



Artigo

## Ciclones em Superfície nas Latitudes Austrais. Parte III: Energética

Manoel Alonso Gan<sup>1</sup> , Sérgio Henrique Ferreira<sup>1</sup>, Karina Reciate da Costa<sup>2</sup>,  
Michelle Simões Reboita<sup>2</sup> , Eveson Dal Piva<sup>3</sup>

<sup>1</sup>*Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, Brasil.*

<sup>2</sup>*Instituto de Recursos Naturais, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, Brasil.*

<sup>3</sup>*Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, Brasil.*

Recebido em: 8 de Fevereiro de 2019 - Aceito em: 1 de Outubro de 2019

### Resumo

Esse estudo tem como objetivo apresentar a análise da energética de quatro casos de ciclones em latitudes austrais, sendo dois extratropicais (um do tipo Bjerknes e Solberg e o outro do tipo Shapiro e Keyser), um tropical e um subtropical, a fim de complementar o trabalho “Ciclones em Superfície nas Latitudes Austrais: Parte II Estudo de Casos”. Para tanto, utilizou-se a equação da energia cinética do distúrbio desenvolvida por Orlanski e Katzfey, pois ela contempla os principais mecanismos para a formação e dissipação dos sistemas transientes, isto é, as instabilidades baroclínica e a barotrópica, além do desenvolvimento corrente abaixo. A análise da energética mostra que o termo de conversão baroclínica foi o mais importante durante o ciclo de vida dos quatro ciclones estudados, já o termo barotrópico foi pequeno. Por outro lado, o termo de desenvolvimento corrente abaixo, conhecido como convergência do fluxo ageostrófico, atuou negativamente em todos os casos, exportando energia cinética para fora da região do ciclone.

**Palavras-chave:** ciclones extratropicais, ciclone subtropical, ciclone tropical, energia cinética.

### Abstract

This study presents the energy analysis of four cyclone cases in southern latitudes, being two extratropical (one Bjerknes and Solberg type and the other Shapiro and Keyser type), a tropical and a subtropical, in order to complement the work “Surface Cyclones over Austral Latitudes: Part II Cases Study”. We applied the eddy kinetic energy equation developed by Orlanski and Katzfey, because it contemplates the main mechanisms for the formation and dissipation of the transient systems, namely baroclinic and barotropic instabilities and downstream development. The energy analysis shows that the baroclinic conversion term was the most important during the life cycle of the four studied cyclones, whereas the barotropic term was small. On the other hand, the downstream development term, known also as ageostrophic flow convergence, had negative contribution for all cases, exporting kinetic energy out of the cyclone region.

**Keywords:** extratropical cyclones, subtropical cyclone, tropical cyclone, kinetic energy.

## 1. Introdução

Grande parte da América do Sul é influenciada diariamente por, pelo menos, um sistema transiente, que altera a circulação atmosférica e, portanto, as condições do tempo sobre o continente e oceanos adjacentes. Assim, é importante conhecer melhor os mecanismos de formação, intensificação e dissipação dos sistemas transientes, para que os previsores de tempo possam com esse conhecimento melhorar as previsões de tempo de curto prazo. As principais teorias de geração e intensificação dos sistemas transientes

são a instabilidade baroclínica, o Desenvolvimento Corrente Abaixo (DCA) e a instabilidade barotrópica (Nielsen-Gammon, 1995). Na teoria da instabilidade baroclínica, o desenvolvimento de uma onda em altos níveis ocorre simultaneamente com o ciclone em superfície, da mesma forma como proposto para o ciclone Tipo-A de Petterssen e Smebye (1971). Porém, muitos ciclones se desenvolvem devido à presença de um cavado pré-existente em altos níveis, mesmo que em baixos níveis não haja um intenso gradiente de temperatura, conforme o ciclone Tipo-B de Petterssen e Smebye (1971). A instabilidade baro-

tropical associada ao crescimento do distúrbio extraindo energia cinética ( $K$ ) do estado básico através do transporte horizontal e vertical de momento angular absoluto pelas perturbações (Lorenz, 1967). Esta forma de instabilidade possui um papel importante no desenvolvimento dos sistemas transientes, principalmente nos trópicos, e também na dissipação dos sistemas baroclínicos de latitudes médias, pois estes decaem por conversão barotrópica (Randel e Stanford, 1985). O mecanismo DCA está relacionado com a dispersão de energia em uma atmosfera barotrópica, como observado por Hoskins et al. (1977).

Uma forma de analisar as instabilidades hidrodinâmicas que contribuem para o desenvolvimento/decaimento dos ciclones é através do cálculo de conversão de energia. A energética pode ser obtida por diferentes formulações como a de Lorenz (1967) e a Orlandi e Katzfey (1991). Os estudos de Gan e Rao (1999), Pezza et al. (2010, 2014), Dias Pinto e da Rocha (2011), Dias Pinto et al. (2013) e Rosa et al. (2013) são exemplos da utilização da formulação de Lorenz (1967) em sistemas que atuam na América do Sul, enquanto os estudos de Gan e Piva (2013, 2016), para vórtices ciclônicos em altos níveis sobre o oceano Pacífico Sul, e de Müller et al. (2015, 2017), para eventos de geadas ocorridos na América do Sul, são exemplos da utilização da formulação de Orlandi e Katzfey (1991). A vantagem da formulação de Orlandi e Katzfey (1991) é que ela além de incluir os termos de conversões barotrópica e baroclínica também analisa o efeito do mecanismo de DCA.

Como no Hemisfério Sul existem poucos estudos que compararam a energética de diferentes tipos de ciclones e a fim de complementar o trabalho de Reboita et al. (2017), “Ciclones em Superfície nas Latitudes Austrais: Parte II Estudo de Casos”, aqui é realizada a análise da energética dos mesmos ciclones estudados pelos referidos autores. Os ciclones selecionados foram dois extra-

tropicais ocorridos no sudoeste do oceano Atlântico Sul, sendo um com características de desenvolvimento do tipo Bjerkens e Solberg (1922) e com gênese no dia 03 de maio de 2013, enquanto o outro foi do tipo Shapiro e Keyser (1990), formado no dia 22 de novembro de 2014. Ambos tiveram a posição inicial entre o extremo sul do Brasil e Uruguai. Os outros dois ciclones analisados foram o subtropical Arani, formado no dia 13 de março de 2011 sobre o Atlântico Sul, e o ciclone tropical Ului, que teve gênese a nordeste da Austrália sobre o oceano Pacífico no dia 10 de março de 2010.

## 2. Dados e Metodologia

Para realizar este estudo foi utilizado o conjunto de análises numéricas do *Global Forecast System* (GFS) com resolução espacial de  $0,5^\circ$  e intervalo de tempo de 6 h (0000, 0600, 1200 e 1800 Z). Embora essa análise tenha 26 níveis na vertical, limitou-se o estudo da superfície até o nível de 100 hPa, correspondendo a um total de 21 níveis verticais.

No presente estudo é analisada a energética dos quatro tipos de ciclones estudados por Reboita et al. (2017). Esses autores identificaram os sistemas com campos de pressão atmosférica e espessura da camada. Foram apresentados quatro estágios do ciclo de vida de cada ciclone: pré-ciclogênese (período que precede a formação do ciclone), ciclogênese (horário quando aparecem isóbaras fechadas na região do ciclone), maturidade (quando o ciclone chega a sua máxima intensidade durante a fase de oclusão) e decaimento (enfraquecimento do sistema após a oclusão). A energética desses casos foi obtida através da equação de  $K$  do distúrbio ( $K'$  – Eq. (1)) desenvolvida por Orlandi e Katzfey (1991) e modificada por Chang (2000), a qual tem sido utilizada em vários estudos (Gan e Piva, 2013, 2016; Müller et al. 2015, 2017) na América do Sul.

$$\begin{aligned} \underbrace{\frac{\partial K'}{\partial t}}_1 + \underbrace{(\mathbf{V}_m \cdot \nabla) K'}_2 + \underbrace{(\mathbf{V}_m \cdot \nabla_3) K'}_3 = \\ - \underbrace{\nabla_h(\Phi' \mathbf{V}')}_4 - \underbrace{\omega' \alpha'}_5 - \underbrace{(\mathbf{V}' \cdot (\mathbf{V}' \cdot \nabla_3 \mathbf{V}_m))}_6 + \underbrace{(\mathbf{V}' \cdot (\mathbf{V}' \cdot \nabla_3 \mathbf{V}'))}_7 + \underbrace{V' \cdot \mathbf{F}_0}_8 + \underbrace{R'}_9 \end{aligned} \quad (1)$$

Na Eq. (1), as variáveis assinaladas com (‘) referem-se às variáveis do distúrbio, os termos com subscrito “m”, “3” e “h” referem-se a valores do estado básico, em três dimensões e horizontal, respectivamente,  $\mathbf{V}$  é o vetor velocidade do vento,  $\omega$  é a componente vertical da velocidade do vento,  $\alpha$  o volume específico,  $\Phi$  o geopotencial,  $\mathbf{F}_0$  corresponde a somatória das forças viscosas e  $R'$  é o resíduo.

Os termos enumerados correspondem: 1) tendência local de  $K'$ ; 2) advecção de  $K'$  pelo estado básico; 3) advecção de  $K'$  pelo transiente; 4) Convergência do Fluxo

Ageostrófico (CFA) ou, como também é conhecido, desenvolvimento corrente abaixo (O mecanismo CFA está associado à dispersão de energia da onda e, portanto, a pacotes de ondas, os quais deslocam-se com a velocidade de grupo. As ondas desenvolvem-se como pacotes, decaindo corrente acima e crescendo corrente abaixo); 5) conversão baroclínica (BRC - conversão de energia potencial disponível do distúrbio em  $K'$ , está associada com a circulação termicamente direta, isto é, com ar quente ascendendo e ar frio descendo); 6) e 7) conversão baro-

tropical (BRT - conversão de  $K$  do estado básico para  $K'$ , está associada com transporte horizontal e vertical de momento angular absoluto pelas perturbações (Lorenz, 1967); 8) e 9) resíduos provenientes dos erros numéricos e outras forças resistivas. A tendência da  $K'$  é obtida de duas formas denominadas de Tendência da  $K'$  Observada (TEO) e a Tendência de  $K'$  Calculada (TEC). A primeira é obtida através da diferença entre dois campos de  $K'$  separados por dois passos de tempo, um, 6 horas antes e o outro 6 horas depois do tempo de referência, e a segunda através da soma de todos os termos do lado direito da Eq. (1), com exceção termo residual (RES). O termo resíduo contém os mecanismos não explicados pela equação, tais como: efeitos de fricção, efeitos diabáticos (liberação de calor latente, fluxos de calor em superfície), efeitos de montanha, fluxos de sub-grade (fluxos turbulentos associados a ondas curtas não resolvidas pela análise); além de erros introduzidos por métodos numéricos como interpolação e derivadas.

A vantagem da Eq. (1) é que ela relaciona os processos mais importantes para a formação ou dissipação dos sistemas transientes, tais como, a instabilidade baroclínica, a instabilidade barotropical e o desenvolvimento corrente abaixo.

Na aplicação da Eq. (1) é preciso ajustar a posição e as dimensões do volume de integração de modo a conter em seu interior o ciclone em superfície e o(s) centro(s) de  $K'$  que envolvem o ciclone. A Eq. (1) é primeiramente integrada na vertical entre a superfície e o nível de 100 hPa conforme Eq. (2):

$$X'_i = \frac{1}{(P_b - P_t)} \int X'_{(i,p)} dP \quad (2)$$

onde  $X'_{(i,p)}$  é a energia cinética do distúrbio ou, genericamente, qualquer um dos termos que compõem a Eq. (1) nas mesmas posições; o índice “ $i$ ” representa os pontos de grade horizontal do modelo; o índice “ $p$ ” representa os níveis isobáricos e “ $dP$ ” é a diferencial vertical de pressão. Os limites para integração vertical são definidos em coor-

denadas de pressão, indo do nível de pressão da base da coluna vertical ( $P_b$ ) ao nível de pressão do topo ( $P_t$ ), onde  $P_b$  corresponde ao nível dos dados mais próximo da superfície, mas que não intercepta a superfície da Terra no ponto considerado. O nível  $P_t$  é fixado em 100 hPa de forma a conter toda a troposfera. Os valores de  $X'_i$  correspondem, portanto, aos termos da equação de energia cinética, integrados em colunas da atmosfera sobre os pontos de grade “ $i$ ” dos dados. Estas colunas são mediadas na horizontal com média ponderada pela massa das respectivas colunas, conforme Eq. (3):

$$\langle X' \rangle = \frac{\Sigma(X'_i \cdot M_i)}{\Sigma M_i} \quad (3)$$

onde o símbolo  $\langle \rangle$  representa a integral no volume,  $M_i$  é a massa de ar de cada coluna dada por  $M_i = A_i(P_b - P_t)/g$ , “ $g$ ” é a aceleração da gravidade e “ $A_i$ ” é a área da base de cada coluna calculada em função das suas coordenadas geográficas como  $A = a^2 \cos(\phi) d\lambda d\phi$ , sendo “ $a$ ” o raio da Terra,  $\phi$  é a latitude e  $d\lambda$  e  $d\phi$  os intervalos de longitude e latitude em radianos.

As delimitações e posições das áreas utilizados na Eq. (3) são ajustadas em cada passo de tempo conforme evolução do ciclone, sendo suas respectivas posições e dimensões apresentadas nas figuras ao longo deste artigo. Desta forma, a Eq. (3) fornece as quantidades energéticas médias, ponderadas pelas variações de massa, tanto devido à variação da extensão vertical, quanto horizontal do volume de integração, tal como ocorre, por exemplo, quando o ciclone passa sobre regiões montanhosas, onde muda de tamanho ou quando translada para diferentes latitudes. Desta forma, os resultados obtidos são comparáveis ao longo do tempo, permitindo analisar a evolução temporal das quantidades energéticas ao longo do ciclo de vida do ciclone.

Considerando-se a Eq. (1), a integral no volume pelas Eqs. (2)-(3), a translação e variações do volume de integração, pode-se obter a Eq. (4):

$$\begin{aligned} \frac{\partial \langle K' \rangle}{\partial t} = & - \underbrace{\langle \nabla \cdot \mathbf{V} K' \rangle}_1 - \underbrace{\langle \nabla \cdot \mathbf{V}_a \Phi' \rangle}_2 - \underbrace{\langle \omega' \alpha' \rangle}_3 - \underbrace{\langle \mathbf{V}' \cdot (\mathbf{V}'_3 \cdot \nabla_3) \mathbf{V}_m + \mathbf{V}' \cdot (\nabla_3 \cdot \nabla_3) \mathbf{V}' \rangle}_4 + \\ & \underbrace{\langle \nabla \cdot \mathbf{V}_v K' \rangle}_5 + \underbrace{\left[ \left( \frac{dP_s}{dt} + \mathbf{V}_v \cdot \nabla P_s \right) K' \right]_B}_6 - \underbrace{[\omega' K']_B}_7 - \underbrace{[\omega' K']_T}_8 - \underbrace{[\omega' \Phi']_B}_9 - \underbrace{[\omega' \Phi']_T}_{10} + \langle \text{RES} \rangle \end{aligned} \quad (4)$$

na qual o símbolo  $[\ ]$  representa a integral de superfície ( $T$  – topo e  $B$  – base) e o subscrito “ $v$ ” indica a velocidade de deslocamento do volume.

Os termos da Eq. (4) têm a mesma interpretação dos da Eq. (1), com exceção dos dois termos de convergência

do fluxo vertical de energia que nesta última equação transformam-se em integrais de superfície, sendo interpretados como fluxo vertical de energia através do limite inferior ( $B$  – Base) e do superior ( $T$  – Topo) da atmosfera (do sétimo ao décimo termos) (Chang, 2000). Os pri-

meios dois termos do lado direito formam a convergência total de  $K'$ . O quinto termo representa o fluxo de  $K'$  devido ao movimento do volume de integração, enquanto o sexto é a mudança de  $K'$  devido à variação da massa contida no volume decorrente da variação da pressão da superfície. Caso o volume seja mantido fixo no espaço, os termos (quinto e sexto) da Eq. (4), que envolvem o deslocamento do volume, tornam-se nulos.

### 3. Resultados

#### 3.1. Ciclone extratropical do tipo Bjerknes e Solberg

Como mostrado em Reboita et al. (2017), o ciclone extratropical que teve gênese no dia 03 de maio de 2013, entre o Uruguai e o Rio Grande do Sul, seguiu o modelo conceitual de Bjerknes e Solberg (1922, daqui em diante chamado de BS22), pois sua evolução sinótica mostra a frente fria rotando em torno do centro de baixa pressão e em direção à frente quente, até ocorrer o processo de oclusão.

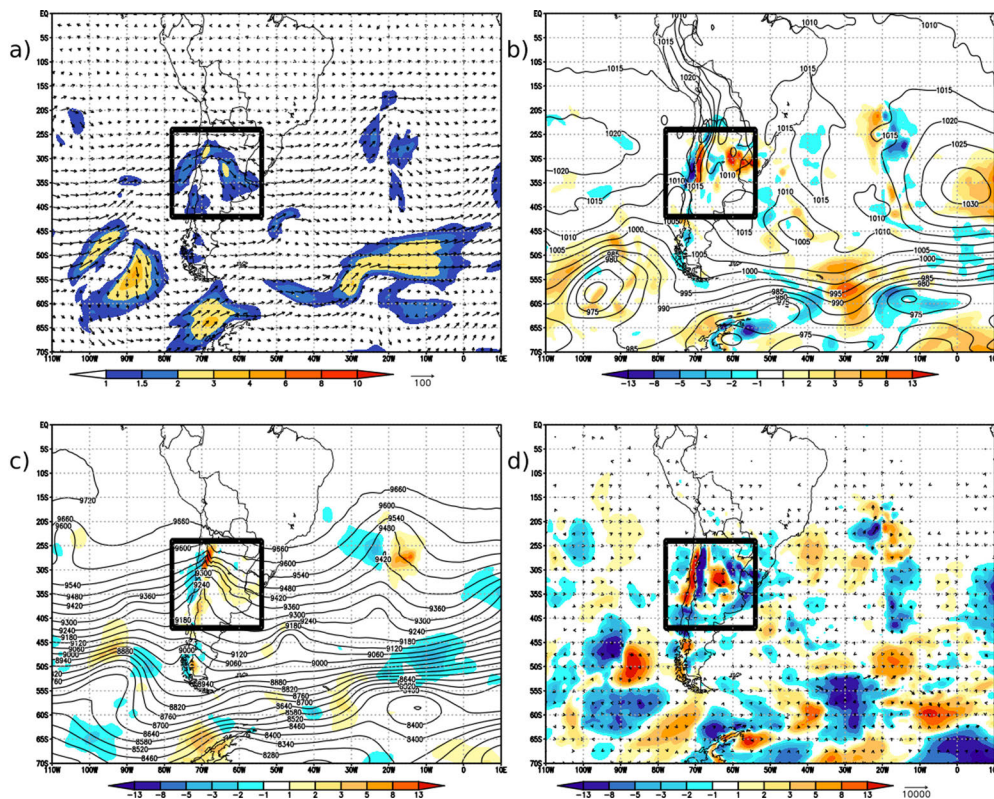
##### 3.1.1. Pré-ciclogênese (0600Z do dia 03/05/2013)

Durante a fase de pré-ciclogênese do BS22 havia um cavado em altos níveis cruzando os Andes (Fig. 1c) com

um máximo de  $K'$  integrada verticalmente (Fig. 1a) que se estendia desde o setor oeste do cavado até o setor leste, passando pelo setor norte do cavado. Os termos da equação  $K'$  integrados verticalmente mostram que sobre o Uruguai e nordeste da Argentina predominava um centro com valores positivos de conversão baroclínica (Fig. 1b), indicativo de condições de desenvolvimento de um distúrbio por conversão baroclínica, isto é, presença de circulação termicamente direta com ar quente ascendendo e ar frio descendendo. Ao mesmo tempo, parte dessa  $K'$  era exportada para fora de região através dos fluxos ageostróficos (Fig. 1c), pois divergência desse fluxo dominava na região (Fig. 1d), como pode-se ver também na Fig. 5b, que mostra os resultados para a integração no volume. O termo de conversão barotrópica (Fig. 1c) mostra um centro positivo sobre a região central da Argentina, indicando que há conversão de  $K$  do estado básico para  $K'$ .

##### 3.1.2. Ciclogênese (1800Z do dia 03/05/2013)

Às 1800Z do dia 03 de maio de 2013, entre o Uruguai e o estado do Rio Grande do Sul, surge uma isolinha fechada no campo de altura geopotencial em 925 hPa (Fig. 2b), caracterizando a gênese do ciclone. Nesse horário, o cavado em altos níveis se propagou para leste



**Figura 1** - Para o dia 03 de maio às 0000 UTC – pré-ciclogênese. a) Energia cinética do distúrbio ( $K'$ ) integrada na vertical (cores –  $\text{J kg}^{-1}10^{-2}$ ) e vetor vento em 300 hPa ( $\text{ms}^{-1}$ ), b) termo de conversão baroclínica (BRC – cores –  $\text{W kg}^{-1}10^{-3}$ ) e altura geopotencial em 925 hPa (linhas contínuas), c) termo de conversão barotrópica (BRT – cores –  $\text{W kg}^{-1}10^{-3}$ ) e altura geopotencial em 300 hPa (linhas contínuas), d) termo de convergência do fluxo ageostrófico (CFA – cores –  $\text{W kg}^{-1}10^{-3}$ ) e vetor do fluxo ageostrófico. O quadrado desenhado com linhas pretas representa a região onde foi feita a integração no volume, apresentada na Fig. 5.

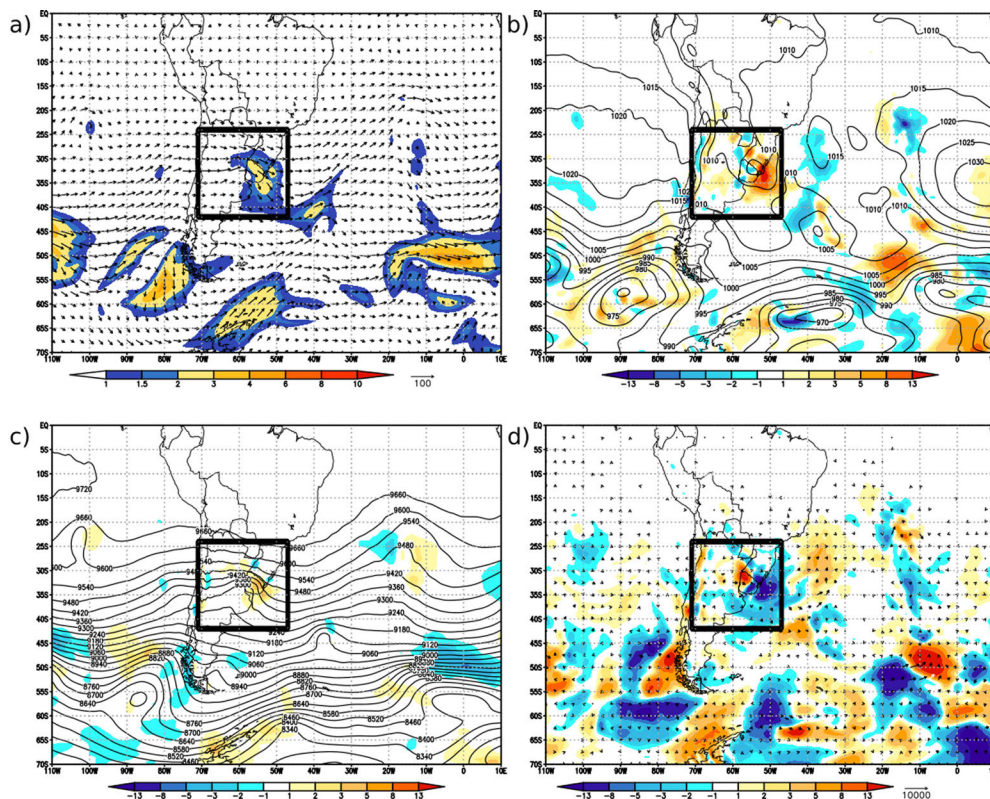


Figura 2 - Idem à Fig. 1 para o dia 3 de maio de 2013 às 1800 Z – Ciclogênese.

(Fig. 2a e 2c), estando seu eixo a oeste do Uruguai. A configuração do máximo de  $K'$  mudou nas últimas doze horas (Fig. 2a), tendo um padrão de vírgula invertida e estando agora apenas nos setores norte e leste do cavado.

O termo baroclínico mostra um máximo ao redor do ciclone em superfície (Fig. 2b), exceto no setor oeste. Esse máximo está sobre a região onde se localiza o máximo de  $K'$ , contribuindo para intensificação do ciclone. No setor oeste do ciclone, alguns pequenos centros com valores negativos são observados. O termo barotópico também apresenta um máximo, porém sobre a região coberta pelo centro do ciclone (Fig. 2c). Já o termo de CFA mostra um centro com valores negativos cobrindo os setores sul e leste do ciclone (Fig. 2d), e um centro com valores positivos no setor oeste do ciclone. Porém, esse centro positivo tem dimensões menores do que o centro de valores negativos, indicando que  $K'$  está sendo exportada para fora da região, contribuindo para intensificação do sistema não seja tão intensa.

### 3.1.3. Maturidade (0000Z do dia 08/05/2013)

Nesse estágio do ciclone em superfície, o cavado em 300 hPa se fecha (Fig. 3c) e entra em fase com o ciclone em superfície (Fig. 3b). O sistema, então, se encontra fechado em todos os níveis da troposfera e sem inclinação na vertical, caracterizando uma estrutura barotrópica. Com relação ao campo de  $K'$  integrada verticalmente (Fig. 3a),

do período de ciclogênese até a fase de maturação do ciclone, há um aumento substancial da  $K'$ , não somente na região onde estava localizado o ciclone, mas também ao longo das ondas curtas de Rossby localizadas nas latitudes subtropicais e extratropicais da América do Sul e oceanos adjacentes. Nota-se, também, que valores de  $K'$  acima de  $100 \text{ J kg}^{-1}$  praticamente envolvem o centro do ciclone, cujos valores máximos acima de  $300 \text{ J kg}^{-1}$  estão localizados à sudoeste do sistema, sendo estes o dobro dos valores observados na fase de ciclogênese (Fig. 3a).

Na maturidade, o termo baroclínico mostra um padrão assimétrico, tendo um centro com valores positivos nos setores sul, leste e norte, sendo que os maiores valores estão localizados a leste e sudeste do ciclone (Fig. 3b). O padrão espacial desse centro positivo acompanha o de  $K'$  (Fig. 3a). Um centro com valores negativos também é observado no setor oeste. Assim, na região leste do ciclone há energia potencial do distúrbio (EPD) sendo convertida em  $K'$ ; já no lado oeste tem-se o inverso, isto é,  $K'$  sendo convertida em EPD. Isso representa que nesse setor há uma circulação termicamente indireta.

O termo de CFA mostra um padrão espacial praticamente inverso ao do baroclínico (Fig. 3d), isto é, sinal contrário. O centro com valores negativos mostra um padrão de vírgula invertida exatamente sobre a região onde se encontra o centro máximo de  $K'$  (Fig. 3a). Um centro com valores positivos é observado no setor noro-

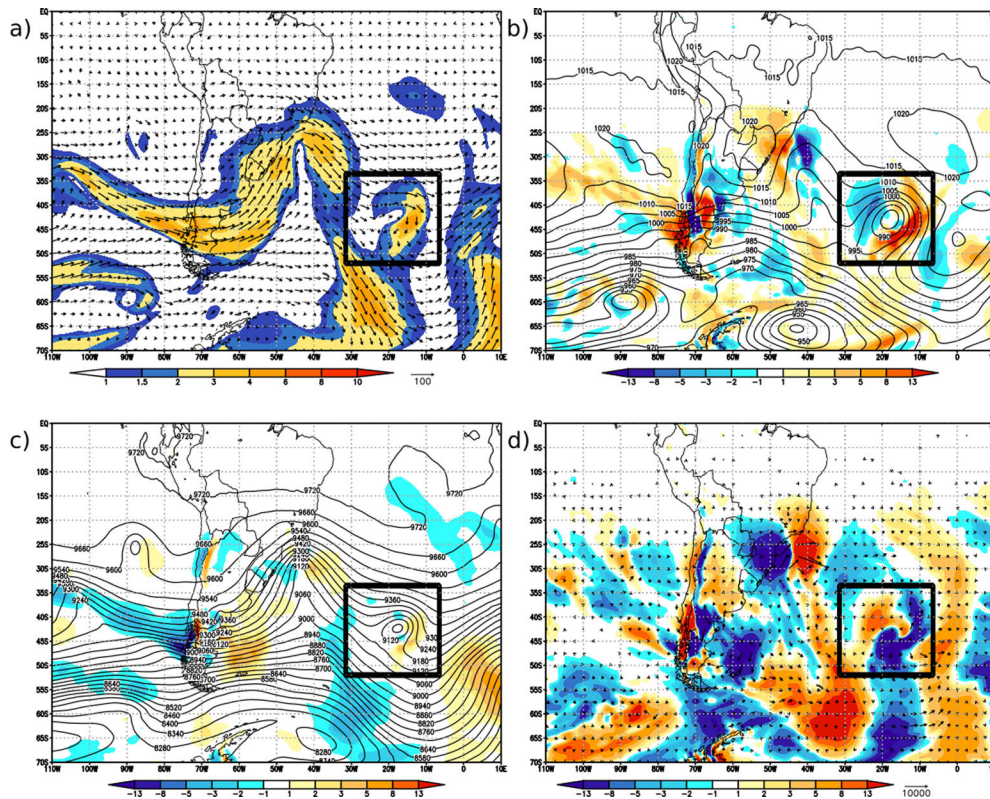


Figura 3 - Idem à Fig. 1 para o dia 8 de maio de 2013 às 0000 Z – Maturidade.

este do ciclone. Assim, nesse setor está havendo importação e no setor leste exportação de  $K'$  através dos fluxos ageostróficos. O padrão inverso do CFA ao termo baroclínico é esperado para este estágio do ciclo de vida, uma vez que nessa fase o sistema já atingiu sua intensidade máxima. Assim, no setor que está havendo um ganho de  $K'$  por conversão baroclínica (pelo termo CFA) há perda pelo termo CFA (por conversão baroclínica).

#### 3.1.4. Decaimento (0600Z do dia 09/05/2013)

Sem o suporte da divergência de massa a jusante do cavado em 300 hPa (Fig. 4a), pois não há mais inclinação na vertical do ciclone, e sem gradientes horizontais de temperatura do ar em superfície (ver Fig. 2g de Reboita et al. 2017), o ciclone tende a enfraquecer e se dissipar como mostra o campo de altura geopotencial em 925 hPa, onde apenas aparece uma isolinha fechada (Fig. 4b). Nessa fase, o termo baroclínico (Fig. 4b) mostra um padrão semelhante ao da fase de maturidade (Fig. 3b), entretanto, parte do centro de máxima conversão positiva deslocou-se para sudeste, fazendo com que a conversão positiva próxima ao ciclone tenha sido reduzida. Por outro lado, o centro com valores negativos de conversão baroclínica praticamente não sofreu alteração. Isso mostra que o saldo do termo baroclínico é pequeno como indica a Fig. 5.

O padrão do termo CFA revela alterações em relação à fase anterior, pois o centro de divergência do fluxo ageostrófico propagou para sudeste (Fig. 4d), onde esse termo apresentou altos valores de divergência. Já sobre o setor noroeste do ciclone, o centro de convergência do fluxo ageostrófico se mantém, porém a divergência possui valores maiores, mostrando que há predominância da exportação de  $K'$  ante a importação.

A Fig. 5 apresenta a evolução dos principais termos da Eq. (1), integrados no volume que é um cubo representado pelo retângulo traçado nas Figs. 1-4.  $K'$  (Fig. 5a) se manteve praticamente constante desde a formação do ciclone até o dia 5 de maio às 0000Z, quando começou a aumentar até atingir um máximo no dia 6 às 1200Z. Após esse horário,  $K'$  apresentou um ligeiro decréscimo, mas no dia 8 aparece um segundo máximo.

O termo BRC (Fig. 5b) foi o mais importante durante todo o ciclo de vida do ciclone, apesar de que no dia 5 de maio contribuiu com pouca conversão positiva. Já o termo BRT apresentou baixos valores de conversão positiva desde a fase de pré-ciclogênese até o dia 07 de maio às 0000Z, quando então passou a ter contribuição negativa. Por outro lado, o termo CFA mostrou valores negativos em praticamente todo o período analisado, exceto no dia 5 das 0000Z às 1200Z, quando apresentou valores praticamente nulos, e no dia 06 às 0000Z, quando mostrou valores positivos. Em suma, este termo contribuiu negati-

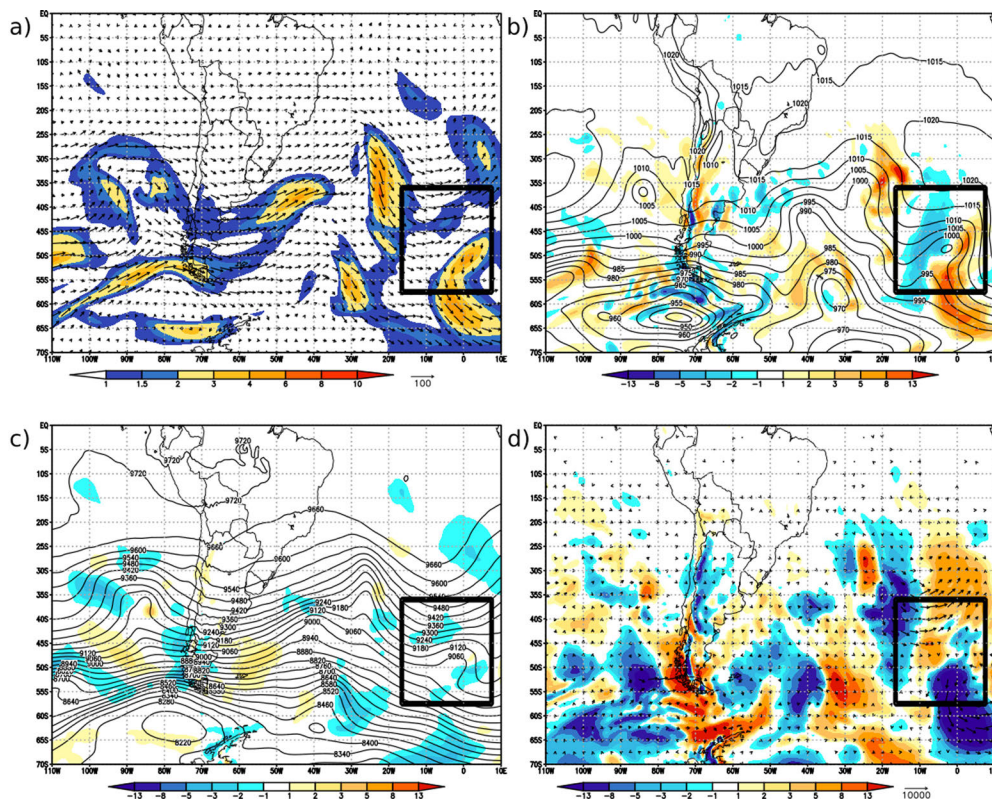


Fig. 4 - Idem à Fig. 1 para o dia 9 de maio de 2013 às 0600 Z – Decaimento.

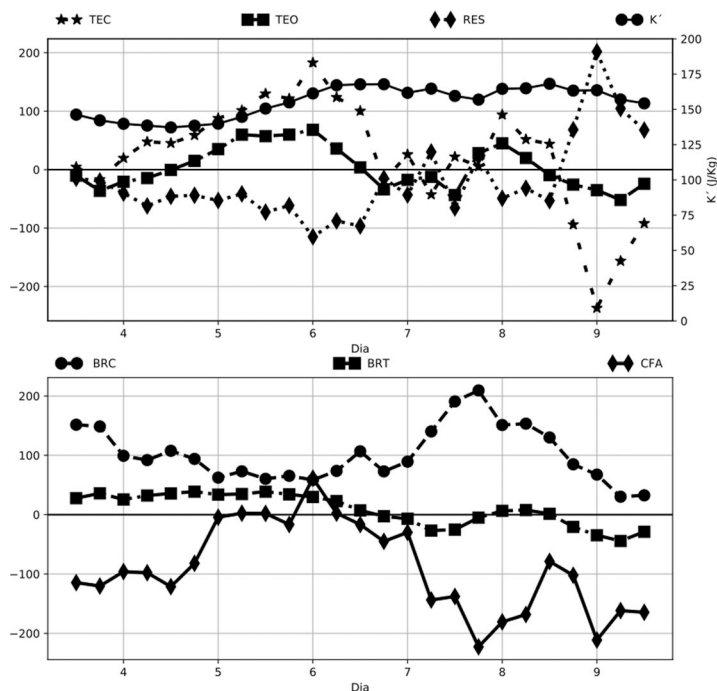


Fig. 5 - Evolução temporal dos principais termos da Eq. (4) (integrados no volume (representado pelo retângulo traçado nas Figs. 1-4), para o período de 3 a 9 de maio de 2013. Nos quadros inferior e superior são apresentados os seguintes termos da tendência em  $W\text{ kg}^{-1}$ : A tendência da energia cinética calculada pela soma dos termos da equação (TEC); tendência da energia cinética observada (TEO); resíduo (Res); termo baroclínico (BRC); termo barotrópico (BRT); Convergência do Fluxo Ageostrófico (CFA). A energia cinética do distúrbio integrada ( $K'$ ) é apresentada no quadro superior em  $(J\text{ kg}^{-1})$ .

vamente durante a fase de formação e intensificação do ciclone e também para a dissipação do sistema. Resultados semelhantes foram obtidos por Piva (2006) ao analisar, através de compostos, a energética de 25 casos de ciclones do tipo B de Petterssen e Smebye (1971) e 13 casos de ciclones do tipo C (com 13 situações) definidos por Radinovic (1986), isto é, ciclones associados a efeitos orográficos, também conhecidos como ciclones a sotavento das montanhas. Os resultados de Piva, para a média no volume que continha os ciclones, mostram que o termo BRC foi o dominante nos dois compostos, enquanto que o termo de CFA desempenhou um papel secundário, contribuindo negativamente no desenvolvimento dos ciclones do tipo C e positivamente no desenvolvimento inicial do ciclone do tipo B.

Com relação ao resíduo (Fig. 5), este é negativo e relativamente pequeno na fase pré-ciclogênica e ciclogênica. Durante a fase de crescimento de  $K'$  (dia 07 de maio), o resíduo oscilou com valores positivos e negativos, mas os valores, em módulo, foram menores do que nas fases anteriores. Na fase de dissipação, esse termo adquiriu valores positivos e bem grandes, indicando que outros processos não contemplados na Eq. (2) podem estar contribuindo para dissipação do sistema.

### 3.2. Ciclone extratropical do tipo Shapiro e Keyser

O ciclone extratropical que terá a energética analisada nesta seção segue o modelo conceitual de Shapiro e

Keyser (1990), analisado em Reboita et al. (2017). Este caso se formou no dia 22 de novembro de 2014 às 0600Z, na costa da região sudeste da América do Sul, e também pode ser considerado um caso do tipo B de Petterssen e Smebye (1971).

#### 3.2.1. Pré-Ciclogênese (0600Z do dia 21/11/2014)

Durante a fase de pré-ciclogênese foram observados baixos valores de  $K'$  sobre a região de formação do ciclone (Fig. 6a). Entretanto, a presença de um cavado cruzando os Andes costuma ser um precursor para a ocorrência de ciclogênese em superfície na costa leste sulamericana. Os termos de conversão barotrópica e baroclínica também apresentaram valores pequenos (Fig. 6b e 6c, respectivamente). Já o CFA mostrou divergência de  $K'$  propiciada pelos fluxos ageostróficos (Fig. 6d). Portanto, a análise da equação de  $K'$  não indica a possibilidade de desenvolvimento do ciclone durante este horário.

#### 3.2.2. Ciclogênese (0600Z do dia 22/11/2014)

Na fase de ciclogênese há uma região de  $K'$  com valores acima de  $100 \text{ J kg}^{-1}$ , que se localiza sobre o ciclone nos baixos níveis e contorna o cavado em 300 hPa (Fig. 7a). Porém, o campo de  $K'$  mostra dois máximos: um no setor nordeste e outro no sudeste do cavado. Apesar desse ciclone ter se formado praticamente na mesma posição do ciclone do tipo BS22, a evolução desse caso foi

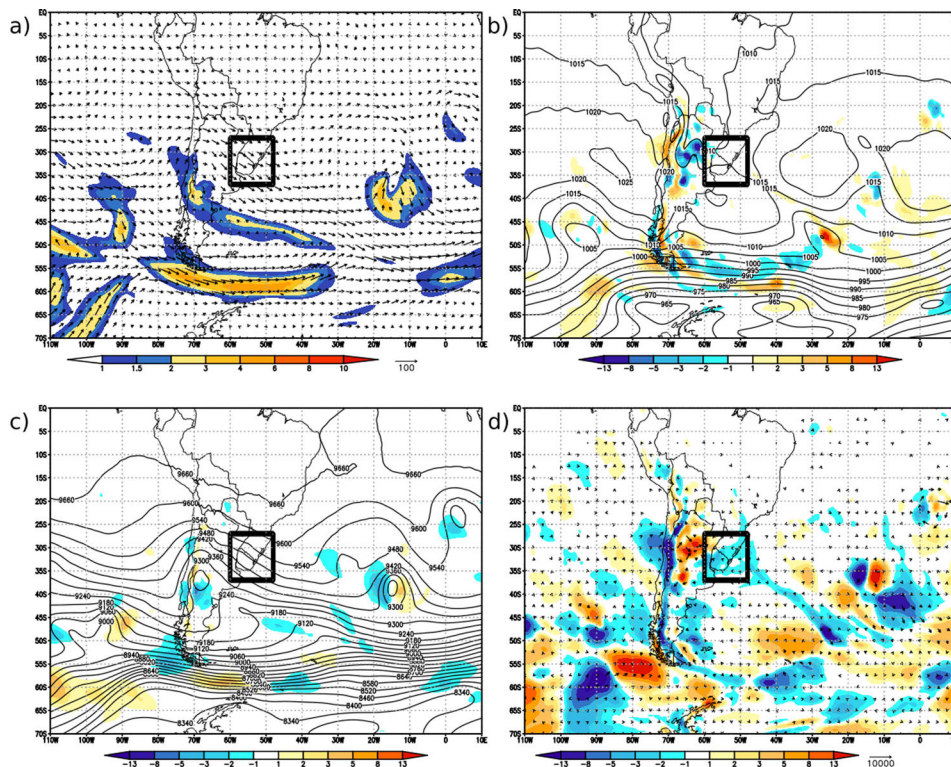


Fig. 6 - Ciclone tipo Shapiro e Keyser: Idem à Fig. 1 para o dia 21 de novembro de 2014 às 0600Z – Pré-ciclogênese. O quadrado desenhado com linhas pretas representa a região onde foi feita a integração no volume, apresentada na Fig. 10.



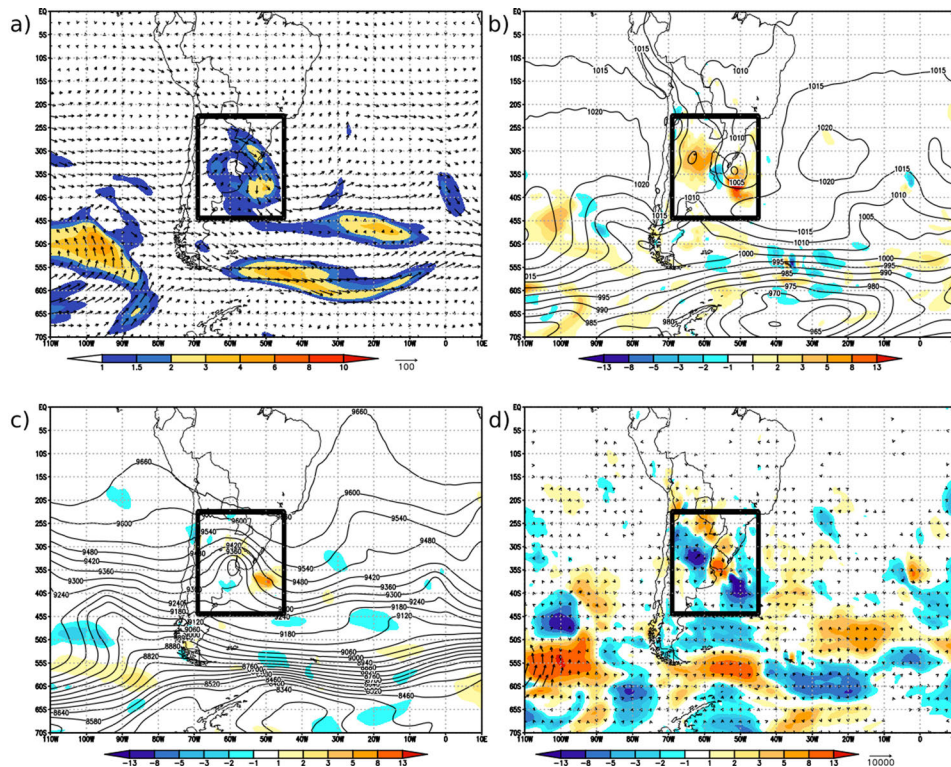


Fig. 7 - Idem à Fig. 1 para o dia 22 de novembro de 2014 às 0600 Z -Ciclogênese.

mais rápida e o padrão de  $K'$  também teve um formato de vírgula invertida.

Com relação ao termo BRC (Fig. 7b), há um centro de máxima conversão positiva no setor sul do ciclone em superfície. Apesar de no setor oeste ocorrer um centro de conversão negativa, a conversão positiva é a que domina na região do ciclone. Comparando-se com o ciclone do tipo BS22, nota-se que o centro de máxima conversão positiva, do ciclone em análise, possui valores menores e que se concentram mais no setor sudeste do ciclone, enquanto que no caso anterior, a máxima conversão de  $K'$  ocorreu no setor leste.

Ainda no período de ciclogênese, sobre a região do ciclone em superfície, observa-se no setor leste divergência do fluxo ageostrófico, com valores maiores no setor sudeste (Fig. 7d). Já no setor oeste nota-se convergência do fluxo ageostrófico. Assim, nessa fase, o ciclone está importando  $K'$  no setor oeste e exportando  $K'$  corrente abaixo. Diferente do BS22 (Fig. 2d), nesse caso há exportação de  $K'$  no setor leste-sudeste. Também, tal como no BS22, o termo barotrópico mostra conversão positiva (Fig. 7c), mas o máximo dessa conversão fica localizado a sudeste do centro do ciclone, diferente do caso do BS22 no qual o máximo da conversão barotópica cobriu o centro do ciclone (Fig. 2c).

3.2.3. Maturidade (0600Z do dia 23/11/2014)

Nessa fase o ciclone está bem desenvolvido sobre o oceano Atlântico (Fig. 8b) e se estendendo até os altos ní-

veis com uma estrutura barotrópica equivalente (Fig. 8c). Um máximo de  $K'$  rodeando todo o centro do ciclone pode ser observado na Fig. 8a, porém com intensidade máxima a leste-sudeste do centro do sistema.

O termo de conversão baroclínica (Fig. 8b) mostra um máximo principal no setor leste-sudeste com formato de vírgula invertida e um máximo secundário no setor noroeste do ciclone, que é menor em tamanho e em intensidade em relação ao primeiro centro. Diferente do caso do tipo BS22, o ciclone em análise não tem um centro negativo de conversão baroclínica. A conversão barotrópica (Fig. 8c) tem um padrão semelhante ao do termo baroclínico, com dois máximos de conversão positiva, sendo um a leste-sudeste do centro do ciclone e o outro a noroeste.

O termo de CFA (Fig. 8d) mostra um padrão um pouco diferente do caso do BS22, pois há um centro com valores negativos rodeando um outro centro com valores positivos, que se localiza no setor nordeste do ciclone, mas bem próximo do seu centro.

3.2.4. Decaimento (0600Z do dia 24/11/2014)

O campo de pressão reduzida ao nível do mar (Fig. 9b) indica uma expansão do ciclone do estágio prévio para a maturidade. Já as isolinhas de altura geopotencial em 300 hPa (Fig. 9c) indicam que o vórtice em altos níveis não está mais fechado e que está enfraquecido. Já o campo de  $K'$  integrado na vertical apresenta uma região de máximo de  $K'$  a leste do cavado em altos níveis,

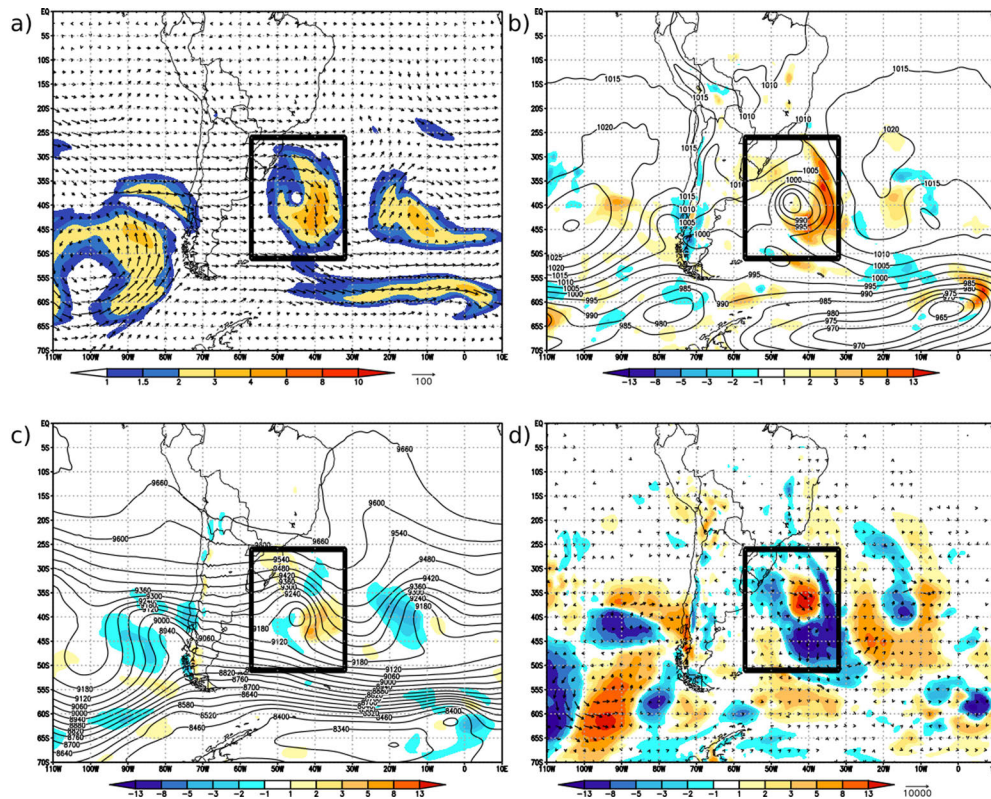


Fig. 8 - Idem à Fig. 1 para o dia 23 de novembro de 2014 às 0600 Z- Maturidade.

com um padrão de vórgula invertida, mas com valores máximos que são inferiores aos da fase anterior (Fig. 9a). Esse padrão é diferente ao do ciclone BS22, que possuía um centro  $K'$  máximo mais intenso corrente abaixo do cavado em altos níveis e outro mais fraco corrente acima (Fig. 4a).

O termo de conversão BRC (Fig. 9b) também mostra máximo positivo com formato de vórgula invertida localizado a leste do ciclone. Diferente do caso BS22, este não mostra um centro de máxima conversão negativa localizada a oeste do centro do ciclone (Fig. 4b). O termo CFA (Fig. 9d) apresenta um padrão semelhante ao do caso de BS22 (Fig. 4d) com convergência no setor noroeste do ciclone e divergência no setor sudeste. O termo de conversão barotrópica mostra apenas contribuição negativa (Fig. 9c), como esperado na fase de decaimento dos sistemas baroclínicos.

A evolução temporal dos principais termos da Eq. (4) mostra que  $K'$  integrada no volume atingiu um máximo no dia 23 de novembro às 0600Z e, após, às 1800Z desse mesmo dia, começou a decair (Fig. 10a). Assim como no caso BS22, o termo BRC foi o mais importante durante o ciclo de vida do ciclone (Fig. 10b). Este termo somente teve contribuição negativa na fase pré-ciclogênese. Por outro lado, o termo CFA mostrou um padrão inverso ao do termo BRC, indicando que ele atuou negativamente para a intensificação do ciclone, expor-

tando  $K'$  para fora da região do ciclone, como ocorreu também no caso do tipo BS22. O termo BRT como era de se esperar, tem valores positivos e inferiores aos do termo BRC até o dia 24 de novembro às 1800Z, quando então adquiriu valores negativos (Fig. 10b). O resíduo para este caso mostra ser negativo e maior, em módulo, do que no caso BS22, apesar de que em alguns horários este termo também se torna pequeno.

Por fim, é interessante ressaltar que a análise da energética dos dois ciclones extratropicais deixa evidente a contribuição do termo BRC, e que isso é um resultado consistente com o da literatura como, por exemplo, o estudo de Piva *et al.* (2010), que analisou a energética dos cavados em altos níveis que contribuíram para a formação de ciclones sobre o Uruguai com e sem o efeito dos Andes, o de Dias Pinto e da Rocha (2011), que estudou a energética de um ciclone bomba e de um ciclone baroclínico clássico, e o de Rosa *et al.* (2013) que analisou a energética de 58 ciclones que se formaram na costa da região sul do Brasil.

### 3.3. Ciclone tropical Ului

Esse ciclone teve gênese sobre o oceano Pacífico equatorial em 2010, a nordeste da Austrália, e decaiu ao atingir esse continente. À medida que atingiu a costa da Austrália, os ventos intensos do Ului causaram danos à

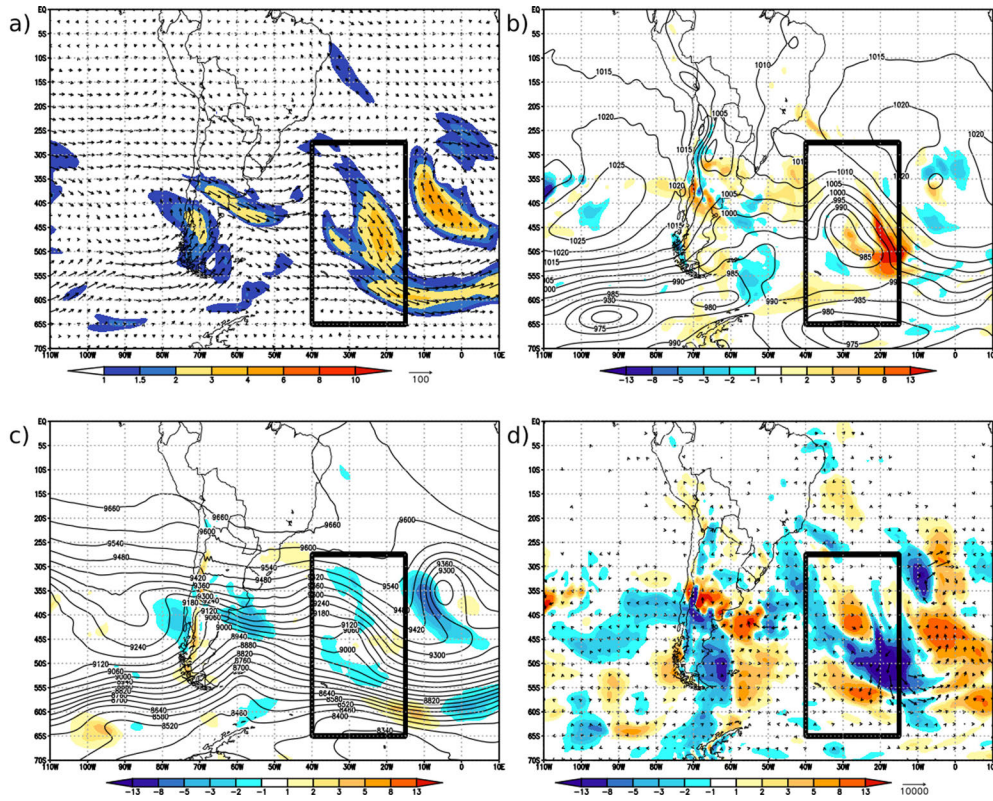


Fig. 9 - Idem à Fig. 1 para o dia 21 de novembro de 2014 às 0600 Z – Decaimento.

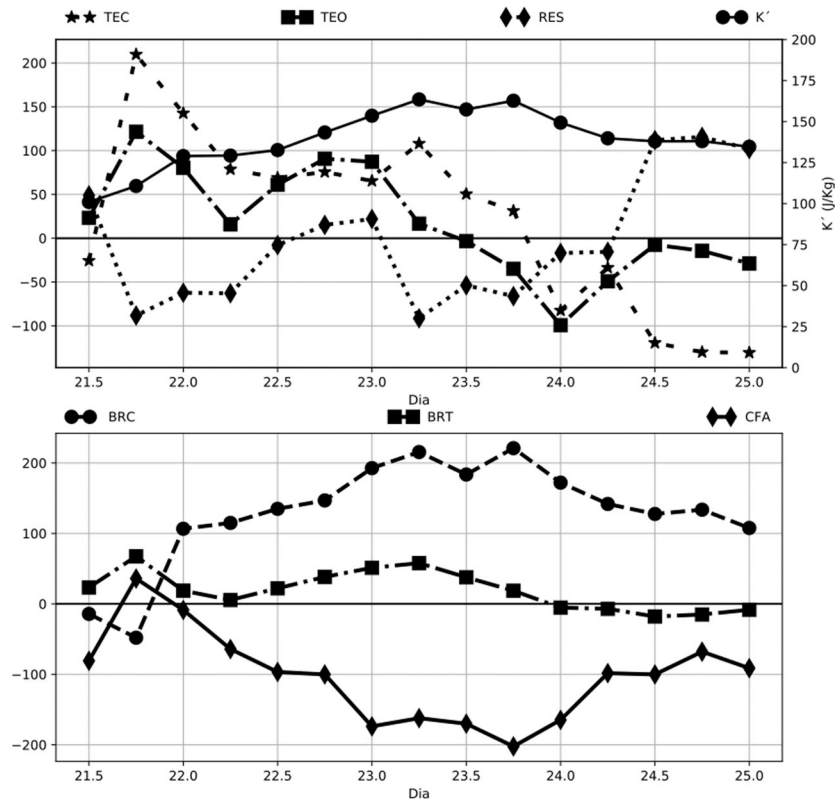


Fig. 10 - Idem à Fig. 5 para o período de 21 a 25 de novembro de 2014.

estrutura de muitas casas e destruição de plantações de cana-de-açúcar (BOM, s/d).

### 3.3.1. Pré-ciclogênese (0000Z do dia 10/03/2010)

Em [Reboita et al. \(2017\)](#), o ciclone Ului é observado nitidamente no campo de vento em 925 hPa, diferente do que ocorre no campo de altura geopotencial nesse mesmo nível, uma vez que essa variável não é boa para identificar os distúrbios na região tropical. Com relação à  $K'$ , há sobre a região em que se encontra o ciclone, valores inferiores a  $100 \text{ J kg}^{-1}$  ([Fig. 11a](#)). Os termos de conversão BRC e BRT também não apresentam valores muito elevados ([Figs. 11b e 11c](#), respectivamente). Já o termo CFA mostra a presença de divergência do fluxo ageostrófico em pequenas regiões ao redor do ciclone e de convergência no setor sudeste do ciclone ([Fig. 11d](#)).

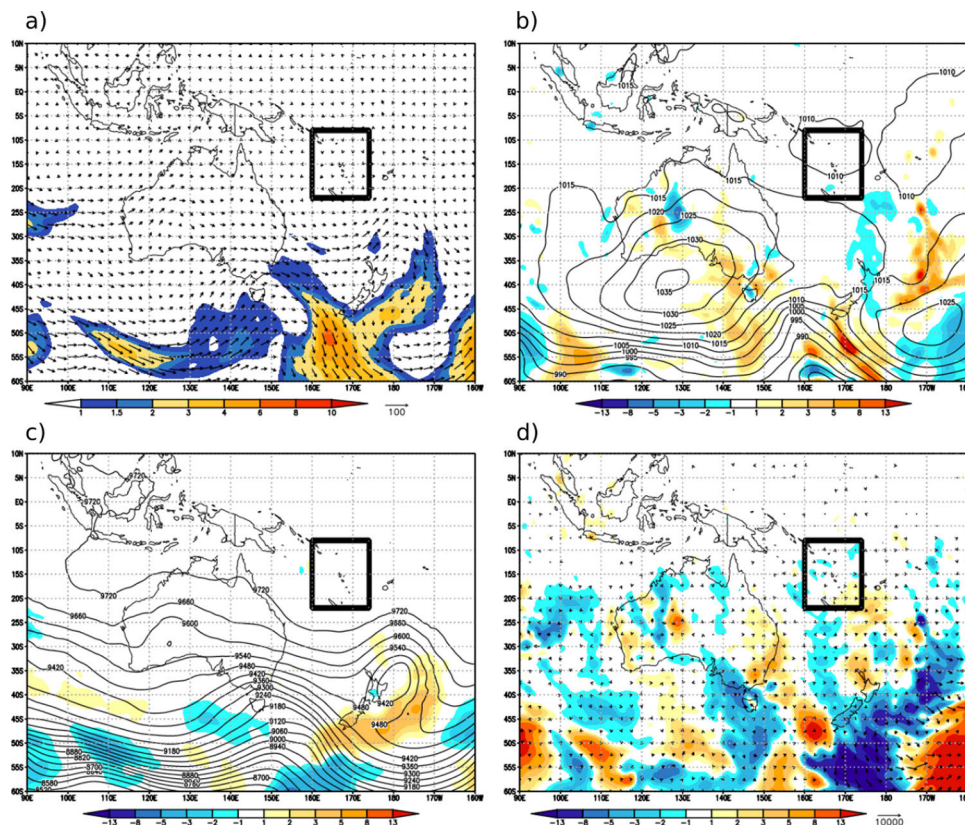
### 3.3.2. Ciclogênese (0000Z do dia 12/03/2010)

Nessa fase, o ciclone aparecia com centro de circulação fechado em 925 hPa ([Fig. 12b](#)), mas com valores de  $K'$  sobre o centro do ciclone ainda pequenos ([Fig. 12a](#)). Os termos de conversão mostram pouca contribuição baroclínica ([Fig. 12b](#)) e barotrópica ([Fig. 12c](#)). O termo CFA apresenta uma região de divergência do fluxo ageostrófico

([Fig 12d](#)), indicando que há exportação de  $K'$  para fora da região onde o ciclone tropical se encontrava.

### 3.3.3. Maturidade (0000Z do dia 16/03/2010)

Nessa fase, o campo de altura geopotencial em 925 hPa mostra um ciclone bem configurado ([Fig. 13b](#)), pelo forte gradiente horizontal dessa variável e pelos altos valores de  $K'$  ([Fig. 13a](#)). É importante salientar que outro ciclone tropical também está presente neste dia a sudeste do Ului. O termo BRC mostra grande contribuição positiva sobre a região central do ciclone ([Fig. 13b](#)), indicando que nessa fase há conversão de EPD para  $K'$  através da circulação termicamente direta. Porém, no setor leste-sudeste da periferia do sistema surge uma região de conversão negativa, indicando que nesse setor  $K'$  está sendo convertida para EPD através de uma circulação termicamente indireta. O termo BRT indica a presença de conversão positiva no setor nordeste e sul do centro do ciclone e negativa no sudoeste ([Fig. 13c](#)). Assim, no setor nordeste e sul (sudoeste), o ciclone recebe (perde)  $K$  do estado básico devido ao transporte horizontal de momentum. O termo CFA mostra um padrão com convergência do fluxo ageostrófico no setor norte e divergência desse fluxo ao sul ([Fig. 13d](#)). Nos setores sudeste e norte, um pouco afastado do centro do ciclone, observa-se uma região com fraca



**Fig. 11** - Ciclone Tropical Ului: Idem à [Fig. 1](#) para o dia 10 de março de 2010 às 0000 Z-Pré-Ciclogênese. O quadrado desenhado com linhas pretas representa a região onde foi feita a integração no volume, apresentada na [Fig. 15](#).

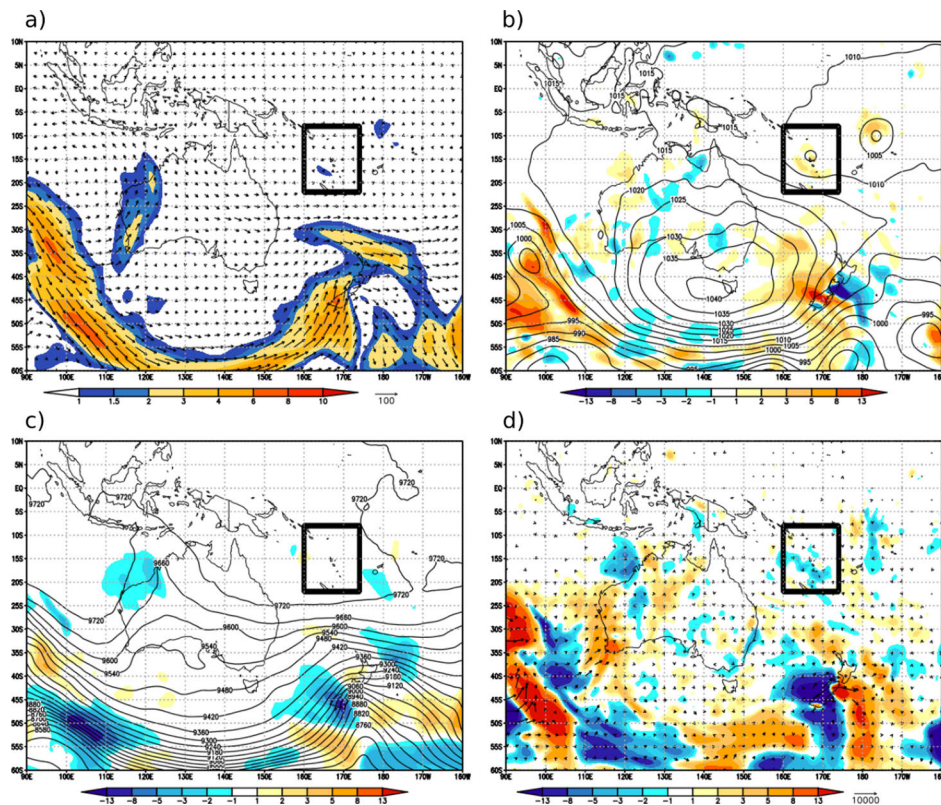


Fig. 12 - Idem à Fig. 1 para o dia 12 de março de 2010 às 0000 Z -Ciclogênese.

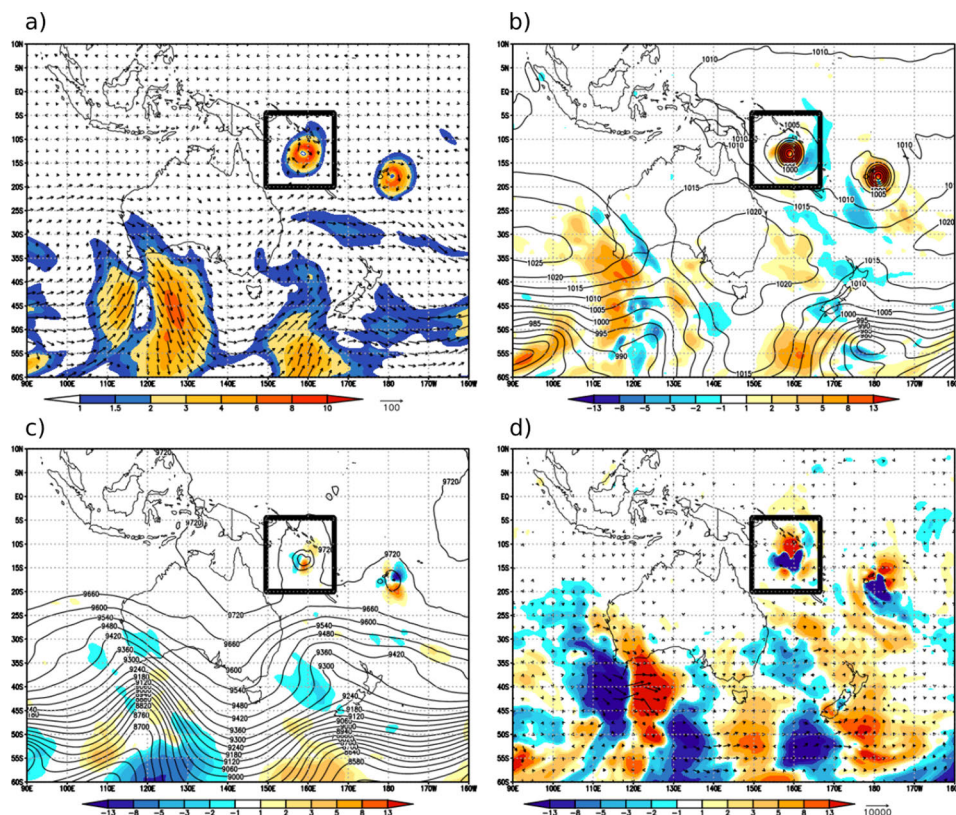


Fig. 13 - Idem à Fig. 1 para o dia 16 de março de 2010 às 0000 Z – Maturidade.

convergência do fluxo ageostrófico. Porém, entre essa região de convergência e a outra mais no interior do ciclone, há um máximo secundário de divergência desse fluxo.

#### 3.3.4. Decaimento (0000Z do dia 21/03/2010)

No período de decaimento, o ciclone tropical Ului está adentrando a região nordeste da Austrália, o que faz com que sua principal fonte de energia, que é o fluxo em superfície de calor latente (Kleinschmidt, 1951; Miller, 1958; Malkus and Riehl, 1960; Liu *et al.* 2012, Andersen *et al.* 2013), seja reduzida a níveis muito baixos, o que enfraquece o ciclone (Fig. 14b). Com o decréscimo da inserção de umidade no ciclone, ocorre uma redução substancial de liberação de calor latente no interior do sistema e, portanto, menos EPD será gerada, uma vez que é o aquecimento diabático que gera EDP (Anthes e Johnson, 1968). Com menor EPD, a conversão baroclínica é reduzida (Fig. 14b), fazendo com que o ciclone tenha menos  $K'$  para se manter (Fig. 14a). O termo BRT tem pouca contribuição positiva a sudeste do ciclone e negativa a oeste (Fig. 14c). O termo CFA apresenta valores positivos e negativos, porém inferiores ao da fase anterior (Fig. 14d).

A evolução temporal dos termos principais de equação da  $K'$  mostra que houve um ligeiro acréscimo da  $K'$  integrada no volume nas primeiras 18 horas da fase pré-ciclogênese, mas depois se manteve constante até iniciar

a gênese (Fig. 15a). Do período de gênese à fase de maturidade,  $K'$  teve um acentuado aumento. Logo em seguida,  $K'$  começou a decrescer de forma lenta. Assim, como nos dois casos de ciclones extratropicais, o termo BRC foi o termo mais importante para a evolução da  $K'$  (Fig. 15b), pois a liberação de calor latente é a principal fonte de EPD nos ciclones tropicais. O termo BRT também contribuiu positivamente para a intensificação do ciclone, porém em uma escala menor (Fig. 15b). Por outro lado, o termo DCA contribuiu negativamente (Fig. 15b), exportando  $K'$  para fora da região do sistema, semelhante ao que ocorreu com os ciclones extratropicais do tipo BS22 e do Shapiro e Kayser (1990). O resíduo permaneceu negativo em quase todo o período, porém sendo praticamente nulo em alguns horários. Até o sistema atingir a maturidade no dia 16 de março, os valores eram pequenos, em módulo, mas a partir desse horário, os valores se tornaram mais negativos.

Embora se pense que nos ciclones tropicais a contribuição baroclínica seja muito pequena comparada à barotrópica, esse estudo e outros, tais como o de Kwon e Frank (2008) e o de Veiga *et al.* (2008) indicam a importância do termo baroclínico nos sistemas tropicais, isto porque nesses sistemas a liberação de calor latente é bem acentuada, principalmente quando estão sobre áreas oceânicas, onde adquirem muita umidade. A liberação de calor latente é

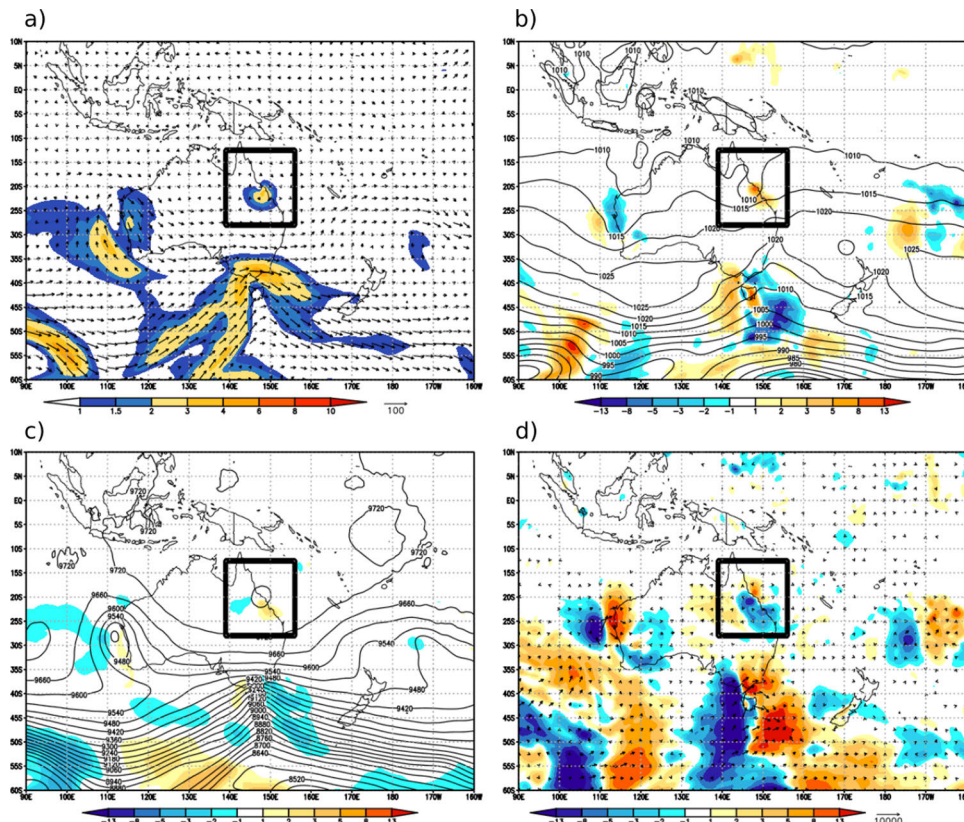


Fig. 14 - Idem à Fig. 1 para o dia 21 de março de 2010 às 0000 Z – Decaimento.

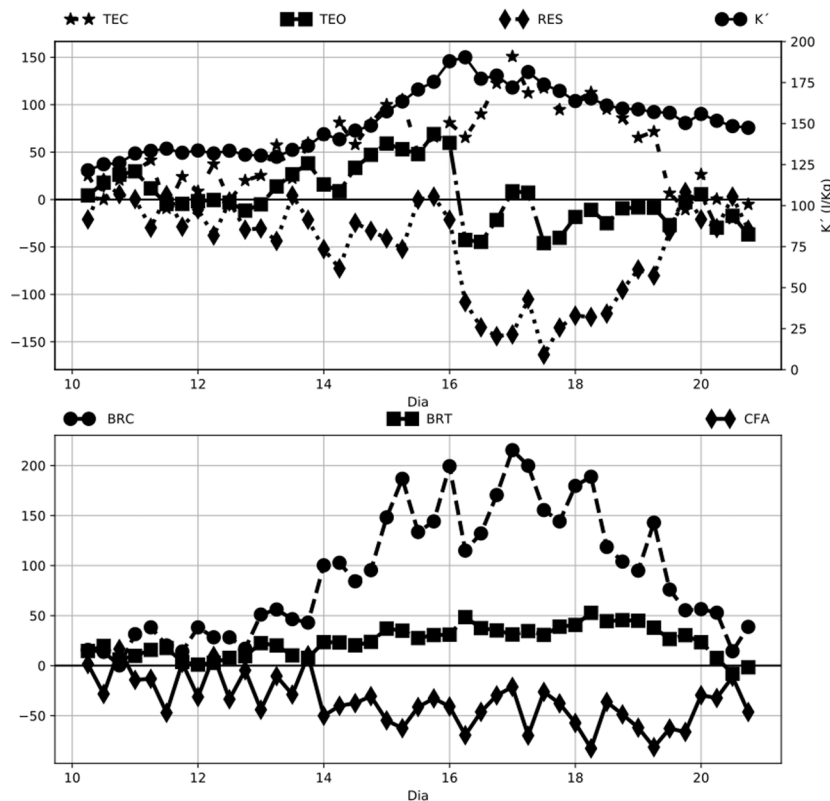


Fig. 15 - Idem à Fig. 5 para o período de 10 a 20 de março de 2010.

fonte de EPD, a qual é convertida em  $K'$  através do termo BRC.

### 3.4. Ciclone subtropical Arani

O ciclone Arani foi um típico ciclone subtropical formado no sudoeste do oceano Atlântico Sul, próximo à costa da região sudeste do Brasil, uma vez que desde a sua gênese apresentou estrutura térmica híbrida: quente em baixos níveis como os ciclones tropicais e fria em níveis médios/altos como os extratropicais (Reboita *et al.* 2017; 2019). Conforme Reboita *et al.* (2019), o Arani foi responsável por elevados totais de precipitação na costa da região sudeste do Brasil, bem como ventos com intensidade acima de 10 m/s.

#### 3.4.1. Pré-ciclogênese (1200Z do dia 13/03/2011)

O ambiente no qual se formará o ciclone Arani mostra pouca  $K'$  na região (Fig. 16a) na fase de pré-ciclogênese, o mesmo ocorre com as conversões baroclínica e barotrópica (Figs. 16b e 16c, respectivamente). O termo CFA mostrou pequenos centros de divergência e convergência do fluxo ageostrófico (Fig. 16d).

#### 3.4.2. Ciclogênese (1200Z do dia 14/03/2011)

Nessa fase o sistema apresentou pouca  $K'$  associada (Fig. 17a). Ao mesmo tempo, havia conversões baroclínicas positivas na periferia do ciclone (Fig. 17b). O

termo BRT é muito pequeno, com pelo menos, uma ordem de grandeza menor (Fig. 17c) comparando com os termos BRC e CFA e, portanto, não contribui para intensificar o ciclone Arani. Por outro lado, o termo CFA mostra nos setores nordeste e sudoeste divergência do fluxo ageostrófico e no setor oeste-noroeste convergência desse fluxo (Fig. 17d).

#### 3.4.3. Maturidade (1200Z do dia 15/03/2011)

Nessa fase, o ciclone Arani continua com pouca  $K'$  (Fig. 18a). Entretanto, o termo BRC mostra um máximo de conversão no setor leste do ciclone, que se estende para norte (Fig. 18b), mostrando que a EPD está sendo convertida em  $K'$ . O termo BRT continua sendo pequeno (Fig. 18b), não tendo, portanto, contribuído para alterar a intensidade do ciclone Arani. O termo CFA mostra que no setor leste do ciclone há divergência do fluxo ageostrófico (Fig. 18d), indicando que  $K'$ , que está sendo adquirida por processos baroclínicos, está sendo exportada para fora da região do ciclone.

#### 3.4.4. Decaimento (1200Z do dia 21/03/2011)

No decaimento, a altura geopotencial em 925 hPa mostra o ciclone fechado (Fig. 19b), porém com menor  $K'$  (Fig. 19a) do que na fase anterior (Fig. 18a). A conversão baroclínica (Fig. 19b), barotrópica (Fig. 19c) e CFA (Fig. 19d) praticamente não mostram contribuição, apenas

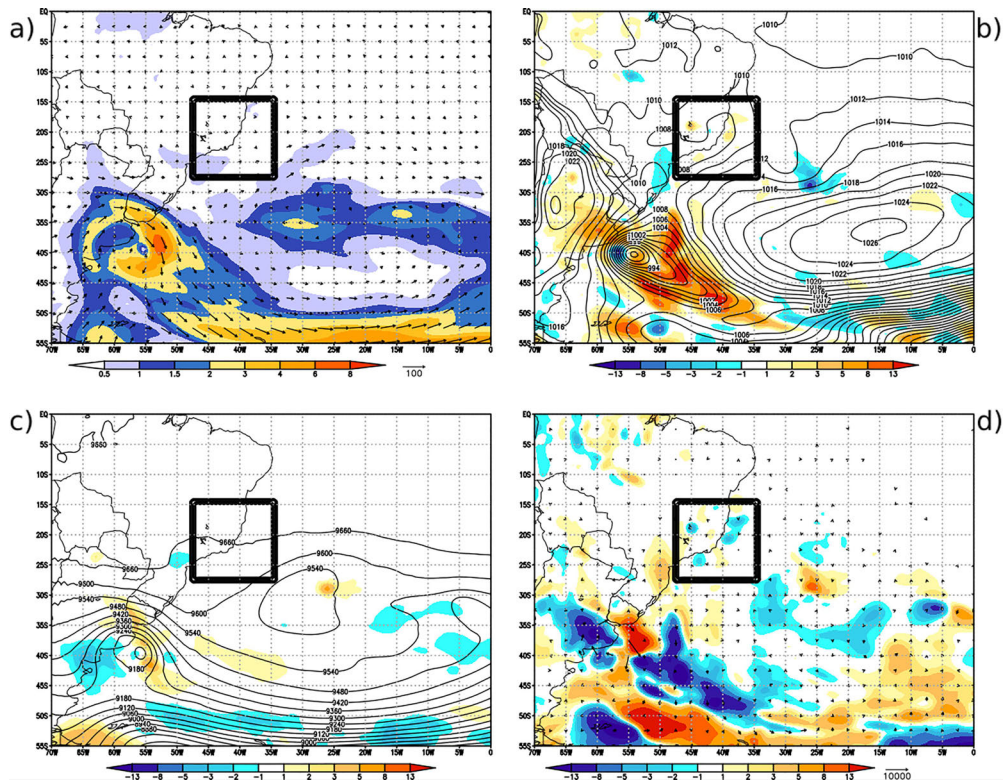


Fig. 16 - Ciclone tropical Arani. Idem à Fig. 1 para o dia 13 de março de 2011 às 1200 Z – Pré-ciclogênese. O quadrado desenhado com linhas pretas representa a região onde foi feita a integração no volume, apresentada na Fig. 20.

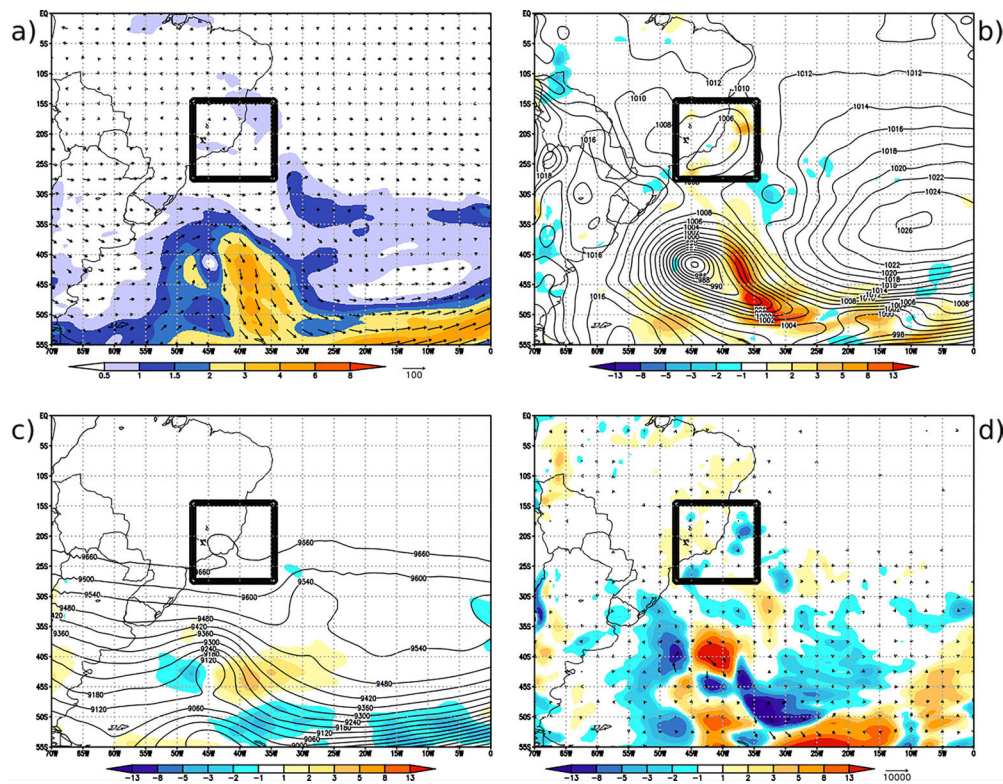


Fig. 17 - Idem à Fig. 1 para o dia 14 de março de 2011 às 1200 Z -Ciclogênese.



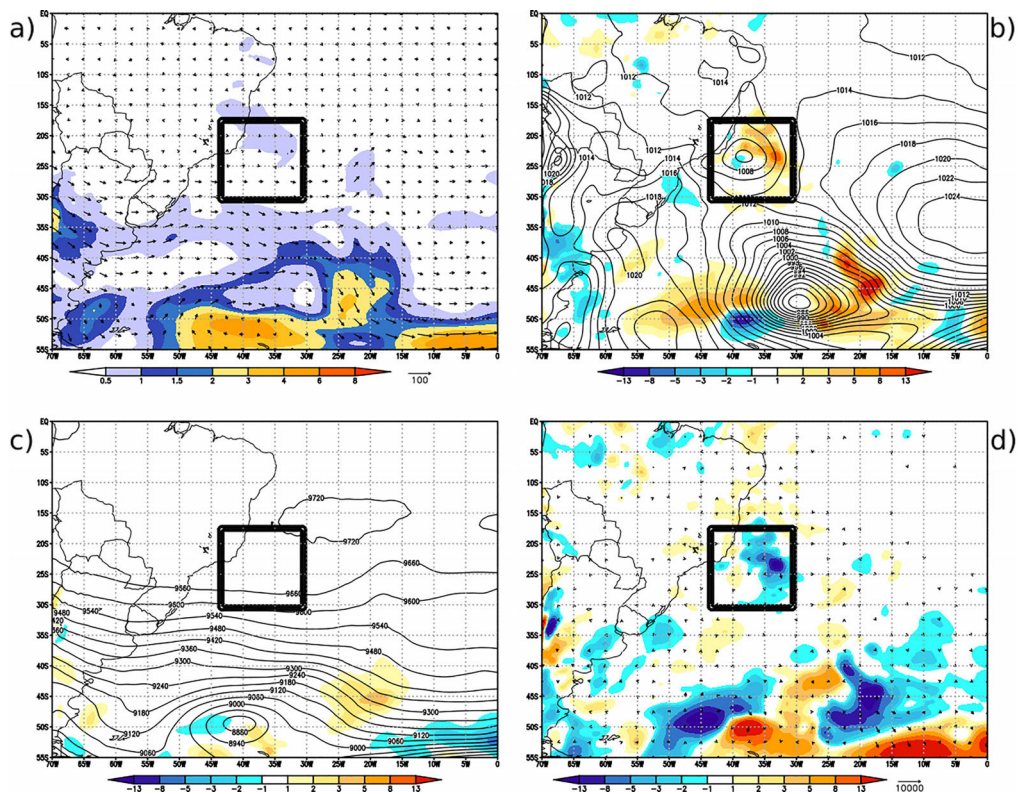


Fig. 18 - Idem à Fig. 1 para o dia 15 de março de 2011 às 1200 Z – Maturidade.

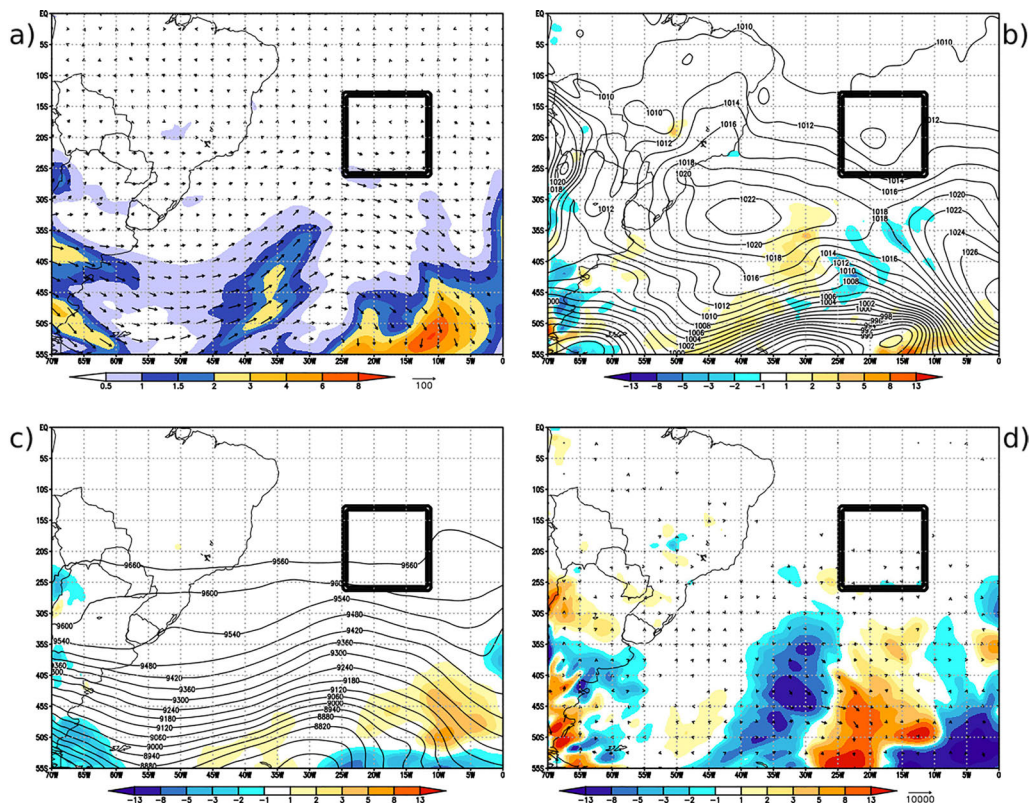


Fig. 19 - Idem à Fig. 1 para o dia 21 de março de 2011 às 1200 Z – Decaimento.

no termo CFA, que apresenta pequenos máximos de divergência do fluxo ageostrófico na borda sul do ciclone, o que contribuiu para que o ciclone continuasse com o processo de enfraquecimento.

A evolução temporal dos principais termos da equação da  $K'$  mostra que  $K'$  teve um ligeiro aumento desde a fase de pré-ciclogênese até o dia 16 de março às 0000Z (Fig. 20a). Após esse horário,  $K'$  do ciclone passou a ter um aumento mais acentuado até atingir o máximo no dia 17 de março às 1800 Z. A partir desse instante, começou a fase de enfraquecimento do centro de  $K'$  associado ao ciclone Arani. Vale destacar que analisando os valores de  $K'$  na Fig. 20a com os dos outros 3 casos de ciclones (Figs. 5a, 10a e 15a), aqui eles são inferiores em grande parte do seu ciclo de vida. O termo de conversão BRC também mostrou ser o mais importante (Fig. 20b), e como nos casos anteriores, o termo CFA esteve atuando para enfraquecer o sistema, pois exportou  $K'$  para fora da região do ciclone. O termo BRT teve uma pequena contribuição positiva na fase de inicial, mas a partir do dia 16 de março às 0000 Z, passou a ter uma contribuição negativa, convertendo  $K'$  para  $K$  do estado básico.

Diferente dos outros casos, o residuo oscila entre valores positivos e negativos, porém em módulos não são grandes, exceto no 17 de março às 0600Z, doze horas antes de atingir o máximo valor de  $K'$ , quando apresentou valores mais negativos.

tropicais ainda é pouco conhecida. Na literatura há o estudo de Cavicchia *et al.* (2018), que investiga um evento na costa leste da Austrália, e o de Dias Pinto *et al.* (2013), que analisaram o ciclo de energia do ciclone subtropical Anita ocorrido em 2010, que foi o primeiro ciclone subtropical a receber nome nessa bacia oceânica. Cavicchia *et al.* (2018) observaram que, ao longo de quase todo o ciclo de vida do ciclone Duck, a magnitude dos termos baroclínico e barotrópico foram comparáveis. Já no caso do ciclone subtropical Anita (Dias Pinto *et al.* 2013), na fase inicial do ciclo de vida desse sistema predomina a energia cinética da perturbação e a conversão de energia barotrópica, já na fase de transição (período em que o ciclone evoluiu de um sistema híbrido para um de centro frio em níveis baixos e altos, apresentando um caráter frontal) a conversão baroclínica foi mais importante. Já no presente estudo, mostrou-se que há predomínio do termo baroclínico ao longo do ciclo de vida do ciclone subtropical Arani. Apesar da comparação desses estudos indicar que não há um comportamento energético único nos ciclones subtropicais, tem-se que lembrar que o tamanho do domínio, no qual é determinado o balanço dos termos da equação de  $K'$ , pode levar a conclusões diferentes. No estudo de Dias Pinto *et al.* (2013), o domínio foi delimitado por uma área de  $25^\circ$  lat x  $25^\circ$  lon, já no presente estudo limitou-se uma área em que envolvesse o ciclone nos baixos níveis e o centro de  $K'$  associado ao sistema.

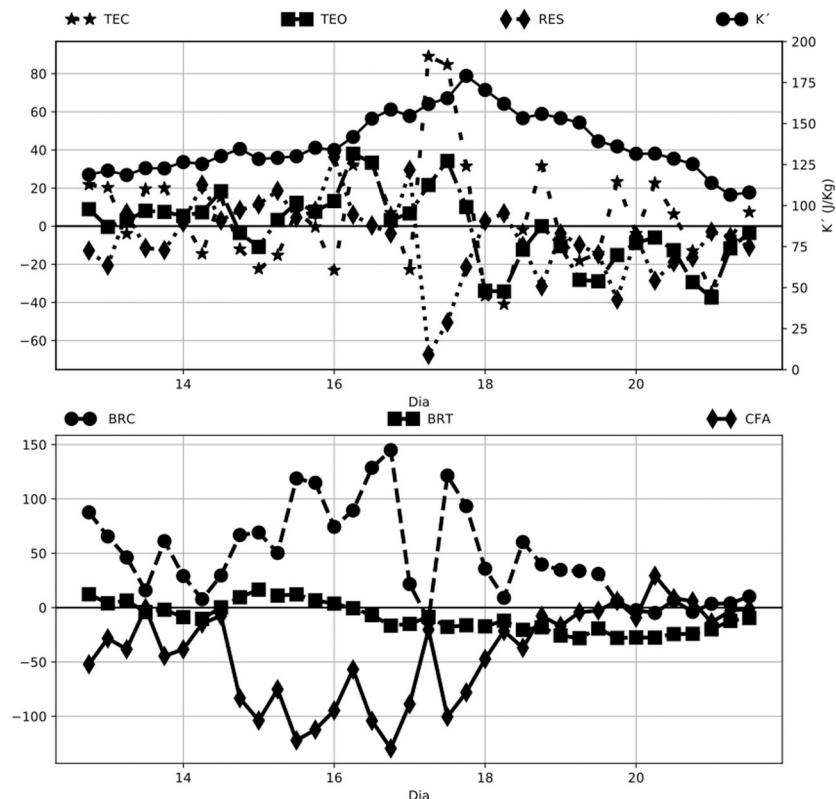


Fig. 20 - Idem à Fig. 5 para o período de 13 a 21 de março de 2011.

Como o cálculo dos termos da Eq. (4) são ponderados pela massa, o tamanho da área pode variar de um passo de tempo para outro.

#### 4. Conclusões

Este estudo teve como objetivo complementar o entendimento dinâmico de quatro tipos de ciclones (dois extratropicais – um tipo Bjerknes e Solberg e o outro do tipo Shapiro e Keyser, um tropical e um subtropical) realizado por Reboita *et al.* (2017) através da análise da energética desses sistemas. Para tanto, utilizou-se a equação da energia cinética do distúrbio desenvolvida por Orlanski e Katzfey (1991), uma vez que ela contempla os mecanismos mais importantes para a formação e dissipação dos sistemas transientes.

A análise da energética mostrou para os quatro casos estudados que o termo de conversão baroclínica foi o mais importante durante o ciclo de vida dos ciclones. Por outro lado, o termo de convergência do fluxo ageostrófico atuou negativamente em todos os casos, exportando energia cinética para fora da região do ciclone. Portanto, durante a fase de desenvolvimento dos ciclones, ele atuou negativamente, impedindo que os ciclones fossem mais intensos. Já o termo barotrópico teve pequena contribuição para os dois tipos dos ciclones extratropicais, sendo positivo durante a fase de desenvolvimento do sistema, passando a negativo na fase de dissipação no ciclone de Shapiro e Keyser e 18 horas antes da intensidade máxima de  $K'$  no tipo Bjerknes e Solberg. No caso do ciclone tropical, este termo teve contribuição positiva e pequena, entretanto, ele foi um pouco maior durante o período de maior intensidade do sistema. Já no caso do ciclone subtropical, o termo barotrópico teve um comportamento semelhante aos dos ciclones extratropicais, sendo em geral positivo na fase de desenvolvimento, mas tornou-se negativo durante a fase de maturação e de dissipação.

#### Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro (Processos No 457906/2014-6 e 305304/2017-8).

#### Referências

- ANDERSEN, T.K.; RADCLIFFE, D.E.; SHEPHERD, J.M. Quantifying surface energy fluxes in the vicinity of inland-tracking tropical cyclones. *The Journal of Applied Meteorology and Climatology*, v. 52, n. 12, p. 2797-2808, 2013.
- ANTHES, R.A.; JOHNSON, D.R. Generation of available potential energy in hurricane Hilda (1964). *Monthly Weather Review*, v. 96, n. 5, p. 291-302, 1968.
- BJERKNES, J.; SOLBERG, H. Life cycle of cyclones and the polar front theory of atmospheric circulation. *Geofysiske Publikasjoner*, v. 3, n. 1, p. 3-18, 1922.
- BOM - Australian Government Bureau of Meteorology. **Severe Tropical Cyclone Ului**. Disponível em: <<http://www.bom.gov.au/cyclone/history/ului.shtml>>. Acesso, 03 jul 2019.
- CAVICCHIA, L.; DOWDY, A.; WALSH, K. Energetics and dynamics of subtropical Australian east coast cyclones: Two contrasting cases. *Monthly Weather Review*, v. 146, n. 5, p. 1511-1525, 2018.
- CHANG, E.K.M. Wave packets and life cycles of troughs in the upper troposphere: Examples from the southern hemisphere summer season of 1984/85. *Monthly Weather Review*, v. 128, n. 1, p. 25-50, 2000.
- DIAS PINTO, J.R.; DA ROCHA, R.P. The energy cycle and structural evolution of cyclones over southeastern South America in three case studies. *Journal of Geophysical Research*, v. 116, n. D14112, 2011.
- DIAS PINTO, J.R.; REBOITA, M.S.; DA ROCHA, R.P. Synoptic and dynamical analysis of subtropical cyclone Anita (2010) and its potential for tropical transition over the South Atlantic Ocean. *Journal of Geophysical Research*, v. 118, n. 19, p. 10870-10883, 2013.
- GAN, M.A.; RAO, V.B. Energetics of the high frequency disturbances over South America. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 17, n. 1, p. 21-28, 1999.
- GAN, M.A.; PIVA, E.D. Energetics of a Southeastern Pacific cut-off low. *Atmospheric Science Letters*, v. 14, p. 272-280, 2013.
- GAN, M.A.; PIVA, E.D. Energetics of southeastern Pacific cut-off lows. *Climate Dynamics*, v. 46, p. 3453-3462, 2016.
- HOSKINS, B.J.; SIMMONS, A.J.; ANDREWS, D.G. Energy dispersion in a barotropic atmosphere. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 103, n. 438, p. 553-567, 1977.
- KLEINSCHMIDT Jr., E. Grundlagen einer Theorie des tropischen Zyklonen. *Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie. Serie A*, v. 4, n. 1, p. 53-72, 1951.
- KWON, Y.C.; FRANK W.M. Dynamic instabilities of simulated hurricane-like vortices and their impacts on the core structure of hurricanes. Part II: Moist experiments. *Journal of the Atmospheric Science*, v. 65, n. 11, p. 106-122, 2008.
- LIU, C.X.; WAN, Q.L.; LIAO, F.; ZHAO, Z.K. Surface observations in the tropical cyclone environment over the South China Sea. *Journal of Tropical Meteorology*, v. 18, n. 2, p. 263-274, 2012.
- LORENZ, E.N. *The Nature and Theory of the General Circulation of the Atmosphere*. World Meteorological Organization, Geneva, n. 218, TP. 115, p. 161, 1967.
- MALKUS, J.S.; RIEHL, H. On the dynamics and energy transformations in steady-state hurricanes. *Tellus*, v. 12, n. 1, p. 1-20, 1960.
- MILLER, B.I. On the maximum intensity of hurricanes. *Journal of Meteorology*, v. 15, n. 2, p. 184-195, 1958.
- MÜLLER, G.V.; GAN, M.A.; PIVA, E.D.; PICCININI, V.S. Energetics of wave propagation leading to cold event in tropical latitudes of South America. *Climate Dynamics*, v. 45, n. 1-2, p. 1-20, 2015.
- MÜLLER, G.V.; GAN, M.A.; PIVA, E.D. Energetics of wave propagation leading to frost events in South America:

- extratropical latitudes. **Atmospheric Science Letters**, v. 18, n. 8, p. 342-348, 2017.
- NIELSSEN-GAMMON, J.W. Dynamical conceptual models of upper-level mobile trough formation: Comparison and application. **Tellus**, v. 47A, n. 5, p. 705-721, 1995.
- ORLANSKI, I.; KATZFEY, J. The life cycle of a cyclone wave in the Southern Hemisphere. Part 1: Eddy energy budget. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 48, n. 17, p. 1972-1998, 1991.
- PETTERSSEN, S.; SMEBYE, S.J. On the development of extratropical cyclones. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 97, p. 457-482, 1971.
- PEZZA, A.B.; GARDE, L.A.; VEIGA, J.A.P.; SIMMONDS, I. Large scale features and energetics of the hybrid subtropical low 'Duck' over the Tasman Sea. **Climate Dynamics**, v. 42, n. 1-2, p. 453-466, 2014.
- PEZZA, A.B.; VEIGA, J.A.P.; SIMMONDS, I.; KEAY, K. Environmental energetics of an exceptional high-latitude storm. **Atmospheric Science Letters**, v. 11, n. 1, p. 39-45, 2010.
- PIVA, E.D. **Cavados em Médios Níveis no Hemisfério Sul: Climatologia, Energética e Ciclogênese em superfície**. Tese de Doutorado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2006.
- PIVA, E.; GAN, M.A.; RAO, V.B.: Energetics of Winter Troughs Entering South America. **Monthly Weather Review**, v. 138, n. 4, p. 1084-1103, 2010.
- RADINOVIC, D. On the development of orographic cyclones. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 112, n. 474, p. 927-951, 1986.
- REBOITA, M.S.; GAN, M.A.; DA ROCHA, R.P.; CUSTODIO, I.S. Ciclones em Superfície nas Latitudes Austrais: Parte II Estudo de Casos. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 4, p. 509-542, 2017.
- REBOITA, M.S.; DA ROCHA, R.P.; OLIVEIRA, D.M. Key features and adverse weather of the named subtropical cyclones over the Southwestern South Atlantic Ocean. **Atmosphere**, v. 10, n. 1, p. 1-21, 2019.
- ROSA, M.B. FERREIRA, N.J.; GAN, M.A.; MACHADO, L.H.R. Energetics of cyclogenesis events over the southern coast of Brazil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n. 3, p. 231-245, 2013.
- SHAPIRO, M.A.; KEYSER, D. Fronts, jet streams and the tropopause. Extratropical cyclones. NEWTON, C.W.; HOLOPAINEN, E.O. (eds.), **The Erik Palmén Memorial Volume**. American Meteorological Society, Boston, p. 167-191, 1990.
- VEIGA, J.; PEZZA, A.; SILVA DIAS, P.L. An analysis of the energetics on the transition of the first South Atlantic Hurricane. **Geophysical Research Letters**, v. 35, n. 35, L15806, 2008.

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