



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Ambiente associado à gênese do ciclone Yakecan em maio de 2022 no Oceano Atlântico Sul

Isis da Rocha Plum Ferreira¹, Michelle Simões Reboita², Luiz Felipe Gozzo³

¹Graduanda em Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI), Av. BPS, 1303, Pinheirinho, CEP 37500-903, Itajubá, Minas Gerais. isisferreira85@gmail.com. ²Dra. em Meteorologia, Professora e Pesquisadora no Instituto de Recursos Naturais - UNIFEI, reboita@unifei.edu.br. ³Dr. em Meteorologia, Professor e Pesquisador na Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Departamento de Física e Meteorologia Av. Eng. Luiz Edmundo Carrijo Coube, 14-01 Bauru, SP, BR 17033-360, luiz.gozzo@unesp.br.

Artigo recebido em 13/12/2024 e aceito em 05/09/2025

RESUMO

No mês de maio de 2022 um ciclone ocorrido no sudoeste do oceano Atlântico Sul, ao adquirir características de subtropical, recebeu o nome de Yakecan pela Marinha do Brasil. Como há pouca ocorrência de ciclones subtropicais no Atlântico Sul, quando esses sistemas são registrados, é necessário estudos que investiguem os processos físicos associados à sua gênese. Diante disso, o presente estudo, através da utilização da reanálise ERA5, descreve o ambiente que favoreceu a gênese e desenvolvimento do ciclone Yakecan. A análise dos campos de pressão ao nível médio do mar (PNMM) e vento em 850 hPa indicam que, às 1200 Z do dia 16 de maio de 2022, a junção de dois ciclones no Atlântico Sul deram origem a um novo sistema que foi o precursor do Yakecan. Nesse horário, o ciclone ainda não era subtropical, já que o parâmetro de assimetria térmica não cumpria o limiar estabelecido na classificação de sistema subtropical. Entretanto, das 1800 Z do dia 16 às 1800 Z do dia 19, o sistema foi classificado como subtropical. O ambiente em que ocorreu a junção dos dois ciclones foi marcado por fraca baroclinia, portanto, com fraco cisalhamento vertical do vento horizontal (200-850 hPa). Isso favoreceu a organização da convecção e desenvolvimento do sistema subtropical.

Palavras-chave: ciclone subtropical, processos diabáticos, Atlântico Sul.

Environment associated with the genesis of Cyclone Yakecan in May 2022 in the South Atlantic

ABSTRACT

In May 2022, a cyclone that formed over the southwestern South Atlantic Ocean developed subtropical characteristics and was named Yakecan by the Brazilian Navy. Given the rarity of subtropical cyclones in this region, events like this warrant detailed investigation into the physical processes behind their formation. This study analyzes the environmental conditions that favored the genesis and development of Yakecan, using data from the ERA5 reanalysis. Analysis of mean sea level pressure (MSLP) and 850 hPa wind fields revealed that, at 1200 Z on May 16, 2022, the interaction and subsequent merger of two cyclonic systems over the South Atlantic led to the formation of a new cyclone, which later evolved into Yakecan. At that point, the system had not yet acquired subtropical features, as the thermal asymmetry parameter remained below the threshold for classification. However, from 1800 Z on May 16 to 1800 Z on May 19, the system displayed clear subtropical characteristics. The region where the cyclones merged was marked by weak baroclinicity and weak vertical 850-200 hPa wind shear, conditions that favored the organization of convection and the development of the subtropical cyclone.

Keywords: subtropical cyclone, diabatic processes, South Atlantic.

Introdução

O setor sudoeste do oceano Atlântico Sul é local de gênese de diferentes tipos de ciclones de escala sinótica, isto é, de sistemas com centro de baixa pressão que possuem diâmetro da ordem de 10^3 km (Reboita et al., 2024a). Os ciclones extratropicais, que têm energia associada aos gradientes horizontais de temperatura do ar em baixos níveis da atmosfera, são o tipo mais comum. Os ciclones tropicais, cuja principal fonte de energia é a transferência de fluxos de calor latente e sensível do mar para o ar, são raros; até hoje foram apenas três documentados a partir da era satelital: Catarina (McTaggart-Cowan et al., 2006), Iba (Reboita et al., 2021) e Akará (Reboita et al., 2024b). Já os ciclones subtropicais, que compartilham características dos extratropicais e tropicais, são mais frequentes do que os tropicais e menos do que os extratropicais (Reboita et al., 2024a).

Os ciclones de escala sinótica podem ter gênese em um dos três tipos mencionados e decair com características desse mesmo tipo ou podem evoluir (transicionar) de um tipo ao outro. Por exemplo, um ciclone pode ter gênese como extratropical e transicionar para subtropical decaindo nesse tipo ou ainda evoluir para tropical ou retornar para o tipo extratropical. Essa transição de tipos é conhecida como *continuum* do espaço de fase dos ciclones (Beven II, 1997; Hart, 2003).

No sudoeste do oceano Atlântico Sul, os ciclones subtropicais apresentam frequência média anual de 7-8 sistemas e o verão, seguido do outono, são as estações do ano preferenciais desses sistemas (Gozzo et al., 2014; de Jesus et al., 2022).

As ciclogêneses subtropicais estão associadas com a presença de cavados ou *cutoff lows* em médios e altos níveis da atmosfera (da Rocha et al., 2019; Reboita et al., 2019). Esses sistemas contribuem para a ocorrência de movimentos ascendentes na atmosfera, levando a queda da pressão e, conseqüente, desenvolvimento da circulação atmosférica em baixos níveis. Além disso, muitas vezes atuam enfraquecendo a circulação de médios e altos níveis, o que terá um papel importante na organização dos sistemas subtropicais, como discutido adiante.

Outros dois processos físicos importantes para a gênese e/ou intensificação dos ciclones subtropicais no Atlântico Sul é a (1) convergência de umidade na região da ciclogênese e a (2) transferência vertical de fluxos turbulentos de calor latente e sensível do oceano para a atmosfera. Com relação ao processo (1), a umidade é transportada para a região do ciclone tanto pelos ventos do setor

oeste do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) quanto do interior do continente pelo jato de baixos níveis (Gozzo et al., 2017; Reboita et al., 2018; Pérez-Alarcon et al., 2024). No processo (2), à medida que os ventos se intensificam próximo à superfície, contribuem para aumentar a transferência mar-ar dos fluxos turbulentos de calor latente e sensível. O calor latente armazenado no vapor d'água condensa, liberando calor latente de condensação, aquecendo as parcelas de ar que se tornam mais instáveis e ascendem ainda mais. Isso implica em divergência nos níveis altos da atmosfera, em que as parcelas de ar deixam a coluna atmosférica, favorecendo o aprofundamento da baixa pressão em superfície.

No processo (2), há um mecanismo de *feedback*, pois quanto mais intenso forem os ventos em baixos níveis da atmosfera, maior será a transferência vertical de fluxos turbulentos mar-ar e mais energia é liberada no processo de condensação. Esse mecanismo é descrito pela teoria *wind-induced surface heat exchange* (WISHE; Emanuel 1986). Como, em geral, o ambiente em que os ciclones subtropicais se desenvolvem possui fraco cisalhamento vertical do vento horizontal entre 200 e 850 hPa (Reboita et al., 2018; Ribeiro et al., 2023), principalmente quando da ocorrência de *cutoff lows*, a convecção pode se organizar mais facilmente. Assim, com os fluxos turbulentos transferindo mais umidade para a atmosfera (teoria WISHE), a condensação é facilitada e há contribuição para o desenvolvimento do sistema em superfície (Emanuel et al., 2024).

No Atlântico Sul, Reboita et al. (2022) descreveram um processo de transição de ciclone extratropical para subtropical. À medida que a seclusão quente de um ciclone extratropical se acoplou com uma *cutoff low* em médios/altos níveis, o cisalhamento vertical do vento horizontal enfraqueceu e a convecção que estava alimentada pelos intensos fluxos turbulentos mar-ar se tornou mais organizada. Isso levou à ocorrência do ciclone subtropical Raoni. Nesse mesmo estudo, os autores mostraram através de experimento numérico que na ausência de fluxos turbulentos mar-ar, o ciclone desenvolvido seria mais fraco comparado ao observado.

Emanuel et al. (2024) analisaram vários estudos de caso de ciclones que se assemelham com tropicais e, assim, como da Rocha et al. (2019) mostraram que esses sistemas, mesmo em diferentes bacias oceânicas, possuem morfologias e estruturas que se assemelham. Entretanto, os ciclones subtropicais são distintos das ciclogêneses tropicais pelo fato de que não há intensidade

potencial (vide Emanuel (1986) para maiores detalhes) no ambiente pré-ciclogênese, mas essa é gerada localmente no decorrer do desenvolvimento dos ciclones. Devido a isso e, também, ao fato de que os ciclones subtropicais recebem diferentes nomes dependendo da bacia oceânica onde ocorrem, Emanuel et al. (2024) sugerem usar uma nomenclatura única para os ciclones subtropicais que é *CYCLones from Locally Originating Potential intensity* (CYCLOPs).

Em Ribeiro et al. (2023) é apresentado o índice de potencial de gênese formulado por Emanuel e Nolan (2004). Foi mostrado que os ciclones subtropicais se formam num ambiente pré-ciclogênese com valores diferenciados do índice do potencial de gênese, variando de ~0 a mais de 20. Em outras palavras, o índice do potencial de gênese não mostra padrão nas ciclogêneses subtropicais.

Após a ocorrência do ciclone subtropical Anita em 2010 (Dias Pinto et al., 2013), a Marinha do Brasil criou uma lista de nomes para atribuir aos sistemas subtropicais e tropicais que ocorressem nas águas oceânicas de sua responsabilidade. Além disso, imediatamente após a ocorrência de um desses sistemas, o Centro de Hidrografia da Marinha do Brasil (DHM) publica um relatório descrevendo as características do ciclone, incluindo a estrutura térmica baseada nos diagramas de fase elaborados com saídas de modelos atmosféricos e disponíveis no sítio <https://moe.met.fsu.edu/cyclonephase/>.

Como as análises realizadas pelo DHM são em tempo quase real, dados mais refinados como a reanálise ERA5 (Soci et al., 2024) ainda não estão disponíveis, o que leva à necessidade de estudos posteriores sobre os casos ocorridos. De fato, o próprio DHM (2022) apresenta nos relatórios a seguinte nota "... O documento não encerra os estudos sobre o fenômeno, devendo servir de motivação e fonte para produção científica...".

Entre os dias 16 e 17 de maio de 2022 a costa do sul do Brasil foi afetada por um ciclone subtropical que recebeu a denominação de Yakecan pelo DHM (2022). Esse ciclone causou ventos de cerca de 100 km h^{-1} ($\sim 28 \text{ m s}^{-1}$) no dia 16 de maio na costa do Rio Grande do Sul e Santa Catarina e, no dia 17, com as condições de mau tempo, um barco virou em Porto Alegre (RS) ceifando a vida de um pescador (CNN, 2022).

Diante do exposto e sabendo-se que os ciclones subtropicais causam ventos intensos próximos à superfície e que esses sistemas não são muito frequentes no oceano Atlântico Sul, torna-se importante a descrição dos casos que ocorrem para um melhor entendimento dos processos físicos a

eles associados. Portanto, o objetivo do presente estudo é descrever as características sinóticas e dinâmicas que conduziram ao processo de gênese do ciclone subtropical Yakecan ocorrido no sudoeste do oceano Atlântico Sul no mês de maio de 2022.

Material e métodos

Área de Estudo e Dados

A área de estudo compreende o sudoeste do oceano Atlântico Sul, entre as coordenadas 10°S e 60°S e 90°W e 20°W .

Para os dias 15 a 20 de maio de 2022, foram obtidas variáveis em superfície (componentes zonal e meridional do vento a 10 m, temperatura a 2 m, temperatura da superfície do mar, pressão ao nível médio do mar e fluxos de calor latente e sensível) e em níveis verticais em coordenadas de pressão (geopotencial, temperatura, componentes zonal e meridional do vento, velocidade vertical e umidade específica) da reanálise ERA5 do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF; Soci et al., 2024). Esses dados possuem resolução horizontal de $0,25^{\circ}$ e foram obtidos para os horários sinóticos-padrão: 0000, 0600, 1200 e 1800 Z. Também foram obtidos dados do satélite GOES-16 (NOAA) referentes ao canal 14 (infravermelho) na banda de $10,35 \text{ }\mu\text{m}$, disponíveis em: <https://ftp.cptec.inpe.br/goes/goes16/retangular>.

Campos Sinóticos

Para o estudo do ciclone que será denominado de Yakecan foram elaborados mapas mostrando as seguintes variáveis atmosféricas: pressão ao nível médio do mar (PNMM), vorticidade relativa a 10 m de altura, ventos em 850 hPa, espessura da camada 500-1000 hPa e jatos em 250 hPa.

Características Básicas do Ciclone

Para definição da trajetória do ciclone, primeiro se realizou uma análise visual dos campos de PNMM e vento em 850 hPa. Na sequência, foram identificadas as coordenadas geográficas (latitude e longitude) do ponto de grade que apresentou a menor pressão atmosférica no centro do ciclone a cada 6 horas. Essa frequência temporal é a recomendada para estudo de sistemas de escala sinótica como indicado por Hoskins e Hodges (2005), Cardoso et al. (2025) e outros autores.

As coordenadas geográficas bem como a pressão central do ciclone são apresentadas na **Tabela 1**. De posse dessas informações é possível

calcular a distância percorrida a cada intervalo de 6 horas, bem como a distância total do ciclone, usando a fórmula de Haversine (Maria et al., 2020):

$$D = 2 \cdot R \cdot \arcsin \sqrt{\sin^2 \frac{\theta_2 - \theta_1}{2} + \cos(\theta_1) \cdot \cos(\theta_2) \cdot \sin^2 \left(\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2} \right)}$$

(eq. 1)

onde D é a distância em quilômetros, R é o raio aproximado da Terra (6378 km), θ_2 é a latitude do ponto 2, θ_1 é a latitude do ponto 1, λ_2 é a longitude do ponto 2, λ_1 é a longitude do ponto 1, com as latitudes e longitudes em graus. Com a distância percorrida e conhecendo-se o tempo decorrido, também é possível calcular a velocidade média do sistema.

Diagrama de Fase

A definição das fases (ou tipos) que um ciclone assume ao longo do seu ciclo de vida pode ser obtida com a metodologia do *Cyclone Phase Space* (CPS) desenvolvida por Hart (2003). Esta metodologia só requer o conhecimento da trajetória do ciclone (**Tabela 1**) e da altura geopotencial em três níveis verticais em coordenadas de pressão (900, 600 e 300 hPa) para o cálculo de três parâmetros: simetria térmica (B), vento térmico em baixos níveis ($-|V_T^L|$) e vento térmico em altos níveis ($-|V_T^U|$).

B é usado para definir se um ciclone é frontal (assimétrico) ou não-frontal (simétrico):

$$B = h \left[\left(\frac{Z_{600hPa} - Z_{900hPa}}{R} \right) - \left(\frac{Z_{600hPa} - Z_{900hPa}}{L} \right) \right]$$

(eq. 2)

onde Z é a altura geopotencial em metros, h assume valor positivo para o Hemisfério Norte e negativo para o Hemisfério Sul, e R e L representam o lado direito e esquerdo, respectivamente, do círculo com raio de 500 km obtido a partir do centro do ciclone.

Para ciclones extratropicais, B assume valores bem maiores do que 10, enquanto que para ciclones tropicais B é menor do que 10. Para os ciclones subtropicais no Atlântico Sul, Gozzo et al. (2014) verificaram que B é normalmente menor do que 25.

O vento térmico representa a diferença vetorial do vento geostrófico entre duas superfícies com pressão constante. No caso do CPS, é utilizada uma formulação que é proporcional à magnitude do vento térmico. Por isso, o símbolo do vento térmico é apresentado em módulo. Basicamente, no CPS, após a definição do raio de 500 km a partir do centro do ciclone se calcula a diferença da altura geopotencial por nível de pressão entre o local a 500 km do centro e o centro. Depois é realizada a

diferença entre os níveis 300-600 hPa que fornece o $-|V_T^U|$ e entre 600 e 900 hPa que fornece o $-|V_T^L|$.

Ciclones extratropicais são caracterizados por $-|V_T^L|$ e $-|V_T^U| < 0$, ciclones tropicais por $-|V_T^L|$ e $-|V_T^U| > 0$ e ciclones subtropicais no oceano Atlântico Sul assumem valores de $-|V_T^L| > -50$ e $-|V_T^U| < -10$ (Gozzo et al., 2014). Com esses limiares, a cada passo de tempo do ciclone, pode-se identificar a sua fase.

Para facilitar a visualização dos resultados se desenham dois diagramas: um que apresenta no eixo x o parâmetro $-|V_T^L|$ e no eixo y, B e o outro que no eixo x também mostra o parâmetro $-|V_T^L|$ enquanto no eixo y é mostrado o parâmetro $-|V_T^U|$.

Evolução Temporal de Variáveis Oceânicas e Atmosféricas

Para analisar a evolução dos campos oceânicos e atmosféricos, definiu-se uma caixa com 5° a partir do centro do ciclone, seguindo o sistema a cada passo de tempo. Foram calculadas médias na área (caixa) da PNMM, intensidade do vento a 10 m, da temperatura do ar a 2 m, temperatura da superfície do mar e sua anomalia em relação à climatologia obtida para o mês de maio entre 2002 a 2021, fluxos turbulentos de calor total, que corresponde a soma dos fluxos de calor latente e calor sensível e cisalhamento vertical do vento horizontal entre 200 e 850 hPa. Os resultados são apresentados a partir das 0000 Z do dia 16 de maio para incluir o ambiente pré-ciclogênese.

Processos Diabáticos

Para entender a contribuição dos processos diabáticos (liberação de calor latente por convecção e fluxos de calor latente e sensível da superfície) no ciclone subtropical, foi utilizada a equação da energia termodinâmica. O resíduo dessa equação é assumido como termo diabático.

A equação da energia termodinâmica (eq. 3) relaciona a mudança da energia interna de um sistema com o calor adicionado ou retirado do sistema e o trabalho por ele, ou sobre ele, realizado. Para sistemas que não se encontram em equilíbrio, a equação pode ser escrita como (Holton e Hakim, 2013):

$$c_p \frac{DT}{Dt} - \alpha \frac{Dp}{Dt} = J \quad (\text{eq. 3})$$

onde c_p é o calor específico à pressão constante ($1004 \text{ J K}^{-1} \text{ kg}^{-1}$), T é a temperatura do ar (K), p é a pressão atmosférica (Pa), α é o volume específico ($\text{m}^3 \text{ kg}^{-1}$), e $J = \frac{\partial H}{\partial T}$ é a taxa de aquecimento diabático. No termo J, H representa a soma dos processos de liberação de calor latente por

convecção, fluxos turbulentos de calor sensível e latente da superfície, que são as fontes diabáticas de calor, e também dos processos radiativos.

Para sistemas isobáricos, pode-se expandir a derivada total $\frac{DT}{Dt}$ da eq. 3 em variação local e advectiva e considerar $\frac{Dp}{Dt} = \omega$. Assim, a equação pode ser reescrita como:

$$c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + \omega \frac{\partial T}{\partial p} \right) - \alpha \omega = J$$

Rearranjando os termos e considerando que $\alpha = \frac{RT}{p}$, tem-se:

$$c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \omega c_p \frac{\partial T}{\partial p} - \frac{RT}{p} \omega = J$$

Dividindo os termos da equação prévia por c_p e rearranjando alguns termos (eq. 4), se torna possível definir um parâmetro de estabilidade estática, S_p , no sistema isobárico (eq. 5).

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) - \omega \left(\frac{RT}{c_p p} - \frac{\partial T}{\partial p} \right) = \frac{J}{c_p} \quad (\text{eq. 4})$$

$$S_p \equiv \frac{RT}{c_p p} - \frac{\partial T}{\partial p} \quad (\text{eq. 5})$$

onde R é a constante dos gases para 1 kg de ar seco ($287 \text{ J K}^{-1} \text{ kg}^{-1}$).

Portanto, a eq. 3 torna-se:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) - S_p \omega = \frac{J}{c_p} \quad (\text{eq. 6})$$

onde u e v representam, respectivamente, as componentes zonal e meridional do vento (m s^{-1}),

ω é a velocidade vertical (Pa s^{-1}) e S_p é o parâmetro de estabilidade estática no sistema isobárico.

Considerando a eq. 4, pode-se definir o termo que representa os movimentos verticais como:

$$S_w = \omega \frac{RT}{c_p p} - \omega \frac{\partial T}{\partial p} \quad (\text{eq. 7})$$

e o termo diabático como:

$$F_T = \frac{J}{c_p} = \frac{1}{c_p} \frac{\partial H}{\partial t} \quad (\text{eq. 8})$$

Usando as definições das eqs. 7 e 8 e reorganizando os termos da eq. 6, a equação da energia termodinâmica pode ser reescrita como:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\vec{V}_H \cdot \vec{\nabla}_p T + S_w + F_T \quad (\text{eq. 9})$$

onde $\vec{V}_H$ representa o vento horizontal, $\vec{\nabla}_p$ é o operador nabla calculado em uma superfície isobárica, $\frac{\partial T}{\partial t}$ é a variação local de temperatura, S_w é o termo que representa os movimentos verticais (eq. 7) e F_T é o termo diabático (eq. 8).

Reescrevendo eq. 9 em coordenadas esféricas, tem-se:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = - \left(\frac{u}{a \cos \varphi} \frac{\partial T}{\partial \lambda} + \frac{v}{a} \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right) - \omega \left(\frac{\partial T}{\partial p} - \frac{\alpha}{c_p} \right) + F_T \quad (\text{eq. 10})$$

No presente estudo, F_T é o termo de interesse e que será apresentado nos resultados.

Tabela 1 Características básicas do ciclone Yakecan.

Data	Hora (Z)	Latitude	Longitude	Pressão central (hPa)	Distância percorrida (km)	Velocidade média (km/h)
16/05/2022	1200	35°S	43°W	1006	0	0
16/05/2022	1800	37°S	43°W	1005	222,4	37
17/05/2022	0000	38°S	44°W	1002	141,9	24
17/05/2022	0600	39°S	47°W	998	283,7	47
17/05/2022	1200	36°S	51°W	998	485,5	81
17/05/2022	1800	34°S	51°W	997	222,4	37
18/05/2022	0000	32°S	50°W	999	241,1	40
18/05/2022	0600	30°S	48°W	998	292,9	49
18/05/2022	1200	28°S	46°W	997	295,4	49
18/05/2022	1800	27°S	45°W	1000	148,6	25
19/05/2022	0000	27°S	41°W	999	396,3	66
19/05/2022	0600	27°S	39°W	996	198,1	33
19/05/2022	1200	29°S	35°W	998	451,3	75
19/05/2022	1800	31°S	32°W	994	364,5	61
20/05/2022	0000	33°S	30°W	996	291,6	49
20/05/2022	0600	34°S	27°W	995	299,6	50
Total	90 horas				4.335,3	48

Resultados

Campos Atmosféricos

Na análise sinótica da PNMM, no dia 14 de maio de 2022 um ciclone se forma na costa sul da Argentina e migra anormalmente para norte enquanto no dia 15 um outro ciclone se forma, mas na costa do sudeste do Brasil e migra para sudeste (Figuras não mostradas). A presença dos dois centros de circulação ciclônica é mostrada na **Figura 1a** às 0600 Z do dia 16 de maio. Devido à alta resolução dos dados, ainda aparece um pequeno centro de circulação ligeiramente a nordeste do segundo centro de baixa (próximo a 40°W), não se configurando como um ciclone de escala sinótica.

Às 1200 Z do dia 16 de maio, os dois centros de circulação ciclônica se unem formando um único sistema de rotação (centrado em 32°S/46°W), que é bem configurado no vento em 850 hPa (**Figura 1b** e destaque). No mesmo horário, há uma extensa área com vorticidade relativa ciclônica (**Figura**

1f) coincidindo com o centro de rotação em 850 hPa. O ciclone proveniente da junção dos outros dois é considerado, no presente estudo, como o precursor do sistema subtropical Yakecan. Nos horários seguintes o ciclone se desloca em direção à costa do sul do Brasil (**Figura 1c,d,g,h**). A partir dessa análise é que foi definido o início do ciclone e a trajetória subsequente apresentada na **Tabela 1**.

No horário das 0600 Z do dia 16, o ciclone mais a sul já se encontra em oclusão (**Figura 2a**), pois não há linhas de espessura cruzando o centro do sistema e os jatos de altos níveis localizam-se a norte desse ciclone. Por outro lado, o ciclone mais a norte e afastado da costa encontra-se numa região com baroclinia (gradientes horizontais de temperatura, evidenciados pelas linhas de espessura e jato de altos níveis passando sobre o sistema em superfície). Na imagem de satélite, a nebulosidade associada a cada sistema é bem evidente e não se conecta (**Figura 2e**).

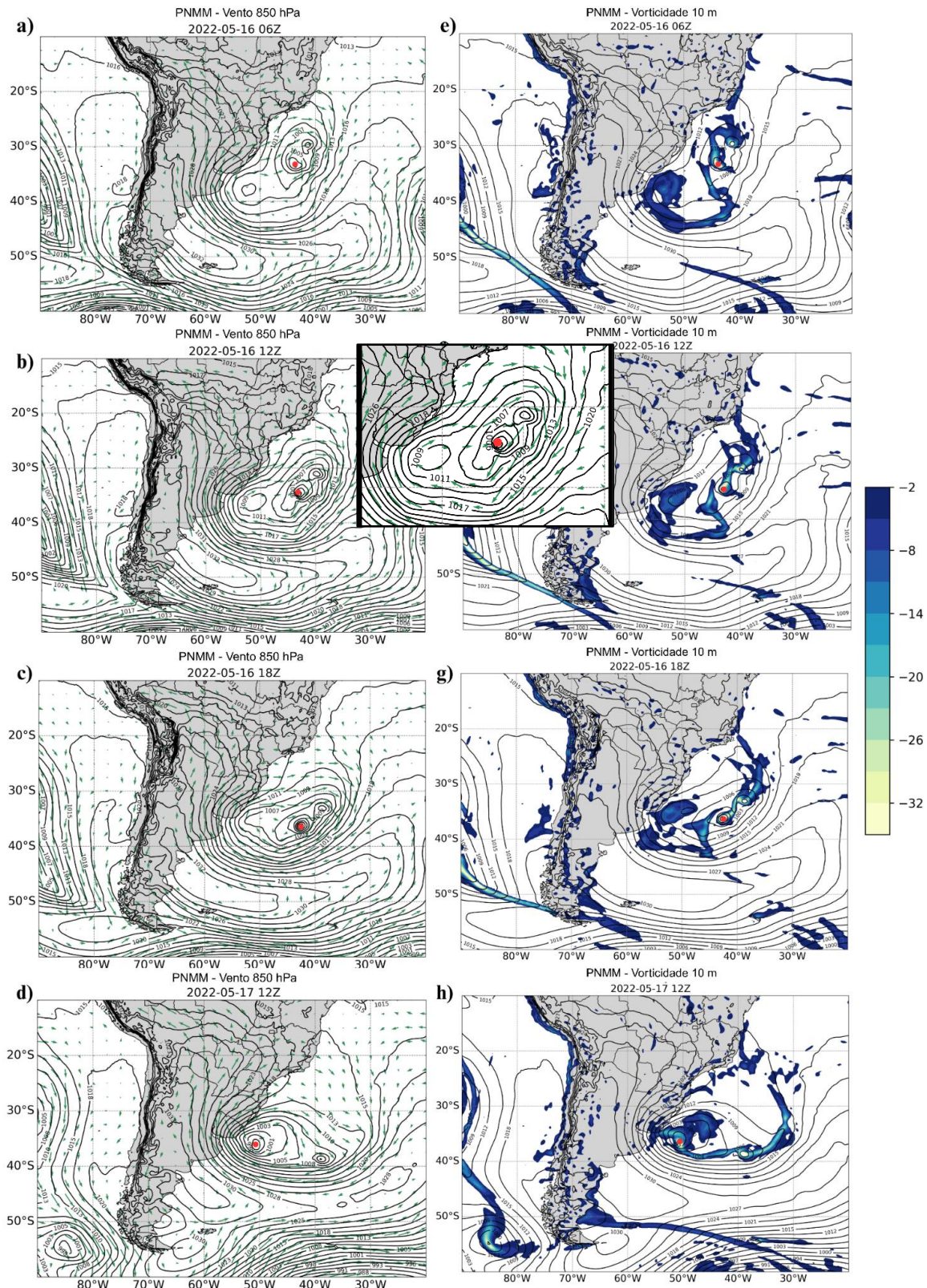


Figura 1 (a-d) pressão ao nível médio do mar (hPa; linhas pretas) e vento em 850 hPa (setas); (e-h) pressão ao nível médio do mar (hPa; linhas pretas) e vorticidade relativa a 10 metros de altura ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$; colorido). No horário das 1200 Z é mostrada uma ampliação da imagem (b) para destacar o núcleo único de circulação em 850 hPa. O centro do ciclone precursor e o Yakecan são indicados com o círculo vermelho preenchido.

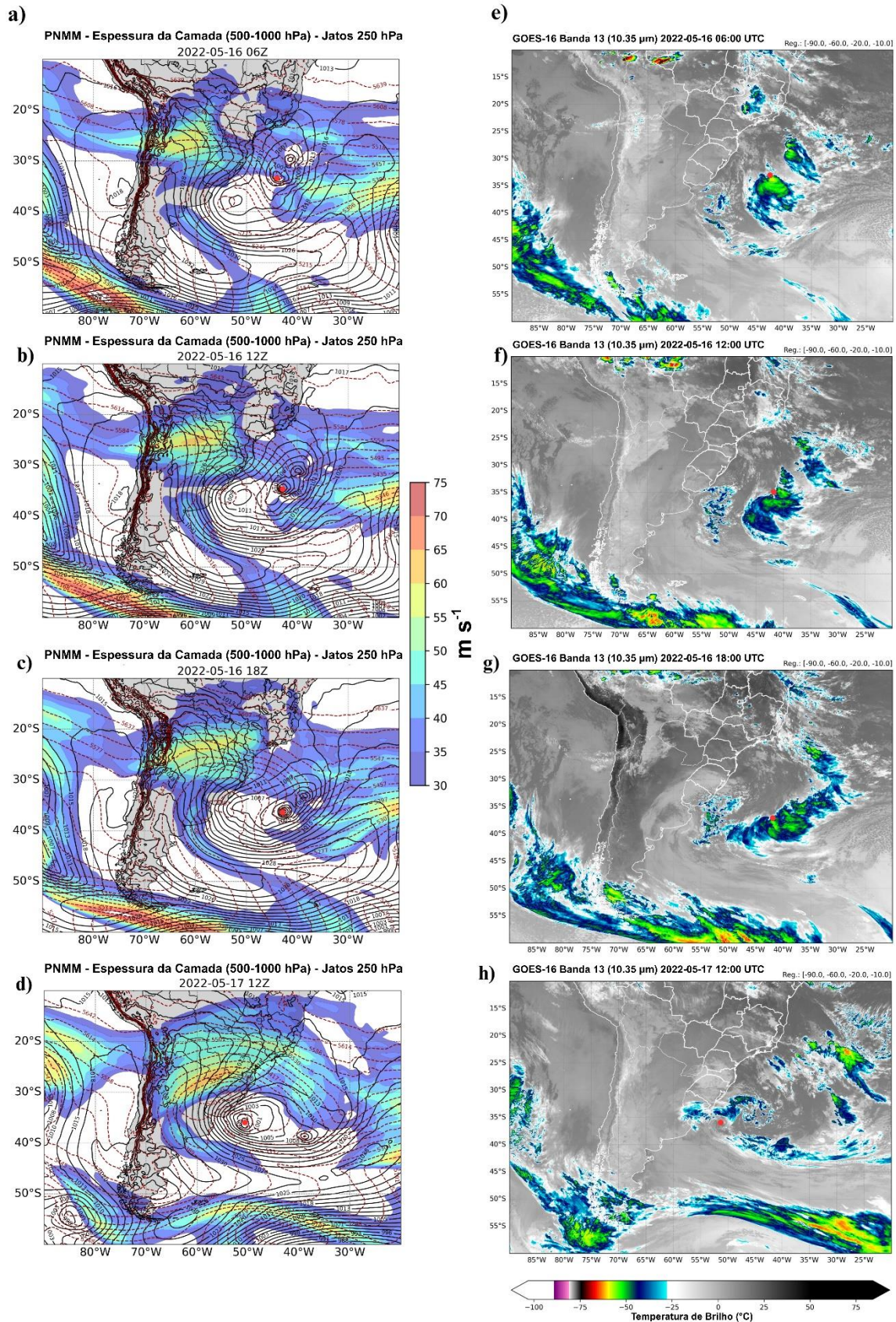


Figura 2 (a-d) pressão ao nível médio do mar (hPa; linhas pretas), espessura da camada 500-1000 hPa (m; linhas tracejadas) e intensidade do vento superior a 30 m s^{-1} em 250 hPa representando os jatos de altos níveis (colorido);

(e-h) imagem de satélite do GOES-16 na banda 13. O centro do ciclone precursor e o Yakecan são indicados com o círculo vermelho preenchido.

Às 1200 Z, quando a circulação em 850 hPa mostra apenas um centro de rotação, a maior parte desse centro se localiza numa região com baroclinia enfraquecida (Figura 2b) e a nebulosidade dos dois centros começa a querer se conectar, Figura 2f). A nebulosidade pode ser utilizada como *proxy* para identificar que há processos diabáticos ocorrendo no sistema e que esses podem ter contribuição do ambiente com fraca baroclinia; essas são características ideais para ciclones subtropicais conforme descrito em vários estudos (Reboita et al., 2024a).

Às 1800 Z do dia 16, as isóbaras aparecem mais organizadas e mostrando um único centro de baixa pressão e já deslocado para oeste em relação ao horário prévio (Figura 2c). Com o passar do tempo, o sistema se aproxima mais da costa e continua sob área de fraca baroclinia (Figura 2).

Embora a análise aqui apresentada já indique que o ciclone em estudo não tenha características de extratropical, devido à baroclinia fraca e/ou ausente, é importante realizar uma análise detalhada da estrutura térmica do ciclone, para confirmar que o sistema pode ser classificado como subtropical, ou até mesmo avaliar se ele pode ter sido de natureza tropical em algum momento de seu ciclo de vida (Reboita et al., 2022, 2024b).

Características Gerais do Ciclone

Uma vez definido que o ciclone em estudo é proveniente da junção de dois sistemas prévios, foi realizada a identificação da sua trajetória da gênese à ciclólise (Tabela 1 e Figura 3). O ciclone em estudo tem deslocamento inicialmente para sul e, na sequência, para oeste, nordeste e sudeste, o que não é o padrão dos ciclones nessa região, que na maioria das vezes apresentam trajetória para leste ou sudeste (Mendes et al., 2010) sem realizar um deslocamento na forma de espiral (Figura 3).

O ciclone percorreu 4.335,3 km em 3,75 dias (90 horas), com velocidade média de 48 km h⁻¹ (13,3 m s⁻¹) (Tabela 1). Exceto pela velocidade média, que é ligeiramente maior, os demais valores são concordantes com os mostrados para os casos prévios de ciclones

subtropicais que receberam nome no Atlântico Sul (Ribeiro et al., 2023). Por outro lado, a distância percorrida e velocidade média do Yakecan são relativamente grandes quando comparadas à climatologia dos ciclones subtropicais no Atlântico Sul (Gozzo et al., 2014).

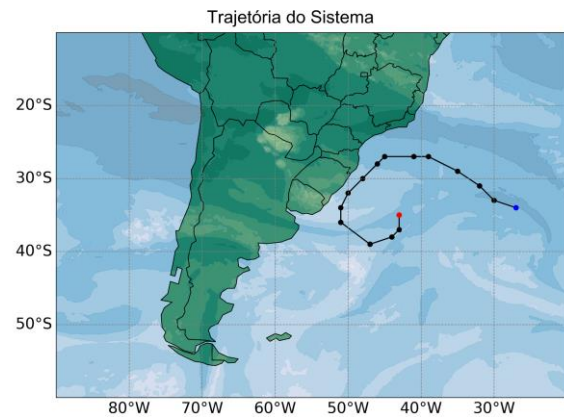


Figura 3 Trajetória do ciclone em estudo. O início da trajetória (35°S e 43°W), às 1200 Z do dia 16 de maio de 2022, foi representado pelo ponto vermelho e o decaimento (34°S e 27°W), às 0600 Z do dia 20 de maio, pelo ponto azul.

Fases do Ciclone

Às 1200 Z do dia 16 de maio de 2022, seguindo os critérios de Gozzo et al. (2014), o ciclone ainda não se classifica como subtropical, pois o parâmetro de simetria térmica excede ao limiar de classificação (B foi maior que 25; Figura 4a). Entretanto, em uma análise global da Figura 4a,b e, com base, na seção Campos Atmosféricos pode-se assumir que o sistema se tornará subtropical. De fato, a partir das 1800 Z do dia 16, o CPS indica que o sistema é do tipo subtropical e essa característica perdura até às 1800 Z do dia 19. Após esse horário o sistema adquire fase extratropical.

A classificação do sistema como subtropical entre às 1800 Z do dia 16 e 1800 Z do dia 19 difere ligeiramente do DHM, que indicou que o sistema perdurou como subtropical entre 0000 Z do dia 17 e 1200 Z do dia 19 de maio. Portanto, no presente estudo, o sistema com características subtropicais é 12 horas mais duradouro do que nas análises do DHM (DHM, 2022). Como mencionado na introdução, o DHM usa dados em tempo quase

real, o que torna mais limitada a quantidade de informação para as análises. Por isso, a necessidade de análises posteriores quando há

disponibilidade de maior número de bases de dados.

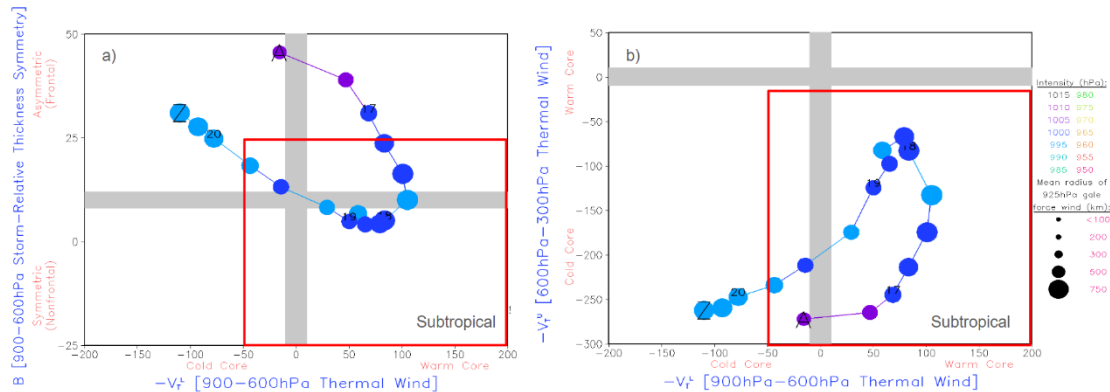


Figura 4 a) Diagrama de fase de B e $-|V_T^L|$ e b) diagrama de fase de $-|V_T^L|$ e $-|V_T^U|$. O quadrado vermelho indica a área do diagrama onde ciclones são considerados subtropicais, segundo os critérios de Gozzo et al. (2014) aplicados ao oceano Atlântico Sul. Nos diagramas, a letra A indica o início do sistema e a letra Z, o fim. Os círculos indicam a fase do ciclone a cada 6 horas. A cor associada a esses círculos representa a pressão e o tamanho, o raio de atuação dos ventos, conforme escala mostrada à direita do painel (b).

Evolução das Variáveis Oceânicas e Atmosféricas e Processos Diabáticos

A **Figura 5** mostra a evolução média das variáveis atmosféricas seguindo a trajetória do ciclone. A média foi calculada numa área com raio de 5° a partir do centro do ciclone desde às 0000 Z do dia 16 de maio para mostrar o período pré-ciclogênese (nesse caso foi usado o mesmo local da gênese para o cálculo das médias). À medida que a pressão atmosférica atinge os valores mais baixos (isto é, quando o ciclone se torna mais forte), os ventos a 10 m de altura se intensificam (**Figura 5a**). Esse período coincide com o que o ciclone se desloca em direção à costa (**Figuras 2c,d**). Às 1200 Z do dia 17, o ciclone com centro em 36°S e 51°W , produz ventos que atingem $\sim 13,5 \text{ m s}^{-1}$.

O ciclone se desenvolve em local com temperatura da superfície do mar mais quente do que a do ar, indicando que a atmosfera ganha energia do oceano, não só através de fluxos de calor latente, mas também através de fluxos de calor sensível (**Figura 6**). Mesmo sendo mais quente do que o ar, a temperatura da superfície do mar apresentava uma ligeira anomalia negativa no início do sistema, que se intensifica para $-0,5^\circ\text{C}$ às 0000 Z do dia 18 de maio e enfraquece nos tempos seguintes (**Figura 5b**). Este cenário de desenvolvimento do Yakecan ilustra a condição que ciclones podem adquirir características subtropicais ou tropicais mesmo

sobre águas relativamente frias, desde que haja uma forçante termodinâmica intensa em médios e altos níveis (McTaggart-Cowan et al., 2015). No caso do Yakecan, a coluna atmosférica em médios/altos níveis é suficientemente fria, associada, a uma baixa despreendida, *cutoff low*, como mostrado na **Figura 7**. Mesmo com a anomalia de TSM mais fria, o oceano está mais quente do que atmosfera (**Figura 6**); assim têm-se camadas quentes em baixos níveis da atmosfera e frias acima, característica importante para gerar instabilidade, ou seja, intensificar movimentos ascendentes na atmosfera (Ahrens & Henson, 2021).

A evolução temporal do cisalhamento vertical do vento entre 200 e 850 hPa mostra valores negativos ao longo de todo o ciclo de vida do ciclone, indicando que os ventos em altos níveis da atmosfera estão mais fracos dos que os em superfície (**Figura 5c**). Essa situação, desencadeada pela presença da *cutoff low* (**Figura 7**), é favorável para a convecção se tornar organizada. Aqui é importante mencionar que convecção, nesse contexto, corresponde aos movimentos ascendentes que transportam ar quente e úmido dos baixos para os altos níveis troposféricos. Haverá, portanto, condensação em níveis elevados, com consequente liberação de calor latente e formação de nebulosidade.

No dia 18 maio, quando o cisalhamento torna-se ainda mais negativo, os fluxos de calor total adquirem valores máximos do mar para o ar, chegando a quase 400 W m^{-2} , que é quase o dobro do valor climatológico na região (Silva & Reboita, 2021). Como o ciclone já estava organizado, os ventos, que excediam $9,5 \text{ m s}^{-1}$ (**Figura 5a**), podem ter contribuído para o aumento dos fluxos, já que há uma relação entre fluxos e ventos (Zeng et al. 1998).

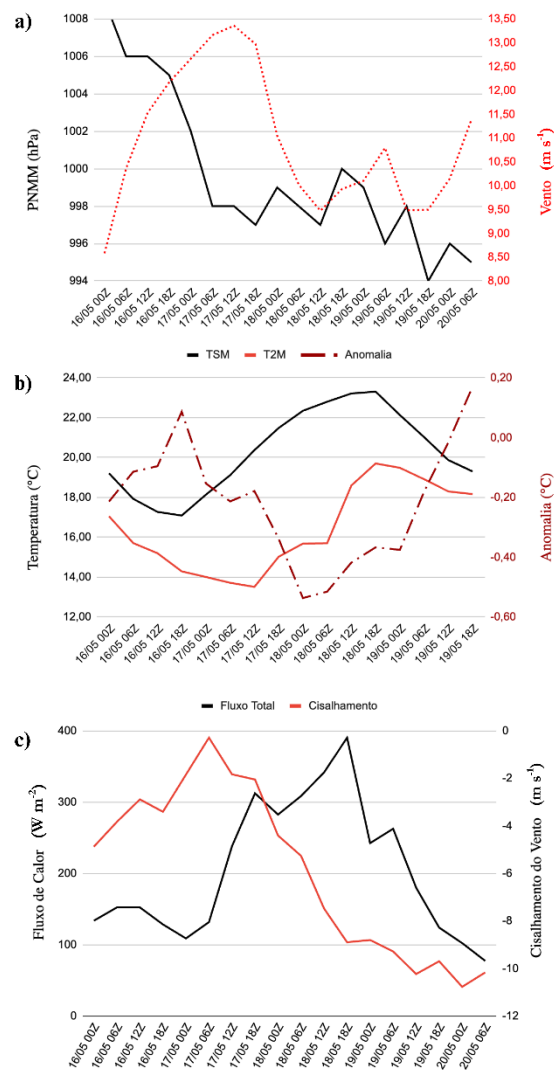


Figura 5 Média na caixa com raio de 5° a partir do centro do ciclone da (a) pressão ao nível médio do mar (hPa, linha preta contínua) e vento a 10 m (m s^{-1} ; linha vermelha tracejada), (b) da temperatura do ar a 2 m ($^\circ\text{C}$, linha vermelha), temperatura da superfície do mar ($^\circ\text{C}$, linha preta) e anomalia da temperatura da

superfície do mar em relação ao mês de maio do período de 2002 a 2021 ($^\circ\text{C}$, linha vinho tracejada) e (c) fluxos turbulentos de calor total (calor latente + calor sensível, W m^{-2}) e cisalhamento vertical do vento horizontal entre 200 e 850 hPa (m s^{-1}).

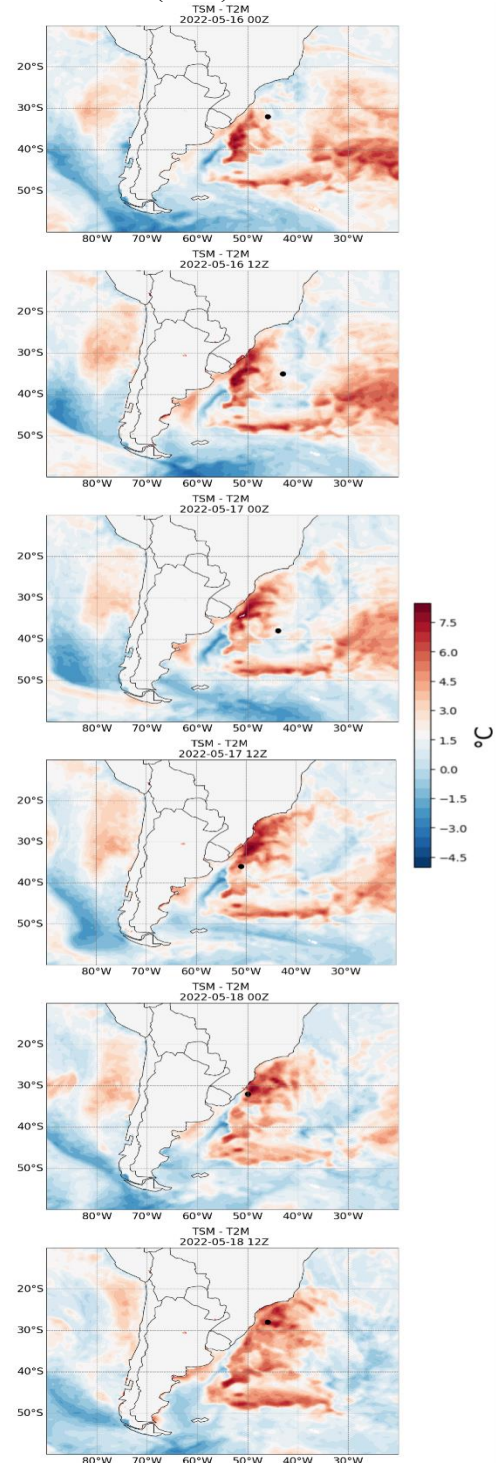


Figura 6 Diferença entre TSM e temperatura a 2 m de altura ($^\circ\text{C}$). O ponto indica o centro do ciclone.

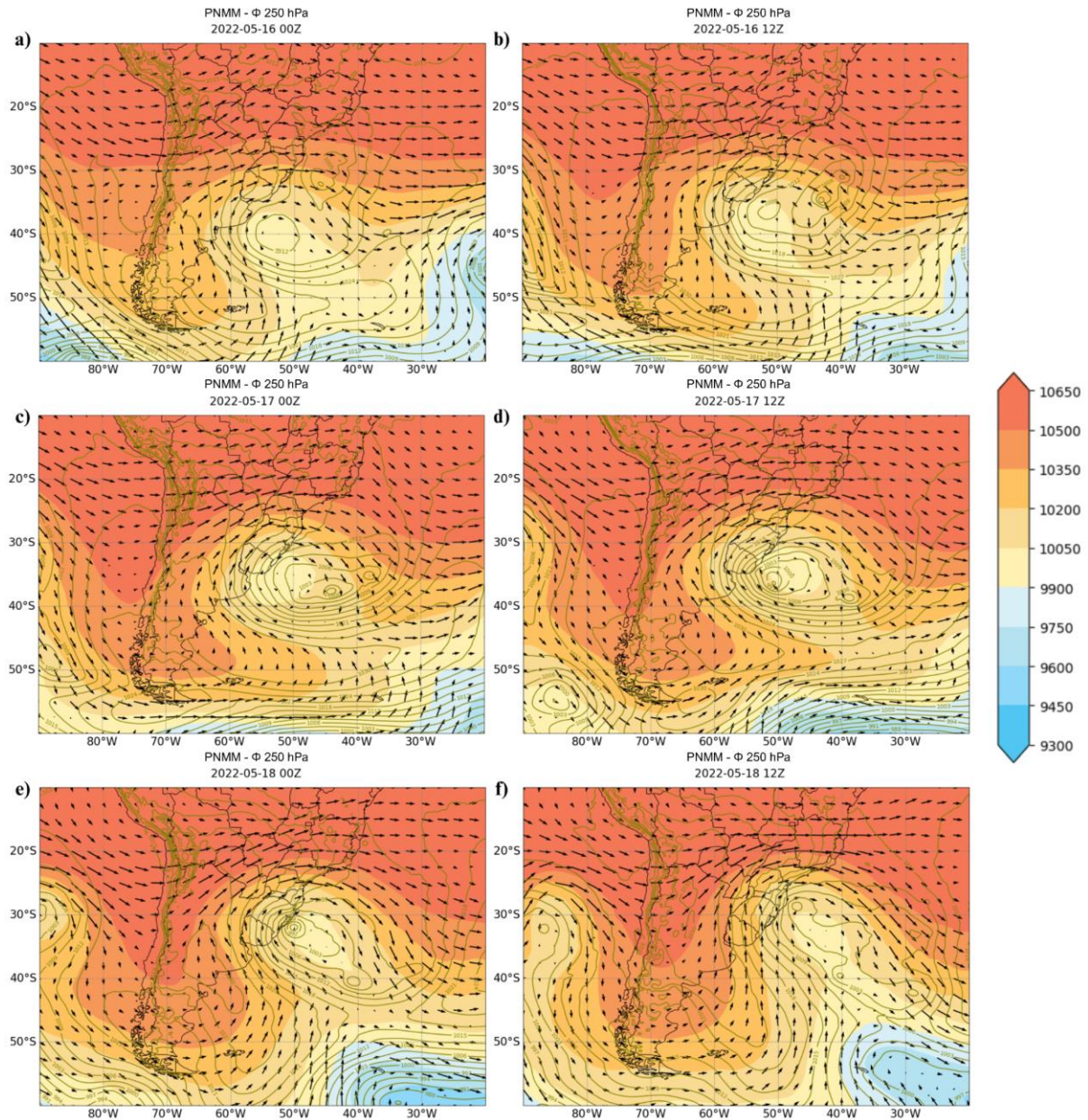


Figura 7 Altura geopotencial (m; em colorido) e ventos (m s^{-1} , setas) em 250 hPa e pressão ao nível médio do mar (hPa, linhas contínuas) do dia 16 ao 18 de maio de 2022 em intervalos de 12 h.

Os valores negativos do cisalhamento vertical do vento são explicados através da configuração da altura geopotencial em 250 hPa, que mostra às 0000 Z do dia 16 uma crista estendendo-se do oceano Pacífico ao sul da Argentina (**Figura 7**). Com o passar do tempo a crista se amplifica em direção ao oceano Atlântico deixando um núcleo de ar mais frio aprisionado a norte. Essa configuração é bem visível no dia 17 (**Figura 7c-d**). Esse padrão descrito configura um tipo similar a bloqueio atmosférico do tipo dipolo, em que há uma baixa localizada a norte de uma área de alta pressão. Essa situação atmosférica favorece a

redução do cisalhamento vertical do vento horizontal, como mostrado na **Figura 5c** e, isso, é um ambiente propício para a convecção se organizar/manter e, consequentemente, o sistema subtropical. Em geral, esse é o ambiente documentado na ocorrência de ciclones subtropicais no Atlântico Sul, tanto dos que têm transição para subtropical, como o Raoni (Reboita et al., 2022), quanto os que têm gênese com essa estrutura, como o Anita (Dias Pinto et al., 2013; Reboita et al., 2019; Ribeiro et al., 2023). O processo de ciclogênese que pode ser diferente entre esses ciclones, mas a presença de um padrão em níveis médios e altos

que causa o enfraquecimento do escoamento zonal é o ponto crucial para a evolução desses sistemas (da Rocha et al., 2019). A **Figura 7** pode ser comparada com a Figura 4 de Dias Pinto et al. (2013). Em ambos os estudos é evidente o padrão tipo bloqueio atmosférico.

Além de favorecer o fraco cisalhamento vertical do vento horizontal, o padrão tipo bloqueio também é responsável pelo deslocamento incomum do ciclone. O deslocamento para oeste ocorre pelo padrão “engrenagem”, isto é, a circulação horária da baixa desprendida em médios/altos níveis (com centro em aproximadamente 35° S-50° W) se combina com a anti-horária da alta, mudando o sentido dos ventos de oeste para leste (**Figura 7c-d**). Processo similar ao descrito foi responsável pelo deslocamento para oeste do

ciclone tropical Catarina em março de 2004 (McTaggart et al., 2006).

Já, no dia 18, quando a baixa desprendida começa a se desconfigurar, o ciclone em superfície passa a ser conduzido para nordeste pela circulação do setor oeste do cavado em altos níveis (**Figura 7c-d**).

O período pré e ciclogênese do Yakecan é caracterizado pelo máximo aquecimento diabático, que tem sinal mais intenso na média troposfera (700-500 hPa) (**Figura 8**). O aquecimento diabático, embora mais enfraquecido entre os dias 17 e 18 de maio, ainda é relevante (acima de 4K/dia). Esse aquecimento associado com a presença da baixa fria desprendida em médios níveis, promove um ambiente propício para forte convecção e, consequentemente, para a manutenção do ciclone subtropical.

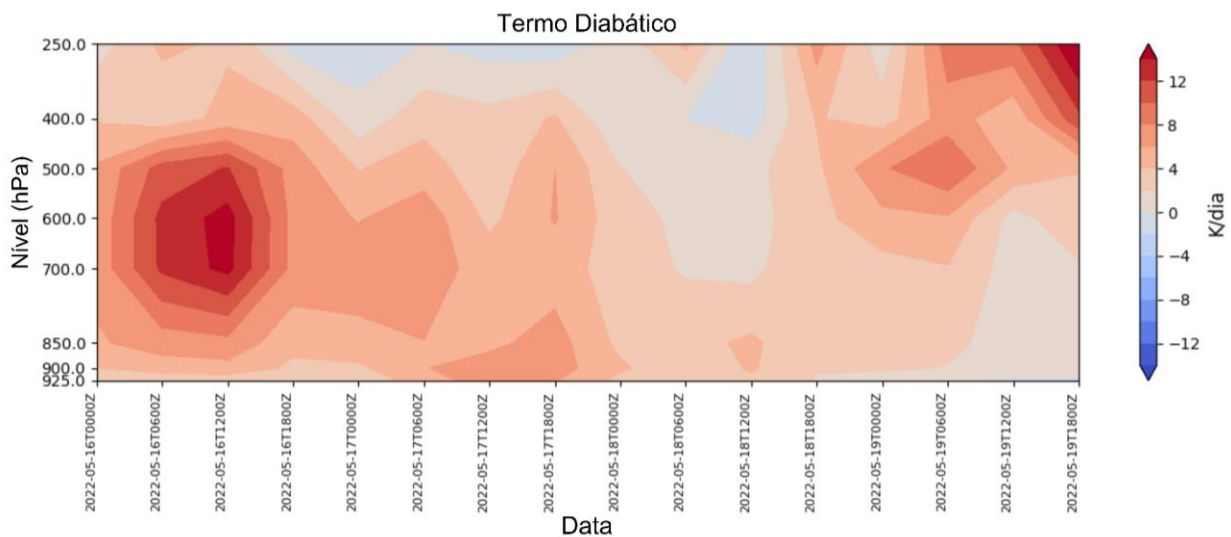


Figura 8 Seção vertical da média do termo diabático (resíduo) da equação termodinâmica acompanhando o ciclone ao longo do seu ciclo de vida. Em cada passo de tempo e nível vertical é realizada a média do resíduo numa área com raio de 5° a partir do centro do ciclone.

Conclusões

Como os ciclones subtropicais são pouco frequentes no oceano Atlântico Sul, os casos registrados necessitam de estudos para que se entenda cada vez melhor os processos físicos responsáveis pela sua gênese e desenvolvimento. No presente trabalho, o objetivo foi a análise da gênese do ciclone Yakecan ocorrido em maio de 2022. Os principais resultados do estudo são destacados abaixo:

Gênese: O Yakecan se formou às 1200 Z do dia 16 de maio de 2022 pela junção de outros dois

ciclones pré-existent no oceano Atlântico Sul. Inicialmente, um cavado em médios e altos níveis da atmosfera propiciou o fraco cisalhamento vertical do vento entre 200 e 850 hPa que, somado ao aquecimento diabático da atmosfera, são os elementos essenciais para a organização do ciclone precursor do Yakecan.

Evolução temporal: Com o passar do tempo, uma crista se prolongando do sul da América do Sul para o oceano Atlântico fez com que o ar frio do cavado em médios e altos níveis ficasse aprisionado a norte, dando origem a um padrão de bloqueio do tipo dipolo (baixa no lado equatorial e

alta no lado polar). Durante a ocorrência desse sistema, os ventos de oeste são enfraquecidos e até mesmo mudam de direção, o que também acaba afetando a circulação em baixos níveis da atmosfera. Isso se reflete na trajetória anômala do Yakecan para oeste.

Estrutura térmica: A análise da estrutura térmica do ciclone mostrou que o sistema assumiu fase subtropical entre 1800 Z do dia 16 e 1800 Z do dia 19, depois transicionou para extratropical, decaindo com essa característica. Nesse estudo, ressalta-se que ciclones subtropicais não necessitam de anomalias positivas de temperatura da superfície do mar para ocorrerem.

Destaca-se que na ocorrência de outros sistemas subtropicais ou tropicais no Atlântico Sul, estudos que analisem a gênese e desenvolvimento são importantes para adicionar conhecimento teórico ao assunto. Também se ressalta que o Yakecan, comparado a outros sistemas com fase subtropical no oceano Atlântico, não foi de fácil estudo devido a sua formação estar associada com outros dois sistemas pré-existentes.

É importante reconhecer algumas limitações do presente estudo. Os resultados baseiam-se em dados da reanálise ERA5, que embora de alta qualidade, podem conter incertezas relacionadas ao processo de assimilação de dados, especialmente em regiões oceânicas com menor cobertura observacional. Isso pode causar erros tanto na PNMM quanto na velocidade do vento, levando a uma sub ou superestimação da intensidade dos ciclones. Ademais, mesmo os produtos derivados de satélites possuem incertezas associadas à calibração de sensores e métodos de estimativa indireta de variáveis meteorológicas. Assim, sugere-se que estudos futuros, além de utilizarem dados de diferentes fontes, também façam uso de modelos atmosféricos em alta resolução para aprimorar a compreensão desses sistemas.

Por fim, em termos de implicações práticas, destaca-se que a análise do ambiente de gênese e desenvolvimento de ciclones subtropicais, como o Yakecan, é fundamental para aprimorar a previsibilidade desses sistemas e apoiar as práticas da meteorologia operacional, fortalecendo a capacidade de resposta aos riscos associados.

Agradecimentos

Os autores agradecem aos centros que disponibilizaram os dados usados no estudo e ao CNPq, FAPEMIG e UNIFEI pelo apoio financeiro.

Referências

- Ahrens, C. D, Henson, R. (2021). *Meteorology today: An introduction to weather, climate and the environment*. 13ed., Cengage Learning, Inc.
- Beven II, J. L., (1997). A study of three hybrid storms. Preprints, 22d Conf. on Hurricanes and Tropical Meteorology, Fort Collins, CO, American Meteorological Society 645, 646.
- Cardoso, A. A., Porfírio da Rocha, R., Simões Reboita, M. et. al. (2025). Performance of the medium and high horizontal resolution models from HighResMIP-CMIP6 in simulating synoptic-scale cyclones over South America. *Climate Dynamics*, 63, 83. <https://doi.org/10.1007/s00382-024-07579-3>
- CNN, (2022). *Entenda como se formou o ciclone Yakecan, que atingiu o Sul do Brasil*. Disponível: <https://www.cnnbrasil.com.br/nacional/entenda-como-se-formou-o-ciclone-yakecan-que-atingiu-o-sul-do-brasil/>. Acesso: 01 set. 2025.
- da Rocha, R. P., Reboita, M. S., Gozzo, L. F., Dutra, L. M. M., De Jesus, E. M., (2019). Subtropical cyclones over the oceanic basins: a review. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1436, 138-156. <https://doi.org/10.1111/nyas.13927>
- de Jesus, E. M., da Rocha, R. P., Crespo, N. M., Reboita, M. S., Gozzo, L. F., (2022). Future climate trends of subtropical cyclones in the South Atlantic basin in an ensemble of global and regional projections. *Climate Dynamics* 58(3), 1221-1236. <https://doi.org/10.1007/s00382-021-05958-8>
- DHM, Centro de Hidrografia da Marinha do Brasil, (2022). *Tempestade Subtropical Yakecan: Relatório Pós-Evento*. Niterói. Disponível: https://www.marinha.mil.br/chm/sites/www.marinha.mil.br/chm/files/arquivos/relatorio_pos_evento_yakecan.pdf. Acesso: 30 set. 2024.
- Dias Pinto, J. R., Reboita, M. S., da Rocha, R. P., (2013). Synoptic and dynamical analysis of subtropical cyclone Anita (2010) and its potential for tropical transition over the South Atlantic Ocean. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 118(19), 10,870-10,883. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50830>
- Emanuel, K. A., (1986). An air-sea interaction theory for tropical cyclones. Part I: Steady-state maintenance. *Journal of Atmospheric Sciences*, 43, 585-605. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1986\)043%3C0585:AASITF%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1986)043%3C0585:AASITF%3E2.0.CO;2)

- Emanuel, K., Alberti, T., Bourdin, S., Camargo, S. J., Faranda, D., Flaounas, M., ... & Romero, R. (2024). A Unified Framework for Surface Flux-Driven Cyclones Outside the Tropics. *EGUsphere*, 1-44. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2024-3387>
- Gozzo, L. F., da Rocha, R. P., Reboita, M. S., Sugahara, S., (2014). Subtropical cyclones over the southwestern South Atlantic: Climatological aspects and case study. *Journal of Climate*, 27, 8543-8562. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00149.1>
- Gozzo, L. F., da Rocha, R. P., Gimeno, L., & Drumond, A., (2017). Climatology and numerical case study of moisture sources associated with subtropical cyclogenesis over the southwestern Atlantic Ocean. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122, 5636-5653. <https://doi.org/10.1002/2016JD025764>
- Hart, R. E., (2003). A cyclone phase space derived from thermal wind and thermal asymmetry. *Monthly weather review*, 131, 585-616. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2003\)131%3C0585:ACPSDF%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2003)131%3C0585:ACPSDF%3E2.0.CO;2)
- Hoskins, B. J., & Hodges, K. I. (2005). A new perspective on Southern Hemisphere storm tracks. *Journal of climate*, 18(20), 4108-4129. <https://doi.org/10.1175/JCLI3570.1>
- Maria, E. et al., (2020). Measure distance locating nearest public facilities using Haversine and Euclidean Methods. *Journal of Physics: Conference Series* 2020, 1450, 012080.
- Mctaggart-Cowan, R., Bosart, L. F., Davis, C. A., Atallah, E. H., Gyakum, J. R., Emanuel, K. A., (2006). Analysis of hurricane Catarina (2004). *Monthly Weather Review* 134(11), 3029-3053. <https://doi.org/10.1175/MWR3330.1>.
- McTaggart-Cowan, R., Davies, E. L., Fairman, J. G., Galarneau, T. J., Schultz, D. M., (2015). Revisiting the 26.5 C sea surface temperature threshold for tropical cyclone development. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96(11), 1929-1943.
- Mendes, D., Souza, E. P., Marengo, J. A., & Mendes, M. C., (2010). Climatology of extratropical cyclones over the South American-southern oceans sector. *Theoretical and applied climatology*, 100, 239-250.
- Pérez-Alarcón, A., Coll-Hidalgo, P., Fernández-Alvarez, J. C., Sorí, R., da Rocha, R. P., Reboita, M. S., ... Gimeno, L., (2024). Quantifying the related precipitation and moisture sources in the lifecycle of subtropical cyclones in the South Atlantic basin. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 150(762), 2765-2782. <https://doi.org/10.1002/qj.4734>.
- Reboita, M. S., Gozzo, L. F., Crespo, N. M., Custodio, M. S., Lucyrio, V., De Jesus, E. M., da Rocha, R. P., (2022). From a Shapiro-Keyser extratropical cyclone to the subtropical cyclone Raoni: An unusual winter synoptic situation over the South Atlantic Ocean. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 148(747), 2991-3009. <https://doi.org/10.1002/qj.4349>
- Reboita, M. S., Gan, M. A., da Rocha, R. P., & Custódio, I. S., (2017). Ciclones em Superfície nas Latitudes Austrais: Parte II Estudo de Casos. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 32(4), 509-542. <https://doi.org/10.1590/0102-7786324002>
- Reboita, M. S., da Rocha, R. P., Oliveira, D. M., (2018). Key features and adverse weather of the named subtropical cyclones over the Southwestern South Atlantic Ocean. *Atmosphere* 10(1), 6. <https://doi.org/10.3390/atmos10010006>
- Reboita, M. S., Crespo, N. M., Dutra, L. M. M., Silva, B. A., Capucin, B. C., da Rocha, R. P., (2021). Iba: the first pure tropical cyclogenesis over the western South Atlantic Ocean. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 126, e2020JD033431. <https://doi.org/10.1029/2020JD033431>
- Reboita, M. S., Crespo, N. M., da Rocha, R. P., & Gozzo, L. F., (2024a). Synoptic-Scale Cyclones Affecting South America and the South Atlantic Ocean. *Oxford Research Encyclopedia of Climate Science*. <https://doi.org/10.1093/acrefore/9780190228620.013.970>
- Reboita, M. S., Nogueira, N. C. D. O., Gomes, I. B. D. S., Palma, L. L. D. C., & da Rocha, R. P., (2024b). Assessment of a Tropical Transition over the Southwestern South Atlantic Ocean: The Case of Cyclone Akará. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(11), 1934. <https://doi.org/10.3390/jmse12111934>
- Ribeiro, J. G., Paz, G., Reboita, M. S., & Gozzo, L. (2023). Análise do Índice do Potencial de Gênese em Ciclones Subtropicais na Costa do Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 16, 2832-2857.
- Silva, B. A., Reboita, M. S., (2021). Climatologia do Índice do Potencial de Gênese de Ciclones Tropicais nos Oceanos Adjacentes à América do Sul. *Anuário do Instituto de Geociências*, 44.

Soci, C., Hersbach, H., Simmons, A., Poli, P., Bell, B., Berrisford, P., ... & Thépaut, J. N., (2024). The ERA5 global reanalysis from 1940 to 2022. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 150(764), 4014-4048. <https://doi.org/10.1002/qj.4803>

Zeng, X., Zhao, M., & Dickinson, R. E., (1998). Intercomparison of bulk aerodynamic

algorithms for the computation of sea surface fluxes using TOGA COARE and TAO data. *Journal of Climate*, 11(10), 2628-2644. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1998\)011%3C2628:IOBAAF%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1998)011%3C2628:IOBAAF%3E2.0.CO;2)