junho de 2013. Campos utilizados: Vorticidade potencial em 250 hPa (em cima), velocidade vertical em 500 hPa (em baixo) e linhas de corrente e magnitude do vento (em ambos os níveis). Círculo azul tracejado: Sistemas com circulação anti-horária em altos níveis; Círculo vermelho com setas: Vórtice Ciclônico em Altos Níveis; Linhas azuis: Crista Zonal em Altos níveis; Linhas vermelhas: Cavados em Altos Níveis.



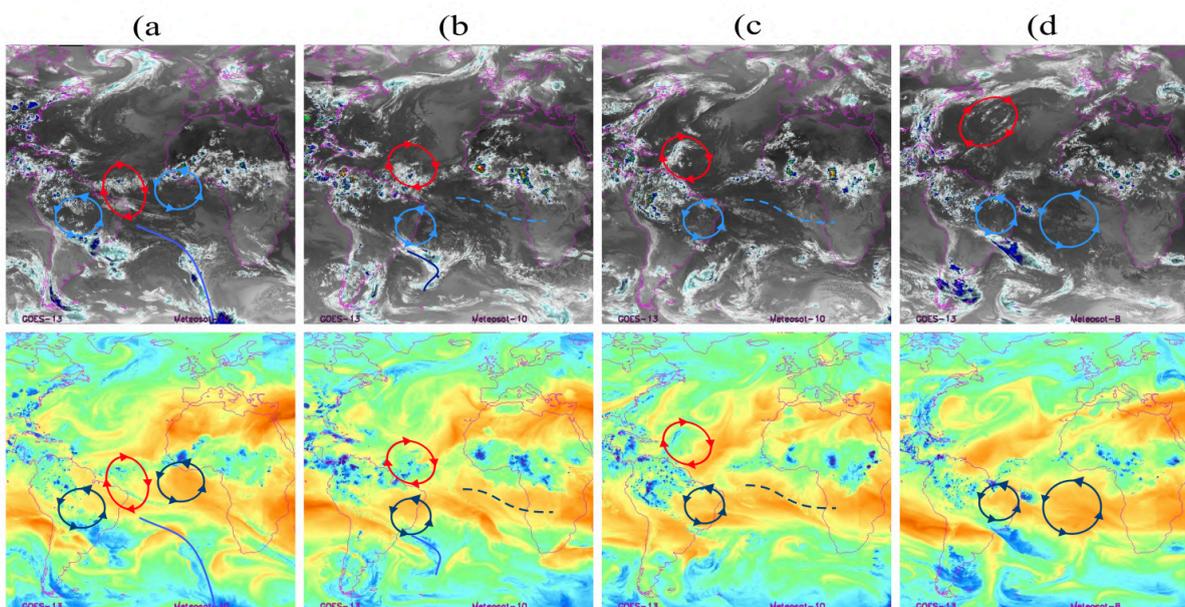
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Durante o processo, um vórtice com circulação anti-horária formado na extremidade da crista zonal entre a costa oeste da África e o Nordeste do Brasil (entre 10°S, 0°S e 40°W, 30°W) invadiu o Atlântico Norte. Após a invasão entre os dias 17 e 18 (figuras 26 e 27), o vórtice passou a se deslocar para oeste, formando uma crista meridional intensa no nível 250 hPa sobre a região central do Brasil (entre 20°S, 5°N e 70°W, 50°W) ao se acoplar a outro anticiclone originado no Pacífico Sul. A crista formada por estes sistemas intensificou a vorticidade potencial sobre o cavado do Hemisfério Sul, aumentando sua invasão para Norte e deslocando seu eixo para leste. O processo ciclogênético foi interrompido durante a intensificação da crista.

Entre os dias 19 e 21 de junho (figuras 26 e 27), o vórtice com circulação anti-horária no Hemisfério Norte (HN) deslocou-se novamente para o Hemisfério Sul (HS), adquirindo características similares à Alta da Bolívia e intensificando o cavado em altos níveis sobre a costa leste do Brasil. O acoplamento de um novo ciclone ao cavado em altos níveis foi observado no dia 20.

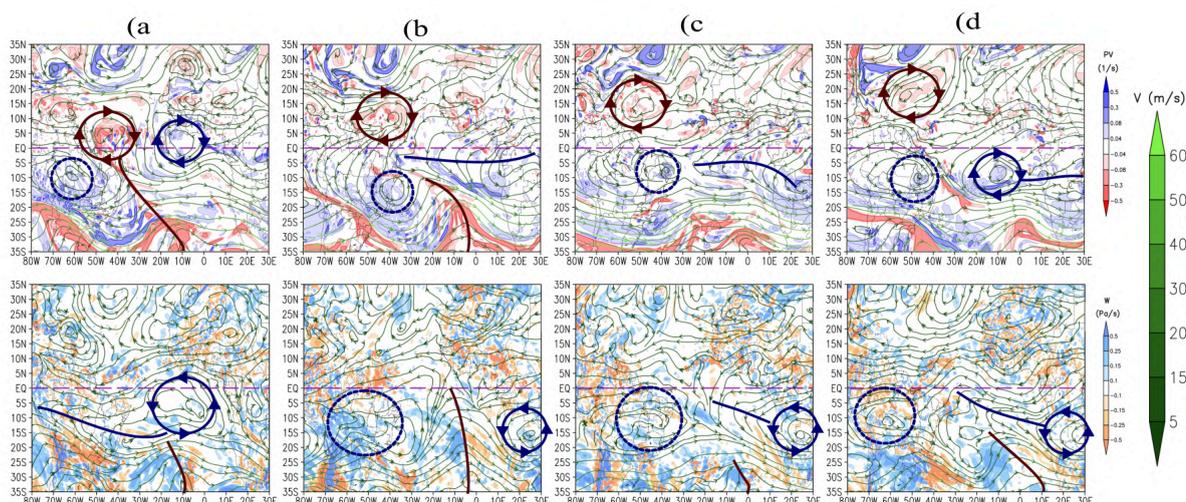
Durante o processo também houve a intensificação da crista zonal entre a costa oeste da África e o Nordeste do Brasil (NEB). A crista se desenvolveu em um centro fechado com circulação anti-horária no nível 250 hPa, entre os dias 21 e 22 de junho (figuras 26 e 27), rompendo o acoplamento entre a extremidade do cavado meridional no Hemisfério Sul e o cavado frontal de um ciclone na periferia da Corrente de Jato Subtropical do Hemisfério Sul (CJP-HS).

Figura 28 - Processo de dissipação do vórtice com circulação horária em altos níveis entre dois anticiclones em altos níveis do Hemisfério Sul a partir de imagens de satélite às 0Z dos dias 26 (a), 28 (b), 30 (c) de junho e 2 (d) julho de 2013. Campos utilizados: Imagens de satélite (Knapp, K. R. et al, 2011) nos canais do Infravermelho (em cima) e Vapor d'água realçado (em baixo). Círculo azul com setas: Sistemas com circulação anti-horária em altos níveis; Círculo vermelho com setas: Centro com circulação horária em Altos Níveis; Linhas azuis: Frentes frias; Linha azul tracejada: Crista Zonal em Altos níveis.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Figura 29 - Processo de dissipação do vórtice com circulação horária em altos níveis entre dois anticiclones em altos níveis do Hemisfério Sul a partir dos campos sinóticos às 0Z dos dias 26 (a), 28 (b), 30 (c) de junho e 2 (d) julho de 2013. Campos utilizados: Vorticidade potencial em 250 hPa (em cima), velocidade vertical em 500 hPa (em baixo) e linhas de corrente e magnitude do vento (em ambos os níveis). Círculo azul com setas: Sistemas com circulação anti-horária em altos níveis; Círculo vermelho com setas: Centro com circulação horária em Altos Níveis; Linhas azuis: cristas em altos níveis; Linhas vermelha: cavados em altos níveis.



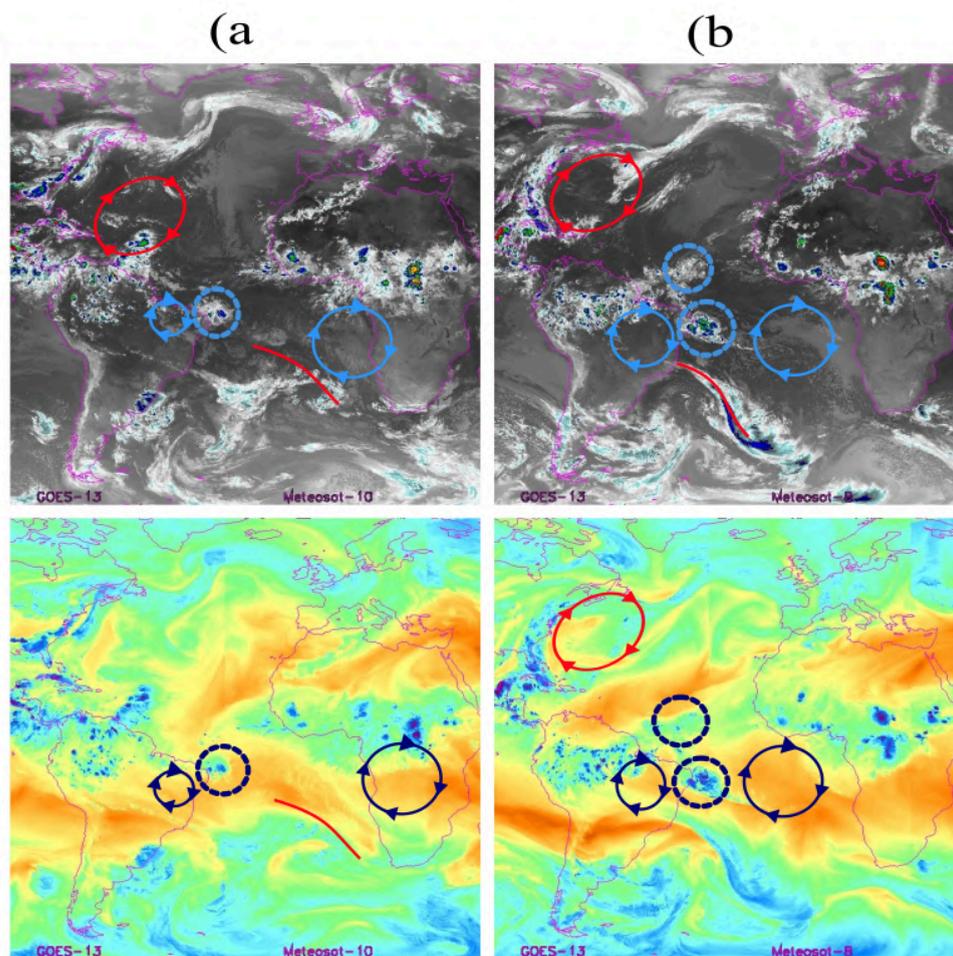
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

A extremidade do cavado entre os dois anticiclones apresentou circulação fechada e horária em 250 hPa, sobre a costa norte do NEB (entre 5°S, 5°N e 40°W, 20°W) entre os dias 23 junho e 5 de julho (figuras 28 e 29), indicando um processo similar à formação de VCAN clássica. Durante esse processo foi observado o aumento da temperatura sobre o NEB em 850 hPa. A presença de nuvens estratiformes e de pequenos centros convectivos também foi observada na região de convergência entre os dois anticiclones.

O vórtice com circulação horária deslocou-se para Noroeste em conjunto com o anticiclone em sua retaguarda (leste) atravessando totalmente para o Hemisfério Norte no dia 26 de junho (figuras 28 e 29). Durante o processo de invasão foi observada a formação de nuvens convectivas e alteração na circulação da ZCIT na periferia do vórtice com circulação horária em 250 hPa.

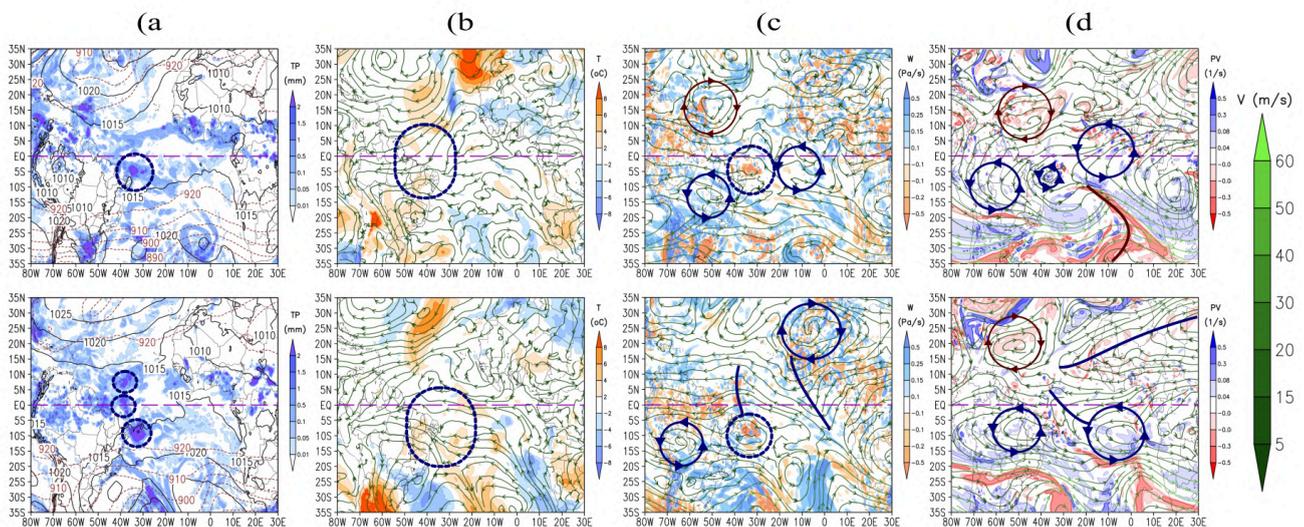
O vórtice com circulação Horária se desacoplou totalmente do cavado no Hemisfério Sul entre os dias 28 e 29 de junho de 2013 (figuras 30 e 31), deslocando-se para norte até sua dissipação no dia 5 de junho. Durante o processo houve novamente a formação da crista zonal entre a costa oeste da África e o NEB, ocorrendo o deslocamento do anticiclone similar à Alta da Bolívia para a Região (entre 10°S, 0°S e 40°W, 30°W). A formação de uma célula convectiva com cerca de 3° de diâmetro foi observada na retaguarda do centro com circulação anticiclônica em 250 hPa.

Figura 30 - Células convectivas a partir de imagens de satélite às 0Z dos dias 29 (a) de junho e 3 (b) julho de 2013. Campos utilizados: Imagens de satélite (Knapp, K. R. et al, 2011) nos canais do Infravermelho (em cima) e Vapor d'água realçado (em baixo). Círculo azul com setas: Sistemas com circulação anti-horária em altos níveis; Círculo azul tracejado: Regiões com atividade convectiva; Círculo vermelho com setas: Centro com circulação horária em Altos Níveis; Linhas azuis: Frentes frias; Linha vermelha tracejada: vanguarda do sistema frontal.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Figura 31 - Células convectivas a partir dos campos sinóticos às 0Z dos dias 29 de junho (em cima) e 3 julho (embaixo) de 2013. Campos utilizados: Precipitação total, pressão ao nível médio do mar e espessura da camada geopotencial entre os níveis 1000 e 500 hPa, anomalia da temperatura do ar em 850 hPa (b), velocidade vertical no nível 500 hPa (c), vorticidade potencial em 250 hPa (d) e linhas de corrente e magnitude do vento (últimos três níveis). Círculo azul com setas: Sistemas com circulação anti-horária em altos níveis; Círculo azul tracejado: Regiões com atividade convectiva; Círculo vermelho com setas: Centro com circulação horária em Altos Níveis; Linhas azuis: cristas em altos níveis.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Outra célula convectiva de maiores proporções (cerca de 5° de diâmetro) foi observada sobre o NEB no dia 3 de julho (figuras 30 e 31). A formação do sistema ocorreu durante uma nova aproximação entre o centro com circulação anti Horária (anticiclone) sobre o NEB e a Crista Zonal sobre o Atlântico Sul. Diversos centros de Vorticidade Potencial positiva e negativa (250 hPa), convecção intensa (500 hPa) e um centro com circulação anticiclônica (500 hPa) ocorreram na região de convergência entre a crista zonal e o anticiclone no nível 250 hPa.

Durante o processo de formação do vórtice horário e do anticiclone sobre o NEB foram observados diversos dias com altas temperaturas e aquecimento no nível 850 hPa. O aquecimento ocorreu preferencialmente na região de convergência entre o anticiclone e a crista zonal sobre o Atlântico Sul. A formação de células convectivas e precipitação estratiforme também foi observada sobre a ZCIT e na periferia dos sistemas.

A análise das mensagens do código METAR indicou a presença dos seguintes sistemas sobre as capitais dos estados no Nordeste do Brasil:

Aracaju - SE: Névoa úmida e precipitação nos dias 17, 18, 19, 21, 25 e 29 de junho e dias 6, 9, 10 e 13 de julho, associados majoritariamente à presença de nuvens com características estratiformes formadas sobre o atlântico ou entre a extremidade de sistemas frontais do Hemisfério Sul e o setor sudoeste do centro com circulação anti-horária em altos níveis. A formação de algumas torres de cumulus foi observada quando a cidade se encontrava sob a região de difluência entre cavados ou VCANs do hemisfério sul e o setor sudoeste de centros com circulação anti-horária em altos níveis.

Fortaleza – CE: Névoa úmida e precipitação no dia 21 de junho, quando a cidade se encontrava sob a região de confluência entre o VCAN do hemisfério Sul e o setor sudeste do anticiclone identificado como a Alta da Bolívia. Rajada de vento de 27 KT no dia 10 de julho, logo após a dissipação do sistema com circulação anti-horária em altos níveis. A formação de algumas torres de Cumulus foi observada quando a cidade se encontrava sob a região de confluência entre cavados ou VCANs do hemisfério sul e o setor oeste de centros com circulação anti-horária em altos níveis.

João Pessoa – PB: Sem alterações significativas na ocorrência de fenômenos adversos.

Maceió – AL: Dezenove dias com Névoa úmida associada a precipitação entre 16 de junho e 16 de julho, enquanto a cidade estava sob a região de difluência entre cavados ou VCANs do Hemisfério Sul e o setor oeste de centros com circulação anti-horária em altos níveis. A formação de torres de cumulus foi identificada nos dias 27 junho e 11 e 13 de julho, quando a cidade se encontrava sob as mesmas condições descritas anteriormente. Eventos de variação na direção do vento nos dias 26 de junho e

3 e 11 de julho, ocorridos quando a cidade se encontrava sob a região de confluência entre o sistema com circulação anti-horária em altos níveis e a Alta da Bolívia.

Natal – RN: Névoa úmida e precipitação nos dias 22 de julho e 2, 3, 6, 7, 11 e 12 de julho quando a cidade se encontrava sob a região de confluência entre cavados ou VCANs do Hemisfério Sul e o setor oeste do centro com circulação anti-horária em altos níveis. A formação de torres de cumulus foi observada sob as mesmas condições descritas anteriormente.

Recife – PE: Névoa úmida e precipitação nos dias 21, 25, 26 e 28 de julho e 2, 4, 7, 9, 13 e 14 de julho quando a cidade se encontrava sob a região de difluência entre cavados ou VCANs do Hemisfério Sul e o setor oeste do centro com circulação anti-horária em altos níveis. A formação de torres de cumulus e de um evento de

4.3 - Centros com circulação anti-horária em altos níveis no Hemisfério Sul

4.3.1 - Contagem e resumo dos casos

Foram observados três processos de formação com diferentes distribuições espaciais, temporais e efeitos sobre a circulação dos sistemas meteorológicos no Nordeste do Brasil. Sendo eles:

4.3.1.1 - Formação a partir de uma crista zonal no Atlântico Sul associada a anticiclones barotrópicos no Sul da África.

Processo mais comum entre as observações, ocorreu majoritariamente durante o inverno austral (junho a setembro) entre 10°W e 30°E, com maior quantidade de casos observada no mês de agosto. Anticiclones em altos níveis formados nesta região deslocaram-se majoritariamente para a direção oeste/noroeste, muitas vezes atravessando da costa da África para o Nordeste do Brasil quando formados entre 10°S e 0°S.

A maior quantidade de anticiclones em altos níveis formados a partir deste processo foi observada durante o inverno austral (tabela 5), com um máximo de 33 casos ocorrendo no mês de agosto. Os meses com as menores quantidades de casos ocorreram entre o verão austral e outono austral devido ao deslocamento dos anticiclones na costa leste da África para latitudes abaixo de 20°S.

O processo de formação geralmente se inicia a partir do deslocamento de Anticiclones barotrópicos no Sul ou Norte da África para regiões mais próximas da costa Oeste do continente. durante o deslocamento foi observada a intensificação de uma crista zonal em altos níveis sobre o Atlântico entre 5°S e 20°S.

A aproximação de sistemas frontais do Hemisfério Sul na extremidade da crista zonal ocorre de forma simultânea ao aumento da temperatura e intensificação da convergência no campo de linhas de corrente no nível 850 hPa sobre a costa Oeste do continente Africano, deslocando o anticiclone barotrópico no Sul da África para leste e formando um novo anticiclone com centro entre os níveis 500 hPa e 250 hPa na extremidade da crista zonal.

Tabela 5 - Contagem e médias mensais da formação de centros com circulação anti-horária em altos níveis associados à extremidade de uma crista zonal em altos níveis sobre o atlântico Sul.

		2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020		TOTAL MENSAL	MÉDIA MENSAL
	JAN	1	1	3	2	2	2	1	1	2	2		17	1,70
	FEV	2	2	1	1	2	2	1	1	3	2		17	1,70
	MAR	2	2	2	1	2	1	3	2	3	2		20	2,00
	ABR	1	4	1	1	1	1	2	2	2	1		16	1,60
	MAI	1	1	2	1	3	2	1	1	1	2		15	1,50
	JUN	3	2	2	2	1	2	2	1	1	3		19	1,90
	JUL	3	3	4	2	1	2	4	2	3	5		29	2,90
	AGO	5	1	5	5	3	5	1	2	2	4		33	3,30
	SET	4	4	3	3	1	3	4	1	2	4		29	2,90
	OUT	2	3	3	1	4	2	2	3	3	2		25	2,50
	NOV	3	2	2	2	3	3	2	2	2	2		23	2,30
	DEZ	2	3	1	2	2	3	1	3	2	4		23	2,30
TOTAL ANUAL		28	27	26	21	23	26	23	20	24	31		TOTAL	MÉDIA
													249	24,90

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Após a formação dos centros fechados no campo de linhas de corrente, o anticiclone em altos e médios níveis passa a se deslocar na extremidade do cavado frontal, apresentando movimentação de sudeste para noroeste. Massas de ar quente em 850 hPa e nuvens de topo quente podem ser observadas na retaguarda do sistema enquanto se desloca da costa Oeste da África para o Nordeste do Brasil.

A chegada do anticiclone no NEB ocorre aproximadamente entre 3 a 5 dias após a sua formação e frequentemente dá-se para regiões com maiores temperaturas no nível 850 hPa. Em alguns casos, a chegada do anticiclone na costa do NEB ocorreu de forma simultânea ao deslocamento da alta da Bolívia para a região, formando um novo anticiclone barotrópico sobre as regiões com maiores temperaturas em baixos níveis.

O processo de deslocamento e permanência destes sistemas normalmente está associado a condições de bom tempo sobre o NEB, com precipitações fracas com características estratiformes sendo observadas na região de confluência entre os anticiclones em altos níveis e a Alta da Bolívia ou após sua dissipação. O acoplamento a anticiclones baroclínicos foi observado durante a passagem dos anticiclones em altos níveis sobre a costa leste do Brasil.

4.3.1.2 - Formação a partir de perturbações ou anticiclones com deslocamento zonal entre o Oceano Pacífico e a América do Sul.

A formação a partir de anticiclones ou perturbações originadas no pacífico sul foi observada com maior frequência entre maio e setembro, com alguns eventos raros sendo registrados durante o verão austral. Anticiclones formados sobre estas condições apresentaram deslocamento majoritariamente zonal, com direção de noroeste para sudeste. Processos similares foram observados em alguns eventos durante a dissipação da Alta da Bolívia ou formação de anticiclones baroclínicos nas regiões Centro-Oeste e Sudeste do Brasil.

A maior quantidade de anticiclones em altos níveis formados a partir deste processo foi observada durante entre o outono austral e inverno austral (Tabela 6), com um máximo de 18 casos no mês de junho. Os meses com as menores quantidades de casos ocorreram entre o verão austral e outono austral devido a presença da circulação da alta da Bolívia e menor extensão latitudinal dos cavados em altos níveis do Hemisfério Sul.

Tabela 6 - Contagem e médias mensais da formação de centros com circulação anti-horária em altos níveis originados no Oceano Pacífico.

		2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020		TOTAL MENSAL	MÉDIA MENSAL
	JAN	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0		1	0,10
	FEV	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0		2	0,20
	MAR	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0		1	0,10
	ABR	0	2	1	0	1	1	0	1	0	0		6	0,60
	MAI	1	2	2	2	1	1	3	1	2	2		17	1,70
	JUN	3	1	2	2	1	2	1	2	2	2		18	1,80
	JUL	0	2	1	2	2	3	1	2	3	1		17	1,70
	AGO	1	2	2	1	2	1	1	2	1	0		13	1,30
	SET	2	1	2	3	1	1	0	0	1	2		13	1,30
	OUT	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0		4	0,40
	NOV	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0		4	0,40
	DEZ	1	0	0	1	1	0	0	0	0	1		4	0,40
TOTAL ANUAL		10	10	11	14	11	12	6	8	9	8		TOTAL	MÉDIA
													99	9,90

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

O processo de formação inicia-se após a passagem de anticiclones na retaguarda de cavados frontais do pacífico Norte ou Sul para o Norte da América do Sul, onde foram observadas regenerações ou formações de anticiclones barotrópicos nas regiões Norte e Nordeste do Brasil. Anticiclones formados sobre estas condições frequentemente

permaneceram como anticiclones barotrópicos similares à Alta da Bolívia por um período entre 3 e 5 dias.

O início do movimento destes anticiclones para a direção sudeste foi observado durante a passagem de sistemas frontais profundos do Hemisfério Sul, onde ocorreram aumentos na temperatura em 850 hPa sobre os estados na costa leste do Brasil e dissipação da convergência no campo de linhas de corrente abaixo do centro do anticiclone no nível 850 hPa.

Durante este processo também foi observada intensificação na nebulosidade, precipitação total e ômega nas regiões de convergência entre o centro do anticiclone e outros sistemas próximos como a Zona de Convergência Intertropical, Sistemas Frontais do Hemisfério Sul e outros anticiclones formados a partir da crista zonal na costa oeste da África.

A dissipação desses sistemas frequentemente ocorreu durante a aproximação de outros anticiclones formados a partir de um dos processos anteriormente descritos (4.3.1.1 e 4.3.1.2). A formação da Corrente de Jato do Nordeste do Brasil foi observada nas regiões de convergência entre os centros fechados dos dois anticiclones no campo de linhas de corrente. Também foram observadas maiores invasões de extremidades frontais do Hemisfério Sul e formação de nuvens estratiformes sobre a costa leste do Nordeste do Brasil. Em alguns processos também foram observadas formações de Vórtices Ciclônicos em Altos Níveis a partir da separação da extremidade de cavados frontais do Hemisfério Sul posicionados entre os dois anticiclones.

O fim do processo foi observado após a união entre os centros fechados dos dois anticiclones no nível 250 hPa. O anticiclone resultante da união entre os dois centros apresentou dissipação no nível 250 hPa após um ou três dias de sua formação, com permanência de centros fechados com deslocamento para oeste no nível 500 hPa. Em alguns casos, observou-se a formação de nuvens convectivas e precipitação intensa a oeste dos sistemas durante ou no dia seguinte à sua dissipação.

4.3.1.3 - Formação a partir da extremidade de cavados do Hemisfério Norte com invasões no Hemisfério Sul.

A formação a partir de cavados em altos níveis do Hemisfério Norte é o processo mais comum entre o fim da primavera austral e início do outono austral (novembro a abril). Este processo ocorre com menor frequência entre maio e outubro devido à formação de cistas zonais e pequenos centros com circulação anti-horária sobre a região tropical do Atlântico, que dificultam a invasão de cavados frontais do Atlântico Norte para o Atlântico Sul.

A maior quantidade de anticiclones em altos níveis formados a partir deste processo foi observada entre novembro e março (tabela 7), com um máximo de 22 casos no mês de fevereiro. Os meses com as menores quantidades de casos foram julho e setembro.

Tabela 7 - Contagem e médias mensais da formação de centros com circulação anti-horária em altos níveis associados à invasão de Cavados em Altos Níveis do Hemisfério Norte

ORIGEM - HEMISFÉRIO NORTE													TOTAL MENSAL	MÉDIA MENSAL
		2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020			
	JAN	2	2	1	2	2	0	2	0	0	2		13	1,30
	FEV	3	2	3	3	3	2	2	1	2	1		22	2,20
	MAR	0	4	4	1	2	1	3	3	2	2		22	2,20
	ABR	2	1	3	2	1	1	1	2	0	0		13	1,30
	MAI	3	3	1	1	2	1	1	2	1	2		17	1,70
	JUN	1	0	2	2	3	2	1	1	2	2		16	1,60
	JUL	2	2	0	0	1	1	1	1	0	1		9	0,90
	AGO	0	0	4	0	3	0	0	1	2	1		11	1,10
	SET	1	0	2	2	1	0	0	0	1	1		8	0,80
	OUT	2	3	2	1	4	2	2	1	0	2		19	1,90
	NOV	4	3	3	2	2	3	2	2	2	2		25	2,50
	DEZ	2	3	1	1	2	4	2	3	1	2		21	2,10
TOTAL ANUAL		20	21	25	15	24	17	15	17	13	16		TOTAL	MÉDIA
													183	18,30

Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Processos de formação de centros com circulação anti-horária em altos níveis na periferia de ciclones e tempestades tropicais posicionados entre 15°N e 0°N foram observados durante os meses do inverno austral. A formação a partir de cristas de

anticiclones em altos níveis do Hemisfério Sul com invasão sobre o Hemisfério Norte também foi observada em alguns casos.

Centros com circulação Anti-horária em altos níveis formados a partir de cavados em altos níveis do Hemisfério Norte possuem trajetória mais errática quando comparada a anticiclones formados a partir de outros processos, com a constante mais evidente sendo o deslocamento para a direção Sul, que ocorre preferencialmente no setor leste de VCANs ou setor oeste cavados frontais do Hemisfério Sul.

O processo de formação se inicia através da separação da extremidade de cavados do Hemisfério Norte com invasões abaixo de 5°N e formação de um centro fechado com circulação anti-horária sobre o atlântico Sul, que normalmente ocorre em conjunto com a formação de Vórtices Ciclônicos em Altos Níveis (VCAN) a oeste destes sistemas. O enfraquecimento da crista do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul, no campo de pressão ao nível médio do mar, e intensificação de cavados no campo de espessura da camada 1000 - 500 hPa também podem ser observados durante o início desse processo.

Após a formação do centro fechado no nível 250 hPa é observado o início do deslocamento do sistema, que pode ocorrer diretamente para sul caso não haja a presença de outros sistemas em altos níveis, ou para sudoeste caso haja acoplamento com a retaguarda de VCANs. A presença de Sistemas Frontais do Hemisfério Sul também influencia na trajetória dos centros com circulação anti-horária em altos níveis, que se mantém próximo ao setor oeste de extremidades frontais durante todo o processo.

A dissipação destes sistemas normalmente ocorre de três formas distintas, relacionadas ao tipo de deslocamento observado. Sendo elas:

- Dissipação devido à união com anticiclones barotrópicos na costa Oeste da África - Normalmente ocorre devido à formação entre 20°W e 10°E, quando os centros com circulação anti-horária em altos níveis se movimentam majoritariamente para sudeste. O transporte de massas de ar quente no nível 850 hPa foi observado entre a costa oeste da África e o Nordeste do Brasil após o fim deste processo;
- Dissipação após a chegada em regiões continentais - Normalmente ocorre devido ao deslocamento para sudoeste, quando há presença de VCANs ou sistemas frontais do hemisfério Sul na vanguarda dos centros com circulação

anti-horária em altos níveis. Precipitações convectivas e estratiformes foram observadas, respectivamente, na vanguarda e retaguarda de VCANs deslocados para oeste durante este processo;

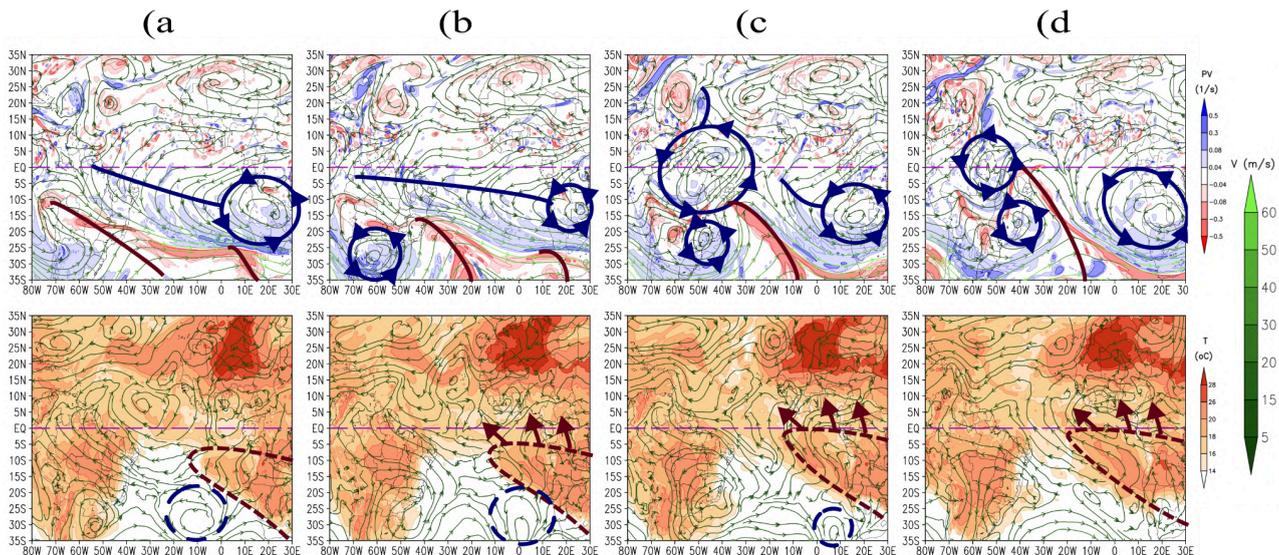
- Dissipação após ultrapassar 15°S - Normalmente ocorre após se aproximar dos centros fechados de ciclones baroclínicos no Atlântico Sul. Formações, Intensificações e Regenerações de Ciclones baroclínicos foram observadas entre o Sul do Brasil e Norte da Argentina durante este processo. Este processo também foi observado entre os dias 21 e 24 de março de 2004, pouco antes da formação do ciclone Catarina (Gan, 2009).

4.3.2 - Formação de Anticiclones em Altos Níveis a partir de uma crista zonal sobre o Atlântico Sul em agosto de 2014

O início do processo ocorreu entre os dias 20 e 25 de agosto de 2014 (figura 32 - a) com a invasão de um cavado frontal do Hemisfério Sul sobre uma crista zonal localizada entre o oeste da África e o Nordeste do Brasil (NEB) (50°W, 20°E ; 15°S, 0°N).

A presença de um centro com circulação anticiclônica entre os níveis 500 e 250 hPa sobre o Sul da África (20°E, 15°S) foi identificada no dia 20 de agosto (figura 32 - b). Este sistema foi classificado como um anticiclone barotrópico de núcleo quente devido à presença de convergência nas linhas de corrente e altas temperaturas abaixo do centro no nível 850 hPa. Outro centro de circulação anticiclônica estava presente no nível 500 hPa, logo abaixo da crista zonal (10°W, 0°E ; 15°S, 5°S). Este sistema permaneceu na região até o dia 25 de agosto, dissipando pouco antes da formação do anticiclone em altos níveis.

Figura 32 - Processo de formação do anticiclone em altos níveis a partir de uma Crista Zonal no Atlântico Sul nos campos sinóticos às 0Z dos dias 20 (a), 21 (b), 22 (c) 23 (d) de agosto de 2014. Campos utilizados: Vorticidade potencial em 250 hPa (em cima), temperatura em 850 hPa (em baixo) e linhas de corrente e magnitude do vento (em ambos os níveis). Círculo azul com setas: Sistemas com circulação anti-horária em altos níveis; Círculo azul tracejado: Anticiclones em baixos níveis; Linhas azuis: cristas; Linhas vermelha: cavados em altos níveis; Polígono vermelho com setas: massa de ar em deslocamento.



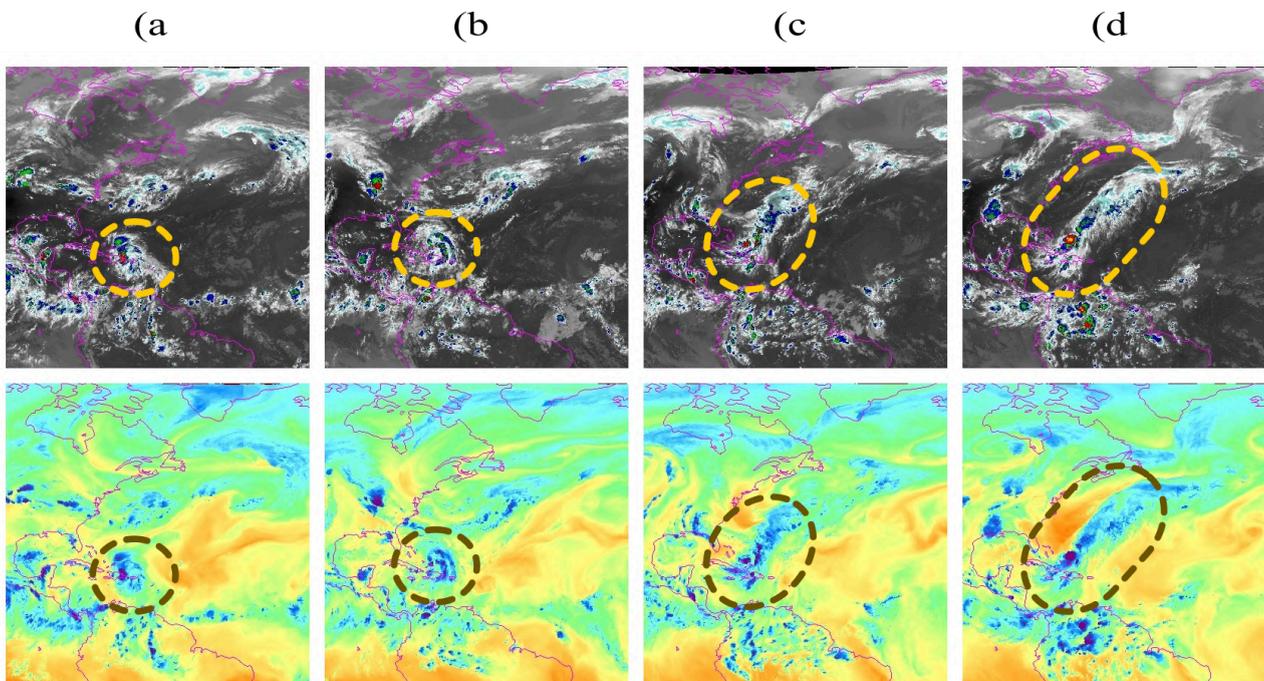
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Entre os dias 20 e 23 de agosto, um sistema frontal do hemisfério Sul atravessou o Atlântico, formando um cavado meridional em altos níveis que descontinuou a crista zonal sobre o Atlântico Sul. Um novo centro com circulação anti-horária formou-se na região equatorial no dia 22 de agosto, entre o cavado frontal e a extremidade da crista zonal que se encontrava sobre o NEB (50°W, 40°W ; 5°S, 5°N). Durante este processo também foi observada a formação de uma tempestade tropical do Hemisfério Norte no setor noroeste (80°W, 60°W ; 15°N, 25°N) do centro com circulação anti-horária em altos níveis e a formação de um centro com circulação horária a partir da extremidade do sistema frontal do Hemisfério Sul no setor sudeste (50°W, 30°W ; 5°S, 5°N).

Entre os dias 24 e 26 de agosto o centro com circulação anti-horária em altos níveis uniu-se à tempestade tropical formando um furacão, identificado pelos campos de linhas de corrente, espessura da camada 1000-500 hPa, precipitação total e vorticidade potencial. O furacão deslocou-se para noroeste, se intensificando e permanecendo visível

até o dia 29 de agosto, quando saiu da área de estudo. O sistema foi reportado pelo National Hurricane Center (NHC), com denominação de furacão Cristobal (AL042014) e classificado como furacão de categoria 1. A passagem do sistema causou precipitação intensa (276,86 mm/dia) em algumas ilhas do atlântico central, deixando cerca de 3,600 desabrigados no Haiti e causando danos a mais de 600 residências na República Dominicana (Pasch, 2015).

Figura 33 - Desenvolvimento da primeira tempestade tropical a partir de imagens de satélite às 0Z dos dias 23 (a), 24 (b), 25(c) e 26(d) agosto de 2014. Campos utilizados: Imagens de satélite (Knapp, K. R. et al, 2011) nos canais do Infravermelho (em cima) e Vapor d'água realçado (em baixo). Círculo amarelo: Localização da tempestade tropical.

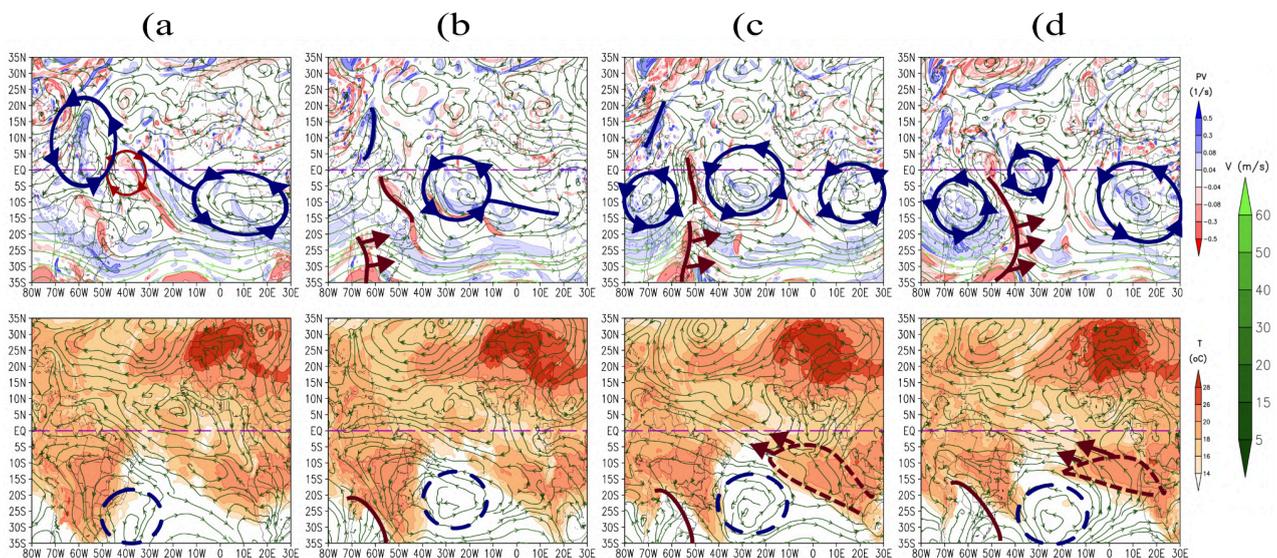


Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Um novo centro com circulação anticiclônica formou-se em 25 de agosto no nível 250 hPa a partir do processo de dissipação do anticiclone barotrópico sobre o Sul da África (40°W, 10°W ; 15°S, 0°S). A formação do sistema ocorreu após a passagem de um novo sistema frontal e o deslocamento de sistemas de alta pressão em baixos níveis sobre o Atlântico Sul. A presença de um anticiclone baroclínico de núcleo frio deslocado para Nordeste na vanguarda de um sistema frontal do Hemisfério sul foi observada entre os dias 22 e 25, nos níveis 1000 e 850 hPa, o centro deste sistema pôde ser observado

através de uma crista meridional visível entre os níveis 500 e 250 hPa no setor sul do anticiclone em altos níveis (40°W , 20°W ; 20°S , 10°S).

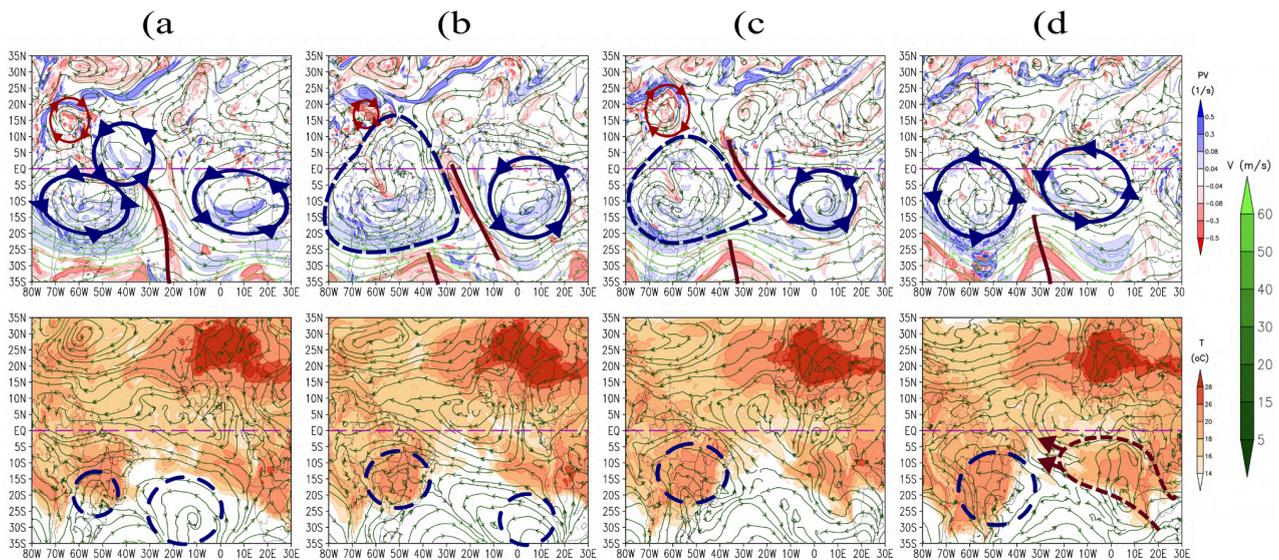
Figura 34 - Processo de deslocamento do anticiclone em altos níveis a partir de uma Crista Zonal no Atlântico Sul nos campos sinóticos às 0Z dos dias 24 (a), 25 (b), 26 (c) 27 (d) de agosto de 2014. Campos utilizados: Vorticidade potencial em 250 hPa (em cima), temperatura em 850 hPa (em baixo) e linhas de corrente e magnitude do vento (em ambos os níveis). Círculo azul com setas: Sistemas com circulação anti-horária em altos níveis; Círculo azul tracejado: Anticiclones em baixos níveis; Linhas azuis: cristas; Linhas vermelha: cavados; Polígono vermelho com setas: massa de ar em deslocamento.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

O anticiclone em altos níveis permaneceu ativo entre os dias 25 e 31 de agosto, deslocando-se para Noroeste na vanguarda de um sistema frontal do Hemisfério Sul entre os dias 25 e 28 de agosto, quando atravessou a região Nordeste do Brasil (NEB) e chegou ao Atlântico Norte (50°W , 30°W ; 5°S , 10°N). Após o dia 28 de agosto, o centro com circulação anti-horária apresentou deslocamento para sudoeste, voltando para o Hemisfério Sul e unindo-se à circulação de um novo anticiclone em altos níveis originado no Pacífico Sul. A interação entre estes sistemas formou um anticiclone barotrópico de núcleo quente com características similares à Alta da Bolívia no dia 31 de agosto de 2014.

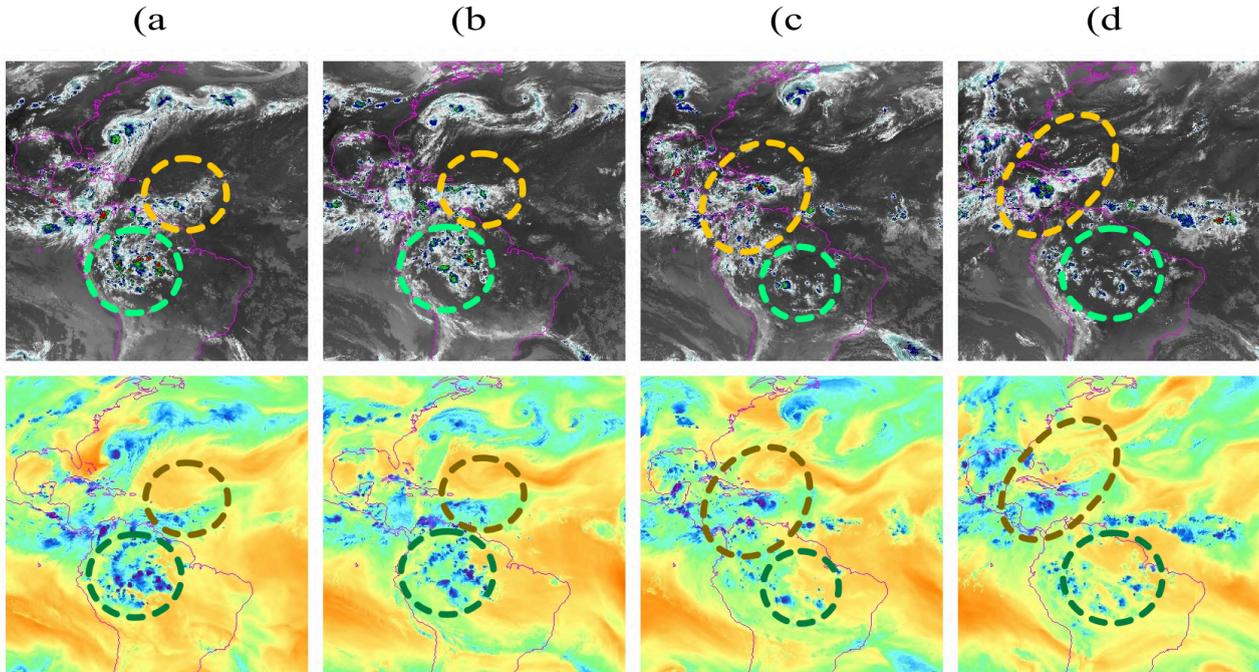
Figura 35 - Processo de dissipação do anticiclone em altos níveis a partir de uma Crista Zonal no Atlântico Sul nos campos sinóticos às 0Z dos dias 28 (a), 29 (b), 30 (c) 31 (d) de agosto de 2014. Campos utilizados: Vorticidade potencial em 250 hPa (em cima), temperatura em 850 hPa (em baixo) e linhas de corrente e magnitude do vento (em ambos os níveis). Círculo azul com setas: Sistemas com circulação anti-horária em altos níveis; Círculo azul tracejado: Anticiclones em baixos níveis; Linhas vermelha: cavados; Polígono azul tracejado: região de junção dos anticiclones; Polígono vermelho com setas: massa de ar em deslocamento.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

A intensificação de uma tempestade tropical no setor Noroeste do anticiclone em altos níveis do Hemisfério Sul foi observada novamente entre os dias 27 e 28 de agosto, durante sua invasão sobre o Hemisfério Norte. A tempestade tropical perdeu intensidade após o retorno do anticiclone em altos níveis para o Hemisfério Sul entre os dias 28 e 29 de agosto. A formação de células convectivas com circulação anti-horária também foi observada sobre a região Amazônica na região de difluência entre o anticiclone em altos níveis originado no Pacífico Sul e o anticiclone em altos níveis originado no Atlântico Sul.

Figura 36 - Desenvolvimento da segunda tempestade tropical a partir de imagens de satélite às 0Z dos dias 27 (a), 28 (b), 29(c) e 30(d) agosto de 2014. Campos utilizados: Imagens de satélite (Knapp, K. R. et al, 2011) nos canais do Infravermelho (em cima) e Vapor d'água realçado (em baixo). Círculo amarelo: Localização da tempestade tropical; Círculo Verde: Centros convectivos sobre a Amazônia.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

A observação dos registros diários de estações automáticas em superfície não demonstrou variações significativas na temperatura, umidade relativa e velocidade do vento durante a passagem dos anticiclones em altos níveis sobre o Nordeste Brasileiro. Todos os estados observados apresentaram queda de até 2 hPa na pressão atmosférica e aumentos de até 2°C na temperatura máxima após a passagem dos sistemas. Precipitações com características estratiformes, origem frontal e intensidade de até 14 mm/dia foram observadas na costa Leste do Nordeste Brasileiro onde ocorreu confluência entre cavados frontais do Hemisfério Sul e os anticiclones em altos níveis.

A análise das mensagens do código METAR indicou a presença dos seguintes sistemas sobre as capitais dos estados no Nordeste do Brasil:

Aracaju - SE: Névoa úmida nos dias 7, 15 e 17 de agosto entre a extremidade de sistemas frontais do Hemisfério Sul e o setor oeste da região de formação dos centros

com circulação anti-horária em altos níveis. Rajada de vento de 23 kt no dia 7 de agosto. A formação de torres de cumulus foi observada sob a região entre a extremidade de sistemas frontais e o setor oeste de centros com circulação anti-horária em altos níveis.

Fortaleza – CE: Rajadas de vento nos dias 5 (30kt) e 25 (35kt) de agosto na região de confluência entre a extremidade de cavados em altos níveis do Hemisfério Sul e o setor oeste de centros com circulação anti-horária em altos níveis. A formação de torres de cumulus foi observada sob as mesmas condições.

João Pessoa – PB: Sem alterações significativas nos fenômenos adversos.

Maceió – AL: Nevoa úmida dias 3, 8, 9, 16, 17, 18, 19, 21, 25 e 26 de agosto associadas majoritariamente ao transporte de umidade por anticiclones baroclínicos no setor oeste de frentes frias do hemisfério sul. A formação de torres de cumulus foi observada sob condições similares.

Natal – RN: Rajadas de vento nos dias 11 (26kt) e 17 (32kt) de agosto, durante a aproximação do setor oeste dos centros com circulação anti-horária em altos níveis. A formação de torres de cumulus foi observada quando a cidade estava sob a influência da crista zonal a oeste dos centros com circulação anti-horária em altos níveis.

Recife – PE: Névoa úmida nos dias 10, 20 e 21 de agosto sob condições similares às observadas em Maceió-AL. Formação de torres de cumulus observada após a dissipação ou na extremidade da crista no setor oeste do centro com circulação anti-horária em altos níveis. Uma rajada de vento com intensidade de 22kt foi observada no dia 18 de agosto sob as mesmas condições.

São Luiz – MA: A formação de torres de cumulus foi observada na região de confluência entre os centros com circulação anti-horária em altos níveis e outros sistemas próximos.

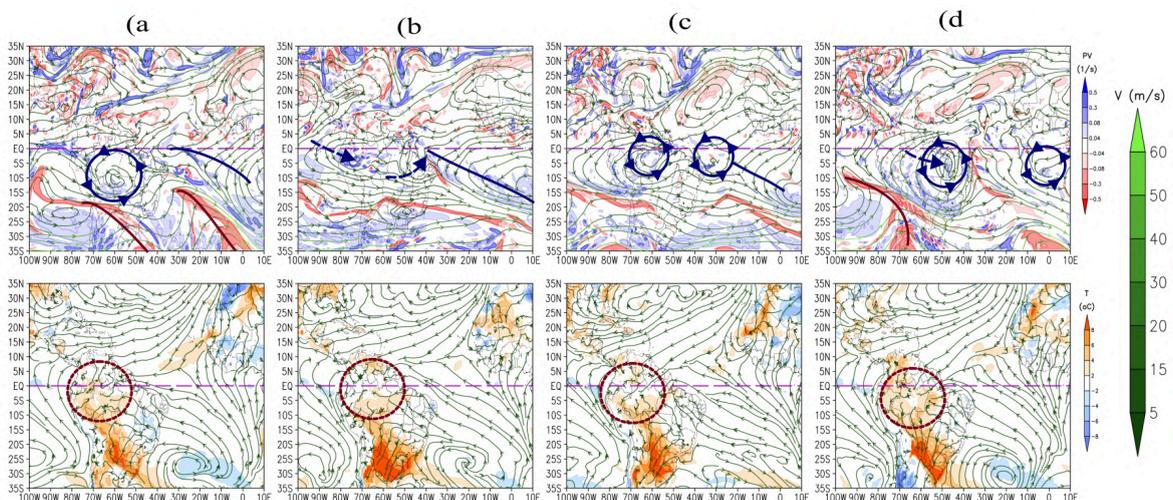
Salvador – BA: Nevoa úmida dias 1, 14, 15, 16 e 27 de agosto sob condições similares às observadas em Maceió-AL e no setor sul de centros com circulação anti-horária em altos níveis.

Teresina – PI: Sem alterações significativas nos fenômenos adversos.

4.3.3 - Formação de Anticiclones em Altos Níveis a partir de uma perturbação no Pacífico Sul em junho de 2020

Entre os dias 18 e 20 de junho (figura 37 - a) foi identificada a presença de um centro com circulação anticiclônica em altos níveis posicionado entre a Bolívia e o Mato Grosso ($60^{\circ}\text{W} - 50^{\circ}\text{W}$, $15^{\circ}\text{S} - 5^{\circ}\text{S}$). A análise dos campos de linhas de corrente e temperatura entre os níveis 1000 e 250 hPa sugeriu presença de convergência e temperaturas elevadas em baixos níveis (1000 e 850 hPa) sobre a região amazônica ($80^{\circ}\text{W} - 60^{\circ}\text{W}$, $20^{\circ}\text{S} - 0^{\circ}\text{S}$) e confluência entre as cristas de dois anticiclones posicionados nos oceanos Pacífico ($100^{\circ}\text{W} - 80^{\circ}\text{W}$, $30^{\circ}\text{S} - 10^{\circ}\text{S}$) e Atlântico Sul ($50^{\circ}\text{W} - 30^{\circ}\text{W}$, $35^{\circ}\text{S} - 15^{\circ}\text{S}$) no Nível 500 hPa. A presença de um cavado meridional associado a um sistema frontal do Hemisfério Sul também foi observada entre os níveis 1000 e 250 hPa, ao sul da região de confluência entre os dois anticiclones ($80^{\circ}\text{W} - 60^{\circ}\text{W}$, $40^{\circ}\text{S} - 20^{\circ}\text{S}$). Devido às características observadas, os sistemas descritos anteriormente foram classificados como Alta da Bolívia.

Figura 37 - Processo de formação do anticiclone em altos níveis a partir de uma perturbação no pacífico Sul através dos campos sinóticos às 0Z dos dias 19(a), 21(b), 23 (c) e 25(d) de junho de 2014. Campos utilizados: Vorticidade potencial em 250 hPa (em cima), anomalia da temperatura em 850 hPa (em baixo) e linhas de corrente e magnitude do vento (em ambos os níveis). Círculo azul com setas: Centro com circulação anti-horária em altos níveis; Círculo vermelho tracejado: Ar quente e convergência; Linhas azuis: Cristas em Altos níveis; Linhas vermelhas: Cavados em Altos níveis; Seta tracejada: Deslocamento dos sistemas.



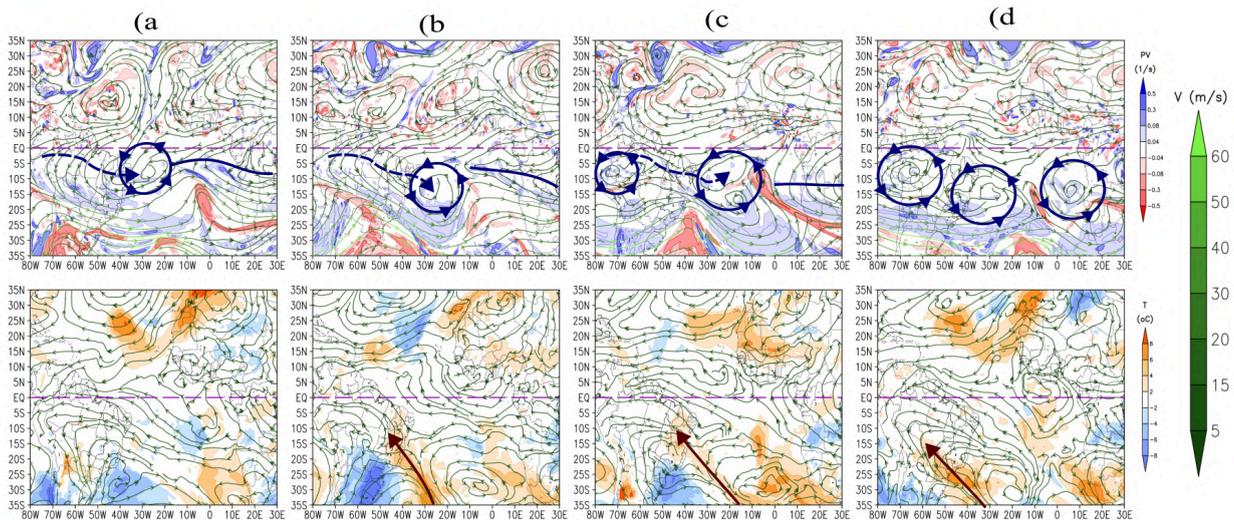
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

O cavado frontal sobre o pacífico deslocou-se para leste, atravessando a América do Sul e atingindo o oceano atlântico no dia 20 de junho. Durante este processo, a componente superior da Alta da Bolívia apresentou enfraquecimento e deslocamento para leste, acompanhando a extremidade do cavado frontal em altos níveis (figura 37 - a e b). Entre os dias 18 e 20, também foi observada a presença de um cavado intenso no setor norte da componente superior do anticiclone barotrópico que acompanhava o cavado frontal no nível 250 hPa (100°W , 80°W ; 20°S , 0°S). A presença do cavado iniciou uma perturbação com circulação anti-horária na região equatorial que se intensificou conforme o sistema se aproximava da América do Sul.

A dissipação do centro em altos níveis da Alta da Bolívia ocorreu entre os dias 20 e 22 de junho (figura 37 - b) sobre o Nordeste do Brasil (NEB). A perturbação observada na região equatorial se deslocou para o Norte da América do Sul formando um novo centro com circulação anti-horária no nível 250 hPa (80°W , 60°W ; 10°S , 0°S). Este sistema apresentou as mesmas características anteriormente citadas, sendo classificado novamente como Alta da Bolívia.

A Alta da Bolívia deslocou-se para leste entre os dias 23 e 26 de junho (figura 37 - c e d), alcançando o NEB no dia 24 de junho. O deslocamento ocorreu em fase com o setor Leste de duas ondas de Rossby presentes nos hemisférios Norte e Sul durante todo o processo. Um sistema com circulação horária e características similares foi observado se formando sobre o Norte da África e se deslocando para oeste sobre o Atlântico Tropical Norte (60°W , 20°E ; 0°N , 20°N) durante o mesmo período. Os dois anticiclones se interceptaram entre os dias 25 e 26 de junho (figura 37 - a e b), quando a Alta da Bolívia estava no limite entre as regiões Norte e Nordeste do Brasil (50°W , 40°W).

Figura 38 - Processo de dissipação do anticiclone em altos níveis a partir de uma perturbação no pacífico Sul através dos campos sinóticos às 0Z dos dias 19(a), 21(b), 23 (c) e 25(d) de junho de 2014. Campos utilizados: Vorticidade potencial em 250 hPa (em cima), anomalia da temperatura em 850 hPa (em baixo) e linhas de corrente e magnitude do vento (em ambos os níveis). Círculo azul com setas: Centro com circulação anti-horária em altos níveis; Linhas azuis: Cristas em Altos e médios níveis; Linhas vermelhas: Cavados em Altos e médios níveis;



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

O processo de dissipação da alta da Bolívia ocorreu logo após o dia 26 (figura 38) com a intensificação de uma crista zonal sobre o Atlântico Sul (70°W, 20°E ; 10°S, 5°S) e o enfraquecimento do anticiclone em altos níveis do hemisfério Norte (60°W, 40°W; 0°N,20°N). A crista permaneceu na região entre os dias 27 e 29 de julho, quando formou novamente um centro fechado sobre costa leste do NEB (40°W, 20°W ; 10°S, 0°S) após a descontinuidade da crista devido à passagem de cavados frontais do Hemisfério sul sobre a costa oeste da África. O anticiclone formado nesta região apresentou circulação fechada entre os níveis 500 e 250 hPa, deslocando-se para sudeste e atingindo o nível 1000 hPa entre os dias 2 e 3 de julho, logo após a intensificação do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (20°W, 0°W ; 30°S, 10°S).

A regeneração e deslocamento do anticiclone no Hemisfério Norte (40°W, 20°W ; 0°N, 20°N) e a formação de um novo centro com circulação anti-horária sobre a região amazônica (80°W, 60°W ; 15°S, 5°S) também foram observadas durante este período.

A análise das mensagens do código METAR indicou a presença dos seguintes sistemas sobre as capitais dos estados no Nordeste do Brasil:

Aracaju - SE: Nevoa úmida dias 24 e 29 de junho e 11 e 12 de julho, chuva e torres de cumulus na maioria dos dias, mais comuns nos dias onde a cidade se encontrava próxima aos setores leste ou oeste da Alta da Bolívia ou centros com circulação anticiclônica em altos níveis.

Fortaleza – CE: Rajada de vento nos dias 23 de junho (29 kt) e 15 de julho (24 kt). Precipitação e trovoadas associadas a Cb foram observadas no dia 6 de julho, quando a cidade estava no setor Norte do centro com circulação anticiclônica em altos níveis. Eventos de variação na direção do vento ocorreram enquanto a cidade se encontrava no setor leste do sistema. A presença de torres de cumulus foi observada enquanto a cidade se encontrava nos setores norte e oeste do sistema.

João Pessoa – PB: Nevoa úmida no dia 3 de julho e rajada de vento (25 kt) no dia 6 de julho, quando a cidade se encontrava no setor norte do sistema. A presença de torres de cumulus foi observada enquanto a cidade se encontrava nos setores norte e oeste do sistema.

Maceió – AL: Nevoa úmida nos dias 22 e 26 de junho (setor leste), 3, 5 e 6 de julho (setor Norte) e 10, 11 e 12 de julho (setor oeste). Uma rajada de vento de 30 kt foi observada dia 5 de julho (setor norte). Eventos de variação na direção do vento e formação de torres de cumulus foram observados quando a cidade se encontrava nos setores oeste e leste do sistema.

Natal – RN: Nevoa úmida nos dias 11 e 12 de julho (setor oeste). Rajadas de vento nos dias 21 (30 kt) e 22 (26 kt) de junho (setor leste). Eventos de variação na direção do vento e formação de torres de cumulus foram observados quando a cidade se encontrava nos setores oeste, leste e norte do sistema.

Recife – PE: Nevoa úmida nos dias 3, 5 e 6 de julho (setor norte) e dia 11 de julho (setor oeste). Rajadas de vento nos dias 21 (23 kt) e 25 (21 kt) de junho (setor leste) e no dia 5 (23 kt) de julho (setor norte). A formação de torres de cumulus foi observada quando a cidade se encontrava nos setores oeste e norte do sistema.

São Luiz – MA: Precipitação e Trovoadas causadas por Cb foram observadas nos dias 21 (setor leste), 25 (centro) e 30 (setor oeste) de julho e 6, 7 (setor norte), 9, 13 e 15 (setor oeste) de junho. Uma rajada de vento de 30 kt foi observada no dia 15 de junho (setor oeste). A formação de torres de cumulus e CB foi observada durante todo o tempo de permanência dos sistemas.

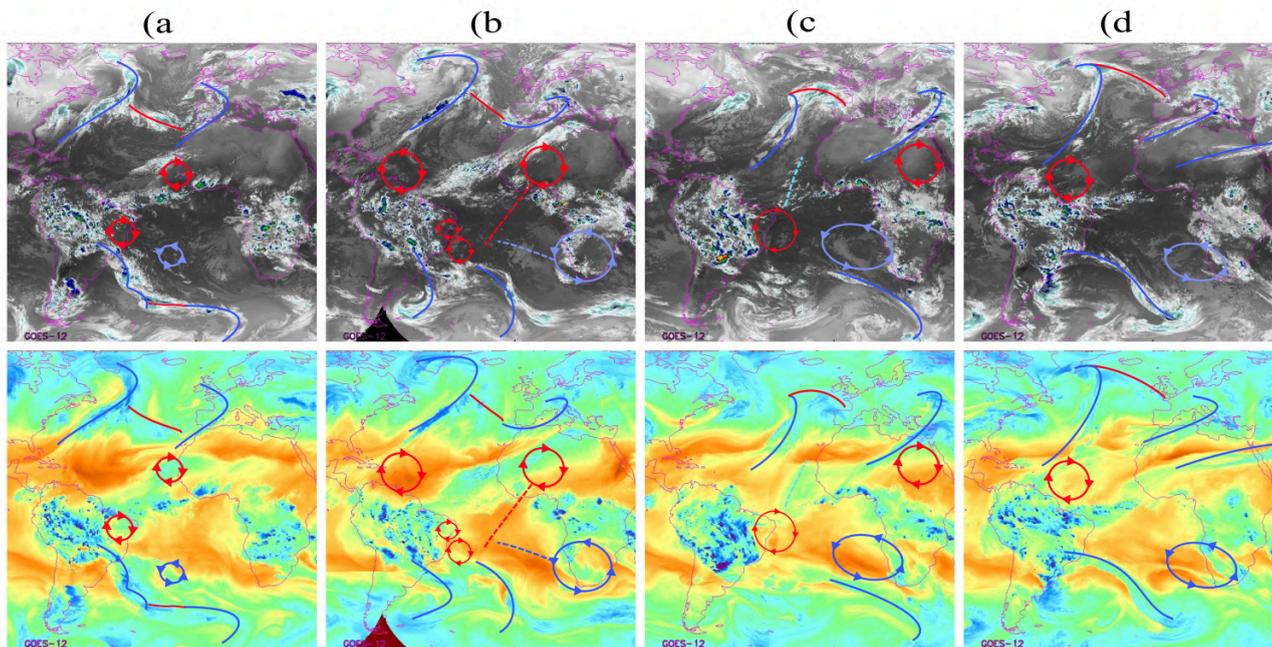
Salvador – BA: A presença de névoa úmida foi observada em boa parte dos dias em que a cidade esteve sobre os setores Oeste e Leste do sistema. Rajadas de vento foram observadas nos dias 22 e 25 de junho, quando a cidade estava no setor leste do sistema. A formação de torres de cumulus foi observada durante todo o tempo de permanência dos sistemas.

Teresina – PI: Eventos de variação na direção do vento foram observados quando a cidade se encontrava no setor norte do sistema.

4.3.4 - Formação de centros com circulação anti-horária em altos níveis a partir de invasões de CAN-HN no Hemisfério Sul em fevereiro de 2009

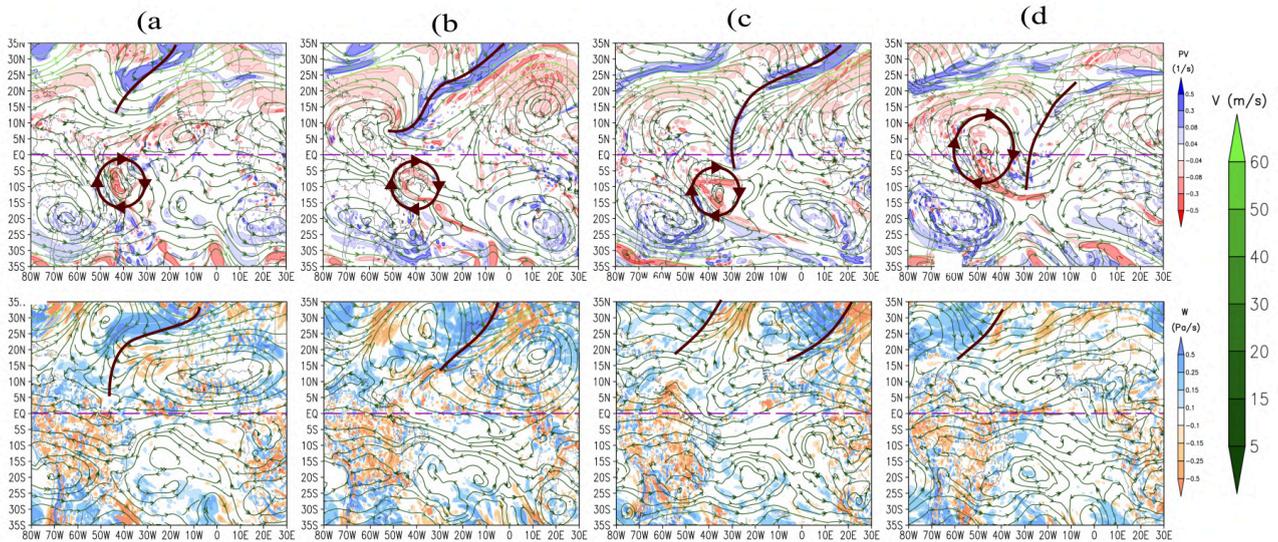
O início do processo ocorreu entre os dias 5 e 8 de fevereiro de 2009, com a invasão de um cavado frontal do Hemisfério Norte (HN) entre os níveis 500 e 250 hPa. O ciclone que deu origem ao cavado formou-se a oeste da Europa (40°N - 60°N ; 0°E - 10°E) a partir da regeneração de um ciclone na periferia da Corrente de Jato Polar do Hemisfério Norte (figuras 39 e 40).

Figura 39- Processo inicial da formação de um vórtice com circulação anti-horária na extremidade de um cavado frontal do Hemisfério Norte em 250 hPa com invasão no Hemisfério Sul a partir de imagens de satélite às 0Z dos dias 5 (a), 7 (b), 9 (c) e 11 (d) de fevereiro de 2009. Campos utilizados: Imagens de satélite (Knapp, K. R. et al, 2011) nos canais do Infravermelho (em cima) e Vapor d'água realçado (em baixo). Círculo vermelho com setas: Vórtice Ciclônico em Altos Níveis; Círculo azul com setas: Sistemas com circulação anti-horária em altos níveis; Linhas azuis: Frentes frias; Linhas tracejadas: Cavados e cristas dos sistemas; Linhas vermelhas: Frentes quentes.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Figura 40 - Processo inicial da formação de um vórtice com circulação anti-horária na extremidade de um cavado frontal do Hemisfério Norte em 250 hPa com invasão no Hemisfério Sul a partir dos campos sinóticos às 0Z dos dias 5 (a), 7 (b), 9 (c) e 11 (d) de fevereiro de 2009. Campos utilizados: Vorticidade potencial em 250 hPa (em cima), velocidade vertical em 500 hPa (em baixo) e linhas de corrente e magnitude do vento (em ambos os níveis). Círculo vermelho com setas: Vórtice Ciclônico em Altos Níveis; Linhas vermelhas: Cavados em Altos Níveis.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Durante o processo de formação, foi observada intensificação e deslocamento para oeste de um Vórtice Ciclônico em Altos Níveis (VCAN) sob a vanguarda do cavado frontal (entre 15°S, 0°S e 50°W, 40°W). A formação e intensificação de anticiclones em altos níveis do Hemisfério Sul também foi observada na vanguarda e retaguarda do cavado frontal, sobre o norte da América do Sul (entre 0°N, 15°N e 80°W, 50°W) e norte da África (entre 0°N, 15°N e 10°W, 10°E).

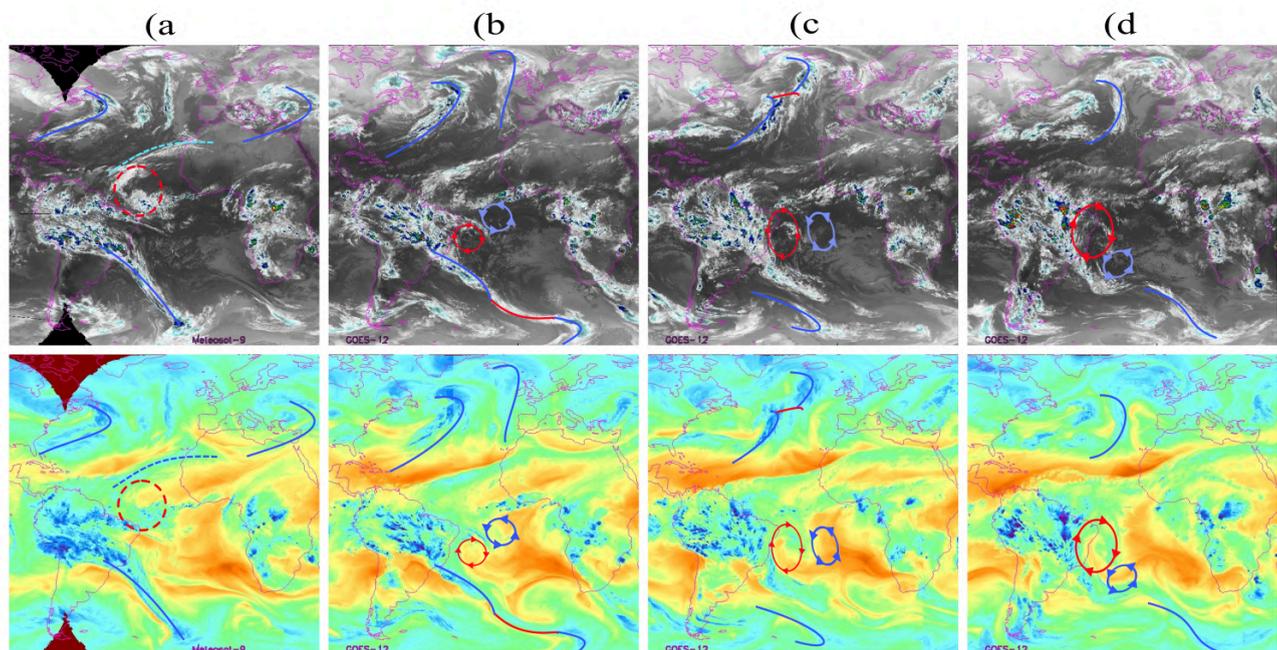
Um pequeno vórtice com circulação anti-horária formou-se na retaguarda do VCAN (10°S, 0°S e 30°W, 20°W) entre os dias 5 e 6 de fevereiro (figuras 39 e 40), dissipando rapidamente após o cavado frontal do HN atingir latitudes ao sul de 5°N. No momento de formação deste sistema foram observados aumentos na temperatura em 850 hPa entre o leste do NEB e retaguarda do vórtice com circulação anti-horária no nível 250 hPa.

O cavado frontal do Hemisfério Norte atingiu a latitude máxima de sua invasão no Hemisfério Sul entre os dias 8 e 11 de fevereiro, alcançando latitudes de até 10°S sobre a costa leste do NEB (40°W, 20°W). A presença do cavado nestas latitudes ocorreu em

conjunto com a intensificação da Alta da Bolívia, deslocando o VCAN que estava sobre o NEB para o Hemisfério Norte.

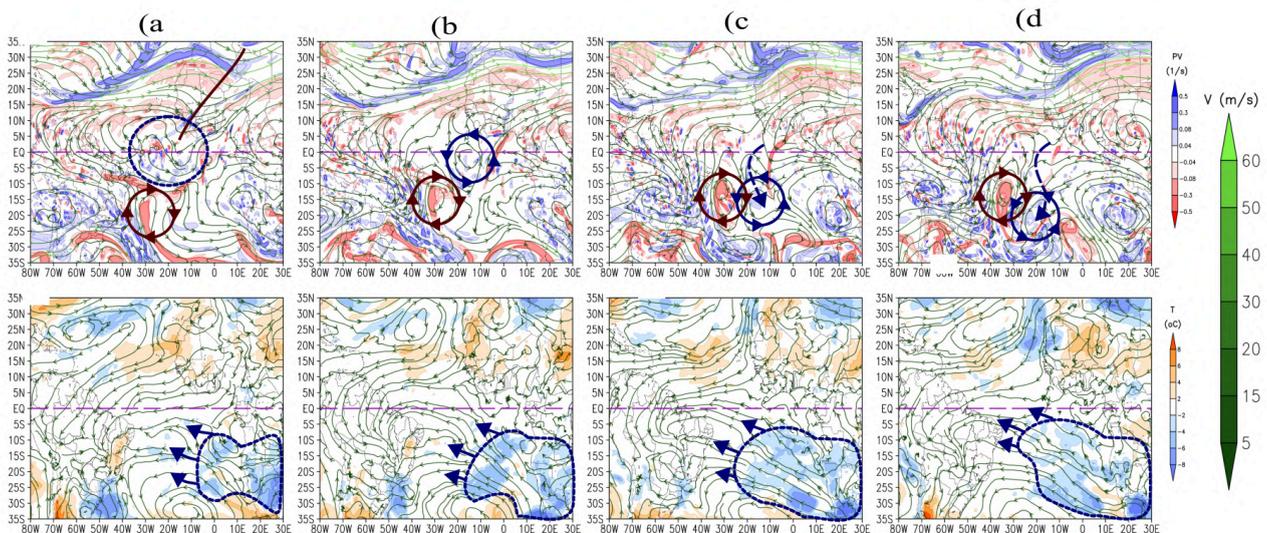
O vórtice formado a partir da Invasão do VCAN do Hemisfério Sul (figuras 41 e 42) apresentou características similares às de anticiclones em altos níveis do Hemisfério Norte, deslocando-se para leste e dissipando sobre o Atlântico Tropical entre os dias 13 e 14 de fevereiro (entre 5°S, 10°N e 30°W, 10°W). Diversos centros de vorticidade potencial positiva e negativa (250 hPa), movimentos verticais intensos (500 hPa) e precipitação intensa foram observados sobre a Zona de Convergência Intertropical na região de dissipação desse sistema.

Figura 41- Processo de Formação de um vórtice com circulação anti-horária na extremidade de um cavado frontal do Hemisfério Norte em 250 hPa com invasão no Hemisfério Sul a partir de imagens de satélite às 0Z dos dias 13(a), 14(b), 15(c) e 16(d) de fevereiro de 2009. Campos utilizados: Imagens de satélite (Knapp, K. R. et al, 2011) nos canais do Infravermelho (em cima) e Vapor d'água realçado (em baixo). Círculo vermelho com setas: Vórtice Ciclônico em Altos Níveis; Círculo azul com setas: Sistemas com circulação anti-horária em altos níveis; Linhas azuis: Frentes frias; Linhas tracejadas: vanguarda dos cavados; Linhas vermelhas: Frentes quentes.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Figura 42 - Processo final da formação de um vórtice com circulação anti-horária na extremidade de um CAN-HN com invasão no Hemisfério Sul a partir dos campos sinóticos às 0Z dos dias 13(a), 14(b), 15(c) e 16(d) de fevereiro de 2009. Campos utilizados: Vorticidade potencial em 250 hPa (em cima), anomalia da temperatura do ar em 850 hPa (em baixo) e linhas de corrente e magnitude do vento (em ambos os níveis). Círculo azul com setas: Sistemas com circulação anti-horária em altos níveis; Círculo vermelho com setas: Vórtice Ciclônico em Altos Níveis; Linhas vermelhas: Cavados em Altos Níveis; Polígono e setas azuis: deslocamento da massa de ar; Seta tracejada: Deslocamento dos sistemas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

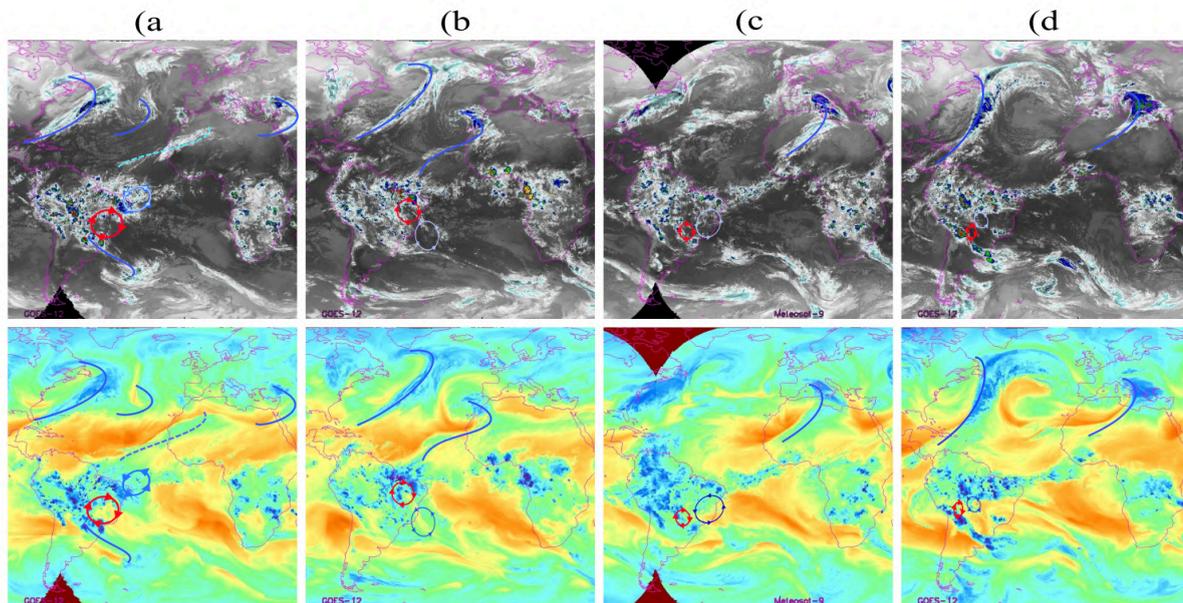
Dois novos centros com circulação horária e anti-horária formaram-se sobre o Atlântico ao Sul da região de dissipação do VCAN e do cavado frontal do Hemisfério Norte no dia 14 de fevereiro (figura 42, a e b). O processo ocorreu na vanguarda de um sistema frontal do Hemisfério Sul e permaneceu até o dia 21 de fevereiro. O centro de circulação horária formado sobre o leste do NEB apresentou as características de um VCAN.

O centro com circulação anti-horária em 250 hPa apresentou características similares às de um anticiclone, com temperaturas mais baixas e formação de nuvens estratiformes sendo observadas no nível 850 hPa na região do seu centro fechado. Uma região de diminuição na espessura entre as camadas 1000 e 500 hPa foi observada abaixo do centro do sistema. O VCAN e o anticiclone em altos níveis permaneceram acoplados durante todo o processo, apresentando deslocamento para oeste em direção à Alta da Bolívia.

Durante o deslocamento dos sistemas foram observadas invasões meridionais de Sistemas Frontais do Hemisfério Sul sobre a região tropical e formação da Zona de

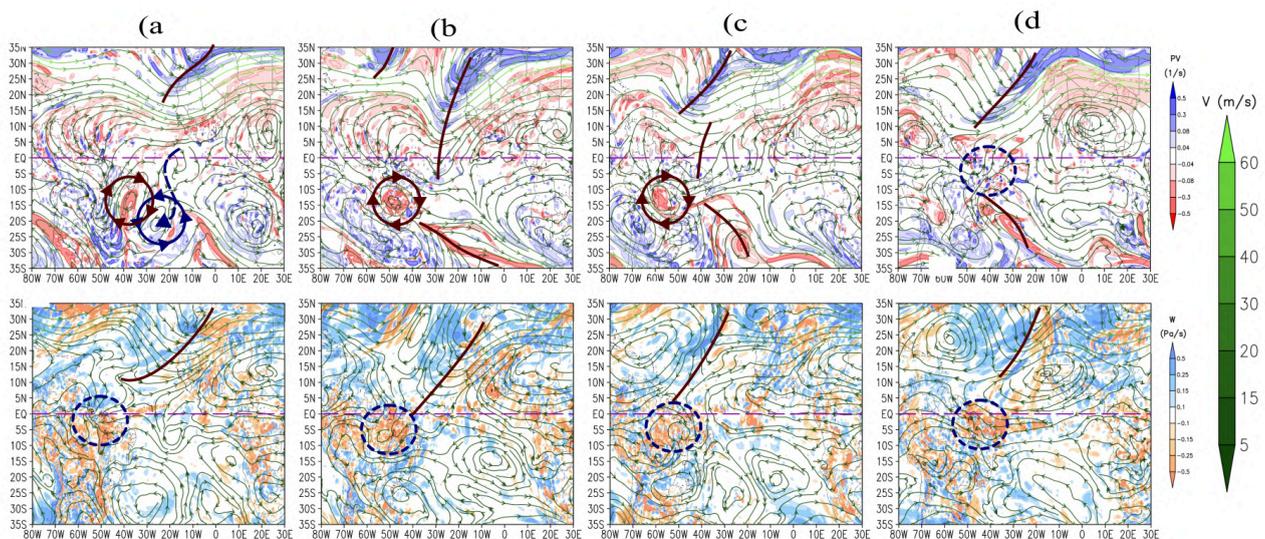
Convergência do Atlântico Sul na região de confluência entre a Alta da Bolívia e o VCAN. A formação de nuvens estratiformes também foi observada na retaguarda do Anticiclone em altos níveis. Regiões de aquecimento foram observadas no nível 850 hPa abaixo do centro do VCAN.

Figura 43 - Processo de dissipação de um vórtice com circulação anti-horária na extremidade de um CAN-HN com invasão no Hemisfério Sul a partir de imagens de satélite às 0Z dos dias 17(a), 19(b), 21(c) e 23(d) de fevereiro de 2009. Campos utilizados: Imagens de satélite (Knapp, K. R. et al, 2011) nos canais do Infravermelho (em cima) e Vapor d'água realçado (em baixo). Círculo vermelho com setas: Vórtice Ciclônico em Altos Níveis; Linhas azuis: Frentes frias; Linha tracejada: Vanguarda do cavado em altos níveis; Linhas vermelhas: Frentes quentes.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

Figura 44 - Processo de dissipação de um vórtice com circulação anti-horária na extremidade de CAN-HN com invasão no Hemisfério Sul a partir dos campos sinóticos às 0Z dos dias 17(a), 19(b), 21(c) e 23(d) de fevereiro de 2009. Campos utilizados: Vorticidade potencial em 250 hPa (em cima), velocidade vertical hPa (em baixo) e linhas de corrente e magnitude do vento (em ambos os níveis). Círculo azul com setas: Sistemas com circulação anti-horária em altos níveis; Círculo azul tracejado - convergência em médios níveis / divergência em altos níveis. Círculo vermelho com setas: Vórtice Ciclônico em Altos Níveis; Linhas vermelhas: Cavados em Altos Níveis; Seta tracejada: Deslocamento dos sistemas.



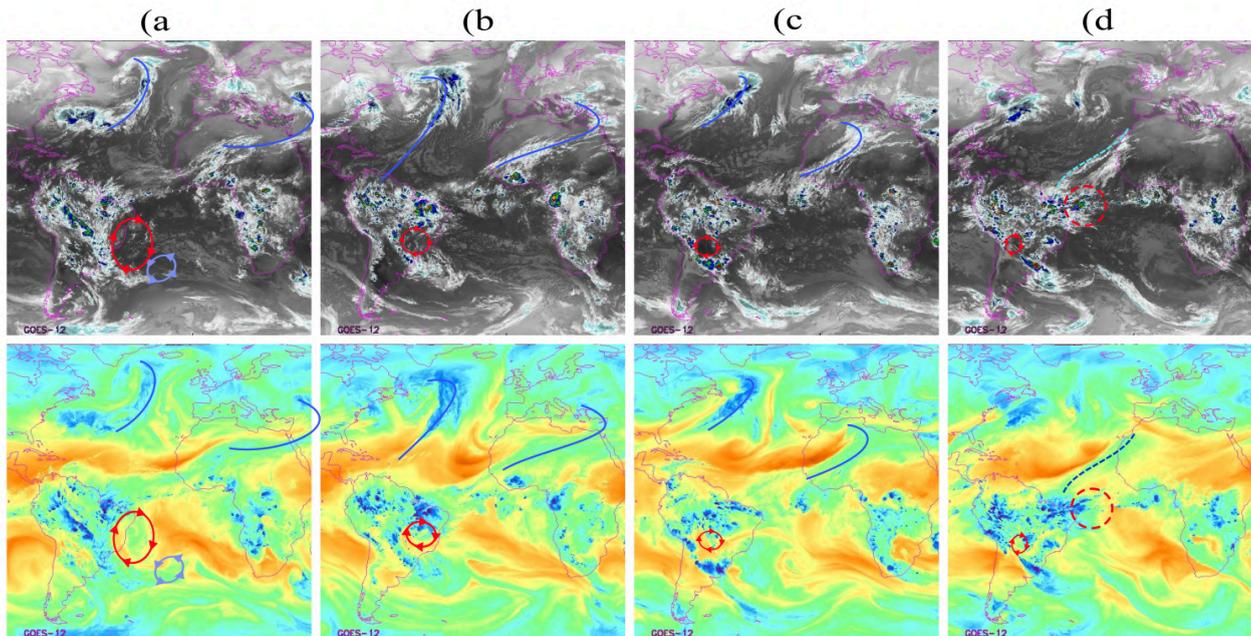
Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

O anticiclone em altos níveis dissipou completamente entre os dias 19 e 20 de fevereiro (figuras 43 e 44), após alcançar a costa leste do Brasil. A invasão de um novo cavado frontal do Hemisfério Norte com latitude de até 5°S foi observada na região de dissipação do sistema.

O centro do VCAN dissipou completamente sobre os Andes no dia 22 de fevereiro. Intensas regiões de vorticidade potencial positiva, movimentos verticais e nebulosidade com características cumuliformes foram observadas a nordeste do VCAN dissipado, atingindo principalmente as regiões Norte e Nordeste do Brasil. A invasão de um novo cavado frontal com latitude até 5°N também foi observada.

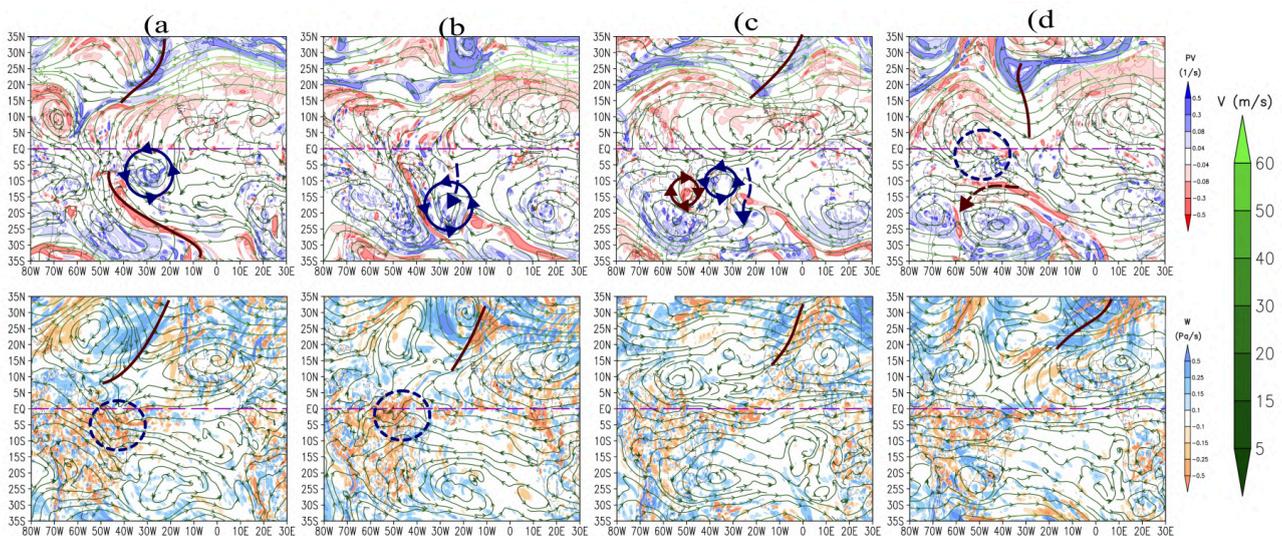
O processo descrito nesta seção repetiu-se mais uma vez após o dia 22 de fevereiro, com novas formações de VCANs de anticiclones em altos níveis entre os dias 24 de fevereiro e 4 de março (figuras 45 e 46). A presença de sistemas frontais do Hemisfério Sul com inclinação meridional e nuvens estratiformes sob o centro do anticiclone foi observada novamente nesse processo.

Figura 45- Processo adicional da formação de um vórtice com circulação anti-horária na extremidade de um CAN-HN com invasão no Hemisfério Sul a partir de imagens de satélite às 0Z dos dias 24(a) e 26(b) de fevereiro e 1(c) e 5(d) de março de 2009. Campos utilizados: Imagens de satélite (Knapp, K. R. et al, 2011) nos canais do Infravermelho (em cima) e Vapor d'água realçado (em baixo). Círculo vermelho com setas: Vórtice Ciclônico em Altos Níveis; Círculo vermelho tracejado: Formação de nuvens de topo frio; Linhas azuis: Frentes frias; Linha tracejada - Vanguarda do cavado em altos níveis; Linhas vermelhas: Frentes quentes.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

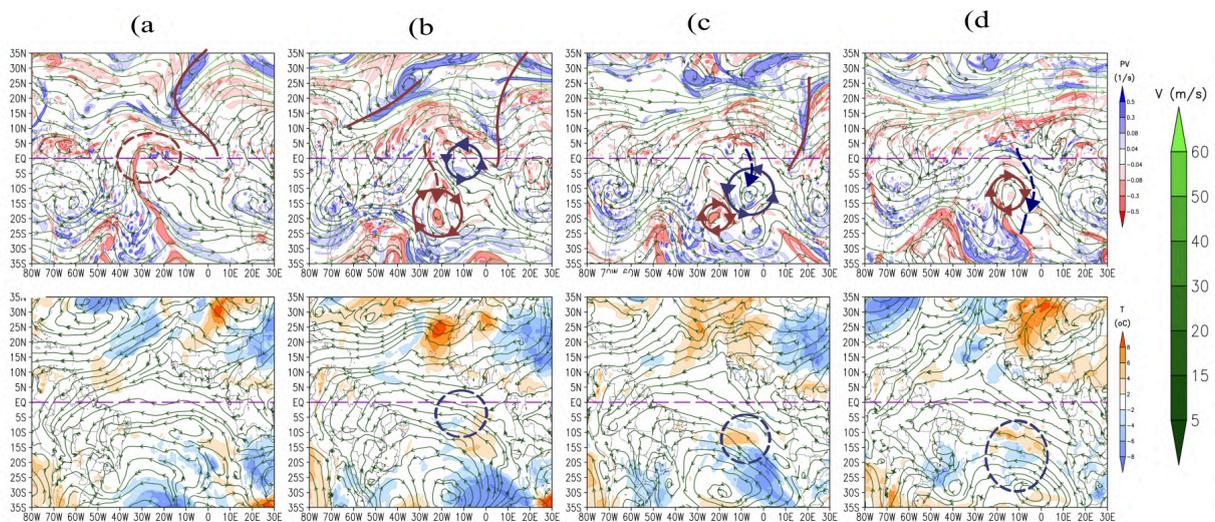
Figura 46 - Processo adicional da formação de um vórtice com circulação anti-horária na extremidade CAN-HN com invasão no Hemisfério Sul a partir dos campos sinóticos às 0Z dos dias 24(a) e 26(b) de fevereiro e 1(c) e 5(d) de março de 2009. Campos utilizados: Vorticidade potencial em 250 hPa (em cima), velocidade vertical em 500 hPa (em baixo) e linhas de corrente e magnitude do vento (em ambos os níveis). Círculo azul com setas: Sistemas com circulação anti-horária em altos níveis; Círculo azul tracejado - convergência em médios níveis / divergência em altos níveis; Círculo vermelho com setas: Vórtice Ciclônico em Altos Níveis; Linhas vermelhas: Cavados em Altos Níveis; Seta tracejada: Deslocamento dos sistemas.



4.3.4 - Formação de centros com circulação anti-horária em altos níveis a partir de invasões de CAN-HN no Hemisfério Sul em março de 2004

O início do processo ocorreu entre os dias 15 e 20 de março de 2004 (figuras 47 e 48, a e b), com a invasão de um Cavado em Altos Níveis do Hemisfério Norte (CAN-HN) sobre o Atlântico Sul (30°W, 0°W). A formação do CAN-HN foi observada durante o processo de dissipação de diversos ciclones na periferia da corrente de Jato Polar do Hemisfério Norte que ocorreram sobre a mesma longitude. Invasões ao sul do CAN-HN foram observadas até a latitude de 0°N nos níveis 500 hPa e 250 hPa. A presença de um sistema com circulação anti-horária foi observada sobre o norte da África (entre 30°N, 40°N e 10°W, 10°E) no nível 500 hPa entre os dias 15 e 16 de março.

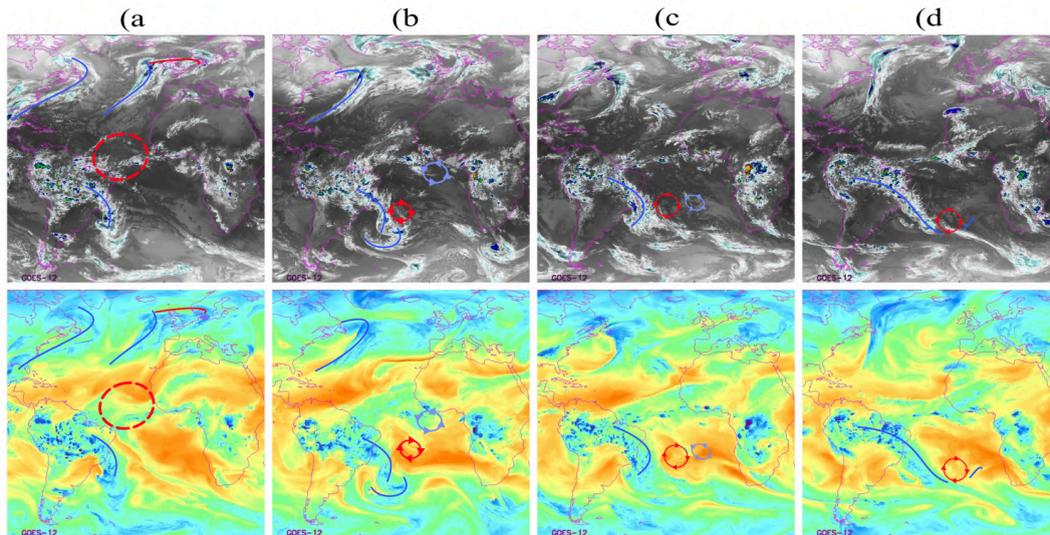
Figura 47 - Processo da formação e dissipação de um centro com circulação anti-horária na extremidade de um CAN-HN com invasão sobre o Hemisfério Sul a partir dos campos sinóticos às 0Z dos dias 16(a), 19(b), 21 (c) e 24(d) de março de 2004. Campos utilizados: Vorticidade potencial em 250 hPa (em cima), anomalia da temperatura em 850 hPa (em baixo) e linhas de corrente e magnitude do vento (em ambos os níveis). Círculo azul com setas: Centro com circulação anti-horária em altos níveis; Círculo azul tracejado: Anomalia de temperatura abaixo dos sistemas; Círculo vermelho com setas: Vórtice Ciclônico em Altos Níveis; Círculo vermelho tracejado: Região de formação dos sistemas; Linhas vermelhas: Cavados em Altos níveis; Seta tracejada: Deslocamento dos sistemas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

O CAN-HN resultante da invasão passou a se deslocar para leste entre os dias 16 e 20 de março (figuras 47 e 48, a e b) formando um novo centro com circulação anti-horária em sua extremidade sobre o Atlântico Sul no nível 250 hPa (entre 15°S, 5°S e 20°W, 0°W). A formação de uma pequena massa de ar frio também foi observada no nível 850 hPa, logo abaixo do centro do vórtice com circulação anti-horária. Pequenos centros de ômega positivo formaram-se sobre a região da massa de ar frio, indicando a subsidência do ar no centro do sistema como uma provável causa para o resfriamento.

Figura 48- Processo da formação e dissipação de um centro com circulação anti-horária na extremidade de um CAN-HN com invasão sobre o Hemisfério Sul a partir de imagens de satélite às 0Z dos dias 16(a), 19(b), 21 (c) e 24(d) de março de 2004. Campos utilizados: Imagens de satélite (Knapp, K. R. et al, 2011) nos canais do Infravermelho (em cima) e Vapor d'água realçado (em baixo). Linha azul - Frentes frias; Linha vermelha - Frentes quentes; Círculo vermelho com setas: Vórtice Ciclônico em Altos Níveis; Círculo vermelho tracejado - Região de formação; Círculo Azul - Centros com circulação anti-horária em altos níveis.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023)

A formação de um pequeno Vórtice Ciclônico em Altos Níveis (VCAN) do Hemisfério Sul foi observada cerca de dois dias antes da observação do centro fechado do vórtice com circulação anti-horária. Os dois sistemas permaneceram próximos durante todo o processo.

O vórtice com circulação anti-horária deslocou-se para sul durante todo o processo, perdendo intensidade entre os dias 21 e 22, após o aquecimento da região abaixo do centro do sistema, no nível 850 hPa. A presença de cistas nos campos de linhas de corrente (níveis 500 hPa e 250 hPa) e espessura da camada entre 1000 e 500 hPa foi observada sobre a região de dissipação do sistema entre os dias 23 e 25 de março.

A dissipação completa do sistema ocorreu entre os dias 24 e 25 (figuras 47 e 48, c e d) de março entre 30°S, 25°S e 20°W, 10°W. Durante o processo foram observadas descontinuidades na circulação do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul e formação de um centro com circulação anticiclônica a oeste da circulação principal (30°W, 20°W). Este processo ocorreu na mesma latitude e período de formação do Ciclone Catarina (GAN, 2009).

5 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foram observadas as influências de três diferentes sistemas meteorológicos sobre a ocorrência de fenômenos extremos no Nordeste do Brasil (NEB), sendo eles: Cavados em Altos e Médios Níveis originados no Hemisfério Norte (HN) com invasões sobre o Hemisfério Sul, Vórtices Ciclônicos em Altos Níveis (VCAN) no Atlântico Tropical e Anticiclones em Altos Níveis no Atlântico Tropical. As análises gerais foram realizadas para o período entre 1991 - 2020, utilizando imagens de satélite nos canais do infravermelho (11 μm) e vapor d'água (6,7 μm) e séries de reanálises do ERA5 com resolução espacial de 0,25°. Contagens manuais utilizando os mesmos campos foram realizadas para cada sistema no período entre 2011 e 2020 (10 anos). Adicionalmente, dados de estações automáticas de superfície e mensagens do código METAR foram utilizados para a análise das variáveis de superfície e identificação de fenômenos adversos nos estudos de caso.

5.1 - Invasões de Cavados em Altos Níveis do Hemisfério Norte sobre o Atlântico Sul

Cavados em Altos Níveis do Hemisfério Norte (CAN-HN) apresentaram maior invasão meridional sobre o Hemisfério Sul nos meses do verão austral (inverno no Hemisfério Norte) devido ao posicionamento dos anticiclones em altos níveis observados sobre o Atlântico Norte.

Os valores máximos e mínimos das invasões de CAN-HN para o período 2011 - 2020 foram observados entre janeiro e fevereiro e entre julho e agosto respectivamente. Invasões sequenciais de CAN-HN em uma mesma latitude estiveram associadas aos meses com maior número de eventos, especialmente durante períodos de descontinuidade da Corrente de Jato Subtropical do HN.

A presença de pequenos anticiclones em altos níveis com deslocamento de leste para oeste sobre o Atlântico Tropical Norte e formação polar dos ciclones do Hemisfério Norte impossibilitaram a invasão de CAN-HN durante os meses de inverno austral.

A maior parte das invasões de CAN-HN entre o fim da primavera e início do outono apresentaram menor escala espacial e estiveram associadas à passagem de tempestades e ciclones tropicais no Atlântico Norte, portanto não foram consideradas nesta análise.

A invasão de CAN-HN foi observada através dos seguintes campos:

- Circulação anti-horária no campo de Linhas de corrente e vorticidade potencial positiva entre 5°S e 10°N;
- Cavados nos campos de linhas de corrente e aumentos da temperatura no nível 850 hPa e espessura da camada entre os níveis 1000 e 500 hPa;
- Linhas meridionais no campo de precipitação total sobre o Atlântico Norte (70°W - 30°W, 0°N - 35°N), com valores entre 0.05 e 0.5 mm;
- Presença de frentes frias ou frentes oclusas sobre o Atlântico Norte com nebulosidade associada à nuvens de topo quente em imagens de satélite nos campos de infravermelho e vapor d'água;
- Intensificação da Zona de Convergência Intertropical ou presença de bandas de nebulosidade com textura filamentosa e acinzentada na costa noroeste da África (30°W - 10°E, 15°N - 35°N) em imagens de satélite nos campos de Infravermelho e vapor d'água.

Foram observadas quatro regiões preferenciais para as invasões de cavados frontais do Hemisfério Norte (HN) sobre o Hemisfério Sul (HS), com diferentes efeitos sobre a formação e posicionamento de sistemas sinóticos no NEB. Sendo elas:

5.1.1 - Norte da América do Sul (80°W - 50°W):

Invasões nesta região estiveram associadas à presença de VCANs do HS ou anticiclones/cristas do HN entre 60°W - 0° e 20°N - 20°S . A formação, deslocamento ou regeneração de VCANs do HS sobre regiões continentais foi observada durante este tipo

de invasão. Formação de centros com circulação anticiclônica em altos níveis ou acoplamentos com a Alta da Bolívia(AB) entre 500 hPa e 250 hPa são frequentemente observadas na vanguarda do CAN-HN.

5.1.2 - Norte e Nordeste do Brasil (50°W - 20°W):

Invasões nesta região estiveram associadas à presença de VCANs do HS ou anticiclones/cristas do HN entre 80°W - 40°W e 0° - 40°E. A formação, deslocamento ou regeneração de VCANs do HS sobre o Atlântico Sul foi observada durante este tipo de invasão. Formações de centros com circulação anticiclônica em altos níveis ou acoplamentos com a Alta da Bolívia(AB) entre 500 hPa e 250 hPa foram frequentemente observadas na retaguarda do CAN-HN.

5.1.3 - Atlântico Sul (20°W - 10°E):

Invasões nesta região estiveram associadas à presença de anticiclones/cristas do Hemisfério Norte entre 60°W - 20°W e 20°E 40°E e frequentemente ocorreram de forma simultânea à invasões em outras regiões. As influências sobre os sistemas sinóticos em altos níveis do HS foram similares às descritas anteriormente.

5.1.4 - Norte da África (10°E - 40°E):

Invasões nesta região estiveram associadas à presença de anticiclones/cristas do Hemisfério Norte entre 60°W - 20°W e 10°E 40°E e frequentemente ocorreram de forma simultânea à invasões em outras regiões. A formação, deslocamento ou regeneração de VCANs do HS sobre a costa oeste da África foi observada durante este tipo de invasão. Centros com circulação Anticiclônica em Altos Níveis formaram-se na retaguarda do CAN-HN ou a partir de cristas de anticiclones em altos níveis na costa oeste da África. VCANs formados durante este processo demonstraram características similares às formações Africanas I e II, deslocando-se majoritariamente para oeste/sudoeste.

5.1.5 - Informações adicionais

Nas observações e estudos de caso, a influência dos CAN-HN sobre o NEB foi observada devido a alterações na circulação em altos níveis que ocasionou modificações nos seguintes sistemas:

- Formação, Intensificação ou reposicionamento de VCANs;
- Intensificação ou reposicionamento da Zona de Convergência Intertropical;
- Entrada meridional de sistemas frontais do Hemisfério Sul e posicionamento meridional da Zona de Convergência do Atlântico Sul;
- Formação de tempestades associadas à VCANs acoplados a sistemas com circulação anticiclônica em seu setor leste.

5.2 - Vórtices Ciclônicos em Altos Níveis sobre o Atlântico Tropical

Os processos de formação dos Vórtices Ciclônicos em Altos Níveis (VCAN) observados acima de 20°S no Atlântico Sul foram similares aos processos já descritos na literatura. Interações entre Cavados em Altos Níveis do Hemisfério Norte (CAN-HN) com invasões sobre o Hemisfério Sul e Atlântico Tropical Norte foram observadas na maioria dos processos de formação e intensificação de VCANs durante o verão austral entre os anos de 2011 e 2020.

5.2.1 - Presença de cavados com invasões tropicais em ambos os hemisférios:

Este processo foi mais comum durante o verão austral e esteve associado às formações Clássica e Alta dos VCANs. A invasão dos CAN-HN intensificou a circulação horária sobre o Atlântico tropical, agindo em conjunto com a amplificação de cavados em altos níveis do Hemisfério Sul. VCANs formados a partir deste processo permaneceram estacionários por alguns dias e se deslocaram majoritariamente para a direção oeste. O deslocamento foi mais frequente durante invasões sequenciais de CAN-HN em diferentes latitudes.

5.2.2 - Presença de dois cavados do Hemisfério Norte com invasão a sul de 10°N:

Associada à intensificação de anticiclones barotrópicos na costa leste da África. Este processo ocorreu de forma similar às formações Alta e Africanas I e II e foi mais comum durante o verão austral. A presença de um anticiclone entre os dois CAN-HN intensificou a circulação horária em todo o Atlântico Tropical, amplificando cristas nos setores Sul e Sudoeste do Anticiclone. A crista amplificada desenvolve-se em um centro com circulação fechada que atravessa para o Hemisfério Sul formando um novo VCAN.

5.2.3 - Formação entre dois anticiclones em altos níveis:

Associada à amplificação de um cavado em altos níveis do Hemisfério Sul entre dois anticiclones no Atlântico Sul. O processo mostrou-se similar às formações Clássica e alta de VCANs, sendo mais comum entre o outono e inverno austrais. A formação ocorreu devido à amplificação de um cavado entre duas cristas ou anticiclones observados na costa leste do Brasil e costa oeste da África. A aproximação das cristas ou anticiclones forma um centro com circulação horária fechada que se deslocou para norte na maioria dos casos observados. A formação de tempestades e ciclones tropicais foi observada no Atlântico Norte após alguns destes centros atravessarem para o Hemisfério Norte.

5.2.4 - Informações adicionais

De forma geral, o deslocamento de VCANs mostrou-se propício à regiões com cristas em baixos níveis associadas ao anticiclone subtropical mais intenso ou no hemisfério mais próximo, havendo também cavados no campo de espessura da camada geopotencial 1000-500 hPa.

A presença de centros com circulação anti-horária no setor leste dos VCANs intensificou o deslocamento para oeste/sudoeste e ocorreu de forma simultânea à formação de tempestades em alguns dos casos observados.

5.3 - Centros com circulação anti-horária em altos níveis no Hemisfério Sul

A identificação de centros com circulação anti-horária em altos níveis foi eficiente a partir da observação de centros fechados com circulação anti-horária e vorticidade positiva no nível 250 hPa. A presença de nuvens de topo quente com uma fraca circulação anticiclônica também foi observada nos campos de imagens de satélite.

Os centros com circulação anti-horária do Hemisfério Sul apresentaram diferentes características e regiões de formação, sendo classificados da seguinte forma:

5.3.1 - Formação na extremidade de uma Crista Zonal sobre o Atlântico Sul.

Mais comum nas estações de transição e inverno austral (maio a outubro) com maior número de casos identificados no mês de agosto. Sistemas formados neste processo foram classificados como anticiclones em altos níveis.

O processo ocorreu a partir da amplificação de uma crista associada a anticiclones barotrópicos na costa leste da África ($30^{\circ}\text{W} - 30^{\circ}\text{E}$, $0^{\circ}\text{S} - 25^{\circ}\text{S}$). A aproximação de um sistema frontal associado a um cavado em altos níveis foi identificada como o principal fator para a separação da extremidade da crista em altos níveis e formação do centro com circulação anti-horária. O deslocamento de anticiclones em altos níveis ocorreu majoritariamente para a direção oeste/noroeste, entre o Atlântico Sul e o Nordeste do Brasil.

Em alguns casos, anticiclones em altos níveis deslocados para o NEB acoplaram-se a anticiclones baroclínicos presentes na costa leste do Brasil, proporcionando condições de bloqueio atmosférico.

Nos estudos de caso, a presença destes sistemas esteve associada à bom tempo sobre o NEB. A ocorrência de precipitação com características estratiformes foi observada durante a dissipação, deslocamento ou confluência entre estes sistemas e outros anticiclones presentes no Brasil.

5.3.2 - Formação a partir de perturbações ou regeneração de anticiclones originados no pacífico tropical.

Mais comum entre o outono austral e inverno austral, com maior número de casos identificados entre maio e julho. Sistemas formados a partir deste processo apresentaram características similares à Alta da Bolívia quando semi estacionários sobre as regiões Norte, Nordeste, Centro Oeste e Sudeste do Brasil. Acoplamentos com anticiclones baroclínicos na retaguarda de ondas de Rossby foram observados antes do sistema se deslocar para leste.

O processo ocorreu a partir da amplificação de perturbações com vorticidade positiva na extremidade de cavados em altos níveis do Hemisfério Sul deslocando-se sobre o Pacífico Tropical. A formação também foi observada a partir da regeneração de centros com circulação anti-horária originados no pacífico Norte. As perturbações ou centros com circulação anti-horária em altos níveis se intensificaram após se deslocarem sobre os andes, muitas vezes formando centros com circulação anticiclônica com características similares à Alta da Bolívia. A dissipação ocorreu após os sistemas se deslocarem para leste/sudeste, aparentemente sendo absorvidos pela circulação de anticiclones sobre o Atlântico Sul.

Sistemas formados a partir desse processo estavam associados a condições de bom tempo nos estudos de caso. Com a ocorrência de eventos pouco intensos de precipitação sendo observada durante o deslocamento, dissipação ou na região de confluência entre anticiclones em altos níveis originados no pacífico e anticiclones em altos níveis originados no atlântico.

5.3.3 - Formação a partir da extremidade de cavados em altos níveis do Hemisfério Norte com invasões sobre o Hemisfério Sul.

Mais comum entre a primavera austral e o verão austral, com maior número de casos identificados no mês de novembro. Estes sistemas apresentaram formação e características similares aos VCANs formados durante o inverno no Hemisfério Sul.

O processo de formação ocorreu a partir da amplificação de um cavado do em altos níveis do Hemisfério Norte com invasão em latitudes iguais ou abaixo de 5°N. Os centros formados a partir da extremidade dos cavados deslocaram-se de forma errática ocorrendo majoritariamente na direção Sul. A associação ao setor leste dos VCANs e setor oeste de Cavados em Altos Níveis do Hemisfério Sul foi observada durante a

aproximação entre os dois sistemas. A formação a partir de cristas no setor norte de anticiclones barotrópicos na costa oeste da África foi observada entre o outono austral e a primavera austral.

Centros com circulação anti-horária formados a partir desse processo estavam associados à intensificação e deslocamento oeste dos VCANs quando acoplados ao seu setor Leste. A formação de tempestades na região de confluência entre os VCANs e a Alta da Bolívia também foi observada durante o processo.

5.5 - Contribuições

Este trabalho acrescentou novas informações sobre teleconexões inter-hemisféricas no Atlântico Sul e suas relações com sistemas de circulação sinótica. Adicionalmente, foram expostos processos complementares para a formação, intensificação e deslocamento de Vórtices Ciclônicos em Altos Níveis formados em baixas latitudes. A descrição dos processos de formação de Anticiclones e outros centros com circulação anti-horária em Altos Níveis também foi realizada para o Hemisfério Sul.

5.6 Sugestões para trabalhos futuros

- A identificação de relações entre as invasões de Cavados em Altos Níveis do Hemisfério Norte (CAN-HN) e sistemas de variação interanual, como o El Niño Oscilação Sul e Oscilação de Madden Julian por exemplo, pode esclarecer algumas incógnitas sobre mecanismos causadores de secas e precipitação intensa no Nordeste do Brasil durante o verão austral, uma vez que a variação na quantidade e região de invasão de CAN-HN pode modificar o posicionamento e deslocamento de Vórtices Ciclônicos em Altos Níveis.
- De forma análoga, a identificação de variações interanuais na ocorrência e posicionamento de anticiclones em altos níveis sobre o Atlântico e América do Sul podem esclarecer dúvidas sobre eventos associados à escassez de precipitação no NEB durante as estações de transição e inverno austral.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barbosa, T. F. **Intrusão de vortividade potencial na alta troposfera sobre o Atlântico Tropical Sul e sua relação com a precipitação no NE do Brasil. (INPE-14170-TDI/1087)**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2006.
- Carvalho, L. M. V. Jones, C.; Liebmann, B. The south Atlantic convergence zone: Intensity, form, persistence, and relationships with intraseasonal to interannual activity and extreme rainfall. **Journal of Climate**, Boston, 01 jan. 2004, v.17 p. 88–108, ISSN: 0894-8755. Disponível em: [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)017%3C0088:TSACZI%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017%3C0088:TSACZI%3E2.0.CO;2) . Acesso em: 05 jan. 2022.
- Cavalcanti, I. F. A.; Kousky, V. E. Climatology of south american cold fronts. In: Proc. 7° International Conference On Southern Hemisphere Meteorology And Oceanography New Zealand. **American Meteorological Society**, mar. 2003. Disponível em: <https://ams.confex.com/ams/pdfpapers/59753.pdf> . Acesso em: 06 jan. 2022.
- Cavalcanti, I. F. A.; Kousky, V. E. “Frentes frias sobre o Brasil.” In: Cavalcanti I. F. A.; Ferreira, N. Silva M. G. A, Silva Dias, M. A. F.; Tempo e Clima no Brasil. **Oficina de Textos**, São Paulo, 2009, p. 135–147.
- Chen, P.; M. P. Hoerling; R. M. Dole. The origin of the subtropical anticyclones. **Journal of the Atmospheric Sciences**, Boston, 01 jul. 2001, v. 58, p. 1827–1835. Disponível em: [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2001\)058<1827:TOOTSA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2001)058<1827:TOOTSA>2.0.CO;2) . Acesso em: 12 dez. 2023.
- Chen, T. C.; Weng, S. P.; Schubert, S. Maintenance of Austral Summertime Upper-Tropospheric Circulation over Tropical South America: The Bolivian High–Nordeste Low System. **Journal of the Atmospheric Sciences**, Boston, 01 jul. 1999, v.56, p. 2081–2100. Disponível em: [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1999\)056%3C2081:MOASUT%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1999)056%3C2081:MOASUT%3E2.0.CO;2) . Acesso em: 12 dez. 2023.
- Coutinho, M. D. L. **Método objetivo de identificação dos vórtices ciclônicos de altos níveis na região tropical sul: validação e climatologia. (INPE-15460TDI/1422)**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2008.
- De Lima, M.C. **Variabilidade da precipitação no litoral Leste da Região Nordeste do Brasil. (INPE – 5283 – TDI / 453)**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - MSc thesis, National Institute of Space Science, São José dos Campos, 1991. Disponível em: <http://mtc-m16b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/MTC-m13@80/2005/08.23.14.43/doc/publicacao.pdf> . Acesso em: 28 nov. 2023.
- Djuric, D. **Weather Analysis**. Englewood Cliffs, New Jersey : Prentice Hall, cop. 1994, p. 304. ISBN:0-13-501149-3.

Fedorova, N; Vladimir, L. Adverse Meteorological Phenomena in Northeast Brazil. UK, Cambridge, Aug. 2023, p. 486. Disponível em: https://books.google.com.br/books?id=QXXaEAAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=pt-BR&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false . References: Chapter I.1, p.16. Acesso em: 20 set. 2023.

Fedorova, N. **Sinótica III: Frentes, correntes de jato, ciclones e anticiclones**. Maceió, 2008. Editora Universitária/ UFAL, p. 192, ISBN:978-85-7177-421-6.

Fedorova, N.; Lyra M. J. A. “Capítulo 1. Corrente de jato e fenômenos associados.” In: **Meteorologia em tópicos**, Pelotas, RS, fev. 2017. UFPel, v. 5, p. 11-68. ISBN 978-85-68891-04-9.

Figueroa, S. N.; Satyamurty, P; Dias, P. L. S. Simulations of the summer circulation over the South American region with an eta coordinate model. **Journal of the Atmospheric Sciences**, Boston, 15 may. 1995, p. 1573-1584. Disponível em: [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1995\)052%3C1573:SOTSCO%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1995)052%3C1573:SOTSCO%3E2.0.CO;2) . Acesso em: 18 set 2023.

Frank, N. L. On the energetics of cold lows. Proceedings of the Symposium on Tropical Meteorology. **American Meteorological Society**, Boston, 6 jun. 1970, p. EIV-EIV.

Gan, M. A. **Ciclone Catarina: Análise Sinótica**. III Simpósio Internacional de Climatologia, Canela, RS, 2009.

Gan, M. A. **Um estudo observacional sobre as baixas frias de alta troposfera, nas latitudes subtropicais do Atlântico Sul e Leste do Brasil**. (INPE – 2685-TDL/126). Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1982, p. 78. Disponível em: <http://mtc-m16b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/jeferson/2005/06.21.17.31/doc/publicacao.pdf> . Acesso em: 15 out. 2023.

Gandu, A. W. Geisler, J. E.; A primitive equations model study of the effect of topography on the summer circulation over tropical South America. **Journal of the Atmospheric Sciences**, Boston, 15 aug. 1991, p. 1822-1836. Disponível em: [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1991\)048%3C1822:APEMSO%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1991)048%3C1822:APEMSO%3E2.0.CO;2) . Acesso em: 15 out. 2023.

Gandu, A. W; Silva Dias, P. L. Impact of tropical heat sources on the South American tropospheric upper circulation and subsidence. **Journal Of Geophysical Research**, E.U.A., Florida 28 mar. 1998, v. 103, p. 6001–6015. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/68932/1/1998_art_awgandu.pdf . Acesso em: 16 out. 2023.

Gilliland, J. M.; Barry, D. K. Position of the South Atlantic Anticyclone and its impact on surface conditions across Brazil. **American Meteorological Society**, Boston, 1 mar. 2018, v. 103, p. 535–553. Disponível em: <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-17-0178.1> . Acesso em: 06 Ago. 2023.

Hastenrath, S. Climate Dynamics of the Tropics. **Kluwer Academic Publishers, Springer Book Archive, Springer Link**, 30 jun. 1991, p. 463-488, eBook

ISBN978-94-011-3156-8. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-94-011-3156-8> . Acesso em: 5 mai. 2023.

Hastenrath, S. "Climate and circulation of the tropics." **Springer Netherlands, Springer Book Archive, Springer Link**, 30 nov. 1985, p. 464, eBook
ISBN978-94-009-5388-8Published , 06 dec. 2012. Disponível em:
<https://doi.org/10.1007/978-94-009-5388-8> . Acesso em: 30 abr. 2023.

Hastenrath, S. Lamb. Climatic Atlas of the Tropical Atlantic and Eastern Pacific Oceans. **Springer Book Archive, University of Wisconsin Press**, 1 mar. 1977, p. 177, ISBN-13 : 978-0299072346. Disponível em:
<https://www.amazon.com.br/Climatic-Tropical-Atlantic-Eastern-Pacific/dp/0299072347> ,
<https://doi.org/10.1007/978-94-011-3156-8> . Acesso em: 30 abr. 2023.

He, C.; Wu, B. Liwei, Z.; Tianjun, Z.; Responses of the Summertime Subtropical Anticyclones to Global Warming. **Journal of the Atmospheric Sciences**, Boston, 15 aug. 2017, p. 6465–6479. Disponível em: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0529.1> . Acesso em: 30 abr. 2023.

Ioannidou, L.; Yau, M. K. A climatology of the Northern Hemisphere winter anticyclones. **Journal Of Geophysical Research**, E.U.A., Florida 30 apr. 2008, v. 113, p. 1–17. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2007JD008409> ,
<https://doi.org/10.1029/2007JD008409> . Acesso em: 30 abr. 2023.

Knapp, K. R.; Steve, A.; Caroline. L. B.; Mark, A. B.; Michael, J. D.; Chris, F.; Chip, N. H.; Christopher, C. H.; Christopher, D. H.; George, J. H.; James, P. K.; Hai-Tien, L.; Alexander, L.; Gudrun, M. Globally gridded satellite (GridSat) observations for climate studies. **Bulletin of the American Meteorological Society**, 92, 893–907, **Journal of the Atmospheric Sciences**, Boston, 01 jul. 2011, p. 893–907. Disponível em:
<https://doi.org/10.1175/2011BAMS3039.1> . Acesso em: 29 mar. 2023.

Kousky, V. E. Pentad outgoing longwave radiation climatology for the South American sector. **Revista Brasileira de Meteorologia, Intech Open**, Europe, 1988, v. 3, p. 217-231. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbmet/> ,
https://www.whoj.edu/cms/files/silva_kousky_217705.pdf . Acesso em: 29 mar, 2023.

Kousky, V. E.; Gan, M. A. Upper tropospheric cyclonic vortices in the tropical South Atlantic. *Tellus Journal*, 01 jan. 1981, v. 33, p. 538-551. Disponível em: <https://a.tellusjournals.se/articles/10.3402/tellusa.v33i6.10775> ,
[DOI: 10.3402/tellusa.v33i6.10775](https://doi.org/10.3402/tellusa.v33i6.10775) . Acesso em: 29 mar. 2023.

Lenters, J. D.; Cook, K. H. On the Origin of the Bolivian High and Related Circulation Features of the South American Climate. **Journal of the Atmospheric Sciences**, Boston, 01 mar. 1997, v. 54, p. 656–678. Disponível em:
[https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1997\)054%3C0656:OTOOTB%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1997)054%3C0656:OTOOTB%3E2.0.CO;2) . Acesso em: 10 out. 2023.

Lyra, M.J.A. **Vórtices ciclônicos de altos níveis do Nordeste brasileiro: sua relação com o transporte de umidade da América do Sul e sua estrutura termodinâmica.** Tese (Doutorado em Meteorologia), Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Campina Grande, Paraíba, Brasil, 26 Ago.

2022, p. 01-165. Disponível em:
<http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/28310> . Acesso em: 10 out. 2023.

Morais, M. D. C. **Vórtice Ciclônico de Altos Níveis no Nordeste do Brasil: Estudo Observacional e Numérico**. Tese (Doutorado). São José dos Campos, INPE. 22 fev. 2016, p. 01-263. sid.inpe.br/mtc-m21b/2016/01.25.15.04-TDI. Disponível em:
<http://mtc-m21b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m21b/2016/01.25.15.04/doc/publicacao.pdf>
 . Acesso em: 12 out. 2023.

Paixão, E. B.; GANDU, A. W. Caracterização do vórtice ciclônico de ar superior sobre o Nordeste do Brasil (Parte I). **CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA**, Rio de Janeiro, nov. 2000, p. 3422-3428, Anais 2000. 1 CD-ROM. Disponível em:
<https://repositorio.usp.br/item/001173632> . Acesso em: 05 de abr. 2023.

Palmén, E. Origin and structure of high-level cyclones south of the maximum westerlies. **Tellus Journal**, 1949, v.1, p. 22-31. Disponível em:
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdfdirect/10.1111/j.2153-3490.1949.tb01925.x> . Acesso em: 10 mar. 2023.

Pasch, R. J. Hurricane Cristobal. National Hurricane Center, tropical cyclone report, p. 2-14. Disponível em: https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/AL042014_Cristobal.pdf . Acesso em: 27 out 2023.

Pepler, A. S.; Di Luca, A.; Evans, J. P. Independently assessing the representation of midlatitude cyclones in high-resolution reanalysis using satellite observed winds. **International Journal Of Climatology**, 19 aug. 2017, v. 38, p. 1314–1327, Published online in Wiley Online Library, doi:10.1002/joc.5245. Disponível em:
https://www.researchgate.net/publication/319173371_Independently_assessing_the_representation_of_midlatitude_cyclones_in_high-resolution_reanalyses_using_satellite_observed_winds . Acesso em: 10 mar. 2023.

Pezzi, L. P.; Cavalcanti, I. F. A. O jato subtropical sobre a América do Sul no período de 1980 a 1989. In: **Congresso Brasileiro de Meteorologia, 7., Belo Horizonte, 1994**. Anais. São José dos Campos: INPE, 1994. v.2, p.148-151. Disponível em:
http://mtc-m16b.sid.inpe.br/col/cptec.inpe.br/walmeida/2005/02.24.15.42/doc/Pezzi_O%20jato%20subtropical%20sobre%20aamerica%20do%20sul.pdf . Acesso em: 02 de jan. de 2023.

Ramirez, M. C. V. **Padrões climatológicos dos vórtices ciclônicos em altos níveis no Nordeste do Brasil**. Dissertação de Mestrado em Meteorologia, INPE, São José dos Campos, 1996, p. 01-132, INPE – 6608 – TDI / 618. Disponível em:
<http://mtc-m16b.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/MTC-m13@80/2005/09.15.19.39/doc/publicacao.pdf> . Acesso em: 22 de fev. 2023.

Ramírez, M. C. V.; Kayano, M. T.; Ferreira, N. J. Statistical analysis of upper tropospheric vortices in the vicinity of Northeast Brazil during the 1980-1989 period. **Atmosfera**, 1999, v. 12, p. 75-88. Disponível em:
<https://www.revistascca.unam.mx/atm/index.php/atm/article/view/8443> . Acesso em: 30 mar. 2023.

Reboita, M. S.; Ambrizzi, T.; Silva, B. A.; Pinheiro, R. F.; Rocha, R. P. "The South Atlantic Subtropical Anticyclone: Present and Future Climate." **Front. Earth Sci.** 26 fev. 2019. v. 7. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00008> . Acesso em: 15 mar. 2023;

Reboita, M. S.; Rodrigues, M.; Pereira, R. A.; Freitas, C. H.; Oliveira, G. M.; Causes of Semi-Aridity in the Northeastern "Sertão." **Revista Brasileira de Climatologia**, jul. 2016, v. 19, p. 254–277. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/42091/29394> . Acesso em: 14 mar. 2023.

Reboita, M. S.; Gan, M. A.; Rosmeri, P. R.; Ambrizzi, T. Regimes of precipitation in South America: a bibliographical review. **Revista Brasileira de Meteorologia**, 2010, v. 25, p. 185–204. DOI:10.1590/S0102-77862010000200004. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbmet/a/yhrG5QPXhBCKZXCgKgyzWvf/?format=pdf&lang=pt> . Acesso em: 14 mar. 2023.

Reiter, E. R. Tropopause Circulations and Jet Streams. **World Survey of Climatology**, 1969, v. 4, p. 85-204. Climate of Free Atmosphere. Disponível em: <https://api.mountainscholar.org/server/api/core/bitstreams/78fc9853-12b6-4e15-bc6b-7b6e795f6c34/content> . Acesso em: 05 jan.2023.

Repinaldo, H F. B. **Vórtice Ciclônico em Altos Níveis e Corrente de Jato do Nordeste Brasileiro em anos de El Niño e La Niña**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto de Ciências Atmosféricas, Maceió - AL, abr. 2010, N° de ordem: MET-UFAL-MS-075. Disponível em: <http://www.repositorio.ufal.br/jspui/handle/riufal/877> . Acesso em: 05 jan. 2023.

Silva, B. F. P.; Fedorova, N.; Vladimir, L.; Anatoly, P.; Bruno, M. D. B.; Sistemas sinóticos associados às precipitações intensas no Estado de Alagoas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, 2011, v.26, p. 232-338. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbmet/a/cxh9LJCscNVR6KVKJFqXZwJ/?lang=pt&format=pdf> . Acesso em: 02 de jan. 2023.

Silva Dias, P. L.; Schubert, W. H.; DeMaria, M. Large-scale response of the tropical atmosphere to transient convection. **Journal of Atmospheric Sciences**, nov. 1983, v. 40, n. 11, p. 2689-2707. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/236587771_Large-Scale_Response_of_the_Tropical_Atmosphere_to_Transient_Convection , DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1983\)040<2689:LSROTT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1983)040<2689:LSROTT>2.0.CO;2) . Acesso em: 06 jan. 2023.

Silva, L. J.; Reboita, M. S.; da Rocha, R. P. Relation of the passage of cold fronts in the southern region of Minas Gerais (RSMG) with precipitation and frost events. **Revista Brasileira de Climatologia**, jan.-jul. 2014, v. 14, p. 229–246. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/36314/23311> . Acesso em: 06 jan. 2023.

Silva, J.P.R; REBOITA, M. S; ESCOBAR, G.C.J. Caracterização da Zona de Convergência do Atlântico Sul em campos atmosféricos recentes. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 25, 2019. p. 355-377. Disponível em:

<https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/download/64101/39277> . Acesso em: 23 mai. 2023.

Simpson, R. H. Evolution of the Kona Storm, a subtropical cyclone. **Journal of Meteorology**, Boston, 01 feb. 1952, v. 9, p. 24-35. Disponível em: [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1952\)009%3C0024:EOTKSA%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1952)009%3C0024:EOTKSA%3E2.0.CO;2) . Acesso em: 30 dez. 2022.

Sinclair, M. R. A climatology of anticyclones and blocking for the Southern Hemisphere. **Journal of Meteorology**, Boston, 01 feb. 1996, p. 245–263. Disponível em: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1996\)124%3C0245:ACOAAB%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1996)124%3C0245:ACOAAB%3E2.0.CO;2) . Acesso em: 02 jan. 2023.

Sotelo, L.M. S. **Variabilidade da Circulação na Alta Troposfera sobre a América do Sul. 2021.** Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 08 jun. 2021, p. 01-88. Disponível em: <https://doi.org/10.11606/D.14.2021.tde-27102021-174719> . Acesso em: 02 jan. 2022.

Sun, X.; Cook, K. H. Edward. K.V.; “The South Atlantic subtropical high: climatology and interannual variability”. **Journal of Meteorology**, Boston, 01 may 2017, p. 3279–3296. Disponível em: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0705.1> . Acesso em: 02 jan. 2022.

Vasquez, T. **Weather forecasting handbook.** Weather graphics technologies. Garland, Texas, 2006, p. 01-292. Disponível em: <https://archive.org/details/weatherforecasti0000vasq/mode/2up> . Acesso em: 20 jan. 2022.

Virji, H. Tropospheric circulation patterns over South America estimated from cloud winds. **Journal of Meteorology**, Boston, 01 mar. 1981, p. 599-610. Disponível em: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1981\)109%3C0599:APSOST%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1981)109%3C0599:APSOST%3E2.0.CO;2) . Acesso em: 02 jan. 2022.

Virji, H.; An estimative of the summertime tropospheric vorticity budget over South America. **Journal of Meteorology**, Boston, 01 mar. 1982, v. 110, n. 3, p. 217-224. Disponível em: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1982\)110%3C0217:AEOTST%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1982)110%3C0217:AEOTST%3E2.0.CO;2) . Acesso em: 23 jun. 2023.

Ynoue, R. Y. Reboita, M. S.; Ambrizzi, T.; da Silva, G. A.; **Meteorology: The Basics.** São Paulo, Oficina de Texto, 2017, p. 01-40, ISBN: 978-85-7975-263-6. Disponível em: http://ofitexto.arquivos.s3.amazonaws.com/Meteorologia-nocoas-basicas_DEG.pdf . Acesso em: 05 abr. 2023.