



Análise Termodinâmica de um Vórtice Ciclônico de Altos Níveis sobre o Nordeste do Brasil Thermodynamic Analysis of an Upper-Tropospheric Cyclonic Vortex over Northeastern Brazil

Matheus José Arruda Lyra¹ & Josefina Moraes Arraut²

¹Universidade Federal de Campina Grande, Programa de Pós-Graduação em Meteorologia,
Avenida Aprígio Veloso, 882, 58429-900, Campina Grande, PB, Brasil

²Universidade Federal de Campina Grande, Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas,
Avenida Aprígio Veloso, 882, 58429-900, Campina Grande, PB, Brasil
E-mails: matheuslyraa@gmail.com; josefina.arraut@gmail.com

Recebido em: 06/07/2020 Aprovado em: 15/09/2020

DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2020_4_302_309

Resumo

Os Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCANs) são um dos principais sistemas que provocam alterações no tempo na região Nordeste do Brasil (NEB). Os estudos sobre os VCANs tornam-se bastante importantes devido aos grandes valores pluviométricos gerados por estes sistemas. Como consequência da precipitação, podem-se acarretar grandes reveses socioeconômicos em cidades sem infraestrutura quanto fornecer água para regiões em longos períodos de estiagem. O principal objetivo deste trabalho foi avaliar as características termodinâmicas de um VCAN ocorrido em janeiro de 2004 sobre o NEB que reabasteceu expressivamente os reservatórios de um açude no estado da Paraíba. A análise foi realizada a partir de dados de reanálise ERA-Interim fornecidos pelo *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF). Imagens do *Geostationary Operational Environmental Satellite* (GOES) 12 no canal Infravermelho também foram utilizadas como ferramenta de auxílio para análise. Os dados referentes à precipitação foram obtidos por intermédio do satélite *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM). Durante os dias de precipitação mais elevada, a periferia oeste do VCAN manteve-se fixada sobre o NEB, onde, em contato com os elevados valores da temperatura de superfície e altos valores de umidade entre a superfície e médios níveis da atmosfera favoreceram a atividade convectiva na região. A avaliação dos campos meteorológicos indicou a variação de movimentos verticais em conjunto com a forte instabilidade devido ao elevado *Convective Available Potential Energy* em determinados pontos da periferia do vórtice, o que se tornou crucial para a variação das taxas de precipitação entre o sertão/semiárido e a costa leste do NEB.

Palavras-Chave: *Instabilidade; Precipitação; Região tropical*

Abstract

Upper-Tropospheric Cyclonic Vortexes (UTCV) are one of the main systems that cause large rainfall in the Brazilian Northeast (BNE). Studies about that vortexes became very important due to the large rainfall generated by these systems, which can lead to major socioeconomic setbacks in cities without infrastructure as well as providing water to regions with long periods of drought. The main purpose of this study was to analyze the UTCV thermodynamic characteristics that occurred in January 2004 over BNE. It significantly refueled the reservoirs of a weir in Paraíba state. The analysis was performed from ERA-Interim reanalysis from European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). Images from the Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES) 12 in the Infrared (IR) channel were also used as an aid to the analysis. Precipitation data was consulted through Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) satellite. The western UTCV periphery remained fixed over the BNE during the days of higher precipitation, where, in contact with the high surface temperature and high humidity values between low and medium atmospheric levels favored the convective activity in the region. The detailed assessment of the meteorological fields indicated the variation of vertical movements together with strong instability due to the high Convective Available Potential Energy in certain points of the vortex periphery, which became crucial for the variation of the precipitation rates between the hinterland/semiarid and the east coast of BNE.

Keywords: *Instability; Precipitation; Tropical region*

1 Introdução

Os Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCANs) são sistemas sinóticos de baixa pressão que se formam na alta troposfera (Kousky & Gan, 1981). Esses sistemas também se caracterizam por possuir um centro de circulação mais frio em relação a sua periferia (Kousky & Gan, 1981). Tendo em vista as várias consequências causadas pelas condições de tempo associadas aos VCANs, diversos estudos foram realizados ao longo dos anos (Ramirez *et al.*, 1999; Reboita *et al.*, 2017; Reis, 2018). Estudos realizados por Kousky & Gan (1981) mostraram que a formação do VCAN na região Nordeste do Brasil (NEB) ocorre devido à intensificação da Alta da Bolívia, associada ao adentramento de sistemas frontais de origem subtropical.

O VCAN é caracterizado como um sistema de pré-estação, onde durante os meses de verão é o principal produtor de chuva em regiões localizadas sobre a sua periferia, porém quando posicionado sobre o NEB, pode contribuir para maior escassez de chuva (Reboita *et al.*, 2016). Sazonalmente, durante o verão astronômico, os VCANs ocorrem com maior frequência nas regiões litorâneas e centro-sul do estado da Bahia, região central de Pernambuco, enquanto no outono, a região central e litorânea da Bahia possui a maior incidência dos vórtices (Pontes da Silva *et al.*, 2011; Reis, 2018).

Segundo Gomes *et al.* (2019), o mês de janeiro é, climatologicamente, um dos meses mais chuvosos do centro-sul do NEB e o mês mais chuvoso da pré-estação do setor norte do NEB. Devido ao potencial dos VCANs em influenciar o regime pluviométrico em regiões do semiárido e sertão do NEB, estes são classificados como sistemas extremamente importantes, por produzirem grandes valores pluviométricos em curtos espaços de tempo.

Os vórtices podem contribuir para a recarga de rios e/ou açudes, essa característica é de fundamental importância para grande quantidade de áreas do NEB que sofrem os efeitos de estiagens prolongadas. Neste estudo foi abordada a influência da precipitação gerada por um VCAN no reabastecimento dos reservatórios do açude Epitácio Pessoa, que abastece diversos municípios do estado da Paraíba.

Diante disto, o objetivo da pesquisa foi avaliar as condições termodinâmicas de um caso de VCAN, que elevou os índices pluviométricos na região do semiárido do NEB, logo após um período de longa estiagem.

2 Dados e Metodologia

2.1 Área de estudo

A área de estudo consiste na região Nordeste do Brasil, situada entre as latitudes 0 – 15°S e meridianos

30°W – 45°W. Segundo a classificação de Köppen (Barros *et al.*, 2012), a região é demarcada em quatro sub-regiões climáticas, observando-se aspectos característicos de cada área: Zona da Mata, Agreste, Sertão e o Meio Norte. Os mecanismos dinâmicos que produzem chuvas no NEB podem ser classificados em mecanismos de grande escala, responsáveis por cerca de 30% a 80% da precipitação observada dependendo do local. Durante os meses de verão os principais sistemas produtores de chuva na região são a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e o VCAN (Reboita *et al.*, 2010).

2.2 Identificação do VCAN

A identificação do VCAN foi realizada com o auxílio das imagens do *Geostationary Operational Environmental Satellites* (GOES 12) no canal Infravermelho (IR), consultadas através do banco de dados do GIBBS Service do *National Center for Environmental Information* (NCEI) em intervalo de 1 hora.

2.3 Dados de Reanálise

Os dados de reanálise global ERA-Interim utilizados nesta pesquisa foram fornecidos pelo *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), com resolução de 0,75° de latitude por 0,75° de longitude. Com o auxílio do software *Open Grid and Analysis Display System* (OpenGrADS), estes dados foram utilizados para a plotagem dos campos meteorológicos nos quatro horários sinóticos (00, 06, 12, 18 UTC). Foram analisados os campos horizontais de *Convective Available Potential Energy* (CAPE) em (J/kg) na superfície, linhas de corrente ($m \cdot s^{-1}$) e vorticidade relativa (s^{-1}) em 300 hPa e seções verticais de umidade específica ($g \cdot kg^{-1}$) e movimentos verticais (entre 1000 e 100 hPa) e temperatura potencial equivalente (K) entre 1000 e 100 hPa.

2.4 Análise de Precipitação Associada ao VCAN

Os dados diários de precipitação estimada foram oriundos do satélite *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM) por meio do produto 3B42, com resolução espacial de 0,25° de latitude por 0,25° de longitude. No presente estudo foram apresentados os totais de precipitação acumulados em 24 horas do dia em questão, ou seja, a precipitação do dia 22 de janeiro corresponde à precipitação entre 00UTC do dia 22 de janeiro e 00UTC do dia 23 de janeiro e assim sucessivamente. Dados mensais do *Global Precipitation Climatology Project* (GPCP), com resolução de 2,5° de latitude por 2,5° de longitude foram utilizados

para calcular a anomalia de precipitação a partir de uma base de dados entre 1979 e 2016.

3 Resultados

Os campos de linhas de corrente e vorticidade relativa em 300 hPa (Figura 1) mostram o desenvolvimento do vórtice ao longo dos dias analisados. O centro do VCAN apresentou menores valores de vorticidade relativa ao longo dos dias, corroborando com as descrições de Pinheiro *et al.*, (2016). O sistema atmosférico em estudo se desenvolveu entre os dias 16 e 25 de janeiro de 2004. Este apresentou formação oceânica, perdurando por cerca de dois dias, passando a ter seu núcleo fixado ao continente durante o restante de sua duração. De acordo com Ramirez *et al.* (1999), os VCANs que possuem deslocamento predominante de leste para oeste são mais intensos, sendo este um fator para a grande intensidade do vórtice analisado. A análise em detalhes do VCAN consistiu entre os dias 22 e 24, onde os maiores valores pluviométricos associados à sua convecção foram identificados.

A Figura 2 apresenta o campo de anomalia de precipitação para o mês de janeiro de 2004, onde pôde ser identificada uma anomalia positiva sobre todo o território do NEB. Segundo Costa (2018), o mês de janeiro de 2004 caracterizou-se pelos elevados valores pluviométricos registrados sobre o NEB, após um longo período de estiagem, desde 1998. Conforme descrito por Alves *et al.* (2004), os elevados valores de precipitação foram consequentes da atuação do VCAN, como também à intensificação dos ventos alísios de nordeste que impulsionaram a ZCIT a atingir o setor norte do NEB com maior intensidade. Além desses fatores, um transporte anômalo de umidade oriundo

da Amazônia e do Oceano Atlântico na baixa troposfera favoreceram a convecção.

Entre os dias 22 e 24, a periferia oeste do VCAN manteve-se sobre a costa leste e região semiárida do NEB. As maiores formações de nebulosidade, bem como precipitação (Figura 3), se localizaram na direção do deslocamento do vórtice, conforme descrito por Kousky & Gan (1981). Os maiores valores de precipitação sobre a Paraíba, Rio Grande do Norte e Ceará ocorreram no dia 22 (Figura 3A), enquanto no dia 23 estes picos concentraram-se principalmente sobre o Maranhão e Piauí (Figura 3B). No dia 24 (Figura 3C) a precipitação ocorreu com maior intensidade sobre o oceano, onde estava localizada a periferia norte do vórtice.

O maior destaque para este estudo remeteu-se à importância do açude Epitácio Pessoa, o qual é fundamental para o abastecimento de água da população do semiárido e sertão do estado da Paraíba. A Figura 4A apresenta os volumes dos reservatórios do açude entre os anos de 2002 e 2004, enquanto a Figura 4B mostra os valores durante o mês de ocorrência do VCAN em análise. Estas informações foram obtidas através do portal da Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba (AES). Os valores pluviométricos causados pelo vórtice reabasteceram expressivamente o volume dos reservatórios após 6 anos de estiagem. Os dados estimados do volume do reservatório do açude indicavam que, até o dia 12 de janeiro, seu volume concentrava-se em torno de 23,9%, enquanto no dia 29 este volume passou para 88,8% de sua capacidade total. Os VCANs atuam com predominância sobre o NEB durante a estação do verão, possibilitando contribuições como a descrita acima em janeiro de 2004. Em contrapartida, quando seus centros estão concentrados sobre a região, os vórtices contribuem para o déficit de precipitação, como em janeiro de 2007 (Ferreira *et al.*, 2019).

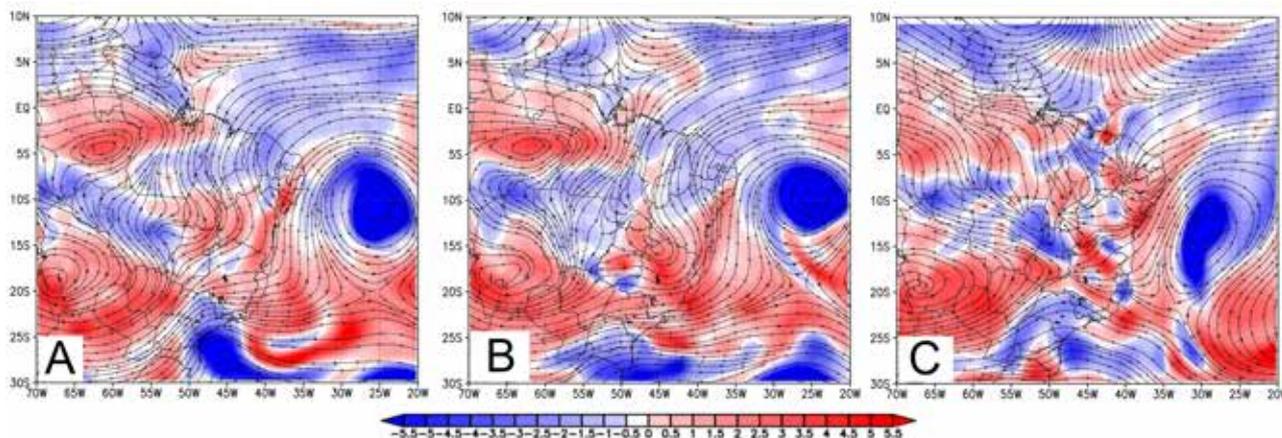


Figura 1 Campos de linhas de corrente e vorticidade relativa ($\cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) em 300 hPa para os dias 22 (A), 23 (B) e 24 (C) de janeiro de 2004 à 00UTC.

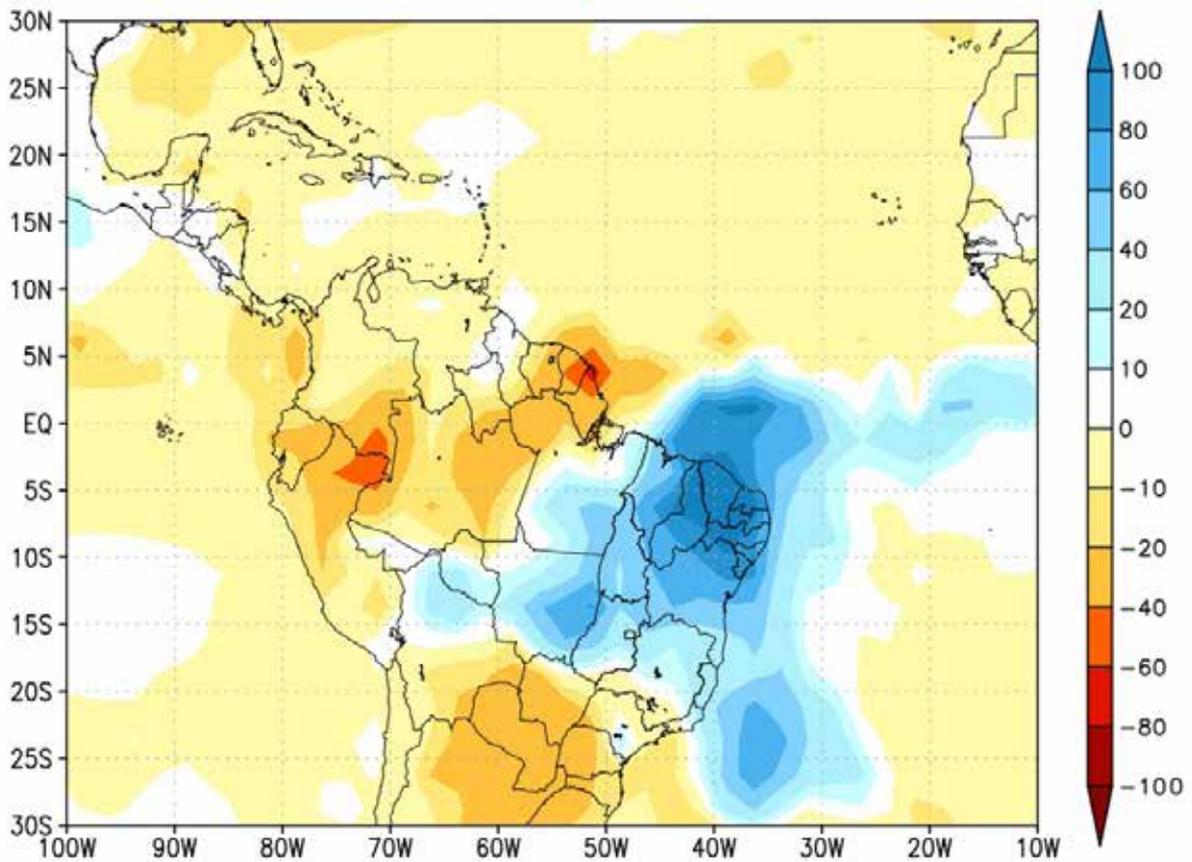


Figura 2 Anomalia de precipitação (mm/mês) para janeiro de 2004.

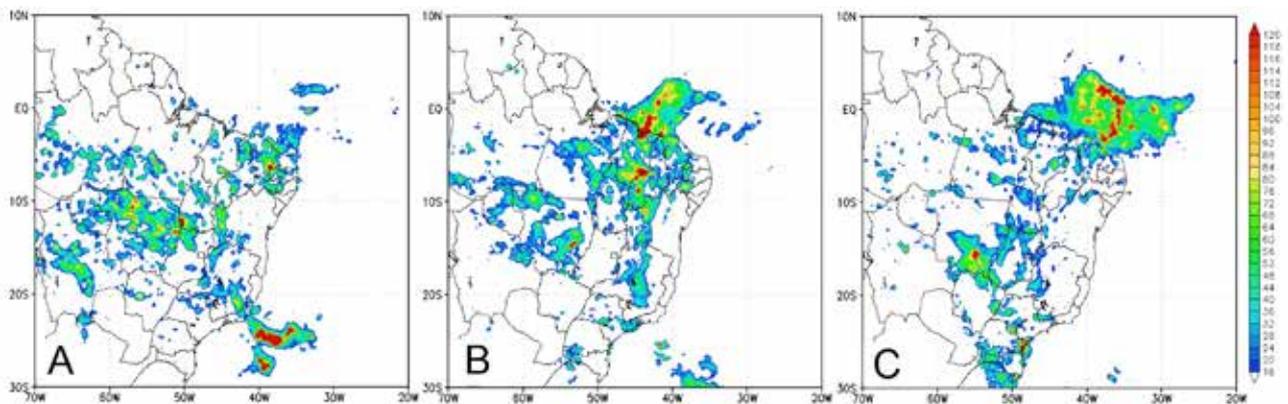
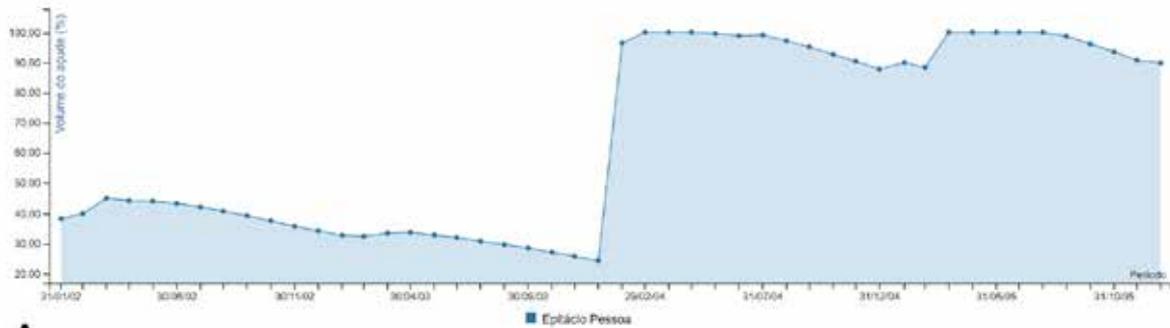


Figura 3 Precipitação acumulada (mm/24h) calculada pelo TRMM para os dias 22 (A), 23 (B) e 24 (C) de janeiro de 2004.

A análise dos campos de temperatura potencial equivalente foi realizada por meio dos cortes meridionais em 45°, 35° e 25°W a 00UTC e 12UTC. A escolha desses recortes foi definida com base na posição do VCAN e de sua atividade convectiva associada no intuito de avaliar as características termodinâmicas em cada região. Na faixa longitudinal de 45°W foram registrados os maiores

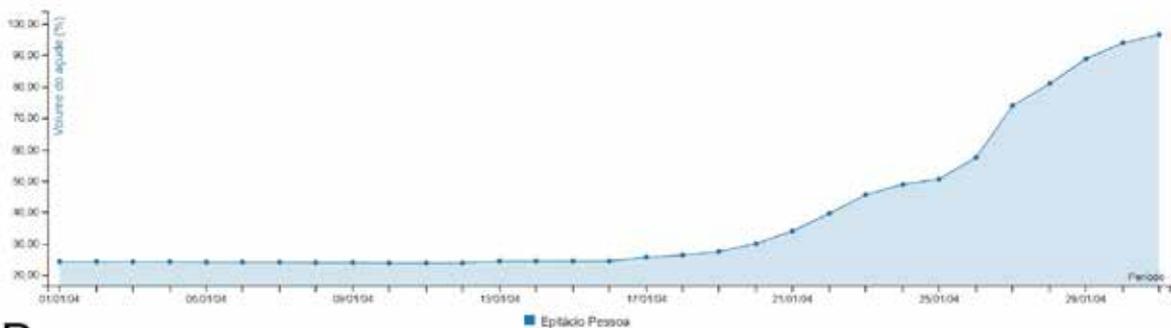
valores pluviométricos associados ao vórtice, em 35°W na região costeira do NEB. E por fim 25°W, onde localizava-se o centro do VCAN observaram-se valores mínimos de temperatura potencial equivalente, próximos a 318K, com uma região de fortes gradientes térmicos entre 900-800hPa para ambos os horários analisados.

VOLUME DO AÇUDE EPITÁCIO PESSOA



A

VOLUME DO AÇUDE EPITÁCIO PESSOA



B

Figura 4 Volume dos reservatórios do açude Epitácio Pessoa (%) durante o período entre os anos de 2002 e 2004 (A); durante o mês de janeiro de 2004 (B).

O recorte realizado nas regiões de máxima precipitação em 45°W mostraram elevadas temperaturas próximo à superfície, porém com pouca variação em médios e altos níveis tanto a 00UTC (Figura 5A) quanto para 12UTC (Figura 5D). Em 35°W (Figura 5B e 5F) os valores de temperatura na periferia do vórtice foram menores em comparação ao recorte supracitado em ambos os horários analisados. Para o recorte da região onde localizava-se o centro do vórtice observou-se valores mínimos de temperatura potencial equivalente a 318 K, com uma região de fortes gradientes térmicos entre 900-800 hPa, para ambos os horários analisados. Ferreira & Souza (2019) apresentaram em um estudo de caso que o sumidouro aparente de umidade também ocorreu em baixos níveis (próximo à 800 hPa). Para o nível entre 500 e 300 hPa, onde o centro do VCAN foi identificado (8°S) notou-se um aumento da temperatura potencial equivalente e consequentemente inibição da convecção sobre esta área, impossibilitando a formação de nebulosidade (Figura 5C e 5F). Segundo Emanuel (1989), é necessária uma diminuição nos valores de θ_e para a formação de tempestades severas,

essas condições podem ser observadas na periferia do VCAN, principalmente no recorte de 35°W.

A análise de umidade e movimento vertical foi realizada para os mesmos recortes e horários supracitados. Na região periférica do VCAN (Figura 6A e 6D) observou-se movimentos ascendentes sobre a região com valores mais altos de umidade ao longo da seção em diferentes níveis verticais. Na região de maiores valores de precipitação observou-se aumento dos valores de umidade aproximadamente em 45°W, onde localizava-se a periferia do sistema, assim como os movimentos ascendentes e elevados valores de temperatura na superfície. Como consequência, resultou-se uma grande atividade convectiva sobre parte do semiárido do NEB, ao contrário da região costeira em 35°W (Figura 6B e 6E), onde não houve grande concentração de umidade. Segundo Cavalcanti *et al.* (2002) apesar do NEB, climatologicamente, ser uma área de convecção suprimida, quando ela está sob a ação de algum sistema de escala sinótica pode se tornar uma grande área de concentração de umidade na atmosfera. Entre 45° e 40°W, pontos de maiores valores pluviométricos registrados, foi observada

Análise Termodinâmica de um Vórtice Ciclônico de Altos Níveis sobre o Nordeste do Brasil
 Matheus José Arruda Lyra & Josefina Moraes Arraut

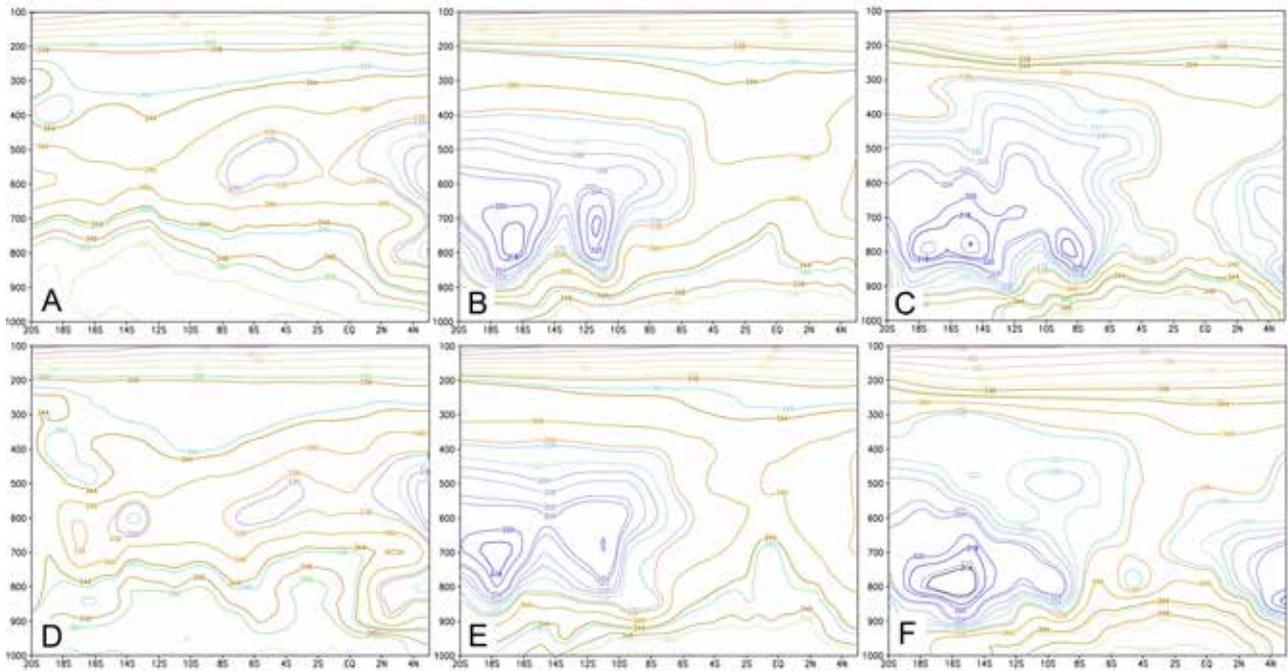


Figura 5 Seções verticais entre 1000 e 100 hPa para o campo de temperatura potencial equivalente (θ_e) para os meridianos 45°W à 00UTC (A) e 12UTC (D); 35°W à 00UTC (B) e 12UTC (E); 25°W à 00UTC (C); 12UTC (F) para o dia 23 de janeiro de 2004.

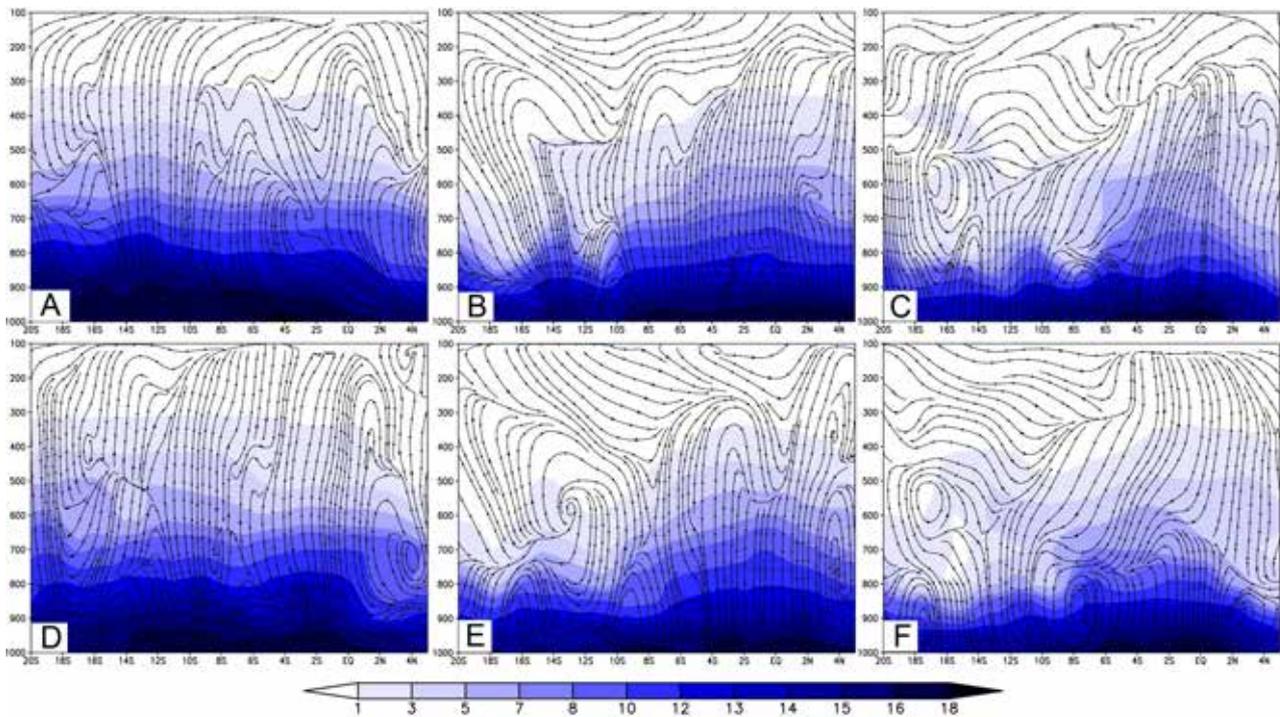


Figura 6 Seções verticais entre 1000 e 100 hPa para os campos de umidade específica ($\cdot 10^3$) e movimento vertical para os meridianos 45°W às 00UTC (A) e 12UTC (D); 35°W às 00UTC (B) e 12UTC (E); 25°W às 00UTC (C); 12UTC (F) para o dia 23 de janeiro de 2004.

umidade elevada até aproximadamente 300 hPa. Por outro lado, as seções verticais plotadas para 25°W indicaram valores mínimos de umidade observados no centro do VCAN, como se pode observar entre 6°-10°S às 00UTC (Figura 6C), acompanhado de movimentos descendentes. Às 12UTC (Figura 6F) pôde-se observar fracos movimentos ascendentes na mesma região supracitada, em decorrência da forte divergência no horário anterior. Um estudo sinótico realizado por Reboita *et al.* (2017) mostrou que as regiões de movimentos ascendentes se concentram a oeste do VCAN, e as outras regiões adjacentes são preenchidas por movimentos subsidentes e ar seco

O campo do CAPE apresentou valores entre 1000 e 1400 J/Kg entre os estados do Piauí, Ceará, Paraíba, Pernambuco e Bahia, caracterizando forte instabilidade,

tornando a região favorável à formação convectiva e justificando a precipitação registrada para o dia estudado (Figura 7). De forma geral, os maiores valores identificados se concentraram sobre a periferia oeste do vórtice, principalmente durante as primeiras horas do dia. Estudos realizados por Barreto (2015) e Ferreira (2017) verificaram que o VCAN quando esteve posicionado sobre o NEB, em alguns momentos inibiu ou favoreceu as ocorrências das chuvas, e isso pode informar a irregularidade no comportamento da chuva sobre a região durante a atuação do sistema. Esta irregularidade observada pelos autores supracitados pode estar relacionada à variação do CAPE em regiões distintas da região, como pôde ser observado nos resultados apresentados no presente estudo.

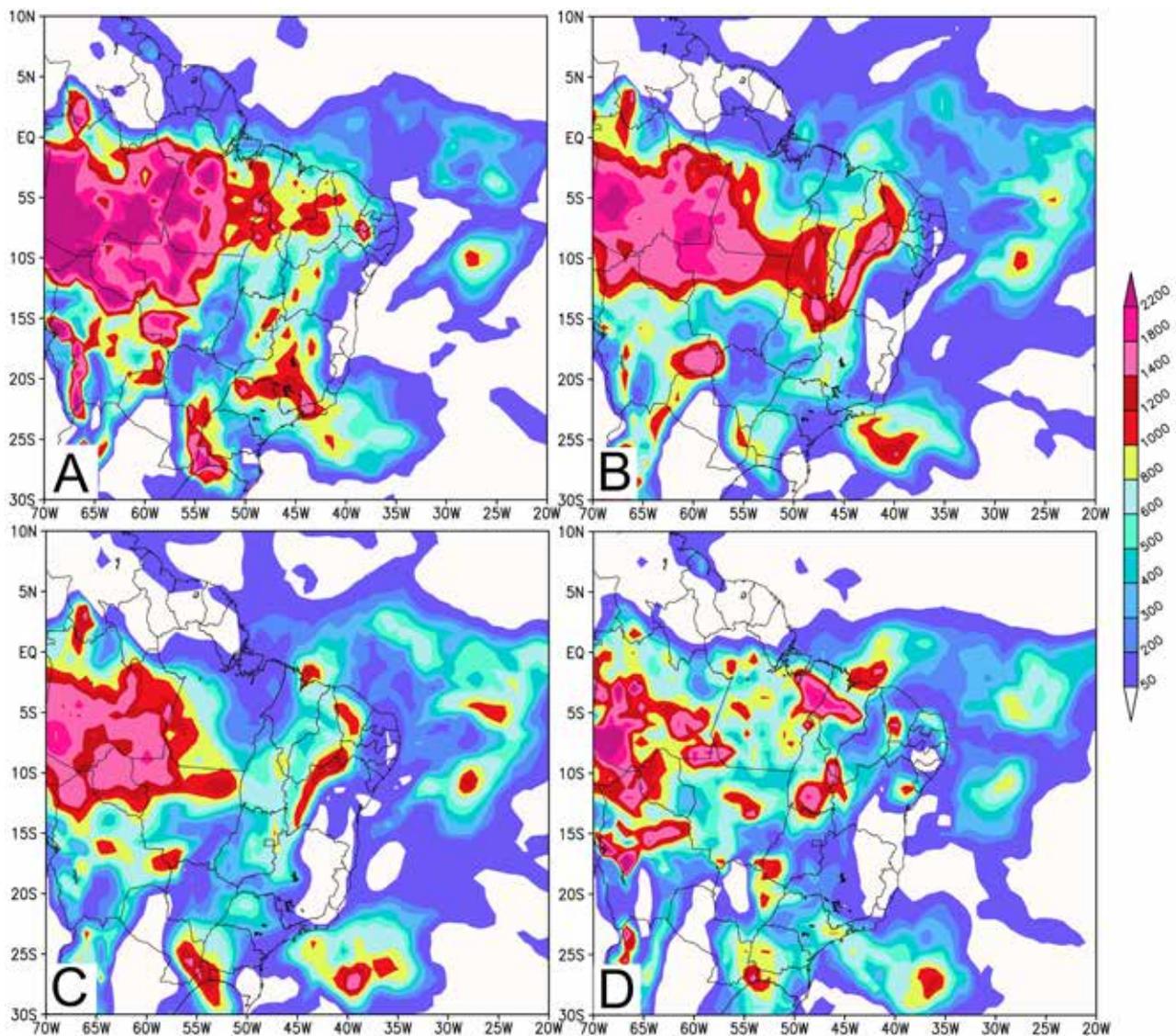


Figura 7 Campo do CAPE para o dia 23/01/2004 às 00 UTC (A), 06 UTC (B), 12 UTC(C) e 18UTC (D).

4 Conclusões

O VCAN analisado se desenvolveu por um período de 9 dias, gerando grandes valores pluviométricos sobre o sertão e semiárido do NEB entre os dias 22 e 24 de janeiro de 2004. Durante estes três dias, a periferia oeste do vórtice manteve-se fixa sobre a região, onde, em contato com os elevados valores da temperatura de superfície e altos valores de umidade entre a superfície e médios níveis da atmosfera, favoreceram a atividade convectiva na região.

A avaliação em detalhes dos campos meteorológicos indicou grandes movimentos ascendentes sobre a periferia oeste do vórtice, além da grande concentração de umidade específica. Esses aspectos em conjunto aos elevados valores do CAPE tornaram-se fatores cruciais para o fortalecimento da convecção, gerando elevados valores de precipitação no sertão/semiárido do NEB (aproximadamente entre 45-40°W). Em contrapartida, a região costeira (próximo a 35°W) não registrou índices elevados de chuva.

As características do VCAN apresentadas neste estudo incrementam a literatura sobre os mesmos, auxiliando na compreensão da dinâmica desses sistemas, além de oferecer maiores subsídios nas práticas de previsão de tempo a curto prazo no NEB.

5 Referências

- Alves, J.M.B.; Campos, J.N.B.; Ferreira, F.F. & Studart, T.M.C. 2004. As chuvas de janeiro/2004 no Nordeste do Brasil, suas características atmosféricas e seus impactos nos recursos hídricos da região. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 5, São Luiz, MA, p. 1-19.
- Barreto, E.C.A. 2015. *Avaliação do desempenho do sistema de previsão por conjuntos do CPTEC/INPE na detecção de vórtices ciclônicos de altos níveis na região tropical*. Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Dissertação de Mestrado, 108p.
- Barros, A.H.C.; Filho, J.C.A.; Silva, A.B. & Santiago, G.A.C.F. 2012. *Climatologia do estado de Alagoas*. Recife, Embrapa, Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 32p.
- Cavalcanti, E.P.; Gandu, A.W. & Azevedo, P.V. 2002. Transporte e balanço de vapor d'água atmosférico sobre o Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 17(2): 207-217.
- Costa, R.F. 2018. *Fonte de umidade para a convecção em Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis: Dois estudos de caso*. Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Universidade Federal de Campina Grande, Dissertação de Mestrado, 91p.
- Emanuel, K.A. 1989. The finite-amplitude nature of tropical cyclogenesis. *Journal of Atmospheric Sciences*, 46: 3431-3456.
- Ferreira, R.R. 2017. Aspectos Termodinâmicos de um Vórtice Ciclônico de Altos Níveis sobre o Nordeste do Brasil. Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Universidade Federal de Campina Grande, Dissertação de Mestrado, 85p.
- Ferreira, R.R. & Souza, E.P. 2019. Aspectos Termodinâmicos de um Vórtice Ciclônico de Altos Níveis sobre a Região Nordeste do Brasil: um Estudo de Caso. *Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ*, 42(3): 504-513.
- Ferreira, G.W.S.; Reboita, M.S. & Rocha, R.P. 2019. Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis nas Cercanias do Nordeste do Brasil: Climatologia e Análise da Vorticidade Potencial Isentrópica. *Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ*, 42(3): 568-585.
- Gomes, H.B.; Ambrizzi, T.; Pontes Da Silva, B.F.; Hodges, K.; Silva Dias, P.L.; Herdies, D.L.; Silva, M.C. & Gomes, H.B. 2019. Climatology of easterly wave disturbance over the tropical South Atlantic. *Climate Dynamics*, 53: 1393-1411.
- Kousky, V.E. & Gan, M.A. 1981. Upper tropospheric cyclonic vortices in the tropical South Atlantic. *Tellus*, 33: 538-551.
- Pontes da Silva, B.F.P.; Fedorova, N.; Levit, V.; Brito, B.M. & Peresetsky, A. 2011. Sistemas sinóticos associados às precipitações intensas no Estado de Alagoas. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 26(3): 295-310.
- Ramirez, M.C.V., Kayano, M.T. & Ferreira, N.J. 1999. Statistical analysis of upper tropospheric vortices in the vicinity of northeast Brazil during the 1980-1989 period. *Atmosfera*, 12: 75-88.
- Reboita, M.S.; Gan, M.A.; Rocha, R.P. & Ambrizzi, T. 2010. Regimes de precipitação da América do Sul: Uma revisão bibliográfica. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 25: 185-204.
- Reboita, M.S.; Rodrigues, M.; Armando, R.P.; Freitas, C.; Martins, D. & Miller, G. 2016. Causas da Semiaridez no sertão nordestino. *Revista Brasileira de Climatologia*, 19: 254-277.
- Reboita, M.S.; Campos, B.; Santos, T.; Gan, M.A. & Carvalho, V.S.B. 2017. Análise sinótica e numérica de um VCAN no Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 10(1): 41-59.
- Reis, J.S. 2018. *Características dinâmicas e termodinâmicas dos Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis no Nordeste do Brasil*. Programa de Pós-Graduação em Ciências Climáticas, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Dissertação de Mestrado, 77p.