



ISSN:1984-2295

# Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: [www.ufpe.br/rbgfe](http://www.ufpe.br/rbgfe)



## Análise sinótica e numérica de um VCAN no Nordeste do Brasil

Michelle S. Reboita<sup>1</sup>, Bruno de Campos<sup>1</sup>, Thaís Santos<sup>1</sup>, Manoel Alonso Gan<sup>2</sup>, Vanessa S. B. Carvalho<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Recursos Naturais, Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI – Itajubá, MG, reboita@gmail.com (autor correspondente), bcampos.f90@gmail.com, santos.thaisle@gmail.com, vanessa.silveira@gmail.com. <sup>2</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE – São José dos Campos, SP, manael.gan@cptec.inpe.br.

Artigo recebido em 03/12/2016 e aceito em 13/01/2017

### RESUMO

Os Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCANs) são sistemas de baixa pressão, com centro frio e circulação ciclônica, que se formam em altos níveis da atmosfera. Na região Nordeste do Brasil e cercanias, esse sistema é um dos responsáveis por períodos chuvosos ou de estiagens dependendo de qual setor do vórtice que está atuando sobre uma determinada região. O presente trabalho tem como objetivo a análise sinótica e numérica do ciclo de vida de um VCAN que ocorreu entre os dias 31 de outubro e 7 de novembro de 2015 contribuindo para condições secas sobre grande parte do Nordeste do Brasil. Com relação ao estudo numérico, o objetivo é verificar se o modelo *Weather Research and Forecasting* (WRF) consegue reproduzir o ciclo de vida do VCAN. Entre os resultados tem-se que o VCAN se formou sobre o oceano Atlântico Sul Tropical, embebido num cavado corrente abaixo da Alta da Bolívia, e migrou para oeste, onde inibiu a ocorrência de precipitação sob seu núcleo, ou seja, sobre a região Nordeste do Brasil. O WRF simulou, de forma similar à reanálise ERA-Interim, o deslocamento do VCAN, mas com algumas diferenças na intensidade do sistema, que foi medida através da vorticidade relativa ciclônica.

Palavras-chave: VCAN, Nordeste do Brasil, análise sinótica, simulação numérica.

## Synoptic and numerical analysis of a VCAN in the Brazilian Northeast

### ABSTRACT

The Upper Tropospheric Cyclonic Vortices (UTCVs) are low pressure systems, with cold core and cyclonic flow, which are formed in high altitudes in the atmosphere. At the Brazilian Northeast and surroundings, this system is responsible for wet periods and droughts, that is associated with its different sectors position on a specific area. This study aims the synoptic and numerical analysis of a UTCV life cycle, which took place between the 31st October and 7th November 2015, contributing to dry conditions over a large portion of the Brazilian Northeast. Concerning the numerical study, the goal is to investigate if the Weather Research and Forecasting (WRF) model is able to reproduce the UTCV life cycle. Among the results, it is presented that the UTCV formation occurred over the Tropical Atlantic Ocean, embedded in a trough, downstream from the Bolivian High. It migrated westward, dwelling the Northeast Brazil, where it inhibited the rainfall. The WRF simulated similar to ERA-Interim reanalysis the system's displacement, but with some differences in its intensity, according to the cyclonic relative vorticity computed in its core.

Keywords: UTCV, Brazilian Northeast, synoptic analysis, numerical simulation.

### Introdução

Os Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCANs) são definidos como centros de baixa pressão que se formam na alta troposfera, possuindo em seu centro ar frio e predominância de movimentos subsidentes (Frank, 1970), enquanto na periferia, movimentos ascendentes e nebulosidade. Na América do Sul, há ocorrência de VCANs de origem subtropical e tropical

(Satyamurty e Seluchi, 2007; Reboita et al., 2010).

Os VCANs de origem tropical ocorrem sobre o oceano Atlântico Sul Tropical e Nordeste do Brasil (NEB), principalmente no verão (Gan e Kousky, 1986; Ramirez, 1997; Ramirez et al., 1999; Morais, 2016). Nessa estação do ano, o desenvolvimento da Alta da Bolívia (AB) juntamente com um cavado a sua jusante favorece um ambiente propício para a formação dos

VCANs (Kousky e Gan, 1981; Gan, 1982; Gan e Kousky, 1986; Satyamurty et al., 2000).

Os mecanismos responsáveis pela gênese dos VCANs tropicais ainda não são totalmente conhecidos. Entretanto, Kousky e Gan (1981) sugeriram que um destes mecanismos é a presença de uma frente fria que se desloca das latitudes médias da América do Sul para os trópicos. Nessa situação, há intensa advecção horizontal de ar quente nos baixos níveis, precedendo a frente fria que contribui para a amplificação de uma crista em altos níveis, que muitas vezes é um alongamento da AB (sistema formado através da liberação de calor latente de condensação (Lenters e Cook, 1997). Corrente abaixo dessa crista, um cavado nas cercanias do NEB e oceano Atlântico se amplifica devido à conservação da vorticidade absoluta. A circulação do cavado pode se fechar e, assim, formar o VCAN.

Os VCANs possuem tempo de vida que varia de 4 a 11 dias (Ramirez et al., 1999) e podem ser sistemas estacionários ou com deslocamento (Morais, 2016). Nesse último, a preferência é de trajetória para oeste. Segundo Morais (2016), as distâncias percorridas pelos VCANs são de cerca de 2000 km. Quanto ao perfil vertical desses sistemas, de maneira geral, eles são alinhados verticalmente ou com inclinação para leste com o aumento da altura e mais intensos entre 500 e 200 hPa (Morais, 2016). Além disso, como os VCANs são centros de baixa pressão, há convergência no centro desses sistemas em altos níveis que favorece os movimentos subsidentes, divergência em superfície e movimentos ascendentes na periferia do vórtice (Kousky e Gan, 1981). Essa configuração afeta o tempo atmosférico, pois sob o centro do sistema, em geral, o tempo é de céu claro enquanto que na periferia há nebulosidade e chuva, o que pode ocasionar déficit ou abundância de precipitação, respectivamente (Kousky e Gan, 1981; Gan, 1982; Gan e Kousky, 1986; Silva, 2005; Ferreira et al., 2009).

Ricks (1959) classificou os VCANs como sistemas secos e úmidos. No primeiro caso, os VCANs possuem centro frio, seco e sem nebulosidade, enquanto que no segundo caso, o centro do VCAN pode apresentar valores elevados de umidade e movimentos ascendentes. Nos VCANs nas cercanias do NEB, Kousky e Gan (1981), estudando dois casos desses sistemas, verificaram que a maior concentração de nebulosidade ocorre na periferia oeste do VCAN.

Em termos de modelagem numérica dos VCANs, Costa et al. (2014) utilizaram o modelo *Brazilian developments on the Regional Atmospheric Modeling System* (BRAMS) no

estudo da teoria da máquina térmica em um evento de VCAN. O modelo conseguiu representar bem o sistema e foi enfatizado que a teoria da máquina térmica apresentou-se como uma ferramenta capaz de ser utilizada no estudo dos VCANs. Morais et al. (2015) utilizaram o modelo atmosférico MM5 para avaliar a performance de três esquemas de parametrização de convecção cumulus (Betts-Miller, Kain-Fritsch e Grell) na ocorrência de um VCAN no NEB em dezembro de 2006. Foi verificado que o esquema de Kain-Fritsch obteve o melhor desempenho na representação da precipitação observada no NEB. Por isso, esse será o esquema de parametrização convectiva utilizado no presente estudo.

Morais (2016) realizou 11 experimentos numéricos com o *Weather Research and Forecasting* (WRF) para verificar a influência do aquecimento por liberação de calor latente de condensação proveniente da convecção cumulus e da microfísica de nuvens no caso do VCAN ocorrido entre 12 e 23 de janeiro de 2011 nas cercanias do NEB. Entre os resultados obteve-se que a redução do aquecimento oriundo da convecção cumulus nas cercanias do VCAN enfraquece os gradientes horizontais de temperatura e o vórtice enfraquece. Quando o aquecimento por liberação de calor latente é totalmente desligado (por convecção cumulus e microfísica) o VCAN também é simulado, mas com menor intensidade do que na simulação controle.

Devido à importância dos VCANs para o tempo e clima no NEB, são necessários estudos que apresentem a análise sinótica e verifiquem se os modelos de previsão de tempo são hábeis a representar tal sistema atmosférico. Assim, o objetivo do trabalho é realizar uma análise sinótica e numérica do VCAN ocorrido entre os dias 31 de outubro e 07 de novembro de 2015 sobre o oceano Atlântico Sul Tropical e NEB. A fim de verificar a habilidade do modelo *Weather Research and Forecasting* (WRF) em simular o VCAN, os resultados foram comparados com a reanálise ERA-Interim.

## Metodologia

### Dados

A análise sinótica do VCAN foi realizada com base nos dados da reanálise da ERA-Interim (Dee et al., 2011) com 0,5° de resolução horizontal e 6 horas de frequência temporal. A ERA-Interim é um sistema de reanálise desenvolvido pelo *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) e conta com um sistema de assimilação de dados de análise

variacional 4D (4DVAR). Como a precipitação não é uma variável assimilada na reanálise e, sim, modelada, ela apresenta erros. Dessa forma, para a análise sinótica, a precipitação utilizada foi a obtida das estimativas do *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM), 3B42RT (ftp://disc2.nascom.nasa.gov/data/TRMM/Gridded/3B42RT/), com frequência de 3 horas e resolução espacial de 0,25°. O TRMM é um projeto conjunto entre a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) e a *Japan Aerospace Exploration Agency* (JAXA), com o objetivo de monitorar a precipitação nos trópicos. A descrição completa dessa base de dados pode ser encontrada em Huffman et al. (2007). No presente estudo são apresentados totais de precipitação acumulados em 24 horas. Portanto, a precipitação do dia 31 de outubro corresponde à precipitação entre às 00:00Z do dia 31 de outubro às 00:00Z do dia 01 de novembro e assim sucessivamente.

Para a detecção subjetiva de áreas com concentração de vapor d'água na coluna atmosférica, associadas ao VCAN, foram utilizados os dados do canal-3 do *Geostationary Operational Environmental Satellite* (GOES-13). Também foram obtidas as imagens do canal-4 (infravermelho) para identificação da nebulosidade associada com a frente fria prévia a

formação do VCAN. Tais dados foram provenientes do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC).

Por fim, as condições iniciais e de fronteira empregadas na simulação numérica com o WRF foram as saídas do modelo global *Global Forecasting System* (GFS-FNL) com resolução horizontal de 1,0° a cada 6 horas.

#### *Weather Research and Forecasting (WRF)*

O WRF é um modelo numérico de mesoescala usado para fins de previsão de tempo e estudos de casos, sendo desenvolvido e mantido pela *National Oceanic and Atmospheric Administration/National Centre for Environmental Prediction* (NOAA/NCEP).

A versão 3.7.1 do WRF foi utilizada para simular o domínio do NEB em grade única de 27 km de resolução horizontal, cuja configuração e parametrizações utilizadas se encontram na Tabela 1. O modelo foi integrado das 00:00Z de 30 de outubro até às 00:00Z de 07 de novembro de 2015, e as primeiras 6 horas foram descartadas para eliminar os efeitos de *spin-up* numérico (Skamarock, 2004). As condições iniciais e de fronteira foram geradas utilizando-se as saídas do modelo global GFS-FNL.

Tabela 1. Configurações e parametrizações da simulação numérica

Parâmetro	Configuração
Pontos em longitude	240
Pontos em latitude	140
Níveis verticais	32
Resolução horizontal	27 quilômetros
Passo de tempo de integração	60 segundos
Microfísica	WSM3
Convecção Cumulus	Kain-Fritsch
Camada limite planetária	YSU
Superfície	Monin-Obukhov
Radiação de onda curta	Dudhia
Radiação de onda longa	RRTM

#### *Análise Sinótica*

O estudo do VCAN foi dividido em quatro estágios: pré-formação (06:00Z de 31 de outubro), formação (18:00Z de 01 de novembro), maturação (00:00Z de 04 de novembro) e dissipação (00:00Z de 07 de novembro de 2015). Para cada um desses estágios, considerando a reanálise ERA-Interim e a simulação do WRF, foram elaborados os mapas das seguintes

variáveis atmosféricas: temperatura do ar e linhas de corrente em 300 hPa; desvio zonal da temperatura do ar e altura geopotencial em 300 hPa; umidade específica e altura geopotencial em 300 hPa; vorticidade relativa ciclônica e linhas de corrente em 300 hPa e imagem do canal vapor d'água (6,5 – 7,0 μm) do satélite GOES-13 juntamente com a vorticidade potencial em 300 hPa. Também foram construídos perfis verticais

para mostrar a vorticidade relativa ciclônica e a divergência horizontal do vento. Sobreposto a essa última variável foi incluído o movimento vertical obtido através da variável  $\omega$  (que é a variação da pressão com o tempo;  $dp/dt$ ) na ERA-Interim e da variável  $W$  (que é a variação da altura geométrica com o tempo  $dz/dt$ ) na simulação. Como essas variáveis possuem sinais opostos,  $W$  foi multiplicado por  $-1$ . Dessa forma, em ambos os conjuntos, os valores negativos indicam movimentos ascendentes enquanto valores positivos, movimentos subsidentes. Tanto  $\omega$  quanto  $W$  foram multiplicados por 100 para serem melhor visualizados nas figuras.

Os perfis verticais foram obtidos considerando a latitude central do VCAN e têm como função mostrar a profundidade vertical desse sistema e as regiões com predominância de movimentos ascendentes e subsidentes. Por fim, são mostrados os mapas da precipitação acumulada em 24 horas juntamente com a circulação atmosférica no nível de 850 hPa em cada estágio do ciclo de vida do VCAN.

Com o objetivo de se investigar as diferenças na trajetória do VCAN na reanálise ERA-Interim e no modelo WRF, foi elaborado um mapa com a posição do centro do sistema a cada 6 horas no nível de 300 hPa. Também, elaborou-se um gráfico com os valores da vorticidade relativa ciclônica ocorridos no centro do sistema tanto na reanálise ERA-Interim quanto na simulação do WRF também a cada 6 horas. Como a vorticidade mede a rotação do sistema, é uma medida da intensidade desse.

## Resultados e discussão

### *Pré-formação*

De acordo com Kousky e Gan (1981), a presença de uma frente fria, que se desloca das latitudes médias para os trópicos, e da AB pode contribuir para a formação de um VCAN no NEB ou cercanias. No caso em estudo, na fase prévia à formação do VCAN, às 06:00Z do dia 31 de outubro, havia uma frente fria em superfície entre o Paraguai e Santa Catarina (Figura 1a). Em 300 hPa (Figura 2a), a AB está com o seu centro deslocado para leste da posição climatológica, isto é, sobre a região centro-oeste do Brasil, ao mesmo tempo que favorece a presença de uma crista (linha em zigue-zague) sobre a região sudeste do país e um cavado (linha tracejada) no sentido noroeste-sudeste entre o oceano e o nordeste do Brasil. Essa configuração se assemelha a descrita no modelo conceitual de Kousky e Gan (1981) que está ilustrado na Figura 1a. Além disso, é uma configuração típica do verão (exceto pela posição

da AB) na América do Sul (Lenters e Cook, 1997). Destaca-se que o modelo WRF simulou tal configuração (Figura 2b), embora com o centro da alta deslocado para noroeste em relação à reanálise.

Às 06:00Z de 31 de outubro foi denominada de estágio de pré-formação, pois ainda não há linhas de corrente formando um círculo fechado no interior do cavado (Figuras 2a-b), o que caracterizaria o VCAN. Em ambos os conjuntos de dados, tanto o campo da temperatura do ar quanto do desvio zonal dessa variável mostram que o cavado é mais frio do que sua vizinhança (Figuras 2a-d) e que o setor a jusante do seu eixo é a região mais úmida (maiores valores de umidade específica; Figuras 2e-f). Entretanto, considerando todo o domínio das Figuras 2e-f, o setor mais úmido ocorre na crista associada com a AB. O padrão espacial e valores da vorticidade relativa ciclônica em ambos os conjuntos de dados são muito similares (Figuras 2g-h). Já, em termos de vorticidade potencial (Figuras 3a-b), embora a vorticidade negativa ocorra quase na mesma posição nos dois conjuntos, o WRF simula valores mais negativos próximos à costa do NEB.

A imagem do satélite GOES-13 no canal do vapor d'água (Figuras 3a-b) mostra que o interior do cavado é dominado por ar mais seco (cores mais escuras na imagem), enquanto que a jusante do eixo do cavado há mais umidade na atmosfera (tons mais brancos na imagem de satélite), concordando com o campo da umidade específica (Figuras 2e-f) e também com a precipitação acumulada do TRMM (Figura 3g). O modelo foi hábil em simular a precipitação, mostrando maiores valores sobre o noroeste de Cuiabá, como no TRMM (Figuras 3g-h), onde reanálise e modelo indicam convergência do vento em 850 hPa.

Em termos de perfis verticais, no centro do cavado (aproximadamente 17,5°S) predomina convergência de massa (cores em azul nas Figuras 3c-d) entre os níveis de 300 e 100 hPa, e a leste e oeste desse há divergência (cores em vermelho nas Figuras 3c-d). Juntamente com a divergência em médios/altos níveis ocorrem movimentos ascendentes (indicados pelos valores negativos nas linhas de contorno), enquanto que com a convergência, movimentos subsidentes. Esses padrões são mais evidentes na reanálise do que no modelo, o que pode ser devido ao efeito da resolução horizontal mais grosseira da reanálise (o que mostra um campo mais suave, isto é, com menos ondas curtas). As regiões com divergência em médios/altos níveis correspondem as mais úmidas na Figura 3a.

A estrutura vertical do cavado é bem caracterizada na variável vorticidade relativa ciclônica (Figuras 3e-f), que mostra um tubo de vorticidade estendendo-se entre 500 a 100 hPa ligeiramente inclinado para leste com a altitude na reanálise, e sem inclinação na simulação. Esse padrão concorda com o estudo climatológico de *Formação do VCAN*

O horário das 18:00Z do dia 01 de novembro foi definido como o de formação do VCAN, pois é quando as linhas de corrente e as linhas de altura geopotencial em 300 hPa tornam-se fechadas, indicando a presença de um vórtice no interior do cavado previamente descrito. Tal processo é notado simultaneamente na ERA-Interim e na simulação (Figuras 4a-d). Considerando-se as linhas de corrente, o centro do vórtice localiza-se a cerca de 10°S e 34°W em ambos os conjuntos de dados (Figuras 4a-b). A semelhança na posição do vórtice também é mostrada no perfil vertical da vorticidade relativa ciclônica (Figuras 5e-f). A diferença entre a reanálise e o modelo é que a primeira mostra uma inclinação do vórtice para leste entre 600 e 400 hPa que é menos evidente no WRF (Figuras 5e-f). Outra diferença entre reanálise e modelo é na posição da AB, que no WRF localiza-se ligeiramente a oeste da observada (Figuras 4a-b).

A configuração da crista sobre o sudeste do Brasil (ligeiramente a nordeste da frente em superfície) e do cavado em altos níveis (Figuras 4a-b) concorda com a do modelo conceitual de Kousky e Gan (1981) apresentada na Figura 1b. Além disso, o padrão da nebulosidade nas cercanias do VCAN na imagem do canal infravermelho também se assemelha com a do modelo conceitual.

Com relação à altura geopotencial em 300 hPa (Figuras 4c-d), o WRF simula o centro do vórtice com altura de 9450 m, enquanto na reanálise esse valor é de 9420 m; assim, na ERA-Interim o vórtice é ligeiramente mais profundo. Uma possível justificativa para essa diferença é que a região do vórtice (com destaque o setor

Morais (2016), que menciona que os VCANs se inclinam para o lado da região mais fria. Enquanto na reanálise o máximo de vorticidade relativa ciclônica aparece a cerca de 35°W, no modelo isso ocorre em 30°W; portanto, o WRF simula o centro do cavado ligeiramente deslocado para leste.

sudeste) é ligeiramente mais fria na reanálise, o que implica numa menor espessura da camada (Figuras 4c-d). Enfatiza-se que, em ambos os conjuntos de dados, os menores valores de temperatura do ar não ocorrem justamente no centro do vórtice e, sim, deslocados para sudeste.

Em termos de umidade específica, o centro do VCAN simulado em 300 hPa é cerca de 10 g/kg de ar mais seco do que na reanálise (Figuras 4e-f). O modelo foi hábil em representar a localização dos valores mais intensos de vorticidade relativa ciclônica (Figuras 4g-h) e de vorticidade potencial (Figuras 5a-b) observados na reanálise.

Considerando o perfil vertical de divergência de massa (Figuras 5c-d), entre 300 e 200 hPa predomina convergência na região central do vórtice e a leste e oeste desse, divergência. Novamente, associado com a convergência ocorre movimentos subsidentes e com a divergência, movimentos ascendentes. As Figuras 5c-d também revelam que a área com movimentos ascendentes é mais extensa e intensa a oeste do centro do VCAN, ou seja, sobre os Estados de Tocantins e Goiás que estão próximos do centro da AB (Figuras 4a-b). Sobre esses Estados há elevada quantidade de vapor d'água na coluna atmosférica (Figura 5a) e precipitação (Figuras 5g-h). Por outro lado, praticamente todo o NEB é dominado por uma massa de ar seco (Figura 5a) e essa área corresponde a de movimentos subsidentes (Figuras 5c-d).

Ainda com relação à precipitação, o WRF superestima essa variável sobre o Estado de São Paulo, o que parece estar relacionado com a convergência mais intensa dos ventos em 850 hPa no modelo do que na reanálise (Figuras 5g-h).

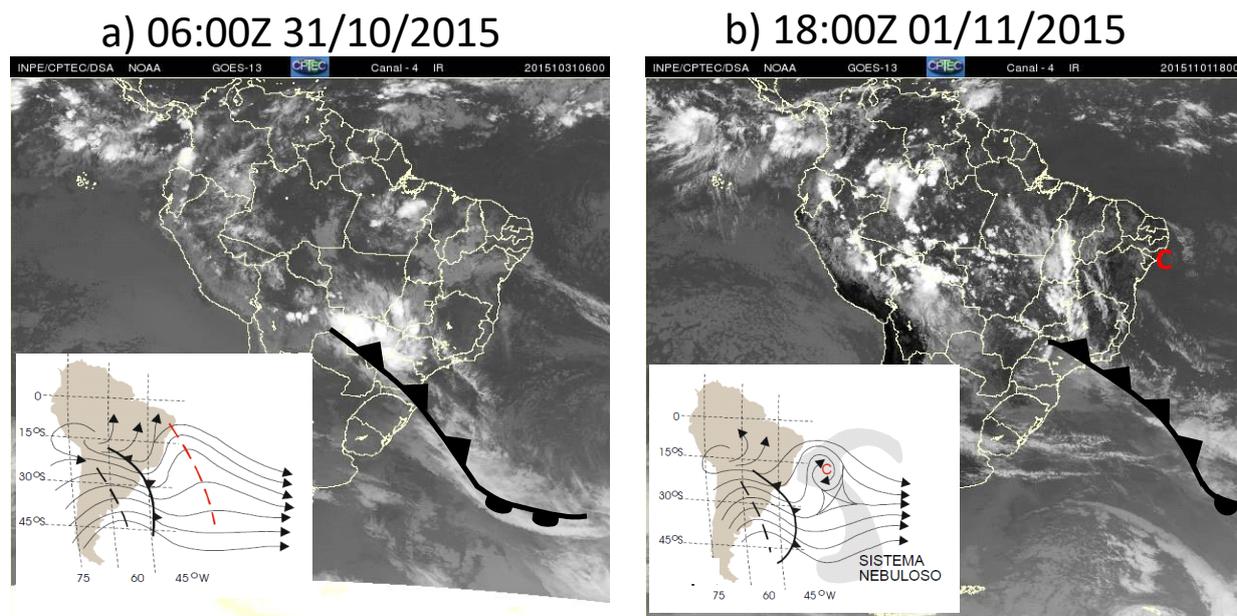


Figura 1. Imagens do canal-4, infravermelho, do satélite GOES-13 às 06:00Z do dia 31/10/2015 (pré-formação do VCAN) e 18:00Z de 04/11/2015 (formação do VCAN). As linhas pretas com triângulos indicam a posição da frente fria enquanto as linhas pretas com semicírculos indicam a posição da frente quente. O esquema ilustrativo, no canto esquerdo dos painéis (a) e (b), representa em (a) o estágio prévio ao fechamento do vórtice ciclônico de altos níveis e em (b) a gênese do vórtice, conforme o modelo conceitual de Kousky e Gan (1981), para facilitar a comparação com o caso em estudo. No modelo conceitual, as linhas pretas mais finas indicam a configuração do escoamento em 200 hPa, a linha preta com triângulos indica a frente fria em superfície e a linha vermelha tracejada indica o eixo do cavado em 200 hPa. A letra C indica o centro do VCAN. No esquema apresentado em (b) a área em cinza claro mostra a localização da nebulosidade. Os esquemas ilustrativos são uma adaptação do modelo de Kousky e Gan (1981) realizada por Varejão-Silva (2006).

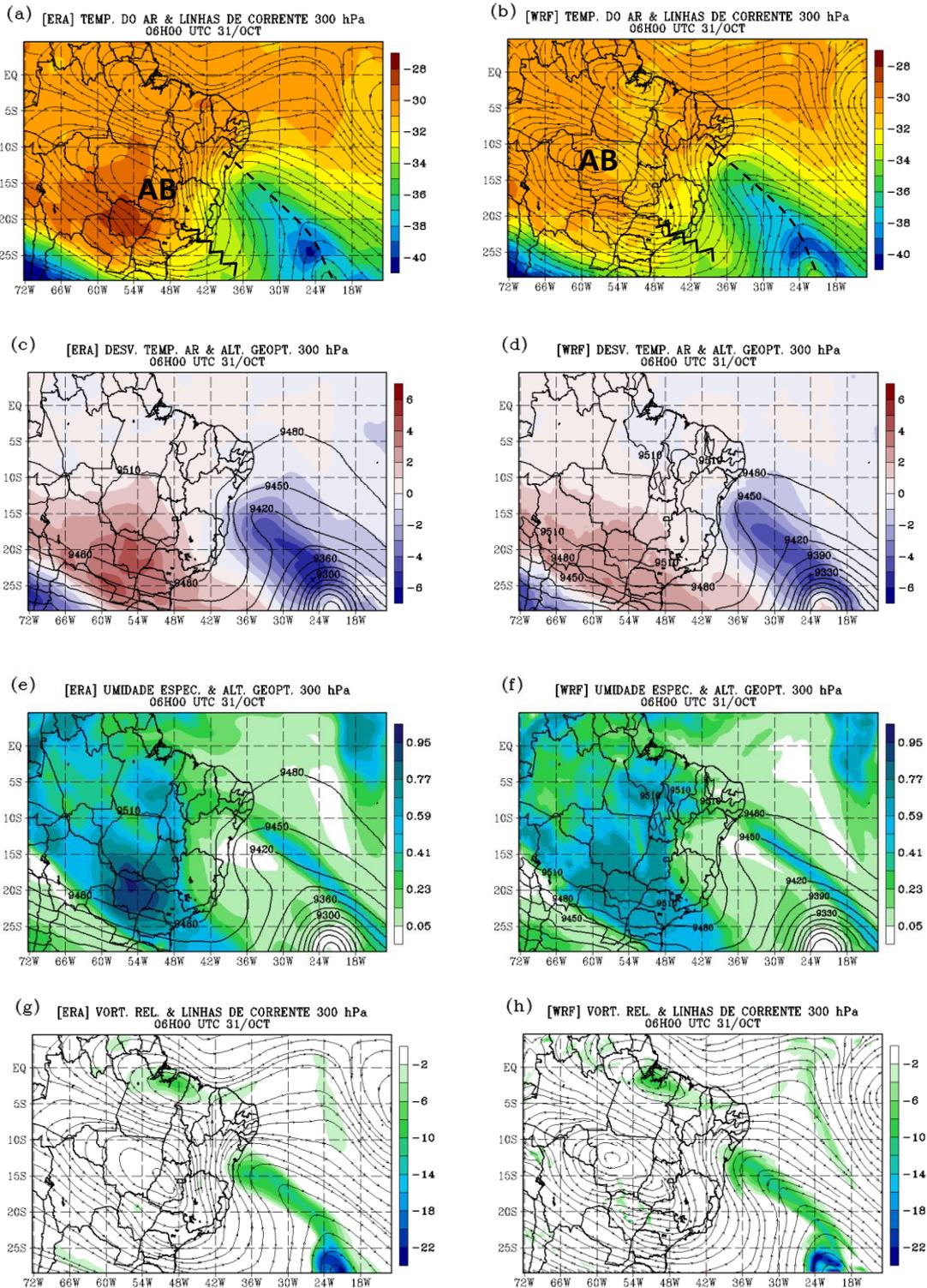


Figura 2. Estágio de pré-formação do VCAN na reanálise ERA-Interim (coluna esquerda) e na simulação do WRF (coluna direita), com os campos de (a, b) temperatura do ar [ $^{\circ}\text{C}$ ] e linhas de corrente [ $\text{m s}^{-1}$ ] em 300 hPa; (c, d) desvio zonal da temperatura do ar [ $^{\circ}\text{C}$ ] e altura geopotencial [metros] em 300 hPa; (e, f) umidade específica [ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ] e altura geopotencial [metros] em 300 hPa; (g, h) vorticidade relativa ciclônica [ $10^{-5}\cdot\text{s}^{-1}$ ] e linhas de corrente em 300 hPa [ $\text{m s}^{-1}$ ]. Em (a, b), a linha tracejada indica a posição do cavado, a linha em zigue-zague mostra a posição da crista, enquanto AB indica Alta da Bolívia.

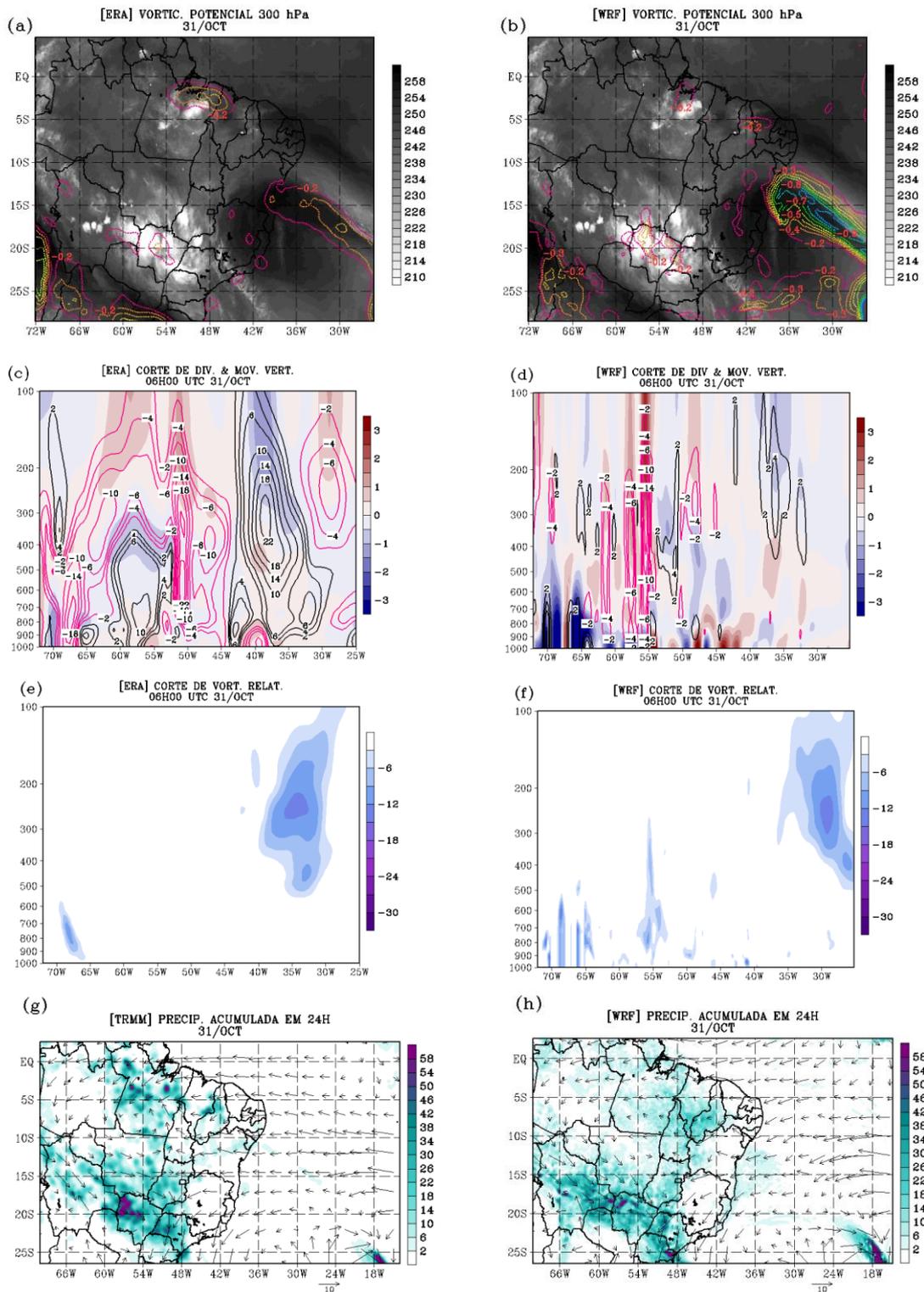


Figura 3. Estágio de pré-formação do VCAN na reanálise ERA-Interim (coluna esquerda) e na simulação do WRF (coluna direita), com os campos de (a, b) imagem do satélite GOES-13 no canal do vapor d'água juntamente com a vorticidade potencial [ $10^{-6} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{K} \cdot \text{kg}^{-1}$ ] em 300 hPa; (c, d) perfil vertical zonal (latitude de  $17,5^\circ \text{ S}$ ) de divergência horizontal do vento [ $10^{-5} \cdot \text{s}^{-1}$ ] no centro do VCAN e movimento vertical (onde valores negativos indicam movimentos ascendentes e vice-versa); (e, f) corte vertical zonal de vorticidade relativa ciclônica [ $10^{-5} \cdot \text{s}^{-1}$ ] no centro do VCAN e (g, h) vetores de direção e intensidade do vento em 850 hPa [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ] e precipitação acumulada em 24 h (mm) pelo TRMM e WRF.

### *Formação do VCAN*

O horário das 18:00Z do dia 01 de novembro foi definido como o de formação do VCAN, pois é quando as linhas de corrente e as linhas de altura geopotencial em 300 hPa tornam-se fechadas, indicando a presença de um vórtice no interior do cavado previamente descrito. Tal processo é notado simultaneamente na ERA-Interim e na simulação (Figuras 4a-d). Considerando-se as linhas de corrente, o centro do vórtice localiza-se a cerca de 10°S e 34°W em ambos os conjuntos de dados (Figuras 4a-b). A semelhança na posição do vórtice também é mostrada no perfil vertical da vorticidade relativa ciclônica (Figuras 5e-f). A diferença entre a reanálise e o modelo é que a primeira mostra uma inclinação do vórtice para leste entre 600 e 400 hPa que é menos evidente no WRF (Figuras 5e-f). Outra diferença entre reanálise e modelo é na posição da AB, que no WRF localiza-se ligeiramente a oeste da observada (Figuras 4a-b).

A configuração da crista sobre o sudeste do Brasil (ligeiramente a nordeste da frente em superfície) e do cavado em altos níveis (Figuras 4a-b) concorda com a do modelo conceitual de Kousky e Gan (1981) apresentada na Figura 1b. Além disso, o padrão da nebulosidade nas cercanias do VCAN na imagem do canal infravermelho também se assemelha com a do modelo conceitual.

Com relação à altura geopotencial em 300 hPa (Figuras 4c-d), o WRF simula o centro do vórtice com altura de 9450 m, enquanto na reanálise esse valor é de 9420 m; assim, na ERA-Interim o vórtice é ligeiramente mais profundo. Uma possível justificativa para essa diferença é que a região do vórtice (com destaque o setor

sudeste) é ligeiramente mais fria na reanálise, o que implica numa menor espessura da camada (Figuras 4c-d). Enfatiza-se que, em ambos os conjuntos de dados, os menores valores de temperatura do ar não ocorrem justamente no centro do vórtice e, sim, deslocados para sudeste.

Em termos de umidade específica, o centro do VCAN simulado em 300 hPa é cerca de 10 g/kg de ar mais seco do que na reanálise (Figuras 4e-f). O modelo foi hábil em representar a localização dos valores mais intensos de vorticidade relativa ciclônica (Figuras 4g-h) e de vorticidade potencial (Figuras 5a-b) observados na reanálise.

Considerando o perfil vertical de divergência de massa (Figuras 5c-d), entre 300 e 200 hPa predomina convergência na região central do vórtice e a leste e oeste desse, divergência. Novamente, associado com a convergência ocorre movimentos subsidentes e com a divergência, movimentos ascendentes. As Figuras 5c-d também revelam que a área com movimentos ascendentes é mais extensa e intensa a oeste do centro do VCAN, ou seja, sobre os Estados de Tocantins e Goiás que estão próximos do centro da AB (Figuras 4a-b). Sobre esses Estados há elevada quantidade de vapor d'água na coluna atmosférica (Figura 5a) e precipitação (Figuras 5g-h). Por outro lado, praticamente todo o NEB é dominado por uma massa de ar seco (Figura 5a) e essa área corresponde a de movimentos subsidentes (Figuras 5c-d).

Ainda com relação à precipitação, o WRF superestima essa variável sobre o Estado de São Paulo, o que parece estar relacionado com a convergência mais intensa dos ventos em 850 hPa no modelo do que na reanálise (Figuras 5g-h).

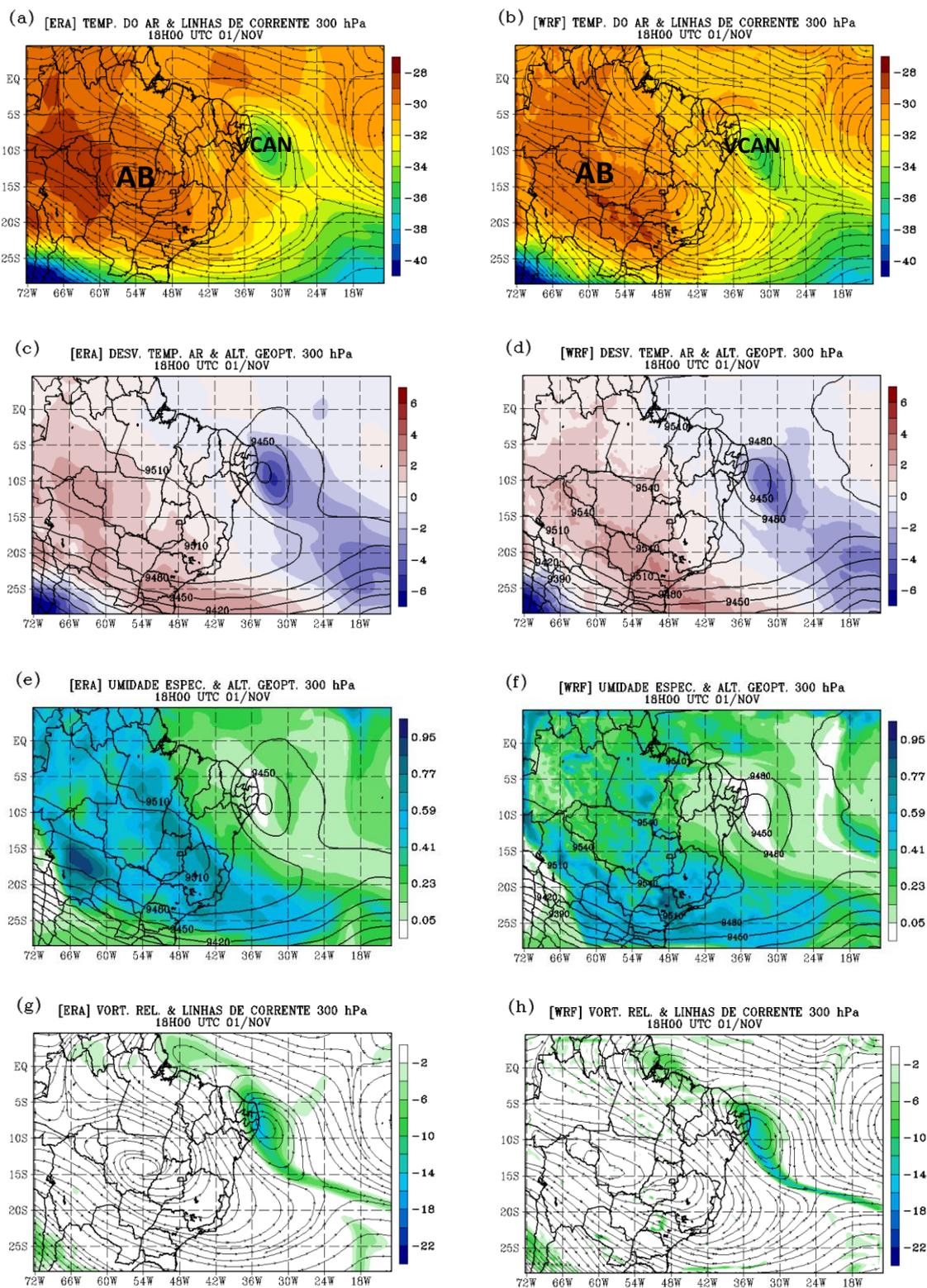


Figura 4. Similar à Figura 2, mas para o estágio de formação do VCAN na reanálise ERA-Interim (coluna esquerda) e na simulação do WRF (coluna direita).

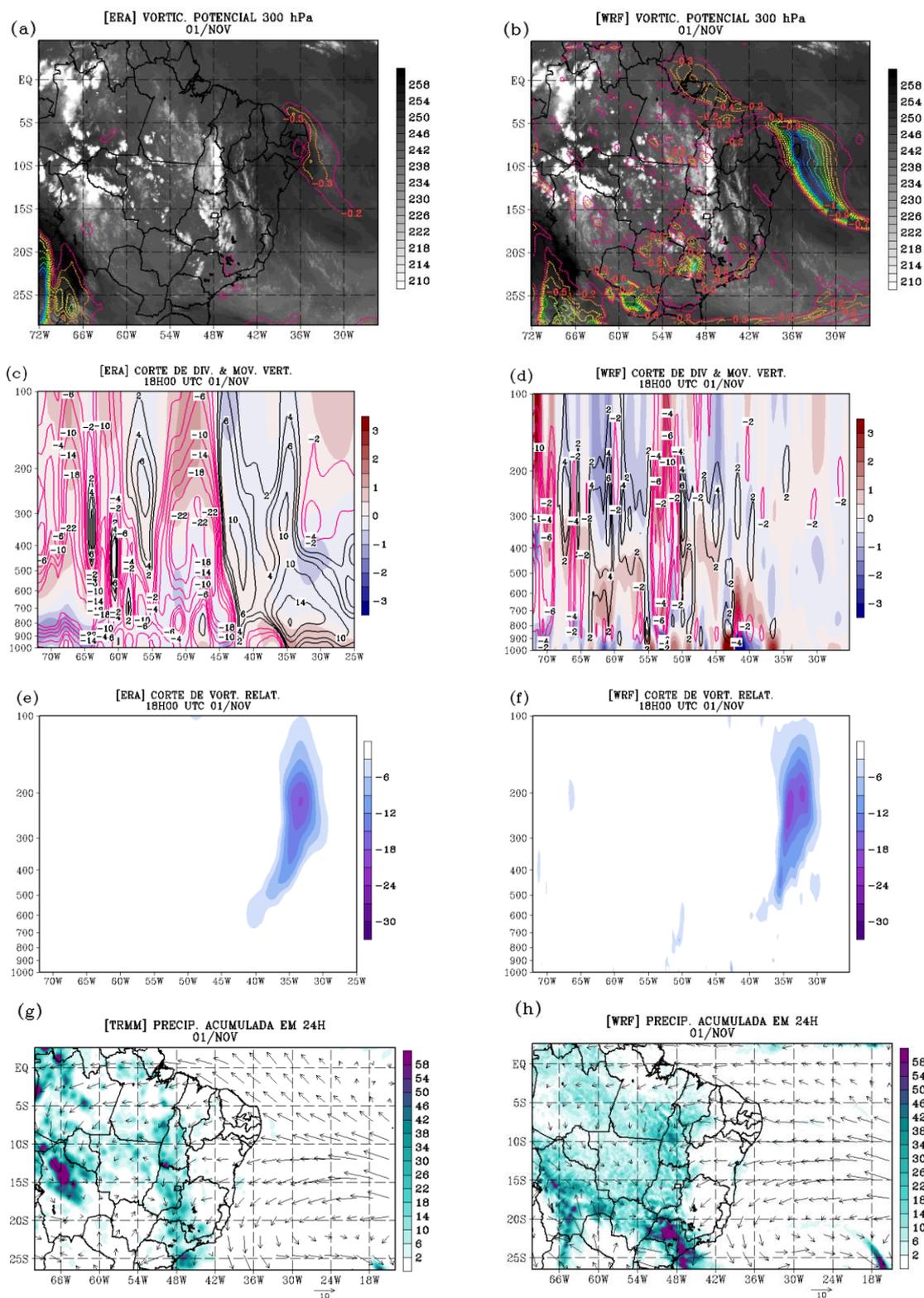


Figura 5. Similar à Figura 3, mas para o estágio de formação do VCAN na reanálise ERA-Interim (coluna esquerda) e na simulação do WRF (coluna direita). Para a elaboração dos perfis verticais, foi utilizada a latitude de 10°S.

*Maturidade do VCAN*

Às 00:00Z do dia 04 de novembro é considerada como estágio de maturidade do VCAN, uma vez que o sistema atinge sua maior intensidade nos campos da vortacidade relativa ciclônica (Figura 6g) e vortacidade potencial (Figura 7a) na reanálise.

No campo da altura geopotencial (Figura 6c-d), nota-se que o centro do VCAN está sobre o NEB, isto é, do estágio de formação para esse o sistema deslocou-se para oeste. Esse sentido de deslocamento pode estar relacionado com a posição da AB (identificada apenas com a letra A na Figuras 6a-b), que se encontra estendida e contornando o setor austral do VCAN. Essa característica é obtida na reanálise e na simulação (Figuras 6a-b). De fato, Ramirez et al. (1999) documentaram que quando a trajetória dos VCANs é para oeste, a AB está estendida zonalmente e pode se dividir em duas partes formando uma circulação anticiclônica ao sul do VCAN.

Em termos de temperatura do ar em 300 hPa, o estágio de maturidade também se diferencia do anterior, pois o desvio zonal dessa variável na reanálise e modelo (Figuras 6c-d) mostra que o núcleo frio localiza-se praticamente no centro do VCAN. O centro do VCAN além de frio é seco, uma vez que há baixa concentração de umidade específica (Figuras 6e-f) e vapor d'água na coluna atmosférica (Figura 7a). Por outro lado, suas bordas oeste e leste são bastante úmidas, mas isso não é suficiente para valores elevados de precipitação. Como mostram as Figuras 7g-h, só ocorre precipitação sob a borda oeste do VCAN (em Tocantins) e com baixos totais.

O setor oeste da alta, nas cercanias de 15°S e 60°W na reanálise e simulação, é dominado por valores elevados de umidade específica em 300 hPa (Figuras 6e-f), vapor d'água na coluna (Figura 7a) e precipitação (Figuras 7g-h). Porém não é nessa região que os totais de precipitação são mais elevados, e sim no Estado de São Paulo (Figuras 7g-h). Nesse, os máximos de precipitação também estão associados com os processos em baixos níveis da atmosfera, pois há convergência do escoamento atmosférico em 850 hPa sobre São Paulo (Figuras 7g-h).

No estágio de maturidade, o centro do VCAN, representado pelo perfil vertical da vortacidade relativa ciclônica, está ligeiramente inclinado para leste com a altura na ERA-Interim (Figura 7e) e quase vertical no WRF (Figura 7f). O vórtice é mais intenso na reanálise ( $-24 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$

<sup>1</sup>) do que na simulação ( $-18 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ), mas na ERA-Interim a maior intensidade se restringe entre 300 e 200 hPa, enquanto que no modelo entre 350 e 150 hPa. Em ambos os conjuntos de dados, o vórtice não ultrapassa, em direção à superfície, o nível de 700 hPa. Em termos de convergência em altos níveis na região do vórtice, esta é bem evidente na ERA-Interim e com movimentos subsidentes associados. Já a oeste do vórtice predominam movimentos ascendentes (Figuras 7c-d).

#### *Dissipação do VCAN*

A dissipação do VCAN inicia às 00:00Z do dia 07 de novembro, quando o sistema começa a se desconfigurar nos campos atmosféricos da reanálise, pois no WRF a vortacidade relativa ciclônica ainda continua intensa (Figuras 8g-h e 9e-f). Não é possível afirmar o momento do decaimento do VCAN na simulação, pois essa foi realizada somente até às 00:00Z do dia 07. Como não se obtiveram os dados de satélite no canal vapor d'água das 00:00Z do dia 07, utilizaram-se os das 18:00Z do dia 06 de novembro para representar o início da dissipação do VCAN (Figura 9a). Nesse estágio, o centro do VCAN em 300 hPa encontra-se a cerca de 10°S e 52°W em ambos os conjuntos de dados (Figuras 8a-b).

No campo de temperatura do ar em 300 hPa (Figuras 8a-b), o modelo simula o centro do vórtice mais frio e mais configurado em comparação com a reanálise. O mesmo padrão ocorre no campo do desvio zonal de temperatura do ar (Figuras 8c-d). Portanto, o WRF simula um sistema mais duradouro do que na reanálise. É importante mencionar que a duração de um VCAN simulado pode ser afetada pelo esquema de parametrização cumulus usada no modelo.

Em comparação à fase de maturidade, na dissipação o VCAN é mais úmido, tanto no centro quanto na periferia (Figuras 8e-f e 9a). Sugere-se que a umidade no centro do sistema seja decorrente de geração de uma atmosfera instável. Como o núcleo do VCAN em altos níveis é frio e as camadas abaixo do sistema mais quentes durante o dia, isso gera fluatibilidade e movimentos ascendentes. De fato, nas Figuras 9c-d são mostrados movimentos ascendentes no centro do VCAN.

Com relação à precipitação, o WRF a superestima na região que se estende do oeste da Amazônia até o Paraná. Além disso, desloca o máximo observado no TRMM sobre Minas Gerais para o Estado de São Paulo (Figuras 9g-h).

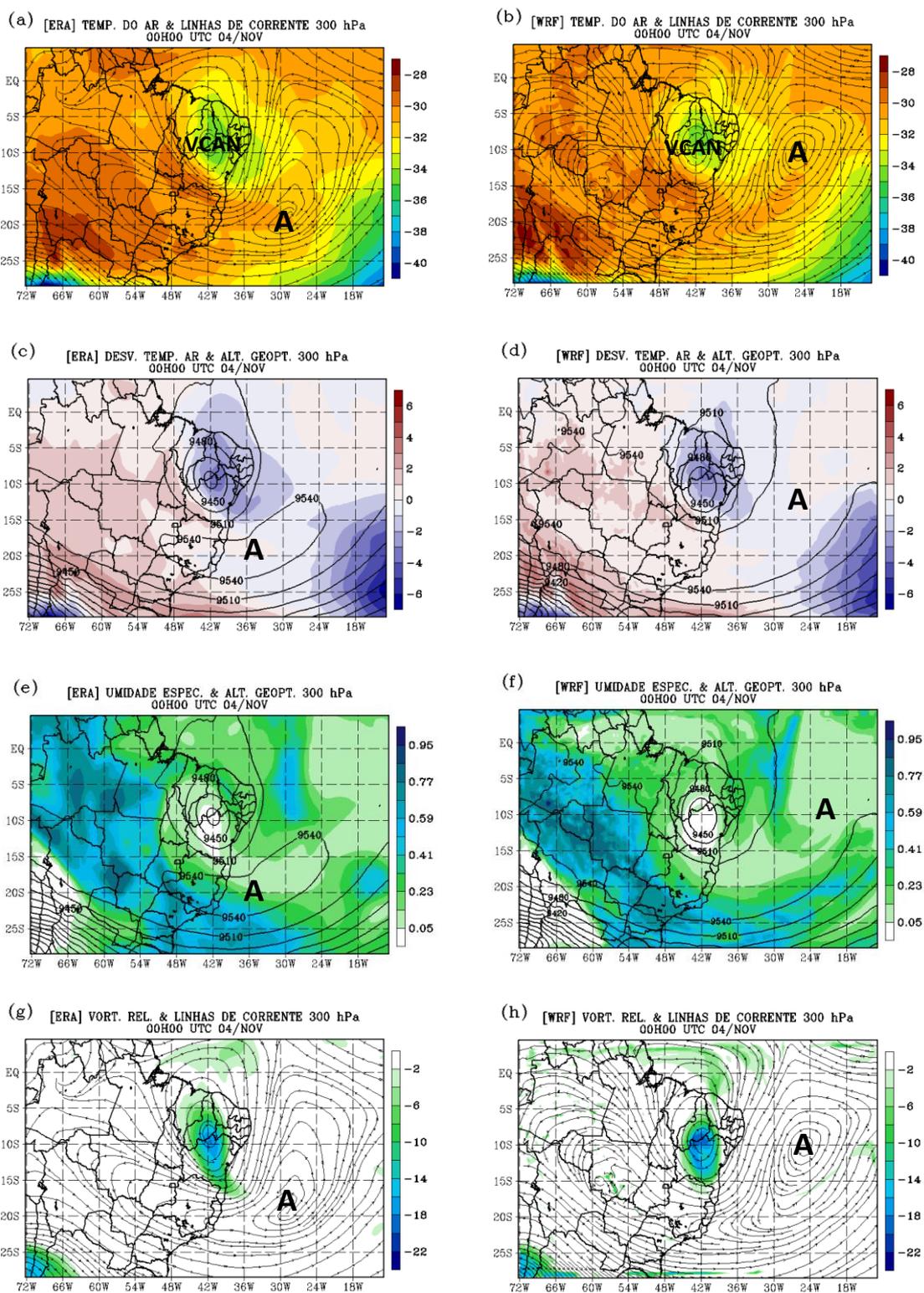


Figura 6. Similar à Figura 2, mas para o estágio de maturidade do VCAN na reanálise ERA-Interim (coluna esquerda) e na simulação do WRF (coluna direita).

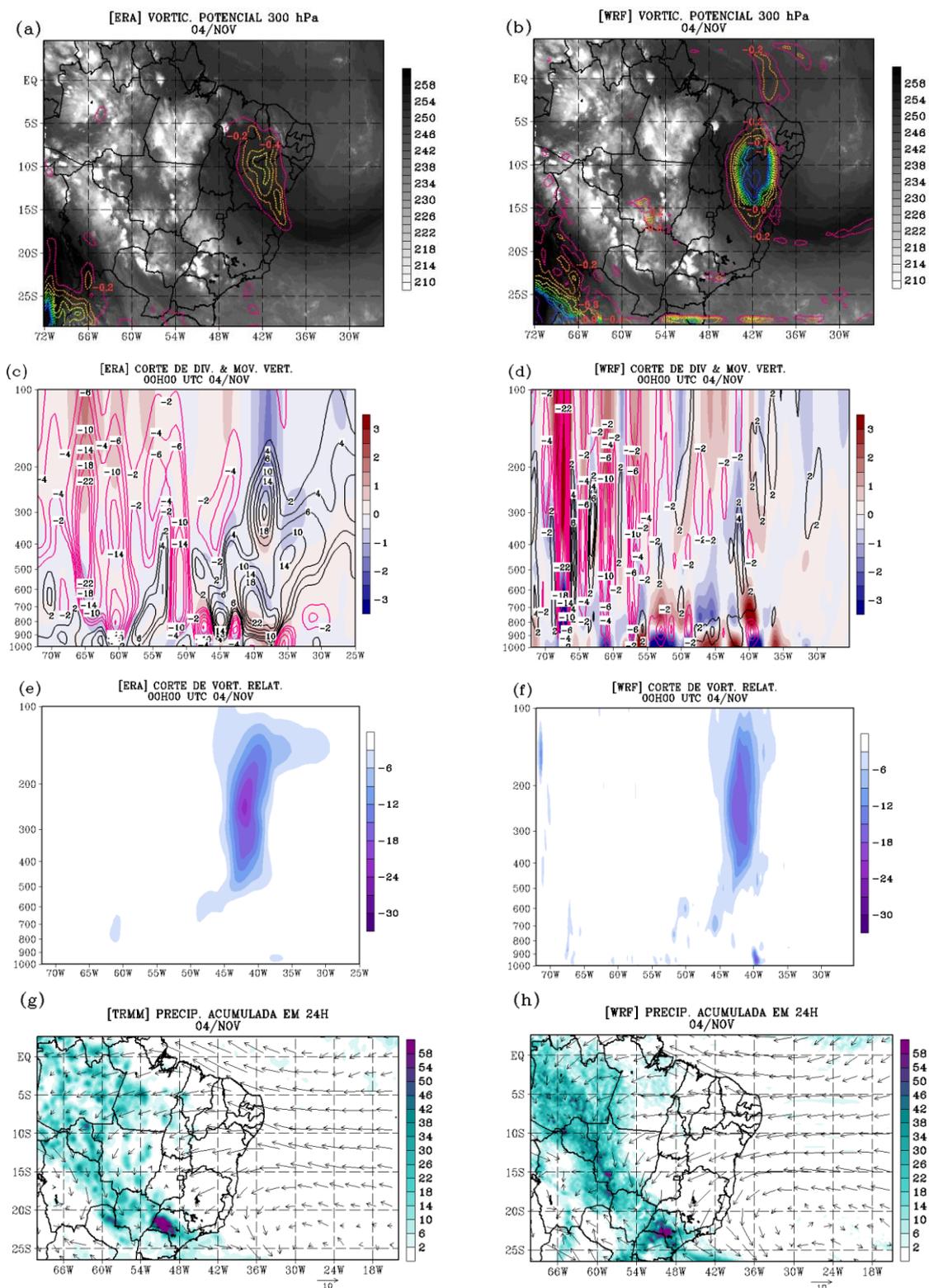


Figura 7. Similar à Figura 3, mas para o estágio de maturidade do VCAN na reanálise ERA-Interim (coluna esquerda) e na simulação do WRF (coluna direita). Para a elaboração dos perfis verticais, foi utilizada a latitude de 8°S.

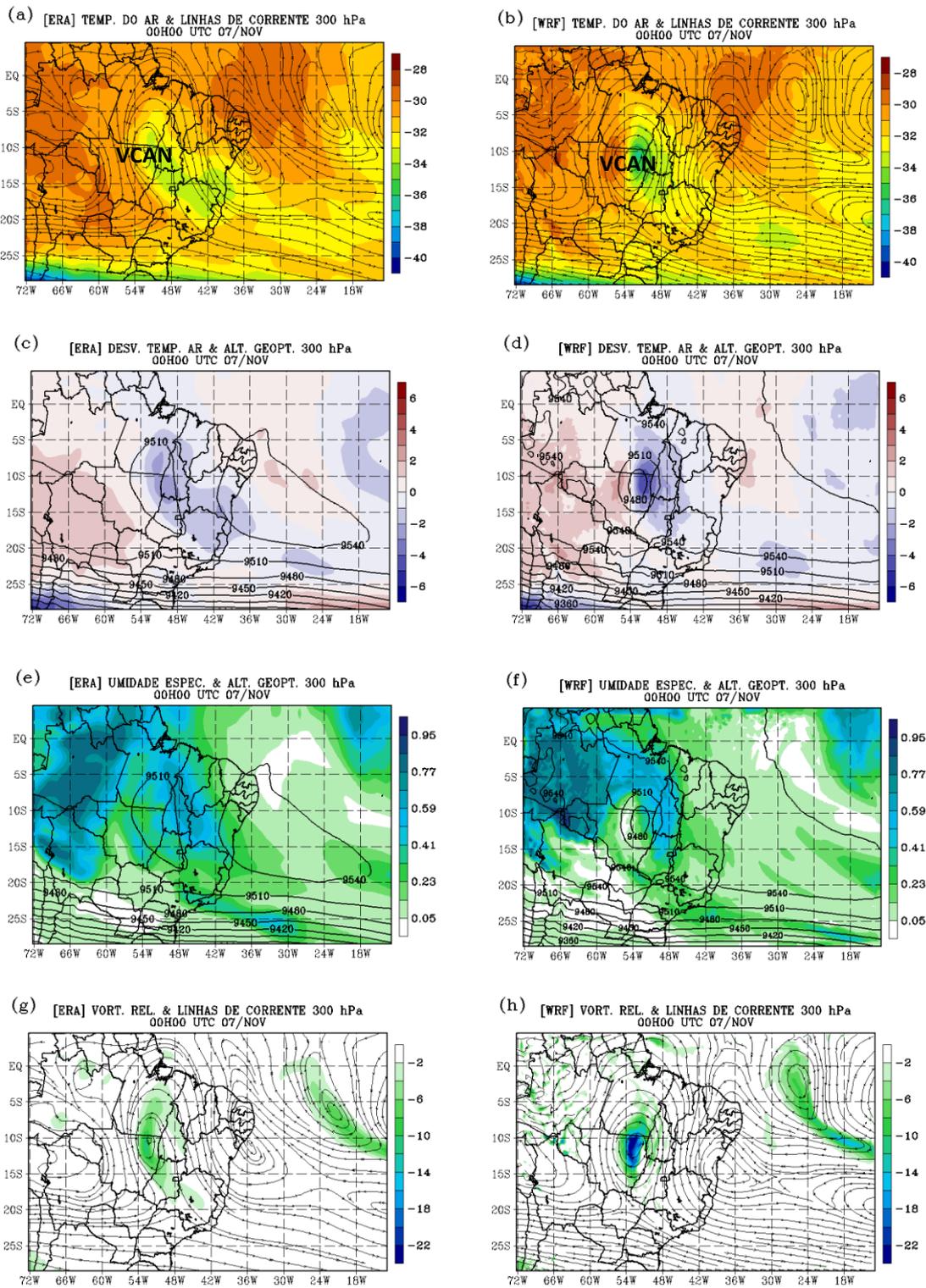


Figura 8. Similar à Figura 2, mas para o estágio de dissipação do VCAN na reanálise ERA-Interim (coluna esquerda) e na simulação do WRF (coluna direita).

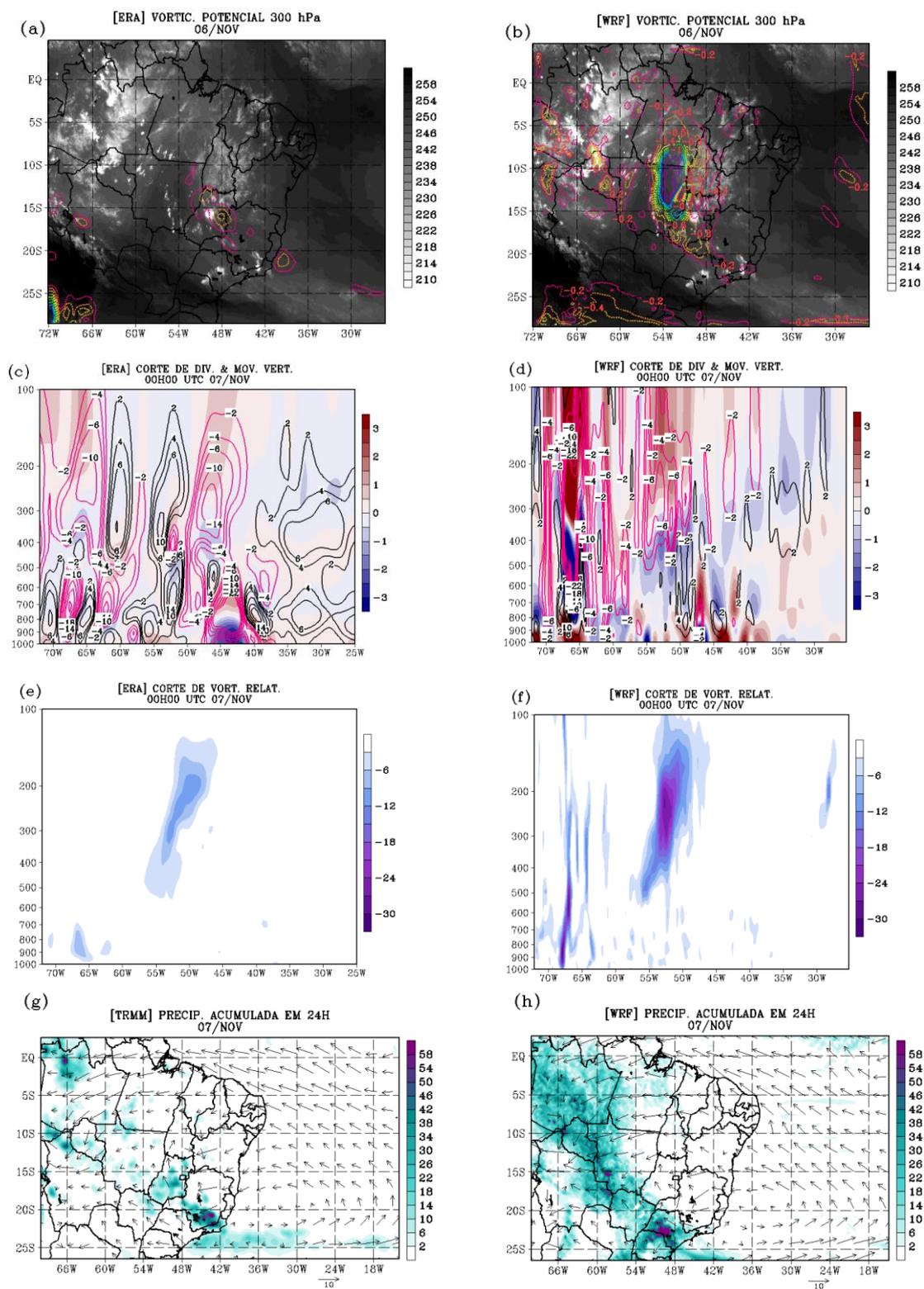


Figura 9. Similar à Figura 3, mas para o estágio de dissipação do VCAN na reanálise ERA-Interim (coluna esquerda) e na simulação do WRF (coluna direita). Para a elaboração dos perfis verticais, foi utilizada a latitude de 10°S.

*Trajatória e Intensidade do VCAN*

A Figura 10 apresenta a trajetória do VCAN obtida através da identificação do valor mais intenso de vorticidade relativa ciclônica no centro do sistema no nível de 300 hPa, entre os dias 01 e 07 de novembro, na reanálise ERA-Interim (linha azul) e na simulação com o WRF (linha vermelha), sendo que cada círculo marca intervalos de 6 horas. Há pouca diferença nas trajetórias, exceto no primeiro horário de rastreamento do sistema sobre o oceano em que o VCAN simulado está ligeiramente a noroeste do observado. Quando o VCAN adentra o continente, o modelo representa a trajetória desse sistema muito similar à da reanálise.

A intensidade do VCAN foi representada através da vorticidade relativa ciclônica (quanto

mais negativa a vorticidade, mais intenso é o VCAN) obtida no centro do sistema em 300 hPa (Figura 11). No primeiro dia de simulação (30/11), o modelo adianta em cerca de 12 horas o máximo de vorticidade (valores mais negativos) registrado na ERA-Interim. Entre meados do dia 01/11 até o início do dia 05/11, os valores observados e simulados são similares, porém, o modelo mostra vorticidade ciclônica mais fraca do que a reanálise em praticamente todos os horários até o dia 04, quando, então, o modelo simula o VCAN mais intenso. A maior diferença constatada entre esses últimos dias na vorticidade pode estar associada com a dificuldade inerente aos modelos em simular o tempo futuro, à medida que se distância da condição inicial.

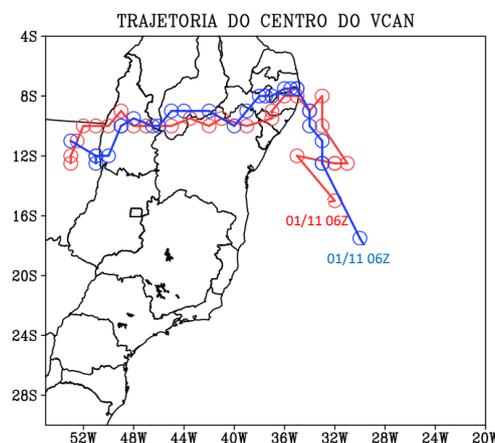


Figura 10. Trajetória do centro do VCAN, no nível de 300 hPa, com dados da ERA-Interim (azul) e simulação do WRF (vermelho) a cada 6 horas, com início em 01 de novembro de 2015 às 06:00Z.

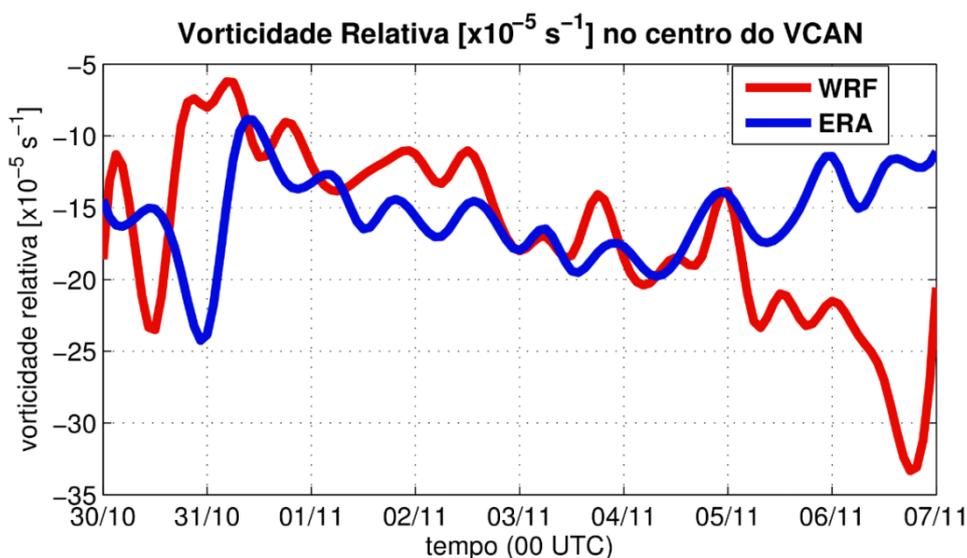


Figura 11. Série temporal da evolução de vorticidade relativa ciclônica [ $10^{-5} s^{-1}$ ] para o centro do sistema, no nível de 300 hPa, na ERA-Interim (azul) e simulação do WRF (vermelho), iniciando no dia 30 de novembro de 2015.

**Conclusões**

Esse estudo teve como objetivo descrever o ambiente sinótico durante o ciclo de

vida de um VCAN no NEB. Além disso, verificou a performance do modelo WRF em simular o sistema atmosférico. Às 06:00Z do dia 31 outubro foi considerada como pré-formação do VCAN, pois as variáveis atmosféricas, linhas de corrente e altura geopotencial em 300 hPa, ainda não mostravam um vórtice fechado no interior do cavado do NEB. Quando isso ocorre, passasse à fase de formação (18:00Z do dia 01 e novembro). Já no período em que o VCAN apresenta intensa vorticidade relativa ciclônica e estendendo-se verticalmente, tem-se a maturidade (00:00Z do dia 04) e, por fim, quando essa enfraquece na reanálise tem-se o decaimento do sistema (00:00Z do dia 07). Portanto, da formação ao início do decaimento, o VCAN teve duração de 7 dias na reanálise, que é um tempo de vida dentro dos valores médios de 4 a 11 dias encontrados por Ramirez et al. (1999). Não é possível mencionar a duração total do VCAN na simulação, pois essa só foi realizada até às 00:00Z do dia 07/11.

O VCAN formou-se associado ao escoamento atmosférico corrente abaixo da AB, que é um padrão característico entre meados da primavera a meados do outono austral (Lenters e Cook, 1997), e à presença de uma frente fria, seguindo o modelo conceitual de Kousky e Gan (1981). Já a dissipação esteve associada com o enfraquecimento das temperaturas frias no núcleo do sistema. Durante a atuação do VCAN, predominaram condições secas em grande parte do NEB.

O WRF simulou a trajetória do VCAN para oeste similar à obtida na reanálise, mas em termos de intensidade (medida através da vorticidade relativa ciclônica), no estágio de dissipação o VCAN enfraqueceu na reanálise, porém na simulação se manteve intenso. Sugere-se que as configurações utilizadas no WRF no presente estudo são adequadas para a previsão de tempo no NEB.

As características do VCAN descritas nesse estudo enriquecem a literatura sobre esse sistema e podem auxiliar nas práticas de previsão de tempo.

### Agradecimentos

À DSA CPTEC-INPE pelo fornecimento das imagens do satélite GOES, ao ECMWF pela reanálise ERA-Interim, a NOAA pela análise do GFS e ao CNPq e FAPEMIG pelo suporte financeiro.

### Referências

- Costa, R.L., Souza, E.P., Silva, F.D.S., 2014. Aplicação de uma teoria termodinâmica no estudo de um Vórtice Ciclônico de Altos Níveis sobre o Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia* 29, 96-104.
- Dee, D.P., Uppala, S.M., Simmons, A.J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S., Andrae, U., Balmaseda, M.A., Balsamo, 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., Kallberg, P., Kohler, M., Matricardi, M., McNally, A.P., Monge-Sanz, B.M., Morcrette, J.-J., Park, B.-K., Peubey, C., Rosnay, P.de, Tavolato, C., Thepaut, J.-N., Vitart, F., 2011. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 137, 553–597.
- Ferreira, N.J., Ramírez, M.V., Gan, M.A., 2009. Vórtices ciclônicos de altos níveis que atuam na vizinhança do Nordeste do Brasil, in: Cavalcanti, I.F.de.A., Ferreira, N.J., Silva, M.G.A.J.da, Dias, M.A.F.daS. (Org.), *Tempo e Clima no Brasil*. Editora Oficina de Textos, São Paulo, pp. 43-60.
- Frank, N.L., 1970. On the nature of upper tropospheric cold core cyclones over the tropical Atlantic. Master's thesis. Tallahassee, Florida State University.
- 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 (Mestrado). São José dos Campos, INPE.
- Gan, M.A., Kousky, V.E., 1986. Vórtices ciclônicos da alta troposfera no Oceano Atlântico Sul. *Revista Brasileira de Meteorologia* 1, 19-28.
- Huffman, G.J., Adler, R.F., Bolvin, D.T., Gu, G., Nelkin, E.J., Bowman, K.P., Hong, Y., Stocker, E.F., Wolff, D.B., 2007. The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-Global, Multiyear, Combined-Sensor Precipitation Estimates at Fine Scales. *Journal of Hydrometeorology* 8, 38–55.
- Kousky, V.E., Gan, M.A., 1981. Upper tropospheric cyclonic vortices in the tropical South Atlantic. *Tellus* 36, 538-551.
- Lenters, J.D., Cook, K.H., 1997. On the origin of the Bolivian high and related circulation features of the South American climate. *Journal of the Atmospheric Sciences* 54, 656-678.

- Morais, M.D.C., 2016. Vórtice Ciclônico de Altos Níveis no Nordeste do Brasil: Estudo Observacional e Numérico. Tese (Doutorado). São José dos Campos, INPE.
- Morais, M.D.C., Oliveira, F.P., Coutinho, M.D.L., 2015. One case of simulation of Upper Tropospheric Cyclonic vortex in the Brazil Northeast – impact in the convection parameterization. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing* 1, 27-44.
- Ramirez, M.C.V., 1997. Padrões climáticos dos vórtices ciclônicos em altos níveis no Nordeste do Brasil. Dissertação (Mestrado). São José dos Campos, INPE.
- Ramirez, M.C.V., Kayano, M. T., Ferreira, N. J., 1999. Statistical analysis of upper tropospheric vortices in the vicinity of northeast Brazil during the 1980-1989. *Atmosfera* 12, 75-88.
- Reboita, M.S., Nieto, R., Gimeno, L., Rocha, R.P.da, Ambrizzi, T., Garreaud, R., Krüger, L.F., 2010. Climatological features of cutoff low systems in the Southern Hemisphere. *Journal of Geophysical Research* 115, D17104. doi:10.1029/2009jd013251
- Ricks, E.L., 1959. On the structure and maintenance of high tropospheric cold-core cyclones of the tropics. Master's thesis. University of Chicago.
- Silva, L., 2005. A influência do vórtice ciclônico de altos níveis (VCANs) sobre a precipitação do Nordeste do Brasil (NEB) e as características associadas. Dissertação (Mestrado). São José dos Campos, INPE.
- Skamarock, W.C., 2004. Evaluating Mesoscale NWP Models Using Kinetic Energy Spectra. *Monthly Weather Review* 132, 3019-3032.
- Satyamurty, P., Nobre, C.A., Silva Dias, P.L., 2000. South America, in: Karoly D.J., Vicent, D.G. (Eds.), *Meteorology of the Southern Hemisphere*. American Meteorological Society. Meteorological Monographs, Boston.
- 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* 96, 203–220.
- Varejão-Silva, M.A., 2006. *Meteorologia e Climatologia*. Versão Digital, 2 ed., Recife. Disponível: <http://www.anakena.com.br/file/239832/meteorologia-e-climatologia-vd2-mar-2006.pdf>. Acesso: 30 nov. 2016.