

Universidade de São Paulo
Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas
Departamento de Ciências Atmosféricas

Julio Cesar de Castro Rocha

Extremos de onda causados por ciclones no
Oceano Atlântico Sudoeste:
distribuição de casos e balanço de calor e
vorticidade dos sistemas geradores

São Paulo
2022

Julio Cesar de Castro Rocha

Extremos de onda causados por ciclones no
Oceano Atlântico Sudoeste:
distribuição de casos e balanço de calor e
vorticidade dos sistemas geradores

Versão Corrigida. O original encontra-se disponível na Unidade.

Dissertação apresentada ao Departamento de Ciências Atmosféricas do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Meteorologia.

Área de Concentração: Meteorologia
Orientador: Prof. Dr. Ricardo de Camargo

São Paulo

2022

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo na publicação

Serviço de Biblioteca e Documentação

Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo

ROCHA, Julio

Extremos de onda causados por ciclones no Oceano Atlântico Sudoeste: distribuição de casos e balanço de calor e vorticidade dos sistemas geradores / Julio Rocha; orientador, Ricardo de Camargo. – 2022

111 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Programa de Pós-Graduação em Meteorologia, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022

1 Eventos extremos 2. Balanço de calor. 3. Balanço de vorticidade. I. Camargo, Ricardo de, orient. II. Universidade de São Paulo. Programa de Pós-Graduação em Meteorologia. III. Título.

CDD 551.55

CDU 551.5



COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO

LISTA DE ASSINATURAS

MESTRANDO: Julio Cesar de Castro Rocha

PROGRAMA: Meteorologia

TÍTULO: "Extremos de onda causados por ciclones no Oceano Atlântico Sudoeste: distribuição de casos e balanço de calor e vorticidade dos sistemas geradores"

MEMBROS DA COMISSÃO JULGADORA:

Prof. Dr. Ricardo de Camargo - orientador
IAG/USP
(por videoconferência)

Documento assinado digitalmente



FABIOLA VALERIA BARRETO TEIXEIRA
Data: 13/12/2022 16:04:03-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Profa. Dra. Fabíola Valéria Barreto Teixeira
CIAARA/MB
(por videoconferência)

Dra. Carolina Barnez Gramcianinov
(pós-doc Hereon Institute - Germany)
(por videoconferência)

MESTRANDO:

Julio Cesar de Castro Rocha
(por videoconferência)

São Paulo, 12 de dezembro de 2022.

Ao Soberano Criador.

AGRADECIMENTO

Ao Soberano Deus, que me capacita, e me sustenta.

À minha amada esposa Suelen, pelo apoio e amor além da medida, meu vento constante à cada jarda navegada.

Aos meus queridos pais, Sarah e Julio, pelo incentivo diante dos desafios, por meio dos quais estendo o agradecimento aos demais familiares e amigos.

Ao ilustríssimo Professor Ricardo de Camargo, meu grande Mestre, orientador, professor e condutor; por todos os ensinamentos, pela paciência, pela vibração, e por me mostrar os caminhos através da nossa fenomenal e sinuosa atmosfera.

Ao prezado Comandante Marcus Vinícius, meu orientador técnico, por tornar os primeiros passos no mundo novo tão mais atingíveis, quanto possível.

À caríssima Doutora Carolina Gramcianinov, pelo empenho e diligência, que serviram de norte no decorrer no percurso.

Ao estimado Professor Pedro Dias, por me mostrar o real significado de amor ao aprendizado e às ciências atmosféricas.

Aos nobres Mestres Rosmeri Rocha, Maria Assunção Dias, Ricardo Hallak, Rita Youne, pelo oceano de conhecimento transmitido com brilhantismo e eficiência.

Aos valorosos Comandante Hansen e Professora Fabíola Teixeira, por me fazer olhar para o céu e nunca mais querer parar de olhar.

Aos bravos companheiros de viagem Natália Pillar, Rodrigo Tecchio, Matheus Bonjour, Renan Pimentel, Carolina Monteiro, Cristielen Perceval, Danilo Souza, Nilson Silva, Maria Luiza Kovalski, Paulo Silva, Renan Godoy e Natália Silva, por ter dividido o peso dessa árdua jornada.

À vultosa Universidade de São Paulo, pela calorosa recepção, pela excelência, profissionalismo e pelas ferramentas oferecidas a fim de assegurar uma travessia serena.

À briosa Marinha do Brasil, que através de suas incansáveis Organizações Militares e seus abnegados Militares e Servidores, dedicou os meios necessários e ampla confiança ao bom cumprimento do dever.

*“É a regulagem das velas, e não o sopro do vento,
Que determina o rumo a ser seguido.”*

(WILCOX, 1916, p. 51, tradução nossa)

RESUMO

ROCHA, J. **Extremos de onda causados por ciclones no Oceano Atlântico Sudoeste**. 2022. Dissertação (Mestrado) em Meteorologia Sinótica - Departamento de Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

As atividades humanas voltadas para o oceano são afetadas sobremaneira pelos fatores ambientais. À medida que a expansão econômica avança em direção ao mar, busca-se continuamente compreender seus impactos, a fim de dirimir incertezas relacionadas ao tempo. Este trabalho tem o propósito de estudar os ciclones extratropicais formados na porção oeste do Oceano Atlântico Sul, mais propensa a formação de ondas extremas, de acordo com as condições atmosféricas de larga escala. Para tal, serão utilizados dados de hindcast do ERA5 e campos atmosféricos, para acompanhar a evolução dos sistemas na região de ciclogênese, com foco nos eventos mais extremos registrados nos últimos 42 anos. Os eventos serão selecionados dentro do domínio e agrupados em faixas de latitude, bem como em termos do setor de ocorrência do extremo em relação ao centro do ciclone. Observando os eventos, nota-se que existe um padrão entre a distribuição dos eventos extremos em relação ao ciclone, variando entre as estações do ano, e também pelas faixas de latitude. Nota-se ainda uma dependência dos extremos com a velocidade de deslocamento do ciclone. Com o propósito de investigar os processos de intensificação dos ciclones até a máxima altura significativa das ondas geradas por eles, foram realizados os balanços de calor e vorticidade de todos os ciclones que geraram extremos de onda entre 1979 e 2020, tanto durante o instante da máxima altura significativa quanto na fase de intensificação. Atenção especial foi dada a dois casos com características distintas, um de inverno e um de verão, bem como subdivisões por estações do ano, por quadrantes e também pelo setor de localização do extremo em relação ao centro do ciclone. O balanço nos mostrou o importante papel dentre outros termos, da advecção de temperatura e vorticidade, e aquecimento diabático; e a variação vertical destes, além da distribuição desigual nos quadrantes, para a geração de extremos de ondas nos diferentes setores e estações do ano.

Palavras-chave: Extremo de Ondas. Ciclone. Balanço de Calor. Balanço de Vorticidade. Oceano Atlântico sudoeste.

ABSTRACT

ROCHA, J. **Wave extremes caused by cyclones in the Southwest Atlantic Ocean.**

2022. Dissertação (Mestrado) em Meteorologia Sinótica - Departamento de Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

Human activities over the ocean are greatly affected by environmental factors. As economic expansion advances towards the sea, there is a continuous search to understand its impacts, in order to resolve weather-related uncertainties. This work aims to study the region of extratropical cyclones, formed in the western portion of the South Atlantic Ocean, most prone to the formation of extreme waves, according to the large-scale atmospheric conditions. To this end, ERA5 hindcast data and atmospheric fields will be used in order to follow the evolution of systems in the cyclogenesis region, focusing on the most extreme events recorded in the last 42 years. Events will be selected within the domain, and grouped into latitude bands and sectorally, in relation to cyclones. Observing the events, it is noted that there is a pattern between the distribution of extreme events in relation to the cyclone, varying between the seasons, and by latitude bands. It is also noted a clear dependence of the extremes with respect to the cyclone displacement speed. In order to investigate the processes of cyclone intensification up to the maximum significant height of the waves generated by them, heat and vorticity budgets were performed for all cyclones that generated wave extremes between 1979 and 2020, both during the instant of maximum significant height and in the intensification phase. Special attention was given to two cases with different characteristics, one in winter and one in summer, as well as subdivisions by seasons, by quadrants and also by the sector where the extreme is located in relation to the center of the cyclone. The heat and vorticity budgets showed us the important role of the advection of temperature and vorticity, and diabatic heating, among other terms; moreover the vertical variation of these terms, in addition to the unequal distribution in the quadrants, for the generation and intensification of extreme waves in the different sectors and seasons.

Keywords: Extreme wave. Cyclone. Heat Budget. Vorticity Budget. Southwest Atlantic Ocean.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 – Esquema das três situações com ondas extremas (hachurado) relacionadas a ciclones extratropicais. (a) ondas ocorrem atrás da frente fria, (b) a diante da frente fria na zona de convergência dos ventos e (c) ao longo da frente quente no setor quente do ciclone. As frentes quente e fria estão representadas de acordo com as convenções meteorológicas. Os centros de baixa e alta pressão estão representados por “L” e “H” respectivamente.....24
- Figura 2 – Trajetória correspondente ao (a) Padrão II, e (b) III. Que juntos correspondem a 80% dos eventos extremos.....25
- Figura 3 – METAREA V com o domínio demarcado. As faixas correspondem a área compreendida entre 55°W e 20°W e latitudes 20°S a 25°S, 25°S a 30°S e 30°S a 35°S.....31
- Figura 4 – Representação gráfica dos balanços de calor e vorticidade e das divisões em quadrantes dos ciclones. (a) reprodução da região 10° x 10° centrada na Baixa pressão indicada como “B” onde as marcas azuis representam os pontos onde os termos dos balanços são calculados. (b) O ponto azul representa a média de todos os pontos que é calculado para as demais camadas de pressão. (b) O mesmo é feito em separado para os quatro quadrantes centrados na baixa, e (d) o mesmo processo é refeito distinguindo os eventos de ondas extremas ocorridos em cada quadrante em separado.37
- Figura 5 – Exemplo de representação de cada termo dos balanços (a) em todos os quadrantes, (b) apenas no quadrante SW, e (c) no quadrante SW apenas dos ciclones que geraram extremos no mesmo quadrante. Cada linha corresponde a um ciclone e as cores indicam a intensidade do evento de ondas associado separadas pelos percentis 25%, 50% e 75%.....38
- Figura 6 – Exemplo de representação de cada termo dos balanços, agrupados pelas médias entre os percentis de 25%, 50% e 75%, (a) em todos os quadrantes, (b) apenas no quadrante SW, e (c) no quadrante SW apenas dos ciclones que geraram extremos no mesmo quadrante.....38
- Figura 7 – Gráfico de dispersão dos eventos extremos de (a, b, c) inverno (d, e, f) primavera, (g, h, i) verão e (j, k, l) outono, relacionando a altura significativa máxima com as variáveis (a, d, g, j) tamanho da pista e velocidade do vento a 10m; (b, e, h, k) período de picos velocidade do vento no ciclone a 10m; e (c, f, i, l) e tamanho do ciclone e velocidade de deslocamento.39
- Figura 8 – Velocidade de deslocamento do ciclone em relação a altura significativa máxima do evento, para (a) inverno, (b) primavera, (c) verão e (d) outono. A linha laranja tracejada corresponde ao valor médio sazonal da velocidade do ciclone, com o desvio padrão para mais e para menos representados pelas linhas pontilhadas.40
- Figura 9 – Velocidade de deslocamento do ciclone em relação à altura significativa máxima do evento, para todas as estações, separados pelas três faixas de latitude. A linha laranja tracejada corresponde ao valor médio sazonal por faixa de latitude da velocidade do ciclone, com o desvio padrão para mais e para menos representados pelas linhas pontilhadas.41

- Figura 10 – Estatísticas de (a, d, g, j) direções do vento a 10 m, das (b, e, i, k) ondas e do (c, f, h, l) setor do ciclone onde o extremo está localizado, para (a, b, c) inverno, (d, e, f) primavera, (g, h, i) verão e (j, k, l) outono.43
- Figura 11 – Histograma direcional de inverno de (a, d, g) direções do vento a 10 m, (b, e, h) ondas e do (c, f, i) setor do ciclone, para as três faixas de latitude, (a-c) 20° -25°S, (d-f) 25°-30°S e (g-i) 30°-35°S onde o extremo está localizado.45
- Figura 12 – Histograma direcional de primavera de (a, d, g) direções do vento a 10 m, (b, e, h) ondas e do (c, f, i) setor do ciclone, para as três faixas de latitude, (a-c) 20° -25°S, (d-f) 25°-30°S e (g-i) 30°-35°S onde o extremo está localizado.46
- Figura 13 – Histograma direcional de verão de (a, d, g) direções do vento a 10 m, (b, e, h) ondas e do (c, f, i) setor do ciclone, para as três faixas de latitude, (a-c) 20° -25°S, (d-f) 25°-30°S e (g-i) 30°-35°S onde o extremo está localizado.47
- Figura 14 – Histograma direcional de outono de (a, d, g) direções do vento a 10 m, (b, e, h) ondas e do (c, f, i) setor do ciclone, para as três faixas de latitude, (a-c) 20° -25°S, (d-f) 25°-30°S e (g-i) 30°-35°S onde o extremo está localizado.48
- Figura 15 – Distribuição de eventos em relação ao ciclone para (a) JJA, (b) SON, (c) DJF e (d) MMA, com a marcação do centro de massa do evento extremo relativa ao centro do ciclone indicada pelo ângulo, a distância do centro indica a altura significativa máxima do evento, a cor indica a velocidade deslocamento do ciclone e o diâmetro da circunferência, o tamanho da pista.49
- Figura 16 – Distribuição de eventos em relação ao ciclone para (a, e, i) JJA, (b, f, j) SON, (c, g, k) DJF e (d, h, l) MAM para as três faixas de latitude (a-d) 20°-25°S, (e-h) 25°-30°S e (i-l) 30°-35°S.50
- Figura 17 – Série temporal da pressão ao nível médio do mar no centro dos ciclones considerados, referente ao caso de (a) inverno em junho de 1984 e (b) verão ocorrido em dezembro de 2011. Os pontos vermelhos indicam o momento de máxima altura significativa, de 12,36 m e 7,14 m ocorridos às 9h do dia 27 e 8h do dia 12 respectivamente.54
- Figura 18 – Balanço de vorticidade do ciclone ocorrido no inverno de 1984, que gerou extremos no quadrante NW, durante cinco fases de maturação indicadas na legenda. Os termos do balanço são (a) vorticidade relativa (10^{-5} s^{-1}), (b) variação local de vorticidade relativa, (c) advecção horizontal de vorticidade absoluta, (d) advecção vertical de vorticidade relativa, (e) termo da inclinação/torção, (f) vorticidade relativa multiplicando divergência, (g) vorticidade planetária multiplicando divergência e (h) vorticidade residual. As unidades de (b)-(h) são 10^{-10} s^{-2}55
- Figura 19 – Balanço de calor do ciclone ocorrido no inverno de 1984, que gerou extremos no quadrante NW, durante cinco fases de maturação indicadas na legenda. Perfis verticais da (a) velocidade vertical (Pa s^{-1}), (b) tendência local de temperatura, (c) advecção horizontal de temperatura, (d) advecção vertical de temperatura, (e) termo adiabático, (f) estabilidade estática, (g) termo diabático/resíduo da equação da termodinâmica e (h) tendência local de temperatura menos advecção horizontal de temperatura. As unidades de (b)-(h) são K dia^{-1}56

Figura 20 – Altura significativa de onda e isolinha de pressão no instante de máxima altura significativa do evento de verão. O evento extremo está localizado próximo a uma região de convergência de ventos.....	57
Figura 21 – Balanço de vorticidade do ciclone ocorrido no verão de 2011, que gerou extremos no quadrante NE.	58
Figura 22 – Balanço de calor do ciclone ocorrido no verão de 2011, que gerou extremos no quadrante NE.	58
Figura 23 – Balanço de vorticidade (a-h) e calor (i-l) do quadrante NW do ciclone do inverno de 1984, com extremo no quadrante NW.	60
Figura 24 – Balanço de vorticidade (a-h) e calor (i-l) do quadrante NE do ciclone do verão de 2011, com extremo no quadrante NE.	62
Figura 25 – Representação do balanço por quadrantes e da esteira transportadora quente fornecendo calor e umidade para as camadas superiores.	63
Figura 26 – Balanço de calor do quadrante SE do ciclone do inverno de 1984, com extremo no quadrante NW.	64
Figura 27 – Balanço de calor do quadrante SE do ciclone do verão de 2011, com extremo no quadrante NE.	65
Figura 28 – Balanço de vorticidade do quadrante SE do ciclone do inverno de 1984, com extremo no quadrante NW.....	66
Figura 29 – Balanço de vorticidade do quadrante SE do ciclone do verão de 2011, com extremo no quadrante NE.	67
Figura 30 – Balanço de vorticidade de todos os ciclones associados a eventos extremos de inverno, durante o instante de máxima altura significativa. Os termos do balanço são (a) vorticidade relativa (10^{-3} s^{-1}), (b) variação local de vorticidade relativa, (c) advecção horizontal de vorticidade absoluta, (d) advecção vertical de vorticidade relativa, (e) termo da inclinação/torção, (f) vorticidade relativa multiplicando divergência, (g) vorticidade planetária multiplicando divergência e (h) vorticidade residual. As unidades de (b)-(h) são 10^{-10} s^{-2} . As cores verde, amarela, laranja e vermelha separam os percentis de 25%, 50% e 75% dentro dos eventos extremos.	70
Figura 31 – Balanço de vorticidade de todos os ciclones de (a-h) verão, (i) primavera e (j) outono. As cores verde, amarela, laranja e vermelha separam os percentis de 25%, 50% e 75% dentro dos eventos extremos.	71
Figura 32 – Balanço de calor de todos os ciclones, para as quatro estações do ano (a) inverno, (b) verão, (c) primavera e (d) outono. Os termos do balanço são: velocidade vertical (Pa s^{-1}), tendência local de temperatura, advecção horizontal de temperatura, advecção vertical de temperatura, termo adiabático, estabilidade estática, termo diabático/resíduo da equação da termodinâmica e tendência local de temperatura menos advecção horizontal de temperatura (demais unidades K dia^{-1}). As cores verde, amarela, laranja e vermelha separam os percentis de 25%, 50% e 75% dentro dos eventos extremos.º.	72

Figura 33 – Balanço de vorticidade de todos os ciclones para (a-h) inverno, (i) primavera, (j) verão e (k) outono. As cores verde, amarela, laranja e vermelha separam os percentis de 25%, 50% e 75% dentro dos eventos extremos.....	74
Figura 34 – Balanço de calor de todos os ciclones para (a-h) inverno, (i) primavera, (j) verão e (k) outono. As cores verde, amarela, laranja e vermelha separam os percentis de 25%, 50% e 75% dentro dos eventos extremos.	75
Figura 35 – Balanço de vorticidade dos quadrantes (a) NW, (b) NE, (c) SW e (d) SE dos ciclones de inverno. As cores verde, amarela, laranja e vermelha separam os percentis de 25%, 50% e 75% dentro dos eventos extremos.....	76
Figura 36 – Perfis de advecção horizontal de vorticidade dos ciclones ocorridos durante o inverno e calculados para cada um dos quadrantes, conforme indicado.	77
Figura 37 – Perfis do termo da divergência multiplicando a vorticidade planetária nos ciclones ocorridos no inverno para os quatro quadrantes indicados.....	77
Figura 38 – Perfis verticais do termo da vorticidade residual de todos os ciclones ocorridos no inverno nos quatro quadrantes indicados.	78
Figura 39 – Perfis verticais do termo da advecção horizontal de vorticidade absoluta no quadrante SE para todas as estações do ano.	79
Figura 40 – Perfis verticais do termo da vorticidade relativa multiplicando divergência no quadrante SE em todas as estações do ano.	79
Figura 41 – Perfis verticais do termo da vorticidade residual no quadrante NW para todas as estações.	79
Figura 42 – Balanço de vorticidade do quadrante SE para eventos extremos que ocorreram a NE (a-h) e NW (i-p) dos ciclones de verão.	81
Figura 43 – Balanço de vorticidade do quadrante NW para eventos extremos que ocorreram a NE (a-d) e NW (e-h) dos ciclones de verão.	82
Figura 44 – Balanço de calor do quadrante SW para eventos extremos que ocorreram a NE (a-h) e NW (i-p) dos ciclones de verão.....	84
Figura 45 – Balanço de calor do quadrante NW para eventos extremos que ocorreram a NE (a-d) e NW (e-h) dos ciclones de verão.....	85
Figura 46 – Balanço de vorticidade de todos os ciclones durante intensificação para (a-h) inverno, (i) primavera, (j) verão e (k) outono. As cores verde, amarela, laranja e vermelha separam os percentis de 25%, 50% e 75% dentro dos eventos extremos.....	87
Figura 47 – Balanço de vorticidade por quadrante dos ciclones de inverno. As cores verde, amarela, laranja e vermelha separam os percentis de 25%, 50% e 75% dentro dos eventos extremos.	88
Figura 48 – Balanço de vorticidade de intensificação por quadrante, dos ciclones de verão. As cores verde, amarela, laranja e vermelha separam os percentis de 25%, 50% e 75% dentro dos eventos extremos.	89

Figura 49 – Advecção de vorticidade absoluta no quadrante SE para todas as estações do ano durante intensificação.	89
Figura 50 – Termo da divergência no quadrante SE para todas as estações do ano, durante a intensificação.....	90
Figura 51 – Balanço de calor de todos os ciclones durante intensificação para (a-h) inverno, (i) primavera, (j) verão e (k) outono. As cores verde, amarela, laranja e vermelha separam os percentis de 25%, 50% e 75% dentro dos eventos extremos.	91
Figura 52 – Balanço de calor dos ciclones de inverno em todos os quadrantes durante intensificação com o eixo das abcissas dos termos limitado entre -40 e 40 K dia^{-1} . As cores verde, amarela, laranja e vermelha separam os percentis de 25%, 50% e 75% dentro dos eventos extremos.	92
Figura 53 – Advecção horizontal de vorticidade absoluta de verão de eventos extremos de NE durante a fase de (a) intensificação e (b) madura de todos os quadrantes.	94
Figura 54 – Balanço de vorticidade do quadrante SE, durante a intensificação para eventos extremos que ocorreram a NW dos ciclones de verão.....	95
Figura 55 – Balanço de vorticidade do quadrante NW, durante a intensificação para eventos extremos que ocorreram a (a-h) NE e (i-p) NW dos ciclones de verão.....	96
Figura 56 – Advecção Horizontal de temperatura durante a intensificação, nos eventos de NW, no verão, nos quatro quadrantes.	97
Figura 57 – Termo diabático de verão de eventos extremos de NE durante a fase de (a) intensificação e (b) madura respectivamente.	98
Figura 58 – Balanço de calor do quadrante SW, durante a intensificação para eventos extremos que ocorreram a (a-h) NE e (i-p) NW dos ciclones de verão.....	99

LISTA DE EQUAÇÕES

Fórmula de haversine

$$d = 2r \arcsin \sqrt{\sin^2 \frac{\Delta\varphi}{2} + \cos \varphi_1 \cdot \cos \varphi_2 \cdot \sin^2 \frac{\Delta\lambda}{2}}. \quad (1)$$

Primeira Lei da Termodinâmica

$$c_p \frac{DT}{Dt} - \alpha \frac{Dp}{Dt} = J. \quad (2)$$

Derivada total em coordenadas de pressão

$$\frac{DT}{Dt} \equiv \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + \omega \frac{\partial}{\partial p}. \quad (3)$$

Primeira Lei da Termodinâmica em derivação local

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

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) - S_p \omega = \frac{J}{c_p}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = - \vec{V} \cdot \nabla T + S_p \omega + \frac{J}{c_p}. \quad (6)$$

Balço de calor

$$F_T = \frac{\partial T}{\partial t} - \left(\underset{\text{i}}{-V_H} \cdot \underset{\text{ii}}{\nabla_p} T + \underset{\text{iii}}{\omega} \frac{\underset{\text{iv}}{RT}}{\underset{\text{v}}{c_p p}} - \omega \frac{\partial T}{\partial p} \right). \quad (7)$$

Estabilidade estática

$$S_p \equiv \frac{RT}{c_p p} - \frac{\partial T}{\partial p} = - \frac{T}{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial p}. \quad (8)$$

Equação da vorticidade

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = - \vec{V} \cdot \vec{\nabla}(\zeta + f) - \omega \frac{\partial \zeta}{\partial p} - (\zeta + f) \nabla \cdot \vec{V} + \vec{k} \cdot \left(\frac{\partial \vec{V}}{\partial p} \times \nabla \omega \right), \quad (9)$$

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = - \vec{V}_H \cdot \vec{\nabla}_p \zeta - \omega \frac{\partial \zeta}{\partial p} - v\beta - (\zeta + f) \vec{\nabla}_p \cdot \vec{V}_H + \frac{\partial \omega}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial p} - \frac{\partial \omega}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial p}. \quad (10)$$

Balço de vorticidade

$$F_\zeta = \frac{\partial \zeta}{\partial t} - \left[- V_H \cdot \nabla_p \zeta - \omega \frac{\partial \zeta}{\partial p} - v\beta - (\zeta + f) \nabla_p \cdot V_H + \left(\frac{\partial \omega}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial p} - \frac{\partial \omega}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial p} \right) \right]. \quad (11)$$

i
ii
iii
iv
v
vi (a, b)
vii

Equação da tendência do geopotencial quase-geostrófica

$$\left[\nabla^2 + f_0^2 \frac{\partial}{\partial p} \frac{1}{\sigma} \frac{\partial}{\partial p} \right] \chi = -f_0 \left[- \vec{V}_g \cdot \nabla(\zeta_g + f) \right] - f_0^2 \frac{\partial}{\partial p} \left[\frac{R}{\sigma p} (- \vec{V}_g \cdot \nabla T) \right] - \frac{f_0^2 R}{C_p} \frac{\partial}{\partial p} \left(\frac{J}{\sigma p} \right). \quad (12)$$

Representação da equação da tendência do geopotencial quase-geostrófica

$$\chi \sim - A_{\zeta_a} + \frac{\partial}{\partial p} A_T + \frac{\partial}{\partial p} J. \quad (13)$$

Equação omega quase-geostrófica

$$\left[\nabla^2 + \frac{f_0^2}{\sigma} \frac{\partial^2}{\partial p^2} \right] \omega = - \frac{f_0}{\sigma} \frac{\partial}{\partial p} \left[- \vec{V}_g \cdot \nabla(\zeta_g + f) \right] - \frac{1}{\sigma} \frac{R}{p} \nabla^2 (- \vec{V}_g \cdot \nabla T) - \frac{R}{C_p \sigma p} \nabla^2 J. \quad (14)$$

Representação da equação omega quase-geostrófica

$$-\omega \sim - \frac{\partial}{\partial p} A_{\zeta_a} + A_T + J. \quad (15)$$

Equação de Petterssen-Sutcliffe

$$\frac{\partial \zeta_0}{\partial t} = - \vec{V}_5 \cdot \vec{\nabla}_p (\zeta_5 + f) - \frac{g}{f_0} \left[\nabla_p^2 (\bar{A}_T + \bar{S} + \bar{H}) \right]. \quad (16)$$

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Média de variáveis e quantidades de ciclones e eventos extremos por setor em relação ao centro do ciclone, no inverno (JJA).....	51
Tabela 2 – Média de variáveis e quantidades de ciclones e eventos extremos por setor em relação ao centro do ciclone, na primavera (SON).....	51
Tabela 3 – Média de variáveis e quantidades de ciclones e eventos extremos por setor em relação ao centro do ciclone, no verão (DJF).....	52
Tabela 4 – Média de variáveis e quantidades de ciclones e eventos extremos por setor em relação ao centro do ciclone, no outono (MAM).....	52
Tabela 5 – Quantidade de ciclones associados a eventos extremos, separados por quadrantes, por estações do ano.....	68
Tabela 6 – Relevância dos termos dos balanços de calor e vorticidade durante a intensificação para os eventos extremos de inverno e verão, onde os valores de 0 a 5 implicam em nenhuma relevância até máxima relevância.	93
Tabela 7 – Relevância dos termos dos balanços de calor e vorticidade durante a intensificação para os eventos extremos de verão que ocorrem a NE e a NW, onde os valores de 0 a 5 implicam em nenhuma relevância até máxima relevância.	100
Tabela 8 – Parâmetros facilmente observáveis e suas posições relativas ao ciclone ativo, associados a intensificação de eventos de onda no quadrante NE e NW.....	104

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASAS	Alta Subtropical do Atlântico Sul
ECMWM	<i>European Centre for Medium-Range Weather Forecast</i> (Centro Europeu de Previsões Meteorológicas a Médio Prazo)
ERA5	<i>ECMWF Reanalysis 5th Generation</i>
EOQG	Equação Omega Quase-Geostrófica
ETQG	Equação da Tendência Quase-Geostrófica
EXWAV	<i>Extreme wind and wave modelling and statistics in the Atlantic Ocean</i> (Modelagem e estatísticas de extremos de ventos e ondas no Oceano Atlântico)
NCEP	<i>National Center for Environmental Prediction</i> (Centro nacional de Previsão Ambiental)
NND	Nível de Não Divergência
NOAA	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i> (Administração Nacional Oceânica e Atmosférica)
PNBoia	Programa Nacional de Boias
PNMM	Pressão ao Nível Médio do Mar
pp1d	<i>Peak Wave Period</i> (Período de picos de onda)
SASH	<i>South Atlantic Subtropical High</i> (Alta Subtropical do Atlântico Sul)
WCB	<i>Warm Conveyor Belt</i> (Esteira Transportadora Quente)
WMO	<i>World Meteorological Organization</i> (Organização Meteorológica Mundial)
WW3	WAVEWATCH III, Modelo de ondas oceânicas de terceira geração desenvolvido pelo NOAA/NCEP

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Advecção
H_s	Altura significativa
J	Aquecimento diabático
c_p	Calor específico à pressão constante
C_p	Capacidade térmica
B	Centro de baixa pressão
σ	Estabilidade estática
Φ	Geopotencial, $\int g dz$
mb	Milibar, 10^{-3} bar
hPa	Hectopascal, 10^2 Pa
∇	Operador gradiente
∇^2	Operador laplaciano
β	Parâmetro beta, variação meridional do parâmetro de Coriolis, df/dy
f	Parâmetro de Coriolis
S_p	Parâmetro de estabilidade estática para sistema isobárico, $p\sigma/R$
F_T	Resíduo do balanço de calor
F_ξ	Resíduo do balanço de vorticidade ou vorticidade residual
T	Temperatura
Pa	Unidade de pressão Pascal
K	Unidade de temperatura termodinâmica Kelvin
χ	Variação do geopotencial no tempo, tendência do geopotencial, $\partial\Phi/\partial t$
u	Velocidade do vento zonal, Dx/Dt
v	Velocidade do vento meridional, Dy/Dt
ω	Velocidade do vento vertical em escala de pressão, Dp/Dt
α	Volume específico, $1/\rho$
ξ_a	Vorticidade absoluta, $\zeta + f$
ζ	Vorticidade relativa, $\partial v/\partial x - \partial u/\partial y$

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	23
1.1. Objetivos	26
2. DADOS E MÉTODOS	28
2.1. Conjunto de dados	28
2.2. Método	30
2.2.1. Equação do balanço de calor	32
2.2.2. Equação do balanço de vorticidade	33
2.2.3. Equação de Sutcliffe e a Equação da tendência quase-geostrófica	35
2.2.4. Etapas do balanço	36
3. DISTRIBUIÇÃO DE CASOS	39
3.1. Dispersão.....	39
3.2. Histograma direcional.....	41
3.3. Dispersão direcional.....	48
4. BALANÇO DE CALOR E VORTICIDADE	53
4.1. Comparação entre balanço de dois ciclones	53
4.1.1. Balanço de calor e vorticidade do ciclone de inverno	54
4.1.2. Balanço de calor e vorticidade do ciclone de verão	56
4.1.3. Análise por quadrantes.....	59
5. BALANÇO MÉDIO DOS CICLONES MADUROS.....	68
5.1. Todos os eventos.....	68
5.2. Médias dos percentis	72
5.3. Balanço por quadrantes	75
5.3.1. Balanço de vorticidade	75
5.4. Comparação entre eventos em quadrantes distintos.....	80
5.4.1. Balanço de vorticidade para eventos em quadrantes distintos	80
5.4.2. Balanço de calor para eventos em quadrantes distintos	82
6. BALANÇO MÉDIO NA INTENSIFICAÇÃO	86
6.1. Balanço de vorticidade na intensificação	86
6.2. Balanço de calor na intensificação	90
6.3. Comparação entre eventos em quadrantes distintos durante intensificação	93
6.3.1. Vorticidade na intensificação para eventos em quadrantes distintos	93
6.3.2. Calor na intensificação para eventos em quadrantes distintos	97

7. DISCUSSÃO E CONCLUSÃO	101
7.1. Sugestões para trabalhos futuros	105
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	106
GLOSSÁRIO	110
ÍNDICES	111

1. INTRODUÇÃO

De acordo com o Centro Brasileiro de Infraestrutura, o Brasil possui, hoje, mais de 150 plataformas de petróleo espalhadas por toda a costa (CENTRO BRASILEIRO DE INFRAESTRUTURA, 2019). Elas estão, em sua maior parte, instaladas nas bacias de Campos e Santos no litoral da Região Sudeste do Brasil, localizado na porção sudoeste do Oceano Atlântico Sul.

Segundo dados publicados pela Agência Brasil, a economia marítima rende, anualmente, 2 trilhões de reais para o Brasil (CARVALHO, 2018), respondendo por 19% do PIB. Assim, é fundamental que tenhamos um entendimento amplo dos fenômenos naturais que mais nos afetam, para que, então, desenvolvamos ferramentas de previsão adequadas. Somente dessa forma, manteremos nossa força de trabalho e as instalações marítimas seguras, eficientes, e sustentáveis.

A previsão de uma janela meteorológica adequada, seja em duração, intensidade e área afetada, pode reduzir consideravelmente os custos, e incrementar a segurança das operações marítimas offshore. De acordo com Catterson et al. (2016), segundo dados de 2014, uma embarcação de transporte comum opera com ondas de até 1,5m e tem um custo diário de 13 mil reais.

Tendo em mente a importância do mar territorial e a plataforma continental brasileiros, e sabendo que, em latitudes médias a altas, o clima de onda é dirigido principalmente por ciclones extratropicais (CAMPOS et al., 2018; DA ROCHA; SUGAHARA; DA SILVEIRA, 2004; GRAMCIANINOV et al., 2022; PONCE DE LEÓN; BETTENCOURT, 2021; PONCE DE LEÓN; GUEDES SOARES, 2014; 2015), o presente trabalho visa observar, dentre outras variáveis, a relação entre a velocidade de deslocamento e a formação de pista de vento¹ (direção, intensidade e região de atuação) destes ciclones atuantes na região Sudoeste do Oceano Atlântico Sul.

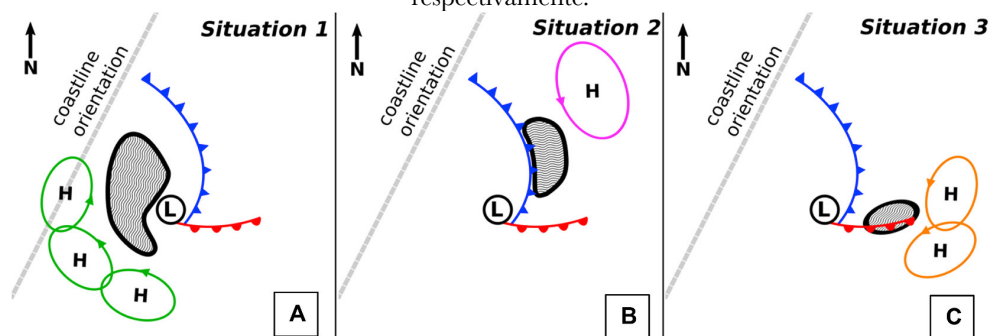
Saber a influência da estrutura do ciclone, da velocidade de deslocamento e de sua intensidade sobre o clima de ondas extremas é um grande desafio, uma vez que além destes existem múltiplos agentes e suas combinações, atuando simultaneamente em cada fenômeno meteoceanográfico. Embora o clima seja resultado da média de padrões climáticos, as mudanças no clima de extremos devem ser analisadas com mais cautela, em relação às

¹ Área oceânica onde ondas são geradas por um vento com direção e intensidade constantes. Também refere-se ao comprimento da área da pista medido na direção do vento.

condições especiais que levam a eventos extremos. Por exemplo, dentro da estrutura do campo de vento nos extratropicais, diferentes padrões podem gerar ondas extremas, dependendo do fluxo de ar dominante (GRAMCIANINOV et al., 2022).

Gramcianinov et al. (2020c), no seu estudo sobre extremos de ondas, acompanharam dez episódios de extremos gerados por ciclones extratropicais e estudaram as condições atmosféricas que levaram a eventos mais extremos na porção sudoeste do Atlântico Sul. Os autores concluíram que ondas extremas podem ocorrer a retaguarda da frente fria, ao longo da frente quente ou a diante da frente quente. Da mesma forma, foi identificado que a posição relativa do anticiclone tem um papel de extrema importância para a ocorrência de ondas extremas (Fig. 1), devido ao aumento do gradiente horizontal de pressão, e podendo afetar também a velocidade de deslocamento do ciclone.

Figura 1 – Esquema das três situações com ondas extremas (hachurado) relacionadas a ciclones extratropicais. (a) ondas ocorrem atrás da frente fria, (b) a diante da frente fria na zona de convergência dos ventos e (c) ao longo da frente quente no setor quente do ciclone. As frentes quente e fria estão representadas de acordo com as convenções meteorológicas. Os centros de baixa e alta pressão estão representados por “L” e “H” respectivamente.



Fonte: Gramcianinov et al. (2020a)

Bell, Gray e Jones (2017) reconheceram a influência das esteiras transportadoras frias e quentes no desenvolvimento de ondas extremas no Mar do Norte, enquanto Kita, Waseda e Webb (2018) relataram a ocorrência de ondas extremas em setores distintos dos ciclones, como ao longo da frente quente, por exemplo. Esses estudos mostraram que, além do padrão climatológico, os estudos de ondas extremas também precisam focar nas características dos sistemas geradores (GRAMCIANINOV et al., 2022).

Num esforço de identificar as condições meteorológicas associadas a eventos extremos, Melo, Romeu e Hammes (2010), usaram o WW3 forçado com ventos do NCEP/NOAA para reconstruir o estado do mar ao largo de Rio Grande, em um período de 30 anos. Foi usada a bóia do PNBOIA Minuano a fim de aferir e corrigir o viés encontrado no Hs. Com isso, foram identificados 40 eventos onde o Hs excede 6 m (denominados eventos “extremos”) e

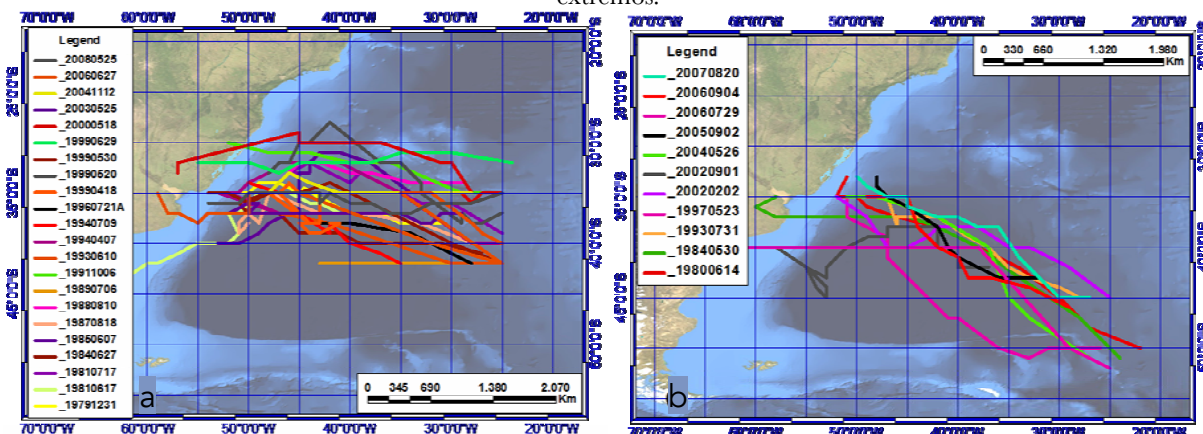
selecionados os 5 mais intensos. Comparando o resultado com a bóia Minuano, foi identificado que, em 4 dos 5 eventos, o modelo tende a superestimar o valor de Hs.

Machado et al. (2010) no seu estudo sobre a relação entre condições extremas e erosão, utiliza os eventos extremos selecionados por Melo, Romeu e Hammes (2010), mencionados anteriormente, e a partir destes, foram caracterizadas as condições atmosféricas que originaram os 40 eventos extremos identificados. Para tal, foram usadas as componentes zonal e meridional do vento a 995 mb, uma resolução espacial de $2,5^\circ \times 2,5^\circ$, uma resolução temporal de 6h, e a região limitada entre 60°S , 15°S , 90°W e 20°W , e finalmente um limiar de vorticidade $\zeta_{10} \leq -5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$. Com isso foram identificados 4 padrões sinóticos capazes de gerar eventos extremos:

- a) Padrão I: Ciclogênese na costa sul da Argentina deslocando para o leste;
- b) Padrão II: Ciclogênese na costa sul do Uruguai deslocando para o leste;
- c) Padrão III: Ciclogênese na costa sul do Uruguai deslocando para o sudeste;
- d) Padrão IV: Centro de alta pressão gerando um vento de leste.

Foi observado que o Padrão II representa a maior parte dos eventos extremos, com 22 dos 40 estudados, seguido pelo Padrão III, com 11 eventos, como podemos observar na figura.

Figura 2 – Trajetória correspondente ao (a) Padrão II, e (b) III. Que juntos correspondem a 80% dos eventos extremos.



Fonte: Machado et al. (2011)

De acordo com Avila, Nunes e Alves (2021), o clima e o tempo na sul da América do Sul são primariamente influenciados por ciclones extratropicais, já que esse tipo de sistema transiente e suas frentes associadas são os fenômenos mais frequentes que atingem a região (REBOITA et al., 2010). Mesmo o caso do ciclone Anita, um ciclone subtropical que

desenvolveu-se sobre o Oceano Atlântico Sul em março de 2010 (DUTRA et al., 2017), e que afetou as condições de tempo, não superou os eventos extremos provocados por dois ciclones extratropicais que ocorreram em junho e julho do mesmo ano (GRAMCIANINOV et al., 2021). Estes provocaram alturas significativas máximas de 8,9 m e 10,1 m respectivamente, o que reforça a relevância desse tipo de ciclone para o clima de ondas na costa Brasileira.

Concernente à importância da distinção sazonal na análise dos agentes atuantes nas diferentes épocas do ano, antes dos anos 90, os estudos sobre ciclogênese na América do Sul apresentavam resultados pouco correspondentes, devido aos diferentes períodos de tempo, critérios de identificação e dados utilizados. Foi observado que a maior atividade ciclogênética ocorre no inverno, com a máxima frequência em maio, e mínima em dezembro (NECCO, 1982). Além disso, foi observada maior frequência em anos de El Niño. A partir do avanço dos modelos numéricos, diversos autores foram analisando a ciclogênese no Sul da América do Sul, utilizando reanálise e identificando as diversas regiões ciclogênicas, como Uruguai e golfo San Mathias (GAN; RAO, 1991), costa leste ao sul e sudeste do Brasil (HOSKINS; HODGES, 2005; REBOITA; ROCHA; AMBRIZZI, 2005) com maior frequência no verão e ainda no extremo sul da América do Sul (ALLEN; PEZZA; BLACK, 2010).

Vimos com isso que, quando trata-se de eventos extremos e suas causas, os estudos são diversos e possuem inúmeras abordagens, com uma ampla gama de fontes de dados e ferramentas empregadas. O que reforça o fato de que, quanto maior o investimento na direção do conhecimento, menor o impacto negativo nas atividades humanas, maior a eficiência, e adicionalmente à sustentabilidade, no uso do mar. Seguindo nesta direção, este estudo visa acrescentar uma abordagem no sentido de identificar as diferentes características dos ciclones e as ondas de gravidade que eles provocam.

1.1.Objetivos

Este trabalho tem por meta selecionar casos mais extremos de alturas de ondas, por estação do ano, na porção Sudoeste do Oceano Atlântico Sul (regiões marítimas Sul e Sudeste do Brasil). A partir de então, analisaremos a localização das pistas de vento, a velocidade de deslocamento do ciclone associado, o setor do ciclone de ocorrência de extremos, e demais características identificáveis. Finalmente, através do balanço de calor e vorticidade destes ciclones, vamos identificar termos associados em maior grau com a intensificação de eventos extremos, bem como o setor ou setores dos ciclones mais relevantes visando, futuramente, o incremento na qualidade das previsões de ondas extremas. Os estudos realizados, serão

divididos em estações do ano, de modo a não desestruturar a análise e a fim de comparar os agentes atuantes.

Para estes fins, foram realizadas as seguintes etapas:

- a) Seleção dos dados de extremos do ERA5 (Hs acima do percentil de 90% e 95%), segregados em estações do ano, correlacionados a ciclones;
- b) Seleção dos casos contidos dentro do domínio estabelecido, e separação em três faixas de latitude;
- c) Cálculo a velocidade de deslocamento do ciclone;
- d) Agrupamento dos extremos em eventos independentes;
- e) Separação dos dados em setores NE, SE, SW e NW;
- f) Identificação de uma relação proporcional entre tamanho da pista, velocidade de deslocamento, intensidade do vento, setor do ciclone, dentre outras variáveis;
- g) Cálculo dos termos dos balanços de calor e vorticidade dos ciclones nas diferentes estações do ano;
- h) Cálculo dos termos dos balanços de calor e vorticidade dos ciclones nos seus quatro setores;
- i) Cálculo dos termos dos balanços de calor e vorticidade separadamente para ciclones que geram extremos em quadrantes distintos
- j) Cálculos dos termos dos balanços mencionados anteriormente na fase de intensificação dos mesmo ciclones.
- k) Identificação dos padrões sinóticos, ação de esteiras transportadoras, e mecanismos dinâmicos e termodinâmicos que influenciam no deslocamento e intensificação dos ciclones que geraram extremos.

2. DADOS E MÉTODOS

2.1. Conjunto de dados

Para este trabalho, foram utilizados dados horários de reanálise do ERA5, que é a quinta geração de reanálise do Centro Europeu de Previsões Meteorológicas de Médio Prazo (ECMWF; HERSBACH et al., 2020), produzido com o Sistema Integrado de Previsão (IFS) do ECMWF, versão CY41R2, usando assimilação de dados 4D-Var. As variáveis atmosféricas e de onda usadas neste trabalho possuem grades horizontais de $0,28^\circ$ e $0,36^\circ$, respectivamente. Os dados foram usados com saídas de 1 hora de 1979 a 2020 e obtidos através do *Copernicus Climate Change Service (C3S)* (2017), contendo, dentre outras, as seguintes variáveis:

- Período de picos de onda²;
- Onda de vento médio;
- Direção média ondas de vento;
- Direção média das ondas;
- Altura significativa das ondas³;
- Componente U vento a 10m; e
- Componente V vento a 10m.

A partir dos dados brutos do ERA5 descritos acima, Gramcianinov et al. (GRAMCIANINOV et al., 2022) identificaram e associaram ciclones, e incluíram demais parâmetros calculados, no escopo do projeto EXWAV (*Extreme wind and wave modeling and statistics in the Atlantic Ocean*), entre as latitudes 20°S e 60°S , já selecionados os percentis acima de 90% e 95%, e separados por estações do ano, sendo estes:

- Data;
- Número de áreas;
- Total de pontos;
- Hs média;
- Hs padrão;
- Hs máxima;
- Lat central;
- Lon central;
- Track id;
- Lat Ciclone;
- Lon Ciclone;
- Vento a 10m do Ciclone;
- Pressão do Ciclone a NMM;
- Setor do ciclone;
- Período entre picos de onda;
- Direção média ondas de vento;
- Direção média das ondas;
- Tamanho da pista;

² Período de onda associado às ondas mais energéticas no espectro total de onda em um ponto específico.

³ Média do terço superior das ondas que ocorrem em dado período, medida do cavado à crista.

- Hs max na pista;
- Hs médio na pista;
- Porção da pista;
- Tamanho da Pista;
- Hs max na pista;

A partir do ERA5, Gramcianinov et al. (2022) extraíram a ocorrência de extremos em cada ponto de grade. Os autores utilizaram a série com o Hs horário de todos os meses de cada estação (DJF, MAM, JJA e SON). O pico de Hs foi selecionado dentro de uma janela de tempo fixa de 96h para garantir a independência dos eventos. Através da distribuição desses picos de Hs, os percentis foram calculados e usados para selecionar os instantes de tempo extremos em cada ponto de grade, i.e., instantes de tempo da série que excedem o percentil. Após isso, os pontos extremos são agrupados em regiões extremas por busca por vizinhos próximos, tendo como critério mínimo para o agrupamento dois pontos vizinhos acima do percentil. No entanto, a análise feita por esses autores não permite uma visão dos extremos através do tempo, uma vez que as regiões de Hs extrema são tratados de forma independente em cada passo de tempo. No presente trabalho, os pontos extremos foram agrupados temporalmente, seguindo os mesmos critérios semelhantes ao de Gramcianinov et al. (2020c): 1) a existência de pelo menos dois pontos de grade vizinhos a algum ponto da região extrema excedem o percentil no passo de tempo seguinte; 2) o evento persiste por, no mínimo, 12 h.

Com relação à associação à ciclones, os procedimentos são os seguintes: primeiro a identificação é feita através de um limiar de vorticidade relativa de $-1,0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ (HOSKINS; HODGES, 2002) e o acompanhamento através do programa TRACK (HODGES, 1994; 1995); foram aplicados filtros de larga e pequena escala ($n < 5$ ou $n > 45$ para ondas atmosféricas (HOSKINS; HODGES, 2002), e finalmente, selecionados sistemas com duração de pelo menos 12h e com deslocamento maior que 500 km (GRAMCIANINOV et al., 2020a).

O próximo passo é associar os ciclones identificados pelo programa TRACK (HODGES, 1994; 1995) aos eventos extremos de onda, e selecionar somente estes eventos associados a ciclones. Definidos os valores extremos, foram separados os eventos associados a ciclones, utilizando o critério de distância entre o seu centro, e o centro de massa da região de extremos, de modo que esta distância não ultrapasse 1.500 km, considerando o tamanho de uma onda baroclínica em latitudes médias; além disso, consideram-se apenas os ciclones que se formam no mínimo 24h antes da ocorrência dos extremos.

2.2.Método

A primeira etapa da análise é calcular a velocidade de deslocamento dos ciclones assimilados, diferenciando suas posições no tempo. A velocidade de deslocamento é uma variável essencial para este estudo, e foi obtida calculando a distância entre duas posições geográficas consecutivas do ciclone, através da fórmula de haversine (INMAN, 1835), que determina a menor distância esférica, dadas sua latitude e longitude, e pode ser descrita como

$$d = 2r \arcsin \sqrt{\sin^2 \frac{\Delta\varphi}{2} + \cos \varphi_1 \cdot \cos \varphi_2 \cdot \sin^2 \frac{\Delta\lambda}{2}}. \quad (1)$$

onde r é o raio da Terra, φ a latitude e λ a longitude.

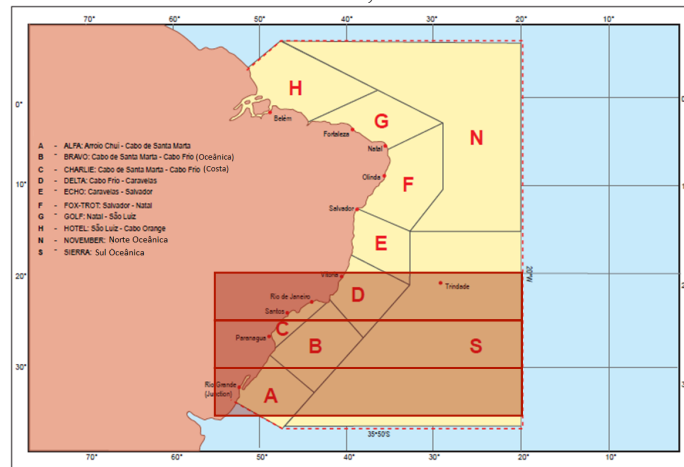
Posteriormente divide-se a distância calculada pelo intervalo de tempo entre as amostragens, que vai desde 1h, até o intervalo entre duas ocasiões onde ocorrer extremos causados pelo mesmo ciclone. Finalmente, utilizou-se como velocidade de deslocamento a média móvel entre as duas últimas velocidades encontradas por este método.

Em seguida foram selecionados apenas as ocorrências de Hs max acima do 90º percentil, para cada estação do ano, dentro do domínio Oceano Atlântico Sul. A partir de então, limitou-se o domínio para a região que corresponde aproximadamente ao setor sul da METAREA V⁴, entre o paralelo 20ºS e 35ºS, e entre o meridiano 55ºW e 20ºW, ilustrado na Figura 3. Posteriormente, separou-se a análise em três faixas de 5º de latitude, de 20ºS a 25ºS, 25º a 30ºS, e 30ºS a 35ºS, de forma a serem especificadas as diferenças e semelhanças ambientais, comparados os fenômenos predominantes por região.

⁴METAREAs são regiões geográficas marítimas traçadas com o propósito de coordenar a transmissão de informações meteorológicas aos navegantes.

METAREA V corresponde às Águas atlânticas de responsabilidade do Brasil, a oeste de 20ºW, de 35º50'S a 7ºN, estreitando-se nas faixas costeiras nas extremidades até a fronteira Uruguai/Brasil em 33º45'S e a fronteira Guiana Francesa/Brasil em 4º30'N

Figura 3 – METAREA V com o domínio demarcado. As faixas correspondem a área compreendida entre 55°W e 20°W e latitudes 20°S a 25°S, 25°S a 30°S e 30°S a 35°S.



Fonte: Marinha do Brasil.

Tendo selecionados os dados, o passo seguinte foi agrupá-los em eventos independentes. Considerou-se *evento*, um intervalo consecutivo de tempo, no qual ocorrem extremos em um determinado local. Os critérios espaciais para a designação de extremo foram mencionados anteriormente e descritos por Gramcianinov et al. (2020c). Feito isto, foram atribuídos a cada evento o valor médio das variáveis dentro da série, bem como sua altura significativa máxima.

O agrupamento temporal dos eventos obedeceu o seguinte critério: é considerado um evento para efeitos de análise, uma sequência horária ininterrupta de ocorrências de extremos associados a um mesmo ciclone. Cada evento deste é caracterizado pelas variáveis no instante da máxima altura significativa.

Tendo em mãos os eventos mais extremos no domínio, os ciclones associados a eles, a distribuição por latitudes, a velocidade de deslocamento do ciclone, apuraremos como se dá interação do ciclone com o oceano, de acordo com a estação do ano, para as faixas de latitudes.

Para cada instante de máxima altura significativa de cada evento de cada ciclone, foram coletados dados de vento zonal, vento meridional, vento vertical em coordenadas de pressão e temperatura (u , v , ω , e T em $m\ s^{-1}$, $m\ s^{-1}$, $Pa\ s^{-1}$ e K respectivamente) das camadas de 975, 950, 925, 900, 850, 750, 700, 650, 600, 550, 500, 450, 400, 350, 300, 250, 200, 150 e 100 hPa, na região composta por 12° N-S e E-W centrada no ponto de mínima vorticidade dos ciclones na superfície.

Através do balanço detalhado na seção 3, os dados acima foram convertidos nos termos das equações, para a área total e quadrantes dos ciclones com as subdivisões mencionadas anteriormente.

2.2.1. Equação do balanço de calor

Para realizarmos o balanço de calor, e assim, calcularmos os termos referentes a variação de temperatura causados por efeitos diversos, partiu-se da primeira lei da termodinâmica,

$$c_p \frac{DT}{Dt} - \alpha \frac{Dp}{Dt} = J, \quad (2)$$

convertendo esta derivada total em derivada local e advecção, ou seja, passando para sua forma lagrangiana, como descrito em Holton e Hakim (2013, p. 29)

$$\begin{aligned} \frac{DT}{Dt} &\equiv \frac{\partial}{\partial t} + \frac{Dx}{Dt} \frac{\partial}{\partial x} + \frac{Dy}{Dt} \frac{\partial}{\partial y} + \frac{Dp}{Dt} \frac{\partial}{\partial p} = \\ &= \frac{\partial}{\partial t} + u \frac{\partial}{\partial x} + v \frac{\partial}{\partial y} + \omega \frac{\partial}{\partial p}, \end{aligned} \quad (3)$$

a primeira lei da termodinâmica pode ser expressa no sistema isobárico, chamando $Dp/Dt = \omega$ e expandindo DT/Dt da seguinte forma

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

que pode ser reescrito como

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) - S_p \omega = \frac{J}{c_p}, \quad (5)$$

ou no formato vetorial

$$\frac{\partial T}{\partial t} = - \vec{V} \cdot \nabla T + S_p \omega + \frac{J}{c_p}, \quad (6)$$

onde,

S_p é o parâmetro da estabilidade estática, e

J a fonte diabática de calor.

Finalmente, podemos isolar todos os termos, e denominar a igualdade não nula, como resíduo do balanço de calor F_T , aos moldes do que foi feito por Dutra et al. (2017). Este resíduo abrangerá todas as fontes diabáticas, como radiação de onda longa e curta, turbulência, e incertezas na computação e na observação, e em especial a liberação de calor latente que sabemos possuir papel preeminente na intensificação de tempestades.

Assim ficamos com

$$F_T = \frac{\partial T}{\partial t} - \left(-V_H \cdot \nabla_p T + \omega \frac{RT}{c_p p} - \omega \frac{\partial T}{\partial p} \right). \quad (7)$$

i ii iii iv v

onde,

- | | | |
|------|---|--|
| i. | F_T | é o resíduo do balanço de calor |
| ii. | $\frac{\partial T}{\partial t}$ | é a variação local (tendência) da temperatura, |
| iii. | $-V_H \cdot \nabla_p T$ | a advecção de temperatura, |
| iv. | $-\omega \frac{\partial T}{\partial p}$ | é o termo adiabático, |
| v. | $\frac{RT}{c_p p} \omega$ | a advecção vertical de temperatura. |

Através da equação de Poisson, vemos que os termos adiabático (7.iv) e advecção vertical (7.v) podem ser representados por

$$S_p \equiv \frac{RT}{c_p p} - \frac{\partial T}{\partial p} = -\frac{T}{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial p}. \quad (8)$$

2.2.2. Equação do balanço de vorticidade

A partir da equação da vorticidade, exposta por Holton e Hakim (2013, p. 103), na forma

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = -\vec{V} \cdot \vec{\nabla}(\zeta + f) - \omega \frac{\partial \zeta}{\partial p} - (\zeta + f) \nabla \cdot \vec{V} + \vec{k} \cdot \left(\frac{\partial \vec{V}}{\partial p} \times \nabla \omega \right), \quad (9)$$

ou

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = -\vec{V}_H \cdot \vec{\nabla}_p \zeta - \omega \frac{\partial \zeta}{\partial p} - v\beta - (\zeta + f) \vec{\nabla}_p \cdot \vec{V}_H + \frac{\partial \omega}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial p} - \frac{\partial \omega}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial p}, \quad (10)$$

Ajustando a equação, passamos a adotar F_ζ , denotando o resíduo do balanço de vorticidade, que representam fontes ou sumidouros de vorticidade na atmosfera (DUTRA et al., 2017).

$$F_\zeta = \frac{\partial \zeta}{\partial t} - \left[-V_H \cdot \nabla_p \zeta - \omega \frac{\partial \zeta}{\partial p} - v\beta - (\zeta + f) \nabla_p \cdot V_H + \left(\frac{\partial \omega}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial p} - \frac{\partial \omega}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial p} \right) \right] \quad (11)$$

i
ii
iii
iv
v
vi
vii

onde,

- | | | |
|------|---|---|
| i. | F_ζ | representa a vorticidade residual, |
| ii. | $\frac{\partial \zeta}{\partial t}$ | é a variação local (tendência) da vorticidade relativa, |
| iii. | $-V_H \cdot \nabla_p \zeta$ | advecção horizontal de vorticidade, |
| iv. | $-\omega \frac{\partial \zeta}{\partial p}$ | advecção vertical de vorticidade, |
| v. | $-v\beta$ | advecção horizontal de vorticidade planetária, |
| vi. | $-(\zeta + f) \nabla_p \cdot V_H$ | termo da divergência, ou termo do estiramento, e |
| vii. | $\frac{\partial \omega}{\partial y} \frac{\partial u}{\partial p} - \frac{\partial \omega}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial p}$ | termo da torção. |

O termo do estiramento (10.v), conhecido como “termo da bailarina” combina o

- | | | |
|-------|-----------------------------|--|
| vi. a | $-\zeta \nabla_p \cdot V_H$ | efeito da vorticidade relativa (não linear), e |
| vi. b | $-f \nabla_p \cdot V_H$ | efeito da vorticidade planetária (linear). |

A vorticidade residual F_ζ representa o transporte de vorticidade causado por nuvens convectivas (CHU; YANAI; SUI, 1981b). O desenvolvimento de cumulonimbus causará intenso movimento ascendente que se encarregará do transporte da vorticidade ciclônica da superfície para níveis mais altos, e com isso uma tendência positiva de vorticidade em superfície.

Entendemos então, que quanto mais positivo este termo em superfície, mais intenso será o movimento ascendente causado pela formação de nuvens convectivas.

2.2.3. Equação de Sutcliffe e a Equação da tendência quase-geostrófica

Como parte desta análise, a Teoria Quase Geostrófica serviu de base para compreendermos a variação do vento vertical e da espessura da camada, suas causas e efeitos. Como sabemos, da equação da tendência do geopotencial quase-geostrófica, a tendência do geopotencial é proporcional à advecção horizontal da vorticidade absoluta, à variação vertical da advecção horizontal de temperatura (ou advecção diferencial de temperatura) e à variação vertical de J (taxa de aquecimento por unidade de massa devido à radiação, condução e liberação de calor latente).

$$\left[\nabla^2 + f_0^2 \frac{\partial}{\partial p} \frac{1}{\sigma} \frac{\partial}{\partial p} \right] \chi = -f_0 \left[-\vec{V}_g \cdot \nabla (\zeta_g + f) \right] - f_0^2 \frac{\partial}{\partial p} \left[\frac{R}{\sigma p} (-\vec{V}_g \cdot \nabla T) \right] - \frac{f_0^2 R}{C_p} \frac{\partial}{\partial p} \left(\frac{J}{\sigma p} \right) \quad (12)$$

onde $\chi = \frac{\partial \Phi}{\partial t}$, e a equação pode ser compreendido da seguinte forma

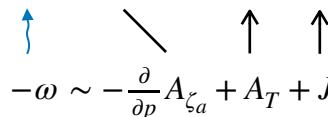
$$\chi \sim -A_{\zeta_a} + \frac{\partial}{\partial p} A_T + \frac{\partial}{\partial p} J. \quad (13)$$


Ou seja, a advecção de vorticidade ciclônica tende a aumentar a espessura da camada, assim como o aumento da advecção quente (ou diminuição da advecção fria) na vertical e o aumento da contribuição diabática ao chegarmos próximos a superfície, conforme o esquema acima.

Da mesma forma, a equação do movimento vertical quase-geostrófico é dada por

$$\left[\nabla^2 + \frac{f_0^2}{\sigma} \frac{\partial^2}{\partial p^2} \right] \omega = -\frac{f_0}{\sigma} \frac{\partial}{\partial p} \left[-\vec{V}_g \cdot \nabla (\zeta_g + f) \right] - \frac{1}{\sigma} \frac{R}{p} \nabla^2 (-\vec{V}_g \cdot \nabla T) - \frac{R}{C_p \sigma p} \nabla^2 J \quad (14)$$

que, analogamente, pode ser compreendido por

$$-\omega \sim -\frac{\partial}{\partial p} A_{\zeta_a} + A_T + J. \quad (15)$$


Esta relação pode ser interpretada como, o movimento ascendente sendo provocado pela advecção quente, pelo aquecimento diabático e pela diminuição da vorticidade (ou aumento da vorticidade ciclônica) com altura, conforme o esquema acima.

A partir da fundação deixada por Sutcliffe (1947) para a previsão quantitativa do tempo, Petterssen (1956) desenvolveu a equação de desenvolvimento de Pettersen-Sutcliffe que considera desprezível a advecção de vorticidade na superfície comparada a de 500 hPa, e a

divergência em 500 hPa desprezível comparada a da superfície. Ela relaciona a tendência da vorticidade na superfície com a advecção de vorticidade no nível de não divergência, juntamente com a advecção média de temperatura, a estabilidade estática e a variação diabática de temperatura.

$$\frac{\partial \zeta_0}{\partial t} = - \vec{V}_5 \cdot \vec{\nabla}_p (\zeta_5 + f) - \frac{g}{f_0} [\nabla_p^2 (\bar{A}_T + \bar{S} + \bar{H})], \quad (16)$$

onde $\vec{\zeta}_0$ é a vorticidade relativa na superfície, $-\vec{V}_5 \cdot \vec{\nabla}_p (\zeta_5 + f)$ é a advecção de vorticidade absoluta em 500 hPa, ∇_p^2 é o operador laplaciano em pressão constante, \bar{A}_T a média na coluna da advecção horizontal de temperatura, \bar{S} é a estabilidade, e \bar{H} a média do aquecimento diabático.

Ou seja, através da equação, vemos que a vorticidade ciclônica na superfície é provocada pela advecção de vorticidade ciclônica no NND, a média nas camadas inferiores da advecção quente, do aquecimento diabáticos e do movimento descendente indicado pelo termo da estabilidade \bar{S} , pois o movimento descendente representado por ele, está indicando aquecimento adiabático na camada.

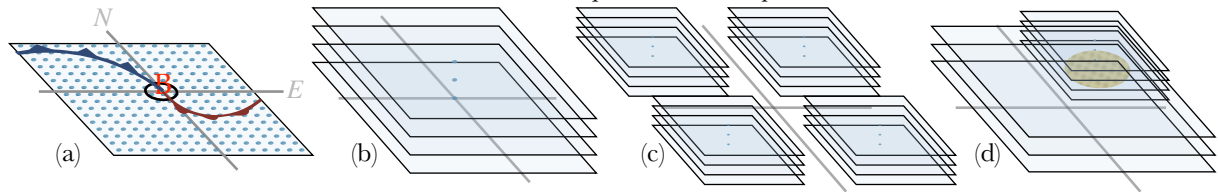
Estas relações ajudarão na compreensão dos fenômenos que contribuem para as mudanças atmosféricas que por sua vez virão a causar extremos de ondas.

2.2.4. Etapas do balanço

De posse dos eventos acima do 90º percentil, associados a ciclones dentro do nosso domínio, separados em 4 trimestres, delimitou-se uma área de 10º x 10º centrado no ponto mínima vorticidade. Em seguida, para cada ponto de grade, foram calculados cada termo da equação da termodinâmica na forma lagrangiana e da equação da vorticidade, em coordenadas de pressão (Fig. 4a), considerando-se os resíduos da equação como resultados de fontes diabáticas de calor e transporte de vorticidade pelo movimento vertical causado pela formação de nuvens, como mencionado anteriormente.

Figura 4 – Representação gráfica dos balanços de calor e vorticidade e das divisões em quadrantes dos ciclones.

(a) reprodução da região $10^\circ \times 10^\circ$ centrada na Baixa pressão indicada como "B" onde as marcas azuis representam os pontos onde os termos dos balanços são calculados. (b) O ponto azul representa a média de todos os pontos que é calculado para as demais camadas de pressão. (c) O mesmo é feito em separado para os quatro quadrantes centrados na baixa, e (d) o mesmo processo é feito distinguindo os eventos de ondas extremas ocorridos em cada quadrante em separado.



Após os cálculos dos termos para cada ponto de grade, faz-se a média dentro da área destes valores para cada nível de pressão (Fig. 4b), e com isso, temos uma curva vertical para cada termo das duas equações, para cada um dos ciclones associados a extremo.

Separação em quadrantes

Tendo as coordenadas do centro do ciclone como referência (ponto de mínima vorticidade), pegamos então a média dos termos das equações não mais da região $10^\circ \times 10^\circ$, mas em quatro pontos distintos centrados a NE, SE, SW e NW do centro do ciclone, correspondendo a uma região de $5^\circ \times 5^\circ$ (Fig. 4c), de forma a vermos o comportamento de cada quadrante dos ciclones geradores de extremos.

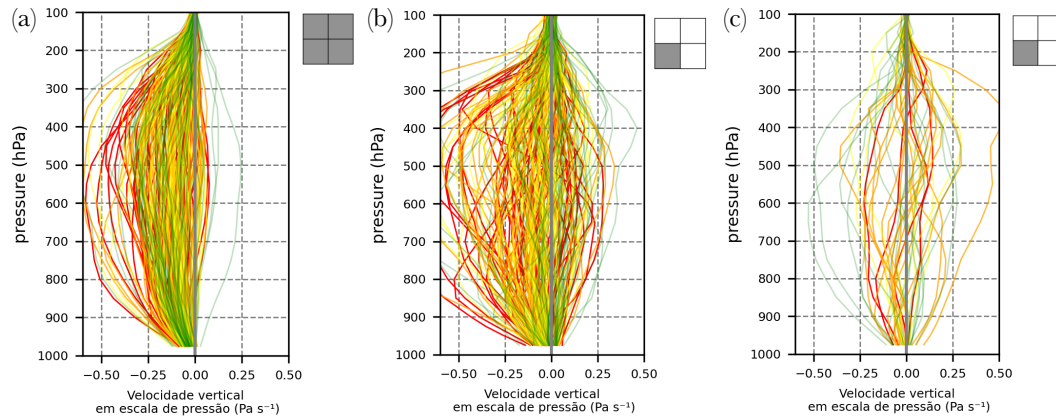
Distinção entre eventos ocorridos em quadrantes distintos

Posteriormente ao balanço de todos os eventos de cada estação do ano, foi feito o mesmo balanço distinguindo os eventos ocorridos nos diferentes quadrantes. Ou seja, agora pode-se comparar as características dos ciclones que geram extremos de ondas apenas a NW de seu centro, com aqueles que provocam à NE, por exemplo. Com isso, pode-se compreender as diferenças e semelhanças entre os eventos de ondas extremas no setor frio e no setor quente dos ciclones extratropicais (Fig. 4d).

De posse desses valores, as figuras apresentarão as combinações das curvas verticais de cada termo, cominando todos os eventos daquela estação do ano, na área total $10^\circ \times 10^\circ$, e em cada um dos quatro quadrantes, além da média apenas dos quadrantes com extremos (Fig. 5).

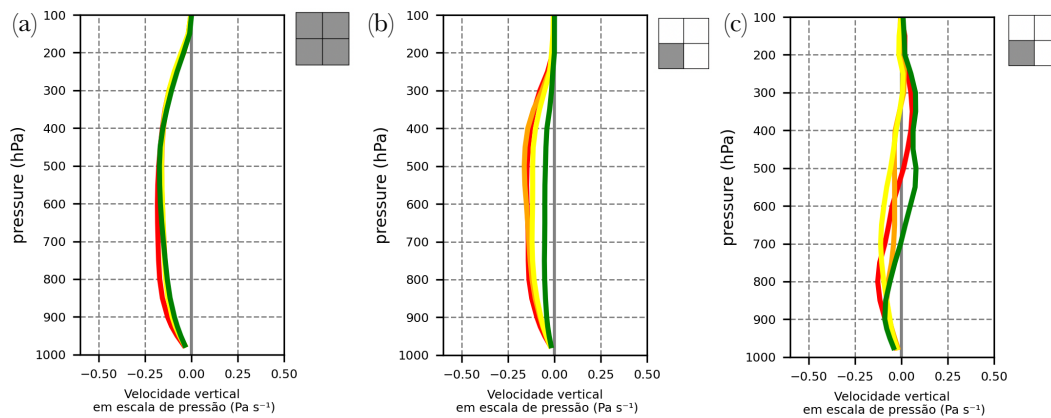
A fim de acompanhar o comportamento da intensificação, o último decil de altura significativa das ondas, está dividido em quatro partes iguais entre os percentis de 25%, 50% e 75%, sendo representados pelas cores verde, amarela, laranja e vermelha respectivamente.

Figura 5 – Exemplo de representação de cada termo dos balanços (a) em todos os quadrantes, (b) apenas no quadrante SW, e (c) no quadrante SW apenas dos ciclones que geraram extremos no mesmo quadrante. Cada linha corresponde a um ciclone e as cores indicam a intensidade do evento de ondas associado separadas pelos percentis 25%, 50% e 75%.



Além da representação individual dos ciclones, serão apresentadas as curvas médias por percentis, agrupando os ciclones conforme a mesma escala de cores associadas aos percentis mencionados anteriormente (Fig. 6).

Figura 6 – Exemplo de representação de cada termo dos balanços, agrupados pelas médias entre os percentis de 25%, 50% e 75%, (a) em todos os quadrantes, (b) apenas no quadrante SW, e (c) no quadrante SW apenas dos ciclones que geraram extremos no mesmo quadrante.



Balanço de calor e vorticidade durante a intensificação

As etapas acima mencionadas serão replicadas para estes mesmos ciclones exatamente 24h antes da ocorrência do extremo, para que sejam expostas suas características durante a intensificação.

Por fim, vamos analisar a importância de cada fenômeno representado pelos termos das equações da Termodinâmica e da Vorticidade, nos diferentes setores do ciclone, e discutir suas relações com ocorrência dos eventos extremos.

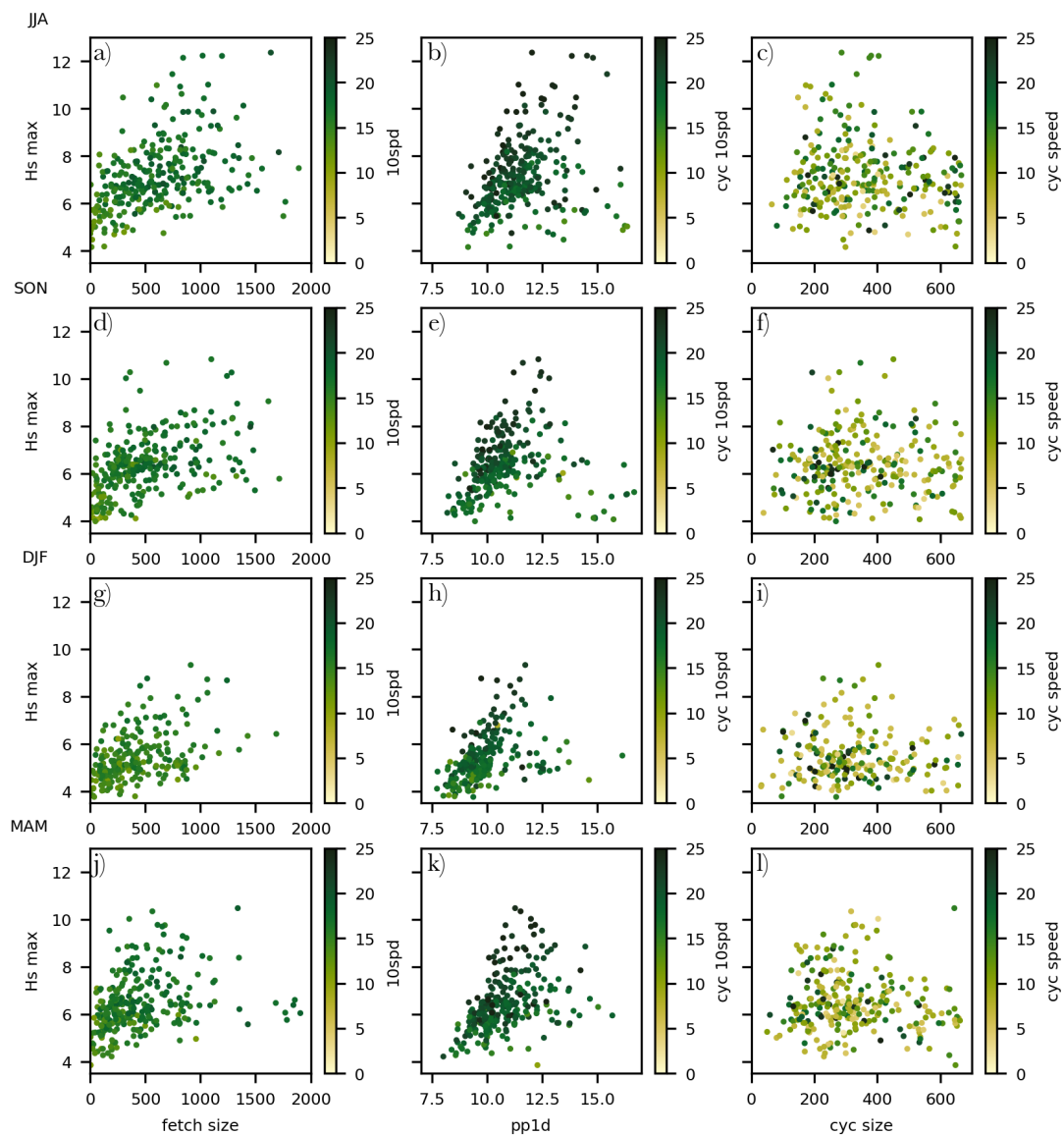
3. DISTRIBUIÇÃO DE CASOS

Nesta seção podemos visualizar alguns aspectos, que serão mais detalhados posteriormente, de modo a compreendermos como o ciclone interage com a superfície do mar.

3.1. Dispersão

A Figura 7 mostra em forma de dispersão algumas relações entre variáveis, para verificarmos em qual grau cada uma delas interfere na geração ou intensificação de eventos de ondas.

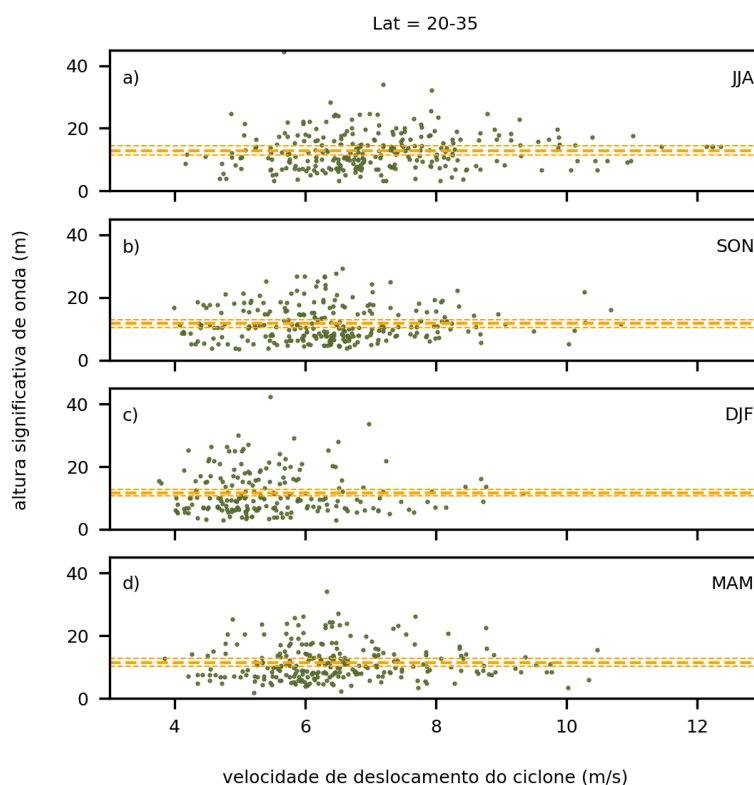
Figura 7 – Gráfico de dispersão dos eventos extremos de (a, b, c) inverno (d, e, f) primavera, (g, h, i) verão e (j, k, l) outono, relacionando a altura significativa máxima com as variáveis (a, d, g, j) tamanho da pista e velocidade do vento a 10m; (b, e, h, k) período de picos velocidade do vento no ciclone a 10m; e (c, f, i, l) e tamanho do ciclone e velocidade de deslocamento.



As Figuras 7a, d, g, j, exibem a relação entre o tamanho da pista e a altura significativa máxima. Conforme os eventos se intensificam a correlação entre as variáveis sofre uma diminuição, apontando para a atuação de outros fatores ambientais. É possível ver que o tamanho da pista implica em ondas maiores, porém o inverso não é verdade. Nota-se ainda, na Figura 7h, uma forte correlação entre a altura da onda e o período entre picos no verão; já no inverno (Fig. 7b), esta característica não é tão presente. Nota-se que o tamanho do ciclone tem pouca ou nenhuma influência na intensificação dos eventos de onda (Figuras 7c, f, i, l); e observa-se ainda que, ciclones mais lentos, principalmente no verão, tendem a estar associados a ondas maiores (Figuras 7a, d, g, j).

Analisando os eventos extremos, apenas com relação a velocidade de deslocamento do ciclone, vemos na Figura 8 que os eventos mais extremos do domínio encontram-se onde as velocidades de deslocamento do ciclone são as menores da série, em especial no verão, onde a velocidade encontra-se em maior parte abaixo da média sazonal.

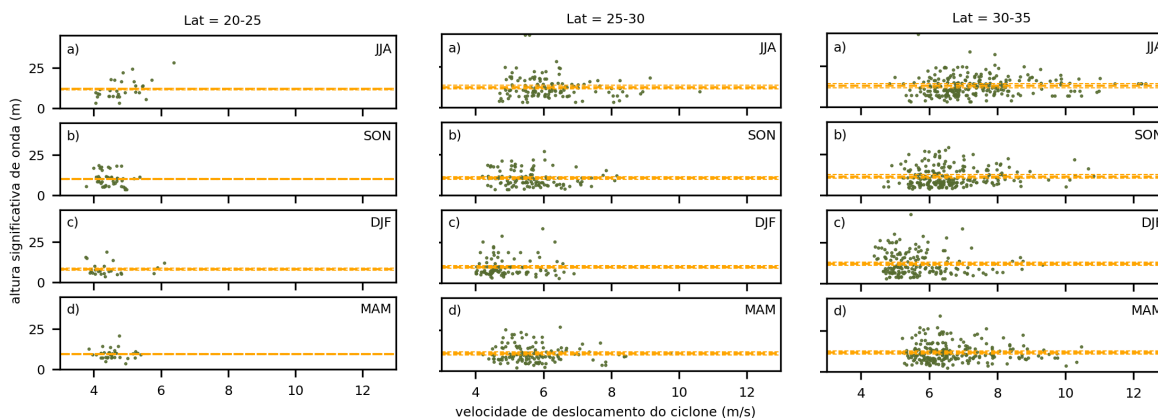
Figura 8 – Velocidade de deslocamento do ciclone em relação a altura significativa máxima do evento, para (a) inverno, (b) primavera, (c) verão e (d) outono. A linha laranja tracejada corresponde ao valor médio sazonal da velocidade do ciclone, com o desvio padrão para mais e para menos representados pelas linhas pontilhadas.



Agora, olhando por faixas de latitude, a Figura 9 mostra a nuvem de pontos concentrada mais a direita no inverno, como esperado. Nota-se ainda que mesmo no inverno,

especificamente na faixa central, os extremos ocorrem onde o ciclone desloca-se com velocidade abaixo da média sazonal e por faixa de latitude, o que observa-se no verão nas três faixas de latitude.

Figura 9 – Velocidade de deslocamento do ciclone em relação à altura significativa máxima do evento, para todas as estações, separados pelas três faixas de latitude. A linha laranja tracejada corresponde ao valor médio sazonal por faixa de latitude da velocidade do ciclone, com o desvio padrão para mais e para menos representados pelas linhas pontilhadas.



3.2. Histograma direcional

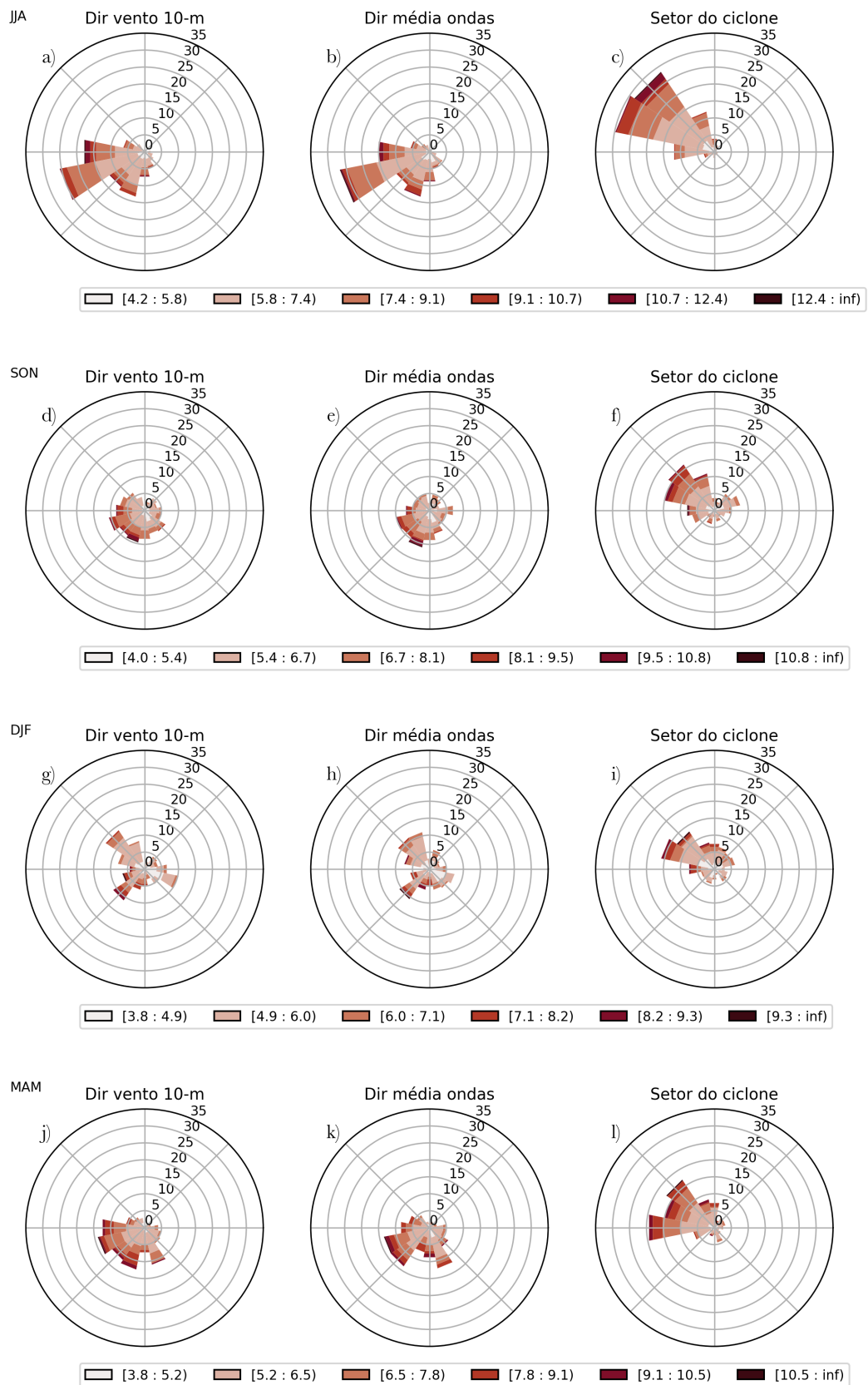
Olhando para parâmetros direcionais do vento, da onda e do setor do ciclone onde ocorre o extremo de onda (Fig. 7), em primeira análise, nota-se uma desigualdade entre as duas estações em destaque, tanto em direções prevalentes, quanto em quantidade de casos. Vê-se que, no inverno os ventos de W-SW são predominantes (Fig. 7a), já no verão (Fig. 7g), a concentração dá lugar a uma maior diversidade, com maior quantidade de eventos extremos com vento NW, seguido por SW e por SE, com os casos mais extremos associados a ventos de SW, assim como no inverno.

Como esperado, esta configuração é acompanhada pela direção das ondas (Fig. 7b e h), de forma que a concentração dos casos mais extremos estão associados à ondas de SW, porém a maior quantidade de casos extremos no verão (Fig. 7e) estão associados à ondas de NW, seguidos por SW e SE.

Com relação à posição das ondas extremas em relação ao ciclone, vemos que para o inverno (Fig. 10c) a ampla maioria dos eventos encontra-se a NW do seu centro; já para o verão (Fig. 10i), apesar da maior concentração também a NW, existe uma maior distribuição dos casos para os demais setores, predominantemente N-NE. Ou seja, existe uma variação bastante significativa na direção de ventos e ondas, de acordo com a latitude, o que indica a predominância de diferentes mecanismos de intensificação por região.

Cabe ressaltar que a direção do vento vista nas Figuras 10 a 14 é relativa ao vento a 10 m do nível do mar. Para uma maior precisão poderia-se utilizar a direção da pista de vento, o que necessitaria de cálculos de maior complexidade.

Figura 10 – Estatísticas de (a, d, g, j) direções do vento a 10 m, das (b, e, i, k) ondas e do (c, f, h, l) setor do ciclone onde o extremo está localizado, para (a, b, c) inverno, (d, e, f) primavera, (g, h, i) verão e (j, k, l) outono. Lat 20-35



Olhando para os casos separados por estações e faixas (Figuras 11 a 14), percebe-se uma transição no regime de vento. A primeira faixa aparentemente sofre menor influência dos sistemas frontais, e maior influência continental (PEZZI et al., 2022) e de sistemas oriundos do Atlântico SE (GRAMCIANINOV et al., 2020c). Esta região apresenta regime de vento heterogêneo (Fig. 11a), passando de S-SW no inverno, para uma distribuição, SW/SE/NE na primavera (Fig. 12a), E no verão (Fig. 13a), e finalmente voltando para SW no outono (Fig. 14a). A faixa central passa a indicar mais claramente a atuação de sistemas frontais, com predominância de ventos W-SW no inverno (Fig. 11d), uma distribuição quase uniforme no quadrante sul na primavera (Fig. 12d); concentração de E-SE, com eventos intensos associados a vento NW no verão (Fig. 13d); e novamente S no outono (Fig. 14d), com eventos mais intensos associados a vento SW. Analisando a última faixa de latitudes, vemos que os ventos W-SW e SW predominam em todas as estações (Figuras 11-14g), e os eventos mais intensos estão associados a estes ventos.

A direção das ondas acompanha o regime de vento em todas as estações e faixas, com exceção das duas faixas mais ao norte no verão (Fig. 13b, e), onde ocorrem eventos extremos de ondas de direção N, sendo que o vento predominante é E-SE (Fig. 13a, d).

Observando o setor do ciclone com ocorrência de extremos, percebe-se que na faixa superior os eventos extremos estão concentrados à NW no inverno (Fig. 11c), passando para uma distribuição NW/NE na primavera (Fig. 12c), seguido de NE no verão (Fig. 13c), e voltando para NW no outono (Fig. 14c), enquanto na faixa inferior predominam os eventos de NW (Figuras 11-14i) associados a sistemas frontais em todas as estações. A faixa central apresenta uma combinação entre as outras e apresenta ambas as características (Figuras 11-14f).

Figura 11 – Histograma direcional de inverno de (a, d, g) direções do vento a 10 m, (b, e, h) ondas e do (c, f, i) setor do ciclone, para as três faixas de latitude, (a-c) 20°-25°S, (d-f) 25°-30°S e (g-i) 30°-35°S onde o extremo está localizado.

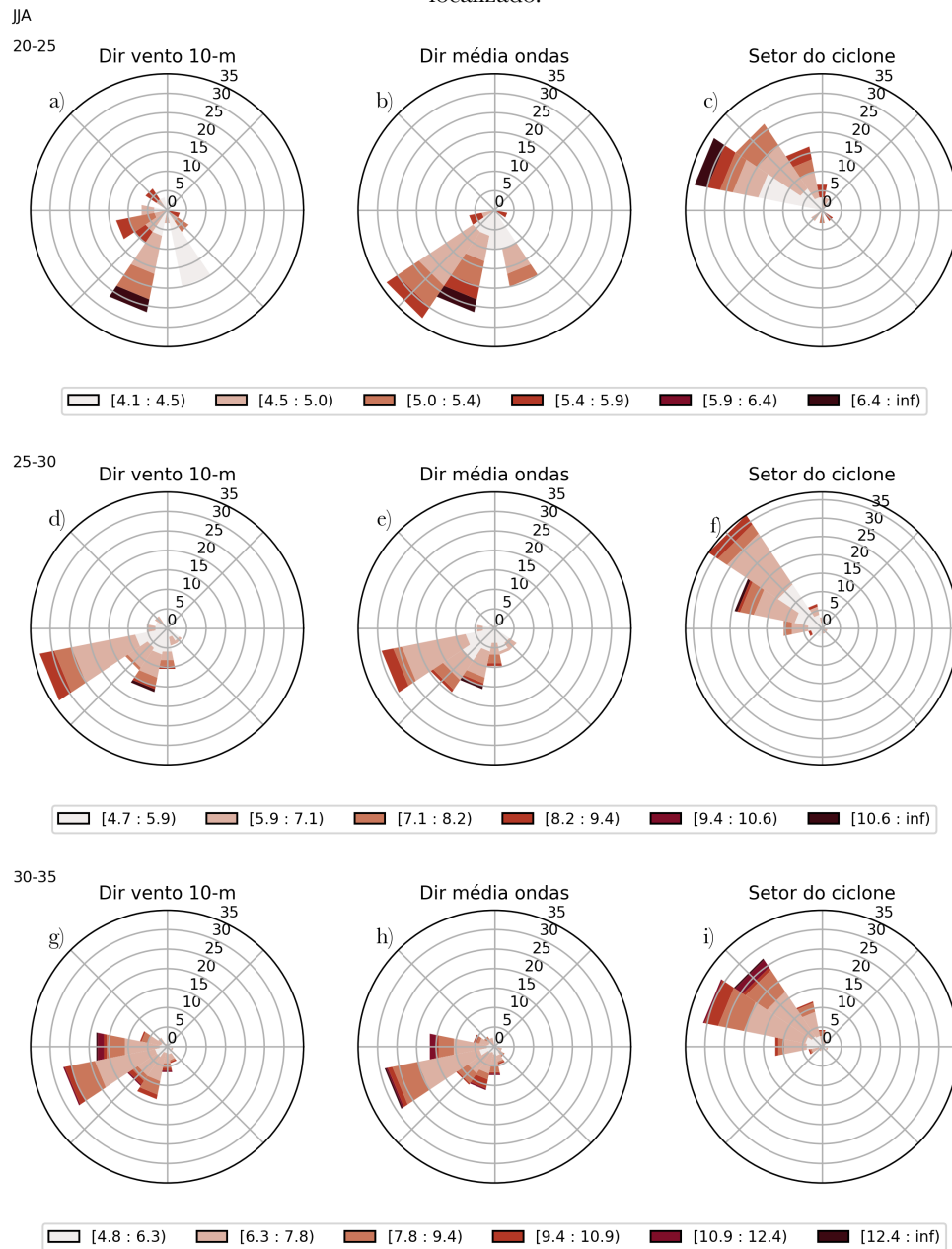


Figura 12 – Histograma direcional de primavera de (a, d, g) direções do vento a 10 m, (b, e, h) ondas e do (c, f, i) setor do ciclone, para as três faixas de latitude, (a-c) 20°-25°S, (d-f) 25°-30°S e (g-i) 30°-35°S onde o extremo está localizado.

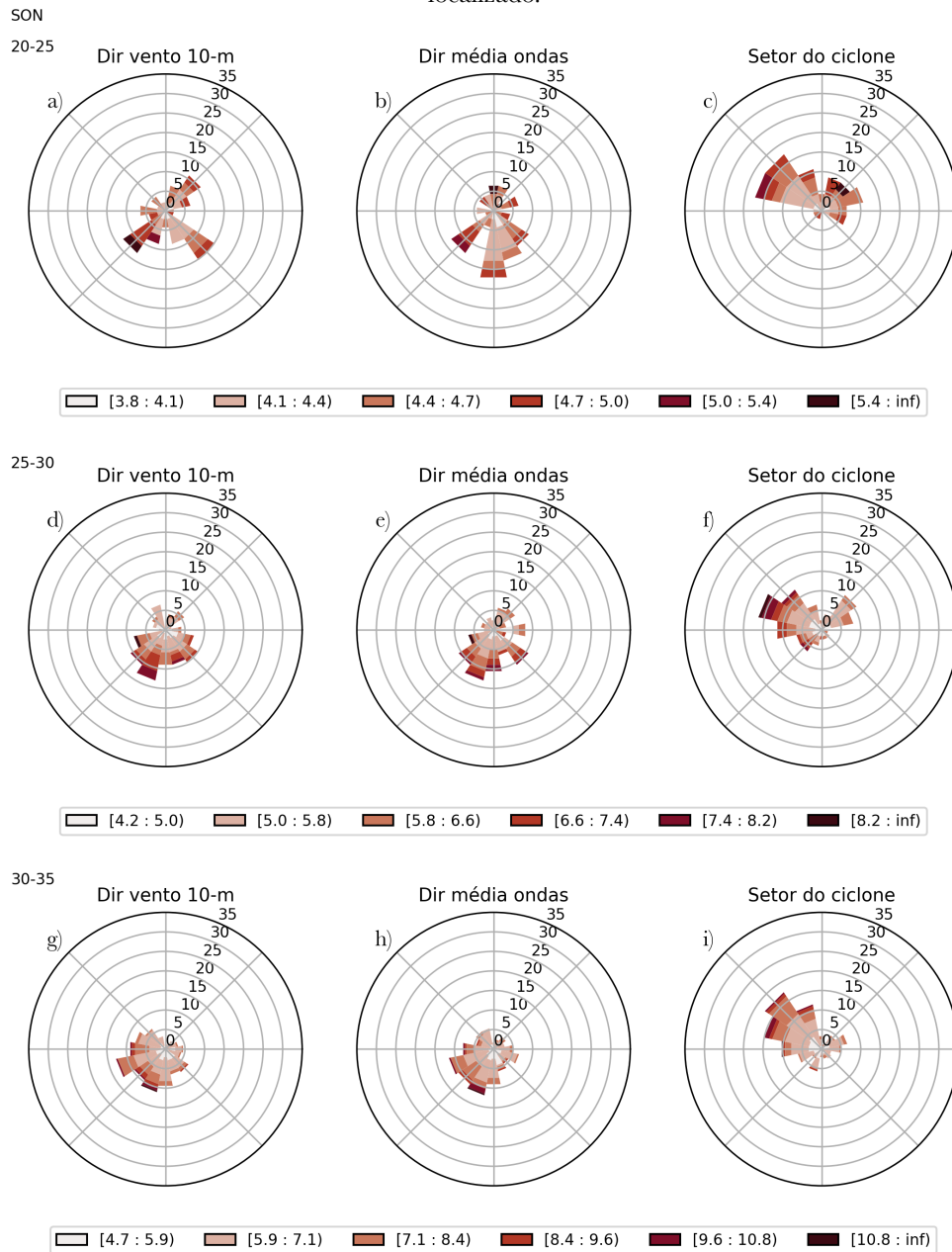


Figura 13 – Histograma direcional de verão de (a, d, g) direções do vento a 10 m, (b, e, h) ondas e do (c, f, i) setor do ciclone, para as três faixas de latitude, (a-c) 20°-25°S, (d-f) 25°-30°S e (g-i) 30°-35°S onde o extremo está localizado.

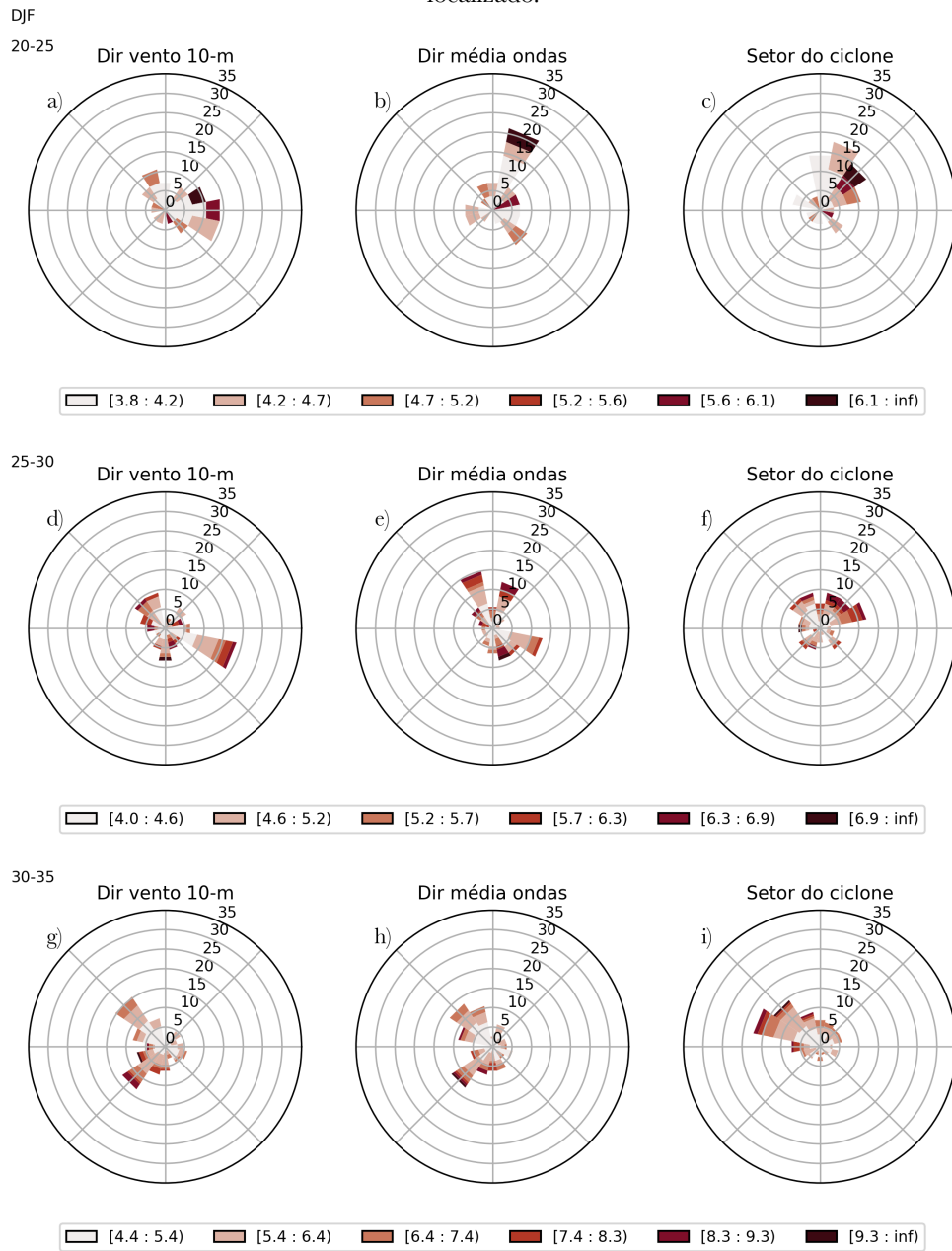
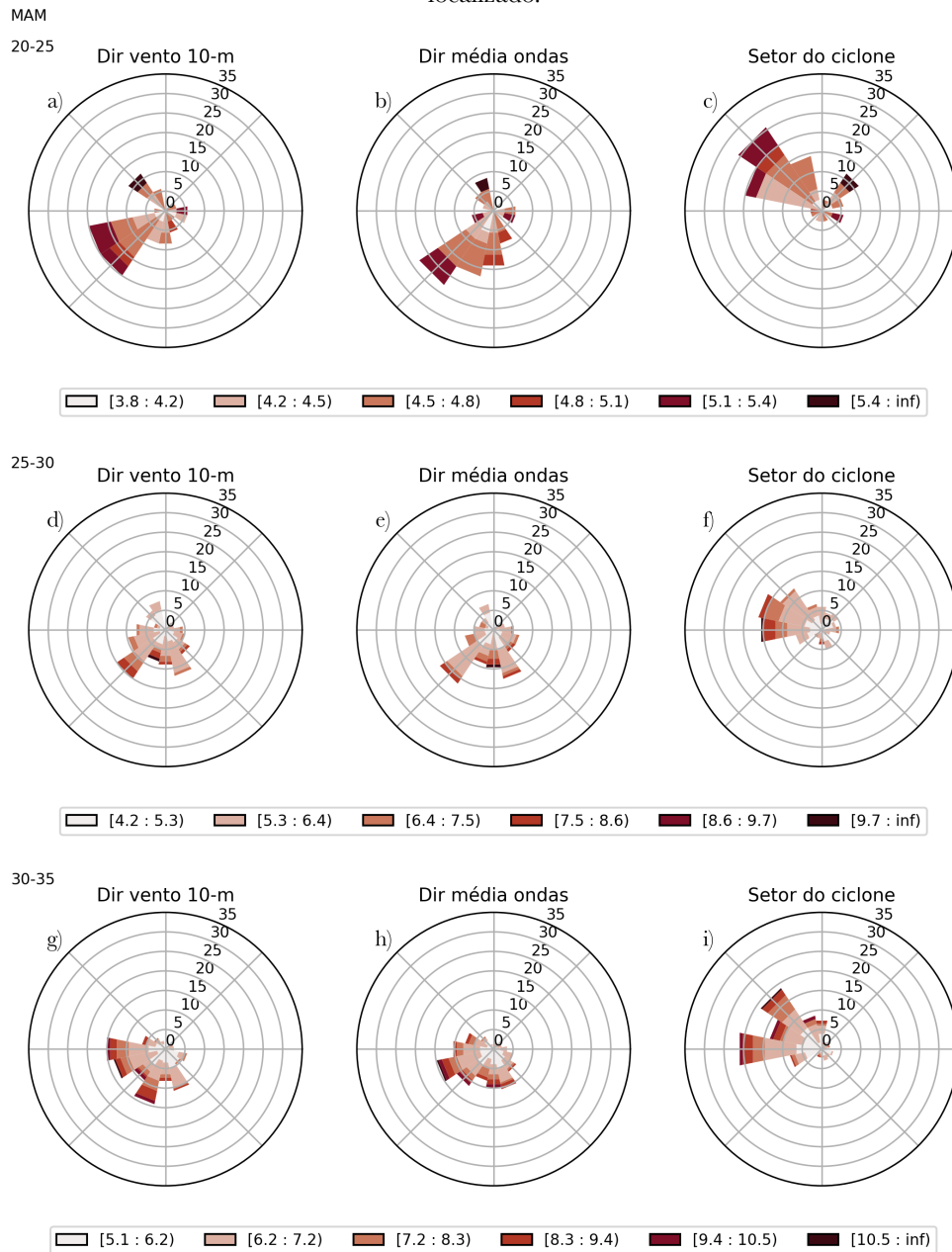


Figura 14 – Histograma direcional de outono de (a, d, g) direções do vento a 10 m, (b, e, h) ondas e do (c, f, i) setor do ciclone, para as três faixas de latitude, (a-c) 20°-25°S, (d-f) 25°-30°S e (g-i) 30°-35°S onde o extremo está localizado.



3.3. Dispersão direcional

Com base nas comparações anteriores, veremos a seguir alguns parâmetros selecionados com base na relevância para a ocorrência de extremos (acima dos percentis 90% e 95%) durante o inverno, primavera, verão e outono (Fig. 15 e Figura 16). Nota-se que ambos os percentis da Figura 15 apresentam distribuições semelhantes; dessa forma, deste ponto em diante, a fim de garantir um maior número de amostras no domínio, serão considerados os eventos com altura significativa máxima acima do percentil de 90%, considerando ainda que

estas alturas de ondas causam impactos nas atividades marítimas para a maior parte dos navegantes.

No domínio escolhido, a maior parte dos eventos concentram-se a NW do ciclone durante o inverno, e a N-NW no verão. A Figura 15 e a Figura 16 trazem, além desta distribuição setorial, as variáveis selecionadas como de grande relevância para este estudo. São elas, a velocidade de deslocamento do ciclone, o tamanho da pista, juntamente com altura significativa máxima de cada evento; além disso as Tabelas 1-4 mostram a média de algumas variáveis dos eventos para todas as estações, como a quantidade total de eventos extremos, a quantidade de ciclones geradores de extremos e a porcentagem de ocorrências.

Figura 15 – Distribuição de eventos em relação ao ciclone para (a) JJA, (b) SON, (c) DJF e (d) MMA, com a marcação do centro de massa do evento extremo relativo ao centro do ciclone indicada pelo ângulo, a distância do centro indica a altura significativa máxima do evento, a cor indica a velocidade deslocamento do ciclone e o diâmetro da circunferência, o tamanho da pista.

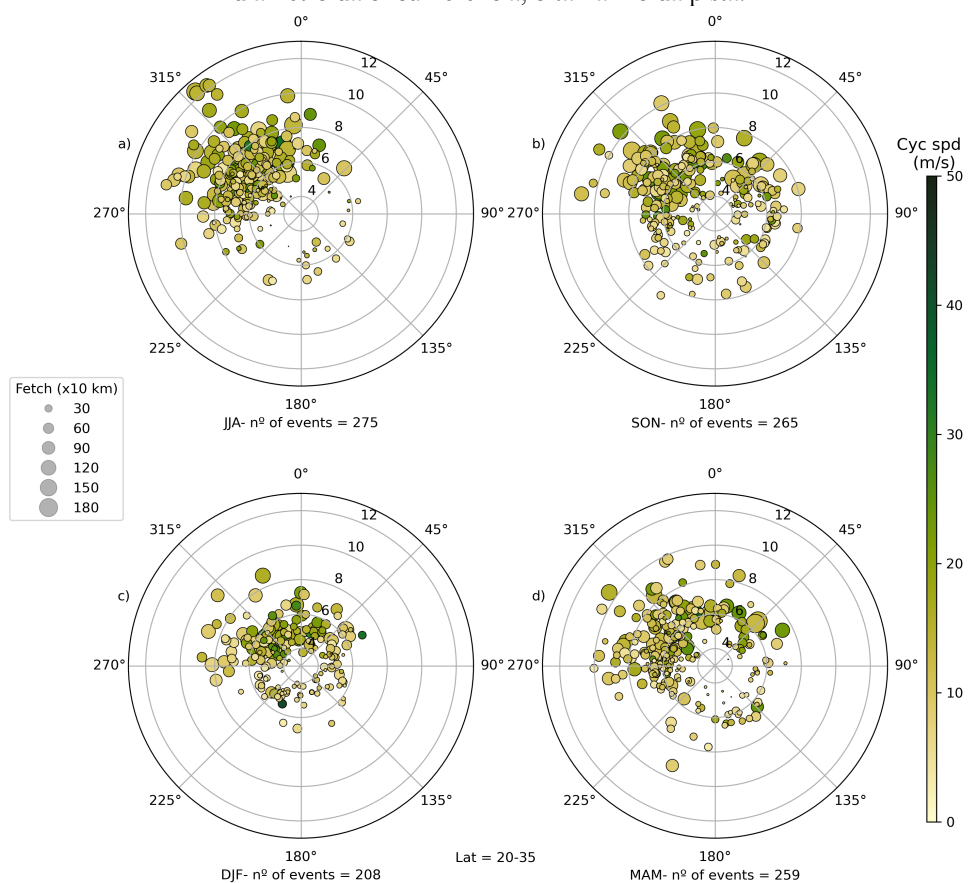
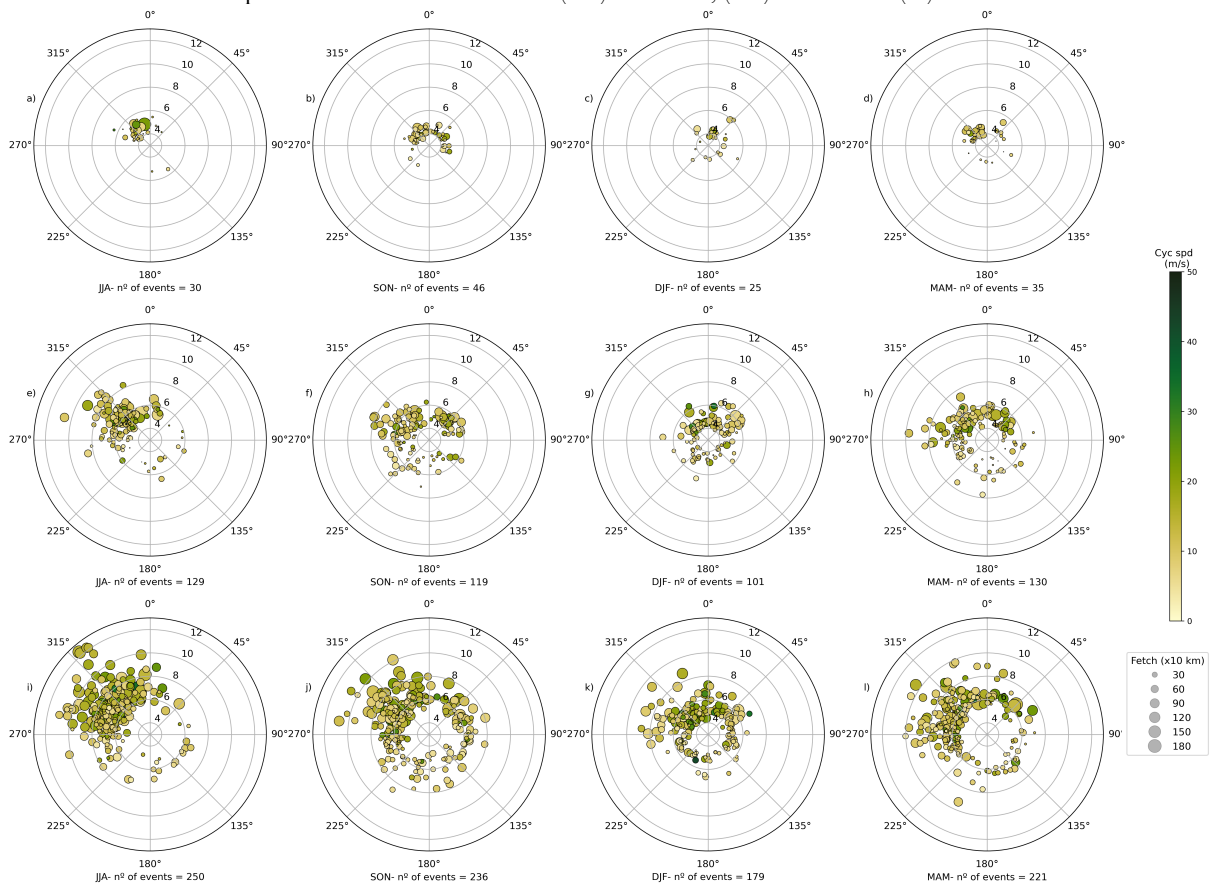


Figura 16 – Distribuição de eventos em relação ao ciclone para (a, e, i) JJA, (b, f, j) SON, (c, g, k) DJF e (d, h, l) MAM para as três faixas de latitude (a-d) 20°-25°S, (e-h) 25°-30°S e (i-l) 30°-35°S.



Considerando os distintos processos e mecanismos que podem interferir na evolução dos ciclones em toda a área de estudo, na Figura 16 vamos olhar para a dispersão anterior por faixas de latitude. A primeira faixa (Fig. 16a-d), vai da latitude 20°S a 25°S, e corresponde, a oeste, à faixa litorânea do Espírito Santo até o Sul do Estado de São Paulo, e detém o maior porto da América Latina, segundo a Confederação Nacional do Transporte⁵, e ainda o limite da região tropical. Vemos que nesta região existiram poucos eventos extremos registrados nos 40 anos de reanálise, e estes possuem altura significativa máxima abaixo de 6m, em quase sua totalidade. Podemos atribuir ao fato de os ciclones extratropicais ocorrerem na maioria dos casos em latitudes mais altas, em especial no verão.

Observemos que, conforme seguimos para latitudes maiores, a concentração dos extremos no verão ganham maior tendência para o setor NW, devido à atuação das frentes, partindo de uma dispersão total na primeira faixa (Fig. 16b) para uma distribuição não tão concentrada como no inverno, mas ainda assim, predominantemente no setor NW.

⁵ Disponível em: <<https://www.cnt.org.br/agencia-cnt/porto-santos-ranking-movimentacao-containers-crescimento-06102014>>

A faixa de 25°S a 30°S que compreende, a oeste, à faixa litorânea do Sul do Estado de São Paulo até o Norte do Rio Grande do Sul, responde pela maior quantidade de plataformas petrolíferas, e aquelas mais afastadas da costa, e possui o segundo maior porto do país. Vemos que no verão, esta região concentra os eventos extremos no quadrante NE do centro do ciclone, e aqueles com deslocamento mais lento e pistas maiores, com uma quantidade elevada de eventos, ocorrem tanto no inverno quanto no verão. Vale dar atenção especial a esta região e aos fenômenos predominantes, principalmente no verão.

A ultima faixa, entre 30°S e 35°S, que vai do Norte do Rio Grande do Sul até o sul do Uruguai, possui uma forte atividade pesqueira, um intenso fluxo de navios de grande porte que rumam o Drake, e ainda dispõe do 3º maior porto do Brasil, o Porto de Rio Grande. E esta região, como já esperado, e amplamente estudado, concentra a maior parte dos eventos extremos do domínio de estudo, tanto durante o inverno, quanto no verão, causados primordialmente pela atuação dos ciclones extratropicais e suas frentes, e como podemos ver na Figura 15i-l a maior concentração dos casos estão a NW do ciclone, e no verão, vemos extremos a NE.

Tabela 1 – Média de variáveis e quantidades de ciclones e eventos extremos por setor em relação ao centro do ciclone, no inverno (JJA).

Setor	Hs médio (m)	Pista (km)	Vel (m/s)	Período (s)	Ciclones	Eventos	%
NE	5,98	463,43	14,98	11,86	12	14	4,96
SE	5,42	229,15	8,61	10,60	10	13	4,61
SW	6,04	306,31	9,57	11,46	20	29	10,28
NW	6,44	672,97	13,38	11,59	163	226	80,14
Todos	5,97	417,97	11,64	11,38	205	282	100,0

Tabela 2 – Média de variáveis e quantidades de ciclones e eventos extremos por setor em relação ao centro do ciclone, na primavera (SON).

Setor	Hs médio (m)	Pista (km)	Vel (m/s)	Período (s)	Ciclones	Eventos	%
NE	5,46	515,26	11,88	10,69	26	53	19,63
SE	5,53	352,36	9,18	10,36	22	36	13,33
SW	5,65	270,27	9,78	10,53	41	51	18,89

Setor	Hs médio (m)	Pista (km)	Vel (m/s)	Período (s)	Ciclones	Eventos	%
NW	5,94	656,72	13,03	11,07	99	130	48,15
Todos	5,65	448,66	10,97	10,66	188	270	100,0

Tabela 3 – Média de variáveis e quantidades de ciclones e eventos extremos por setor em relação ao centro do ciclone, no verão (DJF).

Setor	Hs médio (m)	Pista (km)	Vel (m/s)	Período (s)	Ciclones	Eventos	%
NE	4,81	418,45	12,31	9,41	44	51	22,7%
SE	4,67	192,57	7,45	9,75	16	30	13,3%
SW	4,87	264,95	7,29	9,75	25	37	16,4%
NW	5,09	536,63	13,86	10,31	71	107	47,6%
Todos	4,86	353,15	10,23	9,80	156	225	100,0%

Tabela 4 – Média de variáveis e quantidades de ciclones e eventos extremos por setor em relação ao centro do ciclone, no outono (MAM).

Setor	Hs médio (m)	Pista (km)	Vel (m/s)	Período (s)	Ciclones	Eventos	%
NE	5,58	498,61	13,52	10,35	20	41	15,2%
SE	5,44	205,29	8,87	10,23	24	31	11,5%
SW	5,70	321,25	9,05	10,36	34	52	19,3%
NW	5,96	520,73	12,28	11,21	106	146	54,1%
Todos	5,67	386,47	10,93	10,54	184	270	100,0%

4. BALANÇO DE CALOR E VORTICIDADE

Tendo feita a distribuição dos eventos extremos em relação ao ciclone para as diferentes estações do ano (Fig. 13), seguiu-se para uma análise mais aprofundada com relação aos termos das equações da termodinâmica e da vorticidade, de modo a verificarmos a predominância de um ou outro termo nas diferentes camadas atmosféricas, na formação de eventos extremos.

4.1. Comparação entre balanço de dois ciclones

Antes de entrarmos no cerne deste estudo, vamos comparar o balanço de dois ciclones distintos, em estações diferentes que geraram extremos em setores diferentes. Estes casos foram inicialmente considerados por suas especificidades, e também para aclarar os aspectos dinâmicos e termodinâmicos a serem explorados.

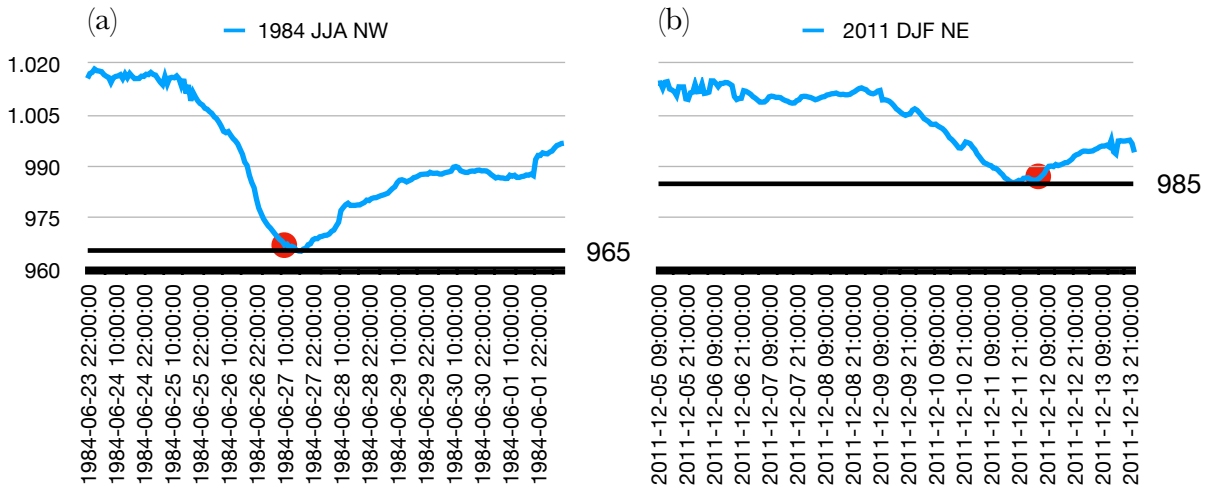
O casos estudados nesta seção tratam-se dos eventos de ondas mais extremos da série de dados, ocorridos no inverno e no verão e posicionados, um a NW e outro a NE do centro do ciclone associado.

As posições dos ciclones obtidas através do programa TRACK (HODGES, 1994; 1995; 1999), seguindo o método descrito em Hoskins e Hodges (2002; 2005) fazem parte do banco de dados de acompanhamento de ciclones, disponível em Gramcianinov et al. (2020a).

O primeiro caso a ser apresentado, representa o ciclone de inverno, associado a ondas com maior altura significativa máxima no setor frio. Ele foi acompanhado, segundo os critérios pré-estabelecidos entre 23 de junho de 1984 às 22h e 2 de julho às 9h, com a evolução da pressão mínima representada pela Figura 17a sendo que as ondas associadas a ele superaram o 90º percentil entre 26 de junho às 21h e dia 30 às 23h, com o Hs máximo de 13,4 m ocorrendo às 9h do dia 27.

O segundo caso é um ciclone de verão, com alturas significativas máximas no setor quente, a nordeste do centro do ciclone. Ele foi acompanhado entre 2 de dezembro de 2011 às 9h e 13 às 23h, com a evolução da pressão mínima representada pela Figura 17b, sendo que as ondas associadas a ele permaneceram acima do 90º percentil entre 10 de dezembro de às 16h e o dia 13 às 5h, com o Hs máximo de 7,13 m ocorrendo no dia 12 às 8h.

Figura 17 – Série temporal da pressão ao nível médio do mar no centro dos ciclones considerados, referente ao caso de (a) inverno em junho de 1984 e (b) verão ocorrido em dezembro de 2011. Os pontos vermelhos indicam o momento de máxima altura significativa, de 12,36 m e 7,14 m ocorridos às 9h do dia 27 e 8h do dia 12 respectivamente.



Para estas análises, os termos das equações foram calculados para cinco diferentes estágios ao longo do ciclo de vida do ciclone: incipiente, intensificação, maduro, enfraquecimento e desintensificação.

4.1.1. Balanço de calor e vorticidade do ciclone de inverno

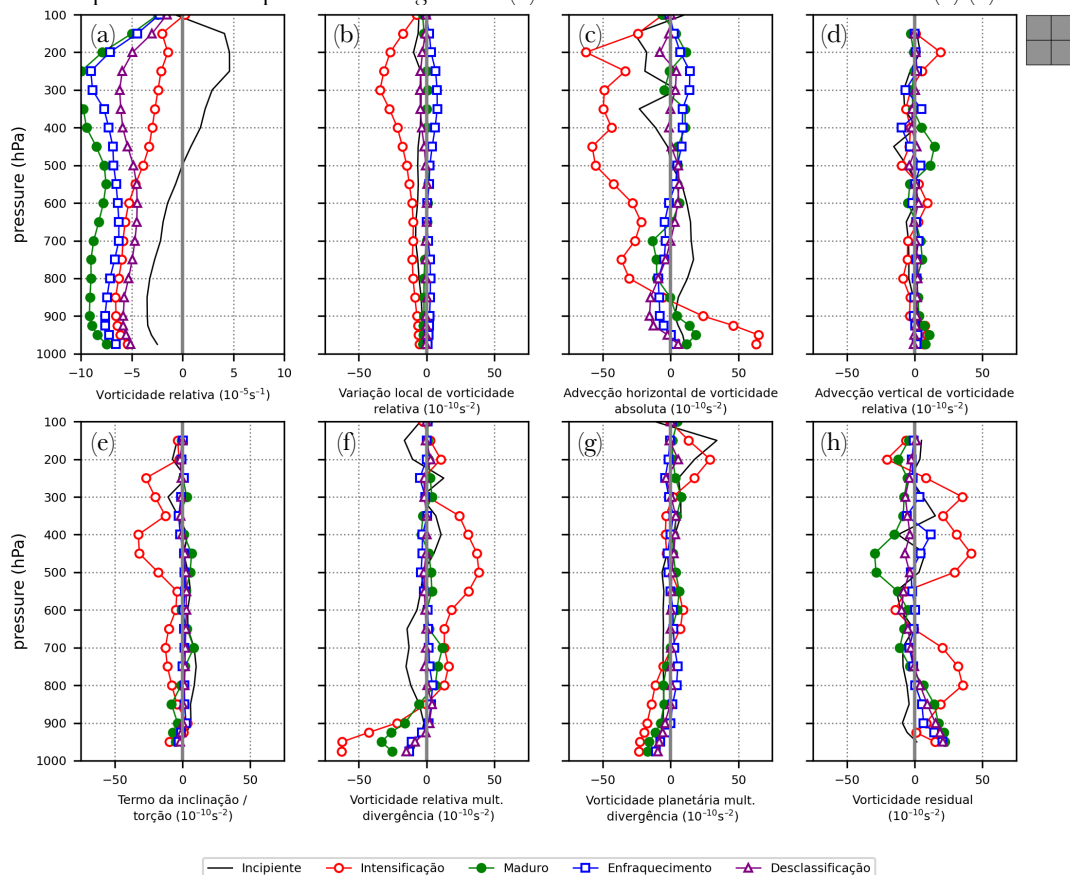
A Figura 18 nos mostra o balanço de vorticidade do ciclone de inverno. A legenda abaixo indica as fases do ciclone, sendo que a fase incipiente corresponde a fase onde deu-se o início do acompanhamento do ciclone, a fase de intensificação é a fase com maior variação de pressão que antecede o extremo. A fase madura foi selecionada como aquela onde ocorre a máxima altura significativa. A fase de enfraquecimento corresponde ao período de máxima variação positiva de pressão e desclassificação é o momento onde o acompanhamento encerra.

Percebe-se em primeira análise que a advecção horizontal de vorticidade relativa (Fig. 18c) e a vorticidade relativa multiplicando a divergência (Fig. 18g, Equação 11vi. a) são aqueles que prevalecem sobre os demais na intensificação da vorticidade local. Cabe destacar que $-\zeta \cdot \nabla_p \vec{V}_H$ (Equação 11vi. a) é um termo não linear, o que poderia estar associado a um crescimento exponencial no fenômeno. Nota-se ainda a tendência de aumento da vorticidade ciclônica $-\zeta$ desde a fase incipiente até a fase madura do ciclone (Fig. 18a), bem como um pico de tendência de vorticidade ciclônica nos altos níveis no estágio de intensificação, ambos conforme esperado (Figuras 18b, Equação 11ii).

A advecção horizontal de vorticidade ciclônica (Fig. 18c, Equação 11iii) aumenta com a altura durante a intensificação, e de acordo com a equação da tendência do geopotencial quase-geostrófica (ETQG, Eq. 12), provoca movimento ascendente, e com isso favorece formação de nuvens. O termo da vorticidade relativa multiplicando a divergência (Fig. 18f, Eq. 11vi.a) mostra convergência em superfície, o que também favorece movimento ascendente.

Cabe também destacar que os termos de vorticidade relativa e planetária aplicados ao termo de divergência (Eq. 11vi) tem sinais opostos na média troposfera durante a intensificação do sistema (Figuras 18f, g).

Figura 18 – Balanço de vorticidade do ciclone ocorrido no inverno de 1984, que gerou extremos no quadrante NW, durante cinco fases de maturação indicadas na legenda. Os termos do balanço são (a) vorticidade relativa (10^{-5} s^{-1}), (b) variação local de vorticidade relativa, (c) advecção horizontal de vorticidade absoluta, (d) advecção vertical de vorticidade relativa, (e) termo da inclinação/torção, (f) vorticidade relativa multiplicando divergência, (g) vorticidade planetária multiplicando divergência e (h) vorticidade residual. As unidades de (b)-(h) são 10^{-10} s^{-2} .

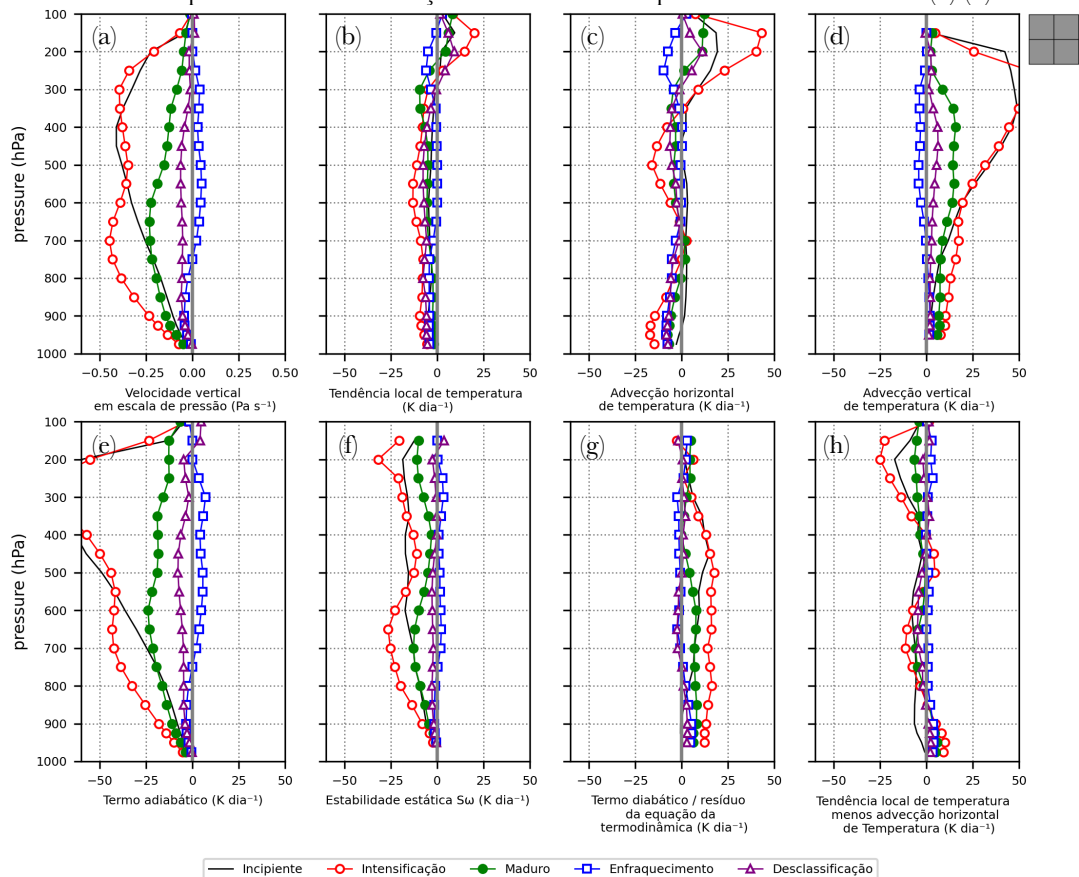


Em primeira análise, o balanço de calor (Eq. 7) mostra o efeito compensatório entre o termo da advecção vertical de temperatura (Eq. 7.v) e o termo adiabático (Eq. 7.iv). Notamos do início até e maturação do ciclone, forte movimento ascendente ω (Fig. 19a), e o termo diabático (Eq. 7i) atuando aumentando a temperatura desigualmente nas diferentes camadas

(Fig. 19g), diminuindo intensidade entre 850 e 400 hPa, e como sabemos da equação da tendência do geopotencial quase-geostrófico, esta variação vertical aumenta a espessura da camada, intensificando o evento.

Além destes termos, a advecção horizontal de temperatura (Eq. 7iii) nos níveis de jato mostra uma tendência ao aquecimento nos altos níveis (Fig. 19c), o que do mesmo modo, atua reduzindo a espessura da camada em altos níveis. Os termos de advecção vertical de temperatura (Eq. 7v) e da estabilidade estática (Eq. 7iv, v) indicam a presença do forte movimento ascendente (Figuras 19d, f).

Figura 19 – Balanço de calor do ciclone ocorrido no inverno de 1984, que gerou extremos no quadrante NW, durante cinco fases de maturação indicadas na legenda. Perfis verticais da (a) velocidade vertical (Pa s^{-1}), (b) tendência local de temperatura, (c) advecção horizontal de temperatura, (d) advecção vertical de temperatura, (e) termo adiabático, (f) estabilidade estática, (g) termo diabático/resíduo da equação da termodinâmica e (h) tendência local de temperatura menos advecção horizontal de temperatura. As unidades de (b)-(h) são K dia^{-1} .

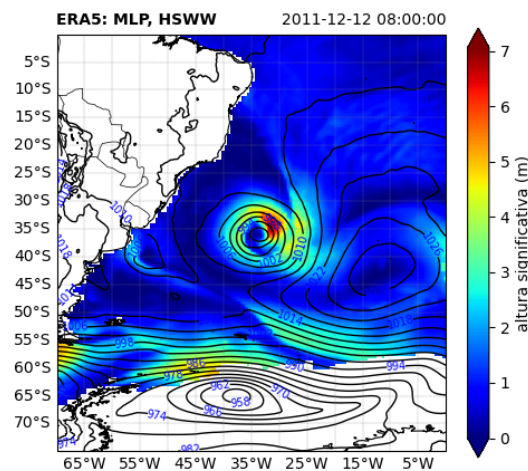


4.1.2. Balanço de calor e vorticidade do ciclone de verão

Acompanhando o ciclone que ocorreu em dezembro de 2011, notamos PNMM mínima superior ao do ciclone mais intenso de inverno (Fig. 17). Da mesma forma, os termos relacionados à intensificação do evento são a advecção horizontal de vorticidade relativa (Eq. 11iii) e o termo do estiramento (Eq. 11vi), assim como no caso de inverno.

A figura 20 mostra a presença da ASAS com máxima pressão ao nível médio de 1030 hPa. Seu centro encontra-se a ESE do ciclone no momento de máxima altura significativa de ondas do evento de verão. A ASAS aparentemente bloqueia a propagação do ciclone para leste justificando seu deslocamento mais lento, que é característica marcante dos ciclones associados a eventos extremos de verão (Fig. 15c). Além disso, a posição do anticiclone age intensificando os ventos de NW (CAMPOS; PARENTE; DE CAMARGO, 2012; GRAMCIANINOV et al., 2020c), tendendo a intensificar os eventos de onda a NE do ciclone (Fig. 20).

Figura 20 – Altura significativa de onda e isolinha de pressão no instante de máxima altura significativa do evento de verão. O evento extremo está localizado próximo a uma região de convergência de ventos.



Comparando os balanços dos dois ciclones para os casos mais intensos, não existem grandes diferenças com relação aos termos, além da intensidade superior no inverno. Ressalta-se apenas o aquecimento diabático menos uniforme nas camadas atmosféricas no verão (Fig. 22g, Eq. 7i) o que sabemos provocar o aumento do geopotencial, de acordo com a ETQG (Eq. 12).

Para buscarmos a diferença entre estes ciclones que causaram extremos em estações diferentes e em quadrantes diferentes, vamos observar o balanço nos diferentes quadrantes destes ciclones.

Figura 21 – Balanço de vorticidade do ciclone ocorrido no verão de 2011, que gerou extremos no quadrante NE.

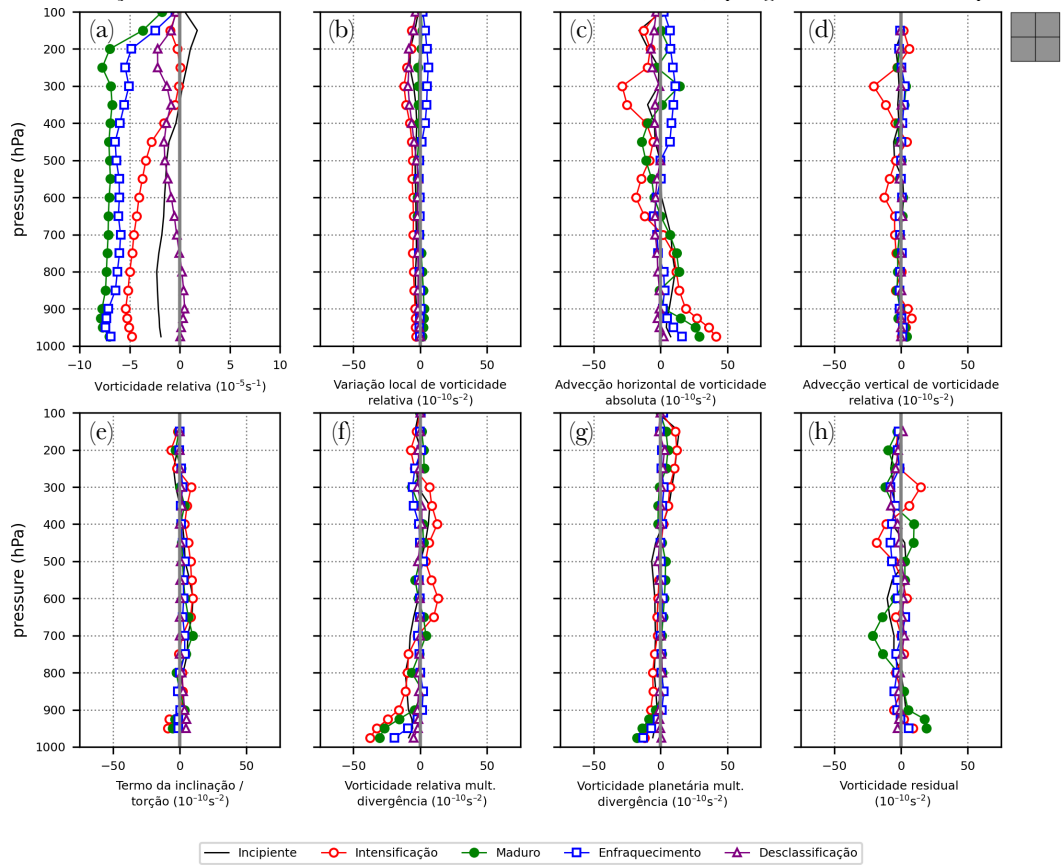
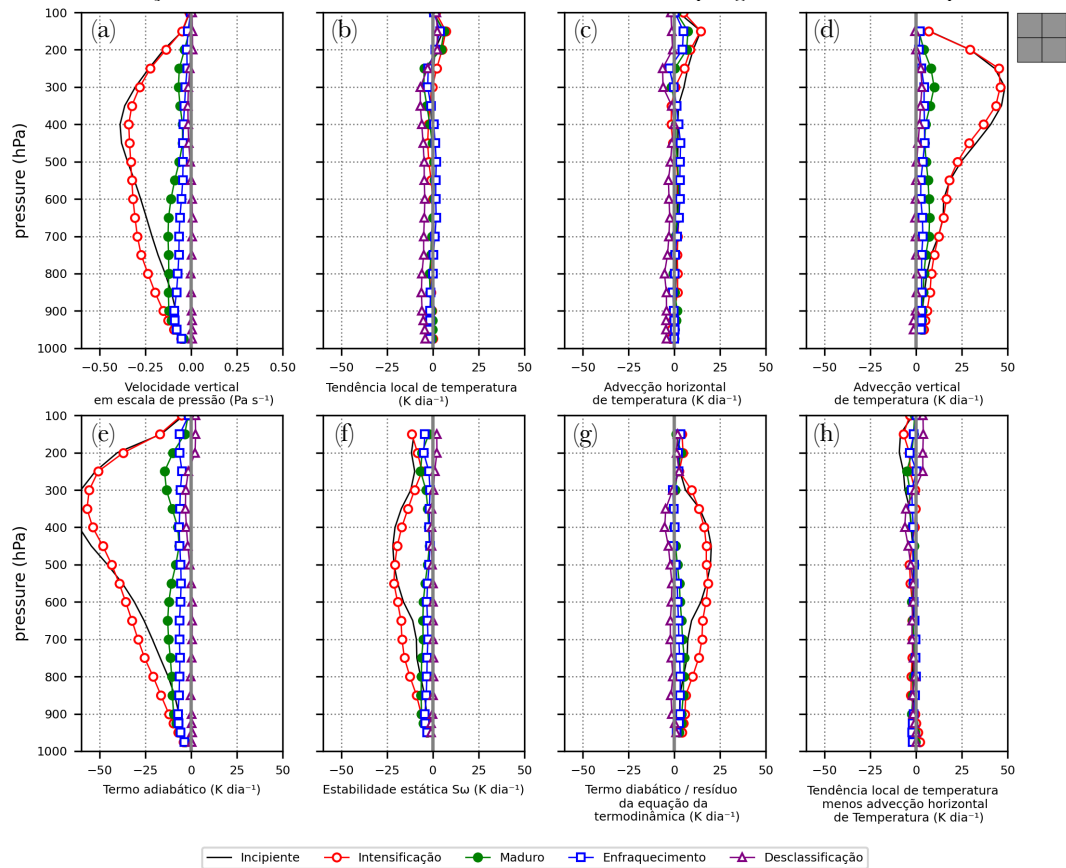


Figura 22 – Balanço de calor do ciclone ocorrido no verão de 2011, que gerou extremos no quadrante NE.

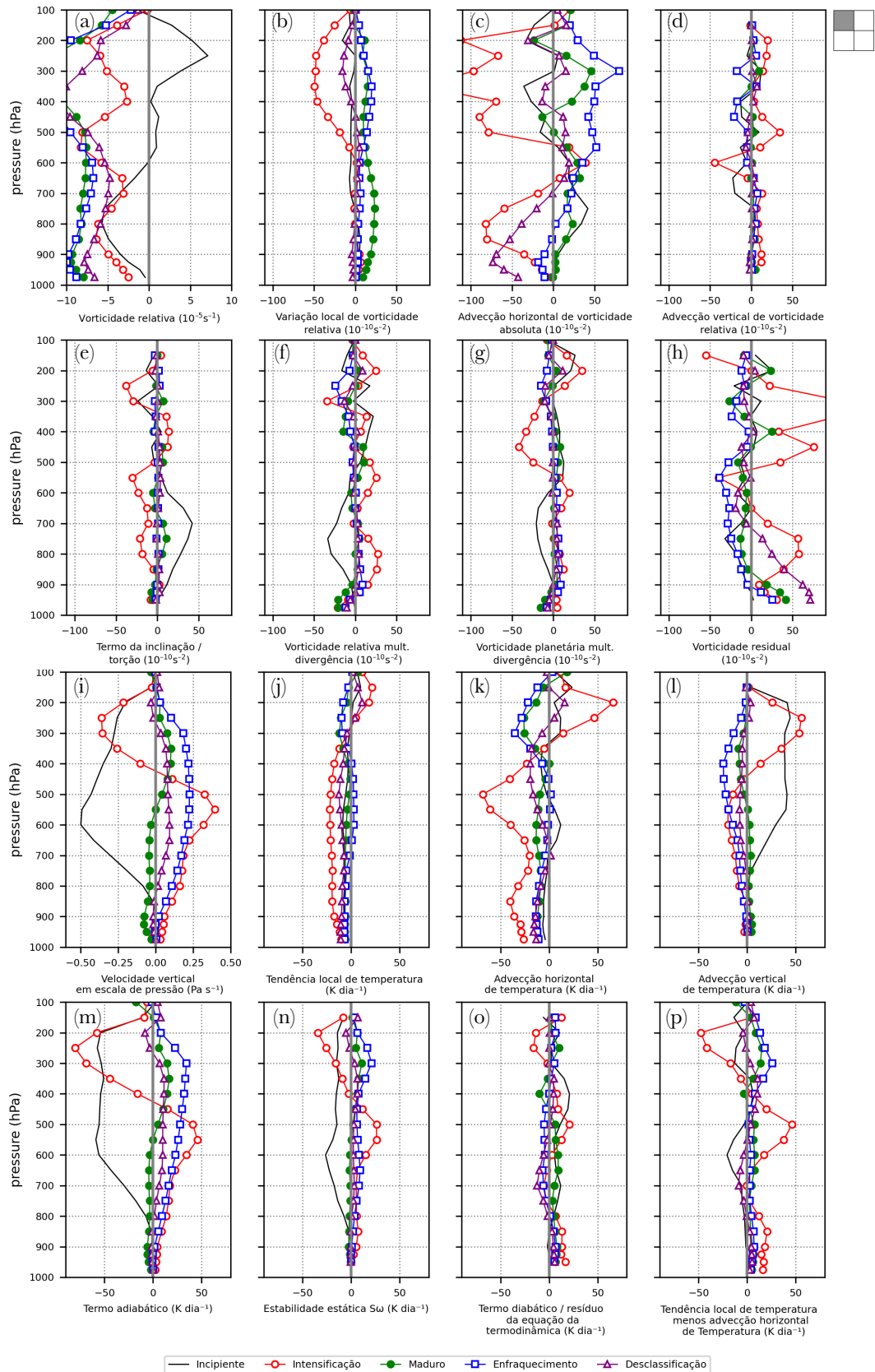


4.1.3. Análise por quadrantes

Diferentemente do que observamos com a média em todos os quadrantes, analisamos inicialmente os quadrantes onde os extremos ocorreram e investigamos os termos predominantes. Em princípio, os termos da advecção de vorticidade (Figura 23c, Eq. 11iii, v) e da vorticidade residual (Figura 23h, Eq. 11i) no quadrante NW, sobressaem-se durante a intensificação, com destaque para o termo da advecção horizontal de vorticidade ciclônica (Eq. 11iii, v) nos altos níveis, que contribui significativamente para a intensificação dos vórtices ciclônicos em altitude (Figura 23b, Eq. 11ii).

O balanço de calor do quadrante NW, ou seja, aquele com a ocorrência do evento extremo, indicou uma sobreposição de camadas com características distintas. Durante a intensificação os níveis médios e baixos têm tendência de redução de temperatura, enquanto os mais altos, de aumento (Figura 23j). Esta diferença aponta para a atuação da advecção horizontal (Eq. 7iii) quente nos altos níveis, e fria nos níveis médios e baixos.

Figura 23 – Balanço de vorticidade (a-h) e calor (i-l) do quadrante NW do ciclone do inverno de 1984, com extremo no quadrante NW.



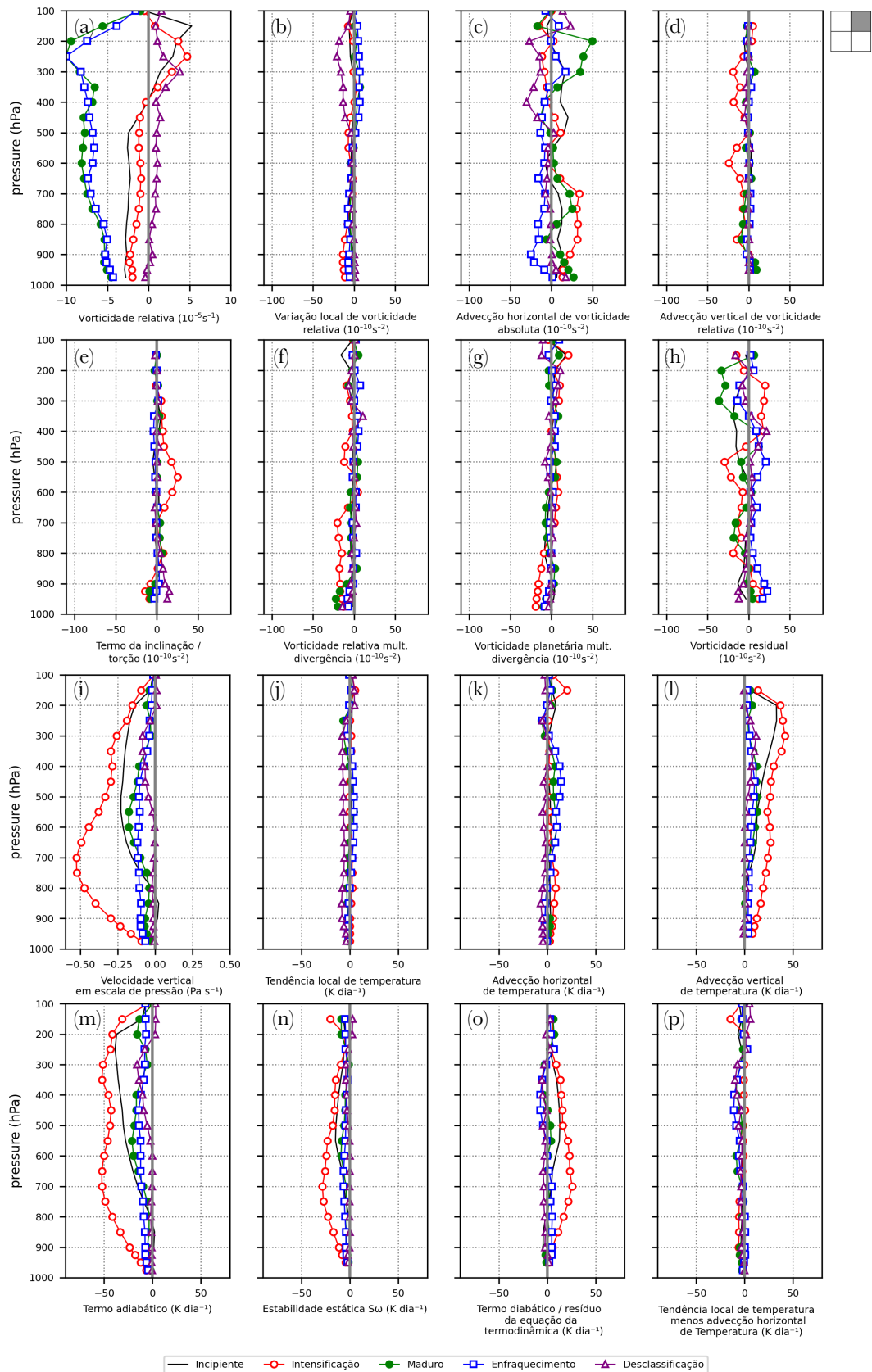
Observando o ciclone ocorrido no verão, analisamos o quadrante NE onde ocorreu o evento extremo. Os termos deste quadrante interferem em menor grau na tendência da vorticidade (Eq. 11ii), destacando-se a advecção horizontal de vorticidade (Eq. 11iii) anticiclônica nos baixos níveis, o termo da inclinação (Figura 24e, Eq. 11vii) indicando certa baroclinia durante a intensificação em níveis médios.

O balanço de calor aponta para o forte resfriamento adiabático (Eq. 7iv) provocado pelo intenso movimento ascendente neste quadrante (Figura 24m), assim como o aquecimento diabático (Figura 24o, Eq. 7i) provocado pela liberação de calor latente.

Cabe destacar que comparando os balanços da região total com os balanços dos quadrantes com ocorrência de extremos, os termos com maior representatividade na média geral se apresentam em setores diversos ao da ocorrência das ondas extremas, ou seja, podemos compreender que estes termos podem estar associados a intensificação do ciclone como um todo, e assim, contribuir indiretamente para a intensificação de eventos de onda. Poderia-se ainda pensar que termos em um quadrante poderiam contribuir na intensificação dos eventos de ondas em outro quadrante, por transporte ou compensação de variáveis.

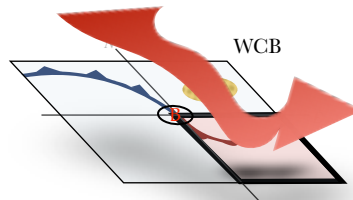
O quadrante SE é aquele que apresenta valores mais intensos em termos como variação vertical da advecção horizontal de vorticidade (Eq. 11iii), que, segundo a teoria quase-geostrófica, provoca convergência em superfície e movimento ascendente, o que acarreta em resfriamento adiabático e aquecimento diabático. A variação da advecção horizontal em relação aos demais termos no quadrante SE pode estar relacionada com o deslocamento E-SE, próprio destes ciclones.

Figura 24 – Balanço de vorticidade (a-h) e calor (i-l) do quadrante NE do ciclone do verão de 2011, com extremo no quadrante NE.



Vamos então analisar o quadrante SE dos ciclones, onde ocorre boa parte da advecção quente e da variação vertical de advecção de vorticidade, e onde a esteira transportadora quente ou *warm conveyor belt* (WCB) contribui com o ar quente e úmido para níveis mais altos.

Figura 25 – Representação do balanço por quadrantes e da esteira transportadora quente fornecendo calor e umidade para as camadas superiores.



Olhando os balanços de calor para ambos os casos (Figuras 25 e Figura 27), a estabilidade estática (Figura 26f e Figura 27f, Eq. 7iv+v) indicou um forte movimento ascendente, e no verão vemos maior presença de aquecimento diabático (Figura 29g, Eq. 7i), associado principalmente a liberação de calor latente pela formação de nuvens. Além disso, pela ETQG, um acentuado $\frac{\partial}{\partial p}J$, interfere diretamente na espessura das camadas, provocando um cavamento em baixos níveis, e a intensificação da vorticidade geostrófica negativa. No inverno, o termo que provoca este aumento é a advecção diferencial de temperatura (Figura 26c, Eq. 7iii).

Figura 26 – Balanço de calor do quadrante SE do ciclone do inverno de 1984, com extremo no quadrante NW.

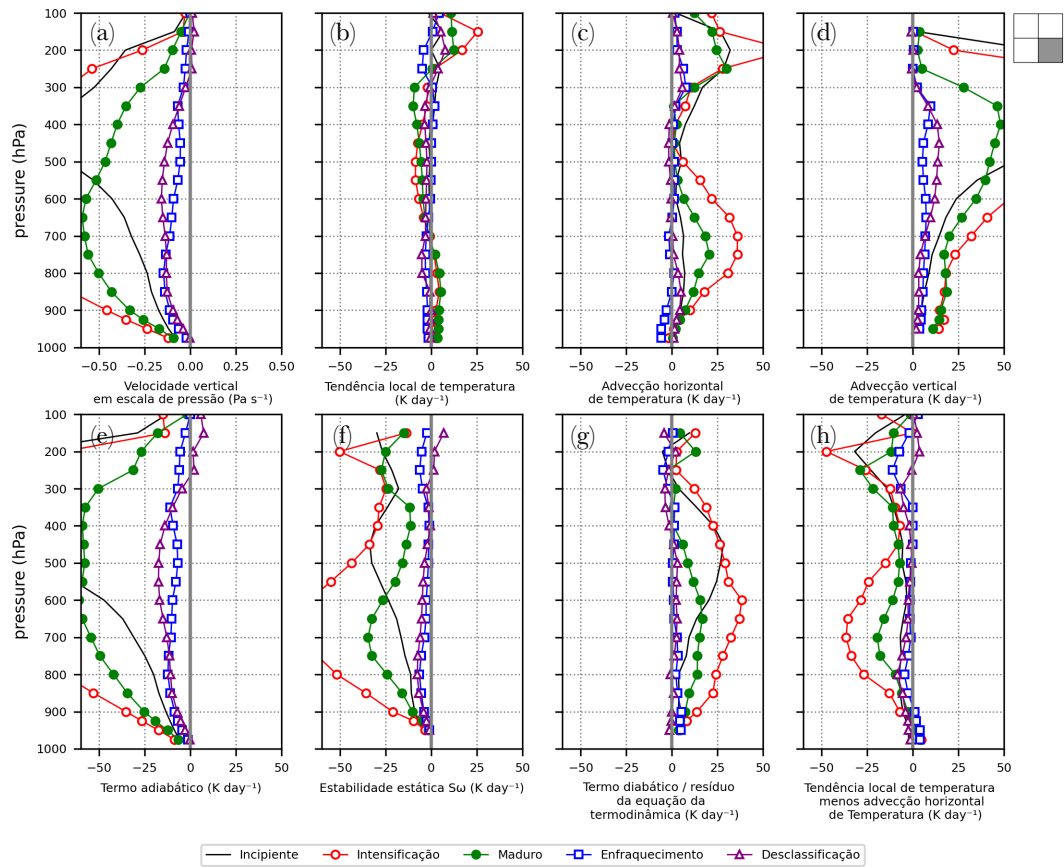


Figura 27 – Balanço de calor do quadrante SE do ciclone do verão de 2011, com extremo no quadrante NE.

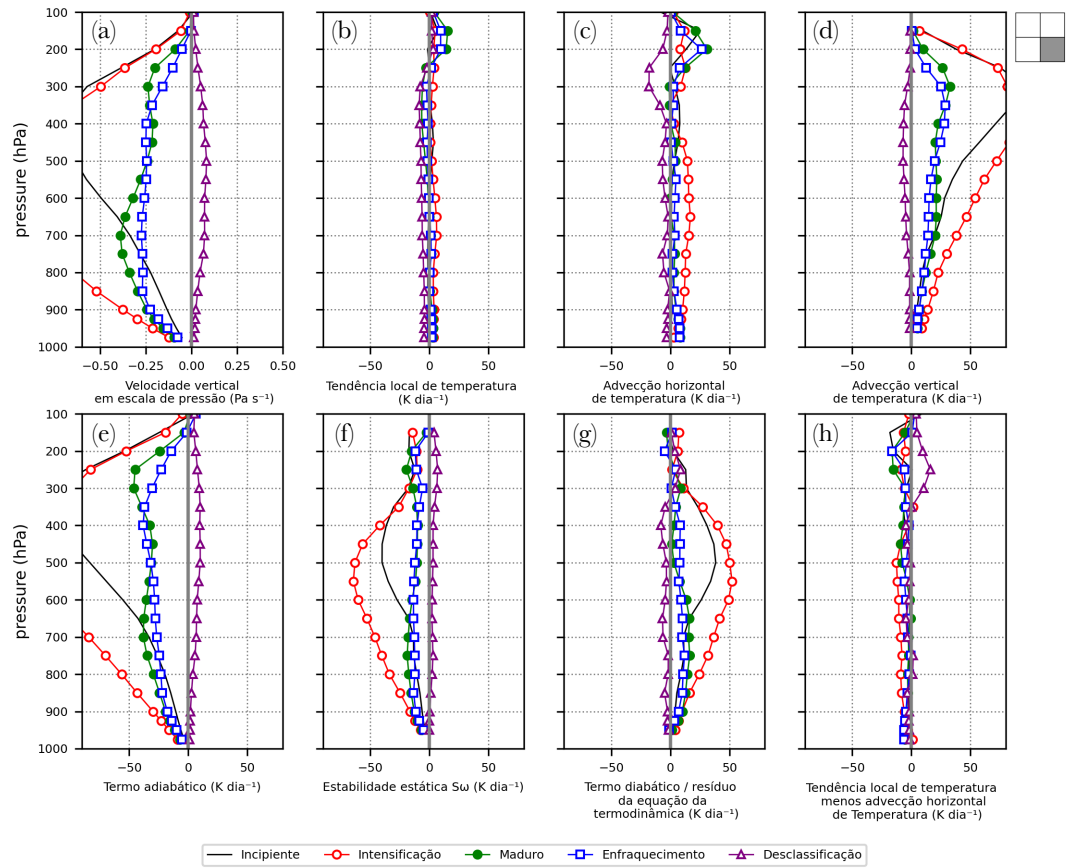
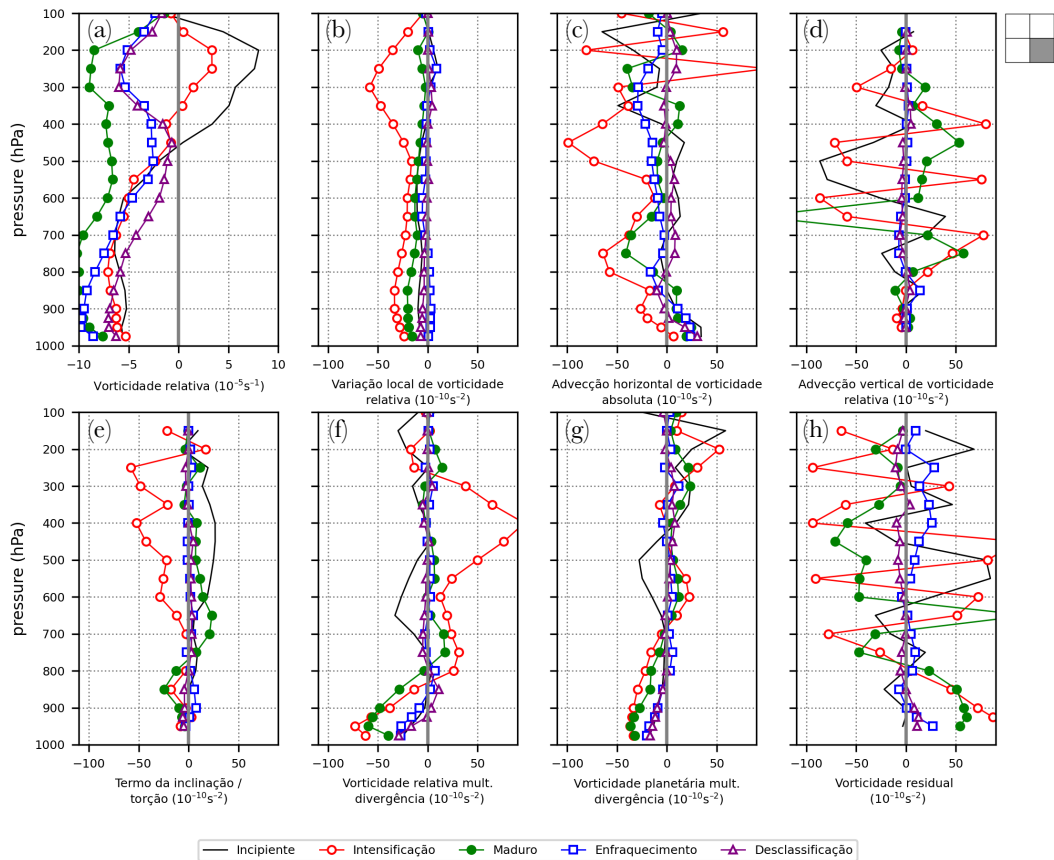
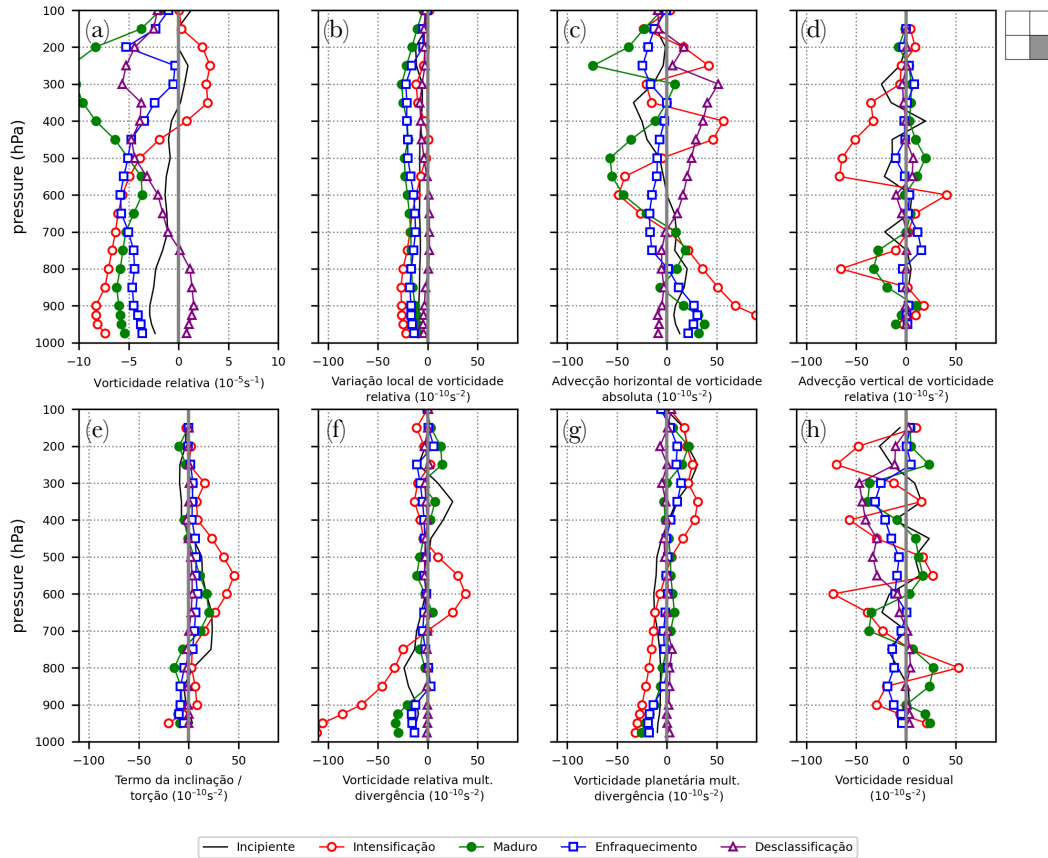


Figura 28 – Balanço de vorticidade do quadrante SE do ciclone do inverno de 1984, com extremo no quadrante NW.



Analisando o balanço de vorticidade vimos que durante a intensificação a variação vertical da advecção horizontal da vorticidade (Figura 28c e Figura 29c, Eq. 11iii) possui maior intensidade em níveis baixos reduzindo com altitude em ambos os ciclones, favorecendo movimento ascendente, e o estiramento (Eq. 11vi) atua intensificando o vórtice.

Figura 29 – Balanço de vorticidade do quadrante SE do ciclone do verão de 2011, com extremo no quadrante NE.



Como podemos observar, os ciclones acima possuem importantes semelhanças relacionadas aos mecanismos de instabilidade, que provocam movimento ascendente, convergência em baixos níveis e divergência nos altos níveis, os quais favorecem a formação de nuvens quando há abundância de umidade, com diferenças fundamentais que podem ou não estar diretamente relacionadas com o quadrante ou com a estação; assim, estudar os casos individualmente é uma tarefa exaustiva muitas vezes inconclusiva.

Como diferenças, destacam-se a variação vertical da advecção horizontal de vorticidade (Eq. 11iii) que ocorre mais intensamente no quadrante SE no evento de verão, e no evento de inverno à SW, provocando intensificação do evento de onda ocorrido ao norte destes quadrantes.

Na próxima seção, todos os ciclones associados a extremos na nossa área delimitada serão estudados de maneira unificada, **durante o instante de máxima altura significativa**, e também **durante seu processo de intensificação**, de modo a podermos analisar o comportamento médio destes eventos.

5. BALANÇO MÉDIO DOS CICLONES MADUROS

Como alternativa a esta análise individualizada, agrupamos os ciclones por estações e por quadrantes nos momentos onde ocorreu o pico de altura significativa de ondas, de modo a vermos o comportamento dos termos juntos em uma única figura neste dado instante. Além disso, agrupamos os mesmos ciclones durante a intensificação, 24h antes da ocorrência do pico do evento.

Observa-se que o número total de eventos indicado na Tabela 5 é menor do que o número de ciclones exposto nas Tabelas de 1 a 4, uma vez que, como mencionado naquela seção, um mesmo ciclone é capaz de gerar múltiplos eventos extremos em momentos diferentes. Para o cálculo do balanço, foi considerado apenas o instante com maior altura significativa associado a cada ciclone.

Tabela 5 – Quantidade de ciclones associados a eventos extremos, separados por quadrantes, por estações do ano.

	NE	SE	SW	NW	TOTAL
DJF	44	16	25	71	156
MAM	20	24	34	106	184
JJA	12	10	20	163	205
SON	26	22	41	99	188
TOTAL	102	72	120	439	733

Iniciamos nossa análise observando os balanços realizados somente para os ciclones intensos e sem discriminação de setor, ou seja, os perfis médios de cada termo referente a todos os ciclones de cada estação.

5.1. Todos os eventos

A estratégia de superposição dos perfis de cada um dos termos foi adotada para a identificação das características marcantes dos ciclones mais intensos. A grande quantidade de casos leva ao espalhamento das curvas, mas é notável a existência de um padrão de comportamento no perfil vertical de cada termo. A ideia é colecionar os casos mais intensos para a obtenção de um comportamento médio dos fenômenos. Todos os balanços dessa seção foram realizados no instante de máxima altura significativa de ondas.

Para os casos de inverno apresentados na Figura 30, verificamos que estes ciclones mais intensos possuem maior advecção horizontal de vorticidade relativa (Eq. 1 l iiii) na superfície, e

maior variação vertical dessa advecção nas primeiras camadas (entre a superfície e 850 hPa), o que provoca movimento ascendente na região, segundo a ETQG.

Igualmente nota-se que o termo da torção (que une o termo da inclinação do vórtice com o termo do solenóide, Eq. 11vii) indica intensidades absolutamente superiores para os eventos mais extremos. Este termo indica forte cisalhamento vertical do vento horizontal e variação horizontal do vento vertical, caracterizado pela presença de nuvens convectivas. Ele indica também a presença de forte inclinação entre o gradiente de pressão e temperatura, caracterizando maior baroclinia e intenso vento térmico.

O termo da vorticidade relativa multiplicando a divergência (Fig. 30g, Eq. 11vi.a), ou termo da “bailarina”, destaca-se dos demais, intensificando o vórtice na baixa troposfera, aumentando proporcionalmente a intensidade do evento.

Vê-se que o termo da vorticidade planetária multiplicando a divergência (Figura 30h, Eq. 11vi.b) contribui com vorticidade ciclônica na superfície e anticiclônica nos altos níveis. Entretanto, percebe-se influência de ordem menor em relação ao efeito da vorticidade multiplicando a divergência (Eq. 11vi.a). No verão (Figura 31), o comportamento assemelha-se ao do inverno, com destaque para menor inclinação do vórtice (Eq. 11vii), que se reflete ao comparar os perfis dos diferentes termos. Observando os quadros inferiores da Figura 31, de primavera e outono (Fig. 31i e Figura 31j), nota-se que estes são aderentes e consistentes aos perfis dos termos equivalentes no inverno e no verão. Cabe destacar o termo da inclinação (Eq. 11vii) mais significativo na primavera, com os eventos mais intensos associados a ele, podendo este representar uma maior baroclinia nestes meses.

Figura 30 – Balanço de vorticidade de todos os ciclones associados a eventos extremos de inverno, durante o instante de máxima altura significativa. Os termos do balanço são (a) vorticidade relativa (10^{-5} s^{-1}), (b) variação local de vorticidade relativa, (c) advecção horizontal de vorticidade absoluta, (d) advecção vertical de vorticidade relativa, (e) termo da inclinação/torção, (f) vorticidade relativa multiplicando divergência, (g) vorticidade planetária multiplicando divergência e (h) vorticidade residual. As unidades de (b)-(h) são 10^{-10} s^{-2} . As cores verde, amarela, laranja e vermelha separam os percentis de 25%, 50% e 75% dentro dos eventos extremos.

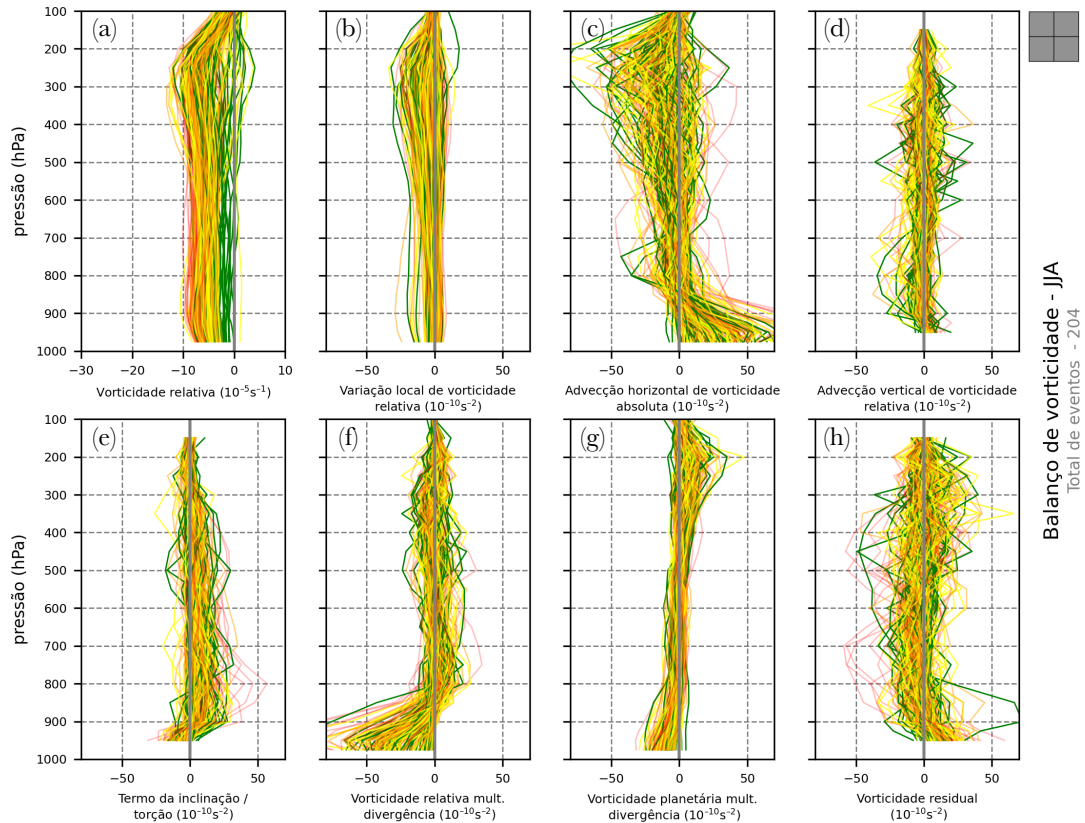
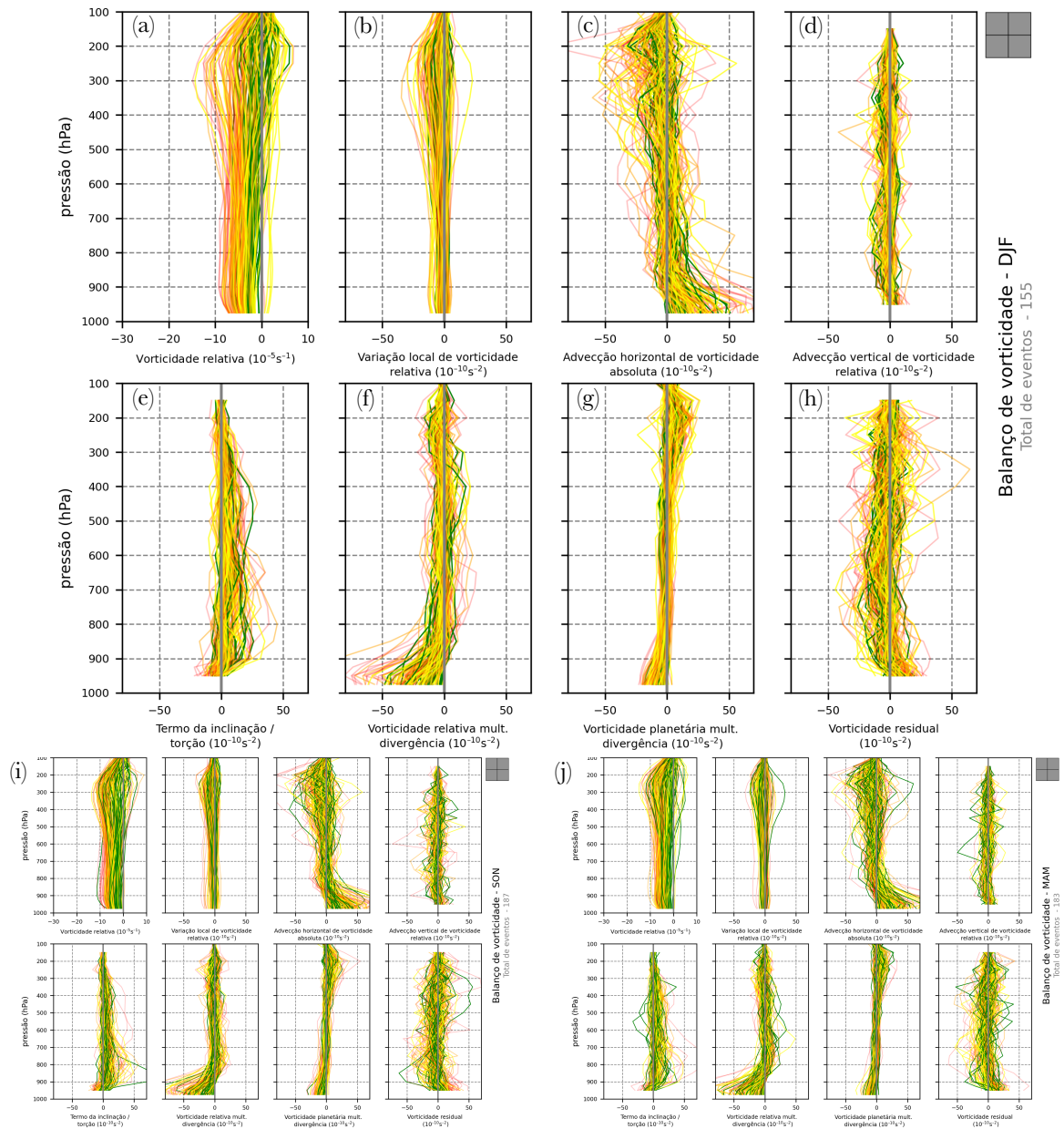


Figura 31 – Balanço de vorticidade de todos os ciclones de (a-h) verão, (i) primavera e (j) outono. As cores verde, amarela, laranja e vermelha separam os percentis de 25%, 50% e 75% dentro dos eventos extremos.

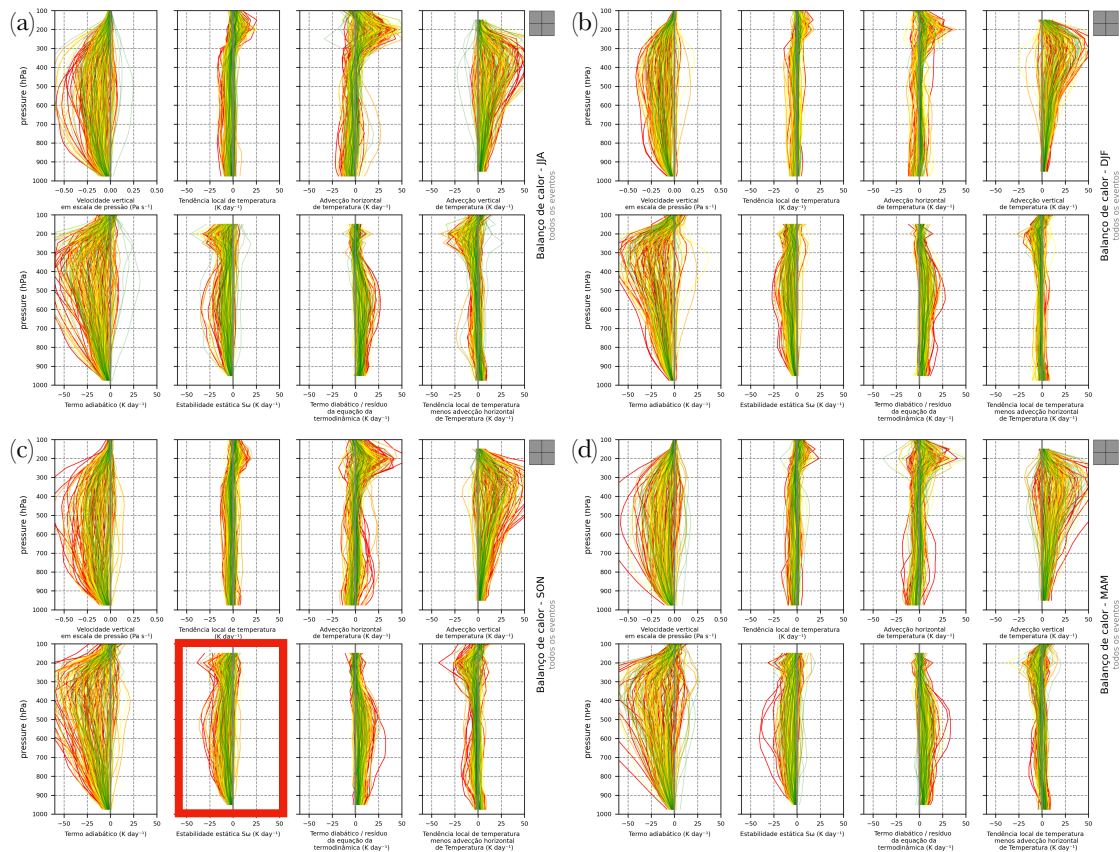


As figuras observadas deixaram evidente que a ordem do termo advecção de vorticidade planetária (Eq. 1 iv) o torna irrelevante para a variação local de vorticidade portanto, para as próximas análises, ele foi unificado com o termo da advecção de vorticidade relativa, que passou a ser identificado como advecção de vorticidade absoluta (Eq. 1 liii+v).

O balanço de calor (Figura 32) reforça a ideia de que os termos de maiores valores absolutos estão associados aos eventos mais extremos. Em primeira análise, nota-se um sobressalto do termo de estabilidade estática (Eq. 7iv+v) na primavera em relação as demais estações do ano (destaque na Figura 32). Com isso entende-se que o resfriamento adiabático

(Eq. 7iv) causado pelo movimento ascendente sobrepõe-se à advecção vertical de temperatura (Eq. 7v).

Figura 32 – Balanço de calor de todos os ciclones, para as quatro estações do ano (a) inverno, (b) verão, (c) primavera e (d) outono. Os termos do balanço são: velocidade vertical (Pa s^{-1}), tendência local de temperatura, advecção horizontal de temperatura, advecção vertical de temperatura, termo adiabático, estabilidade estática, termo diabático/resíduo da equação da termodinâmica e tendência local de temperatura menos advecção horizontal de temperatura (demais unidades K dia^{-1}). As cores verde, amarela, laranja e vermelha separam os percentis de 25%, 50% e 75% dentro dos eventos extremos.°.



5.2. Médias dos percentis

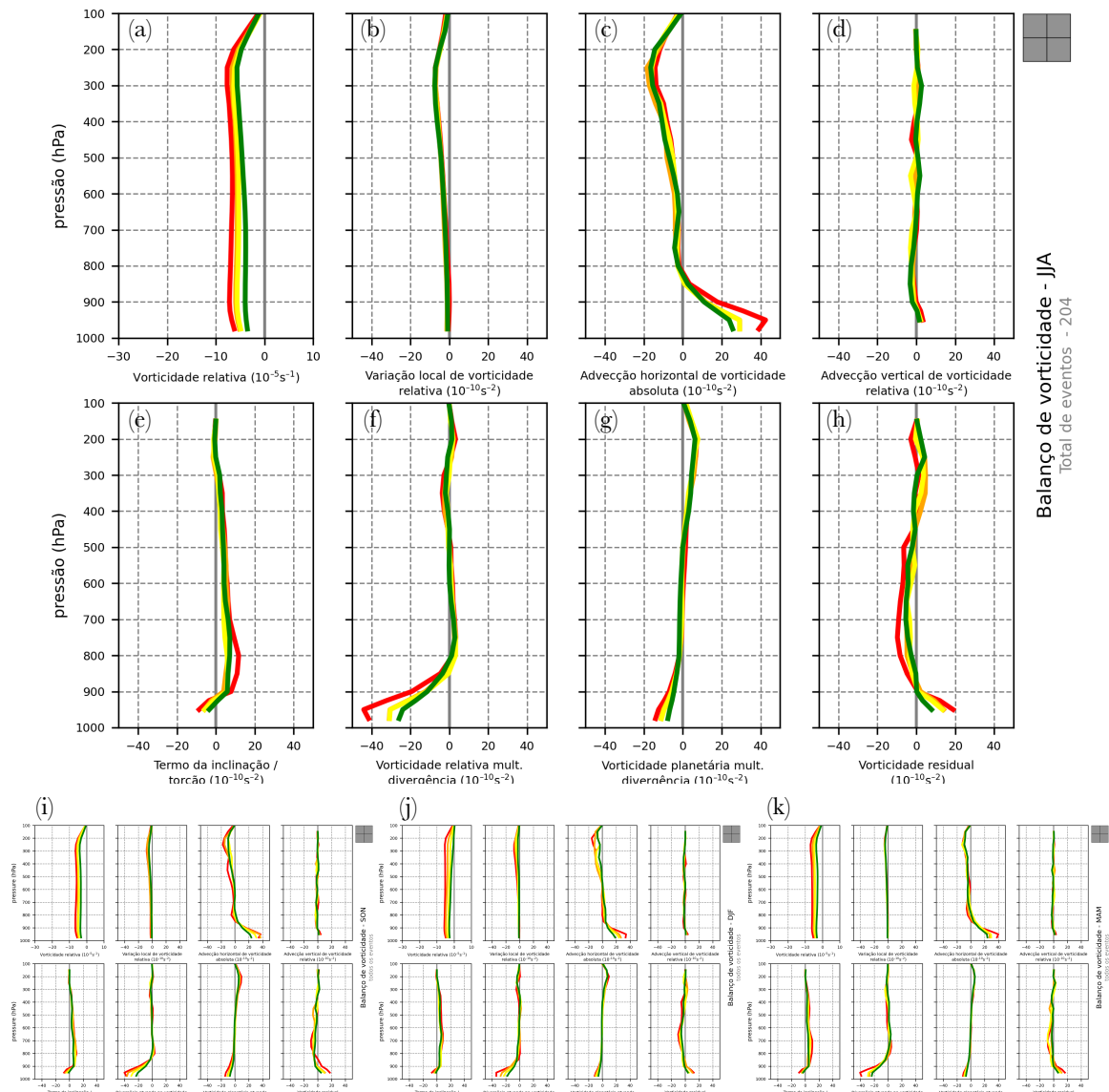
Como mencionado na seção 2, para facilitar a visualização e a compreensão do estudo, os casos extremos (o último decil) foram agrupados em percentis e agregados por cores..

A Figura 33 representa o balanço de vorticidade de todos os eventos nas quatro estações. Notamos a forte homogeneidade entre todos os casos extremos. Percebe-se o espalhamento das cores no termo da advecção horizontal de vorticidade relativa (Eq. 1liii) na atmosfera baixa. Este termo apresenta maiores intensidades para eventos mais extremos na superfície para todas as estações. Porém, durante a primavera e o verão, ele indicou valores mais negativos nos eventos mais extremos na alta troposfera., Assim, a maior variação vertical da vorticidade, acaba por intensificar o movimento ascendente nestas estações.

Outro aspecto importante que cabe ressaltar é que os eventos mais extremos durante todo ano caracterizam-se pela maior divergência (Eq. 11vi) negativa em superfície (convergência), e com advecção de vorticidade anticiclônica também na superfície (Eq. 11iii), considerando a variação vertical decrescente causando movimento ascendente. Devemos considerar que estes valores são médios para a região ao redor do ciclone, uma vez que sabemos que a advecção de vorticidade ciclônica predomina a leste do cavado, e anticiclônica a leste da crista, de forma a transportar a onda para leste. A análise dividida por quadrantes traz melhor compreensão da relação destes dois termos atuando ao redor do ciclone.

A vorticidade residual (Eq. 11i) indica a presença de nuvens convectivas contribuindo para a vorticidade ciclônica onde os eventos são mais intensos, principalmente no inverno e primavera. Outro ponto importante é que a definição do centro do ciclone é feita com base no nível de 850 hPa, de modo que os quadrantes para cálculo dos perfis verticais dos termos dos balanços respeitam esta delimitação geográfica e precisa ser levada em consideração nas análises.

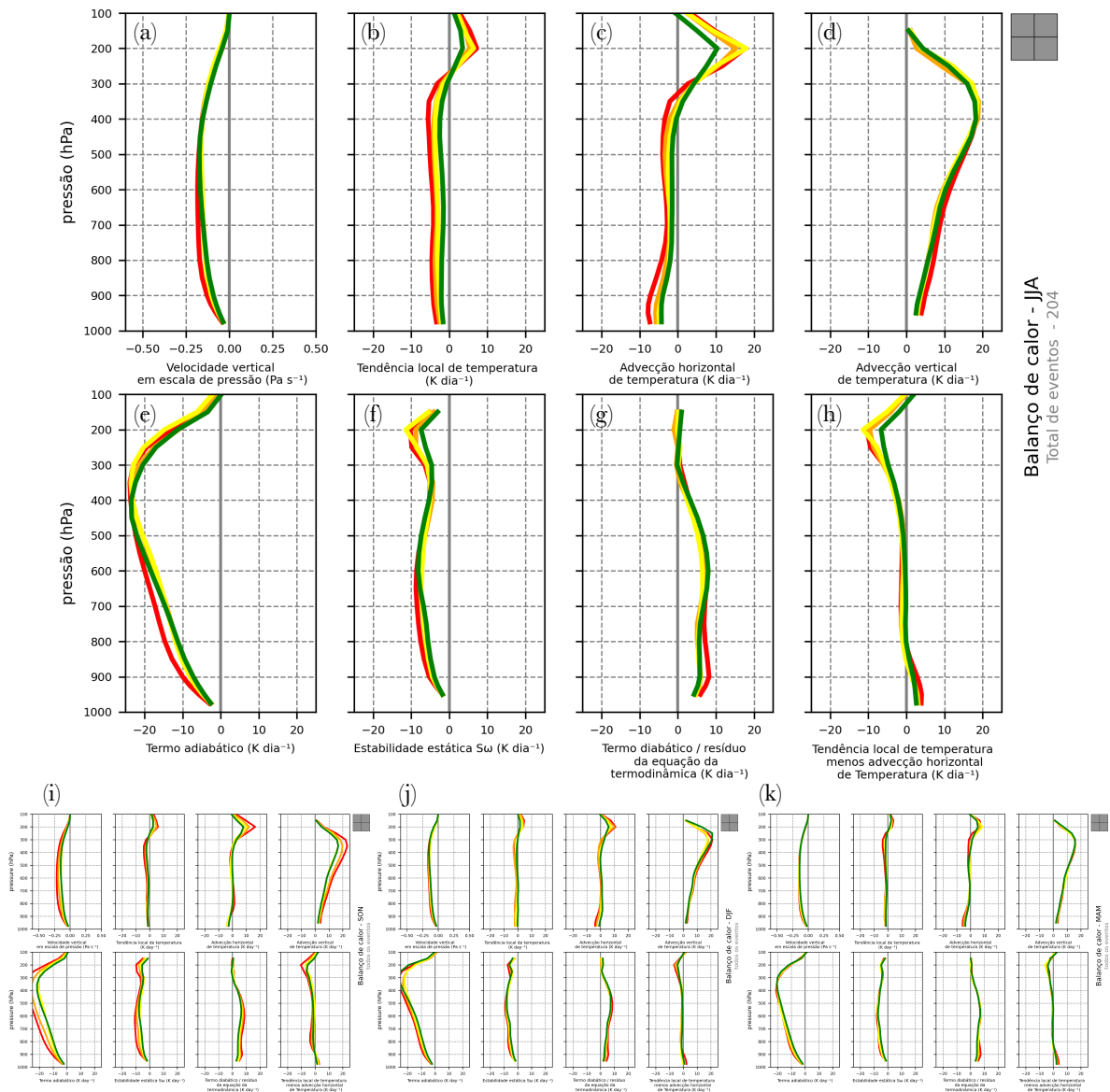
Figura 33 – Balanço de vorticidade de todos os ciclones para (a-h) inverno, (i) primavera, (j) verão e (k) outono. As cores verde, amarela, laranja e vermelha separam os percentis de 25%, 50% e 75% dentro dos eventos extremos.



Observando agora a média do balanço de calor (Figura 34), fica mais fácil visualizar a maior relevância do resfriamento adiabático (Eq 7iv) em relação a advecção vertical de temperatura (Eq. 7v) no inverno e primavera naqueles eventos mais extremos. A advecção horizontal de temperatura (Eq. 7iii) se sobressai em relação aos demais nos eventos mais extremos no inverno. Vale ressaltar a inversão térmica na camada do jato, onde os eventos mais extremos estão associados a uma advecção quente em altitude.

Mais uma vez, fica clara a necessidade de observarmos os quadrantes do ciclone, já que sabemos que a advecção de temperatura dá-se de forma desigual ao redor do ciclone, e sabemos da importância da sua variação vertical para a mudança na espessura da camada.

Figura 34 – Balanço de calor de todos os ciclones para (a-h) inverno, (i) primavera, (j) verão e (k) outono. As cores verde, amarela, laranja e vermelha separam os percentis de 25%, 50% e 75% dentro dos eventos extremos.



5.3. Balanço por quadrantes

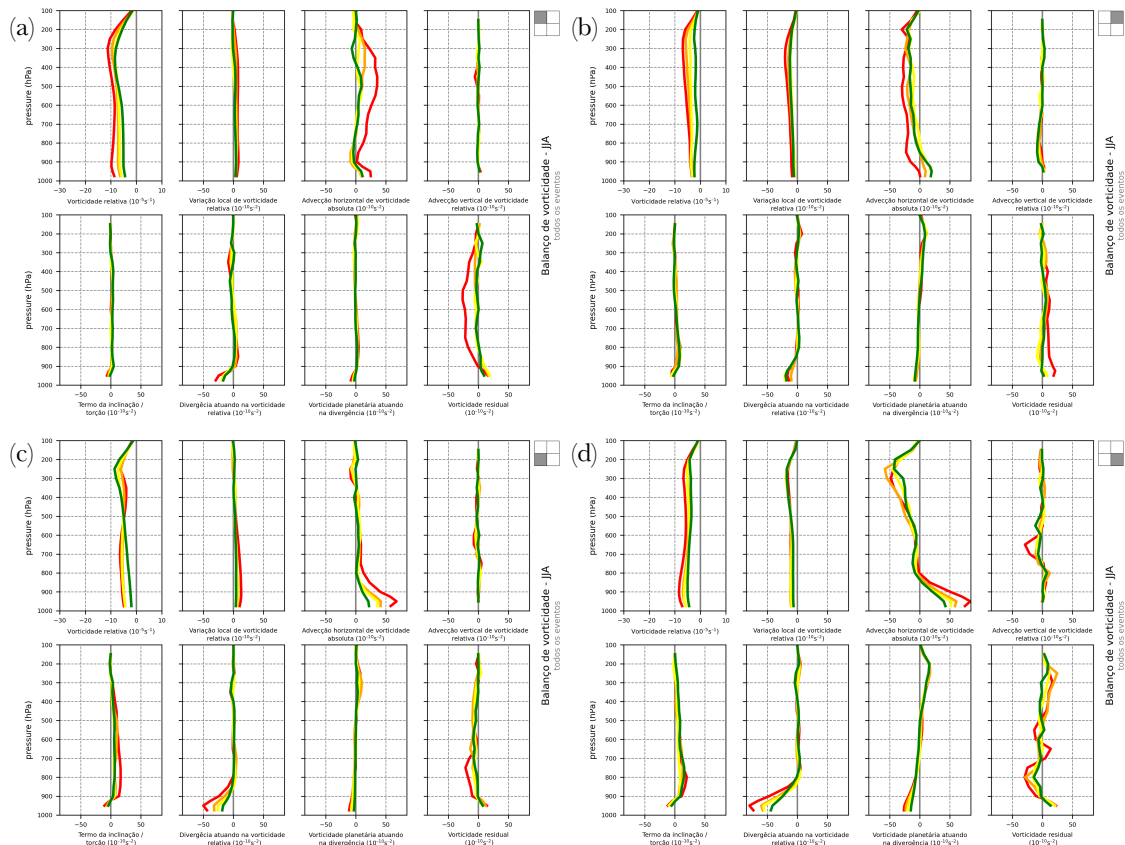
Como vimos anteriormente, para compreendermos o comportamento dos termos das equações, e como interferem na intensificação dos eventos, mostrou-se fundamental separarmos nossa análise por setores do ciclone. Para isso, comparamos os quadrantes NE, SE, SW e NW e identificamos os efeitos de cada fenômeno representado, no incremento dos eventos em lide.

5.3.1. Balanço de vorticidade

Para o início da comparação, olhamos para as médias do balanço de vorticidade dos meses de inverno nos diferentes quadrantes (Figura 35). Nesta figura, já fica evidente algumas

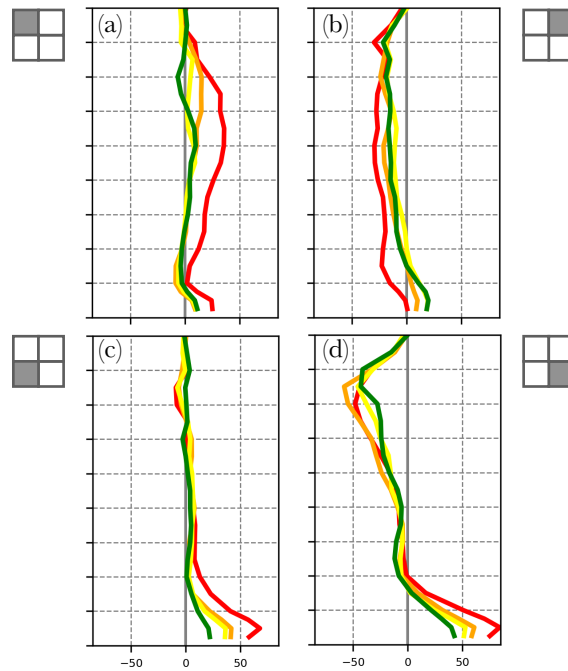
diferenças nas curvas dos termos dos mesmos ciclones porém em quadrantes diferentes em relação ao seu centro.

Figura 35 – Balanço de vorticidade dos quadrantes (a) NW, (b) NE, (c) SW e (d) SE dos ciclones de inverno. As cores verde, amarela, laranja e vermelha separam os percentis de 25%, 50% e 75% dentro dos eventos extremos.



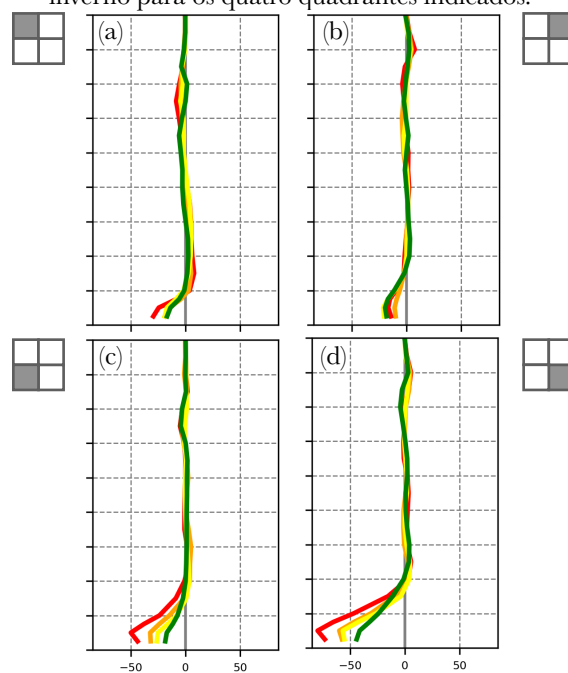
A Figura 36 destaca essa diferença e nos permite tirar algumas conclusões. A advecção horizontal de vorticidade (Eq. 11iii) apresenta comportamento bastante distinto, de acordo com o quadrante onde a média é realizada. Nota-se uma advecção horizontal de vorticidade anticiclônica no quadrante sul (Figuras 33c, d) aumentando proporcionalmente à intensidade do evento. Sendo que a variação vertical no quadrante sudeste (Fig. 34d) estende-se da superfície até a alta troposfera, favorecendo um intenso movimento ascendente.

Figura 36 – Perfis de advecção horizontal de vorticidade dos ciclones ocorridos durante o inverno e calculados para cada um dos quadrantes, conforme indicado.



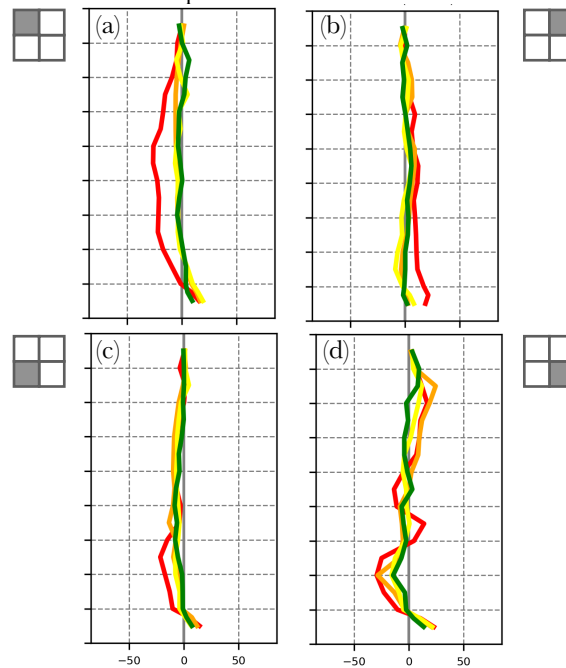
A vorticidade relativa multiplicando a divergência (Eq. 11vi.a) indica que o quadrante SE está mais propenso ao estiramento do vórtice (Figura 37d), intensificando o vento na região. O efeito da vorticidade planetária com a divergência (Eq. 11vi.b) também atua aumentando a vorticidade ciclônica na superfície, entretanto na alta troposfera ela adiciona vorticidade anticiclônica.

Figura 37 – Perfis do termo da divergência multiplicando a vorticidade planetária nos ciclones ocorridos no inverno para os quatro quadrantes indicados.



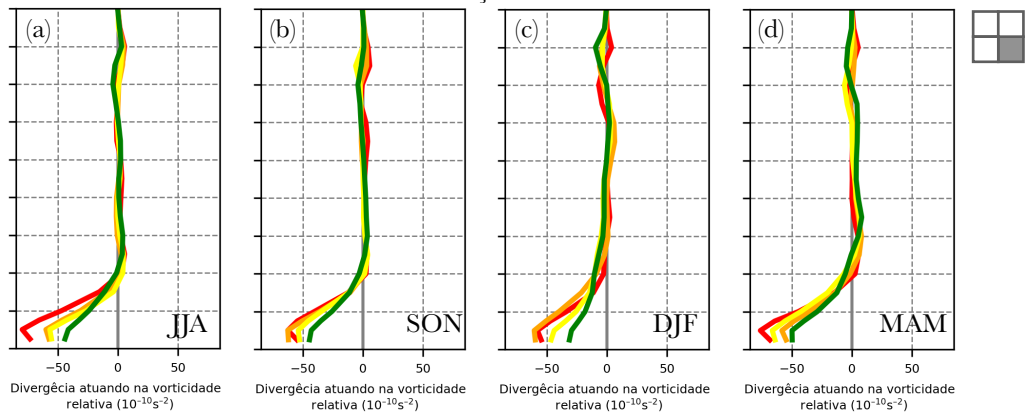
Um termo que chama bastante atenção para os casos extremos no inverno é o resíduo da vorticidade (Figura 38, Eq. 11i). Fica evidenciado que este termo apresenta valores muito fora da média no quadrante NW (Figura 38a) nos meses de inverno. Vemos o quanto o movimento vertical relacionado à formação de nuvens incrementa a vorticidade ciclônica a NW do ciclone no inverno, com leve compensação a leste (Figura 38b, d) causado pelo movimento subsidente.

Figura 38 – Perfis verticais do termo da vorticidade residual de todos os ciclones ocorridos no inverno nos quatro quadrantes indicados.



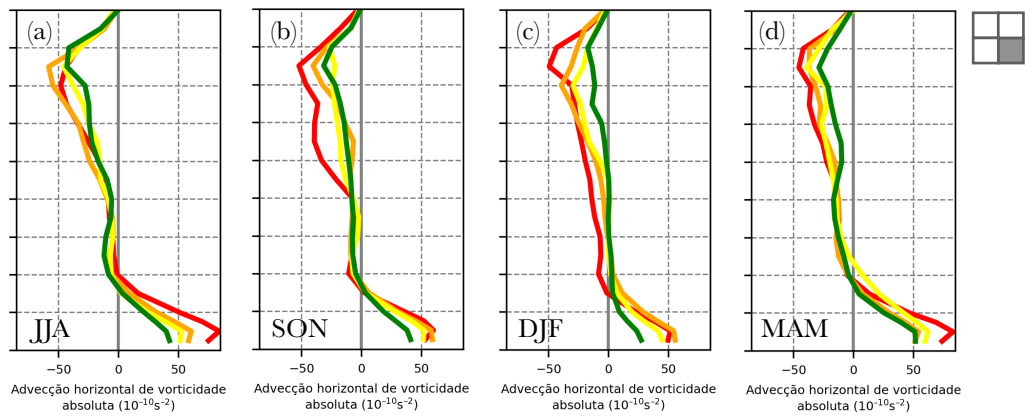
Este comportamento do termo da advecção horizontal de vorticidade (Eq. 11iii, v) no quadrante SE é replicado nas demais estações do ano. Observa-se, porém, que no outono e inverno (Figuras 36a e 36d), a intensa advecção horizontal de vorticidade anticiclônica em superfície é predominante entre os eventos mais extremos, enquanto, a advecção ciclônica em altos níveis aparenta não influenciar nos eventos de inverno (Figura 39a).

Figura 39 – Perfis verticais do termo da advecção horizontal de vorticidade absoluta no quadrante SE para todas as estações do ano.



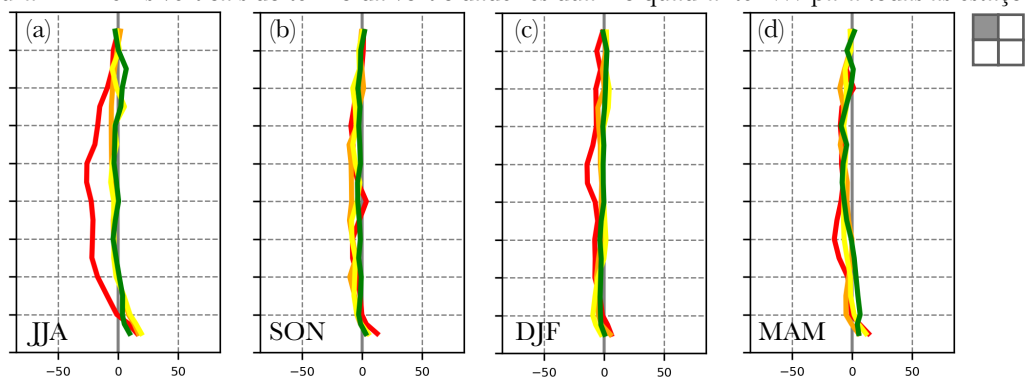
Outono e inverno apresentam maior relação entre eventos extremos de onda e o termo da divergência (Eq. 11vi), como vemos na Figura 40.

Figura 40 – Perfis verticais do termo da vorticidade relativa multiplicando divergência no quadrante SE em todas as estações do ano.



A vorticidade residual (Fig. 41, Eq. 11i) é destoante no quadrante NW durante o inverno, o qual está relacionado diretamente à forte advecção horizontal de vorticidade (Eq. 11iii) que ocorre nestes mesmos meses.

Figura 41 – Perfis verticais do termo da vorticidade residual no quadrante NW para todas as estações.



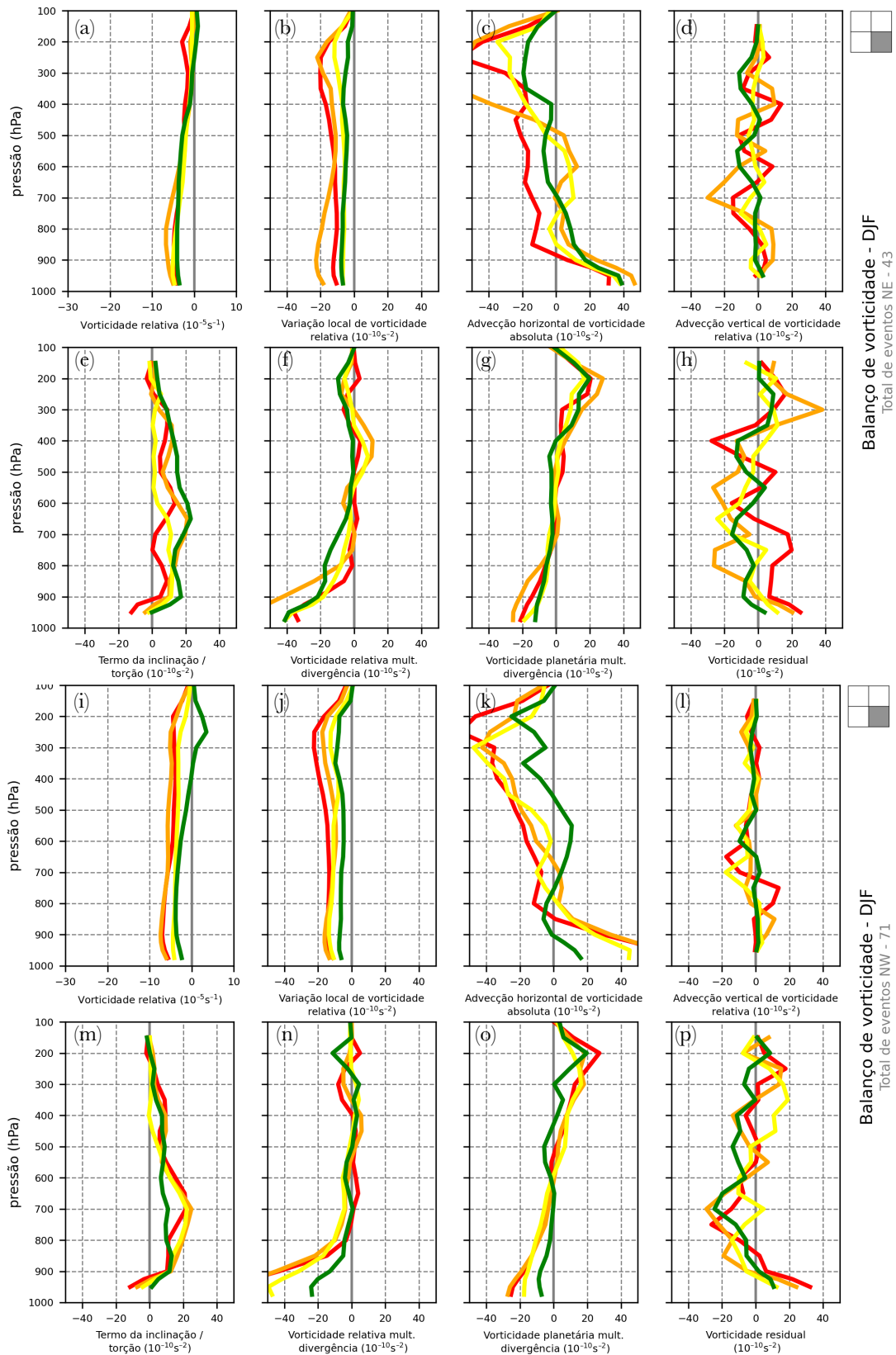
5.4.Comparação entre eventos em quadrantes distintos

5.4.1.Balanco de vortacidade para eventos em quadrantes distintos

Comparando agora o balanço de vortacidade, dos ciclones que geraram extremos a NW e NE, alguns termos destacam-se dos demais. Os eventos mais extremos de NE (Fig. 42a-h) estão associados a advecção horizontal ciclônica (Fig. 42c, Eq. 11iii) mais intensa no quadrante SE o que reduz a espessura da camada interferindo na divergência (Eq. 11vi). Já nos eventos de NW (Fig. 42 i-p), a variação vertical é maior já acima do 25º percentil, o que sabemos favorecer movimento ascendente. Este comportamento é ainda mais relevante na baixa troposfera, da superfície até 800 hPa.

O termo do resíduo da vortacidade (Fig. 42h, Eq. 11i) no quadrante SE indica uma tendência de vortacidade anticiclônica nos eventos mais intensos de NE, indicando a presença maior de nuvens convectivas transportando a vortacidade ciclônica da superfície para camadas superiores. Nos eventos de NW (Fig. 42p) esta característica não se configura.

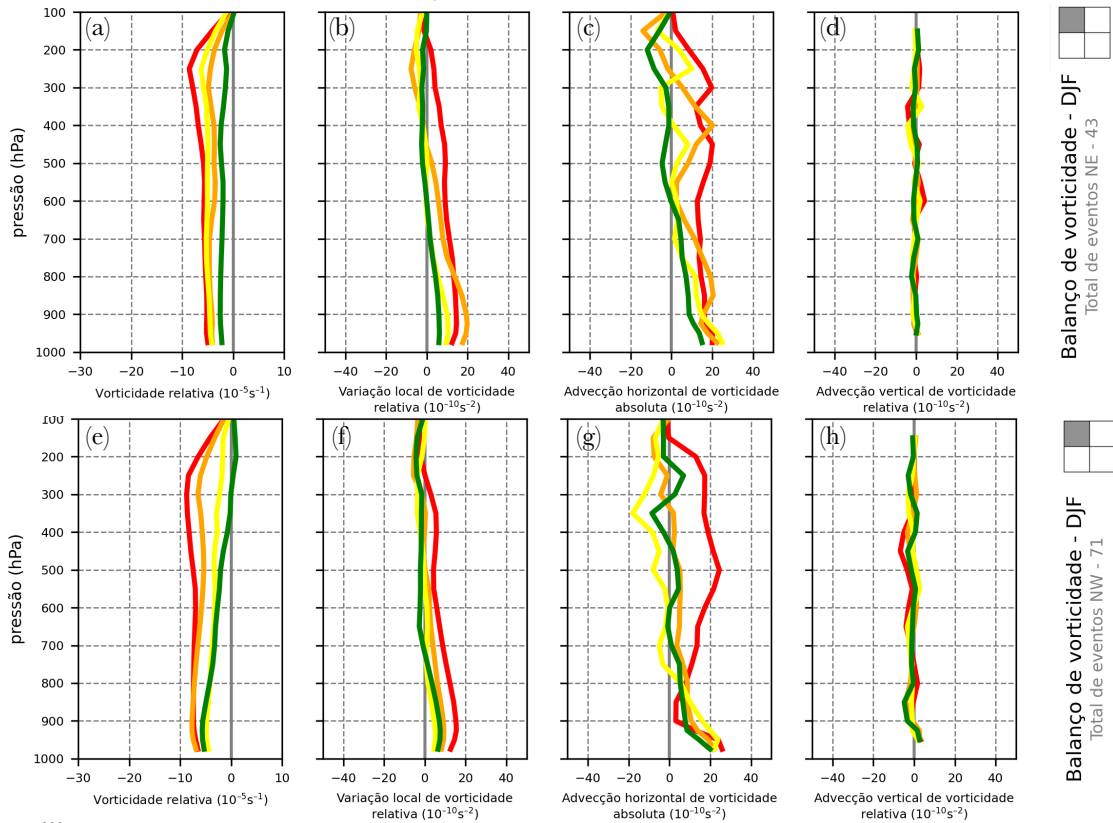
Figura 42 – Balanço de vorticidade do quadrante SE para eventos extremos que ocorreram a NE (a-h) e NW (i-p) dos ciclones de verão.



A advecção horizontal de vorticidade (Eq. 1 liii+v) volta a chamar atenção no quadrante NW (Fig. 43g), pois os eventos que ocorrem nesse mesmo quadrante trazem uma tendência de

advecção anticiclônica para a média e alta troposfera, enquanto nos eventos de NE esta distribuição é mais homogênea (Fig. 43c).

Figura 43 – Balanço de vorticidade do quadrante NW para eventos extremos que ocorreram a NE (a-d) e NW (e-h) dos ciclones de verão.



5.4.2. Balanço de calor para eventos em quadrantes distintos

Observemos o balanço de calor, diferenciando os eventos extremos por quadrantes, de modo a compararmos os ciclones que geraram extremo no quadrante NE, com os que geraram no quadrante NW. Sabemos que o quadrante NE tem especial relevância durante o verão, enquanto o quadrante NW concentra a maior parte dos eventos extremos no decorrer de todo ano, com suas características amplamente conhecidas.

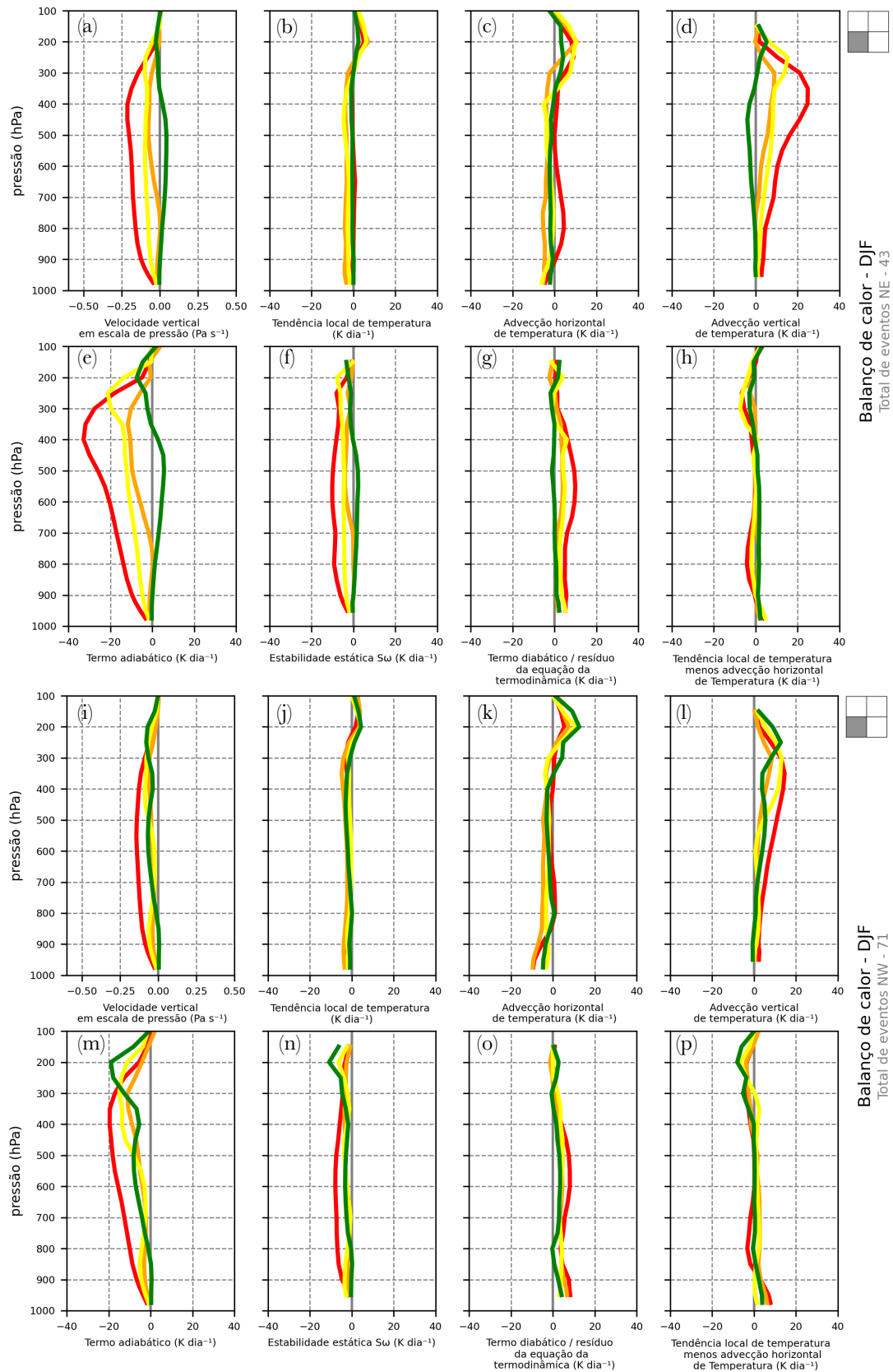
A comparação dos balanços de verão para os ciclones que geraram extremo a NE e a NW exibe algumas características interessantes. Lembrando que, de acordo com a Tabela 1, estão incluídos 44 eventos à NE e 71 à NW. A segmentação dos casos acaba reduzindo o número de casos analisados, e com isso levando a mesma dificuldade da comparação de casos individuais. Para contornar esta dificuldade encontrada, trabalhamos com os quadrantes ao norte do ciclone, que concentram a maior quantidade de eventos extremos em todas as estações.

Observando o balanço de todos os quadrantes, nota-se que o quadrante SW exibe maior relevância dos termos relacionados ao balanço de calor com a intensificação dos eventos de onda. Analisamos então o quadrante SW no balanço de calor (Figura 44), comparando os eventos ocorridos a NW com aqueles de NE. Os casos mais intensos de NE (Figura 44a-h) acontecem quando existe uma variação vertical maior da advecção horizontal de temperatura (Eq. 7iii) da superfície até a troposfera média (Figura 44c), alterando a espessura da camada no quadrante SW.

Percebe-se ainda que a advecção vertical de temperatura (Figura 44d, Eq. 7v) atua sobremaneira aquecendo as camadas superiores porém é mais que compensado pelo resfriamento adiabático (Figura 44e, Eq. 7iv), esta interação reflete-se na estabilidade estática (Figura 44f) que apresenta valores mais intensos para eventos de verão.

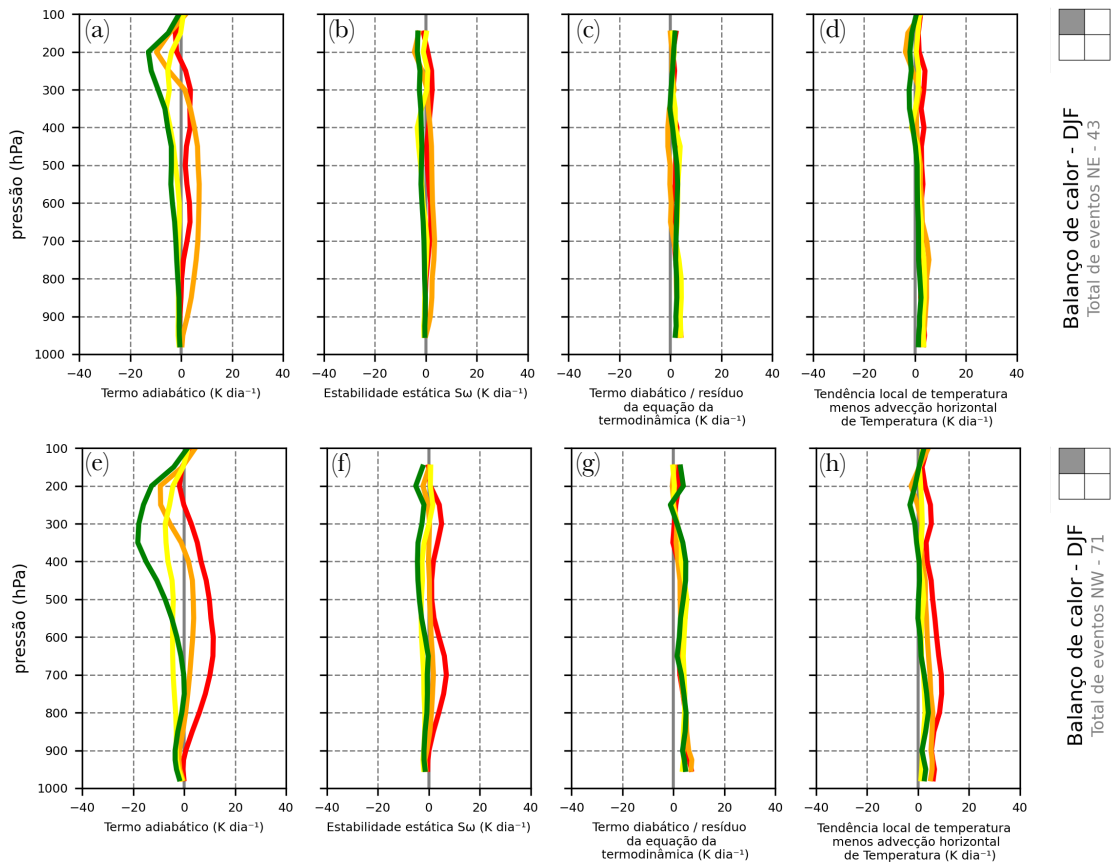
Outro termo que destoa dos demais é o termo diabático (Eq. 7i), representado pelo resíduo (Figura 32e, o), que nos eventos ocorridos no quadrante NW, apresenta uma inversão na camada de 800 hPa, e novamente mais suavemente em 550 hPa, alterando desigualmente a espessura da camada, expandindo na superfície, e contraindo logo acima, depois expandindo e contraindo novamente, de acordo com a teoria quase-geostrófica. Nos eventos de NE, a expansão na superfície não se replica, vemos apenas um aquecimento maior para os eventos mais extremos em especial entre 450 e 650 hPa, intensificando o movimento ascendente.

Figura 44 – Balanço de calor do quadrante SW para eventos extremos que ocorreram a NE (a-h) e NW (i-p) dos ciclones de verão.



Olhando para quadrante NW, nota-se um maior aquecimento adiabático (Eq. 7iv) nos eventos mais extremos de NW (Figura 45e), destoando dos eventos do quadrante NE (Figura 45a). Isto reflete-se na estabilidade estática (Figura 45f, Eq. 7v+vi) que indica a tendência de subsidência a NW destes ciclones, com máximo em 700 hPa.

Figura 45 – Balanço de calor do quadrante NW para eventos extremos que ocorreram a NE (a-d) e NW (e-h) dos ciclones de verão.



6. BALANÇO MÉDIO NA INTENSIFICAÇÃO

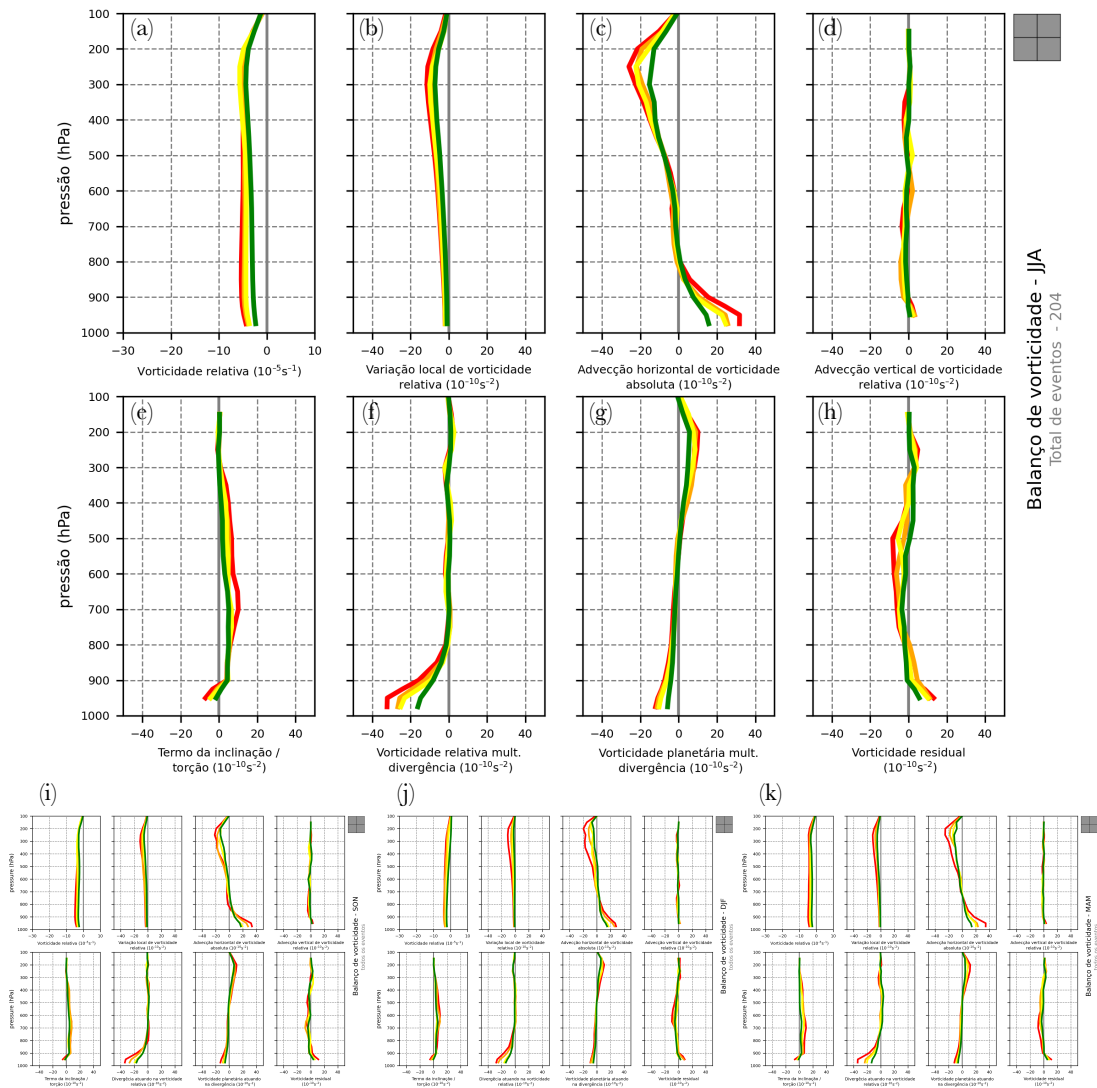
6.1. Balanço de vorticidade na intensificação

Como sabemos, o período de intensificação do ciclone é tão ou mais importante que sua fase madura para buscar compreendermos o evento. Vamos analisar então, os mesmos ciclones exatamente 24 horas antes da ocorrência da máxima altura significativa, e separar os termos mais significativos e seus quadrantes.

Comparando os balanços de vorticidade dentro de toda região de $10^\circ \times 10^\circ$ centrada no ciclone entre as estações, vemos algumas diferenças. Assim como na fase madura, a intensidade do evento, indicada pela diferença de cores, é proporcional à convergência em superfície (Fig. 46f, Eq. 11vi), compensada pela advecção horizontal de vorticidade (Fig. 46c, Eq. 11iii). Deve-se dar especial atenção para tendência de aumento da vorticidade ciclônica (Fig. 46b, Eq. 11ii) em altos níveis presente nos eventos mais intensos, que está associado ao termo da advecção horizontal de vorticidade absoluta (Eq. 11iii) em altitude trazendo vorticidade ciclônica. Assim, fica evidente a influência do cavado em níveis altos atuando de forma proporcional à intensidade do evento. Esta configuração se repete em todas as estações (Fig. 46i, j, k), porém a amplitude da variação vertical da advecção horizontal de vorticidade (Fig. 46c, Eq. 11iii) é maior no inverno, e sabemos segundo a EOQG (Eq. 14) que esta variação provoca movimento ascendente.

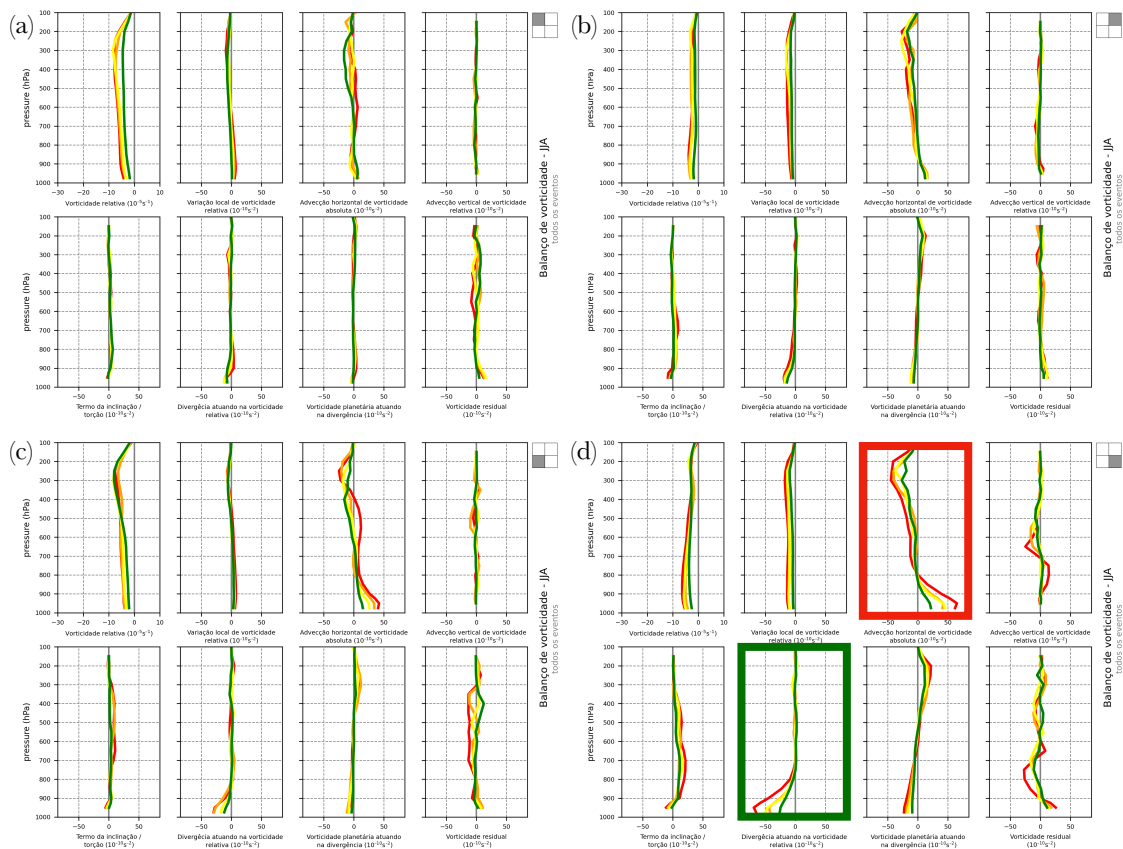
A inclinação do vórtice (Fig. 46e, Eq. 11vii) também está associada a intensificação dos ciclones no inverno, com os eventos mais extremos apresentando maiores valores do termo, que sabemos estar relacionado com a baroclinia do campo, e a variação horizontal do vento vertical, provocado por nuvens.

Figura 46 – Balanço de vorticidade de todos os ciclones durante intensificação para (a-h) inverno, (i) primavera, (j) verão e (k) outono. As cores verde, amarela, laranja e vermelha separam os percentis de 25%, 50% e 75% dentro dos eventos extremos.



Os diferentes quadrantes do balanço de vorticidade no inverno (Figura 47), mostram que o quadrante que mais tende a incrementar a vorticidade ciclônica na superfície é SE, onde tem forte convergência (Fig. 47d - quadro em destaque verde, Eq. 11vi.a), aumentando proporcionalmente à intensidade do evento. Além da advecção de vorticidade ciclônica (Fig. 47d - quadro em destaque vermelho, Eq. 11iii) no nível de não divergência (NND) já indicar convergência em superfície, segundo a equação de Pettersen-Sutcliffe (Eq. 16).

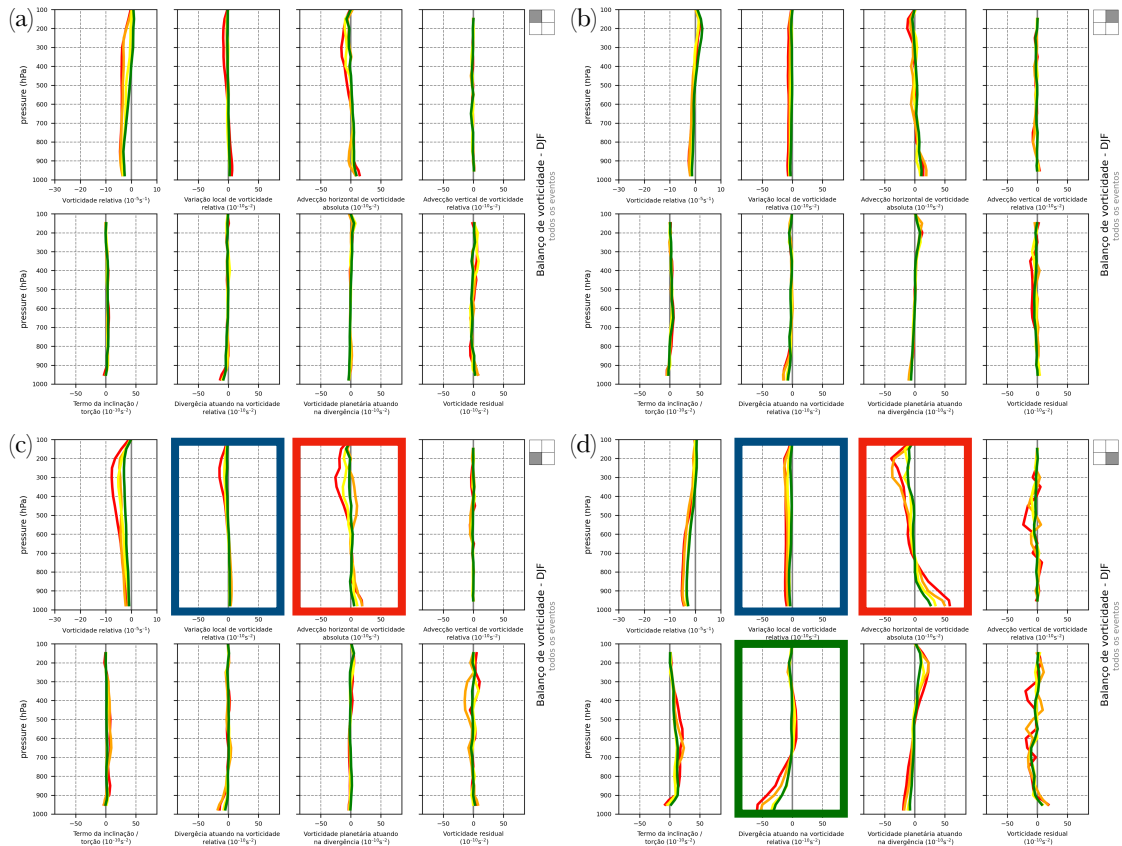
Figura 47 – Balanço de vorticidade por quadrante dos ciclones de inverno. As cores verde, amarela, laranja e vermelha separam os percentis de 25%, 50% e 75% dentro dos eventos extremos.



Da mesma forma, o balanço dos quadrantes feito para o período de verão mostra a advecção horizontal de vorticidade (Fig. 48d - quadro em destaque vermelho, Eq. 11iii) ciclônica no NND provocando forte convergência em superfície (Fig. 48d - quadro em destaque verde, Eq. 11vi.a) a leste do cavado e movimento ascendente. Durante a intensificação, a tendência de aumento de vorticidade ciclônica no quadrante SE (Fig. 48d - quadro destaque azul), devido principalmente a convergência em superfície é consideravelmente superior à fase madura para as duas estações.

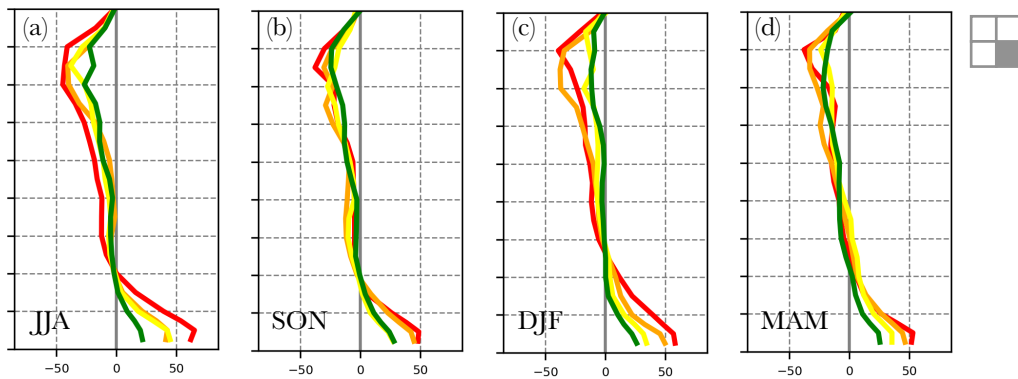
Vale ressaltar que, para os eventos mais extremos, o setor SW apresenta importante advecção horizontal de vorticidade ciclônica (Fig. 48c - quadro em destaque vermelho, Eq. 11iii) nas camadas superiores, o que se reflete na tendência local de vorticidade (Fig. 48c - quadro em destaque azul, Eq. 11ii).

Figura 48 – Balanço de vorticidade de intensificação por quadrante, dos ciclones de verão. As cores verde, amarela, laranja e vermelha separam os percentis de 25%, 50% e 75% dentro dos eventos extremos.



Comparando o termo da advecção horizontal de vorticidade (Fig. 49, Eq. 11iii) e da divergência (Fig. 51, Eq. 11vi) durante a intensificação para as diferentes estações do ano, nota-se a consistência, com maior advecção ciclônica nos eventos mais extremos no NND de inverno e verão (Fig. 49a, c).

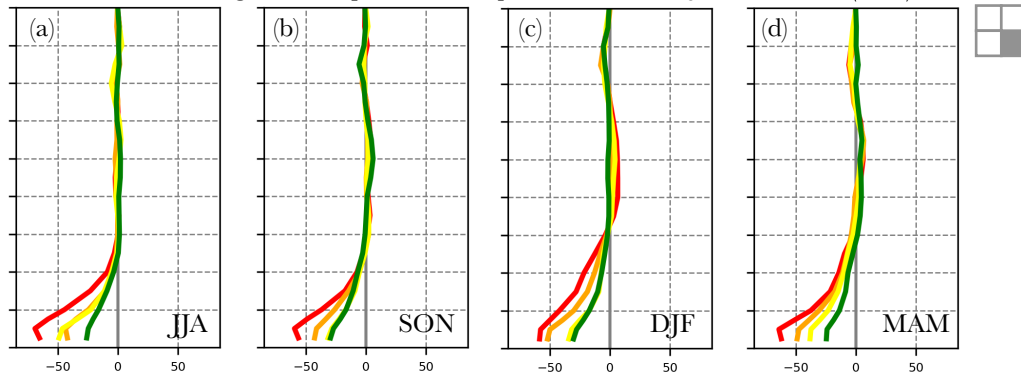
Figura 49 – Advecção de vorticidade absoluta no quadrante SE para todas as estações do ano durante intensificação.



A Figura 50 mostra valores praticamente idênticos de convergência em superfície, aumentando de acordo com a intensidade do evento extremo. Durante o verão (Fig. 50c), a

camada onde ocorre convergência estende-se até o nível de 700 hPa, em seguida apresenta leve divergência na média troposfera.

Figura 50 – Termo da divergência no quadrante SE para todas as estações do ano, durante a intensificação.

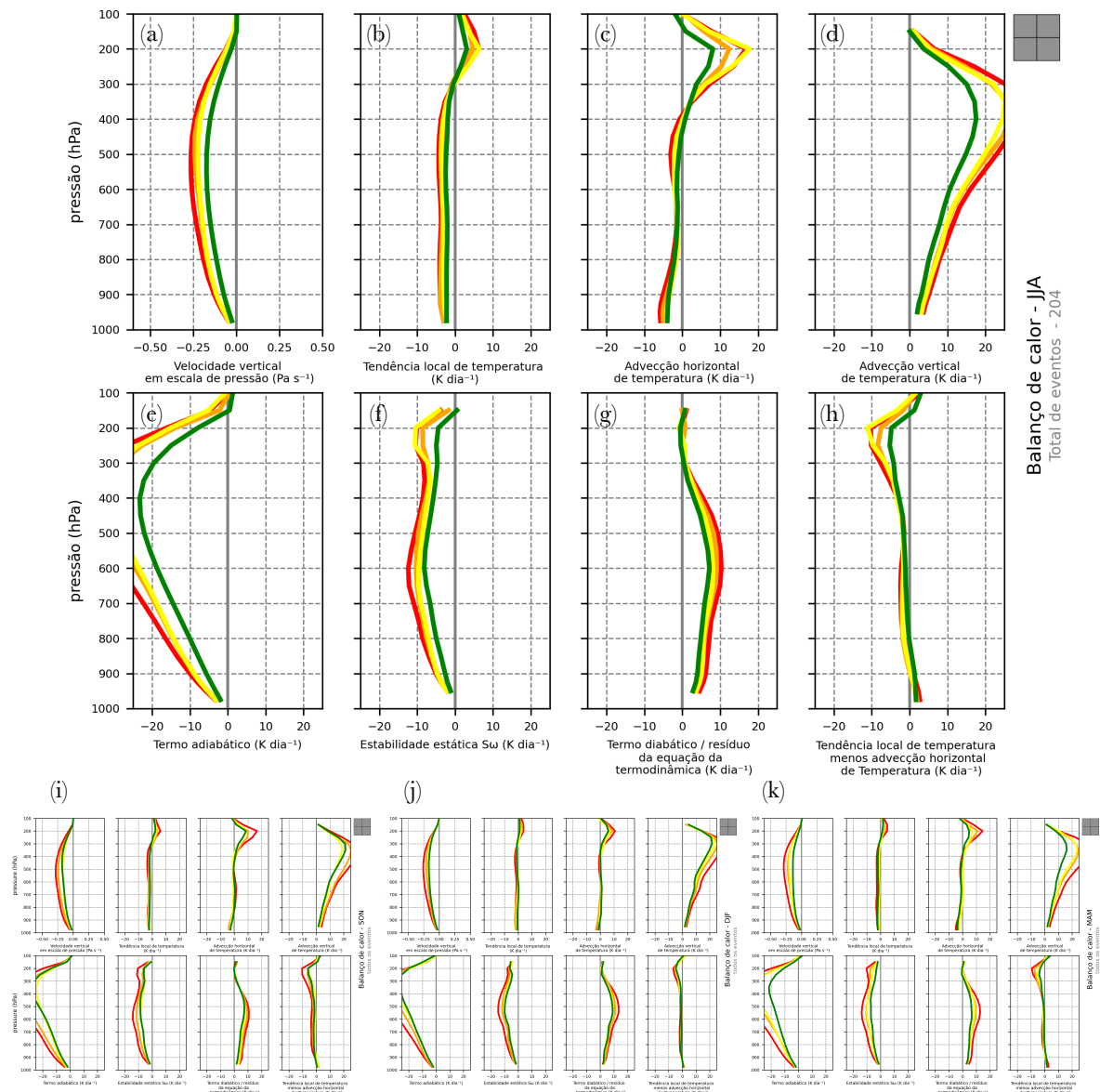


6.2. Balanço de calor na intensificação

Analisando o balanço de calor, notamos a semelhança entre as estações do ano. Porém, comparando com a fase madura, o gradiente de cores indica que durante a intensificação, os termos das equações tendem a indicar previamente a intensidade do evento.

O termo diabático (Fig. 51g, Eq. 7iv) apresenta valores mais intensos do que na fase madura (Fig. 34), o que mostra a importância deste termo na intensificação dos eventos.

Figura 51 – Balanço de calor de todos os ciclones durante intensificação para (a-h) inverno, (i) primavera, (j) verão e (k) outono. As cores verde, amarela, laranja e vermelha separam os percentis de 25%, 50% e 75% dentro dos eventos extremos.

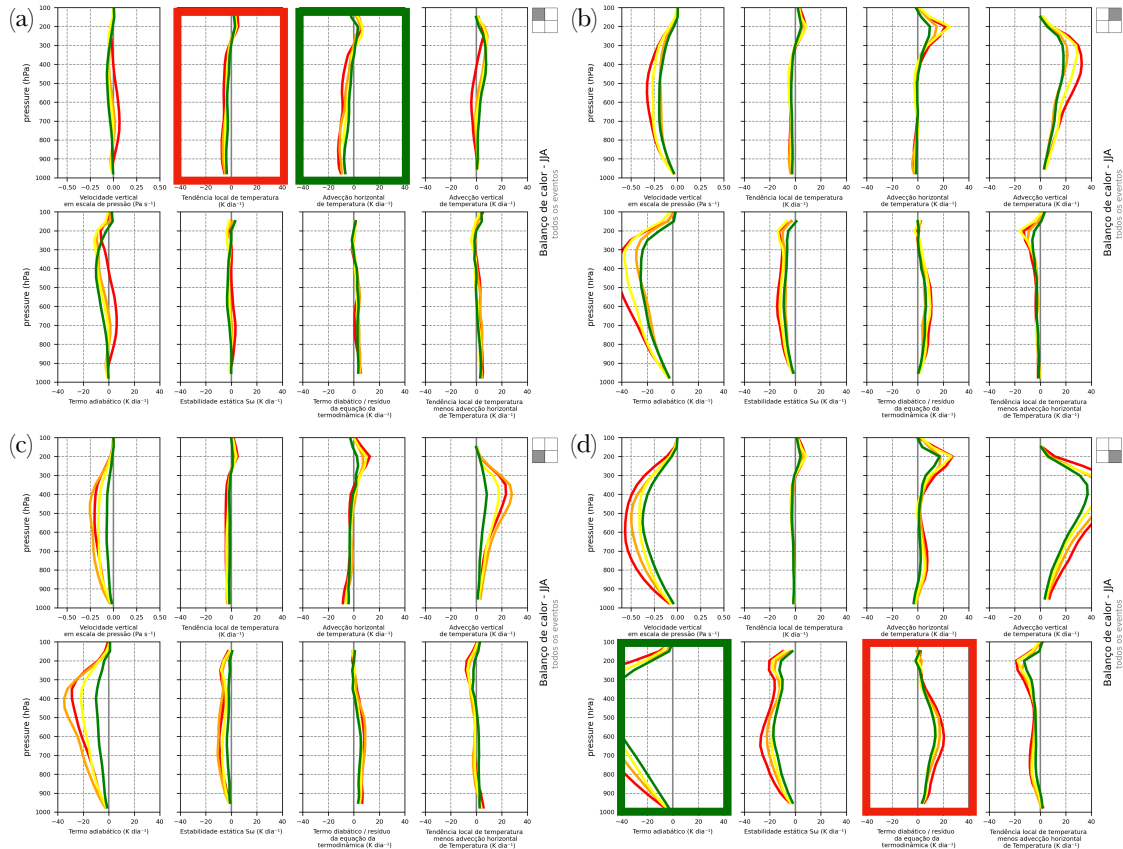


Olhando para os termos do balanço de calor que mais contribuem para a intensificação, nota-se que o aquecimento diabático (Eq. 7i) é, inicialmente, o principal responsável pelo aumento da temperatura no quadrante SE do ciclone (Fig. 52d - quadro em destaque vermelho). Este aquecimento provoca movimento ascendente e advecção vertical quente (Eq. 7v), que são mais que compensado pelo resfriamento adiabático (Fig. 52d - quadro em destaque verde, Eq. 7iv).

O quadrante onde observa-se a maior tendência de variação de temperatura, associada a intensidade dos eventos (gradiente de cores) é o quadrante NW (Fig. 52a, quadro em destaque vermelho, Eq. 7ii), onde ocorre a maior parte dos eventos extremos. Ressalta-se a

atuação de considerável advecção horizontal fria neste setor (Fig. 52a, quadro em destaque verde, Eq. 7iii).

Figura 52 – Balanço de calor dos ciclones de inverno em todos os quadrantes durante intensificação com o eixo das abscissas dos termos limitado entre -40 e 40 K dia^{-1} . As cores verde, amarela, laranja e vermelha separam os percentis de 25%, 50% e 75% dentro dos eventos extremos.



A Tabela 6 abaixo, resume algumas das informações importantes observadas nesta seção. Foram impostos valores de 0 a 5 (sendo 0, o termo não possui relevância significativa para a intensificação; e 5, o termo possui máxima relevância para a intensificação do evento de onda) de forma a qualificar a importância de cada termo na comparação entre todos os eventos de inverno e verão. Para ambas as estações, durante a intensificação os termos de maior relevância e intensidade encontram-se no quadrante SE. O balanço de vorticidade apresenta valores relativamente maiores no inverno do que no verão para o mesmo quadrante.

Tabela 6 – Relevância dos termos dos balanços de calor e vorticidade durante a intensificação para os eventos extremos de inverno e verão, onde os valores de 0 a 5 implicam em nenhuma relevância até máxima relevância.

Termo	JJA					DJF				
	Toda	NE	SE	SW	NW	Toda	NE	SE	SW	NW
Velocidade vertical	3	2	5	4	3	3	1	5	2	3
Tendência local de temperatura	1	0	0	1	1	1	0	0	0	2
Advecção horizontal de temperatura	2	1	3	1	3	1	1	3	1	2
Advecção vertical de temperatura	4	3	5	4	3	4	1	5	3	2
Termo adiabático	5	3	5	4	3	4	1	5	4	3
Estabilidade estática	3	1	4	3	2	3	1	4	2	1
Termo diabático / resíduo	3	1	4	3	0	3	0	4	2	0
Tendência local de T - adv. horizontal T	2	1	2	1	0	1	0	3	0	1
Vorticidade relativa	1	1	2	1	2	1	0	2	2	2
Varição local de vorticidade relativa	1	2	3	1	2	2	2	2	3	2
Advecção horizontal de vorticidade	3	2	5	3	1	4	1	5	2	2
Advecção vertical de vorticidade	0	1	3	0	0	0	0	2	0	0
Termo da inclinação / torção	2	1	3	1	0	1	1	3	2	0
Divergência na vorticidade relativa	3	1	5	3	1	3	1	5	1	1
Vorticidade planetária na divergência	1	1	4	1	0	2	0	3	1	0
Vorticidade residual	2	1	3	2	0	2	0	2	1	0

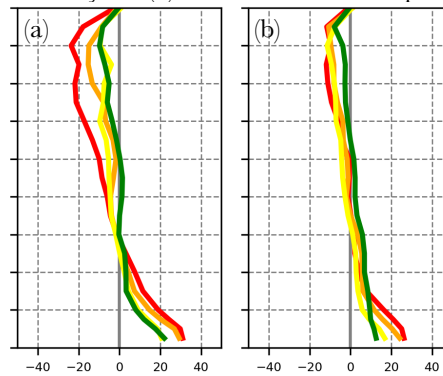
6.3. Comparação entre eventos em quadrantes distintos durante intensificação

Comparando os eventos extremos por quadrantes, como feito na fase madura, é possível analisar e comparar a formação dos extremos nos quadrantes NE e NW dos centros dos ciclones. As comparações entre quadrantes durante a intensificações foram concentradas durante o verão. Olhando para os casos do quadrante NW, as advecções horizontais de temperatura e vorticidade (Eq. 7iii e Eq. 11iii), contribuem ativamente para as tendências na maioria dos quadrantes. Vorticidade na intensificação para eventos em quadrantes distintos

6.3.1. Vorticidade na intensificação para eventos em quadrantes distintos

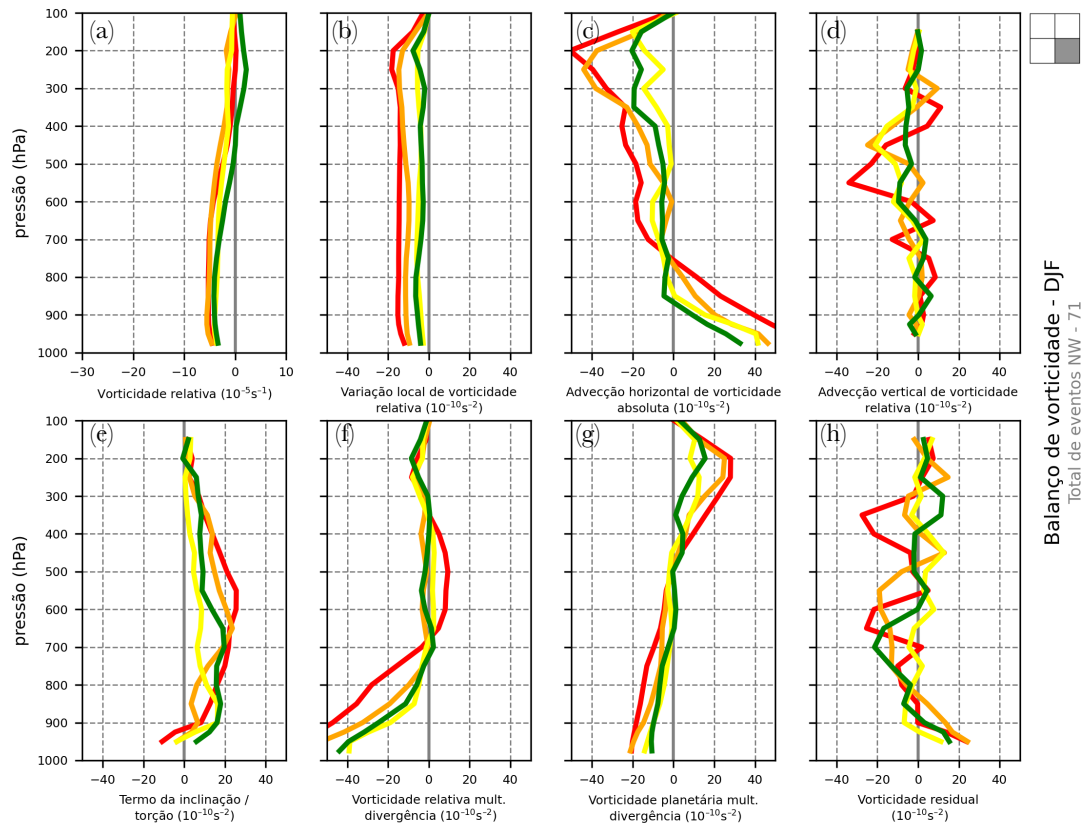
Olhando para o balanço de vorticidade, durante o verão, fica evidente a importância da advecção horizontal de vorticidade nos eventos de NW (Fig. 53a) que contribui significativamente para o incremento da vorticidade ciclônica acima do NND, e aumento da convergência em superfície.

Figura 53 – Advecção horizontal de vorticidade absoluta de verão de eventos extremos de NE durante a fase de (a) intensificação e (b) madura de todos os quadrantes.



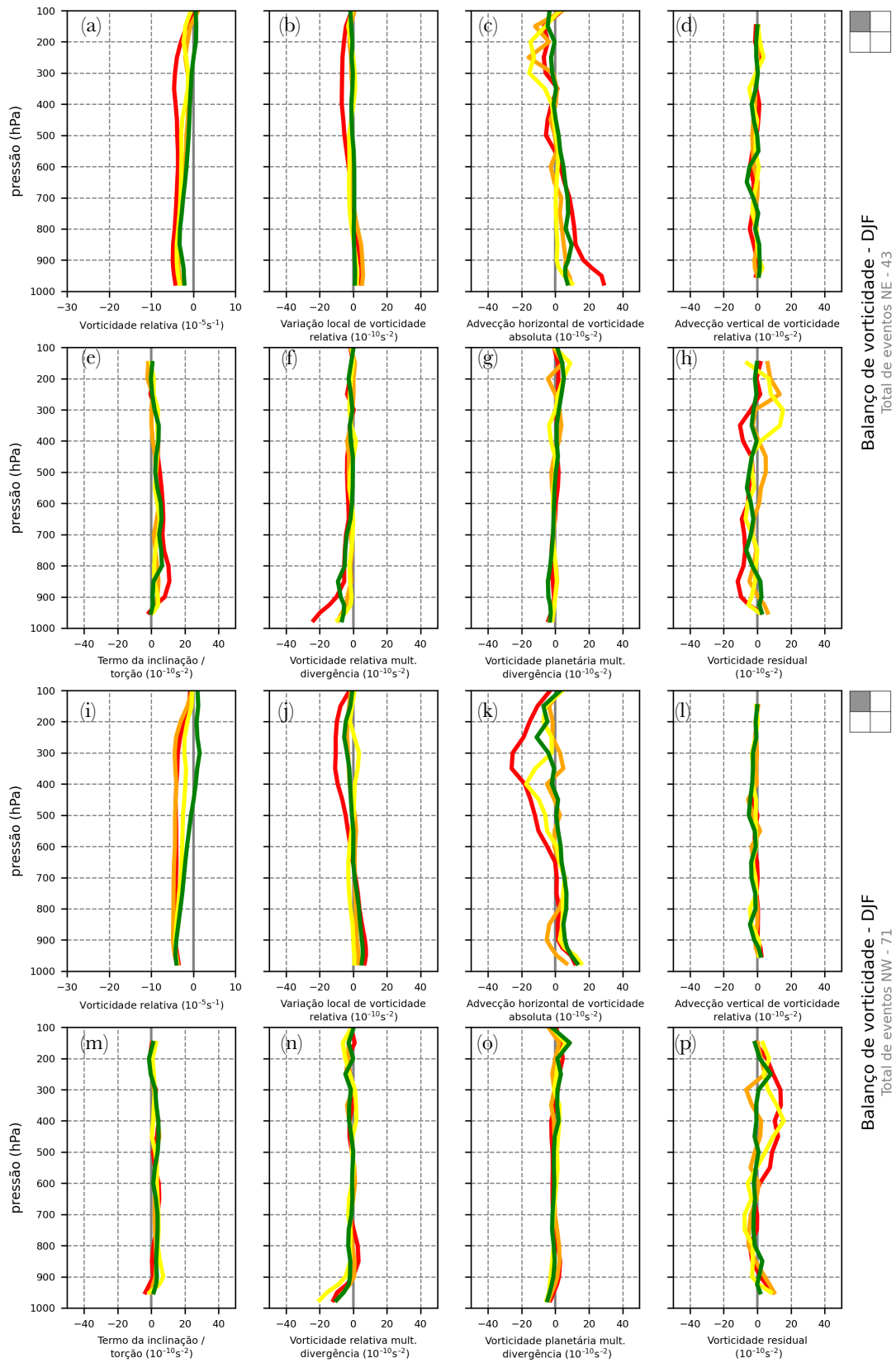
Olhando o balanço de vorticidade do quadrante SE, chega-se ao termo que causa maior impacto nos eventos de NW. A advecção horizontal de vorticidade (Fig. 54c, Eq. 11iii) apresenta uma variação significativa, proporcional a intensidade dos eventos, que provocam forte convergência em superfície (Eq. 11vi) e intensificação do vórtice ciclônico (Eq. 11ii). Este comportamento ocorre também nos eventos de NE porém, sem a mesma tendência ciclônica no NND e acima. Durante o inverno, os eventos de NW apresentam o mesmo comportamento, com forte advecção horizontal de vorticidade negativa acima do NND, e intensa convergência em superfície.

Figura 54 – Balanço de vorticidade do quadrante SE, durante a intensificação para eventos extremos que ocorreram a NW dos ciclones de verão.



O quadrante NW tem diferenças expressivas entre os eventos de NE e NW. A Figura 55 mostra a diferença da advecção horizontal de vorticidade (Eq. 11iii) para os eventos mais extremos, onde nos eventos de NE mais intensos, aparece uma forte advecção anticiclônica em superfície (Fig. 55c), podendo estar associada a um anticiclone atuando na região para eventos mais extremos, enquanto nos eventos de NW, os eventos mais extremos também apresentam forte variação vertical da vorticidade, o que provoca movimento ascendente, porém, da média para alta troposfera, refletindo em tendência ciclônica em altos níveis (Fig. 55k).

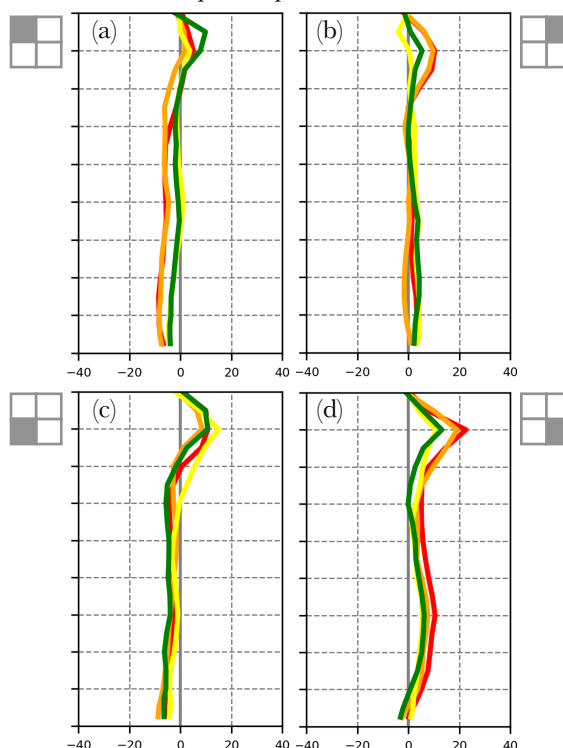
Figura 55 – Balanço de vorticidade do quadrante NW, durante a intensificação para eventos extremos que ocorreram a (a-h) NE e (i-p) NW dos ciclones de verão.



6.3.2. Calor na intensificação para eventos em quadrantes distintos

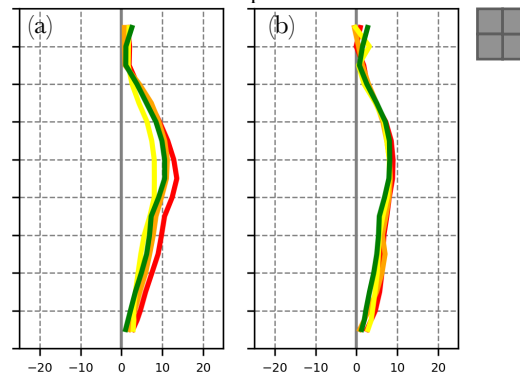
A advecção horizontal de temperatura, atua elevando a temperatura do setor leste do ciclone, e resfriando o setor oeste (Figura 56) intensificando a baroclinia. O quadrante SE, como apontado anteriormente apresenta valores mais significativos em comparação aos demais setores. Ressalta-se ainda a forte relação entre a advecção horizontal no quadrante SE com a intensidade do ciclone, indicada pelo gradiente de cores. O padrão da advecção de temperatura se mantém para os eventos de NE.

Figura 56 – Advecção Horizontal de temperatura durante a intensificação, nos eventos de NW, no verão, nos quatro quadrantes.



A Figura 57 mostra a importância do termo diabático (Eq. 7i) e a liberação de calor latente para a intensificação do evento. Durante a fase de intensificação (Fig. 57a) ocorre maior atuação de fontes diabáticas, e os eventos com maior altura significativa de onda estão relacionados a maior aquecimento diabático.

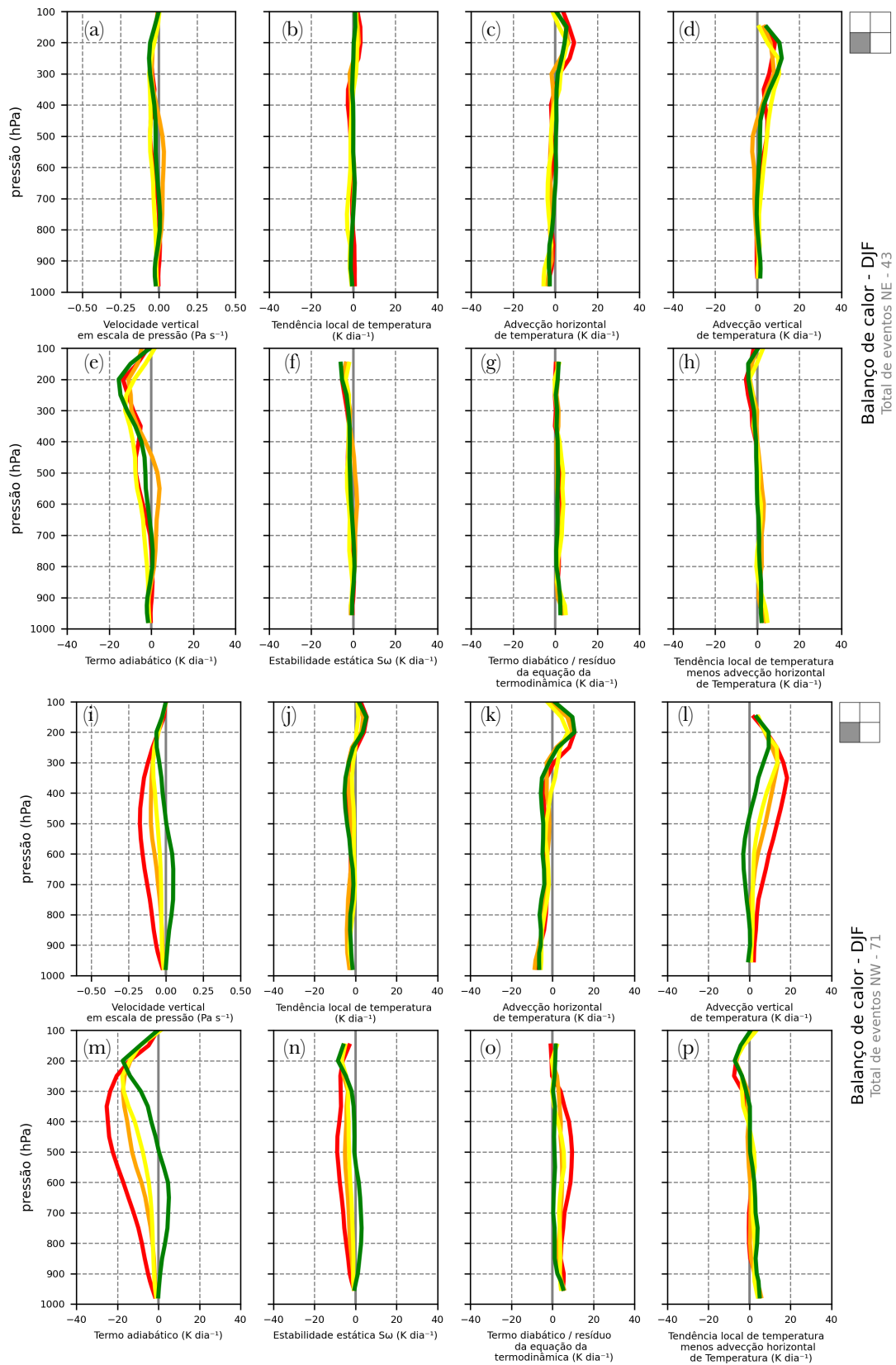
Figura 57 – Termo diabático de verão de eventos extremos de NE durante a fase de (a) intensificação e (b) madura respectivamente.



A contribuição diabática nos eventos de NW, é mais relevante do que nos casos de NE, porém, a advecção horizontal fria também é mais intensa, portanto o aquecimento diabático nos casos extremos do quadrante NW são compensados por esse transporte de ar frio, já nos casos de NE, isto não ocorre.

Observando o quadrante SW dos eventos de verão (Fig. 58), vemos que para os eventos que ocorrem a NW, este quadrante apresenta maior aquecimento diabático (Fig. 58o). Como esperado, o quadrante SW apresenta grande relevância para os eventos de NW e pouca ou nenhuma para os eventos do quadrante NE, com destaque para os termos relacionados ao movimento vertical.

Figura 58 – Balanço de calor do quadrante SW, durante a intensificação para eventos extremos que ocorreram a (a-h) NE e (i-p) NW dos ciclones de verão.



A Tabela 7 resume algumas das informações importantes observadas nesta seção, comparando os eventos de verão a NW com os de NE no que se refere aos termos dos balanços. Nota-se que os termos de vorticidade têm maior relevância para os eventos de NW. Conforme vimos, os termos do balanço no quadrante SE durante a intensificação se destacam em relação aos demais quadrantes. Podemos observar a intensificação dos eventos de ondas a NE estão fortemente associados aos termos termodinâmicos do setor leste do ciclone.

Tabela 7 – Relevância dos termos dos balanços de calor e vorticidade durante a intensificação para os eventos extremos de verão que ocorrem a NE e a NW, onde os valores de 0 a 5 implicam em nenhuma relevância até máxima relevância.

Termo	Eventos de NE					Eventos de NW				
	Toda	NE	SE	SW	NW	Toda	NE	SE	SW	NW
Velocidade vertical	1	4	4	0	1	2	1	5	3	2
Tendência local de temperatura	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1
Advecção horizontal de temperatura	1	1	2	0	1	1	1	4	3	1
Advecção vertical de temperatura	3	5	4	0	2	4	0	5	3	2
Termo adiabático	4	5	5	0	2	4	1	5	3	2
Estabilidade estática	3	4	4	0	2	3	1	5	3	2
Termo diabático / resíduo	3	4	4	0	1	3	1	5	0	0
Tendência local de T - adv. horizontal T	0	0	2	0	0	1	0	3	0	1
Vorticidade relativa	1	1	1	2	3	1	1	2	3	2
Varição local de vorticidade relativa	1	1	2	1	1	2	1	4	2	1
Advecção horizontal de vorticidade	2	2	4	4	3	4	1	5	2	2
Advecção vertical de vorticidade	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0
Termo da inclinação / torção	1	2	0	0	2	2	0	4	2	0
Divergência na vorticidade relativa	2	2	4	0	2	3	0	5	2	1
Vorticidade planetária na divergência	0	2	2	0	0	1	0	3	1	0
Vorticidade residual	0	0	2	3	1	2	0	2	0	0

A comparação acima envolveu 43 ciclones de NE e 71 de NW ocorridos no verão. Devido ao número reduzido de eventos extremos ocorridos nos quadrantes de SE e SW, esta análise não foi realizada.

7. DISCUSSÃO E CONCLUSÃO

Observando as figuras, notamos que existe um padrão entre a distribuição dos eventos extremos em relação ao ciclone, variando entre as estações do ano, e ainda pelas faixas de latitude, tendo os eventos de NW especial relevância para a faixa entre 25°S e 30°S.

Sabemos que a relação do tamanho da pista tem relação direta com a altura de ondas, e esta tem uma forte relação com a velocidade de deslocamento (GRAMCIANINOV et al., 2020b) e finalmente com a intensificação dos casos., Os ciclones com deslocamento mais lento, mostraram ter especial relevância durante o verão, sendo estes capazes de gerar eventos mais extremos.

No inverno, notamos este padrão para a faixa de latitudes entre 25° e 30°, o que corrobora com a ideia de que, nesta estação outros fatores, como a posição dos anticiclones transientes e a ASAS (GRAMCIANINOV et al., 2020c), a atuação forte de esteiras transportadoras quentes (BELL; GRAY; JONES, 2017), dentre outros atores, além da instabilidade baroclínica, característica dos ciclones extratropicais, causam a intensificação dos eventos de onda na região.

A alta concentração de eventos extremos a nordeste do ciclone, ou seja, no seu setor quente, e com deslocamento mais lento que a média, chama a atenção para a necessidade de uma investigação criteriosa. Uma análise dinâmica e termodinâmica, através de balanço de calor e vorticidade, é fundamental para que se conheça a estrutura e evolução destes ciclones (DUTRA et al., 2017).

O balanço de de calor e vorticidade nos permitiu utilizar a primeira lei da termodinâmica, juntamente com a equação da vorticidade, para quantificar os fenômenos presentes nos ciclones geradores de extremos na região do oceano Atlântico Sudoeste. Através delas, pode-se compreender os mecanismos de intensificação utilizando as equações da teoria quase-geostrófica e a equação de desenvolvimento de Petterssen-Sutcliffe.

Dividindo os eventos extremos (que corresponde ao último decil dos eventos de ondas) em quatro intervalos (separados pelos percentis 25%, 50% e 75%), classificando por cores e fazendo a média, a comparação fica mais ilustrativa, o que permite verificar tendência em forma de gradiente de cores. Além disso, a separação por quadrantes facilita a percepção dos fenômenos atuantes em cada quadrante do ciclone, o que é de fundamental importância, tendo em vista a assimetria destes ciclones extratropicais. Outra divisão realizada, foi entre ciclones que geram extremos no SE, SW, NE, e NW, com ênfase para a comparação entre

NW e NE, uma vez que NW concentra a maior parte dos ciclones, e os mais intensos, durante todo o ano, e os eventos de NE têm especial valor durante o verão, com características próprias e relevante intensidade. A última separação foi entre o balanço no instante onde ocorreu a máxima altura significativa, e o balanço 24h antes deste pico, de modo que se reconheçam possíveis causas para a intensificação.

Comparando dois ciclones em estações e com extremos em quadrantes distintos, um de inverno com extremo a NW, e um no verão com extremo a NE, dentre outros aspectos, tornou-se flagrante a predominância da advecção horizontal de vorticidade (Eq. 11iii) durante a intensificação do ciclone no inverno, provocando forte convergência (Eq. 11vi) em superfície; no verão, tem-se o termo diabático (Eq. 7iv) como principal ator.

Analisando os quadrantes dos ciclones em questão, a assimetria torna-se evidente. Enquanto no inverno tem-se um forte movimento ascendente no quadrante sul do ciclone, no verão, esta característica se dá a leste do mesmo. É possível notar o máximo de convergência (Eq. 11vi) em superfície no quadrante SW no inverno, com movimento convectivo intenso, enquanto no verão, esse pico de convergência faz-se presente no quadrante SE. Lembra-se porém, que o número reduzido de ciclones com ondas consideradas extremas não permite um aprofundamento sobre os processos de intensificação em alguns casos, como os de NE durante o inverno.

Através da composição de casos, já torna-se patente, que os eventos mais extremos, indicados pelas cores mais quentes nos balanços, se destacam em termos específicos dos balanços. São os mais evidentes, a convergência (Eq. 11vi) e advecção horizontal de vorticidade (Eq. 11iii) na superfície, a advecção de temperatura (Eq. 7iii) na coluna, e o aquecimento diabático (Eq. 7i), porém, existem nuances importantes de serem exploradas, tando entre estações, mas principalmente entre os quadrantes.

Vê-se que a advecção horizontal de vorticidade (Eq. 11iii) tem maior relevância nos eventos mais extremos no verão, e que este termo é mais atuante no quadrante SE, em todas as estações do ano. Nota-se ainda que, a vorticidade residual (Eq. 11i) no inverno, no quadrante NW, está presente e com intensidade muito acima da média para os eventos mais extremos, o que reitera o papel do vento vertical associado a formação das nuvens convectivas na intensificação dos eventos (CHU; YANAI; SUI, 1981a).

Observa-se que os eventos com extremos de NE, sofrem maior transferência de energia para as camadas mais altas do quadrante SW, através da advecção vertical de temperatura

(Eq. 7v), mais que compensada pelo resfriamento adiabático (Eq. 7iv), e o aquecimento diabático (Eq. 7i) do quadrante SW, dos eventos mais extremos apresenta valores aproximadamente duas vezes maiores que os demais percentis na camada média da atmosfera, mostrando que o quando há forte liberação de calor latente, os eventos extremos tenderão a evoluir para máximos.

Os eventos mais extremos de NW são marcados pelo intenso aquecimento adiabático (Eq. 7iv) nas camadas médias nesse mesmo quadrante, causado pelo movimento subsidente que também predomina nesses casos, e pela advecção horizontal de vorticidade (Eq. 11iii) associada a um cavado em altos níveis. Cabe ressaltar a forte advecção vertical (Eq. 7v) quente nas camadas mais altas no quadrante SE, que sugerem esta compensação a NW.

Viu-se que o período de intensificação acaba sendo mais importante do que o próprio momento de ocorrência da altura significativa máxima. Observando às 24h que antecedem o pico dos eventos de verão, percebe-se que a variação vertical da advecção horizontal de vorticidade (Eq. 11iii) tem papel fundamental no impulsionamento dos eventos de NW, tendo os eventos mais intensos maior advecção ciclônica nos altos níveis, o que provoca movimento ascendente e convecção (Eq. 11vi) em superfície. Além disso, a advecção ciclônica no NND provoca intensificação do vórtice ciclônico em superfície, segundo a equação de Petterssen-Sutcliffe. Nota-se que as maiores intensidades e maior variação vertical do termo da advecção horizontal de vorticidade (Eq. 11iii) encontra-se no quadrante SE, com valores negativos no NND.

Ainda para os eventos de verão do quadrante NW, a inclinação do vórtice (Eq. 11vii), que está relacionada ao ângulo entre o gradiente de pressão e de espessura (baroclinia) e a vorticidade residual, ou variação do movimento vertical causado por nuvens (Eq. 11i), aumenta na troposfera média proporcionalmente à intensidade do evento. Além destes, o termo diabático (Eq. 7i) aponta que liberação de calor latente contribui fortemente para a intensificação dos eventos, em todas as estações, em especial, verão e outono.

Observando os quadrantes separadamente, vê-se que o aquecimento diabático (Eq. 7i) e advecção horizontal quente (Eq. 7iii), ocorrem principalmente à SE do ciclone. Nota-se ainda que, a advecção horizontal de vorticidade (Eq. 11iii) ocorre mais intensamente nesse mesmo quadrante, em todas as estações, o que está associado a convergência (Eq. 11vi) em superfície, movimento ascendente, e nuvens convectivas e mais liberação de calor latente. Além disso, a

advecção de temperatura contribui para a elevação da temperatura a leste e redução a oeste, reforçando a baroclinia.

Comparando os eventos extremos que ocorrem no quadrante NE com os de NW, fica claro que a contribuição diabática (Eq. 7i) é mais relevante para os casos que ocorrem a NE, do que naqueles de NW, onde predomina a advecção horizontal de vorticidade (Eq. 11iii) como agente intensificador dos eventos, com a variação vertical da advecção de vorticidade e a vorticidade negativa no NND provocando forte convergência (Eq. 11vi) em superfície. E como visto, essa característica da advecção horizontal de vorticidade ocorre principalmente a SE.

Outra grande diferença entre os eventos de NE e NW está no balanço quadrante NW, onde os extremos de NE estão associados a maior advecção anticiclônica (Eq. 11iii) em superfície, aumentando com a altura, e provocando movimento ascendente, porém permanecendo positivo durante por toda camada, enquanto os eventos de NW são marcados pela forte advecção ciclônica da média para alta troposfera.

É importante ressaltar a considerável relevância dos fenômenos que ocorrem na região SE do ciclone em comparação às demais. Para todas as estações, este setor é que concentra os valores mais intensos dos termos das equações. Com destaque para advecção horizontal de vorticidade anticiclônica na superfície e ciclônica em altitude, convergência em superfície, vorticidade residual, vento ascendente, aquecimento diabático, advecção de temperatura.

A Tabela 8 resume o que foi identificado como importante durante o transcorrer deste trabalho, apontando apenas os termos mais facilmente identificáveis e em qual quadrante ele se impõe.

Tabela 8 – Parâmetros facilmente observáveis e suas posições relativas ao ciclone ativo, associados a intensificação de eventos de onda no quadrante NE e NW.

Termo	NE	NW
Velocidade vertical	NE/SE	SE/SW
Aquecim diabático	NE/SE	SE
Cisalhamento vertical do vento	SE/SW	SE
Baroclinia	-	SE
Vorticidade	NW	SW

Vimos assim que, o balanço realizado, nos permitiu analisar características fundamentais dos ciclones extratropicais, relacionadas a simetria, transporte de calor e vorticidade, formação de nuvens, e demais processos de aquecimento e resfriamento, que de outra forma seria de difícil compreensão. Dessa forma, que a realização desse levantamento contribua para uma nova abordagem de investigação de ciclones e eventos extremos, e que no futuro, a singradura torne-se cada vez mais segura para os navegantes e exploradores dos oceanos.

7.1.Sugestões para trabalhos futuros

A fim de acompanhar a intensificação do ciclone, poder-se-ia realizar os balanços em outros momentos diversos durante a intensificação. Além disso, o balanço energético forneceria contribuições importantes à compreensão dos eventos.

Uma discussão a cerca da origem e o desencadear dos fenômenos tem o potencial de atribuir pesos aos fenômenos, identificando a cadeia de causa e efeito que levam até o evento extremo de ondas.

A utilização de mapas horizontais permitiria identificar a presença de elementos atípicos em casos de intensificação incomum, como anti-ciclones e zonas de convergências de umidade. Adicionalmente, a utilização de outras reanálises que não o ERA5, seria útil para uma comparação de resultados.

Além da distribuição horizontal de casos por faixas de latitude, para trabalhos futuros poder-se-ia ainda realizar o balanço por faixas o que traria maior esclarecimento quanto às características específicas das latitudes mais baixas.

O gradiente de cores utilizado neste trabalho caracteriza percentis distintos de intensificação. As cores poderiam distinguir outras características qualitativas como estações do ano, quadrantes ou fases de intensificações diferentes.

A elaboração de índices, qualificando a relação entre a intensificação dos eventos de onda e os termos em quadrantes distintos, seria importante para a automatização de análises como as feitas neste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS⁶

ALLEN, J. T.; PEZZA, A. B.; BLACK, M. T. Explosive cyclogenesis: A global climatology comparing multiple reanalyses. **Journal of Climate**, 23, n. 24, p. 6468-6484, 2010.

AVILA, V.; NUNES, A.; ALVES, R. Comparing explosive cyclogenesis cases of different intensities occurred in Southern Atlantic. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, 93, 06/16 2021.

BELL, R.; GRAY, S. L.; JONES, O. North Atlantic storm driving of extreme wave heights in the North Sea. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, 122, n. 4, p. 3253-3268, 2017.

CAMPOS, R. M.; ALVES, J. H. G. M.; GUEDES SOARES, C.; GUIMARAES, L. G. *et al.* Extreme wind-wave modeling and analysis in the south Atlantic ocean. **Ocean Modelling**, 124, p. 75-93, 2018/04/01/ 2018.

CAMPOS, R. M.; PARENTE, C. E.; DE CAMARGO, R., 2012, **Extreme Wave Analysis in Campos Basin (Rio de Janeiro - Brazil) Associated With Extra-Tropical Cyclones and Anticyclones**. American Society of Mechanical Engineers. 71-80. Disponível em: <https://doi.org/10.1115/OMAE2012-83117>. Acesso em: 11/7/2021.

CARVALHO, A. B. **Economia do mar: conceito, valor e importância para o Brasil**. Orientador: MORAES, G. I. D. 2018. 179 f. (Doutorado) - Escola de Negócios, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.

CATTERSON, V. M.; MCMILLAN, D.; DINWOODIE, I.; REVIE, M. *et al.* An economic impact metric for evaluating wave height forecasters for offshore wind maintenance access. **Wind Energy**, 19, n. 2, p. 199-212, 2016.

CENTRO BRASILEIRO DE INFRAESTRUTURA. **Quantas plataformas de petróleo temos no Brasil?** , 2019. Disponível em: <https://cbie.com.br/artigos/quantas-plataformas-de-petroleo-temos-no-brasil>. Acesso em: 14/10/2021.

CHU, J.-H.; YANAI, M.; SUI, C.-H. Effects of Cumulus Convection on the vorticity Field in the Tropics Part I: The Large-Scale Budget. **Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II**, 59, n. 4, p. 535-546, 1981.

COPERNICUS CLIMATE CHANGE (C3S). **ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate**. Copernicus Climate Change Service Climate Data Store (CDS), 2017. Disponível em: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home>.

DA ROCHA, R. P.; SUGAHARA, S.; DA SILVEIRA, R. B. Sea Waves Generated by Extratropical Cyclones in the South Atlantic Ocean: Hindcast and Validation against Altimeter Data. **Weather and Forecasting**, 19, n. 2, p. 398-410, 01 Apr. 2004.

⁶ De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT NBR 6023).

DUTRA, L. M. M.; DA ROCHA, R. P.; LEE, R. W.; PERES, J. R. R. *et al.* Structure and evolution of subtropical cyclone Anita as evaluated by heat and vorticity budgets. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, 143, n. 704, p. 1539-1553, 2017.

GAN, M. A.; RAO, V. B. Surface cyclogenesis over South America. **Monthly Weather Review**, 119, n. 5, p. 1293-1302, 1991.

GRAMCIANINOV, C. B.; CAMPOS, R. M.; DE CAMARGO, R.; GUEDES SOARES, C. Relation Between Cyclone Evolution and Fetch Associated With Extreme Wave Events in the South Atlantic Ocean. **Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering**, 143, n. 6, 2021.

GRAMCIANINOV, C. B.; CAMPOS, R. M.; DE CAMARGO, R.; HODGES, K. I. *et al.* Analysis of Atlantic extratropical storm tracks characteristics in 41 years of ERA5 and CFSR/CFSv2 databases. **Ocean Engineering**, 216, p. 108111, 2020a.

GRAMCIANINOV, C. B.; CAMPOS, R. M.; GUEDES SOARES, C.; DE CAMARGO, R. Comparison Between ERA5 and CFS Datasets of Extratropical Cyclones Associated With Extreme Wave Events in the Atlantic Ocean. *In*: ASME 2020 39th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, 2020b, Fort Lauderdale. **Volume 2A: Structures, Safety, and Reliability**. V02AT02A004: DOI: 10.1115/omae2020-18488. Disponível em: <https://doi.org/10.1115/OMAE2020-18488>. Acesso em: 10/6/2021.

GRAMCIANINOV, C. B.; CAMPOS, R. M.; GUEDES SOARES, C.; DE CAMARGO, R. Extreme waves generated by cyclonic winds in the western portion of the South Atlantic Ocean. **Ocean Engineering**, 213, p. 107745, 2020c.

GRAMCIANINOV, C. B.; DE CAMARGO, R.; CAMPOS, R. M.; GUEDES SOARES, C. *et al.* Impact of extratropical cyclone intensity and speed on the extreme wave trends in the Atlantic Ocean. **Climate Dynamics**, 2022.

HERSBACH, H.; BELL, B.; BERRISFORD, P.; HIRAHARA, S. *et al.* The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146, n. 730, p. 1999-2049, 2020.

HODGES, K. I. A General Method for Tracking Analysis and Its Application to Meteorological Data. **Monthly Weather Review**, 1994.

HODGES, K. I. Feature tracking on the unit sphere. **Monthly Weather Review**, 123, n. 12, p. 3458-3465, 1995.

HODGES, K. I. Adaptive Constraints for Feature Tracking. **Monthly Weather Review**, 127, n. 6, p. 1362-1373, 01 Jun. 1999 1999.

HOLTON, J. R.; HAKIM, G. J. **An Introduction to Dynamic Meteorology**. Elsevier Science, 2013. 9780123848666.

HOSKINS, B. J.; HODGES, K. I. New perspectives on the Northern Hemisphere winter storm tracks. **Journal of the Atmospheric Sciences**, 59, p. 1041-1061, 2002.

HOSKINS, B. J.; HODGES, K. I. A new perspective on Southern Hemisphere storm tracks. **Journal of Climate**, 18, n. 20, p. 4108-4129, 2005.

INMAN, J. Navigation and Nautical Astronomy: For the Use of British Seamen . London, UK: W. Woodward, C. & J. Rivington. Retrieved 2015-11-09. 1835.

KITA, Y.; WASEDA, T.; WEBB, A. Development of waves under explosive cyclones in the Northwestern Pacific. **Ocean Dynamics**, 68, n. 10, p. 1403-1418, 2018.

MACHADO, A. A.; CALLIARI, L. J.; MELO FILHO, E.; KLEIN, A. H. D. F. Historical assessment of extreme coastal sea state conditions in southern Brazil and their relation to erosion episodes. 2010.

MELO, E.; ROMEU, M.; HAMMES, G. Extreme sea state conditions off rio grande based on the ww3 model. **The Fourth Seminário e Workshop em Engenharia Oceânica**, 01/01 2010.

NECCO, G. Comportamiento de vortices ciclonicos en el area Sudamericana durante el FGGE: Ciclogenesis. **Meteorologica**, 13, n. 1, p. 7-20, 1982.

PETTERSEN, S. Weather analysis and forecasting. New York: McGraw-Hill, 1956.

PEZZI, L. P.; QUADRO, M. F. L.; LORENZZETTI, J. A.; MILLER, A. J. *et al.* The effect of Oceanic South Atlantic Convergence Zone episodes on regional SST anomalies: the roles of heat fluxes and upper-ocean dynamics. **Climate Dynamics**, 59, n. 7, p. 2041-2065, 2022/10/01 2022.

PONCE DE LEÓN, S.; BETTENCOURT, J. Composite analysis of North Atlantic extratropical cyclone waves from satellite altimetry observations. **Advances in Space Research**, 68, n. 2, p. 762-772, 2021.

PONCE DE LEÓN, S.; GUEDES SOARES, C. Extreme wave parameters under North Atlantic extratropical cyclones. **Ocean Modelling**, 81, p. 78-88, 2014.

PONCE DE LEÓN, S.; GUEDES SOARES, C. Hindcast of extreme sea states in North Atlantic extratropical storms. **Ocean Dynamics**, 65, n. 2, p. 241-254, 2015.

REBOITA, M.; ROCHA, R. D.; AMBRIZZI, T., 2005, Climatologia de ciclones sobre o Atlântico Sul utilizando métodos objetivos na detecção destes sistemas.

REBOITA, M. S.; GAN, M. A.; ROCHA, R. P. D.; AMBRIZZI, T. Regimes de precipitação na América do Sul: uma revisão bibliográfica. **Revista brasileira de meteorologia**, 25, p. 185-204, 2010.

SUTCLIFFE, R. A contribution to the problem of development. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, 73, n. 317-318, p. 370-383, 1947.

WILCOX, E. W. **World voices**. New York: Hearst's international library company, 1916.
126 p.

GLOSSÁRIO⁷

Adiabático	Referente a um processo no qual não ocorre transferência de calor ou massa entre o sistema e o meio.
Advecção	Transporte de uma propriedade atmosférica somente pelo fluxo de massa da própria atmosfera.
Altura Geopotencial	Altura de um ponto na atmosfera proporcional a energia potencial necessária para movimentar uma unidade de massa do nível do mar até esta altura em relação ao nível do mar.
Altura significativa	Média do terço superior das ondas que ocorrem em dado período, medida do cavado à crista.
Convectivo	Referente a movimentos internos organizados dentro de uma camada de ar, produzindo o transporte vertical de calor.
Diabático	Processo termodinâmico no qual o sistema troca energia com o meio onde exista diferença de temperatura.
Divergência	Medida da expansão ou espalhamento do campo vetorial. Quando negativa é convergência.
Estabilidade estática	Habilidade de um fluido em repouso a tornar-se turbulento (instável) ou laminar (estável) devido ao empuxo.
Esteira transportadora	A quente é uma corrente coesa de ar quente e úmido, que se origina na camada limite do setor quente de um ciclone extratropical.
Período de pico	Período de onda associado às ondas mais energéticas no espectro total de onda em um ponto específico.
Pista de vento	Área oceânica onde ondas são geradas por um vento com direção e intensidade constantes. Também refere-se ao comprimento da área da pista medido na direção do vento.
Quase-geostrófico	Refere-se à aceleração do vento geostrófico pela componente ageostrófica do vento associada a força de Coriolis.
Termodinâmica	Conjunto de ideias e axiomas, que descreve experiências com processos que envolvem fluxos de calor e mudanças no quantidade de energia.
Vorticidade	Medida da rotação de um fluido. É o rotacional da velocidade.

⁷ Fontes: glossary.ametsoc.org, forecast.weather.gov, weather.gov, nhc.noaa.gov.

ÍNDICES

Balanço

- de casos individuais, 53
- de todos os eventos por estações, 68
- médio, 72
- por quadrantes, 75
- na intensificação, 86

Distribuição de eventos em

- dispersão, 39
- histograma direcional, 41
- gráfico radar, 48

Equação

- de haversine, 30
- do balanço de calor, 33
- do balanço de vorticidade, 34
- da tendência do geopotencial quase-geostrófica, 35
- omega quase-geostrófica, 35
- de Pettersen-Sutcliffe, 36

Etapa de

- coleta de dados, 28
- cálculo da velocidade de deslocamento, 30
- seleção da área, 30
- distribuição dos casos, 39
- balanço, 53