

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO  
CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE METEOROLOGIA

Victória da Costa Santos

**ESTUDO DA CONTRIBUIÇÃO DAS VORTICIDADES EM CICLONES DE ALTAS  
LATITUDES**

Rio de Janeiro

2023

ESTUDO DA CONTRIBUIÇÃO DAS VORTICIDADES EM CICLONES DE ALTAS  
LATITUDES

Victória da Costa Santos

Monografia submetida ao corpo docente do Departamento de Meteorologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro como parte dos requisitos necessários à obtenção de grau de Bacharel em Meteorologia.

Aprovada por:

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Ana Cristina Pinto de Almeida Palmeira

---

Prof<sup>o</sup>. Dr. Wallace Figueiredo Menezes

---

Prof<sup>o</sup>. Dr. Fabrício Polifke da Silva

---

Prof<sup>o</sup>. Dr. Wanderson Luiz Silva

---

M.Sc. Rodrigo de Souza Barreto Mathias

Victória da Costa Santos

**ESTUDO DA CONTRIBUIÇÃO DAS VORTICIDADES EM CICLONES DE ALTAS  
LATITUDES**

Monografia apresentada ao Departamento de Meteorologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de bacharel em Meteorologia.

Orientadores: Prof<sup>a</sup>. Dr. Ana Cristina Pinto de Almeida Palmeira e Prof. Dr. Wallace Figueiredo Menezes.

Rio de Janeiro

2023

Meus agradecimentos vão para:

Meus pais, por todo apoio e incentivo nos estudos e na vida.

A professora Ana Cristina, minha orientadora, por ter me apresentado aos ciclones antárticos, área que passei a amar e pela qual sempre terei um carinho.

O professor Wallace Menezes, meu coorientador, por todo conhecimento que me passou durante as aulas e durante a iniciação científica.

Ao pessoal do Laboratório de Meteorologia Dinâmica e Sinótica (LADSIN/UFRJ), onde cada um teve sua contribuição para este trabalho e também se tornaram a família que eu não sabia que precisava.

Aos amigos que fiz durante a graduação e tornaram a faculdade mais leve.

Aos professores do departamento por todo conhecimento que me foi passado.

## RESUMO

A fim de entender o papel e comportamento das vorticidades no ciclo de vida de sistemas ciclônicos em altas latitudes, este trabalho teve como objetivo estudar ciclones antárticos com trajetórias para oeste ocorridos no ano de 2021, através de análises da conservação da vorticidade potencial. A partir dos produtos da reanálise ERA5 e utilizando-se rotinas em GrADS, foram gerados diagramas de evolução de fase e obtidos os valores mínimos de pressão, assim como sua localização, para então obter os valores mínimos das vorticidades e de suas advecções para baixos, médios e altos níveis da troposfera. Os resultados mostraram a influência da advecção de vorticidade absoluta em níveis médios no desenvolvimento desses sistemas. A advecção de vorticidade relativa teve um papel maior na evolução temporal da pressão em superfície e na vorticidade relativa em baixos níveis, enquanto que a advecção de vorticidade planetária teve influência nos períodos estacionários e de deslocamento retrógrado. A existência de anomalias de vorticidade potencial ao longo da troposfera, mais intensas nos baixos níveis, presentes na região dos ciclones, assim como a evolução da vorticidade relativa em níveis médios e altos também serviram como fator de sustentação para esses ciclones.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Região Antártica (fonte: Marinha do Brasil).....	13
Figura 2. Média zonal da densidade de sistemas ciclônicos para o verão, outono, inverno e primavera. As unidades são $10 - 3$ ciclones <i>graus latitude - 2</i> . (fonte: Jones & Simmonds, 1993) .....	14
Figura 3. O ciclo de vida de um ciclone extratropical para o hemisfério norte. (Fonte: Bjerknes e Solberg, 1922).....	15
Figura 4. O ciclo de vida de um ciclone frontal extratropical marinho para o hemisfério norte: (I) ciclone frontal incipiente; (II) fratura frontal; (III) frente quente dobrada para trás e uma estrutura-T frontal; (IV) seclusão frontal de núcleo quente. Primeira: pressão a nível médio do mar, em linhas sólidas; frentes, linhas em negrito; área com nuvens, em sombreado. Segunda: temperatura, linhas sólidas; correntes de ar frio e quente; flechas sólida e tracejada, respectivamente. (fonte: Shapiro e Keyser, 1990).....	17
Figura 5. Vista em corte da estrutura de um ciclone tropical. O topo da tempestade é baseado em uma fotografia de satélite da estrutura de nuvens do furacão Fran de 1996. O corte da direita mostra a componente vertical da velocidade, a partir de uma simulação numérica de um furacão usando o modelo de Emanuel (1995a); os valores máximos (amarelo) são aproximadamente $8 \text{ m s}^{-1}$ . O corte da esquerda mostra a magnitude da componente tangencial do vento medido no furacão Inez de 1966 por aeronaves voando em níveis indicados pelas linhas pretas tracejadas; de Hawkins & Imbêmbô (1976). Os valores máximos são aproximadamente $50 \text{ m s}^{-1}$ (fonte: Emanuel, 2003).....	18
Figura 6. Resumo das localizações gerais de vários tipos de ciclones dentro do espaço de fase proposto: (a) -VTL vs B e (b) -VTL vs -VTU . Enquanto os ciclones podem se mover ao longo do espaço de fase durante sua evolução, a localização plotada é a mais representativa ou única do tipo de ciclone (fonte: adaptado de Hart, 2003). .....	20
Figura 7. Campo de vorticidade de perturbação e campo de velocidade induzido (setas tracejadas) para uma cadeia deslocada meridionalmente de parcelas de fluido. A linha ondulada grossa mostra a posição original da perturbação; linha de luz mostra o deslocamento para oeste do padrão devido à advecção pela velocidade induzida. (fonte: Holton, 2004) .....	24
Figura 8. Esquema de anomalia de VP e tropopausa dinâmica para o Hemisfério Sul. As setas indicam movimentos descendentes e ascendentes e a seta cinza indica a circulação ciclônica (fonte: adaptado de Crespo, 2019). .....	26
Figura 9. Interface do site <a href="http://moe.met.fsu.edu">http://moe.met.fsu.edu</a> , onde os ciclones eram escolhidos. As bolinhas pretas indicam ciclones existentes, enquanto que as vermelhas são gêneses previstas. ....	28
Figura 10. Diagramas de evolução de fase do ciclone com gênese às 12 UTC do dia 07 de setembro de 2021, com base no GFS.....	31
Figura 11. Diagramas de evolução de fase do ciclone com gênese às 12 UTC do dia 07 de setembro de 2021, com base na ERA5.....	32
Figura 12. Gráficos de (a) pressão (linha verde) x vorticidade relativa em 1000 hPa (linha ciano) e (b) pressão x advecção de vorticidade relativa em 500 hPa (linha azul) do ciclone do dia 07. ....	33

Figura 13. Gráficos de (a) pressão (linha verde) x vorticidade planetária (linha roxa) e (b) pressão x advecção de vorticidade planetária em 500 hPa (linha azul) do ciclone do dia 07.....	35
Figura 14. (a) Gráfico de pressão (linha verde) x vorticidade potencial em 1000 hPa (linha contínua) x vorticidade potencial em 500 hPa (linha mista) x vorticidade potencial em 300 hPa (linha pontilhada); (b) Gráfico de pressão (linha verde) x vorticidade relativa em 1000 hPa (linha contínua) x vorticidade relativa em 500 hPa (linha mista) x vorticidade relativa em 300 hPa (linha pontilhada) do ciclone do dia 07. ....	37
Figura 17. Gráficos de (a) pressão (linha verde) x vorticidade relativa em 1000 hPa (linha ciano) e (b) pressão x advecção de vorticidade relativa em 500 hPa (linha azul) do ciclone do dia 01.....	41
Figura 18. Gráficos de (a) pressão (linha verde) x vorticidade planetária (linha lilás) e (b) pressão x advecção de vorticidade relativa em 500 hPa (linha azul) do ciclone do dia 01. ....	43
Figura 19. (a) Gráfico de pressão (linha verde) x vorticidade potencial em 1000 hPa (linha contínua) x vorticidade potencial em 500 hPa (linha mista) x vorticidade potencial em 300 hPa (linha pontilhada); (b) Gráfico de pressão (linha verde) x vorticidade relativa em 1000 hPa (linha contínua) x vorticidade relativa em 500 hPa (linha mista) x vorticidade relativa em 300 hPa (linha pontilhada) do ciclone do dia 01. ....	44
Figura 22. Gráficos de (a) pressão (linha verde) x vorticidade relativa em 1000 hPa (linha ciano) e (b) pressão x advecção de vorticidade relativa em 500 hPa (linha azul) do ciclone do dia 10.....	48
Figura 23. Gráficos de (a) pressão (linha verde) x vorticidade planetária (linha roxa) e (b) pressão x advecção de vorticidade relativa em 500 hPa (linha azul) do ciclone do dia 10. ....	50
Figura 24. (a) Gráfico de pressão (linha verde) x vorticidade potencial em 1000 hPa (linha contínua) x vorticidade potencial em 500 hPa (linha mista) x vorticidade potencial em 300 hPa (linha pontilhada); (b) Gráfico de pressão (linha verde) x vorticidade relativa em 1000 hPa (linha contínua) x vorticidade relativa em 500 hPa (linha mista) x vorticidade relativa em 300 hPa (linha pontilhada) do ciclone do dia 10. ....	51

## LISTA DE SIGLAS

AVP	Anomalia de vorticidade potencial
ECMWF	<i>European Centre for Medium-Range Weather Forecasts</i>
GFS	<i>Global Forecast System</i>
GrADS	<i>Grid Analysis and Display System</i>
HS	Hemisfério Sul
LADSIN	Laboratório de Meteorologia Dinâmica e Sinótica
PNMM	Pressão a nível médio do mar
VP	Vorticidade Potencial
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
UTC	<i>Universal Time Coordinated</i>
UVP	Unidades de vorticidade potencial



## SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO</b> .....	10
<b>CAPÍTULO 2 - REGIÃO ANTÁRTICA</b> .....	12
<b>CAPÍTULO 3 - CONCEITOS FÍSICOS</b> .....	15
3.1    Ciclones .....	15
3.2    Vorticidade .....	21
3.3    Ondas de Rossby.....	23
3.4    Desenvolvimento de ciclones.....	25
<b>CAPÍTULO 4 - DADOS E METODOLOGIA</b> .....	27
4.1    Produtos de Reanálise .....	27
4.2    Métodos.....	28
<b>CAPÍTULO 5 - RESULTADOS</b> .....	30
5.1    Ciclone 07/09/2021 .....	30
5.2    Ciclone 01/11/2021 .....	38
5.3    Ciclone 10/12/2021 .....	45
<b>CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES</b> .....	52
<b>Sugestões para trabalhos futuros</b> .....	54
<b>CAPÍTULO 7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	55

## CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

Ciclones, segundo a definição formal do glossário da *American Meteorological Society*, são sistemas meteorológicos onde os ventos giram ao redor de um centro de baixa pressão, em relação aos seus arredores, possuindo giro horário no Hemisfério Sul e anti-horário no Hemisfério Norte, estando associados com tempo instável.

Das várias formas de estudar ciclones, existem pesquisas com padrões qualitativos (tipos e formas), quantitativos (médias e anomalias), regionalizações, intensidades, deslocamentos, etc, mas pouco se tem discutido sobre as contribuições relacionadas à vortacidade (tanto ao rotacional do vento em si como a sua advecção). Trabalhos anteriores geralmente focam em ciclones tropicais, como Wu & Wang (2000) e Chan et al. (2002), que mostraram a relação entre o movimento desses sistemas e a tendência da vortacidade potencial, deixando em aberto outros tipos de ciclones, assim como as vorticidades durante o ciclo de vida desses sistemas, principalmente para a região polar sul.

Desta forma, este trabalho tem como objetivo analisar o ciclo de vida de alguns sistemas ciclônicos na Região Antártica, a partir de uma perspectiva dinâmica, especialmente em sistemas que retrocederam na sua trajetória. Os objetivos específicos são:

- Mostrar que alguns ciclones com trajetórias para oeste são relativamente comuns na região Antártica.
- Mostrar que ciclones de latitudes polares também mudam de fase.
- Encontrar ciclones na região da Península Antártica através das simulações numéricas do GFS, por análise do Diagrama de Fase de Hart (2003).
- Comparar os ciclones selecionados através do Diagrama de Fase, usando a reanálise ERA5, para posterior utilização dessa reanálise nos campos atmosféricos.
- Aplicar a Teoria de Sutcliffe para verificar a importância da advecção da vortacidade (termo dinâmico) nos ciclones antárticos.
- Aplicar a teoria de conservação da vortacidade potencial no estudo dos ciclones com deslocamento para oeste.

No capítulo seguinte, será tratada a Região Antártica. No Capítulo 3, serão abordados os conceitos físicos. No Capítulo 4 será destinada a exposição dos dados e a metodologia empregados. O Capítulo 5 contém os resultados, enquanto no

Capítulo 6 encontram-se as conclusões e, enfim, o Capítulo 7 apresenta as Referências Bibliográficas.

## **CAPÍTULO 2 - REGIÃO ANTÁRTICA**

A região Antártica (Figura 1) corresponde a área compreendida ao Sul de 60° S, e nela estão inclusas o continente coberto de gelo, algumas ilhas e grande parte do Oceano Antártico. Ao contrário da região oceânica Ártica, o gelo marinho que circunda a Antártica não é limitado por regiões de terra adjacentes e possui uma variação interanual na sua extensão que influencia a circulação atmosférica no Hemisfério Sul (King e Turner, 1955).

A camada de gelo na Antártica é dividida em três zonas: a Antártica Oriental, ou Grande Antártica, que consiste na maior das três e é dominada pelo planalto antártico e por cordilheiras formadas pela erosão eólica, todos cobertos de neve. A Antártica Ocidental, ou Antártica Pequena, que possui montanhas que atingem o tamanho do planalto antártico e é separada de sua contraparte maior pelas Montanhas Transantárticas. A Península Antártica, que é uma barreira montanhosa consideravelmente alta a ponto de afetar significativamente a circulação atmosférica, ocasionando em condições climáticas bem destoantes entre os mares de Bellingshausen e Weddell.

Na escala sinótica, ciclones e anticiclones são os principais sistemas que ocorrem tanto na região costeira do continente quanto no oceano. Jones e Simmonds (1993) produziram uma climatologia de ciclones para o Hemisfério Sul e encontraram um núcleo de densidade de ciclones nas altas latitudes, mais especificamente na região circumpolar (Figura 2), sendo esta região onde ocorrem os sistemas mais intensos e com trajetória predominante para leste/leste-sudeste.

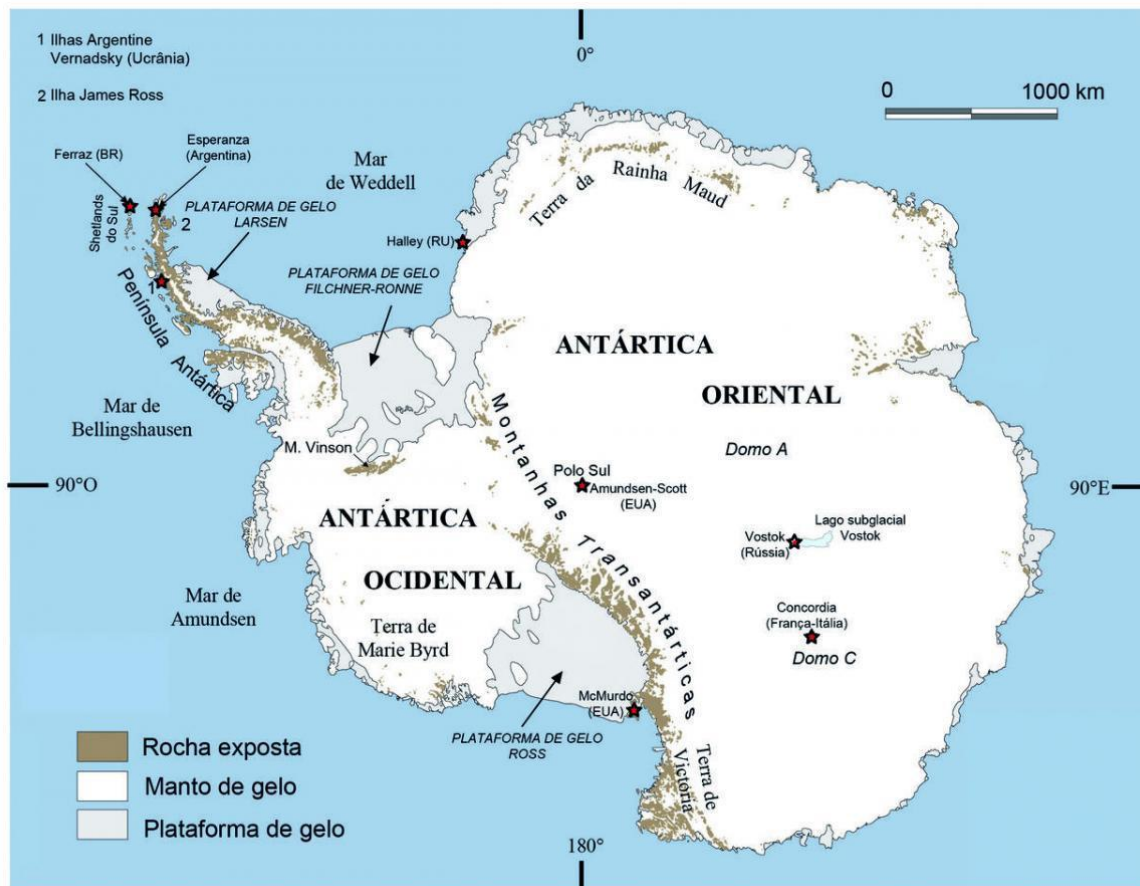


Figura 1. Região Antártica (fonte: Marinha do Brasil)

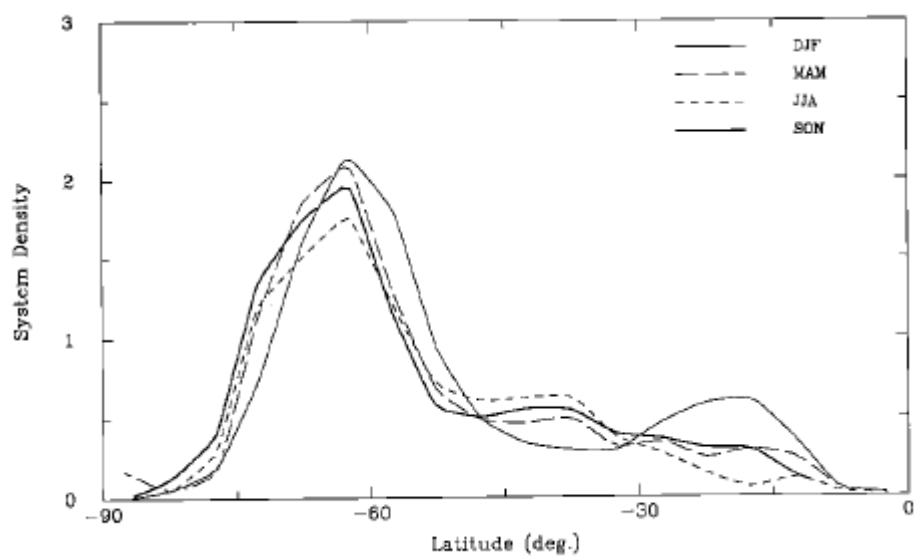


Figura 2. Média zonal da densidade de sistemas ciclônicos para o verão, outono, inverno e primavera. As unidades são  $10^{-3}$  ciclones  $(\text{graus latitude})^{-2}$ . (fonte: Jones & Simmonds, 1993)

## CAPÍTULO 3 - CONCEITOS FÍSICOS

### 3.1 Ciclones

O primeiro modelo idealizado de um ciclone foi criado por Bjerknes e Solberg (1922) [Figura 2] sendo conhecido como modelo norueguês. Ele descreve o surgimento de um ciclone extratropical a partir do encontro de parte do escoamento de duas massas de ar diferentes, uma fria de leste e outra quente de oeste, isso para o Hemisfério Norte. A zona frontal, que é a camada que separa as duas massas de ar, se inclina em direção ao ar frio e através dela o ar quente é levantado, ao longo da troposfera. Este ciclone então seguirá as correntes de ar quente em direção a leste num padrão de onda. No estágio maduro, também chamado de oclusão, o ciclone se transforma em um vórtice barotrópico de ar frio homogêneo, após o ar quente ter sido todo resfriado.

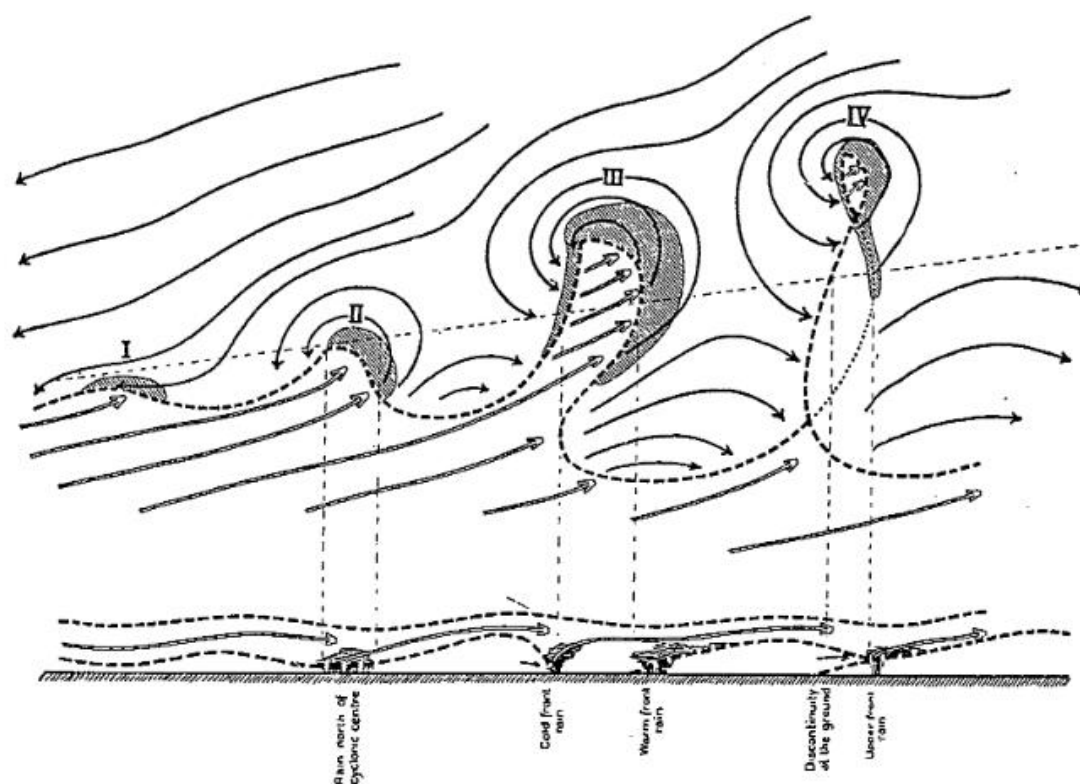


Figura 3. O ciclo de vida de um ciclone extratropical para o hemisfério norte. (Fonte: Bjerknes e Solberg, 1922)

Com o passar dos anos, avanços tecnológicos em Meteorologia Observacional, como balões meteorológicos e redes de radiossondagem, e na modelagem numérica surgiram e novos estudos meteorológicos (e.g., Edelmann, 1963; Eliassen e Raustein, 1968; Mudrick, 1964, apud Shapiro & Keyser, 1990) descobriram configurações de sistemas frontais que diferiam consideravelmente do conhecido modelo norueguês. Shapiro e Keyser (1990) produziram então um novo modelo conceitual de um ciclone extratropical marítimo intenso com seclusão. Este novo modelo, mostrado na Figura 3, destoava do modelo norueguês a partir do 2º estágio do ciclo de vida, onde apresenta um enfraquecimento do ar polar do ramo frio perto do ar quente, chamado de fratura; na 3º fase há formação de uma estrutura em T que se forma entre as frentes; e o estágio 4 que apresenta a seclusão quente no estado maduro do ciclone, em que há ar quente cercado por ar frio no centro da baixa pressão.



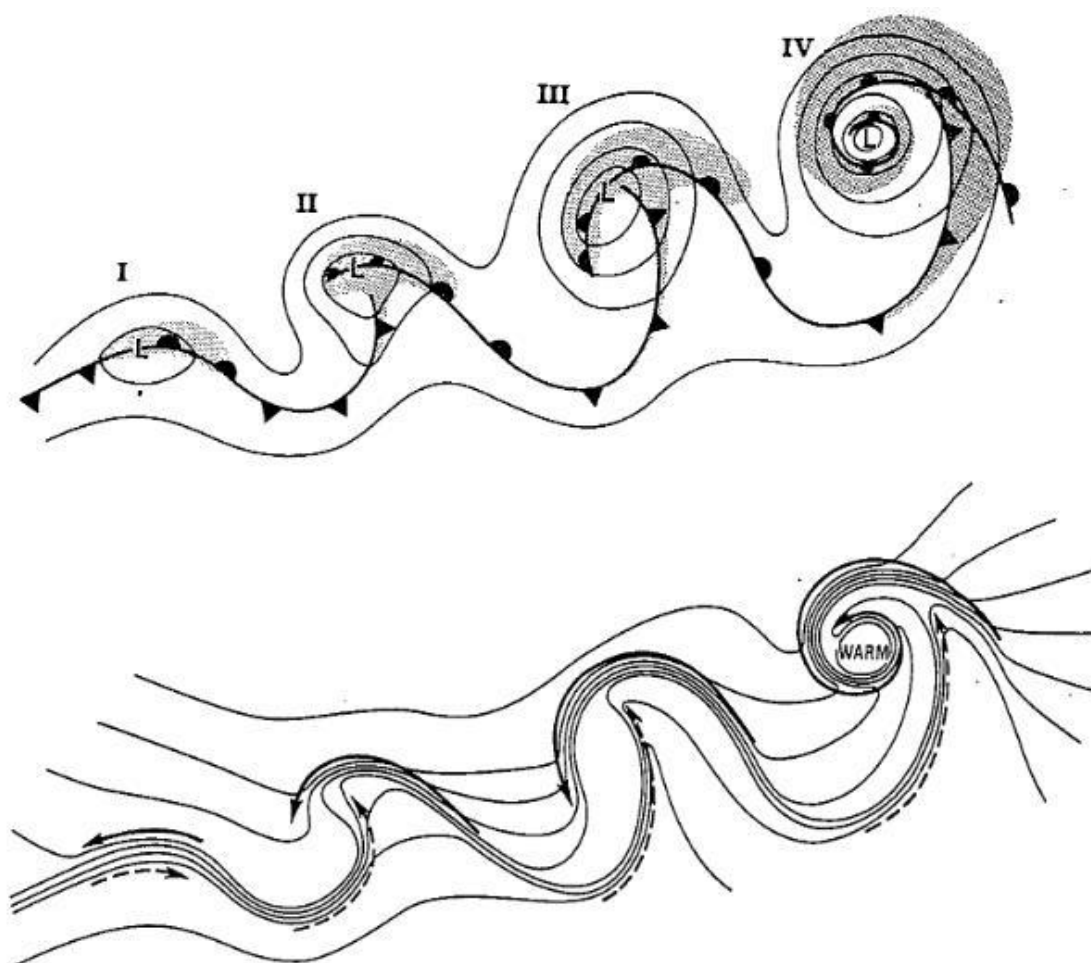


Figura 4. O ciclo de vida de um ciclone frontal extratropical marinho para o hemisfério norte: (I) ciclone frontal incipiente; (II) fratura frontal; (III) frente quente dobrada para trás e uma estrutura-T frontal; (IV) seclusão frontal de núcleo quente. Primeira: pressão a nível médio do mar, em linhas sólidas; frentes, linhas em negrito; área com nuvens, em sombreado. Segunda: temperatura, linhas sólidas; correntes de ar frio e quente; flechas sólida e tracejada, respectivamente. (fonte: Shapiro e Keyser, 1990)

Outro tipo de ciclone existente são os ciclones tropicais, sendo os furacões um dos estágios do desenvolvimento desses sistemas. Eles não possuem caráter frontal; evoluem a partir de uma depressão tropical após esta adquirir um núcleo simétrico e quente e são amplificados pela convergência de umidade e a liberação de calor latente que ocorre em seus centros (Charney e Eliassen, 1964). Na Figura 4 é mostrado um corte de um ciclone tropical com imagem de satélite; nela é possível ver o olho do

furacão, que é a região no centro de ciclones tropicais bem desenvolvidos onde o movimento vertical descende a uma velocidade entre 5 e 10  $\text{m s}^{-1}$ , possuindo poucas ou nenhuma nuvem (Emanuel, 2003). O olho é cercado por extensas paredes de cumulonimbus, com comprimento de 20 - 50 km a partir do olho, e velocidades ascendente entre 5 e 10  $\text{m s}^{-1}$ , atingindo o máximo em altos níveis da troposfera (Jorgensen et al. 1985).

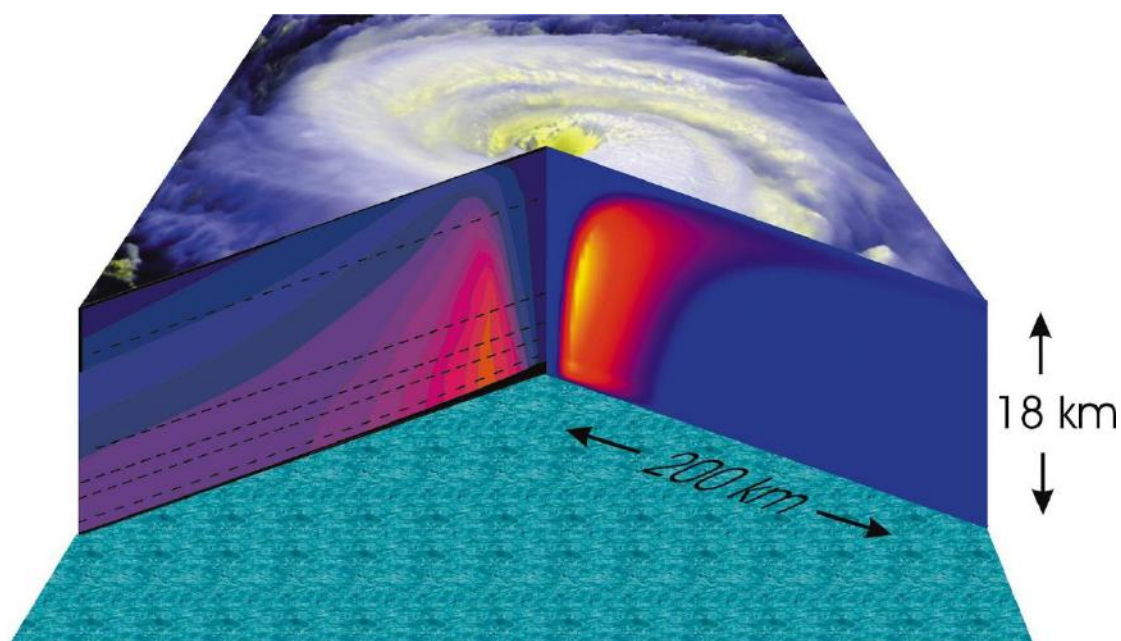


Figura 5. Vista em corte da estrutura de um ciclone tropical. O topo da tempestade é baseado em uma fotografia de satélite da estrutura de nuvens do furacão Fran de 1996. O corte da direita mostra a componente vertical da velocidade, a partir de uma simulação numérica de um furacão usando o modelo de Emanuel (1995a); os valores máximos (amarelo) são aproximadamente  $8 \text{ m s}^{-1}$ . O corte da esquerda mostra a magnitude da componente tangencial do vento medido no furacão Inez de 1966 por aeronaves voando em níveis indicados pelas linhas pretas tracejadas; de Hawkins & Imbêbo (1976). Os valores máximos são aproximadamente  $50 \text{ m s}^{-1}$  (fonte: Emanuel, 2003).

Entre os dois ciclones que são bem conhecidos citados anteriormente existiam outros pouco conhecidos, com fases híbridas em seu ciclo de vida ou que apresentavam características tanto dos tropicais quanto dos extratropicais; estes

ciclones, chamados de ciclones subtropicais, foram descobertos e estudados através de imagens de satélite (Hebert e Poteat, 1975). Em sua estrutura há um núcleo simétrico e quente em baixos níveis como os tropicais, com uma estrutura de ventos máximos semelhante aos extratropicais (Hart, 2003).

Hart (2003) propôs então a criação de um espaço tridimensional de fase para diagnosticar a evolução de fase de todos os ciclones pertencentes à escala sinótica a partir da avaliação de suas estruturas térmicas. Esse diagrama, mostrado na Figura 5, requer o uso de três parâmetros:

- “B” - simetria térmica do sistema: define o núcleo do ciclone como sendo assimétrico/frontal ou simétrico/não frontal, levando em consideração a espessura do núcleo entre os níveis de 900 e 600 hPa e um raio de 500 km;
- “-VTL ” - vento térmico entre 900 e 600 hPa: determina a característica térmica (frio ou quente) do sistema em baixos níveis através da magnitude do vento térmico.
- “-VTU ” - vento térmico entre 600 e 300 hPa: o mesmo que o parâmetro anterior, mas para os altos níveis.

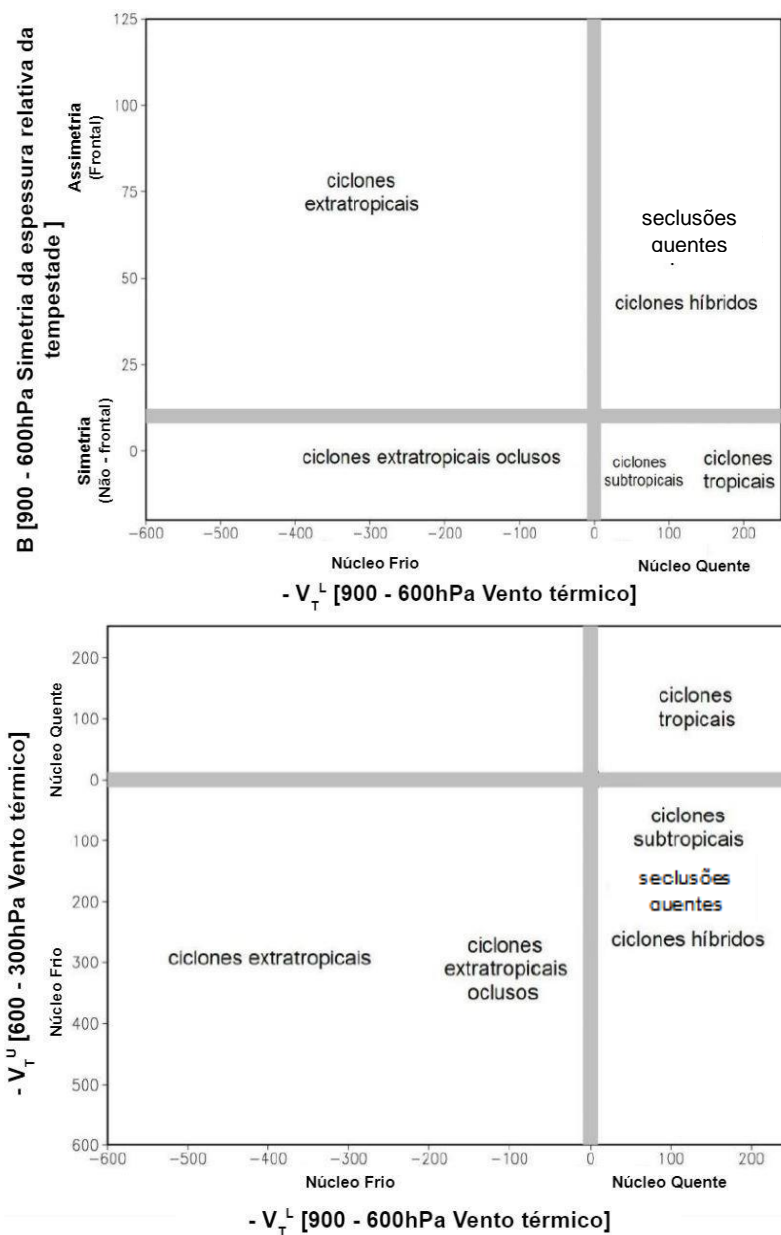


Figura 6. Resumo das localizações gerais de vários tipos de ciclones dentro do espaço de fase proposto: (a)  $-V_T^L$  vs  $B$  e (b)  $-V_T^L$  vs  $-V_T^U$ . Enquanto os ciclones podem se mover ao longo do espaço de fase durante sua evolução, a localização plotada é a mais representativa ou única do tipo de ciclone (fonte: adaptado de Hart, 2003).

### 3.2 Vorticidade

A vorticidade é um campo vetorial representado pela ondulação da velocidade e também a medida microscópica da rotação de um fluido (Holton, 2004). Se tratando da atmosfera a vorticidade é a tendência do cisalhamento do vento, gerando assim a rotação. A vorticidade relativa é designada como  $\zeta$  (zeta) =  $\vec{\nabla} \times \vec{V}$ , onde  $\vec{V}$  é a velocidade do vento; a vorticidade planetária, conhecida como  $f$ , sendo essa a componente vertical local da vorticidade da Terra devido à sua rotação, equacionada por  $f = 2\Omega \sin(\varphi)$ , onde  $\Omega$  é a velocidade de rotação da terra ( $7,2921 \times 10^{-5}$  rad/s) e  $\varphi$  a latitude; e da vorticidade absoluta, designada como  $\eta = \text{zeta} + f$ . Para a dinâmica de escala sinótica e planetária, apenas as componentes verticais de zeta e de  $\eta$  são importantes. A vorticidade relativa possui grande importância em análises meteorológicas devido ao fato de, no Hemisfério Sul (HS), valores negativos estarem ligados às tempestades ciclônicas e a movimentos ascendentes do ar. Sinclair (1997) mostrou a importância da utilização da vorticidade máxima (em módulo, pois no HS ela é negativa) ao invés da pressão mínima na identificação de ciclones em métodos automatizados, pois a pressão era enviesada em sistemas de altas latitudes (maiores que  $60^\circ\text{S}$ , por exemplo).

A vorticidade potencial (VP), consiste no produto da vorticidade absoluta ( $\zeta_\theta + f$ ) numa superfície isentrópica (onde a temperatura potencial é constante) com a estabilidade estática ( $\partial\theta/\partial p$ ). Ela também pode ser descrita em forma isobárica, sendo  $(f \mathbf{k} + \nabla_p \times \mathbf{V}_h)$  a vorticidade absoluta em coordenadas isobáricas e  $\nabla_p \theta$  é o gradiente de temperatura potencial considerando o cisalhamento vertical do vento. Mais simples, VP sempre é a razão entre a vorticidade absoluta e a profundidade efetiva do vórtice. Essa profundidade  $h$  é a distância diferencial entre as camadas de temperatura potencial medidas em unidades de pressão ( $-\partial\theta/\partial p$ ) (Holton, 2004), que pode ser dada por:

$$VP = -g(\zeta_\theta + f) \left( \frac{\partial\theta}{\partial p} \right) \text{ (forma isentrópica)}$$

$$VP = -g(f \mathbf{k} + \nabla_p \times \mathbf{V}_h) \cdot \nabla_p \theta \text{ (forma isobárica)}$$

$$VP = (\zeta + f) / h = \eta / h$$

onde os termos podem variar ao longo de um deslocamento adiabático e sem atrito para que ocorra sua conservação.

### 3.3 Ondas de Rossby

A onda de Rossby (Figura 7), ou onda planetária, é um movimento zonal em que há conservação da vorticidade absoluta (Holton, 2004). Ondas de Rossby podem ocorrer tanto na atmosfera quanto no oceano. Na atmosfera ela ocorre em médios níveis da troposfera, sendo gerada pela variação do parâmetro de Coriolis/vorticidade planetária  $f$ , com a latitude. Numa atmosfera baroclínica, ela deve sua existência ao gradiente isentrópico de vorticidade potencial. Ondas baroclínicas, que atuam nas mudanças do tempo, são ondas de Rossby. Ao contrário do fluxo zonal médio da atmosfera, que faz os sistemas meteorológicos seguirem em direção a leste, seu movimento é em direção a oeste e tende a fazer os sistemas retrocederem, que é de acordo com o fato de a advecção de vorticidade planetária em 500 hPa tender a fazer os padrões de onda irem para oeste, movimento esse conhecido como movimento retrógrado. Fenômenos ligados a ondas curtas ( $L < 3000$  km) tendem a seguir a advecção de vorticidade relativa e o fluxo zonal médio para leste, enquanto que ondas longas ( $L > 10000$  km) tendem a ir para oeste, seguindo a advecção de vorticidade planetária e a onda de Rossby. Em fenômenos ligados a ondas intermediárias, pode acontecer da velocidade das ondas de Rossby entrarem em balanço com o fluxo zonal médio, fazendo os sistemas estacionarem ou se moverem mais lentamente.

$$c = \bar{u} - \frac{\beta}{K^2}$$

Onde:

$c$  = velocidade zonal de fase da onda de Rossby

$\bar{u}$  = velocidade do fluxo zonal médio

$\beta$  = parâmetro beta ( $df/dy$ )

$K^2$  = quadrado do número de onda horizontal total

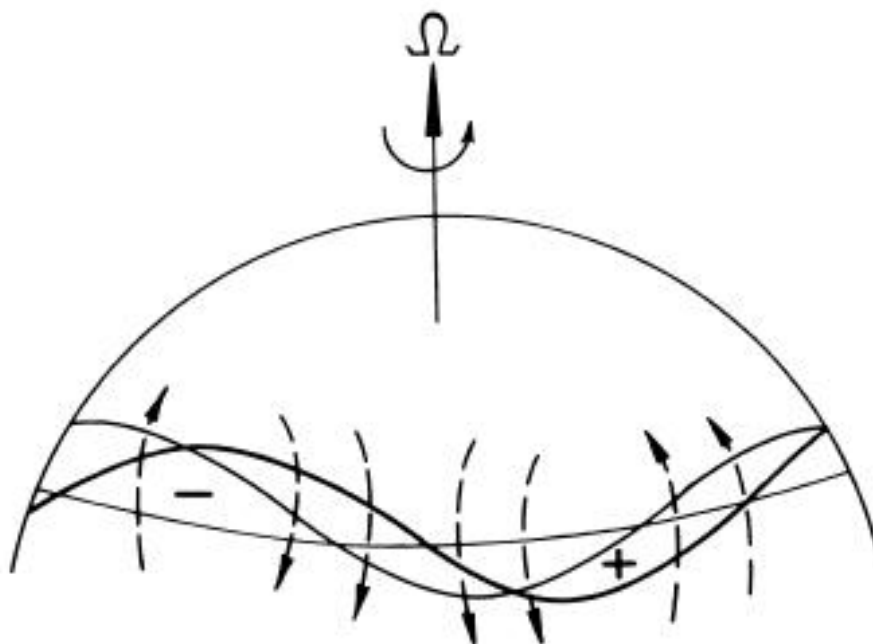


Figura 7. Campo de vorticidade de perturbação e campo de velocidade induzido (setas tracejadas) para uma cadeia deslocada meridionalmente de parcelas de fluido. A linha ondulada grossa mostra a posição original da perturbação; linha de luz mostra o deslocamento para oeste do padrão devido à advecção pela velocidade induzida. (fonte: Holton, 2004)



### 3.4 Desenvolvimento de ciclones

Sutcliffe (1947) desenvolveu uma equação, conhecida como equação do desenvolvimento de Sutcliffe, para descrever a evolução dos sistemas meteorológicos de latitudes médias. Essa equação, feita com base na teoria quase-geostrófica, foi aprimorada por Pettersen (1956, apud Marrafon & Reboita, 2019) para sua versão atual e mais conhecida

$$\frac{\partial Q_0}{\partial t} = -(\vec{V} \cdot \nabla \vec{Q})_p - \frac{R}{f} \nabla_p^2 \int_p^{p_0} (A_T + S + H) d \ln p$$

(1)                      (2)                      (3)    (4)    (5)

onde:

- (1) = tendência da vorticidade absoluta em 1000 hPa
- (2) = advecção horizontal de vorticidade absoluta em 500 hPa
- (3) = advecção de espessura/temperatura
- (4) = termo relacionado ao movimento vertical/estabilidade estática
- (5) = taxa de aquecimento/resfriamento diabático

O termo (2) é responsável pela gênese dos ciclones, além de também controlar o deslocamento desses fenômenos em superfície (Kousky & Elias, 1982). A advecção de vorticidade planetária é bem menor comparada com a de vorticidade relativa, entretanto, a advecção de zeta tende a mover os padrões de onda e vorticidade para leste, enquanto que a advecção de  $f$  tende a mover para oeste.

É importante ressaltar que Lupo *et al.* (1992) atualizaram a equação de Sutcliffe, inserindo um maior detalhamento na equação, mas ela não é foco deste trabalho, assim como os três últimos termos da equação anterior.

A distribuição de VP está ligada às mudanças do campo de vorticidade relativa, sendo esta dependente dos campos de vento. Sendo  $f$  ligado ao seno da latitude e  $-\left(\frac{\partial \theta}{\partial p}\right)$  o gradiente vertical da temperatura potencial, logo VP é maior nos altos níveis da troposfera e em altas latitudes (Pang et al., 2022). Valores maiores, em módulo (pois VP é negativa no HS), que 1,5 UVP (unidades de vorticidade potencial =  $10^{-6} m^2 s^{-1} K Kg^{-1}$ ) são chamados de anomalias de vorticidade potencial.

As anomalias de VP (AVP) em altos níveis da troposfera são transportadas para médios níveis, criando movimento subsidente a oeste e ascendente a leste da anomalia, mostrada na Figura 6, sendo o setor leste a região favorável à ciclogênese (Hirschberg e Fritsch, 1991). Para latitudes médias, tem-se que um ciclone possui o aquecimento diabático máximo nos níveis médios da troposfera (Martin, 2006, apud Crespo 2019); devido a isso, é gerada VP nos baixos níveis da troposfera e a

dissipação de VP nos níveis mais altos (Wernli e Davies, 1997). Essa nova anomalia de VP, criada em baixos níveis devido ao calor latente, é menos intensa que as de níveis superiores e possui circulação ciclônica, podendo intensificar o ciclone na superfície.

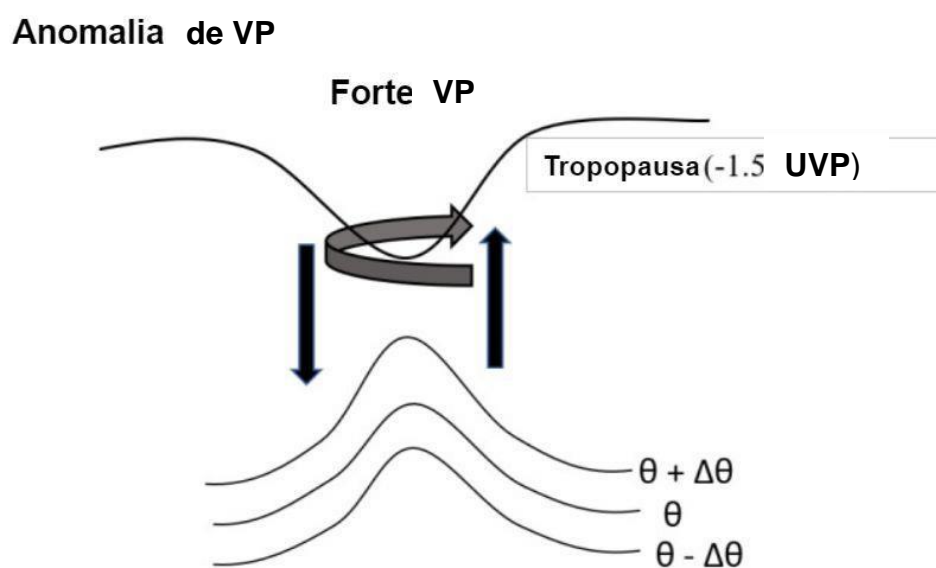


Figura 8. Esquema de anomalia de VP e tropopausa dinâmica para o Hemisfério Sul. As setas indicam movimentos descendentes e ascendentes e a seta cinza indica a circulação ciclônica (fonte: adaptado de Crespo, 2019).

Crespo (2015), estudando a influência da estratosfera na ciclogênese sobre a América do Sul, mostrou que ciclones associados às anomalias de VP em 300 hPa tinham maior durabilidade, maior deslocamento e menor pressão comparados aos não associados. Pang *et al.* (2022), estudando um ciclone extratropical explosivo na região leste asiática a partir da vorticidade potencial mostrou que havia uma “torre de VP”, que é quando valores altos de VP se alinham ao longo da troposfera (Martin e Otkin, 2004), podendo reforçar o giro do vento, logo intensifica o sistema, através do desenvolvimento de circulação ciclônica através da troposfera.

## **CAPÍTULO 4 - DADOS E METODOLOGIA**

### **4.1 Produtos de Reanálise**

Foram utilizados os produtos de pressão ao nível médio do mar (PNMM), vorticidade relativa, vorticidade potencial e componentes meridional e zonal do vento, para os níveis entre 1000 e 200 hPa da reanálise ERA5, que consiste na reanálise mais atual do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)*, que possui resolução temporal horária, resolução espacial de  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ , resolução horizontal de 31 km e 137 níveis abrangendo a superfície da Terra a 0,01 hPa. Essas características a tornam a reanálise mais refinada das reanálises globais anteriores, como a ERA-Interim (Hersbach et al.,2020).

## 4.2 Métodos

Os ciclones estudados foram escolhidos devido a serem sistemas antárticos (> 60° S), ou que passaram a ser em algum momento de sua vida, e cujo movimento passou a ser em direção a oeste. De oito casos encontrados, três foram escolhidos para serem apresentados. Eles foram localizados através dos diagramas de evolução de fase criados a partir dos produtos do *Global Forecast System* (GFS) 0,5, modelo de previsão global pertencente ao *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP), disponibilizados em <http://moe.met.fsu.edu>, mostrado na Figura 9, onde também são disponibilizados scripts em *Grid Analysis and Display System* (GrADS). O GFS possui 127 níveis, resolução temporal de 6 em 6 horas, resolução horizontal de 28 km e resolução espacial de 0,5° x 0,5°. Os diagramas utilizados neste trabalho foram gerados através desses scripts, mas com a ERA5. Esses scripts foram adaptados para a nova base de reanálises e estão disponíveis no Laboratório de Meteorologia Dinâmica e Sinótica (LADSIN/UFRJ). Com isso, também foi possível observar a diferença entre as evoluções de fase dos ciclones entre os diagramas do GFS e o da ERA5.

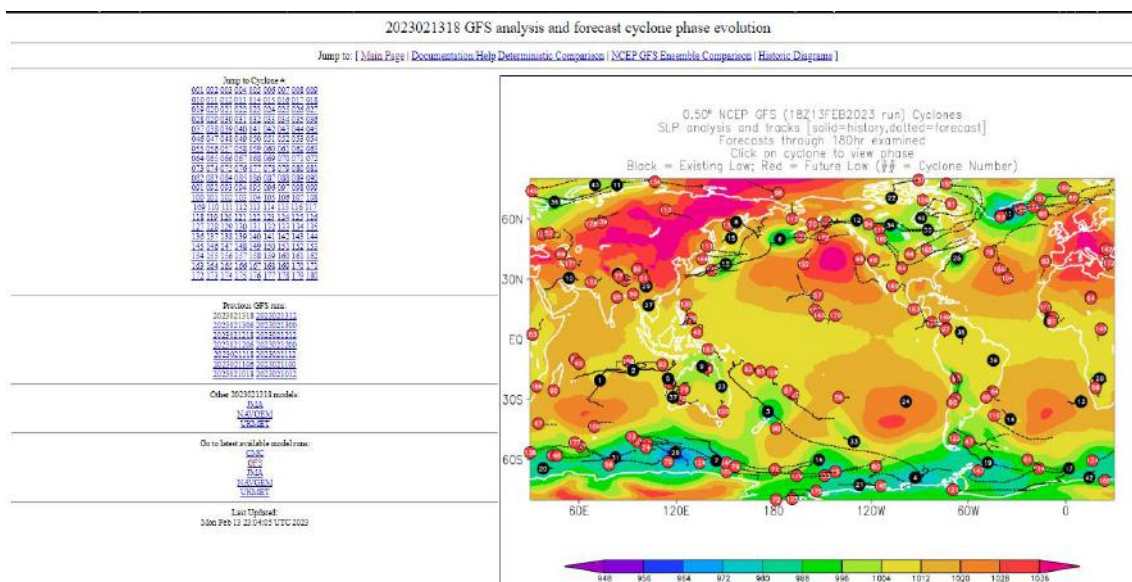


Figura 9. Interface do site <http://moe.met.fsu.edu>, onde os ciclones eram escolhidos. As bolinhas pretas indicam ciclones existentes, enquanto que as vermelhas são gêneses previstas.

Com a trajetória sendo conhecida pelos diagramas de fase, foi utilizada uma rotina em GrADS que gerava o campo de PNMM no terminal e com a função “q pos” era possível clicar na imagem gerada e obter o mínimo de pressão do ciclone, assim como sua latitude e longitude, considerando-se uma área de 3° graus de latitude e

longitude a partir do ponto clicado. O critério de 3° graus foi escolhido para se ter certeza que as informações registradas eram do mesmo sistema.

A PNMM mínima e sua latitude e longitude eram registradas, e então considerando-se uma área de 5° a partir dessa latitude e longitude, foram registrados também os valores mínimos de:

- vorticidade relativa em 1000 hPa;
- vorticidade potencial em 1000 hPa;
- advecção de vorticidade relativa em 500 hPa;
- advecção de vorticidade planetária em 500 hPa;
- vorticidade relativa em 500 hPa
- vorticidade potencial em 500 hPa;
- vorticidade relativa em 300 hPa;
- vorticidade potencial em 300 hPa.

Para essa segunda parte a escolha de 5° de intervalo de latitude e longitude foi devido ao fato de as variáveis obtidas acima não ficarem contidas apenas na região central do sistema, mas não foi utilizado um intervalo maior pelo mesmo motivo da escolha do critério de 3° graus no passo anterior.

A vorticidade planetária também foi registrada, mas na latitude em que se encontrava o mínimo de pressão. As advecções foram calculadas utilizando-se as componentes do vento da própria reanálise.

As análises do comportamento das vorticidades foram feitas utilizando-se os diagramas de fase em conjunto com gráficos, gerados em python, que relacionam temporalmente a pressão com cada vorticidade e advecção, para que pudesse ser observado esse comportamento durante as mudanças de fase do ciclone.

Os fenômenos apresentados foram escolhidos entre os oito por causa de: suas transições marcantes, passando por fase tropical ao longo do ciclo de vida; por seu tempo de duração, tendo dois dos sistemas duração de uma semana; e pela trajetória realizada por eles, em que tiveram um movimento bem significativo para oeste e, como aconteceu em um dos casos, se deslocou de latitudes médias para a região Antártica.

## **CAPÍTULO 5 - RESULTADOS**

### **5.1 Ciclone 07/09/2021**

Nas figuras 10 e 11 são mostrados os diagramas de evolução de fase do respectivo ciclone com o GFS e a ERA5, respectivamente. Tendo início às 12 UTC do dia 07 de setembro de 2021 e dissipação às 16 UTC do dia 09 de setembro de 2021, o sistema surgiu no mar de Amundsen, em  $67,25^{\circ}$  S e  $102,5^{\circ}$  W, possuindo assimetria e núcleo frio, indicando caráter frontal; passou pela transição para ciclone tropical - núcleo simétrico e quente em baixos níveis e quente e profundo em altos níveis, no dia 08 e se dissipou com núcleo quente e sem caráter definido, situado em  $73,5^{\circ}$  S e  $105,75^{\circ}$  W. O sistema também é marcado por um movimento retrógrado considerável, isto é, para oeste, do dia 07 às 22 UTC, localizado em  $70,5^{\circ}$  S e  $101,5^{\circ}$  W, até o dia 08 às 16 UTC, em  $74^{\circ}$  S e  $117,25^{\circ}$  W. O diagrama do GFS diferiu consideravelmente da reanálise em relação à evolução, pois nele o ciclone é representado como sendo subtropical em todo seu ciclo; em relação ao horário de dissipação ocorreu apenas uma diferença de duas horas entre o previsto e o ocorrido.

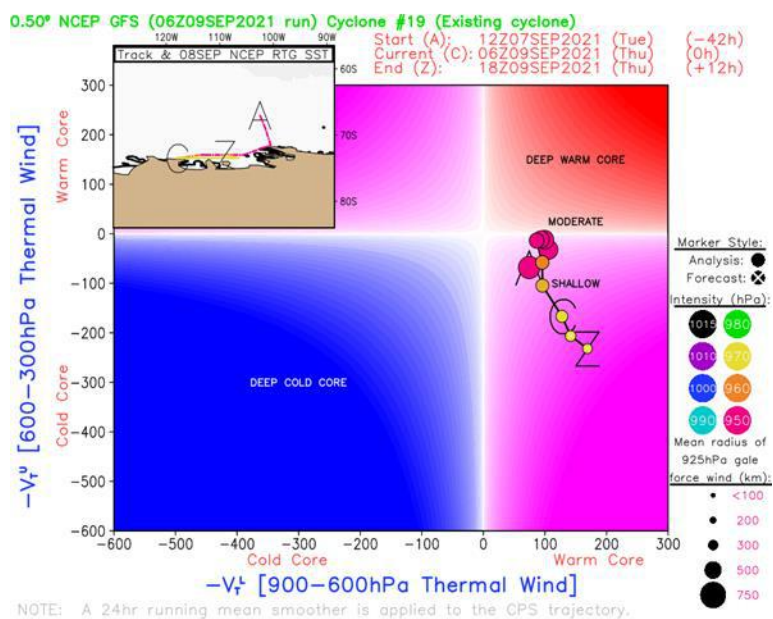
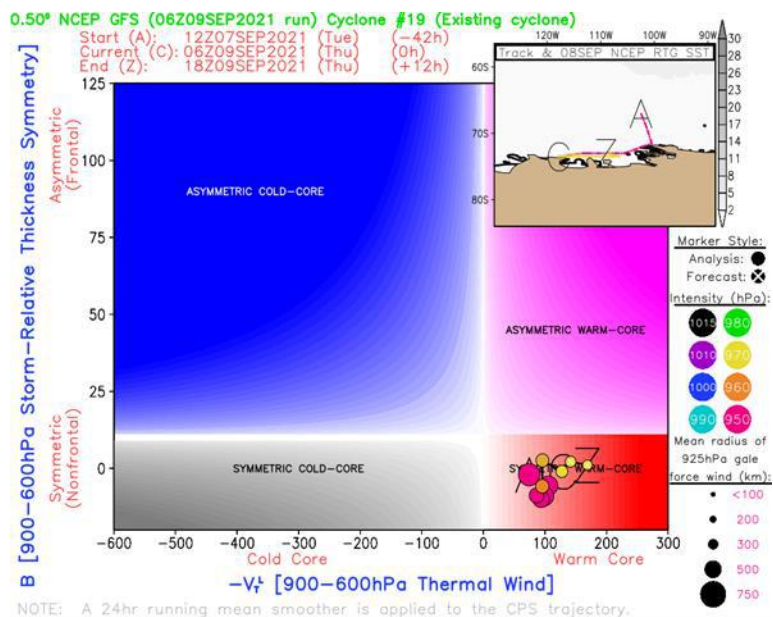


Figura 10. Diagramas de evolução de fase do ciclone com gênese às 12 UTC do dia 07 de setembro de 2021, com base no GFS.

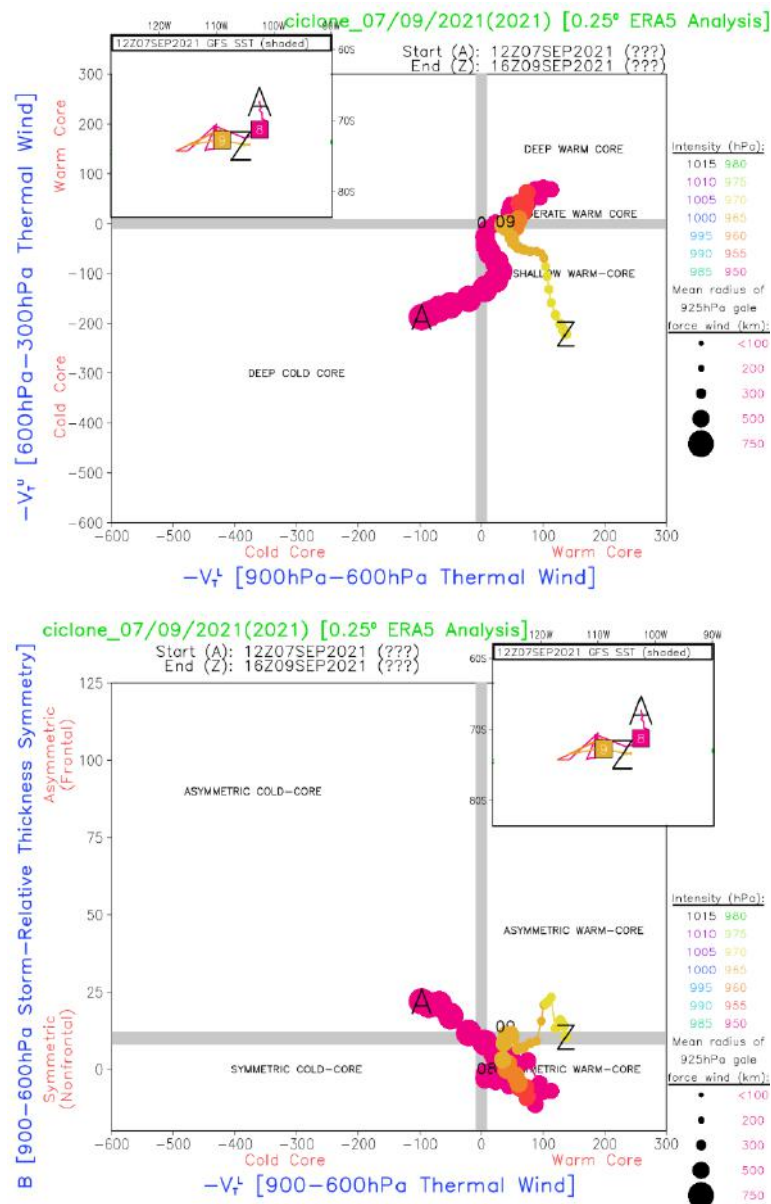


Figura 11. Diagramas de evolução de fase do ciclone com gênese às 12 UTC do dia 07 de setembro de 2021, com base na ERA5.

Na Figura 12a é mostrada a PNMM em conjunto com a vorticidade relativa negativa em 1000 hPa e a 12b é com a advecção de vorticidade relativa negativa em 500 hPa (termos da equação de desenvolvimento). É possível observar claramente a



relação entre as três variáveis; ou seja, conforme ocorre o enfraquecimento da advecção negativa de zeta em níveis médios, tanto a pressão em superfície quanto zeta em 1000 hPa também enfraquecem ao longo do tempo, em concordância com a teoria de Sutcliffe. Os valores mais profundos do ciclone e de zeta não acontecem simultaneamente; o valor mínimo de pressão foi 929,9 hPa às 19 UTC do dia 07, enquanto que o de zeta foi  $-5,656 \times 10^{-4} s^{-1}$  na sua gênese e o da advecção de zeta foi às 00 UTC do dia 08 (ou seja, duas horas após a trajetória deixar de ser de leste e passar para de oeste), de  $-1,41988 \times 10^{-7} s^{-2}$ .

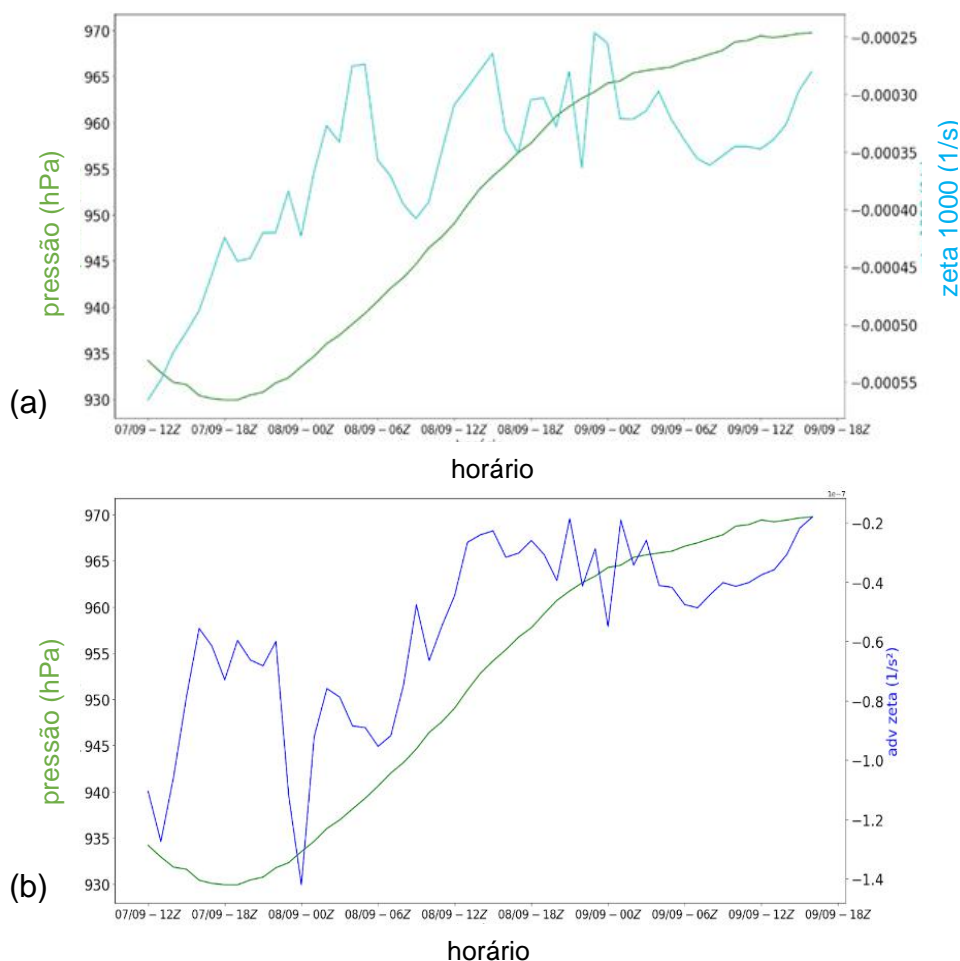


Figura 12. Gráficos de (a) pressão (linha verde) x vorticidade relativa em 1000 hPa (linha ciano) e (b) pressão x advecção de vorticidade relativa em 500 hPa (linha azul) do ciclone do dia 07.

A Figura 13a apresenta a relação da pressão com a vorticidade planetária enquanto que a Figura 13b relaciona a PNMM com a advecção de vorticidade planetária em 500 hPa. Sendo  $f$  uma função do seno da latitude, a intensificação de  $f$  no gráfico é explicada pelo deslocamento do sistema para sul e a intensificação da advecção de  $f$  acompanha esse padrão nos primeiros horários, mas indicam nesse caso uma falta de relação com a pressão em superfície, que está em ascendência. O deslocamento para oeste coincide com o padrão de vale no qual o gráfico de advecção faz entre as 00 e 18 UTC do dia 08, cujo valor mais intenso nesse percurso é de  $-1,30426 \times 10^{-10} s^{-2}$  às 03 UTC. O ciclone se torna estacionário em  $73,5^\circ S$  e  $105^\circ W$  entre o período de 05 e 14 UTC do dia 09, período marcado por uma amplificação da advecção de  $f$  que atinge o seu valor mais intenso nessa última hora, sendo de  $-2,01703 \times 10^{-10} s^{-2}$ . Isto indica que a advecção local de  $f$  precisa ser analisada levando-se em consideração o ambiente.

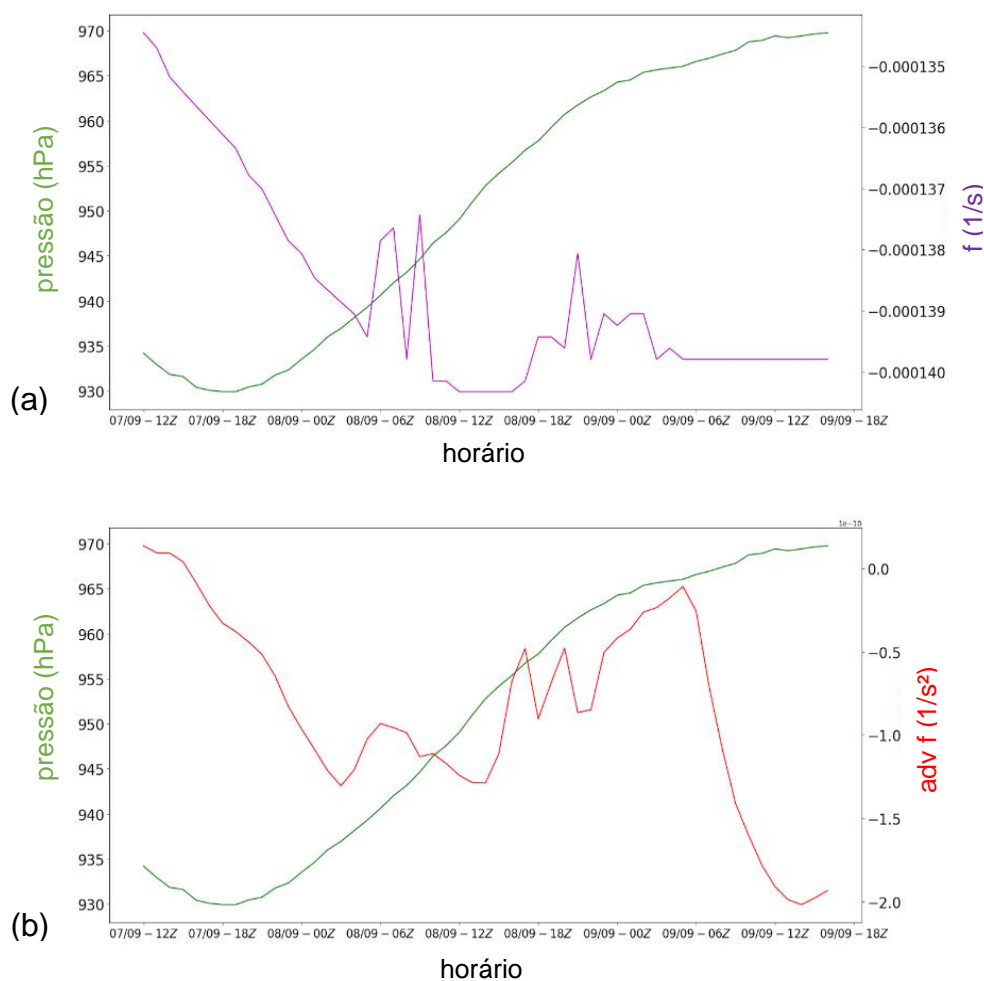


Figura 13. Gráficos de (a) pressão (linha verde) x vorticidade planetária (linha roxa) e (b) pressão x advecção de vorticidade planetária em 500 hPa (linha azul) do ciclone do dia 07.

Os perfis de vorticidade potencial e de vorticidade relativa para os níveis de 1000, 500 e 300 hPa são mostrados na Figura 11. A Com exceção do nível de 500 hPa no período entre 12 e 19 UTC do dia 08, ocorreu a existência de AVPs durante todo o tempo de vida na região do sistema nos três níveis estudados, sendo um fator contribuinte para a manutenção do sistema ao longo da troposfera, o que era esperado para um sistema em altas latitudes. A VP no nível de 1000 hPa é a maior entre as três, o que difere da teoria conhecida e de trabalhos anteriores (Crespo, 2015; Pang et al. 2022), em que a vorticidade potencial é menos intensa em níveis baixos do que em níveis altos, sendo marcada por três picos: o mais intenso no dia 08 às 00 UTC,

de -31,9 UVP, duas horas após o movimento retrógrado começar e coincidindo com a mudança de fase para a fase tropical; o segundo, de - 29,6 UVP às 14 UTC do dia 08, três horas antes do movimento voltar para leste e com o sistema estando posicionado em 74,25° S (sua posição mais a sul); e o terceiro, -19,9 UVP, sendo às 00 UTC do dia 09 com o sistema perdendo a característica tropical, podendo estar não apenas ligada a intensificação de  $f$ , mas também a fatores termodinâmicos ligados à fase tropical, porém fugiam do foco deste trabalho, sendo necessário uma melhor análise para isso poder ser afirmado. A vorticidade relativa nos níveis médios apresenta um decréscimo ao longo do tempo, em módulo, o que já era esperado pelo enfraquecimento da advecção de zeta no mesmo nível e confirma o aumento da PNMM. Já a vorticidade relativa em altos níveis, que seguia um padrão estável até às 18 UTC do dia 08, passou a intensificar a partir deste horário, que estaria ligado a um aumento da convergência em altos níveis e consequentemente um enfraquecimento do sistema em superfície.

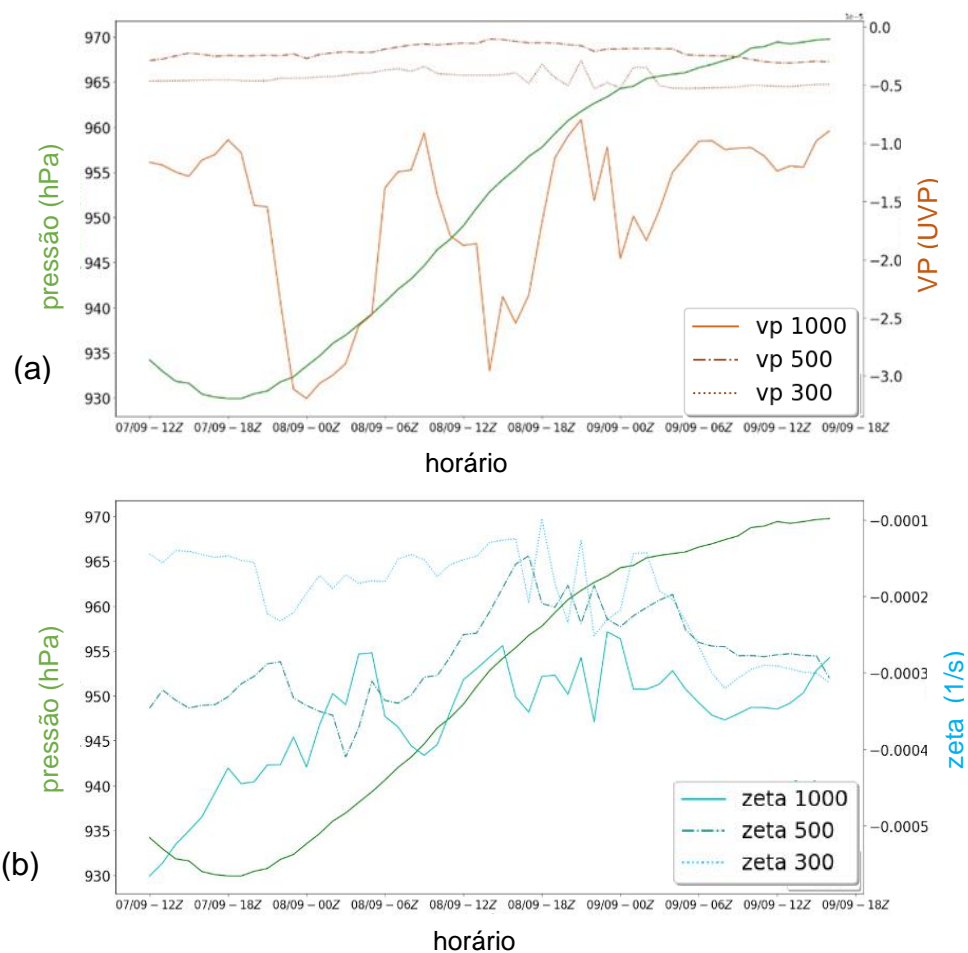


Figura 14. (a) Gráfico de pressão (linha verde) x vorticidade potencial em 1000 hPa (linha contínua) x vorticidade potencial em 500 hPa (linha mista) x vorticidade potencial em 300 hPa (linha pontilhada); (b) Gráfico de pressão (linha verde) x vorticidade relativa em 1000 hPa (linha contínua) x vorticidade relativa em 500 hPa (linha mista) x vorticidade relativa em 300 hPa (linha pontilhada) do ciclone do dia 07.

## 5.2 Ciclone 01/11/2021

Os diagramas de fase do segundo sistema estudado são mostrados nas Figuras 15 e 16. Este ciclone começou no mar de Amundsen e teve seu início às 06 UTC do dia 01 de novembro de 2021, localização  $67,5^{\circ}$  S e  $149,75^{\circ}$  W e com PNMM inicial 975,1 hPa, e fim às 21 UTC do dia 06 de novembro de 2021,  $69,75^{\circ}$  S e  $115^{\circ}$  W e 960,1 hPa. Ele possuiu gênese como ciclone extratropical, se tornando durante o dia 03 um ciclone extratropical de seclusão quente, passando pela transição tropical completa ao longo do dia 04, e se dissipou como subtropical. O movimento de leste a oeste ocorreu das 22 UTC do dia 04, onde se encontrava em  $70,25^{\circ}$  S e  $095,25^{\circ}$  W, até 1 hora antes da sua dissipação, situado então em  $73,5^{\circ}$  S e  $116,25^{\circ}$  W. O desenvolvimento do sistema é o mesmo em ambos os diagramas, diferenciados pelo GFS mostrar a dissipação ainda na fase tropical. Os diagramas do GFS não foram salvos na rodada final, então não foi possível verificar qual o horário final em que o sistema se dissipou, segundo o GFS.

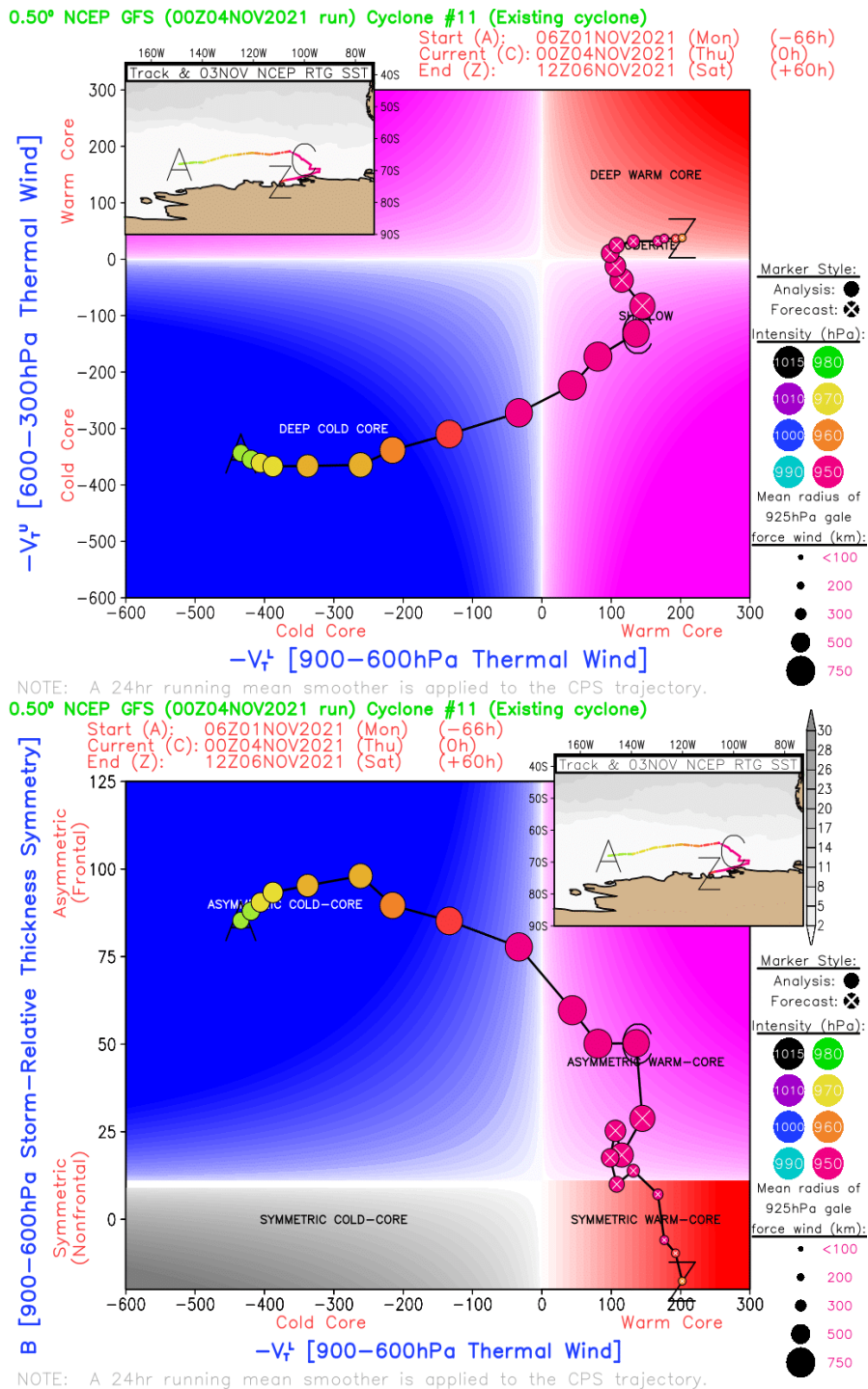


Figura 15. Diagrama de evolução do ciclone com gênese às 06 UTC do dia 01 de novembro de 2021, para o GFS.

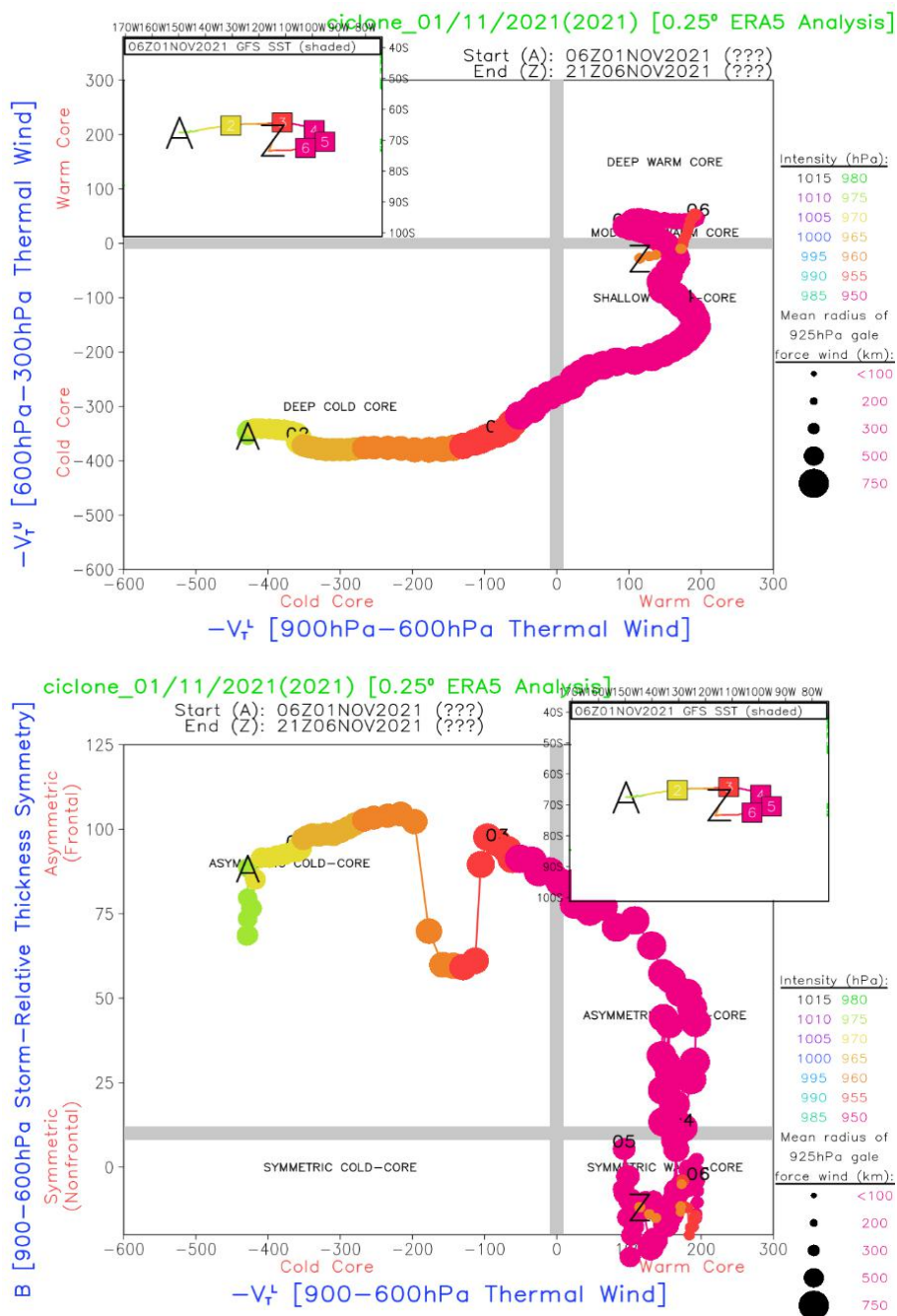


Figura 16. Diagrama de evolução do ciclone com gênese às 06 UTC do dia 01 de novembro de 2021, para a ERA5.

A Figura 17a mostra a pressão a nível médio do mar em conjunto com a vorticidade relativa negativa em 1000 hPa e a 17b a pressão relacionada com a advecção de zeta negativa em 500 hPa, ambas para o segundo ciclone estudado. A advecção de zeta segue um padrão oposto ao da pressão e de zeta em 1000 hPa no



início do desenvolvimento do sistema, para então aprofundar a partir do dia 03 e atinge seu valor mínimo às 10 UTC do dia 05, de  $-6,60187 \times 10^{-8} s^{-2}$ , para enfraquecer após isso. Esse sistema, assim como o do dia 07 de setembro, teve o pico de advecção de zeta mínimo após o sistema entrar em modo retrógrado. A pressão passa a seguir a tendência da advecção negativa de zeta às 15 UTC do dia 03, estando de acordo com o esperado pela equação de Sutcliffe. Ela atinge seu valor mínimo, de 936,1 hPa, às 13 UTC do dia 04. A relação de zeta em 1000 hPa com a advecção de zeta em 500 hPa se assemelha, num geral, ao padrão da PNMM; seu valor mínimo foi  $-3,90159 \times 10^{-4} s^{-1}$  às 16 UTC do dia 06, próximo do horário de dissipação.

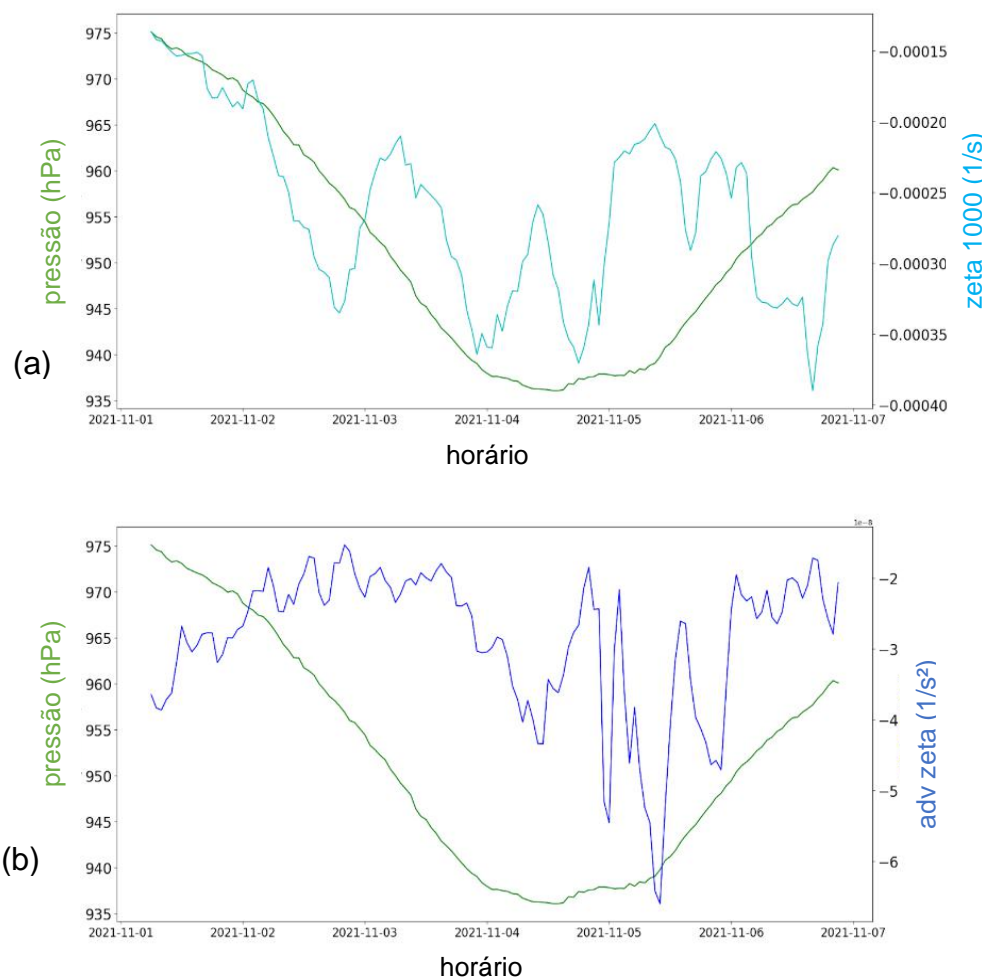


Figura 15. Gráficos de (a) pressão (linha verde) x vorticidade relativa em 1000 hPa (linha ciano) e (b) pressão x advecção de vorticidade relativa em 500 hPa (linha azul) do ciclone do dia 01.

A Figura 18a apresenta a relação da PNMM com a vorticidade planetária enquanto que a Figura 18b relaciona a PNMM com a advecção de vorticidade planetária em 500 hPa. Assim como no sistema analisado anteriormente, a intensificação de  $f$  no gráfico é explicada pelo deslocamento do sistema para sul, com um enfraquecimento no último horário devido ao deslocamento do sistema para norte, de  $73,5^\circ$  S para  $69,75^\circ$  S, mas possuindo um enfraquecimento inicial devido ao deslocamento do sistema para latitudes menores. A oscilação da advecção de vorticidade planetária é marcada por picos mínimos: 1 - o primeiro pico de advecção de  $f$ , cujo valor é  $-1,19668 \times 10^{-10} s^{-2}$  às 15 UTC do dia 01, localizado em  $66,5^\circ$  S, marca o início do deslocamento do sistema para norte. O sistema atinge sua posição mais ao norte na latitude  $64,25^\circ$  S às 00 UTC do dia 03; 2 - o ciclone ficou entre entre às 02 e 05 UTC do dia 03 na latitude  $64,5^\circ$  S, com o segundo pico de  $-8,42367 \times 10^{-11} s^{-2}$ ; 3 - O sistema estacionou na latitude  $66,75^\circ$  S, movendo-se zonalmente durante às 21 UTC do dia 03 e 02 UTC do dia 04, período correspondente ao terceiro pico mínimo de advecção de  $f$ , que atingiu o valor de  $-1,06172 \times 10^{-10} s^{-2}$  às 01 UTC do dia 04; 4 - A trajetória do movimento para oeste, que começa às 22Z do dia 04, é seguido por outro pico de advecção, de  $-7,04981 \times 10^{-11} s^{-2}$ , às 10 UTC do dia 05; 5 - o último pico coincide com a mudança brusca de latitude que ocorre na hora final do ciclone (que é possível ver na variação do próprio  $f$ ), sendo de  $-9,16381 \times 10^{-11} s^{-2}$ . Vale ressaltar que esses picos de advecção podem estar ligados a mudanças dos ventos em 500 hPa.

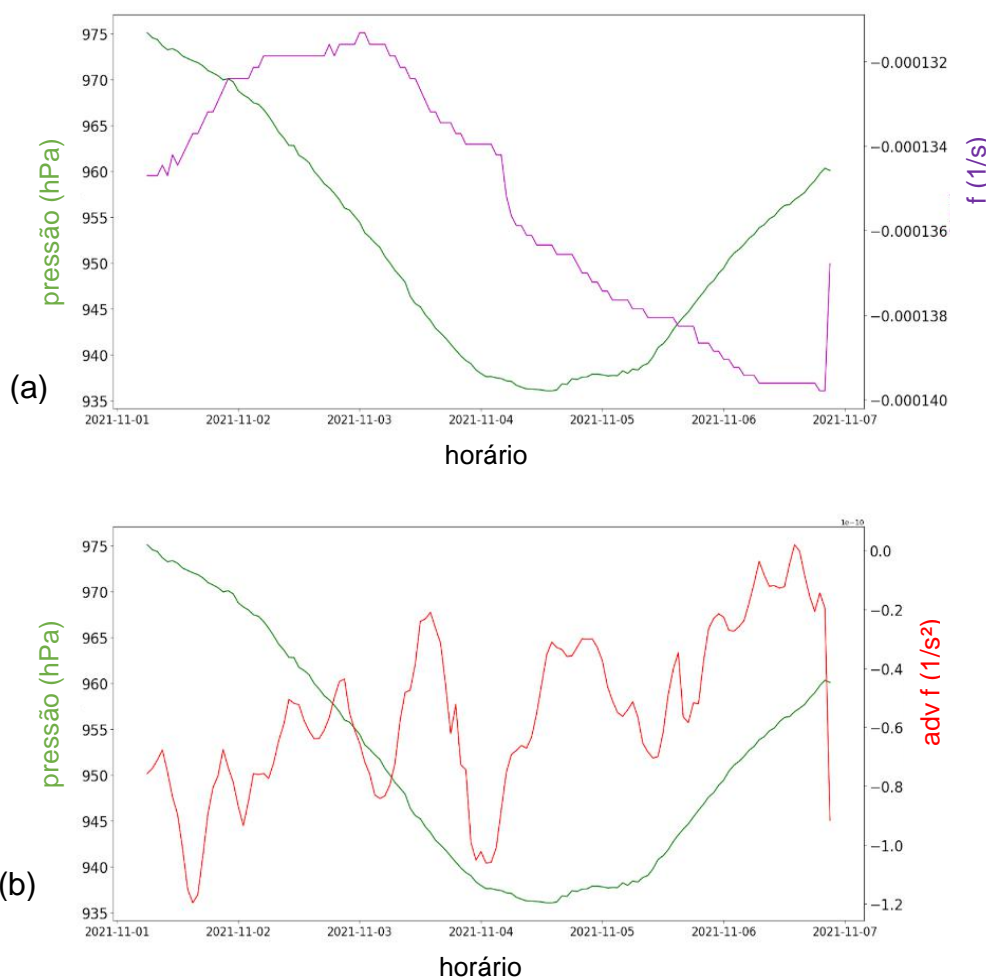


Figura 16. Gráficos de (a) pressão (linha verde) x vorticidade planetária (linha lilás) e (b) pressão x advecção de vorticidade relativa em 500 hPa (linha azul) do ciclone do dia 01.

Os perfis de vorticidade potencial e de vorticidade relativa para os níveis de 1000, 500 e 300 hPa para o ciclone 2 são mostrados na Figura 19. O aumento de  $f$  no início da vida do ciclone pode explicar a VP menos intensa em baixos níveis, que passa por significativa intensificação a partir das 02 UTC do dia 04, semelhante ao caso anterior durante a fase quente; ela atinge seu valor mais intenso às 23 UTC do dia 05, de -15 UVP. Após isso, ela enfraquece, coincidindo com a perda da característica quente em altos níveis. Em médios níveis a VP atinge valores abaixo de -3 UVP entre às 10 UTC do dia 04 e 13 UTC do dia 05 e valores não anômalos nas últimas 4 horas de vida do sistema. Em altos níveis a VP tem seus valores mais baixos

- entre -2 e -3 UVP, nas primeiras horas do dia 06, para depois se intensificar novamente. Assim como o sistema anterior, anomalias de VP nos três níveis representam um fator de sustentação para o sistema ao longo da troposfera. A intensificação da vorticidade relativa a partir das 15 UTC do dia 03 em 500 hPa coincide com o aprofundamento da PNMM, assim como o decaimento de ambas; ela atinge seu valor mínimo às 09 UTC do dia 04, de  $-3,50179 \times 10^{-4} s^{-1}$ . Um comportamento semelhante é notado na vorticidade em 300 hPa, o que indicaria um sistema profundo até altos níveis.

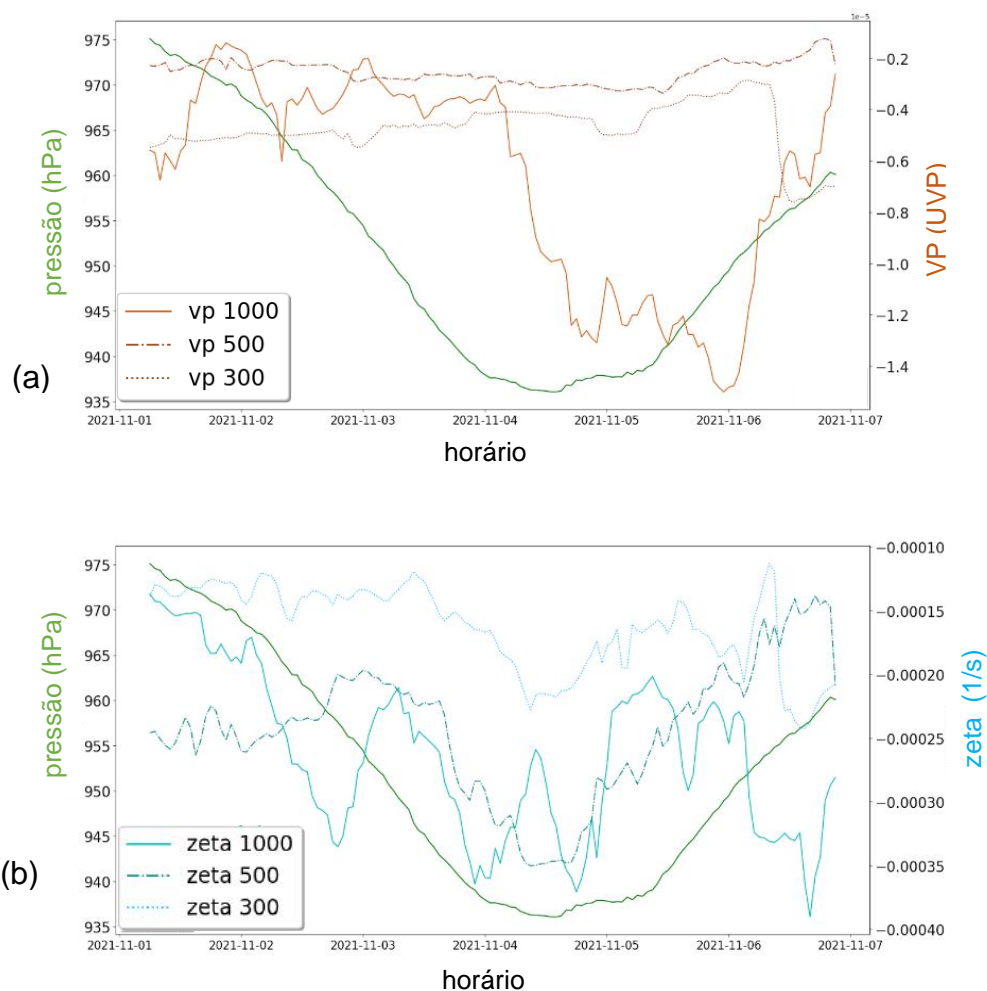


Figura 17. (a) Gráfico de pressão (linha verde) x vorticidade potencial em 1000 hPa (linha contínua) x vorticidade potencial em 500 hPa (linha mista) x vorticidade potencial em 300 hPa (linha pontilhada); (b) Gráfico de pressão (linha verde) x vorticidade relativa em 1000 hPa (linha contínua) x vorticidade relativa em 500 hPa (linha mista) x vorticidade relativa em 300 hPa (linha pontilhada) do ciclone do dia 01.

### 5.3 Ciclone 10/12/2021

Nas Figura 20 e 21 são apresentados os diagramas de fase do terceiro sistema analisado. Este ciclone teve seu início às 00 UTC do dia 10 de dezembro de 2021, tendo núcleo frio e sem característica definida (ou seja, estava entre frontal e não frontal) e vai adquirindo caráter frontal, com pressão inicial de 1007,7 hPa. No final do dia 13 ele passa rapidamente a ser uma seclusão quente, e após isso se torna subtropical - quente e simétrico em baixos níveis e frio em altos níveis, no início do dia 14, e se dissiparia mantendo essa característica às 22 UTC do dia 15 de dezembro de 2021, com pressão final de 957,2 hPa. Ele se formou em latitudes médias, 44,5° S e 070,25° W - sul da Argentina, sendo o único que não foi inteiramente antártico em seu período de vida. Ele passou a ser de latitudes altas às 01 UTC do dia 03, com localização final em 69,75° S e 070,25° W, no mar de Weddell. Seu movimento para oeste ocorreu entre às 13 UTC do dia 14 e 21 UTC do dia 15. Ambos os diagramas apresentaram o sistema tendo o mesmo desenvolvimento, com uma defasagem de 2 horas do horário final.

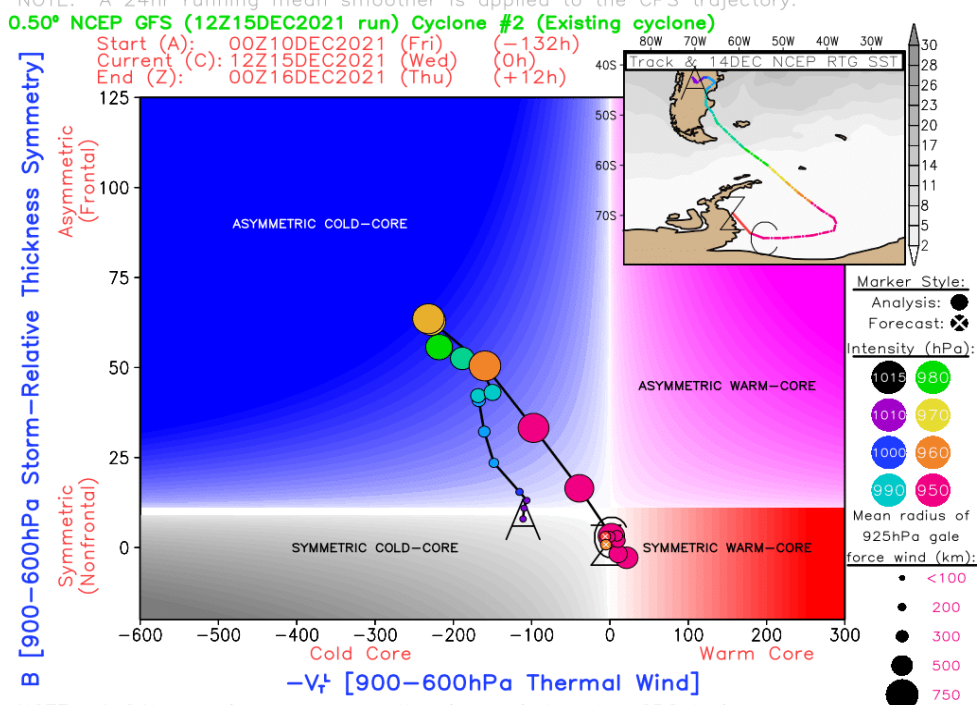
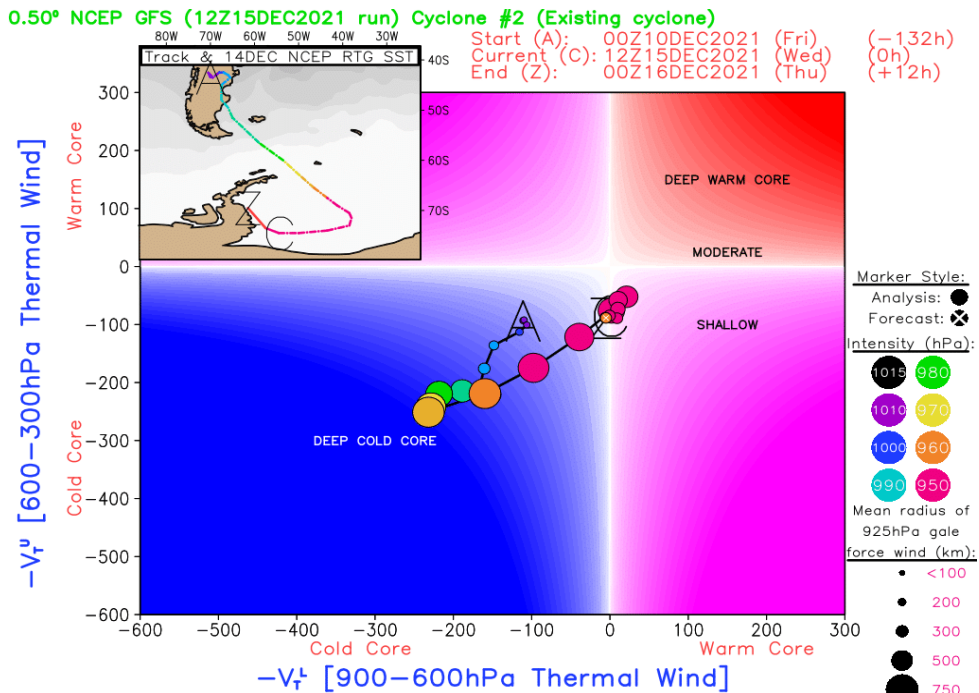


Figura 20. Diagrama de evolução do ciclone com gênese às 06 UTC do dia 10 de dezembro de 2021, para o GFS.

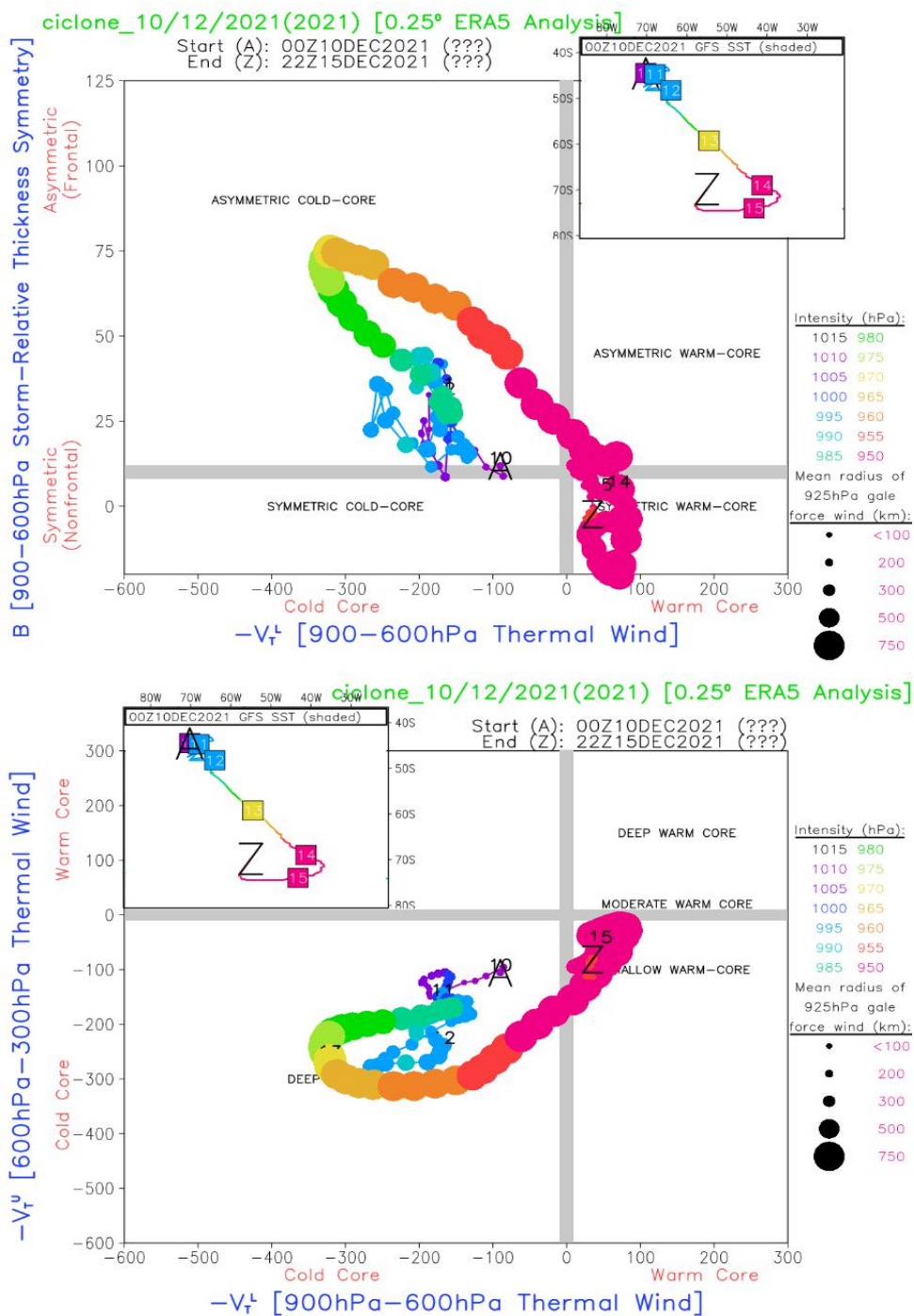


Figura 21. Diagrama de evolução do ciclone com gênese às 06 UTC do dia 10 de dezembro de 2021, para a ERA5.

A PNMM, zeta em 1000 hPa e advecção de zeta em 500 hPa do terceiro sistema estão mostradas na Figura 19. A pressão segue a tendência da advecção de zeta até às 22 UTC do dia 11, quando ocorre o pico da advecção, de  $-1,35273 \times 10^{-7} s^{-2}$ , após isso a advecção não influencia no aprofundamento do sistema. Ele diferiu dos sistemas analisados anteriormente devido a advecção mínima de zeta ter ocorrido antes do movimento retrógrado. O valor mínimo de pressão é 944,9 hPa às 14 UTC do dia 14. Zeta, ao contrário da PNMM, possuiu ao longo do desenvolvimento do ciclone uma tendência próxima ao da advecção em níveis médios, em acordo com o esperado por Sutcliffe, com o valor mínimo de  $-4,71581 \times 10^{-4} s^{-1}$  às 17 UTC do dia 11.

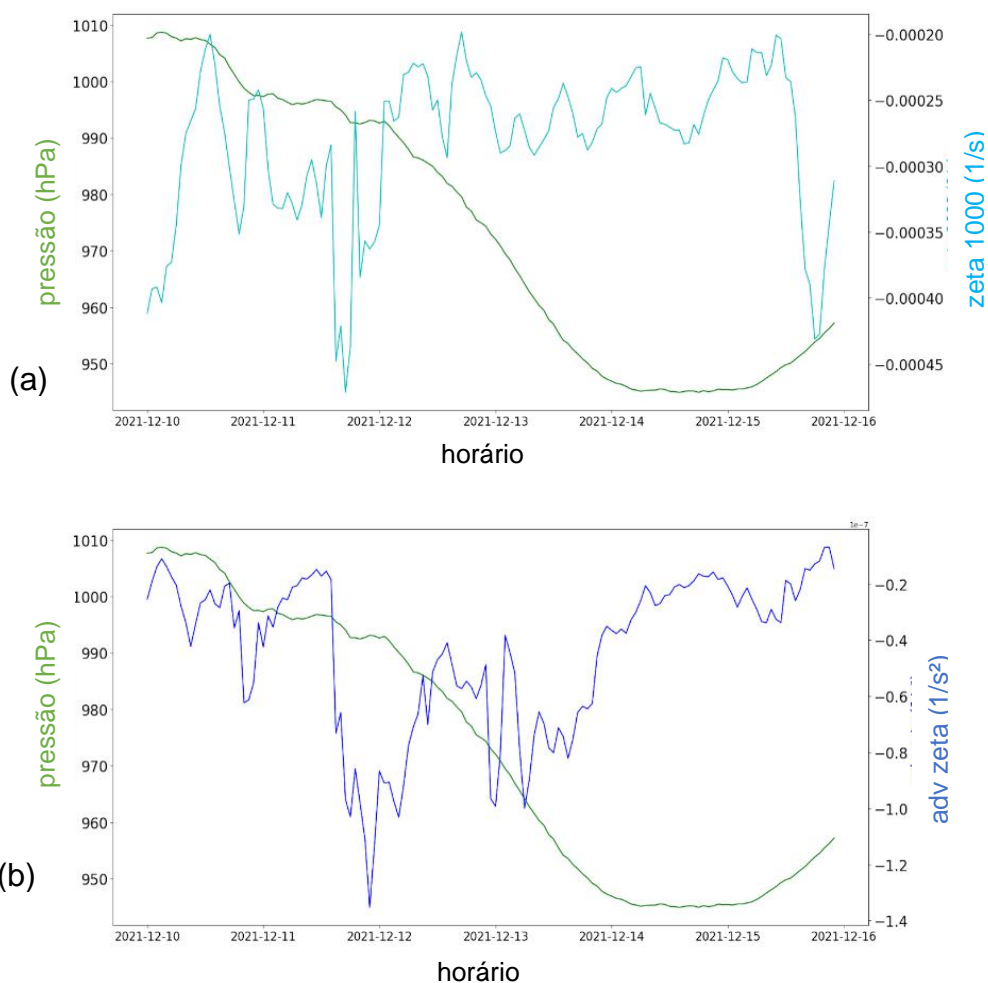


Figura 18. Gráficos de (a) pressão (linha verde) x vorticidade relativa em 1000 hPa (linha ciano) e (b) pressão x advecção de vorticidade relativa em 500 hPa (linha azul) do ciclone do dia 10.



A Figura 20a apresenta a relação da pressão com a vorticidade planetária enquanto que a Figura 20b relaciona a PNMM com a advecção de vorticidade planetária em 500 hPa. A advecção de  $f$  tem um pico de valor máximo no horário das 16 UTC do dia 11, de valor  $9,64795 \times 10^{-11} s^{-2}$ , sendo que duas horas antes o sistema se deslocou da latitude  $44^\circ S$  até  $47^\circ S$ , continuando então deslocamento para latitudes mais altas. O menor valor ocorreu às 10 UTC do dia 12, sendo de  $-2,91841 \times 10^{-10} s^{-2}$ , quando o sistema está no início do deslocamento para sudeste. Após isso, ele continua sentido sudeste e chegou na latitude  $60^\circ S$  às 01 UTC do dia 13, onde a advecção de  $f$  era  $3,79883 \times 10^{-11} s^{-2}$  ocorreu outro pico positivo às 09 UTC do dia 13, de  $1,04177 \times 10^{-10} s^{-2}$ . O período de retrocesso no deslocamento não correspondeu com alterações significativas na advecção de  $f$ .

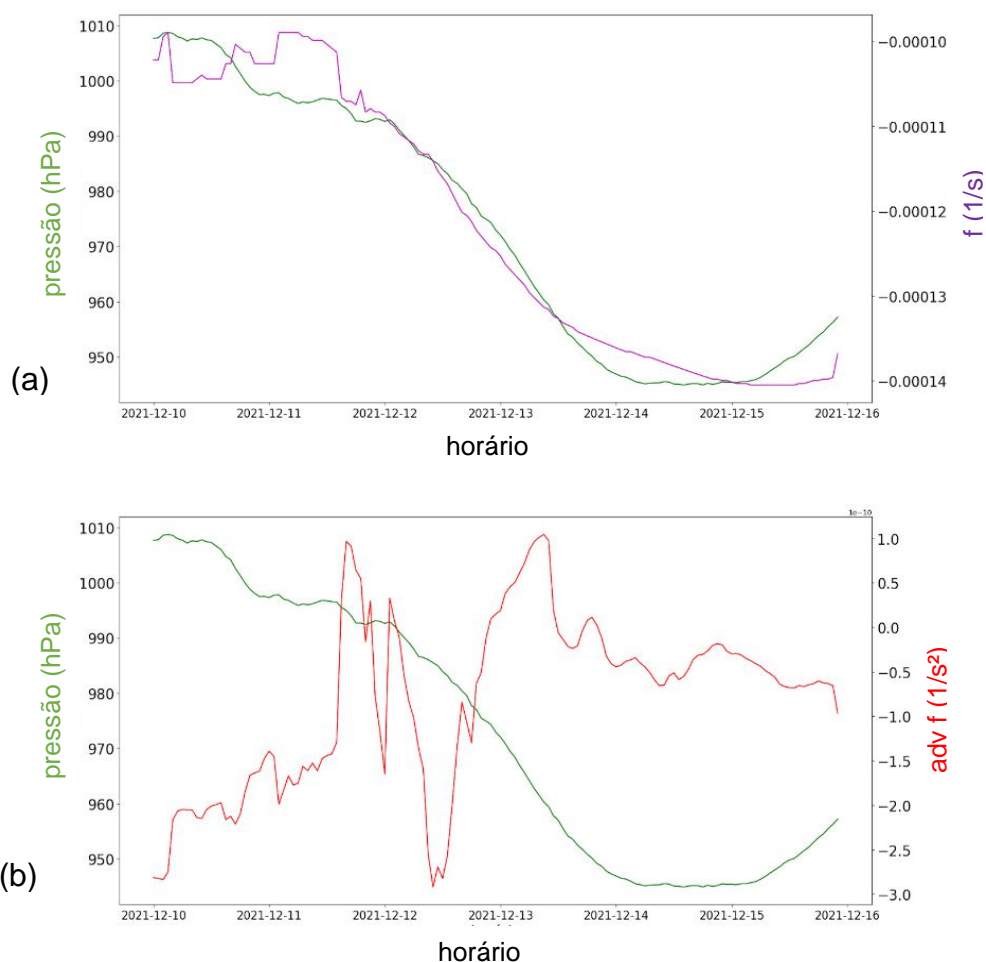


Figura 19. Gráficos de (a) pressão (linha verde) x vorticidade planetária (linha roxa) e (b) pressão x advecção de vorticidade relativa em 500 hPa (linha azul) do ciclone do dia 10.

Os perfis de vorticidade potencial e de vorticidade relativa para níveis baixos, médios e altos do ciclone 3 são apresentados na Figura 19. Diferente dos dois sistemas apresentados anteriormente, que tiveram AVPs bem intensas durante a fase quente, a VP em 1000 hPa do terceiro caso foi mais intensa na fase inicial, com o menor valor 09 UTC do dia 10, de -4,36 UVP. Esse pode ter sido um dos fatores para a sustentação do sistema em superfície nos primeiros horários, sendo que não havia AVPs em altos níveis até às 14 UTC do dia 11. No horário seguinte ocorreu o surgimento de AVPs que chegaram até -11,2 UVP. Essas anomalias induziram vorticidade ciclônica em altos e médios níveis, pois na Figura 19b, para o mesmo horário, ocorreu uma intensificação marcante da vorticidade relativa em 500 e 300 hPa

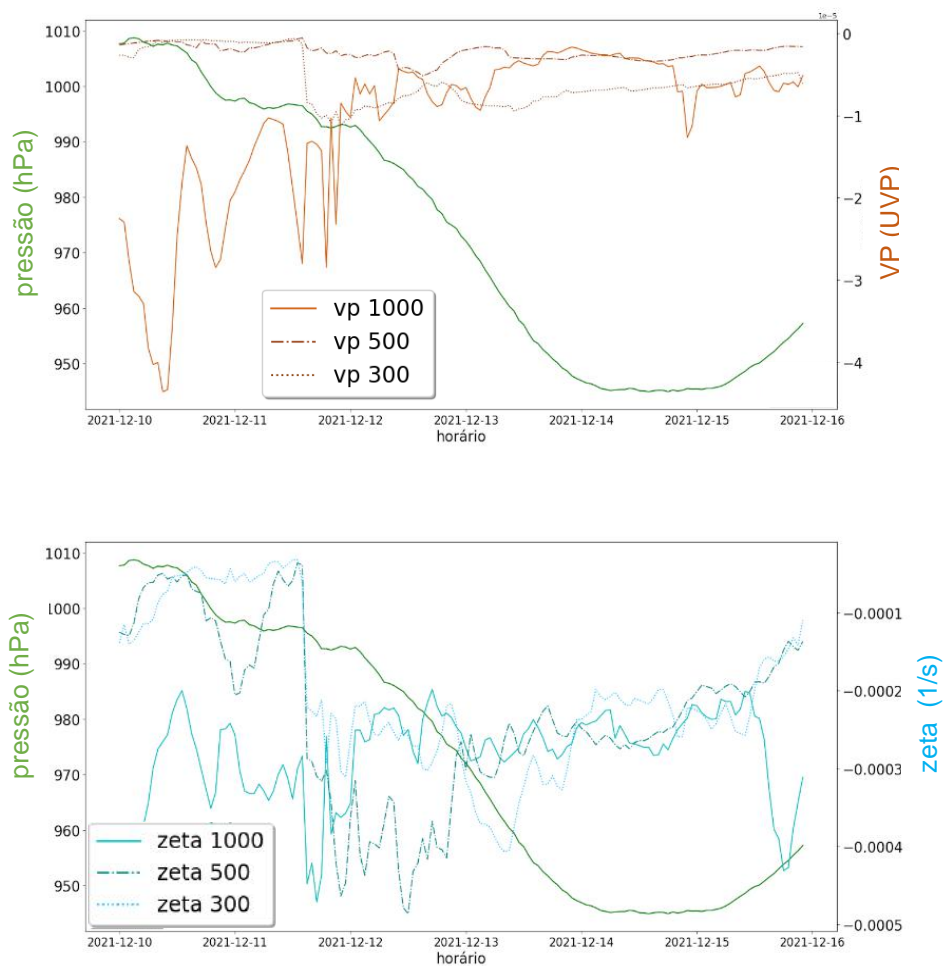


Figura 20. (a) Gráfico de pressão (linha verde) x vorticidade potencial em 1000 hPa (linha contínua) x vorticidade potencial em 500 hPa (linha mista) x vorticidade potencial em 300 hPa (linha pontilhada); (b) Gráfico de pressão (linha verde) x vorticidade relativa em 1000 hPa (linha contínua) x vorticidade relativa em 500 hPa (linha mista) x vorticidade relativa em 300 hPa (linha pontilhada) do ciclone do dia 10.

## **CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES**

Com a motivação de mostrar ciclones de altas latitudes cujo deslocamento retrocedeu e entender as contribuições dinâmicas que atuaram no desenvolvimento desses sistemas, este trabalho teve então como objetivo estudar alguns casos de sistemas ciclônicos de latitudes polares com trajetórias para oeste em algum momento do seu ciclo de vida, enfatizando uma análise através dos perfis de vorticidades relativa, planetária e potencial e de suas advecções.

Foram encontrados para a série temporal de 2021-2022, 8 casos, deixando claro que alguns ciclones com trajetórias para oeste são relativamente comuns nessa região.

Foi bem nítido que os ciclones vizinhos a Península Antártica mudam de fase com certa naturalidade, tal qual os ciclones de outras latitudes. Isso, tanto através do modelo operacional GFS como nas reanálises do ERA5.

Dos casos disponíveis, foram escolhidos 03 casos: 07 de Setembro de 2021, 01 de Novembro de 2021 e 10 de Dezembro de 2021.

O primeiro caso abordado foi um ciclone extratropical que passou pela transição tropical e que foi antártico durante todo o ciclo de vida. Foi possível observar o desenvolvimento da pressão a nível médio do mar e da vorticidade relativa em 1000 hPa com a advecção de zeta em 500 hPa, de acordo com a teoria do desenvolvimento. Foi possível observar o deslocamento do sistema através da vorticidade planetária, assim como o efeito da advecção desta nos períodos em que o ciclone retrocedeu ou estacionou. Existiram anomalias de vorticidade potencial nos três níveis na região do sistema, sendo uma fator de manutenção do sistema. A AVP em baixos níveis foi a mais intensa entre as três, durante a fase quente do sistema.

O segundo sistema, também totalmente antártico, passou de ciclone extratropical para seclusão quente até transicionar para ciclone tropical. Neste sistema a relação da advecção de zeta em 500 hPa com a PNMM e com zeta em baixos níveis também ficou evidente. Os picos mínimos de advecção de vorticidade planetária marcaram o movimento zonal do ciclone, estacionado em uma mesma latitude, assim como a mudança de sentido do sistema de sul para norte e também seu movimento retrógrado para oeste. Neste também havia a presença de AVPs em quase todo o ciclo de vida do sistema, com a AVP em 1000 hPa se tornando bem intensa durante a fase tropical, semelhante ao primeiro caso. A vorticidade relativa em médios e altos níveis confirmavam a intensificação do sistema ao longo da troposfera.

O terceiro sistema, sendo o único que não foi inteiramente antártico e apresentou um comportamento diferente. Ao contrário dos sistemas anteriores, a advecção de zeta mínima aconteceu antes do movimento para oeste. A advecção de zeta deixa de ser o fator principal no aprofundamento da pressão, mas zeta em 1000 hPa seguiu a mesma tendência da advecção em níveis médios. Variações da advecção de  $f$  estiveram ligadas às mudanças de latitude durante o trajeto do sistema, mas pouca relação com o movimento retrógrado. As anomalias de VP em baixos níveis foram mais intensas no início do desenvolvimento, e a AVP em 300 hPa foi responsável por intensificar o sistema em níveis superiores.

Ao longo do trabalho também é mostrado que não só a advecção de vorticidade absoluta em níveis médios da troposfera possui influência no deslocamento. A área de estudo se encontra na célula Polar, onde predominam os ventos de leste, e conseqüentemente, as ondas de Rossby. Pode-se atestar a influência da advecção de vorticidade planetária no movimento retrógrado, mas não se pode dizer que ela é a única contribuinte nesse fenômeno.

Em resumo, o estudo de ciclones através da conservação da vorticidade mostra-se uma boa ferramenta para análise de trajetórias, aprofundamentos/enfraquecimentos, mudanças de fase dos ciclones. Esse estudo concentrou-se em iniciar uma linha de pesquisa baseada na dinâmica da atmosfera, para destoar das análises termodinâmicas mais frequentes e ressalta-se que é uma linha de pesquisa promissora e principalmente útil na área operacional.

## Sugestões para trabalhos futuros

Fica como sugestão:

- aumentar a série temporal desses ciclones retrógrados, o maior número de anos possível, criando uma climatologia;
- aplicar em latitudes mais baixas;
- investigar das diferenças nas fases dos ciclones no GFS e na reanálise ERA 5;
- investigar a influência do escoamento em 500 hPa, pois nos casos em que a advecção de vortacidade planetária se mostrou pouco influente, a contribuição maior pode ter vindo das ondas de Rossby;
- Analisar os outros termos da equação do desenvolvimento, principalmente o termo do aquecimento diabático –  $H$ , pois ele possui grande contribuição.

## CAPÍTULO 7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BJERKNES, J., & H. Solberg, 1922: Life cycle of cyclones and the polar front theory of atmospheric circulation. *Geophys. Publ.*, 3, 1–18.

CAVALCANTI, I. F. A. Tempo e clima no Brasil. São Paulo: Oficina de Textos. 2009

CHAN, J. C. L., Ko, F. M. F., & Lei, Y. M. (2002). Relationship between Potential Vorticity Tendency and Tropical Cyclone Motion, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 59(8), 1317-1336. Retrieved Feb 11, 2023, from [https://journals.ametsoc.org/view/journals/atsc/59/8/15200469\\_2002\\_059\\_1317\\_rbpvta\\_2.0.co\\_2.xml](https://journals.ametsoc.org/view/journals/atsc/59/8/15200469_2002_059_1317_rbpvta_2.0.co_2.xml)

CHARNEY, J. G. & Eliassen, A. 1964: On the growth of the hurricane depression. *J. Atmos. Sci.*, 21, 68–75.

CRESPO, N. M. Contribuição da interação troposfera-estratosfera nas ciclogêneses em superfície sobre a América do Sul. 2015. 114 p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

\_\_\_\_\_. A potential vorticity perspective on cyclones over South America. 2019. 105p. Tese (Doutorado) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

EMANUEL, K.A. Tropical cyclones. *Annual review of earth and planetary sciences*, v. 31, n. 1, p.75-104, 2003.

GLOSSARY OF METEOROLOGY (June 2000).\_"Cyclone". American Meteorological Society. Acesso em 03/07/2022.

HART, R. E. 2003. A cyclone phase space derived from thermal wind and thermal asymmetry. *Monthly Weather Review* 131, 4:585–616. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2003\)131<0585:ACPSDF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2003)131<0585:ACPSDF>2.0.CO;2).

HEBERT, P. J., and K. O. Potteat, 1975: A satellite classification technique for subtropical cyclones. NOAA Tech. Memo. NWS SR83, National Weather Service, 25 pp.

HERSBACH, H, Bell, B, Berrisford, P, et al. The ERA5 global reanalysis. *Q J R Meteorol Soc.* 2020; 146: 1999– 2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>.

HIRSCHBERG, P. A., and J. M. Fritsch, 1991: Tropopause Undulations and the Development of Extratropical Cyclones. Part I. Overview and Observations from a Cyclone Event. *Mon. Wea. Rev.*, **119**, 496–517, [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1991\)119<0496:TUATDO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1991)119<0496:TUATDO>2.0.CO;2).

HOLTON, J. R. An Introduction to Dynamic Meteorology. 4th Edition, v. 88, 2004.

JONES, D.A., Simmonds, I. 1993. A climatology of Southern Hemisphere extratropical cyclones. *Climate Dynamics* **9**, 131–145. <https://doi.org/10.1007/BF00209750>

JORGENSEN, D. P., E. J. Zipser, and M. A. LeMone, 1985: Vertical Motions in Intense Hurricanes. *J. Atmos. Sci.*, **42**, 839–856, [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1985\)042<0839:VMIIH>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1985)042<0839:VMIIH>2.0.CO;2).

KING, J. C. (John Christopher), 1955 - Antarctic meteorology and climatology / J. C. King and J. Turner. p. cm. - (Cambridge atmospheric and space science series)

KOUSKY, V. E.; Elias, M. Meteorologia sinotica: parte I. Sao Jose dos Campos: INPE, 1982. 118 p. IBI: <6qtX3pFwXQZ3r59YCT/GTt9P>. (INPE-2605-MD/021). Available from: <ibi:6qtX3pFwXQZ3r59YCT/GTt9P>.

LUPO, A. R., P. J. Smith, and P. Zwack, 1992: A Diagnosis of the Explosive Development of Two Extratropical Cyclones. *Mon. Wea. Rev.*, **120**, 1490–1523, [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1992\)120<1490:ADOTED>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1992)120<1490:ADOTED>2.0.CO;2).

MARINHA DO BRASIL. Programa Antártico Brasileiro. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/secirm/pt-br/proantar/a-antartica>.

MARRAFON, V.H.D.A. & Reboita, M.S. 2019. Revisitando a Equação do Desenvolvimento de Sutcliffe. *Anuário do Instituto de Geociências*, **41(3)**: 614-629. DOI: [http://dx.doi.org/10.11137/2018\\_3\\_614\\_629](http://dx.doi.org/10.11137/2018_3_614_629).

MARTIN, J. E., and Otkin, J. A., 2004. The rapid growth and decay of an extratropical cyclone over the central Pacific Ocean. *Weather and Forecasting*, **19**: 358-376.



PANG, H., Fu, G. & Lu, C. Structure of the Potential Vorticity of an Explosive Cyclone over the Eastern Asian Region in Late November 2013. *J. Ocean Univ. China* 21, 253–263 (2022). <https://doi.org/10.1007/s11802-022-4787-7>

SHAPIRO, M. A., 1988 & D. Keyser, 1990: Fronts, jet streams and the tropopause. *Extratropical Cyclones, The Erik Palmén Memorial Volume*, C. W. Newton and E. O. Holopainen, Eds., Amer. Meteor. Soc., 167–191.

SCHULTZ, D. M., & Keyser, D. (2021). Antecedents for the Shapiro–Keyser Cyclone Model in the Bergen School Literature, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 102(2), E383-E398. Retrieved Oct 13, 2022, from <https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/102/2/BAMS-D-20-0078.1.xml>.

SINCLAIR, M.R. (1997) Objective identification of cyclones and their circulation intensity, and climatology. *Weather and Forecasting* 12:595–612. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(1997\)012<0595:OIOCAT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(1997)012<0595:OIOCAT>2.0.CO;2).

The WFO Gaylord Science Corner (January 2010). Potential Vorticity: A Different Perspective, v. 3. NOAA.

WERNLI, H., & Davies, H. C. (1997). A Lagrangian-based analysis of extratropical cyclones. I: The method and some applications. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 123, 467-489.

WU, L., & Wang, B. (2000). A Potential Vorticity Tendency Diagnostic Approach for Tropical Cyclone Motion, *Monthly Weather Review*, 128(6), 1899-1911. Retrieved Feb 11, 2023, from [https://journals.ametsoc.org/view/journals/mwre/128/6/1520-0493\\_2000\\_128\\_1899\\_apvtda\\_2.0.co\\_2.xml](https://journals.ametsoc.org/view/journals/mwre/128/6/1520-0493_2000_128_1899_apvtda_2.0.co_2.xml)