

Artigo

Estudo Sinótico e da Estrutura Vertical de um Vórtice Ciclônico de Altos Níveis Ocorrido em Janeiro de 2016

Matheus José Arruda Lyra¹ , Josefina Moraes Arraut¹¹*Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, Brasil.*

Recebido em: 29 de Novembro de 2022 - Aceito em: 17 de Fevereiro de 2023

Resumo

Os Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN) são um dos principais sistemas que provocam alterações no tempo durante a pré-estação chuvosa do Nordeste do Brasil (NEB). O principal objetivo deste estudo é compreender a configuração do VCAN que se desenvolveu durante 26 dias em janeiro de 2016 através da análise sinótica e termodinâmica. Além do vórtice, sistemas de diferentes escalas espaciais e temporais como a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), Oscilação Madden-Julian (OMJ) se configuraram simultaneamente, junto com o El Niño que se encontrava ativo desde 2015. A conexão entre os sistemas supracitados provocou um grande aumento nos índices de chuva no NEB. A configuração do VCAN em conjunto com a ZCAS sendo impulsionados pela propagação da OMJ determinaram o excesso de chuvas durante os dias analisados. A periferia oeste do vórtice se posicionou próxima à costa leste do NEB, provocando uma alteração no padrão de convergência do transporte de umidade de grande escala, que passou a convergir sobre o NEB, elevando os índices de precipitação em alguns estados. A avaliação da estrutura vertical do VCAN por meio de seções verticais indicou movimentos ascendentes somente na periferia oeste, a periferia leste foi caracterizada por forte inibição convectiva.

Palavras-chave: VCAN, região tropical, ZCAS, OMJ.

Upper Tropospheric Cyclonic Vortex Synoptic and Vertical Structure Study Occurred in January 2016

Abstract

The Upper-Tropospheric Cyclonic Vortexes (UTCV) are one of the main synoptic systems that provoke alterations in the weather during the pre-rainy season over Northeastern Brazil (BNE). The main objective of the study is to understand the UTCV configuration that was developed during 26 days in January 2016 through synoptic and thermodynamic analysis. In addition to the vortex, systems of different spatial and temporal scales such as the South Atlantic Convergence Zone (SACZ), Madden-Julian Oscillation (OMJ) were configured simultaneously, along with the El Niño that had been active since 2015. The connection between these systems caused a large increase in rainfall over the BNE. The UTCV configuration together with the SACZ being driven by the propagation of the MJO determined the excess of rainfall during the days analyzed. The western periphery of the vortex was positioned close to the BNE east coast, causing a change in the convergence pattern of large-scale moisture transport, which began to converge on the BNE, increasing precipitation rates in some states. The evaluation of the UTCV vertical structure through vertical sections indicated upward movements only in the western periphery, the eastern periphery was characterized by strong convective inhibition.

Keywords: UTCV, tropical region, SACZ, MJO.

1. Introdução

A região Nordeste do Brasil (NEB) é afetada ao longo do ano por diversos sistemas de diferentes escalas

meteorológicas. De acordo com [Reboita et al. \(2010\)](#), dois diferentes sistemas de escala sinótica moldam o regime pluviométrico no NEB durante os meses de verão. A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), que consiste em

uma grande região de confluência dos ventos alísios de nordeste oriundos do Hemisfério Norte e dos ventos Alísios de sudeste, oriundos do Hemisfério Sul (Hastenrath, 1985; Uvo e Nobre, 1989; Lyra *et al.*, 2019). E os Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN), que se tratam de sistemas sinóticos desenvolvidos na alta troposfera e caracterizam-se por uma circulação fechada com o centro mais frio em relação à sua periferia (Kousky e Gan, 1981).

A importância dos VCANs para a meteorologia do NEB motivou diversos estudos a seu respeito. Kousky e Gan (1981) destacaram que a formação dos vórtices se deve à intensificação da Alta da Bolívia associada ao adiantamento de sistemas frontais de origem extratropical. Ramirez *et al.* (1999) identificaram a origem dos VCANs como resultado da formação de cavados a norte/noroeste da Alta Subtropical do Atlântico Sul. Posteriormente, Paixão e Gandu (2000) também determinaram um outro processo de desenvolvimento desses sistemas, através da intensificação da convecção na África, gerando um par de anticiclones em altos níveis que acarretam o aprofundamento de um cavado à oeste, dando origem aos VCANs do NEB.

Os VCANs atuantes no NEB são grandes produtores de chuva em regiões localizadas sobre a sua periferia, porém podem contribuir para maior escassez de chuva em regiões localizadas sobre seu centro (Reboita *et al.*, 2017; Reis *et al.*, 2021). Segundo Gan e Kousky (1986) a maior convergência ocorre no ramo oeste dos VCAN, acarretando a intensificação da atividade convectiva na direção do movimento dos vórtices. A maior frequência dos vórtices ocorre durante o mês de janeiro (Kousky e Gan, 1981; Ramirez *et al.* 1999; Repinaldo *et al.* 2020). Estes sistemas podem produzir chuvas muito intensas, e por vezes representam quebras entre longos períodos de estiagem.

A Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) consiste em uma banda de nebulosidade subtropical que pode ser identificada nos compostos climatológicos de precipitação e Radiação de Onda Longa (ROL; Kodama, 1992; Rosa *et al.*, 2020). Durante o verão austral, a ZCAS é uma das principais perturbações atmosféricas responsável pela precipitação na região Sudeste do Brasil, onde sua formação e desenvolvimento estão ligados a um sistema frontal, em conjunto com a Alta da Bolívia e o VCAN do Nordeste, onde existem efeitos combinados da região Sudeste ao Nordeste do Brasil, intensificando sistemas convectivos a partir do padrão ZCAS-VCAN (Ramirez *et al.*, 1999; Braga e Ambrizzi, 2022).

Fenômenos de escala intrassazonal e interanual também afetam o regime pluviométrico do NEB. A Oscilação Madden-Julian (OMJ) é a principal forçante de variabilidade intrassazonal na região tropical do Brasil, especificamente na Amazônia e no NEB (Valadão *et al.*, 2017; Mayta *et al.*, 2019). De acordo com De Souza e Ambrizzi (2006), a OMJ é compreendida a partir da propagação para

leste de ondas equatoriais longas em um período de 30 a 60 dias até que se complete seu ciclo intrassazonal, que se compreende em 8 fases distintas. A primeira corresponde ao Índico ocidental, posteriormente, a OMJ se propaga em direção ao Oceano Pacífico. A OMJ é uma resposta anômala das células de Walker e Hadley, e contribui com sinais de baixa frequência para supressão ou convecção de sistemas atmosféricos tropicais (Jiang *et al.*, 2020).

A fase positiva do El Niño Oscilação Sul consiste no aquecimento anômalo das águas superficiais e subsuperficiais do Oceano Pacífico Equatorial, sendo o principal sistema de regime interanual a afetar o regime pluviométrico do NEB devido a alteração na circulação de Walker (Hastenrath, 1976; Kousky *et al.*, 1984; Reboita *et al.*, 2021).

Neste estudo pretende-se compreender a configuração do longo episódio de um VCAN através de uma análise sinótica e termodinâmica, em conjunto com a atuação da ZCAS e a propagação de OMJ. Onde, simultaneamente, determinaram o excesso de chuvas em janeiro de 2016 na Região Nordeste do Brasil, a qual vinha passando por um longo período com déficit pluviométrico.

2. Materiais e Métodos

2.1. Produtos de satélite

Imagens do satélite *Geostationary Operational Environmental Satellite* (GOES) 13 no canal espectral Infravermelho (IR), em um intervalo de 1 hora foram disponibilizadas. Essas imagens foram obtidas através do banco de dados do portal da Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais (DSA) do Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC/INPE).

2.2. Dados de reanálise

Foram utilizados dados de reanálise global ERA-Interim fornecidos pelo *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF), para o período compreendido entre 1988-2016. A resolução espacial dos dados foi de 0,75° de latitude por 0,75° de longitude, obtidos para os quatro horários sinóticos: 00, 06, 12 e 18 UTC. Todos os dados, com exceção dos dados de superfície, foram utilizados em doze níveis isobáricos (1000, 925, 850, 800, 700, 650, 600, 500, 400, 300, 200 e 100 hPa). As seguintes variáveis foram utilizadas como ferramenta de pesquisa: componente zonal do vento (u), componente meridional do vento (v), omega (ω), umidade específica (q), umidade relativa (ur), temperatura do ar (T), pressão à superfície (P_s) e temperatura de superfície do mar (TSM), vorticidade relativa (ζ), temperatura potencial (θ), temperatura potencial equivalente (θ_e), perfil de convergência e, por fim, a estimativa de *Convective Available Potential Energy* (CAPE) e *Convective inhibition Energy* (CINE): consistindo na flutuabilidade que o ar superficial teria em cada nível vertical sendo estimada pela diferença entre o

ar superficial θ_e no nível de 1000 hPa e da temperatura potencial equivalente saturada (θ_{es}) em cada um dos níveis de pressão. Essa grandeza recebe o nome de índice de fluatibilidade do ar superficial e é apresentada como um perfil vertical. Isto é, o índice de fluatibilidade do ar superficial é dado em cada nível pela diferença entre o valor de θ_e no nível de 1000 hPa e o valor local de θ_{es} .

As seções verticais de umidade específica, movimentos verticais, perfil de convergência, temperatura potencial, temperatura potencial equivalente e estimativa de CAPE e CINE foram plotadas entre 1000 e 200 hPa. A seção vertical consistiu em definir uma latitude de um determinado local, e variar a longitude entre dois pontos, resultando em uma imagem de um corte vertical na atmosfera que nos possibilitou analisar a estrutura vertical do VCAN.

Os dados de *Outgoing Long-wave Radiation* (OLR - ROL) foram obtidos através da reanálise do *National Center for Environmental Prediction* (NCEP) e *National Center for Atmospheric Research* (NCAR), com resolução de 1° de latitude por 1° de longitude. A consulta de uma outra fonte de dados se fez necessária devido à inexistência da variável na fonte anteriormente citada.

2.3. Cálculo do transporte de umidade integrado na vertical

O campo do transporte de umidade integrado na vertical ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$) foi utilizado para verificar a distribuição de umidade no NEB durante a ocorrência do VCAN. As variáveis utilizadas para o cálculo dessa componente são as componentes zonal (u) e meridional do vento (v) dispostas em $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, umidade específica (q ; $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$), P_0 é a pressão em superfície (hPa) e g é a aceleração da gravidade ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$). Conforme descrito por Arraut (2007), este campo é calculado a partir da integral na variável de massa, uma vez que q é uma razão de massas. Dessa forma, o cálculo dessa componente é representado abaixo através da Eq. (1).

$$Qu = \int_{P_0}^P qu dm = \int_{P_0}^P qu \frac{dP}{g} \quad (1)$$

A aceleração da gravidade (g) é considerada constante para o intervalo de integração, e P é a pressão em superfície. Qv é calculado da mesma forma, logo o transporte vetorial de umidade integrado na vertical e a sua divergência horizontal são dadas por:

$$\overrightarrow{QV} = (Qu, Qv) \quad (2)$$

$$DQV = \nabla h \cdot \overrightarrow{QV} \quad (3)$$

As unidades de Qu e Qv são representadas em $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ e podem ser facilmente compreendidas supondo o vento

constante na Eq. (2). Dessa forma é apresentada a Eq. (4):

$$Qu = u \int_{P_0}^P q \frac{dP}{g} \quad (4)$$

Portanto, o transporte de umidade integrado na vertical é o produto da quantidade total de vapor d'água contida em uma coluna, dada em $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$, pelo vento. Supõe-se uma fila de colunas de ar com bases quadradas de área igual a 1 m^2 , alinhadas na direção zonal. A cada segundo um número u dessas colunas atravessa um segmento de 1 metro linear com orientação perpendicular a u . Ou seja, são Qu quilogramas de vapor de água atravessando cada metro linear a cada segundo.

2.4. Dados de precipitação

As informações referentes à precipitação provocada pelos VCANs foram consultadas através dos dados de precipitação estimada do satélite *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM) através do produto 3B42, com resolução espacial de 0,25° de latitude por 0,25° de longitude.

3. Resultados e Discussão

Abaixo serão analisados em detalhes os sistemas de diferentes escalas que determinaram o excesso de chuvas na região Nordeste do Brasil no mês de janeiro de 2016, com foco no Vórtice Ciclônico de Altos Níveis, durante 3 dias de seu desenvolvimento (20, 21 e 22) que durou aproximadamente 26 dias. Apesar do longo período de vida do vórtice em questão, optou-se por uma análise detalhada dos dias da atuação simultânea em conjunto dos outros sistemas de diferentes escalas espaciais e temporais.

3.1. Sistemas identificados

A Fig. 1 apresenta as anomalias de Temperatura de Superfície do Mar (TSM) em parte da faixa tropical entre novembro de 2015 e janeiro de 2016. As temperaturas mais elevadas que se estendem sobre o oceano Pacífico ao largo da costa do Peru mostram o aquecimento acima do normal na região, que representa o El Niño. De acordo com Braga e Ambrizzi (2022), o El Niño está ligado com a variação no número de ocorrências dos VCANs que atuam sobre o NEB. Apesar do El Niño aumentar os índices de seca na região, o mesmo estudo aponta para uma maior ocorrência dos vórtices em anos de El Niño, além de sua maior intensidade. Em parte do Atlântico Norte em janeiro de 2016 (Fig. 1c), ao largo da costa norte do Brasil, as regiões em azul indicam uma temperatura de superfície do mar está abaixo do normal. Esta situação desfavoreceu a atuação da Zona de Convergência Intertropical sobre o NEB, sendo este um dos principais sistemas de escala sinótica responsáveis pelo regime pluviométrico do norte

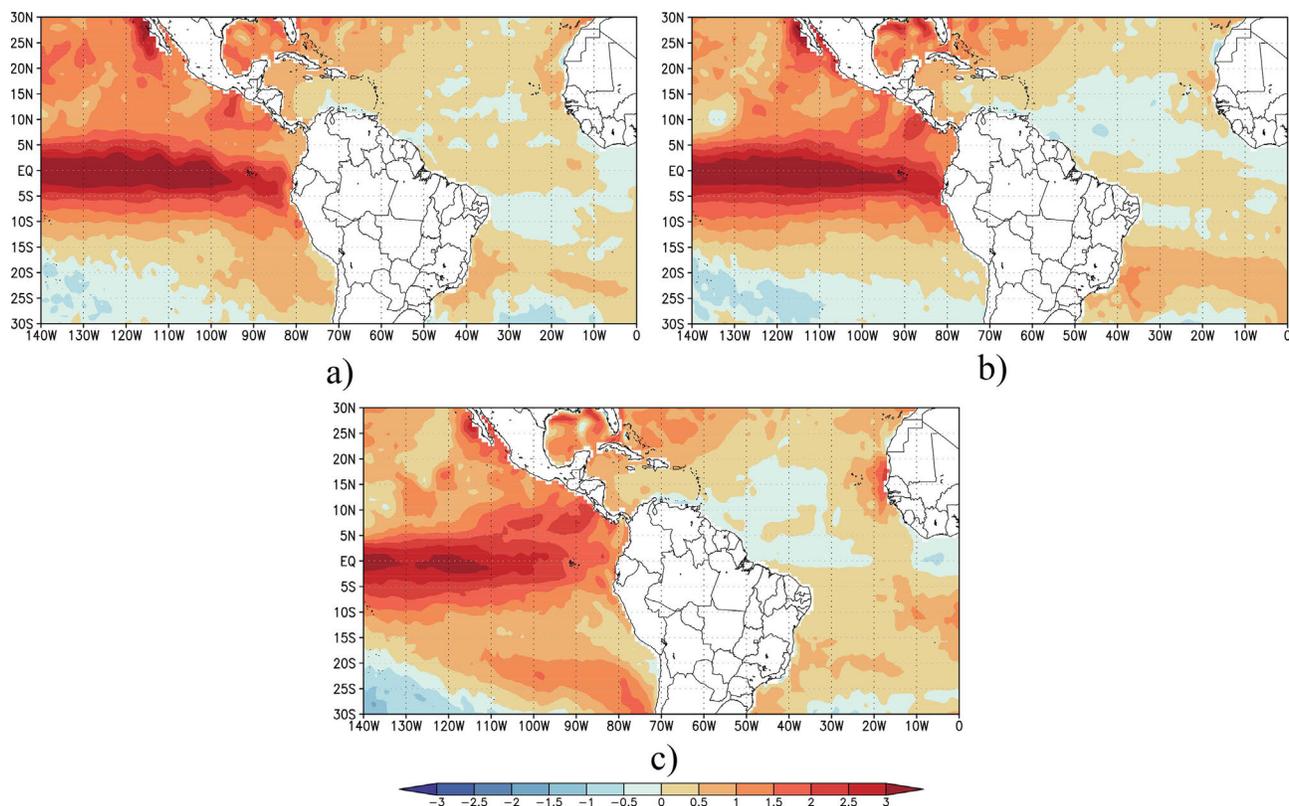


Figura 1 - Anomalias da Temperatura de Superfície do Mar (°C) em parte da faixa tropical para (a) novembro de 2015, (b) dezembro de 2015, (c) janeiro de 2016.

da região. A região alaranjada que se estendeu próxima da costa da Região Sudeste ao estado da Bahia indicou uma TSM com valores acima do normal, o que colaborou com o avanço de uma frente fria na região, ajudando no desenvolvimento da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS).

Na Fig. 2 é apresentado o diagrama de fase Real Multivariate OMJ index (RMM) desenvolvido através do estudo de Wheeler e Hendon (2004) e obtido através do Bureau of Meteorology (BOM) do governo australiano, contendo o seu ciclo completo. A OMJ apresentou sinal ativo, migrando da fase 7 para 4, permanecendo inativa entre os dias 22 e 25 de janeiro, onde foi evidente a propagação de oeste no domínio equatorial, favorecendo a convecção na região analisada. De acordo com Valadão *et al.* (2016) as 8 diferentes fases da OMJ apresentam diferentes influências ao longo do território do NEB. De acordo com os autores supracitados, as fases 1, 2 e 8 da OMJ possuem maior influência na intensificação de chuvas no estado da Bahia, além deste, o estudo climatológico realizado por Vasconcelos-Junior *et al.* (2021) mostrou uma maior frequência entre as fases 1, 2 e 3 na ocorrência de eventos extremos no NEB. O evento extremo analisado estava situado sobre a fase 2 da OMJ (Fig. 2) durante o período analisado o que favoreceu a convecção da periferia oeste do VCAN que estava atuando no NEB.

Além do diagrama de fase apresentado acima, o diagrama de Hovmöller de Outgoing Long-wave Radiation (OLR - ROL; Fig. 3a) foi utilizado para confirmar da presença da OMJ sobre a região de estudo, além de evidenciar a propagação dessa oscilação de oeste para leste através do Oceano Pacífico sul tropical. O sinal da propagação global da OMJ foi evidente a partir dos primeiros dias de janeiro na região próxima de 160° W (Oceano Pacífico) e finalmente chegando na América do Sul, em direção a 40° W, região que estava sobre a presença do VCAN. A anomalia de ROL (Fig. 3b) foi aplicada para o filtro de banda no período de 30-60 dias através da transformada de Fourier, onde comprovou-se a propagação de onda intrassazonal, deslocando-se em direção ao NEB, onde no período de 20 a 21 de janeiro houve o sinal de propagação de onda para leste sobre a região do NEB.

Nas análises dos campos médios semanais de ROL (Fig. 4) referentes a janeiro de 2016 onde houve o desenvolvimento do VCAN em análise, ficou clara a contribuição da variabilidade intrassazonal na sua intensificação. Os valores da ROL foram menores sobre as principais áreas convectivas dos trópicos, onde nuvens altas, médias e cumulonimbus foram predominantes. Os valores máximos ocorrem onde não há cobertura de nuvens e as temperaturas da superfície são as mais altas.

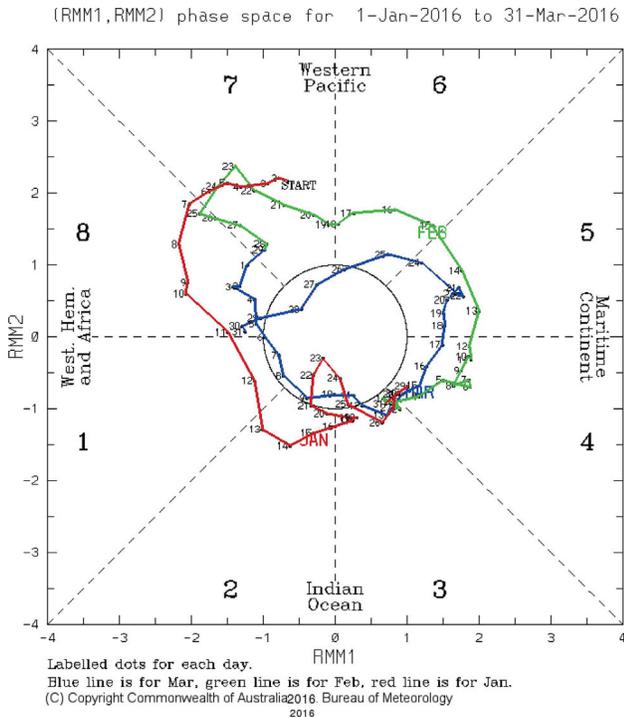


Figura 2 - Diagrama de fase da oscilação Madden-Julian durante 1 de janeiro a 31 de março de 2016. Os eixos (RMM1 e RMM2) representam valores diários dos componentes principais dos dois modos principais. Os pontos caracterizam os dias. A distância da origem é proporcional à intensidade de OMJ.

A análise destes campos apresenta uma evidente progressão de oeste para leste da OMJ principalmente quando a mesma se encontrava na fase 2, de acordo com o diagrama de fase Real Multivariate OMJ index (Fig. 2). Ma *et al.* (2020) mostraram que, durante esta fase, as atividades das ondas atmosféricas relacionadas a OMJ ten-

dem a ser mais fortes durante verões de La Niña. A OMJ apresentou-se ativa sobre o NEB a partir da segunda semana de janeiro (Fig. 4b), mantendo sua intensidade até o dia 21, onde a mesma foi perdendo sua intensidade (Fig. 4d).

Para o verão austral, Ambrizzi e Hoskins (1997); Braga *et al.* (2022) mostraram que a região entre o Pacífico Sul e América do Sul é uma rota propícia à propagação de energia. Mayta *et al.* (2020) destacaram os efeitos da propagação de oeste para leste das ondas equatoriais, estas se propagam sobre o Oceano Pacífico, favorecendo a convecção na região da Amazônia, demonstrando os efeitos da OMJ na porção equatorial e nos subtropicais da América do Sul através ondas de Rossby barotrópicas extratropicais. Com base nessas informações, influências semelhantes também são esperadas sobre o NEB.

Além da atuação dos sistemas de escala interanual e intrassazonal, o VCAN analisado foi um dos principais responsáveis pelos grandes valores de precipitação no NEB durante seus dias de atuação. O vórtice manteve-se ativo praticamente durante todo o mês de janeiro, onde seu ciclo de vida durou por aproximadamente 26 dias (6 a 31 de janeiro), possuindo um período ativo muito acima da média. Coutinho (2008) observou que o tempo de vida de um VCAN de origem tropical varia de acordo com as estações do ano, possuindo maior tempo de vida no verão (9,5-10,6 dias) e menor nas estações de primavera (4,6-6,0 dias) e outros (4,6-7,6 dias). Segundo a classificação proposta por Moraes (2016), esse vórtice possuiu características de um sistema estacionário durante as duas primeiras semanas de desenvolvimento. A região de desenvolvimento do vórtice é uma característica climatológica, sendo as regiões central e sul da Bahia preferenciais de ocorrência de VCANs de acordo com o estudo climato-

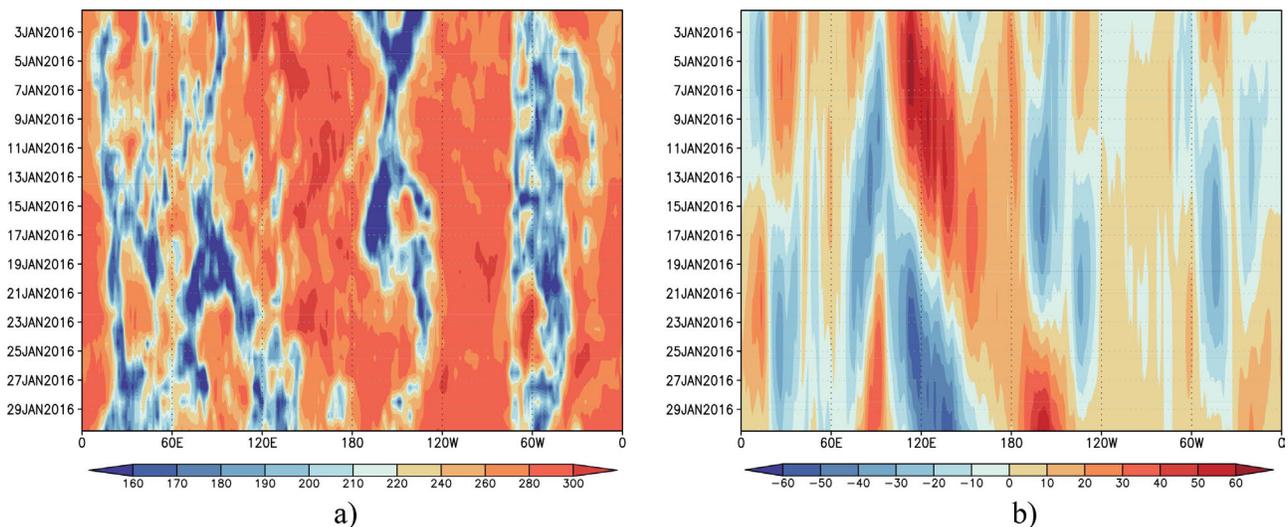


Figura 3 - Diagramas de Hovmöller de ROL (W/m^2) no período de 1 a 31 de janeiro de 2016 (a) e para as anomalias filtradas no período 30-60 dias (b), ambos para a latitude de $15^\circ S$.

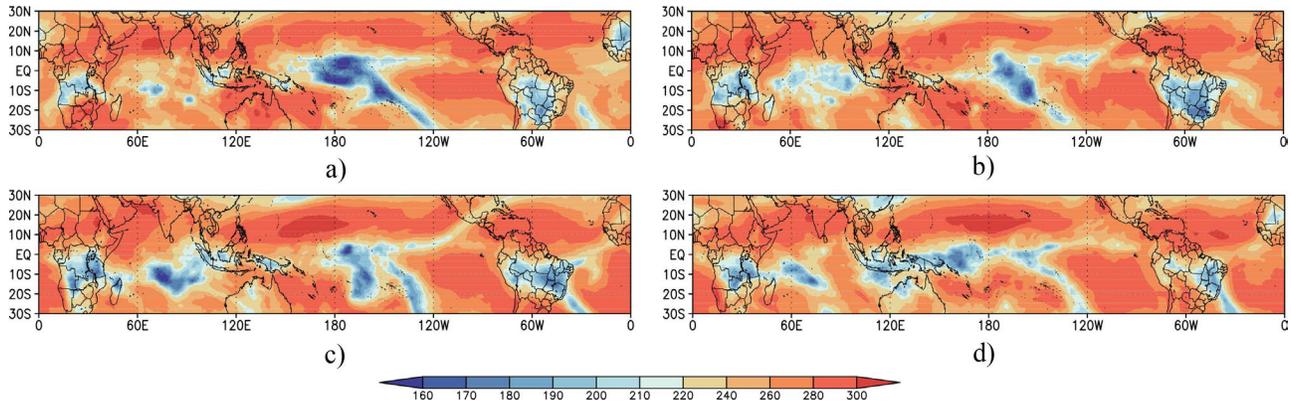


Figura 4 - Campos médios semanais de Outgoing Longwave Radiation (W/m^2) no período entre 1-7 de janeiro (a), 7-14 de janeiro (b), 14-21 de janeiro (c) e 21-28 de janeiro (d).

lógico realizado por [Reis et al. \(2021\)](#). O mesmo pode ser observado na [Fig. 5](#), através dos campos de vorticidade e linhas de corrente em 300 hPa.

O VCAN originou-se sobre o oceano atlântico, oriundo de um cavado em altos níveis que se prolongou até o NEB e interagiu com o escoamento da Alta da Bolívia. Sua formação se assemelhou conforme o desenvolvimento descrito por [Kousky e Gan \(1981\)](#). Segundo a classificação proposta por [Frank \(1970\)](#), esse vórtice pôde ser classificado como sendo um VCAN do tipo úmido, por possuir nebulosidade assimétrica em torno de sua estrutura. Destacou-se um longo período de precipitação entre os dias 20 e 22, principalmente no primeiro dia citado. As imagens de satélite no canal IR ([Fig. 6](#)), mostram o desenvolvimento do VCAN ao longo dos dias analisados, além de apresentar a faixa de nebulosidade no sentido noroeste/sudeste que se estendeu da Amazônia ao Sudeste do Brasil, característica da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), formada a partir da ligação entre o VCAN, alta da Bolívia (observada na [Fig. 5](#)) e de um sistema frontal estacionário localizados aproximadamente nas suas posições climatológicas. De acordo com [Braga e Ambrizzi \(2022\)](#), na região climatológica de atuação do VCAN as composições de ZCAS - El Niño e ZCAS - La Niña possuíram circulações opostas, sendo evidente a ação da variabilidade interanual na intensificação do VCAN a partir de um ciclone anômalo na região do Cavado do Nordeste durante os anos de El Niño. Além da diferença marcante na circulação através do escoamento anômalo de oeste sob a região equatorial do Oceano Atlântico Sul durante as composições de ZCAS - El Niño.

Segundo [Carvalho et al. \(2002\)](#) e [Carvalho et al. \(2004\)](#), durante anos de El Niño, a ZCAS possui características mais oceânicas devido a alteração na célula de Walker através das mudanças na circulação dos ventos em diversos níveis da atmosfera causadas pelo aquecimento das águas do oceano Pacífico Equatorial, essas condições favorecem a intensificação dos VCANs. Esses fatores, de acordo com [Lenters e Cook \(1997\)](#), dificultam a organiza-

ção da Alta da Bolívia, necessária para a formação da ZCAS. Este padrão ZCAS - El Niño observado no presente estudo também provocou o enfraquecimento da ZCIT devido à alteração no vento zonal, sendo também evidenciada pelos estudos de [Ferreira et al. \(2004\)](#) e [Braga e Ambrizzi \(2022\)](#).

3.2. Convergência do transporte de umidade integrado na vertical

Foi possível observar para os dias analisados o transporte de umidade adentrando o NEB não só pelo oceano atlântico, como também pelo seu setor oeste, oriundo da floresta amazônica ([Fig. 7](#)). A fonte desta umidade que adentra a floresta, segundo [Arraut e Satyamurty \(2009\)](#) é inter-hemisférica e concentra-se principalmente no verão austral, de dezembro a março. [Drumond et al. \(2010\)](#) mostraram que embora a precipitação máxima associada ao transporte de umidade proveniente do Atlântico Sul em direção ao semiárido do NEB seja observada entre janeiro e março, a maior contribuição de umidade do oceano para a região acontece no mês de abril. Essa elevada concentração de umidade entrou em contato com a periferia do VCAN, intensificando os valores pluviométricos principalmente no Maranhão, Piauí e Bahia. Ao longo dos dias seguintes esse transporte permaneceu estacionário na costa leste do NEB, assim como fortes convergências do fluxo de umidade, o que favoreceu a formação de precipitação. Houve também bastante concentração de convergência no setor sul do NEB, devido a presença da ZCAS sobre parte desse território. Em consequência do grande adentramento de umidade na região, os valores totais de convergência de umidade foram elevados para todos os horários analisados.

Os campos de anomalia ([Fig. 8](#)) indicaram maior intensidade do transporte proveniente da Amazônia e do Oceano Atlântico principalmente nos dias supracitados. Entre os dias 21 e 22 também pôde-se observar um grande transporte proveniente do Atlântico Sul e desviado na

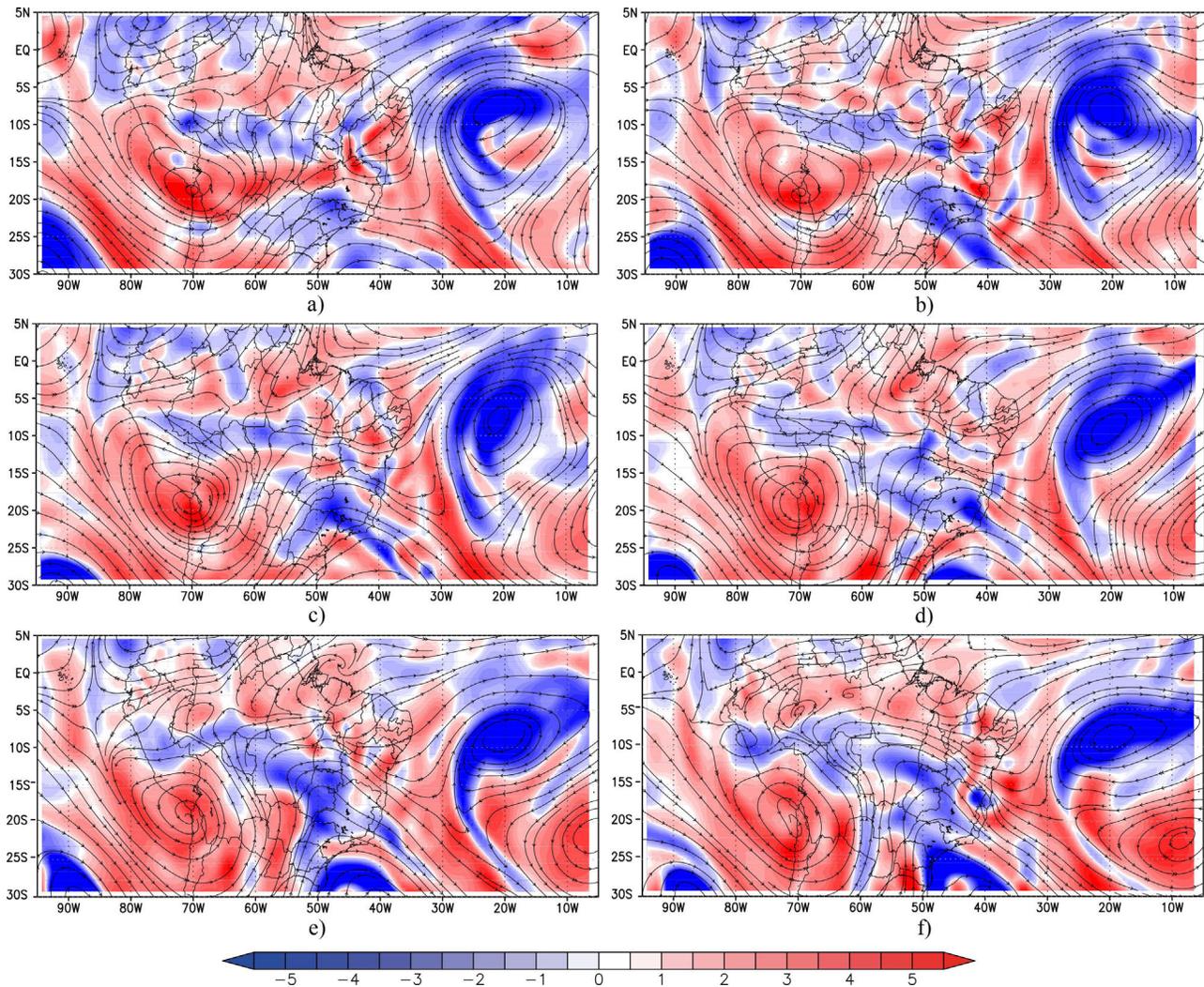


Figura 5 - Linhas de corrente e vorticidade relativa em 300 hPa (s^{-1}) nos dias 20 às 06 UTC (a) e 18 UTC (b); 21 às 06 UTC (c) e 18 UTC (d); 22 às 06 UTC (e) e 18 UTC (f) de janeiro de 2016.

região Centro-oeste, elevando a convergência de umidade sobre o estado da Bahia. Em geral a entrada de umidade por três locais distintos acarretou uma grande fonte de umidade que adentrou o NEB, o que conseqüentemente provocou os altos valores de precipitação no período de atuação do vórtice. Essa característica observada não é climatológica, uma vez que esse campo é o resultado de um cálculo da diferença entre o horário analisado em relação à média climatológica. Esse fator indicou a contribuição de fluxo de umidade proveniente da Amazônia para a intensificação do desenvolvimento do VCAN. Os primeiros resultados a apresentar tal dinâmica foram apresentados por Lyra (2022), onde se observou que anomalias do transporte de umidade ao longo dos Andes e sobre a Amazônia tiveram seu sentido invertido com relação ao escoamento médio durante a atuação de alguns VCANs. Nestes aspectos, os vórtices assemelharam-se à monção da América do Sul, invertendo as anomalias de vento e deslocando a precipitação.

O campo de ômega em 500 hPa (Fig. 9) indicou fortes movimentos ascendentes de ar em todo setor centro-sul do NEB para todos os horários analisados. Grande parte concentrou-se sobre os estados da Bahia e Piauí, as quais foram regiões onde houve registros de forte convergência do transporte de umidade, favorecendo a atividade convectiva por grande parte desse território, corroborando com Santos (2005), que evidenciou regiões de ômega negativo em regiões de bastante nebulosidade (de acordo com imagens de satélite). Já na região costeira, entre os estados de Sergipe e Ceará, somente em alguns horários pôde-se observar o ômega negativo, mesmo apesar dos elevados valores do fluxo de umidade registrados nas fronteiras leste das caixas. Observando através da estrutura do VCAN, os movimentos ascendentes foram observados somente na periferia oeste, a qual estava fixada sobre o continente. Esse fator também se deve à presença do ramo ascendente da OMJ durante esses dias, conforme

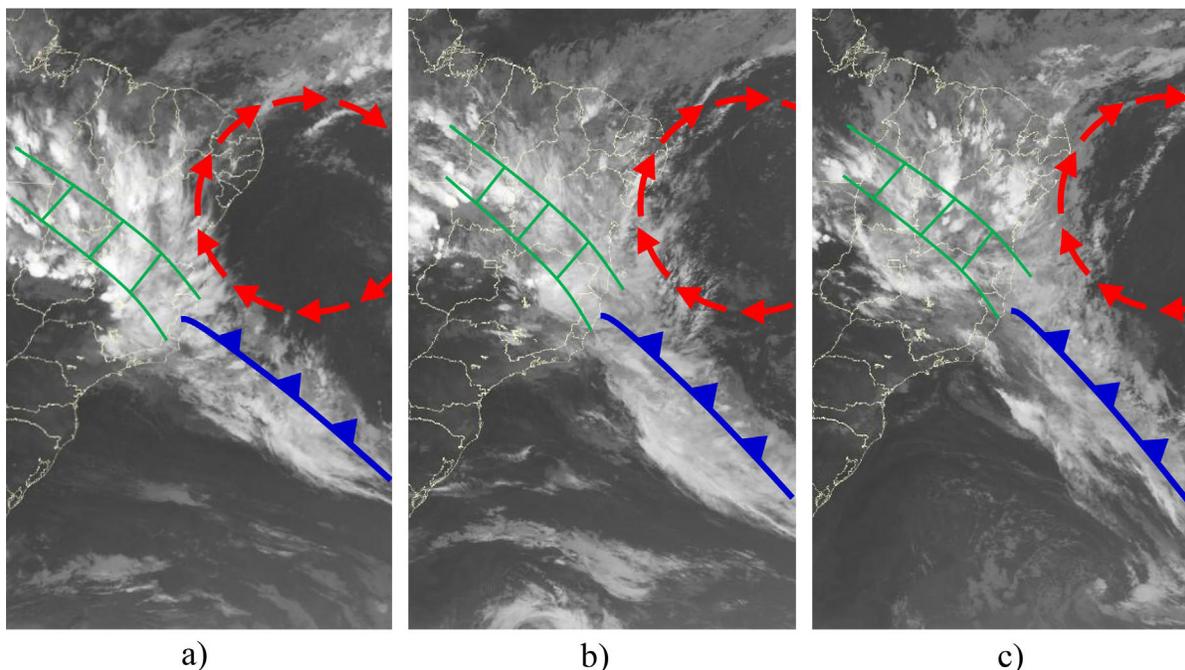


Figura 6 - Imagens do satélite GOES-13 no canal IR para os dias 20 (a), 21 (b) e 22 (c) de janeiro de 2016 às 06 UTC. Fonte: CPTEC/INPE.

observado na Fig. 4, intensificando a atividade convectiva junto ao grande escoamento de umidade presente sobre a região durante os dias analisados.

3.3. Análise de precipitação

A Fig. 10 apresenta os campos médios diários de precipitação (mm/24 h; sombreado), convergência do transporte de umidade integrado na vertical (contornos) e linhas de corrente em 300 hPa (cinza). A Fig. 10 indicou maior convecção em todo setor centro-sul do NEB para todos os horários analisados, onde situava-se a periferia sudoeste do VCAN. Os vórtices atingem com grande intensidade o Sertão do NEB, setor que possui baixos totais pluviométricos anuais (entre 200-500 mm/ano), decorrentes de movimentos subsidentes na região ao longo de todo o ano (Hastenrath, 1976; Molion e Bernardo, 2002; Reboita *et al.*, 2010).

Grande parte da precipitação concentrou-se sobre os estados da Bahia e sul do Piauí, as quais foram regiões onde houve registros de forte convergência do transporte de umidade, favorecendo a atividade convectiva por grande parte desse território. Já na região costeira, entre os estados de Sergipe e Ceará, somente em alguns horários pôde-se observar fortes concentrações de convergência, porém sem precipitação associada. De forma geral, observando através da estrutura do VCAN, os movimentos ascendentes foram observados somente na periferia oeste/sudoeste, as quais mantiveram-se fixadas sobre o continente.

Foi possível observar pontos de elevada convergência de umidade entre os dias 20 e 22 sobre os locais onde

houve maior precipitação, com destaque na faixa longitudinal entre 50° W- 40° W, entre os estados da Bahia e Piauí. A Fig. 10 apresentam de forma clara a relação dos pontos onde houve elevado transporte e convergência de umidade. No dia 20, a exemplo, onde a Bahia recebeu uma grande quantidade de umidade originada no Atlântico Sul e desviada na região Centro-oeste, consequente da mudança de circulação provocada pelo vórtice. Nos dias seguintes, a forte convergência provocou elevados valores pluviométricos sobre a costa leste do NEB. No dia 22 houveram elevados valores de precipitação registrados no eixo centro-sul da região, em destaque todo o estado da Bahia e região central do Piauí.

A Fig. 11 apresenta o campo de anomalia de precipitação (calculado entre 1999 e 2016) para o mês de janeiro de 2016, onde pôde ser identificada uma anomalia positiva sobre todo o NEB. Estes elevados valores estão associados ao VCAN analisado neste estudo, visto que o mesmo manteve-se influenciando a precipitação em grande parte do NEB durante praticamente todo o mês em conjunto com a atuação simultânea da ZCAS e a propagação de OMJ durante cerca de 3 dias. Além disso, o transporte anômalo de umidade oriundo da Amazônia e do Oceano Atlântico na baixa troposfera (observados na Fig. 8) também favoreceram a convecção na região. De acordo com Lyra (2022), os VCANs com formação oceânica onde suas respectivas periferias oeste atingiram o continente favoreceram a convecção no NEB devido à convergência de umidade nos meses onde a variável apresentou-se mais intensa.

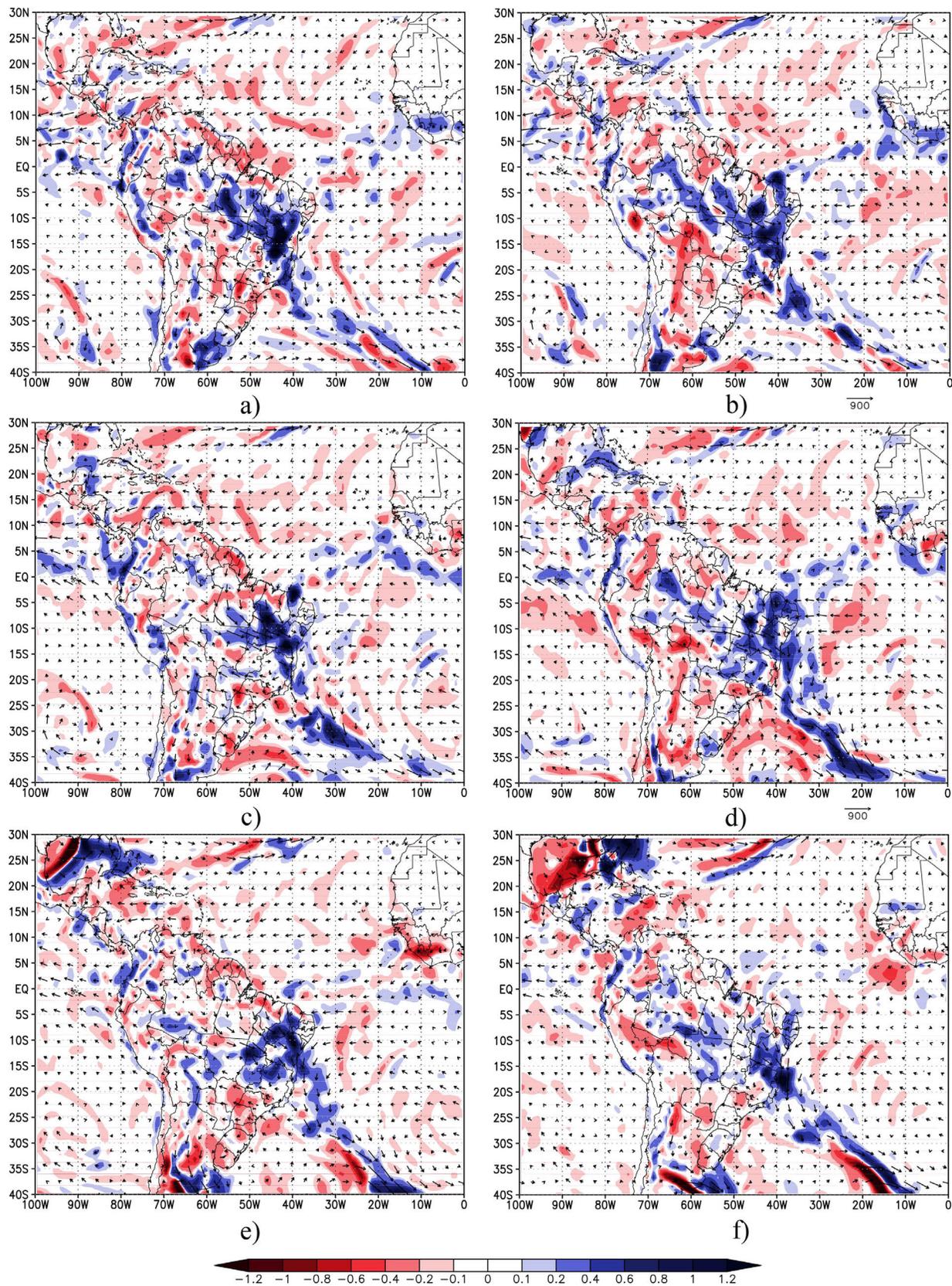


Figura 7 - Campos de convergência do transporte de umidade integrado na vertical entre 1000 e 300 hPa ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{s} \cdot 10^{-3}$) para os dias 20 às 06 UTC (a) e 18 UTC (b), 21 às 06 UTC (c) e 18 UTC (d) e 22 às 06 UTC (e) e 18 UTC (f) de janeiro de 2016.

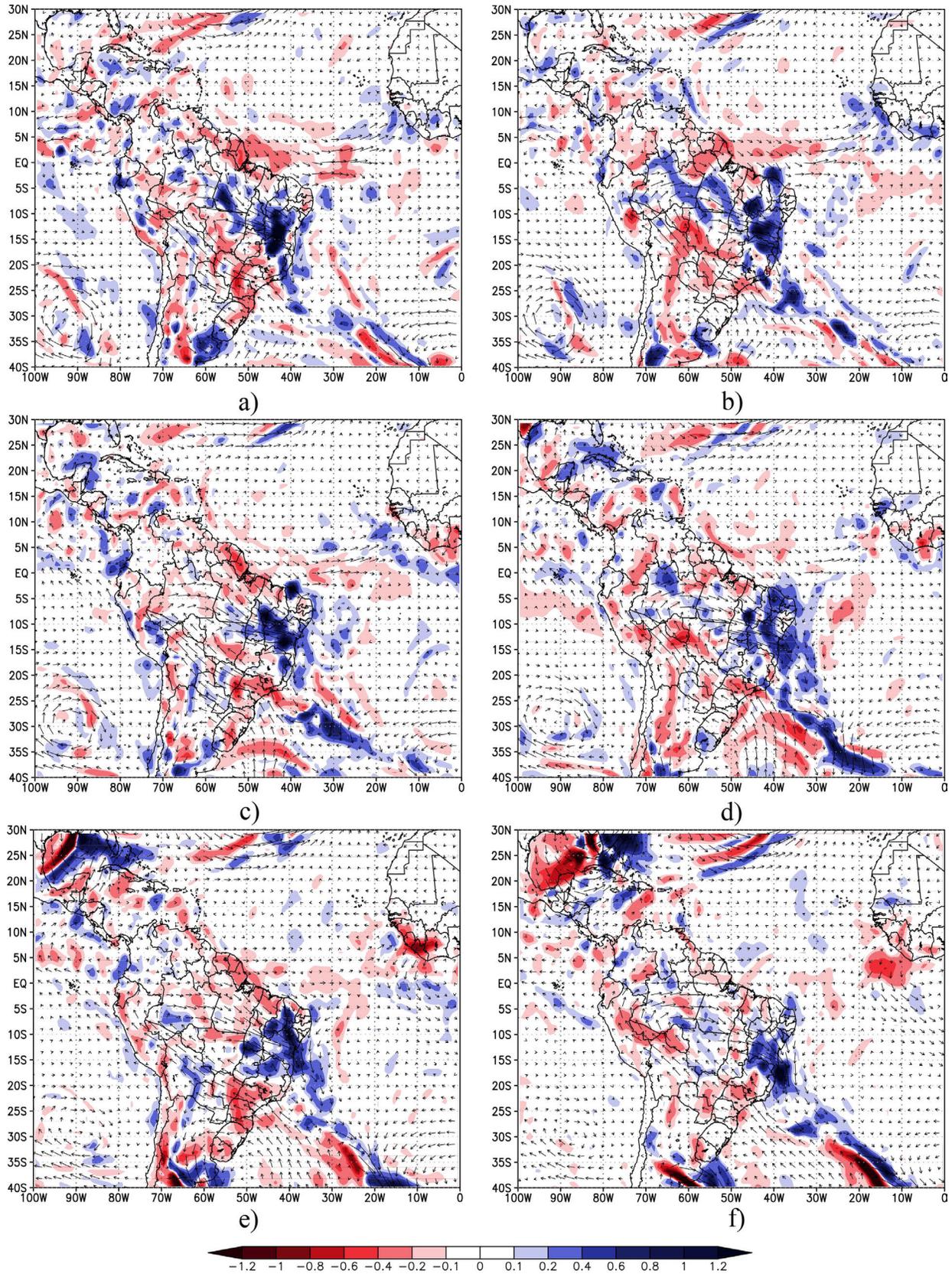


Figura 8 - Campos de anomalia da convergência do transporte de umidade integrado na vertical entre 1000 e 300 hPa ($\text{kg/m}^2 \cdot \text{s} \cdot 10^{-3}$) para os dias 20 às 06 UTC (a) e 18 UTC (b), 21 às 06 UTC (c) e 18 UTC (d) e 22 às 06 UTC (e) e 18UTC (f) de janeiro de 2016.

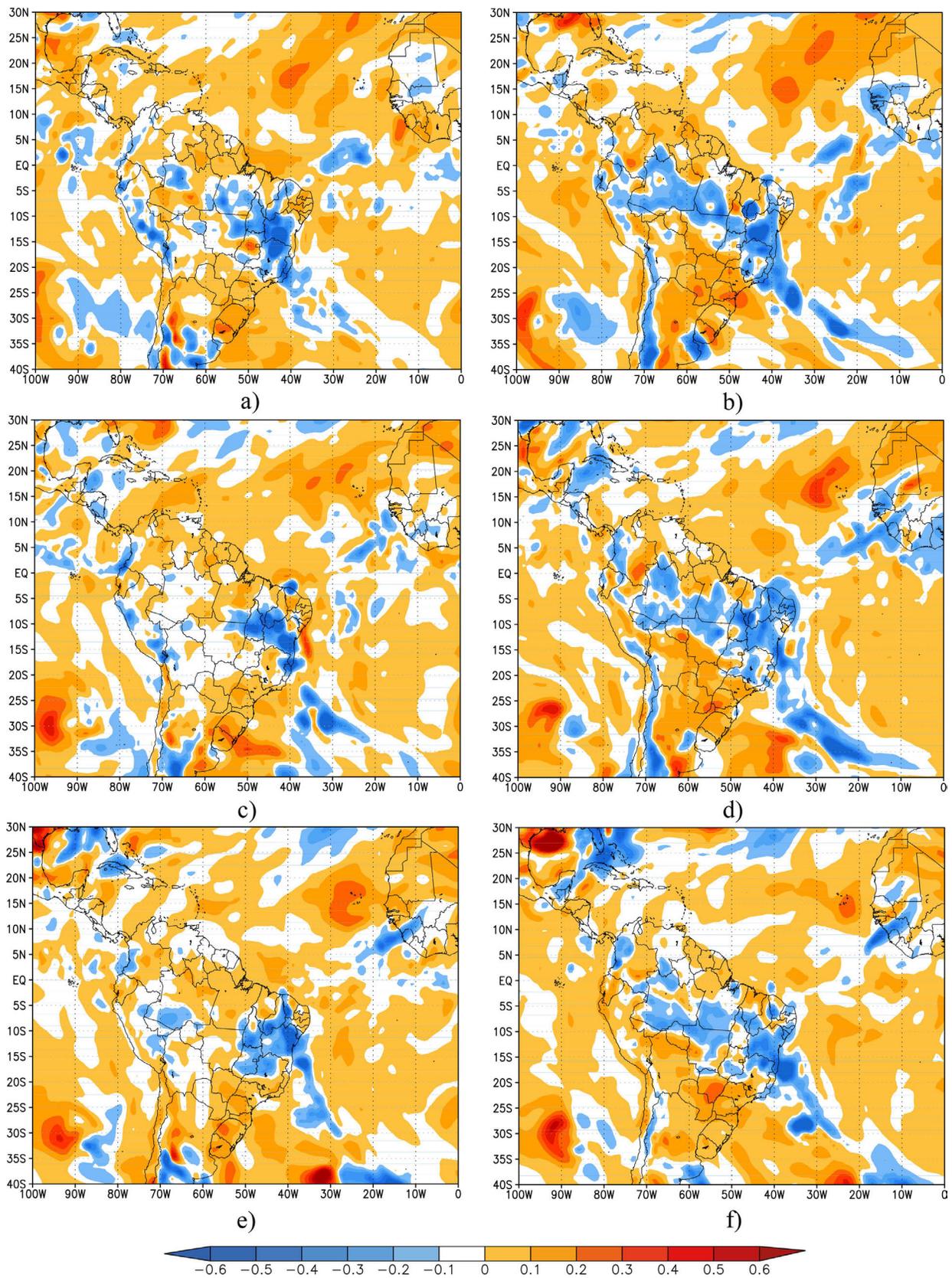


Figura 9 - Campos de ω em 500 hPa ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) para os dias 20 às 06 UTC (a) e 18 UTC (b), 21 às 06 UTC (c) e 18 UTC (d), 22 às 06 UTC (e) e 18 UTC (f) do mês de janeiro de 2016.

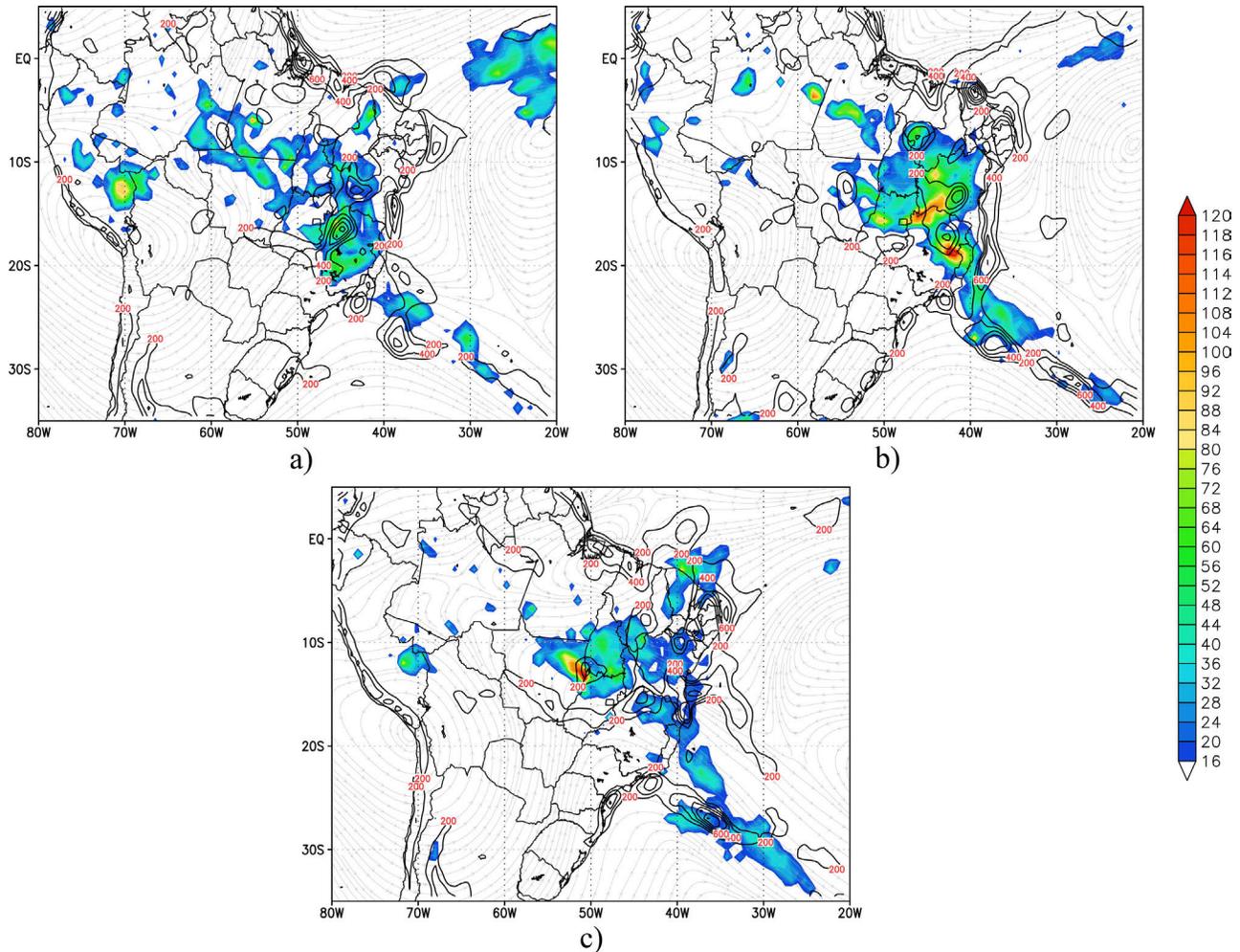


Figura 10 - Campos médios diários de precipitação (sombreado), convergência do transporte de umidade integrado na vertical (contornos), direção e magnitude do transporte de umidade (vetores) e linhas de corrente em 300 hPa (cinza) para os dias 20 (a), 21 (b) e 22 (c) de janeiro de 2016.

3.4. Análise termodinâmica através de seções verticais

Abaixo são apresentadas as seções verticais zonais dos campos de umidade específica e movimentos verticais (a, b), perfil de convergência (c, d), estimativa de CAPE e CINE (e, f), temperatura potencial (g, h) e temperatura potencial equivalente (i, j) às 06 UTC e 18 UTC, respectivamente. As legendas atribuídas acima são representadas para os dias 20 (Fig. 12), 21 (Fig. 13) e 22 (Fig. 14) de janeiro de 2016 através dos recortes latitudinais de 13°, 10° e 10° S, respectivamente.

Através da análise dos campos de movimentos verticais e umidade específica, pôde-se observar a presença de fortes movimentos ascendentes na periferia oeste do vórtice (concentrada na faixa entre continente e oceano) entre 30° e 45° W, além de elevados valores de umidade até aproximadamente 500 hPa para todos os seis horários analisados, o que favoreceu a convecção em grande parte do estado da Bahia, principalmente no dia 22. Os movimentos ascendentes em parte da periferia oeste também foram

indicados pelo perfil de convergência, caracterizados em todos os 3 dias de análise. Já para o núcleo e região da periferia leste, os movimentos verticais não foram muito característicos neste campo. O estudo termodinâmico de [Lyra e Arraut \(2020\)](#) identificou elevados movimentos ascendentes e grande concentração de umidade específica sobre a periferia oeste do VCAN. Aspectos similares também foram identificados no presente estudo, onde este estava sob influência da OMJ.

No centro e periferia leste do VCAN foram observados, de forma geral, movimentos descendentes e alta concentração de umidade se estendeu somente até 800 hPa em ambas as faixas. Estimativa de potencial de energia convectiva foi identificada entre 700 e 300 hPa ao longo da faixa de 35° e 20° W, caracterizada pela periferia oeste e centro do vórtice, onde houve intensificação à oeste ao longo dos dias analisados. A inibição convectiva (CINE) foi mais acentuada na periferia leste, estendendo-se até aproximadamente 600 hPa. Assim como o caso analisado anteriormente, os movimentos descendentes estiveram

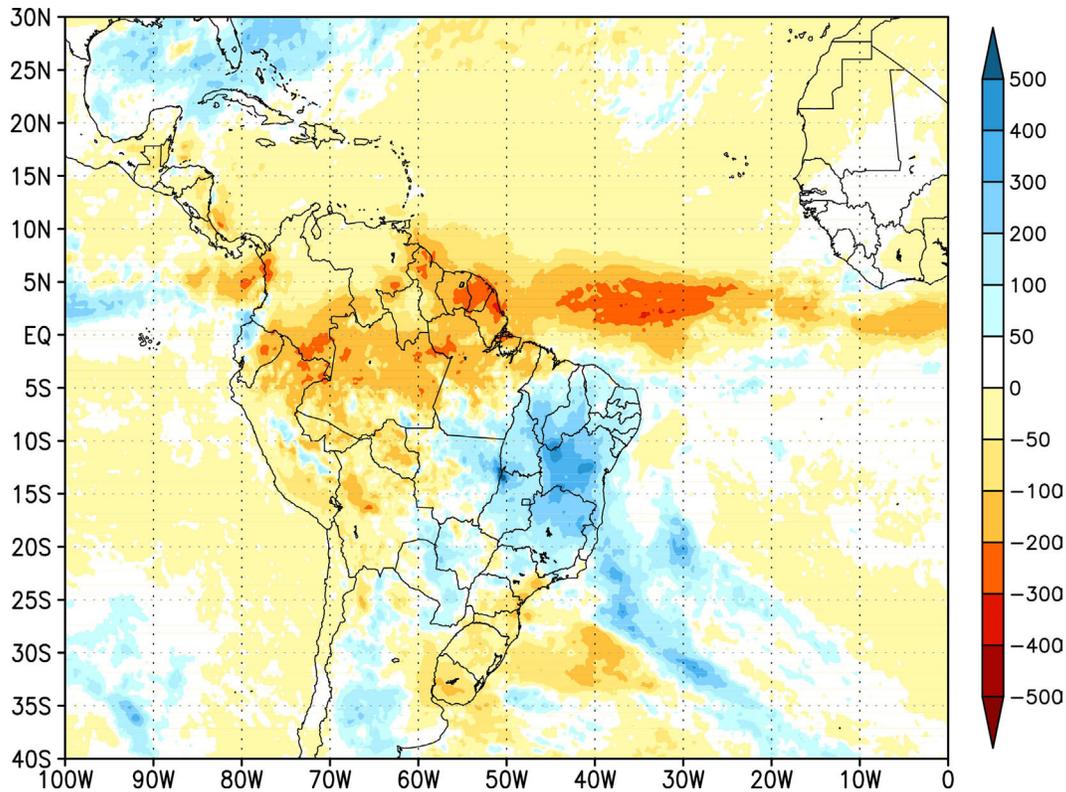


Figura 11 - Anomalia de precipitação para janeiro de 2016 (mm/mês).

presentes na periferia leste. De acordo com [Reboita et al. \(2017\)](#) as regiões de movimentos ascendentes se concentram sobre o ramo oeste do VCAN, já as outras regiões adjacentes são preenchidas por movimentos subsidentes e ar seco.

As seções verticais de temperatura potencial também indicaram para este caso temperaturas mais elevadas nas periferias oeste e leste e menores no centro do VCAN, corroborando com o modelo de núcleo frio proposto por [Kousky e Gan \(1981\)](#). Os menores gradientes térmicos se concentraram na camada central do vórtice, entre 700-500 hPa. Próximo à superfície, as temperaturas foram mais elevadas nas áreas de máxima precipitação no dia 22 (aproximadamente 40° W), tanto às 06 UTC quanto para as 18 UTC. As características estacionárias do VCAN, através do posicionamento do centro (núcleo frio) ao longo dos dias pôde ser observado claramente através desse campo. A existência desse núcleo frio também foi utilizada como critério para indicar a extensão vertical do vórtice, entre 300 hPa e 700 hPa, aproximadamente.

As seções verticais de temperatura potencial equivalente indicaram elevados gradientes na faixa entre continente e oceano (35° e 40° W), mantendo o padrão conforme o avanço dos dias, devido ao posicionamento estacionário do vórtice. Por fim, houve um pequeno resfriamento ao longo dos dias entre os níveis de 400 e 300 hPa, na faixa longitudinal onde o centro do VCAN

estava localizado (aproximadamente 20° W). Segundo [Emanuel \(1989\)](#) a diminuição nos valores da temperatura potencial equivalente é necessária para a formação de tempestades severas, essas condições podem ser observadas na periferia oeste do VCAN, principalmente no início do dia 22 ([Fig. 14i](#)).

4. Conclusões

Os resultados apresentados neste estudo evidenciam os impactos das teleconexões atmosféricas em diferentes escalas espaciais e temporais sobre o Nordeste Brasileiro. A atuação simultânea desses sistemas foi o principal fator responsável pelos altos índices pluviométricos na região Nordeste do Brasil, onde se registrou um mês bastante chuvoso em relação à média climatológica. A configuração de uma ZCAS em conjunto com a atuação do VCAN sendo impulsionados pela propagação da Oscilação Madden-Julian além do elevado transporte de umidade que adentrou o NEB determinaram o excesso de chuvas durante os dias analisados no presente estudo.

As configurações nos oceanos adjacentes permitiram um desenvolvimento prolongado do VCAN, conseqüentemente o período de vida da ZCAS ao longo do mês de janeiro. Ambos os sistemas também foram favorecidos pelo ramo ascendente da OMJ, que contribuiu para se contrapor aos efeitos do fenômeno El Niño. Apesar da situação des-

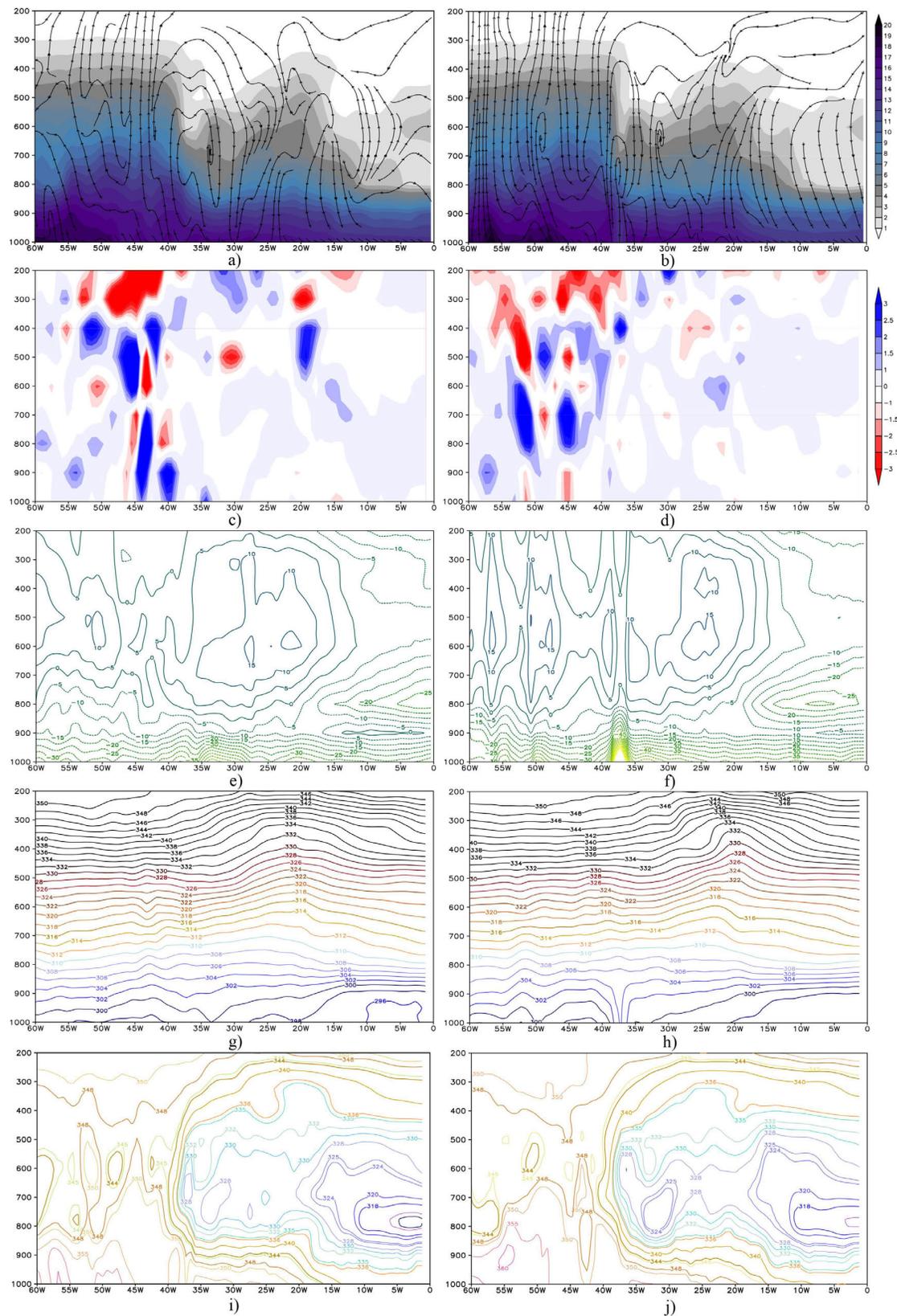


Figura 12 - Seções verticais de umidade específica e movimentos verticais às 06 UTC (a) e 18 UTC (b), Perfil de convergência às 06 UTC (c) e 18 UTC (d), estimativa de CAPE e CINE às 06 UTC (e) e 18 UTC (f), temperatura potencial às 06 UTC (g) e 18 UTC (h) e temperatura potencial equivalente às 06 UTC (i) e 18 UTC (j), ambos para o dia 20 de janeiro de 2016. Recorte latitudinal: 13° S.

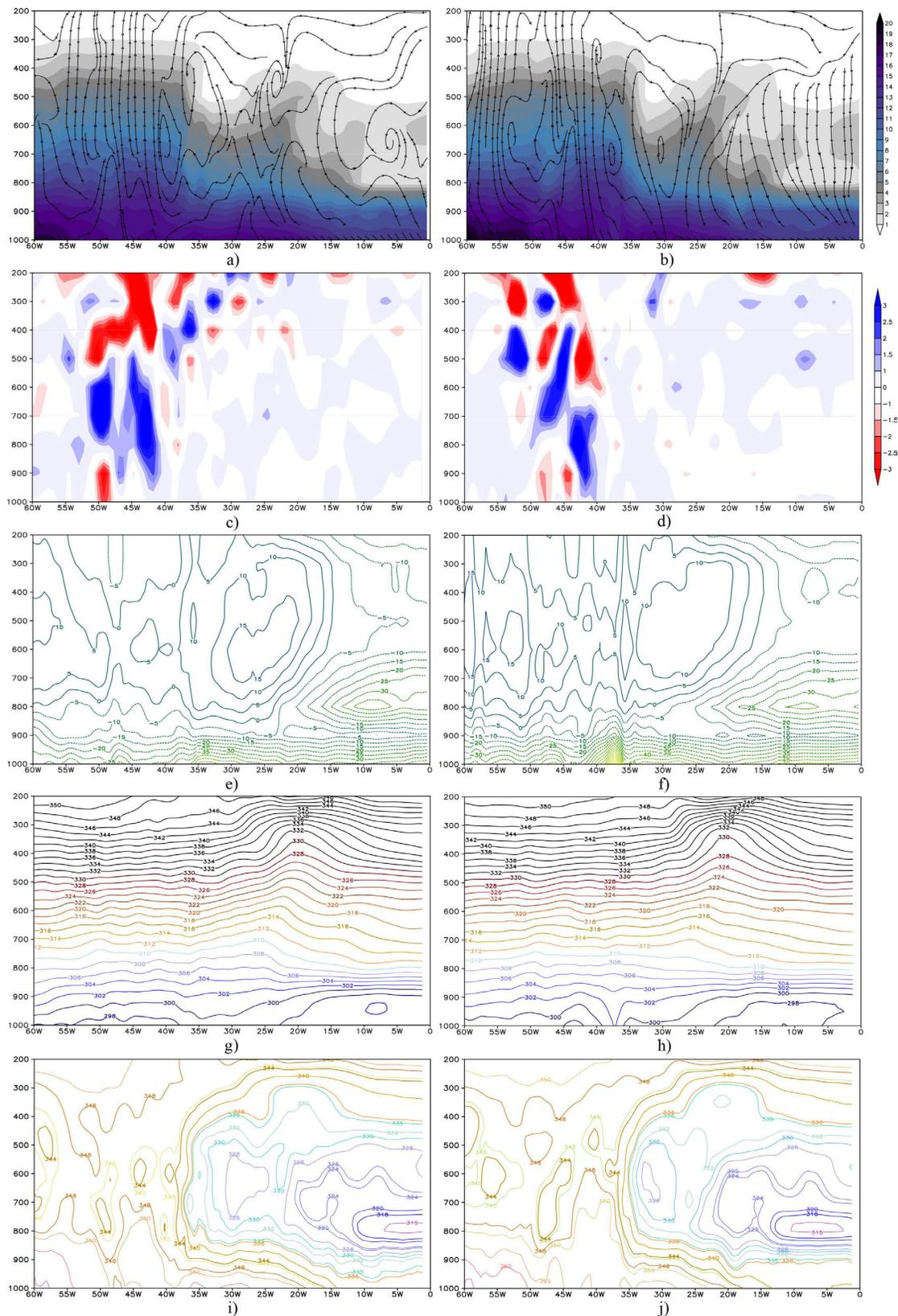


Figura 13 - Seções verticais de umidade específica e movimentos verticais às 06 UTC (a) e 18 UTC (b), Perfil de convergência às 06 UTC (c) e 18 UTC (d), estimativa de CAPE e CINE às 06 UTC (e) e 18 UTC (f), temperatura potencial às 06 UTC (g) e 18 UTC (h) e temperatura potencial equivalente às 06 UTC (i) e 18 UTC (j), ambos para o dia 21 de janeiro de 2016. Recorte latitudinal: 10° S.

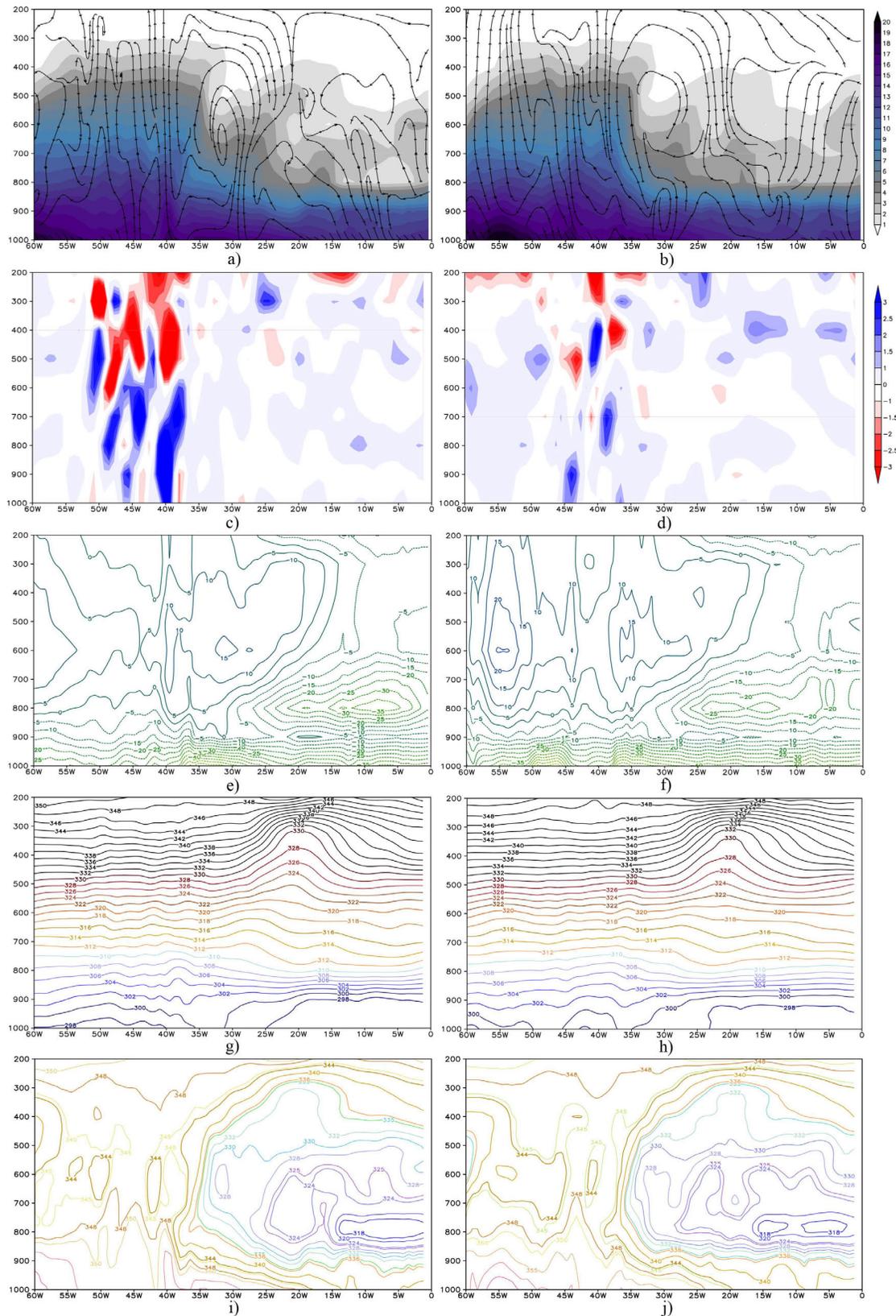


Figura 14 - Seções verticais de umidade específica e movimentos verticais às 06 UTC (a) e 18 UTC (b), Perfil de convergência às 06 UTC (c) e 18 UTC (d), estimativa de CAPE e CINE às 06 UTC (e) e 18 UTC (f), temperatura potencial às 06 UTC (g) e 18 UTC (h) e temperatura potencial equivalente às 06 UTC (i) e 18 UTC (j), ambos para o dia 22 de janeiro de 2016. Recorte latitudinal: 10° S.

favorável para atuação da ZCIT sobre o NEB devido à alteração no vento zonal provocado pelo padrão ZCAS - El Niño, o desenvolvimento em conjunto dos sistemas supracitados foi suficiente para a elevação nos índices pluviométricos.

O vórtice em estudo teve sua periferia oeste posicionada próxima à costa leste do NEB durante os dias analisados, o sistema provocou uma alteração no padrão de convergência do transporte de umidade de grande escala, que passou a convergir sobre o NEB, causando intensa precipitação em alguns estados. Houve também forte alteração nas anomalias do transporte de umidade com relação às médias mensais de longo prazo, elas mudaram de sentido sobre a Amazônia, escoando de oeste para leste.

A análise termodinâmica através das diferentes seções verticais mostrou a presença de movimentos ascendentes somente na periferia oeste do VCAN. Esta região também esteve associada a elevada umidade até aproximadamente 500 hPa, valores acima do normal, uma vez que o conteúdo de vapor d'água acima de 650 hPa não é considerado como significativo. As áreas de maior convergência de ar na periferia oeste resultaram dos fortes movimentos ascendentes, além da elevada umidade específica. As seções verticais de temperatura potencial e temperatura potencial equivalente apresentaram ótimos resultados quanto a estrutura vertical do vórtice, condizente ao modelo de núcleo frio e capaz de identificar a profundidade do sistema. Estes resultados foram pouco explorados na literatura, enfatizando sua importância para trabalhos futuros.

Referências

- AMBRIZZI, T.; HOSKINS, B.J. Stationary rossby-wave propagation in a baroclinic atmosphere. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 123, n. 540, p. 919-928, 1997. [doi](#)
- ARRAUT, J.M. **Frentes e Frontogênese no Verão: Aspectos Geométricos, Dinâmicos e Impactos Sobre as Chuvas nos Subtrópicos da América do Sul**. Tese de Doutorado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2007.
- ARRAUT, J.M.; SATYAMURTY, P. Precipitation and water vapor transport in the Southern Hemisphere with emphasis on the South America region. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 48, n. 9, p. 1902-1912, 2009. [doi](#)
- BRAGA, H.A.; AMBRIZZI, T. A variabilidade intrassazonal e interanual do acoplamento entre a zona de convergência do Atlântico Sul e o vórtice ciclônico de altos níveis. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 37, n. 3, p. 1-7, 2022. [doi](#)
- BRAGA, H.A.; AMBRIZZI, T.; HALL, N.M. Relationship between interhemispheric Rossby wave propagation and South Atlantic convergence zone during La Niña years. **International Journal of Climatology**, v. 42, n. 16, p. 8652-8664, 2022. [doi](#)
- CARVALHO, L.M.; JONES, C.; LIEBMANN, B. Extreme precipitation events in Southeastern South America and large-scale convective patterns in the South Atlantic convergence zone. **Journal of Climate**, v. 15, n. 17, p. 2377-2394, 2002. [doi](#)
- CARVALHO, L.M.; 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**, v. 17, n. 1, p. 88-108, 2004. [doi](#)
- COUTINHO, M.D.L. **Método Objetivo de Identificação dos Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis na Região Tropical Sul: Validação e Climatologia**. Dissertação de Mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2008.
- DE SOUZA, E.B.; AMBRIZZI, T. Modulation of the intraseasonal rainfall over tropical Brazil by the Madden-Julian oscillation. **International Journal of Climatology**, v. 26, p. 1759-1776, 2006.
- FERREIRA, N.J.; SANCHES, M.; SILVA DIAS, M.A.F. Composição da zona de convergência do Atlântico Sul em períodos de El Niño e La Niña. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 19, n. 1, p. 89-98, 2004.
- GAN, M.A.; KOUSKY, V.E. Vórtices ciclônicos da alta troposfera no Oceano Atlântico Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 1, p. 19-28, 1986.
- HASTENRATH, S. Variation in low-latitude circulation and extreme climatic events in the Tropical Americas. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 33, p. 201-215, 1976. [doi](#)
- HASTENRATH, S. **Climate and Circulation of the Tropics**. Dordrecht: Reidel, 1985.
- JIANG, X.; ADAMES, Á.F.; KIM, D.; MALONEY, E.D.; LIN, H.; KIM, H.; *et al.* Fifty years of research on the Madden-Julian oscillation: recent progress, challenges, and perspectives. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 125, n. 17, p. 1-64, 2020. [doi](#)
- KODAMA, Y.M. Large-scale common features of subtropical precipitation zones (the baiu frontal zone, the spcz, and the sacz) Part I: Characteristics of subtropical frontal zones. **Journal of the Meteorological Society of Japan**, v. 70, n. 4, p. 813-836, 1992. [doi](#)
- KOUSKY, V.E.; GAN, M.A. Upper tropospheric cyclonic vortex in the subtropical South Atlantic. **Tellus**, v. 33, n. 6, p. 538-551, 1981. [doi](#)
- KOUSKY, V.E.; KAGANO, M.T.; CAVALCANTI, I.F.A. A review of the Southern oscillation: Oceanic-atmospheric circulation changes and related rainfall anomalies. **Tellus**, v. 36, p. 490-504, 1984.
- 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**, v. 54, n. 5, p. 656-678, 1997. [doi](#)
- LYRA, M.J.A.; CAVALCANTE, L.C.V.; LEVIT, V.; FEDOROVA, N. Ligação entre extremidade frontal e zona de convergência intertropical sobre a região Nordeste do Brasil. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 42, n. 1, p. 413-424, 2019. [doi](#)
- LYRA, M.J.A.; ARRAUT, J.M. Análise termodinâmica de um vórtice ciclônico de altos níveis sobre o Nordeste do Brasil. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 43, n. 4, p. 302-309, 2020. [doi](#)
- LYRA, M.J.A. **Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis do Nordeste Brasileiro: Sua Relação com o Transporte de Umi-**

- dade da América do Sul e sua Estrutura Termodinâmica.** Tese de Doutorado, Universidade Federal de Campina Grande, 2022.
- MA, J.; CHEN, W.; NATH, D.; LAN, X. Modulation by ENSO of the relationship between stratospheric sudden warming and the Madden-Julian oscillation. **Geophysical Research Letters**, v. 47, n. 15, p. 1-10, 2020. [doi](#)
- MAYTA, V.C.; AMBRIZZI, T.; ESPINOZA, J.C.; SILVA DIAS, P.L. The role of the Madden-Julian oscillation on the Amazon Basin intraseasonal rainfall variability. **International Journal of Climatology**, v. 39, n. 1, p. 343-360, 2019. [doi](#)
- MAYTA, V.C.; SILVA, N.P.; AMBRIZZI, T.; SILVA DIAS, P.L.; ESPINOZA, J.C. Assessing the skill of all-season diverse Madden-Julian oscillation indices for the intraseasonal Amazon precipitation. **Climate Dynamics**, v. 54, p. 3729-3749, 2020. [doi](#)
- MOLION, L.C.B., BERNARDO, S.O. Uma revisão da dinâmica das chuvas no Nordeste brasileiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 17, n. 1, p. 1-10, 2002.
- MORAIS, M.D.C. **Vórtice Ciclônico de Altos Níveis no Nordeste do Brasil: Estudo Observacional e Numérico.** Tese de Doutorado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2016.
- PAIXÃO, E.B.; GANDU, A.W. Caracterização do vórtice ciclônico de ar superior sobre o Nordeste do Brasil (Parte I). In: **Anais XI Congresso Brasileiro de Meteorologia**, Rio de Janeiro, p. 3422-3428, 2000.
- RAMIREZ, 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**, v. 12, p. 75-88, 1999.
- REBOITA, M.S.; GAN, M.A.; ROCHA, R.P.; AMBRIZZI, T. Regimes de precipitação da América do Sul: Uma revisão bibliográfica. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 25, n. 2, p. 185-204, 2010. [doi](#)
- REBOITA, M.S.; CAMPOS, B.; SANTOS, T.; GAN, M.A.; CARVALHO, V.S.B. Análise sinótica e numérica de um VCAN no Nordeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 10, n. 1, p. 41-59, 2017.
- REBOITA, M.S.; OLIVEIRA, K.R.; CORRÊA, P.Y.C.; RODRIGUES, R. Influência dos diferentes tipos do fenômeno El Niño na precipitação da América do Sul. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 2, p. 729-742, 2021. [doi](#)
- REIS, J.S.; GONÇALVES, W.; MENDES, D. Climatology of the dynamic and thermodynamic features of upper tropospheric cyclonic vortices in Northeast Brazil. **Climate Dynamics**, v. 57, p. 3413-3431, 2021. [doi](#)
- REPINALDO, H.F.B.; FEDOROVA, N.; LEVIT, V.; REPINALDO, C.R.R. Tropospheric cyclonic vortex and Brazilian Northeast jet stream over Alagoas State: Circulation patterns and rainfall. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, n. Especial, p. 745-754, 2020. [doi](#)
- ROSA, E.B.; PEZZI, L.; QUADRO, M.; BRUNSELL, N. Automated detection algorithm for sacz, oceanic sacz, and their climatological features. **Frontiers in Environmental Science**, v. 8, p. 1-15, 2020. [doi](#)
- SANTOS, A.S. **Alguns Aspectos Termodinâmicos de um Vórtice Ciclônico de Altos Níveis Sobre a Sua Região de Atuação.** Dissertação de Mestrado em Meteorologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2005.
- UVO, C.R.B.; NOBRE, C.A. A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) e a precipitação no norte do Nordeste do Brasil. Parte I: A posição da ZCIT no Atlântico Equatorial. **Climanálise**, v. 4, n. 1, p. 34-40, 1989.
- VALADÃO, C.E.A.; CARVALHO, L.M.V.; LUCIO, P.S.; CHAVES, R.R. Impacts of the Madden-Julian oscillation on intraseasonal precipitation over Northeast Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 37, p. 1859-1884, 2017. [doi](#)
- VASCONCELOS JUNIOR, F.C.; JONES, C.; GANDU, A.W.; MARTINS, E.S.P.R. Impacts of the Madden-Julian oscillation on the intensity and spatial extent of heavy precipitation events in northern Northeast Brazil. **International Journal of Climatology**, v. 41, n. 6, p. 3628-3639, 2021. [doi](#)



License information: This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (type CC-BY), which permits unrestricted use, distribution and reproduction in any medium, provided the original article is properly cited.