



**Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis nas Cercanias do  
Nordeste do Brasil: Climatologia e Análise da Vorticidade Potencial Isentrópica**  
Upper-Level Cyclonic Vortices in the Vicinity of  
Northeast Brazil: Climatology and Analysis of the Isentropic Potential Vorticity

Glauber Willian de Souza Ferreira<sup>1</sup>; Michelle Simões Reboita<sup>1</sup> & Rosmeri Porfírio da Rocha<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Itajubá, Instituto de Recursos Naturais, Avenida BPS, 1303, 37500-903, Pinheirinho, Itajubá, MG, Brasil

<sup>2</sup>Universidade de São Paulo, Departamento de Ciências Atmosféricas,

Rua do Matão, 1226, 05508-090, Cidade Universitária, São Paulo, SP, Brasil

E-mails: glauber\_ferreira@unifei.edu.br; reboita@gmail.com; rosmerir@model.iag.usp.br

Recebido em: 17/05/2019      Aprovado em: 23/07/2019

DOI: [http://dx.doi.org/10.11137/2019\\_3\\_568\\_585](http://dx.doi.org/10.11137/2019_3_568_585)

## Resumo

Vórtices ciclônicos de altos níveis (VCANs) são sistemas com núcleo frio que se desenvolvem na média e alta troposfera e que podem causar alterações nas condições atmosféricas em superfície. Existem VCANs de origem tropical e subtropical/extratropical. O foco do presente estudo são os VCANs tropicais, que ocorrem nas cercanias do Nordeste do Brasil (NEB) e têm literatura pouco extensa. Diante disso, os objetivos do estudo são identificar os casos de VCANs ocorridos nas cercanias do NEB, nos meses de verão entre 2006 e 2019, para obtenção de uma descrição das características médias desses sistemas, e uma associação da localização dos VCANs com as anomalias de precipitação no NEB. Além disso, é investigada a contribuição da intrusão de vorticidade potencial isentrópica (VPI) na gênese dos vórtices. Os VCANs foram identificados por meio da análise visual da circulação atmosférica e do desvio zonal de temperatura do ar em 200 hPa obtidos da reanálise ERA-Interim. Os resultados indicam a ocorrência de 175 casos no período de estudo, com maior frequência nos meses de dezembro (65 casos) e janeiro (58 casos). Os VCANs propiciam precipitação nas regiões sob suas bordas e condições secas sob seu centro. Consequentemente, quando o centro desses sistemas ocorre sobre o NEB, em geral, eles contribuem para anomalias negativas de precipitação na região. Na análise da VPI associada aos VCANs, sugere-se que essa possa ser um mecanismo que contribua para a formação dos vórtices.

**Palavras-chave:** *Trajatórias dos VCANs; Precipitação; Composições*

## Abstract

Upper-level cyclonic vortices (ULCVs) are cold core systems that develop in the middle and upper troposphere and may cause changes in surface atmospheric conditions. In addition, there are ULCVs of tropical and subtropical/extratropical origin. The present study focuses on the tropical ULCVs, which occur in the vicinity of Northeast Brazil (NEB) and have sparse literature. Hence, this study identifies ULCVs occurring near the NEB during the austral summer months between 2006 and 2019, describes the systems' average features, and associates the ULCVs' location with the precipitation anomalies in the NEB. Furthermore, the contribution of isentropic potential vorticity (IPV) intrusion to the genesis of these systems is investigated. ULCVs were identified through visual analysis of atmospheric circulation and zonal deviation of air temperature in 200 hPa obtained from the ERA-Interim reanalysis. Results indicate the occurrence of 175 cases in the study period, most frequently in December (65 cases) and January (58 cases). ULCVs provide precipitation in the regions under their edges and dry conditions under their center. Consequently, when the center of these systems occurs on the NEB, they usually contribute to negative precipitation anomalies in the region. In the analysis of IPV associated with ULCVs, it is suggested that IPV can be a mechanism that contributes to the systems' formation.

**Keywords:** *ULCVs' Trajectories; Precipitation; Compositions*



## 1 Introdução

As condições de tempo na região do Nordeste do Brasil (NEB) e cercanias são influenciadas por diversos sistemas atmosféricos de escalas espaciais e temporais distintas, dentre os quais se destacam os Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCANs) (Figura 1). Os VCANs são sistemas de escala sinótica, que se formam na média/alta troposfera, e apresentam circulação ciclônica e centro mais frio que sua periferia (Kousky & Gan, 1981).

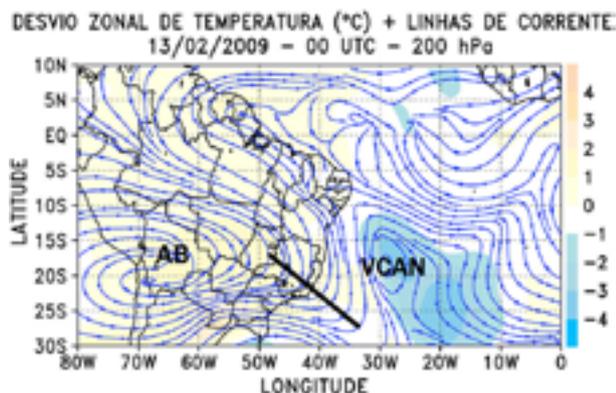


Figura 1 Exemplo de um VCAN nas cercanias do NEB identificado por meio de campos sobrepostos de linhas de corrente e desvio zonal de temperatura do ar (°C, em cores), no nível de 200 hPa. As iniciais AB e VCAN indicam, respectivamente, a Alta da Bolívia e o Vórtice Ciclônico de Altos Níveis. A linha preta indica a posição de uma crista.

Os VCANs nas cercanias do NEB se formam entre meados da primavera e outono, quando as condições atmosféricas na América do Sul (AS) são influenciadas pelo sistema de monção (Vera *et al.*, 2006; Reboita *et al.*, 2010; Marengo *et al.*, 2012). Nesse período, há a presença de uma circulação anticiclônica em altos níveis (com centro localizado, em geral, sobre a Bolívia) chamada de Alta da Bolívia (AB) e, corrente abaixo desse sistema, se forma um cavado, que é o cavado das cercanias do NEB (CNE). Sobre a região Sudeste do Brasil também é registrada a presença de uma crista.

A gênese de um VCAN ocorre quando, na parte sul do cavado, as suas bordas oeste e leste sofrem deformação de modo que praticamente se unem, favorecendo a formação do VCAN no interior do

cavado. Os mecanismos físicos que atuam na geração desse padrão ainda não são totalmente conhecidos (Reboita *et al.*, 2017). Entretanto, há um mecanismo proposto por Kousky & Gan (1981): ao adentrar em latitudes mais baixas, um sistema frontal provoca forte advecção de ar quente em baixos níveis, contribuindo para a amplificação de uma crista em altos níveis. Corrente abaixo dessa crista, há a amplificação do cavado, devido à conservação de vorticidade absoluta. Assim, o VCAN pode se formar no interior do cavado. De acordo com os autores, a manutenção do VCAN se dá por uma circulação térmica direta, com movimentos ascendentes de ar quente e úmido na periferia e com movimentos verticais subsidentes de ar frio e seco no centro do vórtice (Figura 2A). Esse padrão de circulação vertical influencia diretamente a precipitação, pois sob o centro (periferia) do vórtice há condições desfavoráveis (favoráveis) para a convecção (Morais, 2016). Silva (2005) e Reboita *et al.* (2016) destacam que os VCANs podem afetar a distribuição das chuvas em diferentes setores do NEB, como o litoral e o Sertão Nordestino. Podem também alcançar o interior do continente e, em algumas ocasiões, a fronteira da região Norte do Brasil (Reboita *et al.*, 2017).

Como os cavados são regiões com ar mais frio, quando o VCAN se forma, esse ar fica aprisionado no centro do sistema e, por essa razão, o centro dos vórtices é frio (Figura 2B). Essa característica dos VCANs é documentada em estudos que mostram o perfil vertical desses sistemas (Morais, 2016; Reboita *et al.*, 2017).

Concernente às características climatológicas dos VCANs nas cercanias do NEB, um dos primeiros estudos foi realizado por Gan & Kousky (1986), com a utilização de dados de vento e imagens de satélite dos canais infravermelho e visível, para o período de 1974 a 1981. Os autores verificaram que os VCANs se formam principalmente durante o verão, com máxima atividade no mês de janeiro. No período de inverno (de maio a agosto), o estudo não detectou vórtices pelas imagens de satélite ou cartas de vorticidade relativa e linhas de corrente. Em geral, os primeiros estudos climatológicos de VCANs nas cercanias do NEB (Kousky & Gan, 1981; Gan, 1982; Gan & Kousky, 1986) identificaram a ocorrência de vórtices nos meses de verão (DJF) com tempo de vida de 3,5 a 5,6 dias.

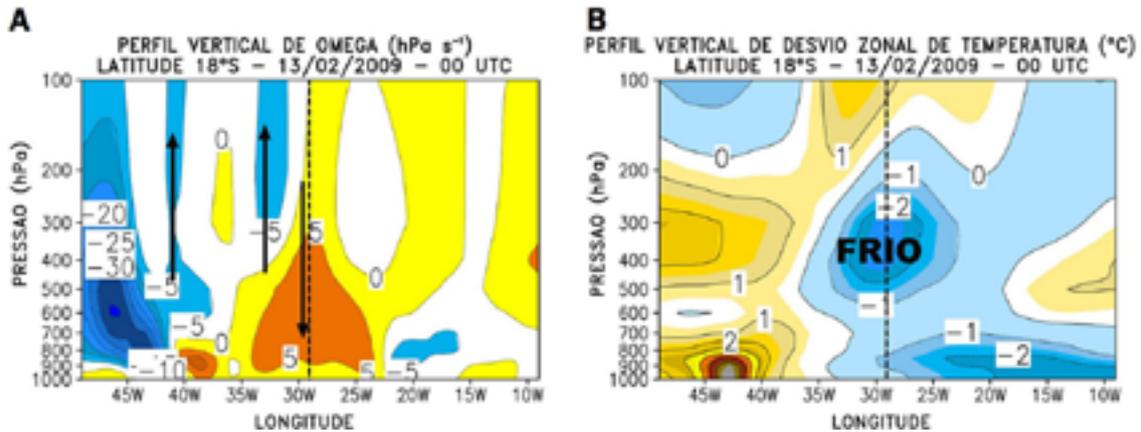


Figura 2 Campos atmosféricos correspondentes à fase de formação de um VCAN; A. Perfil vertical de movimento vertical ( $\text{hPa s}^{-1}$ ); B. Perfil vertical de desvio zonal de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ). Os campos foram obtidos considerando-se a posição central do VCAN ( $18^{\circ}\text{ S} - 29^{\circ}\text{ W}$ ) em seu período de gênese (00 UTC do dia 13 de fevereiro de 2009). A linha tracejada preta indica a posição central do vórtice.

Ramírez *et al.* (1999) detectaram a ocorrência de VCANs no NEB por meio de campos diários de vento, vorticidade relativa e desvio zonal de temperatura do ar, para o período de 1980 a 1989. Esse estudo incluiu na climatologia somente VCANs com tempo de vida igual ou superior a três dias. Desse modo, foram encontradas 176 ocorrências do sistema, considerando-se os 10 anos de estudo. Um total de 46% dos VCANs ocorreu nos meses de verão, enquanto 8,5% dos vórtices foram registrados nos meses de maio a setembro. Nos meses de DJF, os resultados indicaram um tempo de vida médio de 6,8 dias para os VCANs. Os vórtices com maior duração ocorreram nos meses de verão. Resultado semelhante foi obtido por Repinaldo (2010), que encontrou tempo de vida médio de 6,9 dias (para o período de 1988 a 2000) para sistemas registrados no verão. Todavia, esse estudo incluiu vórtices com tempo mínimo de um dia de vida. Considerando a maior longevidade dos VCANs durante o verão, Germano (2016) observou que vórtices com tempo de vida médio de 9 a 16 dias ocorreram somente nos meses de DJF.

O verão também é mostrado como a estação de maior ocorrência de VCANs nos estudos de Coutinho (2008), Morais (2016) e Reis (2018). Como Coutinho (2008) incluiu na climatologia sistemas com tempo de vida igual ou superior a dois dias, obteve-se duração média desses sistemas de 2 a 4 dias. Já Morais (2016),

contabilizou todos os sistemas com tempo de vida igual ou superior a 24 horas e, assim, o tempo de vida médio foi menor, de 1 a 3 dias.

Os VCANs que ocorrem nas cercanias do NEB são de origem tropical, entretanto, também existem os VCANs de origem subtropical (mas que não atuam no NEB), cujos mecanismos que contribuem para a sua gênese são um tanto distintos dos tropicais. Todavia, os processos físicos de gênese de ambos ainda são pouco descritos na literatura. Alguns estudos (Hoskins *et al.*, 1985; Appenzeller *et al.*, 1996; Wernli & Sprenger, 2007; Sprenger *et al.*, 2007; Nieto *et al.*, 2008) têm sugerido que a intrusão horizontal ou vertical de vorticidade potencial pode ser um mecanismo importante para a gênese dos VCANs subtropicais, enquanto a relevância dessa variável para os VCANs do NEB só foi mencionada por Rao *et al.* (2007), que utilizaram tal variável em coordenadas isentrópicas (Vorticidade Potencial Isentrópica, VPI).

A VPI é uma grandeza conservativa para parcelas de ar em movimento adiabático (ausência de liberação de calor latente), podendo ser utilizada como um traçador da origem de massas de ar (Bluenstein, 1993). Isso se deve pela VPI possuir altos valores na estratosfera, em função da elevada estabilidade estática do ar, favorecida pela ausência de movimentos convectivos e turbulência (Bernadet & Silva Dias,

1989). Como a VPI é uma grandeza conservativa, quando a parcela de ar proveniente da estratosfera atinge a troposfera, sua estabilidade estática diminui e, para conservar a VPI, sua vorticidade absoluta deve aumentar (Bluenstein, 1993). Assim, a identificação de regiões com altos valores de VPI na troposfera é um indicativo de intrusão de ar de origem estratosférica, e que contribui para a geração de anomalias de circulação ciclônica (Reboita & Veiga, 2017). A VPI foi definida por Holton (2004) por meio da Equação (1):

$$VPI = (\zeta_{\theta} + f) \left( -g \frac{\partial \theta}{\partial p} \right) \quad (1)$$

onde  $\zeta_{\theta}$  é a componente vertical da vorticidade relativa isentrópica,  $f$  é a vorticidade planetária,  $g$  é a aceleração da gravidade e  $\frac{\partial \theta}{\partial p}$  é a estabilidade estática.

A VPI é dada em UVP (Unidades de Vorticidade Potencial), sendo que 1 UVP corresponde a  $10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \text{ K kg}^{-1}$ . Valores menores (em módulo) que  $\approx 1,5$  UVP são associados ao ar troposférico, enquanto valores maiores estão associados ao ar estratosférico (Postel & Hitchman, 1999). Por definição, no Hemisfério Norte o sinal da VPI é positivo e no Hemisfério Sul é negativo.

Sabendo-se que a VPI é uma traçadora da incursão de ar estratosférico na troposfera, a questão é: quais padrões da circulação atmosférica podem contribuir para a incursão? Uma resposta para isso são os eventos de quebra da onda de Rossby (no inglês, Rossby Wave Breaking – RWB). A definição da RWB é muito generalista: “processo no qual os contornos materiais são rapidamente e irreversivelmente deformados” (McIntyre & Palmer, 1984). Uma definição de mais fácil compreensão seria em termos de aparência do escoamento em superfícies isentrópicas. Nessas superfícies, a RWB assume a forma de uma língua estreita e meridionalmente alongada no campo da VPI (McIntyre & Palmer, 1984). De acordo com Postel & Hitchman (1999), nos extratropicos, a RWB em escala sinótica forma-se durante o estágio final de uma onda baroclínica e pode se estender meridionalmente além dos subtropicos.

Entretanto, nos subtropicos e trópicos, a RWB também pode ocorrer por influência dos anticiclones subtropicais, independentemente da existência de uma onda baroclínica.

O transporte horizontal de ar de latitudes mais altas (extratropicos) para mais baixas (trópicos) durante os eventos da RWB é também denominado de intrusão (Waugh & Polvani, 2000). As intrusões são caracterizadas por altos valores de VPI, geralmente na camada isentrópica de 350 K ( $\approx 200$  hPa nos trópicos; Bluenstein, 1993), que penetram na região tropical, e influenciam a convecção por propiciarem movimentos verticais e a desestabilização da atmosfera. Além disso, em ambientes úmidos, intrusões com altos valores de VPI podem iniciar a ciclogênese tropical (Davis & Bosart, 2006). Outros sistemas atmosféricos também podem ser modulados pela VPI. Por exemplo, Rao *et al.* (2007) sugerem que as intrusões horizontais de VPI até a região tropical da AS e oceano Atlântico Tropical Sul (OATS) contribuem para a formação de VCANs no NEB, ocasionando convergência na alta troposfera e divergência em níveis mais baixos, o que pode inibir a precipitação sobre o NEB.

Diante do exposto, o estudo tem três objetivos: (1) determinar a climatologia da ocorrência de VCANs nas cercanias do NEB nos meses de verão, considerando um período com dados recentes (2006 a 2019), a fim de complementar a literatura citada; (2) apresentar uma associação da localização dos VCANs com as anomalias de precipitação no NEB e (3) apresentar uma análise da possível influência da VPI na gênese dos VCANs.

## 2 Metodologia e Dados

### 2.1 Área de Estudo

A área de estudo compreende as latitudes  $0^{\circ}$  -  $25^{\circ}$  S e longitudes  $0^{\circ}$  -  $80^{\circ}$  W (Figura 3), a fim de incluir a atuação dos VCANs nas cercanias do NEB e a sua frequente associação à circulação da AB. O domínio de análise não considerou latitudes maiores do que  $25^{\circ}$  S para evitar a inclusão de VCANs de origem subtropical. A área utilizada é similar à de outros estudos, como os de Coutinho (2008) e Morais (2016).

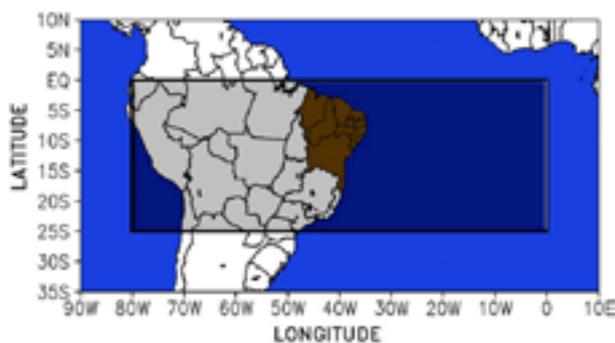


Figura 3 Área selecionada para identificação e análise dos VCANs (retângulo preenchido em escuro). O setor a oeste de 60° W é usado apenas para facilitar a identificação da AB. A área marrom corresponde à região do NEB.

## 2.2 Dados

Para identificação e análise dos VCANs, as variáveis atmosféricas empregadas foram temperatura do ar e componentes zonal e meridional do vento. Essas variáveis foram obtidas da reanálise ERA-Interim (Dee *et al.*, 2011; <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era-interim>), com resolução espacial de 0,75°, frequência temporal de 6 horas, no nível atmosférico de 200 hPa e período de dezembro de 2005 a fevereiro de 2019.

Com o objetivo de avaliar os campos de VPI nas cercanias do NEB, utilizaram-se dados dessa variável provenientes da mesma reanálise supracitada (com resolução espacial de 0,75°) para a superfície isentrópica de 350 K, no período de dezembro de 2005 a fevereiro de 2019. Uma camada/superfície isentrópica é aquela em que dada variável atmosférica é medida em relação à temperatura do ar da respectiva camada. No caso, em relação à temperatura do ar da camada isentrópica de 350 K.

Para analisar as condições de precipitação associadas aos vórtices, foram utilizados dados diários do NOAA/Climate Prediction Center (CPC) (Chen *et al.*, 2008) – disponíveis em <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/cpc-unified-gauge-based-analysis-global-daily-precipitation> –, com resolução espacial de 0,5°, para o período de janeiro de 1979 a dezembro de 2017. Salienta-se que esse conjunto de dados não cobre os dois últimos verões analisados no estudo (2018 e 2019).

O período de estudo se restringiu aos meses de verão austral (dezembro, janeiro e fevereiro – DJF), dado que a frequência de VCANs nas cercanias do NEB é maior nesses meses (Gan & Kousky, 1986; Ramírez *et al.*, 1999; Morais, 2016).

## 2.3 Identificação e Análise Subjetiva dos VCANs

Para a detecção dos VCANs, foi calculado o desvio zonal de temperatura do ar no nível de 200 hPa, como meio de identificar os núcleos de centro mais frio. Plotaram-se linhas de corrente para a mesma camada atmosférica, com o objetivo de mostrar as circulações ciclônicas fechadas, bem como a ocorrência de cristas e cavados. A escolha do nível de 200 hPa para a identificação dos vórtices se deve a uma maior frequência observada de VCANs, durante o verão, nessa camada atmosférica (Satyamurty & Seluchi, 2007). Esse período de maior incidência de vórtices coincide com a época do ano em que o escoamento, no nível de 200 hPa, na AS, é mais meridional. Tal escoamento é caracterizado por um centro de alta pressão na região da Bolívia (a AB) e um cavado sobre o OATS, condições que favorecem a formação dos vórtices ciclônicos (Kousky & Gan, 1981).

Após a construção dos campos atmosféricos, os VCANs foram registrados avaliando-se principalmente três aspectos: (1) existência de núcleos com temperatura mais fria; (2) associação desses núcleos a linhas de corrente com circulação ciclônica fechada e; (3) circulações ciclônicas fechadas de centro mais frio com tempo de vida mínimo de 24 horas. A partir dos critérios apresentados, foi possível analisar os VCANs e suas características como o tempo de vida médio, o sentido de deslocamento e a área de atuação dos vórtices.

A Figura 4 exemplifica o método de detecção dos VCANs mediante a análise subjetiva de campos sobrepostos de linhas de corrente e desvio zonal de temperatura. Pela figura, verifica-se um cavado no nível de 200 hPa atuando sobre o OATS, com formato de letra ômega, cujo centro possui circulação ciclônica fechada e está localizado em torno da latitude 10° S e longitude 32° W (indicado pelas iniciais VCAN). Próximo ao centro ciclônico, nota-se um núcleo de

temperatura mais fria, com desvio negativo de até 3 °C. Observa-se também a AB bem configurada sobre o continente, e sua circulação associada ao cavado, evidenciando o mecanismo clássico de formação proposto por Kousky & Gan (1981).

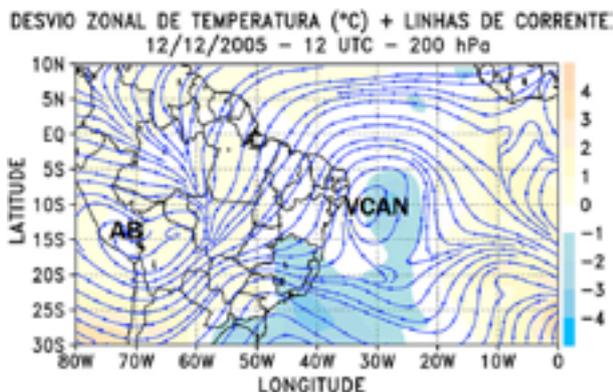


Figura 4 Identificação de VCAN mediante campos sobrepostos de linhas de corrente e desvio zonal de temperatura do ar (°C, em cores), no nível de 200 hPa. As iniciais AB e VCAN indicam, respectivamente, a Alta da Bolívia e o Vórtice Ciclônico de Altos Níveis.

Como descrito em Coutinho *et al.* (2010), o centro de circulação ciclônica não coincide necessariamente com o centro de mínima vorticidade relativa, dado que a maioria dos VCANs não possui estrutura horizontal simétrica. Por conseguinte, deduz-se que, para a caracterização do vórtice no atual trabalho, a posição do centro de circulação ciclônica não precisa obrigatoriamente coincidir com a posição do centro do núcleo de temperatura mais fria.

No presente trabalho, foram catalogados os vórtices com duração mínima de 24 horas, e as posições dos VCANs foram identificadas pela verificação das coordenadas geográficas do centro da circulação ciclônica em cada tempo de atuação. Quando a circulação do VCAN não se mostra fechada, e volta a se fechar logo após um intervalo de 24 horas, o sistema é considerado como um novo. Não foi utilizado nenhum limiar de temperatura no estudo, a fim de não tornar o método para identificação dos vórtices restritivo. Esse critério é semelhante ao de Ramírez *et al.* (1999), que empregaram o desvio zonal de temperatura do ar sem utilização de limiar dessa variável, porém com a finalidade de localizar o núcleo frio dos VCANs.

Para cada sistema detectado foi calculada a distância total percorrida, estimada pela soma das distâncias percorridas entre dois tempos consecutivos (ou seja, a cada seis horas), ao longo de todo o ciclo de existência do VCAN, calculadas pela lei dos cossenos na trigonometria esférica (Van Brummelen, 2012) de acordo com a Equação (2).

$$D = \text{acos}(\text{sen}\varphi_1 + \text{sen}\varphi_2 + \text{cos}\varphi_1 + \text{cos}\varphi_2 + \text{cos}\Delta\lambda) \cdot R \quad (2)$$

onde  $D$  é a distância entre duas coordenadas geográficas (em km),  $\varphi_1$  é a latitude do ponto 1 (em radianos),  $\varphi_2$  é a latitude do ponto 2 (em radianos),  $\Delta\lambda$  é a diferença entre as longitudes dos pontos 1 e 2 (em radianos), e  $R$  é o raio da Terra (em km). Vórtices cujo deslocamento não ultrapassou os limites de uma grade de 4°×4° (em relação à sua posição inicial) foram classificados como VCANs quase estacionários.

#### 2.4 Análise da Vorticidade Potencial Isentrópica

Uma análise dos campos de VPI nas cercanias do NEB complementa o estudo climatológico dos VCANs. Inicialmente, foram definidos quatro quadrantes e denominados de 1, 2, 3 e 4 (Figura 5). O quadrante 1 corresponde à área entre 0°-10°S e 30° W - 45° W; o quadrante 2 corresponde à área limitada entre 0°- 10° S e 15° W - 30° W; o quadrante 3 engloba a área entre 10° S - 20° S e 30° W - 45° W e, por fim, o quadrante 4 compreende a área entre 10° S - 20° S e 15° W - 30° W.

O passo seguinte foi identificar as ocorrências de VCANs em cada quadrante, considerando-se somente

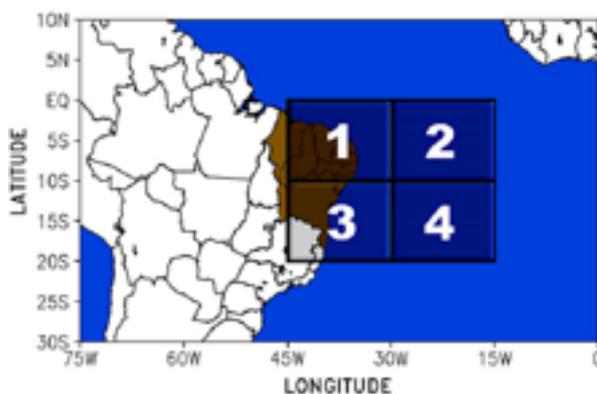


Figura 5 Quadrantes selecionados para análise de eventos de intrusão de VPI nas cercanias do NEB.

as coordenadas geográficas da posição inicial do centro de cada vórtice (fase de formação). Após a identificação das ocorrências, foram calculadas duas médias para a VPI: uma incluindo todos os dias do período em estudo (considerada como média climatológica) e outra considerando apenas os dias correspondentes ao início (tempo inicial) de cada VCAN identificado. Na sequência, calculou-se a diferença: média dos eventos de VCANs menos a média climatológica. Isso permite identificar, do ponto de vista climático, possíveis intrusões de VPI que podem ser um mecanismo físico para a formação de VCANs, já que essa grandeza contribui para a vorticidade absoluta ciclônica. As análises não se restringiram ao tempo inicial dos VCANs, mas também para um dia antes e um dia após a formação desses sistemas (chamados de dia -1 e dia +1, respectivamente). Para os campos de anomalias, foi realizado o teste t de Student com intervalo de confiança de 99%, a fim de avaliar a diferença entre as composições e a significância estatística dos resultados (Stevenson, 1981).

### 3 Resultados

#### 3.1 Características Médias dos VCANs

Foram detectados 175 casos de VCANs (incluindo 28 casos de VCANs quase estacionários) nos meses de verão (DJF) do período de 2006 a 2019. Lembra-se aqui que o verão de um dado ano inclui o mês de dezembro do ano anterior. Por exemplo, no primeiro verão em estudo, que é o de 2006, os resultados incluem os meses de dezembro de 2005 a fevereiro de 2006. As maiores frequências de VCANs foram registradas nos verões de 2017 e 2013 (15 ocorrências em cada verão), seguidas dos verões de 2019, 2014, 2009 e 2008 (14 casos em cada verão) (Figura 6A). Esses resultados são similares aos divulgados nos boletins mensais de monitoramento climático do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, Climanálise). Os resultados ilustrados na Figura 6A não indicam relação clara da frequência de VCANs com o fenômeno El Niño-Oscilação Sul (ENOS; NOAA, 2019), pois o grande número de sistemas nos verões de 2019 e 2007 ocorreu em períodos de El Niño, enquanto os outros verões com grande frequência (em 2017 e de 2011 a 2014, por exemplo) ocorreram em períodos de La Niña. Por

outro lado, Morais (2016), examinando a variabilidade interanual de VCANs num período mais extenso (1984 a 2013), sugere a possível associação desses sistemas com episódios de El Niño.

A média de ocorrência de VCANs nos meses de dezembro a fevereiro (Figura 6B) é maior nos dois primeiros meses da estação quente, correspondendo a 37,1% e 33,1% dos casos observados, respectivamente. Esses resultados concordam parcialmente com aqueles encontrados em Gan & Kousky (1986) e Ramírez *et al.* (1999), nos quais se verificou que a maior frequência de VCANs ocorreu no mês de janeiro. A diferença entre os resultados pode ser consequente do uso de fontes de dados e períodos distintos para análise dos vórtices.

Há maior frequência de VCANs com tempo de vida de 2, 3 e 4 dias, correspondendo a 37,1% dos casos, seguida de VCANs com duração de 1, 6 e 9 dias, contabilizando 26,3% dos casos identificados (Figura 6C). Esses resultados condizem parcialmente com os de Coutinho (2008), em que 75,3% dos vórtices observados tiveram ciclo de vida de 2 a 4 dias. A grande frequência de VCANs com tempo de vida de 6 a 9 dias também corrobora os resultados de Ramírez *et al.* (1999) e Repinaldo (2010), que encontraram um tempo de vida médio para o sistema de 6,8 e 6,9 dias, respectivamente. No presente estudo, cerca de 17,1% dos casos encontrados foram de VCANs com duração igual ou superior a 10 dias. Segundo Morais (2016), a maioria dos vórtices com período de vida maior que 10 dias ocorre apenas no verão e primavera. Entre os VCANs quase estacionários, 78,6% tiveram duração de 1 e 2 dias (39,3% cada), seguidos de 14,3% com duração de 3 dias e 7,1% com tempo médio de 4 dias.

Com relação ao sentido de deslocamento dos VCANs (Figura 6D), esse foi computado com base nas posições de início e fim dos vórtices. 16% dos casos identificados foram classificados como vórtices quase estacionários (indicados na Figura 6D como QE). Os VCANs apresentaram deslocamento preferencial para o quadrante oeste, pois 44,6% dos casos moveram-se para sudoeste, enquanto 38,3% deslocaram-se para noroeste. Esses resultados condizem aos de estudos prévios (Gan & Kousky, 1986; Reboita *et al.*, 2010; Morais, 2016), que observaram uma tendência dos VCANs nas cercanias do NEB se deslocarem para o

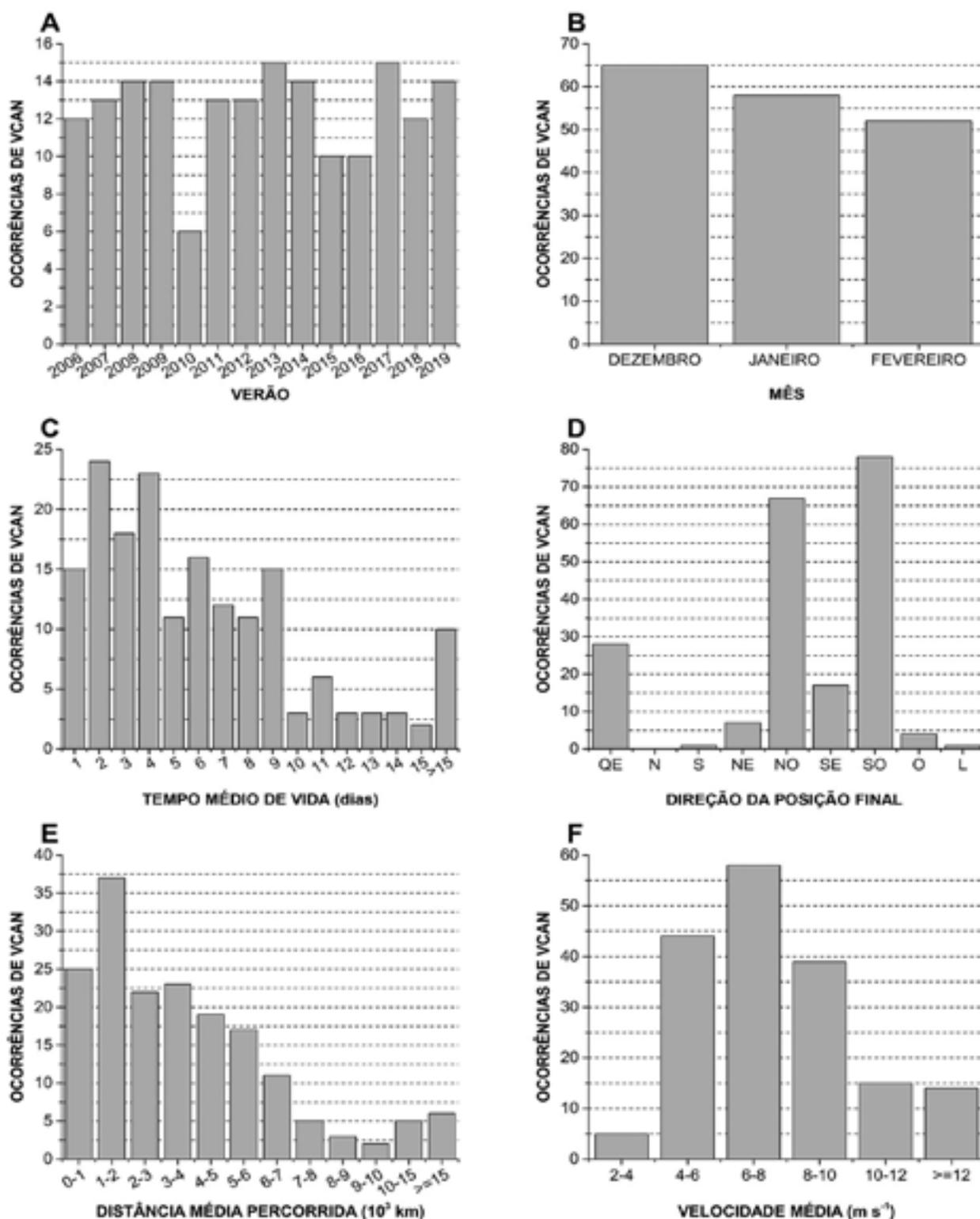


Figura 6 Resultados da análise de VCANs no NEB para o período de dezembro de 2005 a fevereiro de 2019; A. Ocorrências de vórtices de acordo com o verão do ano de estudo; B. Ocorrências de vórtices de acordo com o mês de verão austral (DJF); C. Ocorrências de vórtices de acordo com o seu tempo médio de vida (dias); D. Ocorrências de vórtices de acordo com a direção de sua posição final; E. Ocorrências de vórtices de acordo com o seu deslocamento médio (10<sup>3</sup> km); F. Ocorrências de vórtices de acordo com sua velocidade média (m s<sup>-1</sup>). Nas Figuras E e F, os intervalos de classe não incluem o último número.

quadrante oeste. Conforme Ramírez *et al.* (1999), os VCANs podem ter deslocamento regular, irregular ou ainda permanecerem estacionários por alguns dias. O deslocamento regular define-se como aquele no qual só ocorre movimento para oeste, e irregular quando a direção de propagação muda de leste a oeste e vice-versa. Há também vórtices mais raros, que se deslocam até o centro do continente, podendo atingir a costa oeste da AS. De fato, no atual trabalho, somente quatro VCANs com esse tipo de percurso foram observados, ocorridos em fevereiro de 2009, dezembro de 2010, janeiro de 2015 e janeiro de 2017.

Em termos de distância percorrida (Figura 6E), verifica-se uma maior frequência de VCANs que percorreram distâncias entre 1000 e 2000 km (21,1% dos casos), seguida de vórtices que se deslocaram por até 1000 km (14,3%), entre 3000 e 4000 km (13,1%), e entre 2000 e 3000 km (12,6%). Vórtices quase estacionários obtiveram um deslocamento médio de 827,3 km. 6,3% dos VCANs moveram-se por distâncias iguais ou superiores a 10000 km. Morais (2016) observou que, durante o verão, o percurso dos vórtices poderia alcançar até 11000 km. A autora sugere que os VCANs tendem a percorrer distâncias maiores nos meses mais quentes.

Por fim, é apresentada a distribuição de VCANs de acordo com a sua velocidade média (Figura 6F), calculada mediante a razão entre a distância total percorrida e o tempo de vida desses sistemas. A maior parte dos VCANs, aproximadamente 33,1% dos casos, possui velocidade média de 6 a 8 m s<sup>-1</sup>, seguida de vórtices com velocidade média de 4 a 6 m s<sup>-1</sup> (25,1%), e VCANs com velocidade média de 8 a 10 m s<sup>-1</sup> (22,3%). Em geral, a velocidade média dos 175 casos foi de 7,7 m s<sup>-1</sup>. Esses resultados são análogos aos de Morais (2016), a qual concluiu que, em todas as estações do ano, a maioria dos VCANs percorre entre 500 e 1000 km nas primeiras 24 horas de vida, computando uma velocidade média de 8,7 m s<sup>-1</sup>. Para os VCANs quase estacionários, obteve-se uma velocidade média de 6,1 m s<sup>-1</sup>.

A Tabela 1 apresenta uma síntese dos resultados do presente estudo (última linha) com alguns da literatura sobre VCANs no NEB (demais linhas). É válido notar que as características gerais dos VCANs obtidas aqui estão em concordância com as de estudos anteriores, indicando que a maioria dos VCANs tende a durar poucos dias. Outras características como distância percorrida e velocidade média não são frequentemente encontradas em muitos estudos.

Tabela 1 Resultados de estudos climatológicos e/ou estatísticos sobre VCANs nas cercanias do NEB.

Período	Distância Média Percorrida (km)	Velocidade Média (m s <sup>-1</sup> )	Tempo Média de Vida – DJF (dias)	Nível (hPa)	Método	Referência
1974-1981	–	–	5,6	200	Subjetivo, reanálise, satélite	Gan & Kousky (1986)
1980-1989	–	–	6,8	700, 500, 300 e 200	Subjetivo, reanálise, satélite	Ramírez <i>et al.</i> (1999)
1994-2001	–	–	10	200	Objetivo, subjetivo, reanálise, satélite	Silva (2005)
1979-2006	–	–	2 a 4	200	Objetivo, subjetivo, reanálise, satélite	Coutinho (2008)
1988-2000	–	–	6,9	200	Subjetivo, reanálise, satélite	Repinaldo (2010)
1984-2013	2000	8,7	1 a 3	200	Objetivo, subjetivo, reanálise, satélite	Morais (2016)
2006-2019	4167	7,7	2 a 4	200	Subjetivo, reanálise	Ferreira <i>et al.</i> (2019)

### 3.2 VCANs e a Precipitação no NEB

Para descrever a influência dos VCANs na precipitação no NEB, é realizada uma análise focando os verões de 2007, 2011 e 2017, em função das anomalias de precipitação registradas em tal região. A Figura 7 ilustra a trajetória dos VCANs juntamente com a anomalia mensal de precipitação (em mm mês<sup>-1</sup>), que foi computada em relação à média climatológica de 1979 a 2017.

Nos meses de dezembro de 2006 e janeiro de 2007 (Figuras 7A e 7B), os VCANs contribuíram para déficit de precipitação no setor norte do NEB, uma vez que se concentraram sobre tal área. Já em fevereiro de 2007 (Figura 7C), os centros dos VCANs ocorreram afastados do continente, propiciando os eventos de precipitação no NEB, o que concorda com a descrição apresentada no boletim Climanálise (2007). Ressalta-se que fevereiro de 2007 foi um mês atípico em termos de anomalias de precipitação no NEB. A localização dos centros dos VCANs sobre áreas oceânicas (indicados na Figura 7C como VCAN1 e VCAN2), juntamente com a atuação da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) ao sul de sua posição climatológica (Climanálise, 2007), proporcionou o aumento de precipitação sobre o NEB.

O verão de 2011 no NEB foi caracterizado por anomalias positivas de precipitação, sendo mais fracas em dezembro de 2010 e mais acentuadas em janeiro e fevereiro de 2011 (Figuras 7D a 7F). Na primeira quinzena de dezembro de 2010, os episódios de VCANs sobre o norte do NEB (representados na Figura 7D como VCAN1 e VCAN3) inibiram a ocorrência de chuvas em parte do setor leste dessa região (Climanálise, 2011). Na segunda quinzena do mês, a atuação mais ao sul do vórtice (VCAN3) permitiu que a atividade convectiva se desenvolvesse em todo o norte do NEB, enquanto inibiu a convecção no centro-sul da Bahia e nos estados de Sergipe e Alagoas (Climanálise, 2011). Em geral, no mês de janeiro de 2011, os vórtices contribuíram para menor anomalia positiva de precipitação sobre as latitudes da Bahia do que no norte do NEB (Figura 7E). Isso foi devido principalmente aos VCAN3 e VCAN4 que se deslocaram para o interior do continente e se posicionaram mais ao sul (Climanálise, 2011). Situação similar ocorreu em fevereiro de 2011, em que os VCANs se concentraram entre a Bahia e norte do

sudeste do Brasil (Figura 7F). Portanto, a precipitação foi inibida sob o centro do vórtice e favorecida no norte do NEB.

As Figuras 7G a 7I ilustram as trajetórias de VCANs e anomalia mensal de precipitação para o verão de 2017. Enfatiza-se que esse verão fez parte da seca mais severa já registrada no Semiárido Nordestino, ocorrida no período de 2012 a 2017 (Brito *et al.*, 2018; Marengo *et al.*, 2018). A Figura 7G indica a ocorrência de VCANs sobre o norte do NEB e sul da Bahia (identificados como VCAN1, VCAN3, VCAN4 e VCAN5), contribuindo para a estiagem e anomalias negativas de precipitação em grande parte do NEB. No mês de janeiro de 2017 (Figura 7H), além dos VCAN3, VCAN4 e VCAN5 atuando sobre o NEB, houve um evento mais raro que adentrou o continente até o sul de Amazonas e norte de Rondônia (VCAN1). Consequentemente, esses vórtices ajudaram a reduzir a precipitação no NEB. Em fevereiro de 2017, notam-se apenas dois episódios de VCANs próximos a áreas continentais (ilustrados na Figura 7I como VCAN2 e VCAN3), favorecendo a ocorrência de precipitação acima da média em regiões do NEB.

Os resultados apresentados para os anos de 2007 e 2011 puderam ser comparados com os dos boletins Climanálise, enquanto a análise para 2017 não, uma vez que tal produto parou de ser disponibilizado em dezembro de 2014. Destaca-se também que muitas vezes as anomalias de precipitação no NEB podem não apresentar uma resposta direta à influência dos VCANs, pois outros sistemas podem modular as anomalias de precipitação como, por exemplo, o dipolo de temperatura de superfície do mar (TSM) do Atlântico Tropical que afeta a posição da ZCIT (Hastenrath & Greischar, 1993), bem como (na escala intrassazonal) a oscilação de Madden-Julian (Souza & Ambrizzi, 2006).

### 3.3. Análise da Vorticidade Potencial Isentrópica (VPI)

Nessa seção, são apresentados os resultados da análise de VPI, de acordo com cada quadrante selecionado. Dos 175 casos de VCANs identificados, 131 tiveram gênese em um dos quadrantes mostrados na Figura 5, sendo 21 no primeiro, 22 no segundo, 37 no terceiro e 51 no quarto quadrante. Em geral, os quadrantes 3 e 4 apresentaram 45 casos de formação de VCANs a mais que os quadrantes 1 e 2.

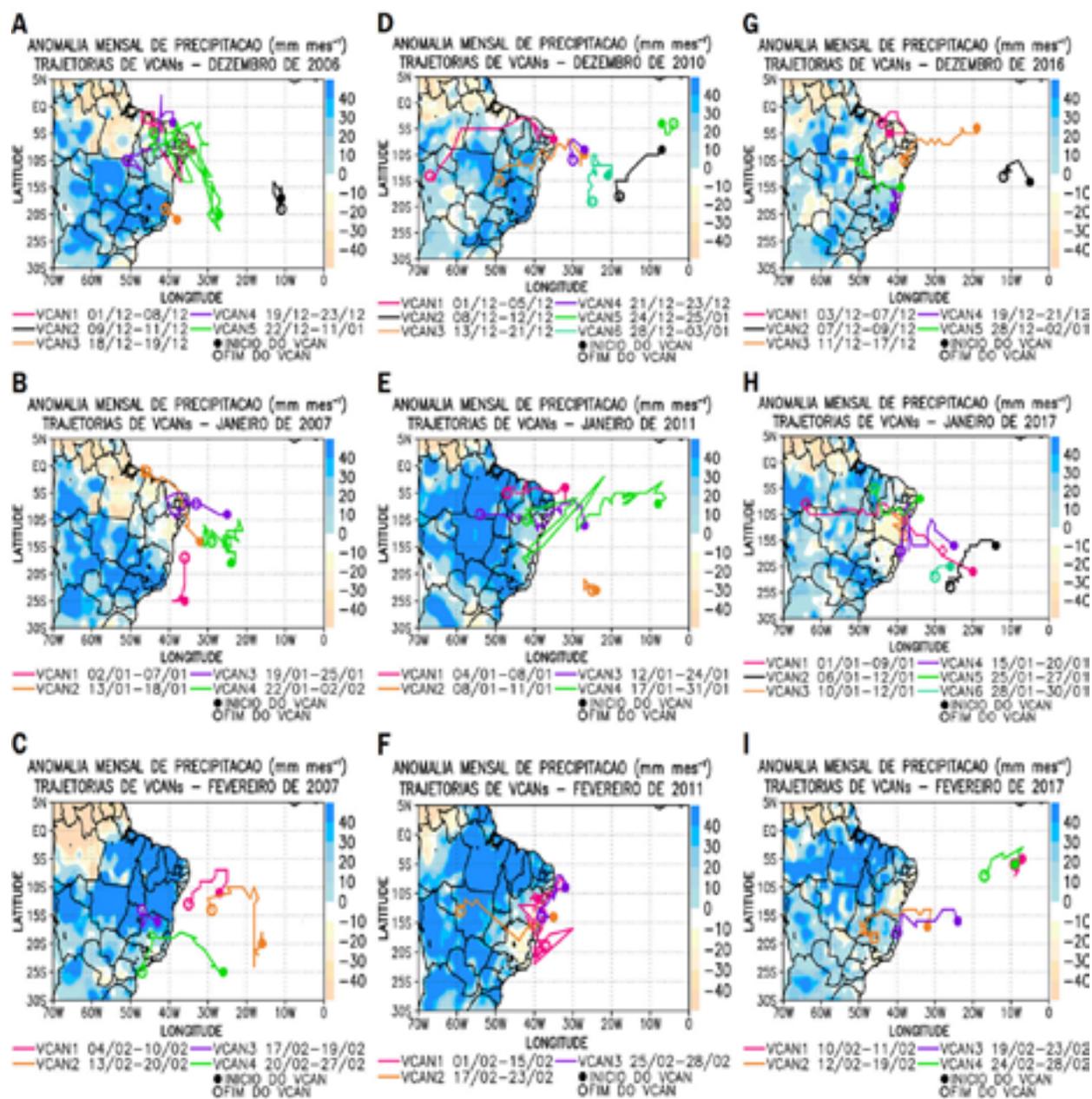


Figura 7 Trajetórias de VCANs e anomalia mensal de precipitação ( $\text{mm mês}^{-1}$ ); A. Dezembro de 2006; B. Janeiro de 2007; C. Fevereiro de 2007; D. Dezembro de 2010; E. Janeiro de 2011; F. Fevereiro de 2011; G. Dezembro de 2016; H. Janeiro de 2017; I. Fevereiro de 2017.

Na Figura 8, têm-se as médias (considerando-se os dias com VCANs) e anomalias (média dos casos de VCANs menos a média climatológica) da VPI e da direção e intensidade do vento ( $\text{m s}^{-1}$ ) para os casos ocorridos no Quadrante 1. Um dia antes da gênese dos VCANs (dia -1, Figura 8A), a circulação atmosférica em 200 hPa é caracterizada por um cavado de grande amplitude que se estende de cerca de 25°S

a 5°S e, associados a ele, aparecem valores de até -1,2 UVP. Em termos de anomalias, predomina circulação ciclônica e um núcleo de VPI justamente na região em que os VCANs irão se formar. Como a anomalia de VPI se intensifica no dia 0 (Figura 8E), sugere-se que essa contribua com vorticidade absoluta ciclônica para formação/intensificação do VCAN, sendo um mecanismo complementar ao proposto por Kousky

& Gan (1981). Aqui, a palavra complementar denota que a contribuição da VPI pode ocorrer juntamente aos casos que seguem o modelo clássico de formação. Entretanto, a incursão horizontal de VPI também pode atuar sozinha para formação dos VCANs, por meio dos remanescentes da massa de ar com vorticidade

absoluta ciclônica que adentra as latitudes tropicais, o que é similar ao documentado no caso dos VCANs subtropicais (Appenzeller *et al.*, 1996; Sprenger *et al.*, 2007). No dia +1, há um enfraquecimento nas anomalias de VPI e a anomalia de circulação ciclônica se encontra mais confinada ao leste do NEB (Figura 8F).

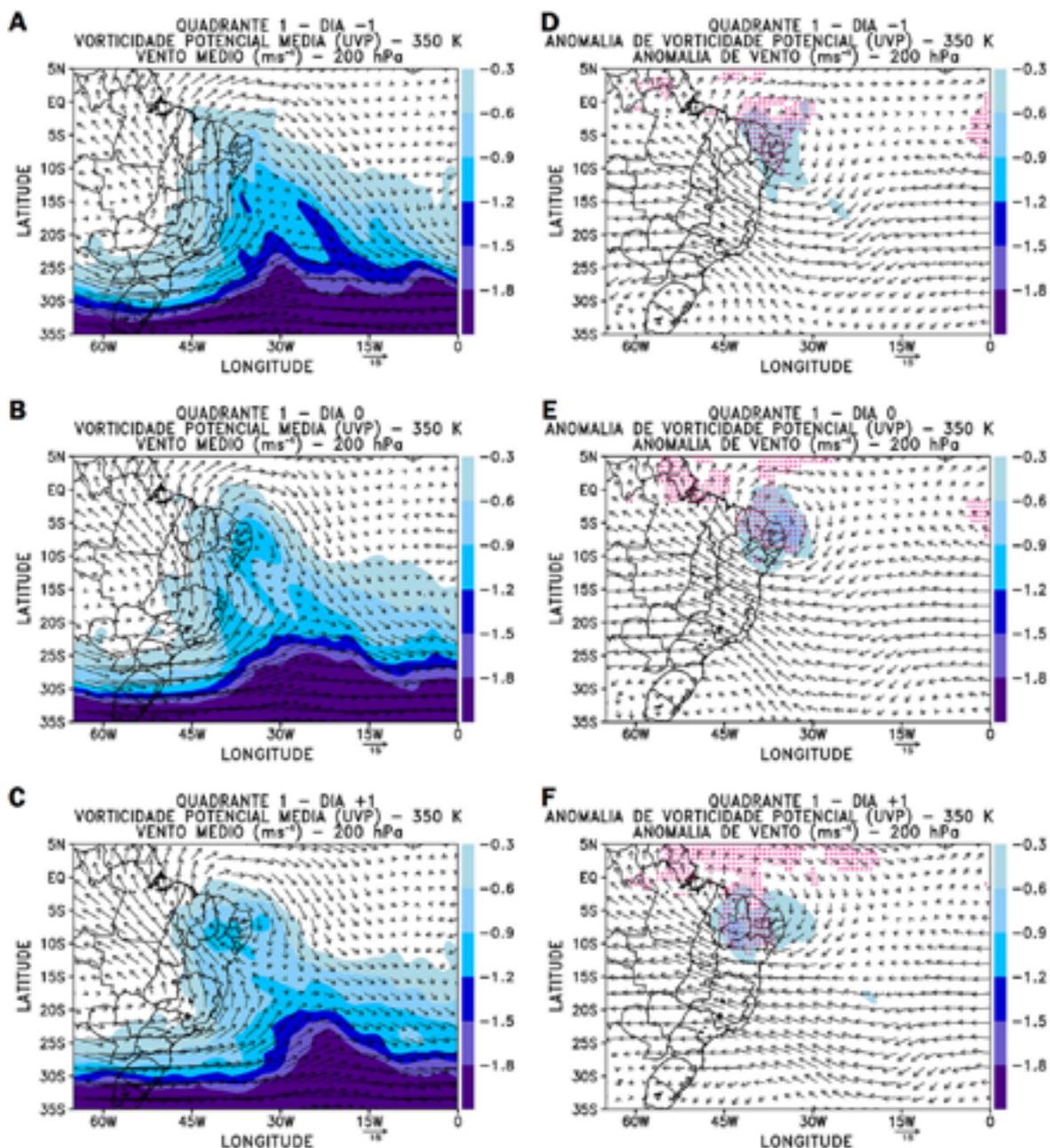


Figura 8 Coluna da esquerda: média de VPI ( $10^{-6} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ K kg}^{-1}$ ) e da direção e intensidade do vento ( $\text{m s}^{-1}$ ); A. O dia anterior à formação de VCANs na região do Quadrante 1; B. O dia de formação de VCANs; C. O dia posterior à formação de VCANs. Coluna da direita: anomalia de VPI ( $10^{-6} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ K kg}^{-1}$ ) e da direção e intensidade do vento ( $\text{m s}^{-1}$ ). D. O dia anterior à formação de VCANs; E. O dia de formação de VCANs; F. O dia posterior à formação de VCANs. Áreas com pontilhado magenta são significativas ao nível de 99%, baseado no teste *t* de Student. No Hemisfério Sul, os valores de VPI são negativos.

As Figuras 9, 10 e 11 apresentam os mesmos campos da Figura 8, porém para os VCANs ocorridos nos quadrantes 2, 3 e 4, respectivamente. Considerando-se a Figura 9, observa-se que os campos de VPI são similares aos encontrados no Quadrante 1, com a diferença de estarem mais deslocados para leste, sobre o OATS. Embora os campos de VPI dos quadrantes

1 e 2 não mostrem eventos de intrusão de VPI com valores mais negativos que -1,2 UVP, é válido notar a presença de incursões de VPI sobre o NEB em todos os tempos analisados, bem como a existência de circulação ciclônica nas regiões de maior vorticidade potencial (em módulo), o que pode indicar uma contribuição dessa variável para a formação dos VCANs.

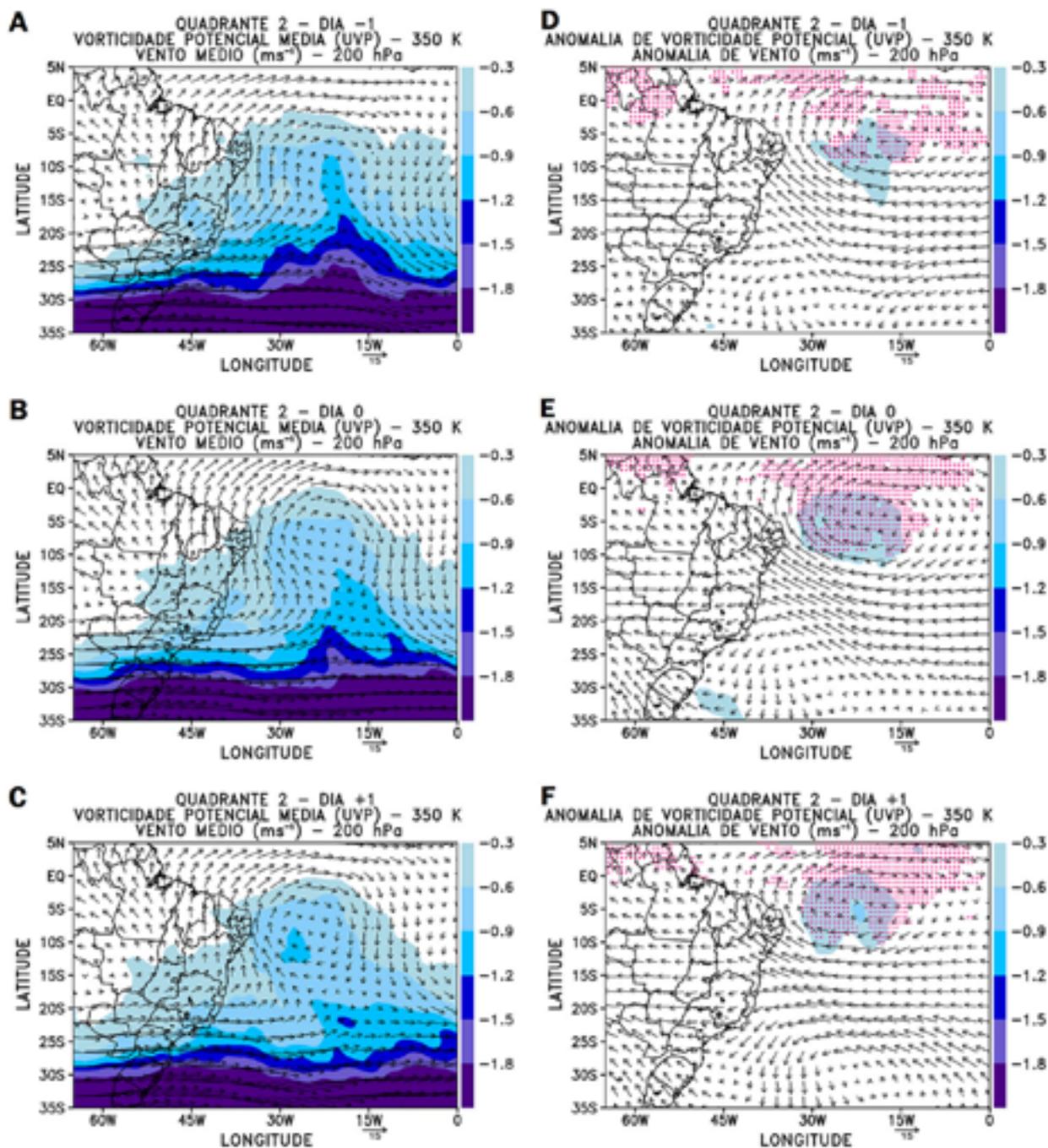


Figura 9 Similar à Figura 8, exceto para os VCANs que se formaram na região do Quadrante 2.

Por outro lado, as análises realizadas para os quadrantes 3 e 4 (Figuras 10 e 11) revelam incursões horizontais de VPI com valores mais negativos que -1,5 UVP, suportando a ideia de que massa de ar transportada da estratosfera das regiões extratropicais pode ter contribuição na formação dos VCANs. As anomalias de VPI do Quadrante 3 (Figuras 10D a 10F)

são mais intensas e abrangem áreas maiores do que aquelas obtidas nos dois primeiros quadrantes. Nos dias 0 e +1 ocorrem anomalias de até -0,9 UVP em áreas oceânicas próximas à costa da Bahia. As médias (Figuras 10A a 10C) apresentam intrusões de VPI de até -1,8 UVP em latitudes mais tropicais em todos os dias, alcançando o leste da Bahia.

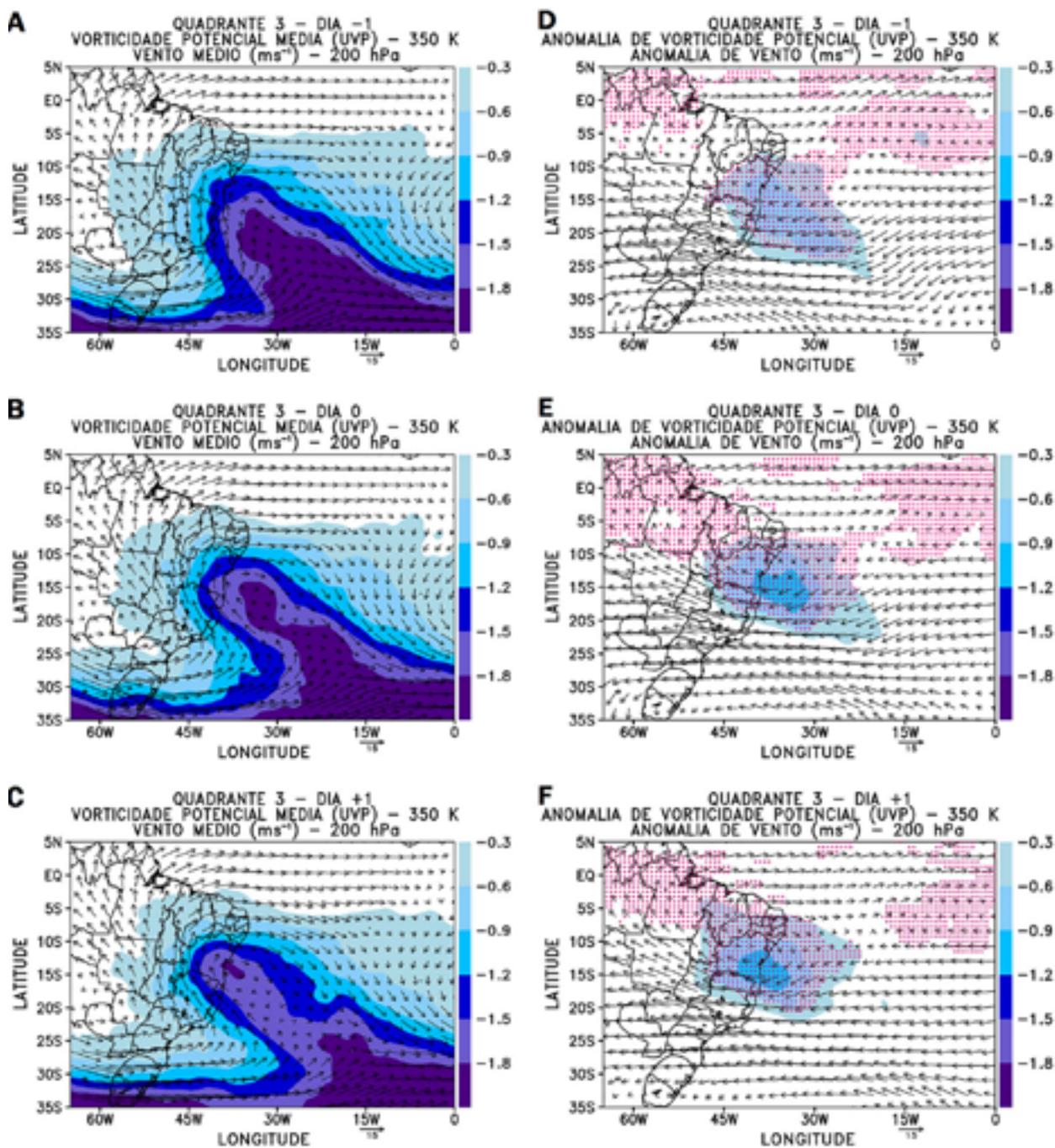


Figura 10 Similar à Figura 8, exceto para os VCANs que se formaram na região do Quadrante 3.

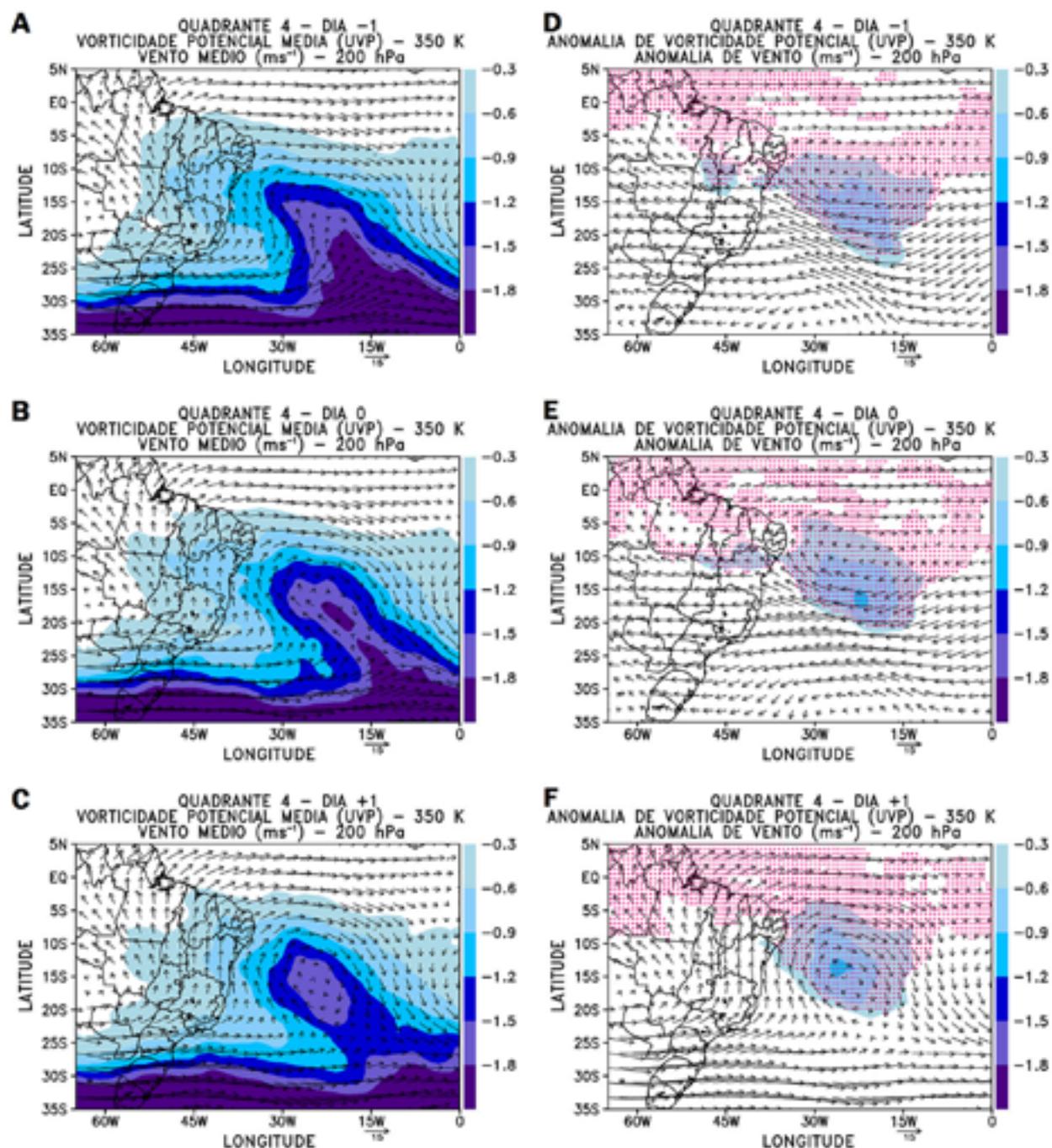


Figura 11 Similar à Figura 8, exceto para os VCANs que se formaram na região do Quadrante 4.

As anomalias obtidas para o Quadrante 4 (Figuras 11D a 11F) mostram valores de -0,3 a -0,9 UVP sobre o OATS, e estendendo-se para a costa do NEB. Assim como no Quadrante 3, os campos de médias (Figuras 11A a 11C) ilustram a incursão de altos valores de VPI (em módulo) em todos os dias, circundadas por ventos intensos no setor oeste.

Pela avaliação da vorticidade potencial isentrópica nas cercanias do NEB, tem-se que a região entre 10° S - 20° S e 30° W - 45° W (Quadrante 3) possui os maiores valores de médias e anomalias de VPI (em módulo), com intrusões de até -1,8 UVP para noroeste, em direção a latitudes mais tropicais. Resumidamente, a área limitada pelos quadrantes 3

e 4 detém maiores valores de VPI que as adjacências, o que pode sugerir uma maior propensão à intrusão de ar estratosférico e formação de vórtices ciclônicos nesses setores. Os resultados obtidos suportam os de Rao *et al.* (2007). Estes autores mostraram que há anomalias positivas de precipitação no norte do NEB quando há menor frequência de intrusão horizontal de vorticidade potencial associada com a quebra da onda de Rossby nos ventos de oeste. Contrariamente, anomalias negativas de precipitação estão associadas à maior frequência de eventos de intrusão. Isso significa que, em episódios de intrusão de vorticidade potencial, podem ocorrer VCANs que atuam de forma a inibir a precipitação na região em estudo. Destaca-se que a influência dos vórtices ciclônicos na precipitação depende da posição em que eles estão sobre o continente. Por exemplo, no verão de 2007, os VCANs contribuíram para secas no NEB, enquanto em 2011 para anomalias positivas de precipitação, como exposto na Seção 3.2.

#### 4 Conclusão

Esse estudo teve como objetivos determinar a ocorrência de VCANs nas cercanias do NEB, nos meses de verão entre 2006 e 2019, e avaliar suas características médias como tempo de vida, distância percorrida, direção preferencial de deslocamento, velocidade média, frequências mensal e anual. Para isso, foram construídos mapas de linhas de corrente e desvio zonal de temperatura no nível de 200 hPa, os quais foram analisados subjetivamente. Foram identificados 175 VCANs, sendo dezembro o mês preferencial de ocorrência. Entre as características médias dos VCANs, a maioria dos vórtices deslocou-se para o quadrante oeste, apresentou tempo médio de vida de 2 a 4 dias e percorreu distâncias entre 1000 e 2000 km, com velocidade média de 6 a 8 m s<sup>-1</sup>.

A localização geográfica dos VCANs afeta a climatologia de precipitação no NEB. Quando esses sistemas ocorrem sobre o oceano Atlântico, há favorecimento para anomalias positivas de chuva no NEB, mas quando se desenvolvem sobre o continente, atuam a inibir a precipitação.

A principal contribuição do estudo está na análise da VPI que pode ter influência na gênese dos VCANs. A análise da ocorrência de VCANs por quadrante

mostrou que, em todos os casos, há incursão horizontal de VPI de maiores para menores latitudes. Isso indica que ar estratosférico dos extratropicais está sendo transportado para a troposfera tropical. Como a VPI é uma grandeza conservativa, a massa de ar vai perdendo estabilidade estática, mas aumentando a vorticidade absoluta ciclônica, de forma que pode contribuir para a circulação ciclônica e a formação de VCANs no NEB. Portanto, sugere-se que esse mecanismo possa atuar sozinho ou juntamente com o modelo conceitual clássico de Kousky & Gan (1981) para a formação dos VCANs no NEB. O presente estudo também suporta os resultados de Rao *et al.* (2007).

#### 5 Agradecimentos

Agradecemos ao ECMWF pelos dados da reanálise ERA-Interim e ao CPC pelos dados de precipitação utilizados nesse estudo. Além disso, agradecemos ao CNPq e FAPEMIG pelo suporte financeiro.

#### 6 Referências

- Appenzeller, C.; Davies, H.C. & Norton, W.A. 1996, 'Fragmentation of stratospheric intrusions', *Journal of Geophysical Research*, vol. 101, no. D1, pp. 1435-1456. <https://doi.org/10.1029/95JD02674>
- Bernadet, L.G. & Silva Dias, M.A.F. 1989, 'Diagnóstico da estrutura vertical da troposfera associada a sistemas de precipitação', *Revista Brasileira de Meteorologia*, vol. 2, no. 4, pp. 365-377.
- Bluenstein, H.B. 1993, *Synoptic-Dynamic Meteorology in Midlatitudes: Volume II – Observations and Theory of Weather Systems*, Oxford University Press, New York.
- Brito, S.S.B.; Cunha, A.P.M.A.; Cunningham, C.C.; Alvalá, R.C.S.; Marengo, J.A. & Carvalho, M.A. 2018, 'Frequency, duration and severity of drought in the Semiarid Northeast Brazil region', *International Journal of Climatology*, vol. 38, no. 2, pp. 517-529. <https://doi.org/10.1002/joc.5225>
- Chen, M.; Shi, W.; Xie, P.; Silva, V.B.S.; Kousky, V.E.; Wayne Higgins, R. & Janowiak, J.E. 2008, 'Assessing objective techniques for gauge-based analyses of global daily precipitation', *Journal of Geophysical Research*, vol. 113, no. D4, pp. 1-13. <https://doi.org/10.1029/2007JD009132>
- Climanálise. 2007, Boletim de Monitoramento e Análise Climática, 22(02).

- Climanálise. 2011, Boletim de Monitoramento e Análise Climática, 26(02).
- Coutinho, M.D.L. 2008, '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.
- Coutinho, M.D.L.; Gan, M.A. & Rao, V.B. 2010, 'Método objetivo de identificação dos vórtices ciclônicos de altos níveis na região tropical sul: validação', *Revista Brasileira de Meteorologia*, vol. 25, no. 3, pp. 311-323. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862010000300003>
- Davis, C.A. & Bosart L.F. 2006, 'The formation of hurricane Humberto (2001): The importance of extra-tropical precursors', *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 132, no. 619, pp. 2055-2085. <https://doi.org/10.1256/qj.05.42>
- Dee, D.P.; Uppala, S.M.; Simmons, A.J.; Berrisford, P.; Poli, P.; Kobayashi, S.; Andrae, U.; Balsameda, M.A.; Balsamos, G.; Bauer, P.; Bechtold, P.; Beljaars, A.C.M.; Van De Berg, L.; Bidlot, J.; Bormann, N.; Delsol, C.; Dragani, R.; Fuentes, M.; Geer, A.J.; Haimberger, L.; Healy, S.B.; Hersbach, H.; Hólm, E.V.; Isaksen, L.; Kállberg, P.; Köhller, M.; Matricardi, M.; McNally, A.P.; Monge-Sanz, B.M.; Morcrette, J.J.; Park, B.K.; Peubey, C.; Rosnay, P.; Tavolato, C.; Thépaut, J.N. & Vitart, F. 2011, 'The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system', *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 137, no. 656, pp. 553-597. <https://doi.org/10.1002/qj.828>
- Gan, M.A. 1982, 'Um Estudo Observacional Sobre as Baixas Frias da Alta Troposfera nas Latitudes Subtropicais do Atlântico Sul e Leste do Brasil', Dissertação de Mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
- Gan, M.A. & Kousky, V.E. 1986, 'Vórtices ciclônicos da alta troposfera no oceano Atlântico Sul', *Revista Brasileira de Meteorologia*, vol. 1, pp. 19-28.
- Germano, A.S. 2016, 'Aspectos Sinóticos de Vórtices Ciclônicos em Altos Níveis que Provocaram Precipitações Extremas nas Cidades de Recife, Maceió e Aracaju no Período de 2011 a 2015: Estudo de Casos', Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Alagoas.
- Hastenrath, S. & Greischar, L. 1993, 'Circulation mechanisms related to Northeast Brazil rainfall anomalies', *Journal of Geophysical Research*, vol. 98, no. 3, pp. 5093-5102. <https://doi.org/10.1029/92JD02646>
- Holton, J.R. 2004, *An Introduction to Dynamic Meteorology – Fourth Edition*. Burlington, Elsevier Academic Press.
- Hoskins, B.J.; McIntyre, M.E. & Robertson, A.W. 1985, 'On the use and significance of isentropic potential vorticity maps', *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 111, no. 470, pp. 877-946. <https://doi.org/10.1002/qj.49711147002>
- Kousky, V.E. & Gan, M.A. 1981, 'Upper tropospheric cyclonic vortices in the tropical South Atlantic', *Tellus*, vol. 33, no. 6, pp. 538-551. <https://doi.org/10.1111/j.2153-3490.1981.tb01780.x>
- Marengo, J.A.; Liebmann, B.; Grimm, A.M.; Misra, V.; Dias, P.L.S.; Cavalcanti, I.F.A.; Carvalho, L.M.V.; Berbery, E.H.; Ambrizzi, T.; Vera, C.S.; Saulo, A.C.; Nogues-Paegle, J.; Zipser, E.; Seth, A. & Alves, L.M. 2012, 'Recent developments on the South American Monsoon System', *International Journal of Climatology*, vol. 32, no. 1, pp. 1-21. <https://doi.org/10.1002/joc.2254>
- Marengo, J.A.; Alves, L.M.; Alvalá, R.C.S.; Cunha, A.P.M.A.; Brito, S. & Moraes, O.L.L. 2018, 'Climatic characteristics of the 2010-2016 drought in the Semiarid Northeast Brazil region', *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, vol. 90, no. 2, pp. 1973-1985. <https://doi.org/10.1590/0001-3765201720170206>
- McIntyre, M.E. & Palmer, T.N. 1984, 'The 'surf zone' in the stratosphere', *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, vol. 46, no. 9, pp. 825-849. [https://doi.org/10.1016/0021-9169\(84\)90063-1](https://doi.org/10.1016/0021-9169(84)90063-1)
- Morais, M.D.C. 2016, 'Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis que Atuam no Nordeste do Brasil: Estudo Observacional e Numérico', Tese de Doutorado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
- Nieto, R.; Sprenger, M.; Wernli, H.; Trigo, R.M. & Gimeno, L. 2008, 'Identification and climatology of cut-off lows near the tropopause', *Trends and Directions in Climate Research: Annals of the New York Academy of Sciences*, vol. 1146, no. 1, pp. 256-290. <https://doi.org/10.1196/annals.1446.016>
- NOAA. 2019, National Oceanic and Atmospheric Administration – Historical El Niño / La Niña episodes (1950-present). Cold & Warm Episodes by Season. Disponível em: <[https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ONI\\_v5.php](https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php)>. Acesso em 22 mar. 2019 e 26 jun. 2019.
- Postel, G.A. & Hitchman, M.H. 1999, 'A climatology of Rossby Waves Breaking along the subtropical tropopause', *Journal of the Atmospheric Sciences*, vol. 56, pp. 359-373. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1999\)056%3C0359:ACORWB%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1999)056%3C0359:ACORWB%3E2.0.CO;2)

- Ramírez, 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*, vol. 12, no. 2, pp. 75-88. <https://www.revistascca.unam.mx/atm/index.php/atm/article/view/8443>
- Rao, V.B.; Franchito, S.H. & Barbosa, T.F. 2007, 'Impact of high potential vorticity intrusions into the tropical upper troposphere in South Atlantic on precipitation over Northeast Brazil', *Geophysical Research Letters*, 34, no. 6, pp. 1-4. <https://doi.org/10.1029/2006GL027873>
- Reboita, M.S.; Gan, M.A.; da Rocha, R.P. & Ambrizzi, T. 2010, 'Regimes de precipitação na América do Sul: Uma revisão bibliográfica', *Revista Brasileira de Meteorologia*, vol. 25, no. 2, pp. 185-204. <https://doi.org/10.1590/S0102-77862010000200004>
- Reboita, M.S.; Nieto, R.; Gimeno, L.; Da Rocha, R.P.; Ambrizzi, T.; Garreaud, R. & Krüger, L.F. 2010, 'Climatological features of cutoff low systems in the Southern Hemisphere', *Journal of Geophysical Research*, vol. 115, no. D17, pp. 1-15. <https://doi.org/10.1029/2009JD013251>
- Reboita, M.S.; Rodrigues, M.; Armando, R.P.; Freitas, C.; Martins, D. & Miller, G. 2016, 'Causas da semiaridez do Sertão Nordestino', *Revista Brasileira de Climatologia*, vol. 19, pp. 254-277. <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v19i0.42091>
- 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*, vol. 10, no. 1, pp. 41-59. <http://dx.doi.org/10.5935/1984-2295.20170004>
- Reboita, M.S. & Veiga, J.A.P. 2017, 'Análise sinótica e energética de um VCAN que causou chuva no deserto do Atacama em março de 2015', *Revista Brasileira de Meteorologia*, vol. 32, no. 1, pp. 123-139. <https://doi.org/10.1590/0102-778632120160019>
- Reis, J.S. 2018, 'Características Dinâmicas e Termodinâmicas dos Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis no Nordeste do Brasil', Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.
- Repinaldo, H.F.B. 2010, 'Vórtice Ciclônico em Altos Níveis e Corrente de Jato do Nordeste Brasileiro em Anos de El Niño e La Niña', Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Alagoas.
- Satyamurty, P. & Seluchi, M.E. 2007, 'Characteristics and structure of an upper air cold vortex in the subtropics of South America', *Meteorology and Atmospheric Physics*, vol. 96, pp. 203-220. <https://doi.org/10.1007/s00703-006-0207-6>
- Silva, L.A. 2005, 'A Influência do Vórtice Ciclônico de Altos Níveis (VCAN) Sobre a Precipitação do Nordeste do Brasil (NEB) e as Cercanias Associadas', Dissertação de Mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
- Souza, E.B. & Ambrizzi, T. 2006, 'Modulation of the intraseasonal rainfall over tropical Brazil by the Madden-Julian oscillation', *International Journal of Climatology*, vol. 26, no. 13, pp. 1759-1776. <https://doi.org/10.1002/joc.1331>
- Sprenger, M.; Wernli, H. & Bourqui, M. 2007, 'Stratosphere-troposphere exchange and its relation to potential vorticity streamers and cutoffs near the extratropical tropopause', *Journal of the Atmospheric Sciences*, vol. 64, no. 5, pp. 1587-1602. <https://doi.org/10.1175/JAS3911.1>
- Stevenson, W.J. 1981, *Estatística Aplicada à Administração*, Harper & Row Brazil, São Paulo.
- Van Brummelen, G. 2012, *Heavenly Mathematics: The Forgotten Art of Spherical Trigonometry*, Princeton University Press, Princeton.
- Vera, C.; Higgins, W.; Amador, J.; Ambrizzi, T.; Garreaud, R.; Gochis, D.; Gutzler, D.; Lettenmaier, D.; Marengo, J.; Mechoso, C.R.; Noguez-Paegle, J.; Dias, P.L.S. & Zhang, C. 2006, 'Toward a unified view of the American monsoon systems', *Journal of Climate – Special Edition*, vol. 19, pp. 4977-5000. <https://doi.org/10.1175/JCLI3896.1>
- Waugh, D.W. & Polvani, L.M. 2000, 'Climatology of intrusions into the tropical upper troposphere', *Geophysical Research Letters*, vol. 27, no. 23, pp. 3857-3860. <https://doi.org/10.1029/2000GL012250>
- Wernli, H. & Sprenger, M. 2007, 'Identification and ERA-15 climatology of potential vorticity streamers and cutoffs near the extratropical tropopause', *Journal of the Atmospheric Sciences*, vol. 64, no. 5, pp. 1569-1586. <https://doi.org/10.1175/JAS3912.1>