



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA
NATUREZA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA



JAMYLE MAGALHÃES DA SILVA

**IDENTIFICAÇÃO DO NÍVEL DO JATO DE ALTOS NÍVEIS EM SITUAÇÕES DE
INSTABILIDADES ATMOSFÉRICAS EM SUPERFÍCIE SOBRE AS BACIAS DE
CAMPOS E SANTOS**

Rio de Janeiro

2023

Jamyle Magalhães da Silva

IDENTIFICAÇÃO DO NÍVEL DO JATO DE ALTOS NÍVEIS EM SITUAÇÕES DE
INSTABILIDADES ATMOSFÉRICAS EM SUPERFÍCIE SOBRE AS BACIAS DE
CAMPOS E SANTOS

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Meteorologia,
Departamento de Meteorologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de
Janeiro, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Meteorologia.

Orientadora: Prof.^a D. Sc. Ana Cristina Pinto de Almeida Palmeira

Coorientador: Prof.^o D. Sc. Wanderson Luiz Silva

Rio de Janeiro

2023

**IDENTIFICAÇÃO DO NÍVEL DO JATO DE ALTOS NÍVEIS EM SITUAÇÕES DE
INSTABILIDADES ATMOSFÉRICAS EM SUPERFÍCIE SOBRE AS BACIAS DE
CAMPOS E SANTOS**

JAMYLE MAGALHÃES DA SILVA

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA DO INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS DO CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO (PPGM-IGEO-CCMN-UFRJ) COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA À OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS (ÁREA: METEOROLOGIA).

Ana Cristina M. de Almeida Palmeira

Ana Cristina Pinto de Almeida Palmeira – PPGM/UFRJ

Wanderson Luiz Silva

Wanderson Luiz Silva – PPGM/UFRJ

Edilson Marton

Edilson Marton – PPGM/UFRJ

Rita Yuri Ynoue

Rita Yuri Ynoue – IAG/USP

Luiz Felipe Gozzo

Luiz Felipe Gozzo - UNESP

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

NOVEMBRO 2023

CIP - Catalogação na Publicação

d111i da Silva, Jamyle Magalhães
IDENTIFICAÇÃO DO NÍVEL DO JATO DE ALTOS NÍVEIS
EM SITUAÇÕES DE INSTABILIDADES ATMOSFÉRICAS EM
SUPERFÍCIE SOBRE AS BACIAS DE CAMPOS E SANTOS /
Jamyle Magalhães da Silva. -- Rio de Janeiro, 2023.
71 f.

Orientadora: Ana Cristina Pinto de Almeida
Palmeira.

Coorientador: Wanserson Luiz Silva.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do
Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Programa
de Pós-Graduação em Meteorologia, 2023.

1. Jatos de Altos Níveis. 2. Corrente de Jato
Polar. 3. Corrente de Jato Subtropical. 4. Bacia de
Campos. 5. Bacia de Santos. I. Palmeira, Ana
Cristina Pinto de Almeida, orient. II. Luiz Silva,
Wanserson, coorient. III. Título.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me permitir iniciar e finalizar esse ciclo. Os planos de Deus são infinitamente maiores e melhores do que poderíamos imaginar, e como é bom vivê-los. A Ele seja sempre toda honra e glória.

Aos meus pais, Tania e Roberto, por todo incentivo e apoio para que pudesse finalizar esse ciclo e ser a primeira em nossa família a ter uma pós-graduação. Essa e todas as vitórias que ainda irão acontecer são nossas.

Aos meus amigos, que continuam me “aturando” desde a graduação, e aqueles que me aproximei mais durante a pós-graduação por todo incentivo, apoio, conselhos, por me emprestarem os ouvidos muitas vezes, sem vocês essa fase nem teria existido (literalmente): Karine, Victor, Ana Beatriz, Beatriz, Gabriela Unfer, Anne, Luizão e Igor. Obrigada também a toda família LaDSin por terem me acolhido nesses últimos dois anos, por todas as risadas, resenhas, fofocas, etc. Vocês são maravilhosos! Sou muito grata por ter tido a oportunidade de tê-los conhecido.

Aos meus orientadores, Ana Cristina e Wanderson, por acreditarem em mim e nesse tema mais do que eu mesma (muitas vezes). Vocês são muito maravilhosos e inspiração para muitos alunos. Não desistam da meteorologia!

À Petrobras pelo suporte financeiro e fomento a esta pesquisa através do Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) “Meteorologia Aplicada à Indústria do Petróleo” – Processo 2018/00067-1

RESUMO

Os Jatos de Altos Níveis são regiões de máxima velocidade do vento, geralmente próxima ao topo da troposfera. A presença de uma corrente de jato pode favorecer o desenvolvimento de instabilidades na superfície, por meio de ajustes no campo de vento que induzem movimentos ageostróficos transversais nas regiões de entrada (onde as partículas de ar aceleram) e saída (desaceleram). Assim, uma boa representação dos jatos e de suas circulações associadas pode contribuir para um aperfeiçoamento na previsão de tempo e auxiliar na tomada de decisões. Dessa forma, esse trabalho tem por objetivo analisar os níveis de 300, 250 e 200 hPa e identificar qual nível melhor caracteriza a componente de altos níveis em situação de instabilidade em escala sinótica nas Bacias de Campos e Santos (Brasil). Para tal, o algoritmo TRACK foi utilizado, assim como campos horários de Pressão ao Nível Médio do Mar e Vorticidade Relativa em 1000 hPa, para a identificação das instabilidades que passaram pelas bacias durante o período de dezembro de 2019 a novembro de 2020. Entretanto, somente aquelas com vorticidade mínima de $-2.10^{-4} \text{ s}^{-1}$ e duração mínima de 6h foram selecionadas. Após essa etapa, buscou-se, para cada um dos eventos identificados, o nível em que o núcleo do jato, mais próximo da região de interesse, apresentou maiores velocidades. Além disso, para tal nível, compostos sazonais de magnitude do vento foram elaborados com o intuito de observar a posição do jato que favorece a intensificação de instabilidades na área de estudo. Em dezembro de 2019, os casos não atingiram os critérios propostos e não foram contabilizados. Assim, no ano de 2020 identificou-se 89 eventos que afetaram a região de estudo. Observou-se maior número de casos na primavera (SON - 28 casos), seguido por verão (DJF) e inverno (JJA), com 23 casos em cada estação, e outono (MAM - 15 casos). Dos sistemas identificados, 54% foram classificados como frente fria (com maior frequência no inverno), 26% como ciclones (mais frequentes na primavera e verão), 9% como cavados (primavera) e 11% como outros eventos (maior ocorrência no outono). Em relação ao nível do jato, a maioria dos casos apresentou maior magnitude no núcleo do jato em 200 hPa, com maior ocorrência no verão e primavera. A análise da posição do jato indicou que, durante as estações de transição (outono e primavera), a região de estudo esteve posicionada na Entrada Equatorial do jato, favorecendo assim a intensificação de instabilidades em superfície. Dessa forma, o nível de 200 hPa foi o escolhido como o que melhor representa o jato de altos níveis no ano de 2020 para as Bacias de Campos e Santos. Além disso, a posição do núcleo em, aproximadamente, $33^{\circ}\text{S } 030^{\circ}\text{W}$, pode favorecer a intensificação de instabilidades na área de estudo.

Palavras-chave: jato de altos níveis; bacia de Campos; bacia de Santos; TRACK.

ABSTRACT

Upper-Level Jets are maximum wind speed regions, usually close to the troposphere. Its presence may support the development of surface instabilities through adjustments in the wind field that induce transverse ageostrophic movements in the entrance (where air particles accelerate) and exit (decelerate) regions of the jet. Thus, a good representation of the jets and their associated circulations improves weather forecasting and helps in decision-making. In this way, the work aims to analyze the 300, 250, and 200 hPa levels and identify which level best characterizes the upper-level component in an instability situation in the study region. For this, the TRACK algorithm and hourly Pressure at Mean Sea Level and Relative Vorticity in 1000 hPa fields were used to identify the instabilities that passed through the basins from December 2019 to November 2020. However, only those whose minimum vorticity is $-2.10^{-4} \text{ s}^{-1}$ and with at least 6 hours were selected. After this, for each of the selected events, it was sought the level at which the jet core, closest to the region of interest, presented the highest speeds. In addition, seasonal composites of wind magnitude were prepared for the previously identified level in order to observe the jet position that favors the intensification of instabilities in the study area. In December 2019, cases did not reach the proposed criteria and were not counted. Thus in 2020, 89 events that affected the study region were identified. There were more cases in spring (SON - 28 cases), followed by summer (DJF) and winter (JJA), with 23 cases in each season, and autumn (MAM - 15 cases). Of the identified systems, 54% were classified as cold fronts (more frequent in winter), 26% as cyclones (more frequent in spring and summer), 9% as troughs (spring), and 11% as other events (more frequent in autumn). About the jet level, most cases had a greater magnitude in the jet core at 200 hPa, with more occurrence in summer and spring. The analysis of the jet's position indicated that, during the transition seasons (autumn and spring), the study region was positioned at the jet's Equatorial Entrance, thus favoring the intensification of surface instabilities. Therefore, the 200 hPa level was chosen as the one that best represents the high-level jet in 2020 for the Campos and Santos Basins. Furthermore, the position of the core at approximately $33^{\circ}\text{S } 030^{\circ}\text{W}$ may favor the intensification of instabilities in the study area.

Keywords: Upper-level Jets; Campos basin; Santos Basins; TRACK.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.1** - Seção transversal do Hemisfério Norte mostrando as correntes de jato e elevações da tropopausa. L e H indicam regiões de baixa e alta pressão, respectivamente. Fonte: Adaptado de National Oceanic and Atmospheric Administration (2023). Disponível em: <https://www.noaa.gov/jetstream/global/jet-stream> 15
- Figura 2.1** - Representação esquemática da variação de pressão com a altura em função do contraste de temperatura entre polo e equador. Gradiente de cores entre azul e vermelho é a diferença de temperatura em superfície. Linhas pretas contínuas indicam o mesmo valor de pressão, que diminui com a altura. Seta roxa é a Força do Gradiente de Pressão (FGP) e seta verde, a Força de Coriolis (FCO). Ponto preto é a representação do Vento Geostrófico (Vg) saindo da página (de oeste para leste). Fonte: Adaptado de Grimm (1999)..... 19
- Figura 2.2** - Esquema da componente do momento angular em torno do eixo de rotação da Terra. PS = Polo Sul. Fonte: Adaptado de Peixoto e Oort (1992) para o Hemisfério Sul 20
- Figura 2.3** - Representação esquemática do eixo da corrente de jato. Fonte: MEDINA (1976) ... 21
- Figura 2.4** - Exemplo de movimento ageostrófico próximo ao jato para 12Z8jul2020. (a) Magnitude do vento em tons de laranja, altura geopotencial em linhas pretas contínuas e componente meridional do vento ageostrófico em vetores pretos. (b) Circulação direta (entrada do jato) representada pela divergência (positiva – tons de azul; negativa – tons de vermelho); (c) Circulação indireta (saída do jato) representada pela divergência (positiva – tons de azul; negativa – tons de vermelho). Fonte: Autor. 23
- Figura 2.5** - Média sazonal do número de frentes frias na América do Sul para cada ponto de grade em 925 hPa, entre os anos de 1979 a 2010, para: (a) verão; (b) outono; (c) inverno; (d) primavera. Quadrado vermelho indica a posição das bacias de Campos e Santos. FONTE: Adaptado de Foss et al. (2017) 27
- Figura 2.6** - Densidade de ciclogênese para o verão (DJF), entre os anos de 1979 a 2010. A unidade de densidade é ciclogênese por mês por área, onde a unidade de área equivale a 106 km². Quadrado vermelho indica a posição das bacias de Campos e Santos. Fonte: Adaptado de Gramcianinov (2019) 28
- Figura 3.1** - Mapa das bacias de Santos e Campos (delimitada pela linha laranja), localizadas sobre o Oceano Atlântico, aproximadamente entre os paralelos 28 e 20°S e meridianos 049 e 037°W 30
- Figura 4.1** - Ocorrência mensal (a) e sazonal (b) dos sistemas que atuaram nas BC e BS, com VR menor que -2.10^{-4} s⁻¹ e duração mínima de 6 horas, entre dezembro de 2019 e janeiro de

2020. Número de Cavados estão em verde, Frentes Frias em azul, Ciclones em laranja e Outros Eventos em cinza	34
Figura 4.2 - Número de casos, em cada nível, com maior magnitude no núcleo do jato, para cada estação do ano	35
Figura 4.3 - Composto de magnitude do vento para o nível de 200 hPa, considerando 3 horas antes do horário inicial da vorticidade relativa em 1000 hPa em cada caso, para: (a) verão, (b) outono, (c) inverno e (d) primavera	38
Figura 4.4 - Imagem do satélite GOES-16 no canal 13 às: a) 11Z do dia 21/03/2020; b) 21Z do dia 21/03/2020 e c) 04Z do dia 22/03/2020	40
Figura 4.5 - Campos de Pressão ao Nível Médio do Mar (hPa - Linha cinza contínua), Espessura da camada entre 1000 e 500 hPa (m _g p - linha azul e vermelha tracejada) e Vorticidade Relativa em 1000 hPa (10 ⁻⁵ s ⁻¹ - tons de azul) - linha superior - e Umidade Específica (g/kg - sombreado) e Linha de Corrente em 850 hPa - linha inferior - às: a) e d) 11Z do dia 21/03/2020; b) e e) 21Z do dia 21/03/2020; c) e f) 04Z do dia 22/03/2020	41
Figura 4.6 - Campos de magnitude do vento (m/s - cores e linha) e componente meridional do vento ageostrófico (vetor) - linha superior - e divergência (10 ⁻⁵ s ⁻¹) e linha de corrente - linha inferior - às 08Z do dia 21 de março de 2020, em: a) e d) 300 hPa; b) e e) 250 hPa; c) e f) 200 hPa	42
Figura 4.7 - Magnitude do vento (m/s) em 300 (coluna da esquerda), 250 (coluna do meio) e 200 hPa (coluna da direita) às: a), b), c) 11Z do dia 21/03/2020; d), e), f) 21Z do dia 21/03/2020; g), h), i) 04Z do dia 22/03/2020	43
Figura 4.8 - Campos de magnitude do vento (m/s - cores e linha) e componente meridional do vento ageostrófico (vetor) - linha superior - e divergência (10 ⁻⁵ s ⁻¹) e linha de corrente - linha inferior - às 22Z do dia 21 de março de 2020, em: a) e d) 300 hPa; b) e e) 250 hPa; c) e f) 200 hPa	44
Figura 4.9 - Imagem do satélite GOES-16 no canal 13 às: a) 22Z do dia 20/09/2020; b) 13Z do dia 21/09/2020; c) 23Z do dia 21/09/2020	45
Figura 4.10 - Campos de Pressão ao Nível Médio do Mar (hPa - Linha cinza contínua), Espessura da camada entre 1000 e 500 hPa (m _g p - linha azul e vermelha tracejada) e Vorticidade Relativa em 1000 hPa (10 ⁻⁵ s ⁻¹ - tons de azul) - linha superior - e Umidade Específica (g/kg - sombreado) e Linha de Corrente em 850 hPa - linha inferior - às: a) e d) 22Z do dia 20/09/2020; b) e e) 13Z do dia 21/09/2020; c) e f) 23Z do dia 21/09/2020	46

Figura 4.11 - Campos de magnitude do vento (m/s - cores e linha) e componente meridional do vento ageostrófico (vetor) - linha superior - e divergência (10-5 s-1) e linha de corrente - linha inferior - às 19Z do dia 20 de setembro de 2020, em: a) e d) 300 hPa; b) e e) 250 hPa; c) e f) 200 hPa	47
Figura 4.12 - Magnitude do vento (m/s) em 300 (coluna da esquerda), 250 (coluna do meio) e 200 hPa (coluna da direita) às: a), b), c) 22Z do dia 20 de setembro de 2020; d), e), f) 13Z do dia 21/09/2020; g), h), i) 23Z do dia 21/09/2020	48
Figura 4.13 - Campos de magnitude do vento (m/s - cores e linha) e componente meridional do vento ageostrófico (vetor) - linha superior - e divergência (10-5 s-1) e linha de corrente - linha inferior - às 18Z do dia 21 de setembro de 2020, em: a) e d) 300 hPa; b) e e) 250 hPa; c) e f) 200 hPa	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Escala de vorticidade relativa para sistemas sinóticos (Fonte: Adaptado de Rodrigues et al. 2019)	25
Tabela 4.1 - Velocidade mínima (Mín), média (Méd) e máxima (Máx) observada, em m/s, no núcleo do jato, de acordo com os casos identificados em cada nível e considerando todos os 89 casos identificados (Total), para cada estação do ano	36

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASAS	Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul
BC	Bacia de Campos
BS	Bacia de Santos
CJP	Corrente de Jato Polar
CJS	Corrente de Jato Subtropical
DSA	Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais
ECMWF	<i>European Centre for Medium-Range Weather Forecast</i>
EE	Entrada Equatorial
FCO	Força de <i>Coriolis</i>
FF	Frente Fria
FGP	Força do Gradiente de Pressão
GOES	<i>Geostationary Operational Environmental Satellite</i>
HS	Hemisfério Sul
IFS	<i>Integrated Forecast System</i>
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
JAN	Jato de Altos Níveis
JBN	Jato de Baixos Níveis
PNMM	Pressão ao Nível Médio do Mar
SP	Saída Polar
VCAN	Vórtice Ciclônico de Altos Níveis
VR	Vorticidade Relativa
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1. Considerações Iniciais	14
1.2. Contexto do Estudo	15
1.3. Motivação da Pesquisa	16
1.4. Objetivos do Trabalho	17
1.5. Estrutura da Dissertação	17
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1. Correntes de Jato	18
2.1.1. Corrente de Jato Subtropical.....	19
2.1.2. Corrente de Jato Polar.....	20
2.2. Circulações Direta e Indireta	21
2.3. Vorticidade Relativa	24
2.4. Climatologia das Bacias de Campos e Santos	25
3. DADOS E METODOLOGIA	29
3.1. Área de Estudo.....	29
3.2. Dados	30
3.3. Metodologia.....	31
3.3.1. Identificação das Instabilidades em Superfície	31
3.3.2. Identificação do Nível do Jato	32
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	33
4.1. Análise dos Sistemas	33
4.2. Análise do Nível do Jato.....	35
4.3. Análise da Posição do Jato	37
4.4. Estudo de Casos.....	39
4.4.1. Caso Outono: 11z 21/03/2020 - 04z 22/03/2020.....	39
4.4.2. Caso Primavera: 22z 20/09/2020 - 23z 21/09/2020	44
5. CONCLUSÃO.....	50
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52
APÊNDICE A - LISTAGEM COM OS CASOS IDENTIFICADOS NO ESTUDO.	58

1. INTRODUÇÃO

1.1. Considerações Iniciais

As correntes de jato são regiões de máxima velocidade do vento que ocorrem ao redor do globo em altos níveis atmosféricos, em ambos os hemisférios, e impactam o tempo meteorológico. Dentre as definições existentes, a corrente de jato é caracterizada, de acordo com a Organização Meteorológica Mundial (WMO, 1992), como um tubo de ar quase horizontal e próximo a troposfera, onde as maiores velocidades são observadas em seu núcleo, cujo eixo localiza-se ao longo da linha de máxima velocidade e forte cisalhamento do vento. Essas regiões estão relacionadas aos contrastes de temperatura em superfície entre polo e equador, que contribuem para um aumento no gradiente de pressão em níveis superiores e, conseqüentemente, ventos mais intensos em altitude (Grimm, 1999; Holton, 2004).

Existem dois tipos de correntes de jato: Jato Subtropical (CJS) e Jato Polar (CJP) (Figura 1.1). A CJS possui pouca variação latitudinal durante o ano, posicionado em latitudes de aproximadamente 30°-40° em ambos os hemisférios (Gallego *et al.*, 2005). Também predomina nos campos médios sazonais do vento em função do gradiente de temperatura entre os trópicos e latitudes mais altas e da conservação do momento angular (Sato, 1951). A CJP está associada ao forte gradiente horizontal de temperatura que acontece nas zonas frontais, localizando-se no lado equatorial dessas (Pezzi; Rosa; Batista, 1996), assim como, influencia na posição e no deslocamento dos sistemas de baixa pressão em superfície (Grimm, 1999). Então, a CJP pode impactar as condições de tempo, visto que as áreas de instabilidades associadas aos sistemas em superfície podem estar relacionadas ao Jato de Altos Níveis (JAN). Dessa forma, tanto a identificação do nível do jato quanto de seu deslocamento pode influenciar o prognóstico do tempo.

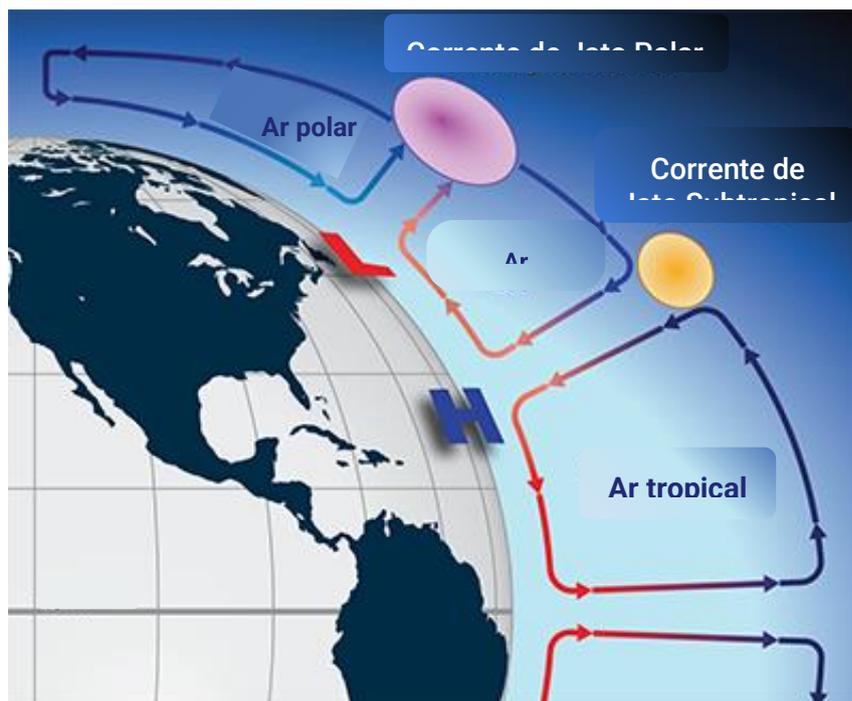


Figura 1.1 - Seção transversal do Hemisfério Norte mostrando as correntes de jato e elevações da tropopausa. L e H indicam regiões de baixa e alta pressão, respectivamente. Fonte: Adaptado de *National Oceanic and Atmospheric Administration* (2023). Disponível em: <https://www.noaa.gov/jetstream/global/jet-stream>.

1.2. Contexto do Estudo

As variações do vento ao longo da região de entrada e de saída do jato induzem movimentos ageostróficos transversais. Assim, a presença da corrente de jato pode favorecer o desenvolvimento ou intensificar uma instabilidade na superfície, através desses padrões de circulação e ajustes no campo de massa (Uccellini; Johnson, 1979). Alguns estudos identificaram uma forte difluência em altos níveis, com a presença de uma corrente de jato, alto teor de umidade e vórtice ciclônico em baixos níveis, próximo à área de interesse, em casos de eventos de chuva e vento intenso (Lara *et al.*, 2019; Coelho; Nunes, 2020; Ramos; Nunes; Cassol Machado, 2021). Regiões de difluência em níveis mais elevados levam a um aumento da saída do ar, favorecendo a divergência de massa em altos níveis e convergência em baixos níveis, podendo intensificar a severidade das instabilidades em superfície (Krishnamurti *et al.*, 2018). Essas regiões de divergência em altos níveis são observadas na região da Entrada Equatorial (EE) e na região da Saída Polar (SP) do núcleo do jato.

Melamed-Turkish, Taylor, Liu (2018) ilustraram a variabilidade anual e sazonal das correntes de jato em Ontário (Canadá) e regiões adjacentes. Os autores identificaram que o nível de pressão mediana do núcleo do jato na região de estudo é de 250 hPa, o mesmo utilizado no

ambiente operacional do país. Entretanto, separando em faixas latitudinais, o nível do jato variou para cada região, sendo 200 hPa para faixa mais próxima do equador, 250 hPa para faixa em torno de 20-30°N (sendo 275 hPa em DJF e 225 hPa em JJA), e 275-300 hPa na faixa mais ao norte (próxima ao polo). Os autores também identificaram uma pequena variabilidade sazonal no nível de pressão do jato dentro de cada faixa, embora no verão (inverno) tenha os níveis mais baixos (altos).

Vale ressaltar que, no Brasil, não há estudos que busquem identificar a variabilidade dos diferentes níveis do jato, apesar de diversos trabalhos utilizarem o nível de 200 hPa para climatologia dos jatos e análise da CJS (Pezzi; Cavalcanti, 1994; Cruz, 2003; Gallego, 2005; Campos, 2010; Zimmermann, 2017). No entanto, segundo Escobar (2009), o nível de 250 ou 300 hPa é o adequado para identificar a presença dos jatos no ambiente operacional.

As Bacias de Campos (BC) e Santos (BS), localizadas na costa Sul e Sudeste do Brasil, são as principais bacias petrolíferas produtoras do país (Petrobrás, 2022). Nelas, estão localizados expressivos campos de exploração do pré-sal e grandes laboratórios para desenvolvimento de novas tecnologias, sendo afetadas por sistemas atmosféricos durante todo o ano (Dereczynski; Menezes, 2015). Com a intensificação da produção e consequente aumento no tráfego de embarcações marinhas e aéreas, torna-se necessário um maior conhecimento dos sistemas meteorológicos que afetam a região, tal como de alguns fatores que favorecem seus desenvolvimentos, contribuindo para a execução das atividades e prognóstico do tempo na área de estudo.

1.3. Motivação da Pesquisa

Diversos estudos realizados buscam entender a climatologia das BC e BS, os sistemas que as afetam (Dereczynski; Menezes, 2015; Carvalho, 2018; Silva *et al.*, 2019), e compreender as condições atmosféricas que contribuiriam para eventos de chuva ou vento intenso (Rodrigues *et al.*, 2022; Silva *et al.*, 2023), devido à sua importância para a produção e exploração de petróleo e gás natural, além do transporte marítimo. Entretanto, poucos estudos levam em consideração a análise da posição do JAN e sua influência nos sistemas meteorológicos em superfície.

Como citado anteriormente, a CJP está associada ao forte gradiente de temperatura em superfície observado nas zonas frontais que afetam grandemente a região de interesse. De acordo com Souza *et al.* (2020), em média, ocorrem 50 Sistemas Frontais por ano na BS. Além

disso, a posição do JAN em relação à instabilidade pode intensificá-la ou favorecer seu desenvolvimento através das circulações transversais observadas nas regiões de entrada e saída do jato. Dessa forma, uma boa representação do JAN e de suas circulações associadas, assim como identificar qual a posição que contribui para a formação ou intensificação do sistema na área de estudo, contribuem para um aperfeiçoamento da previsão e auxilia na tomada de decisões na região de interesse. Logo, a questão a ser respondida é: “Qual o nível em altitude que melhor caracteriza a influência da componente de altos níveis para as instabilidades em superfície na região das BC e BS?”

1.4. Objetivos do Trabalho

Este trabalho tem como objetivo principal analisar os níveis de 300, 250 e 200 hPa e identificar aquele que melhor representa o jato em situações de instabilidade em superfície na BC e BS. Como objetivos específicos, destacam-se:

- 1- Verificar em qual nível vertical a circulação transversal (direta e indireta) associada ao jato é melhor representada, bem como a sua importância na BC e BS;
- 2- Identificar a posição horizontal (latitude e longitude) do núcleo do jato que favorece o desenvolvimento e/ou intensificação de instabilidades nas bacias.

1.5. Estrutura da Dissertação

No Capítulo 2 é apresentada uma revisão da literatura sobre as correntes de jato e as circulações associadas a tais sistemas, além de uma breve definição da Vorticidade Relativa (VR), principal variável utilizada na identificação dos sistemas em superfície, e a climatologia da região de estudo. Os dados e a metodologia utilizada para identificação dos eventos e a seleção do nível do jato são descritos no Capítulo 3. As análises dos resultados obtidos, assim como dos estudos de casos selecionados, são apresentadas no Capítulo 4. Por fim, as conclusões e considerações finais encontram-se no Capítulo 5.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste Capítulo, é apresentada uma revisão da literatura sobre as correntes de jato que atuam sobre a região de estudo e suas circulações associadas, bem como uma breve descrição da VR negativa, a qual é usada como diagnóstico (marcador) de instabilidades em superfície.

2.1. Correntes de Jato

A geração dos máximos de vento em altura, relacionados às correntes de jato, está associada aos contrastes de temperatura em superfície (Holton, 2004). Visto que o ar frio é mais denso do que o ar quente, a pressão nos polos, onde a temperatura é menor, decresce mais rapidamente do que na região equatorial (Figura 2.1). Dessa forma, em altitude, a pressão é maior sobre os trópicos e menor sobre os polos, gerando um gradiente de pressão dos polos para o equador. A Força do Gradiente de Pressão (FGP), com sentido oposto (do equador para os polos), inicia o movimento (Figura 2.1, seta roxa). Seguindo o balanço geostrófico, que é o balanço entre a FGP e a Força de *Coriolis* (FCO), as pressões mais altas estão à esquerda do movimento e as pressões mais baixas, à direita no HS. Esse balanço é válido principalmente em altos níveis, onde a força de atrito é mínima. Portanto, desse balanço, chega-se ao vento geostrófico, à direita da FCO, ou seja, com sentido de oeste para leste (saindo da página, ponto preto na Figura 2.1). Como o gradiente de pressão aumenta com a altitude, conseqüentemente o vento aumenta, obtendo os maiores valores em níveis mais elevados, onde observam-se as correntes de jatos (Grimm, 1999).

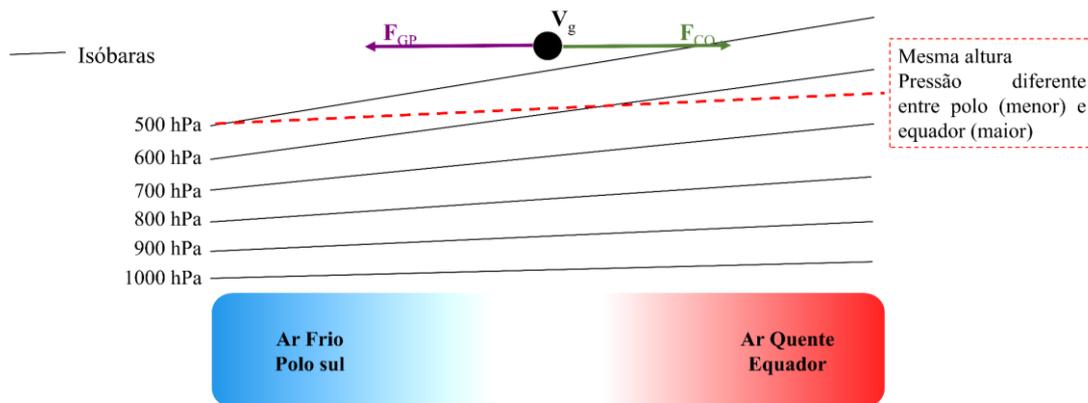


Figura 2.1 - Representação esquemática da variação de pressão com a altura em função do contraste de temperatura entre polo e equador. Gradiente de cores entre azul e vermelho é a diferença de temperatura em superfície. Linhas pretas contínuas indicam superfícies de mesmo valor de pressão, que diminui com a altura. Seta roxa é a Força do Gradiente de Pressão (F_{GP}) e seta verde, a Força de Coriolis (F_{CO}). Ponto preto é a representação do Vento Geostrófico (V_g) saindo da página (de oeste para leste). Fonte: Adaptado de Grimm (1999).

2.1.1. Corrente de Jato Subtropical

A CJS é relativamente constante em sua posição em torno de, aproximadamente, 30°S (Gallego *et al.*, 2005), principalmente no inverno, quando a circulação meridional média é mais intensa (Hastenrath, 1991). Nessa estação, a CJS atua com maior frequência e possui velocidade média de até 45-50 m/s (ou 90-100 kt). A CJS está associada à circulação da célula de Hadley, sendo essa um dos principais mecanismos para sua manutenção, localizando-se no ramo descendente dessa célula (Palmén; Newton, 1969). Seu ramo ascendente posiciona-se sobre a região equatorial, onde ocorre o levantamento do ar devido ao forte aquecimento. Assim, quando uma parcela no equador ascende, por conservação de massa, ela flui em direção aos polos em altitude, devido ao aquecimento diferencial existente entre essas regiões (Schneider, 2006). Dessa forma, o momento angular absoluto (ou total) por unidade de massa (M) é conservado em relação ao eixo da Terra, na ausência de forças de atrito (Peixoto; Oort, 1992):

$$M = (\Omega a \cos \phi + u) a \cos \phi \quad (2.1)$$

Onde: Ω é a velocidade angular da Terra, a seu raio médio, ϕ a latitude e u , a componente zonal do vento. Uma vez que Ω não varia, a velocidade do vento zonal irá modificar quando a distância do eixo de rotação variar (Figura 2.2). Como o raio da Terra é menor em latitudes médias em relação ao equador, uma partícula que se move em direção aos polos irá adquirir

velocidade zonal de oeste, devido a ação da FCO, para manter o momento angular absoluto constante (Peixoto; Oort, 1992; Sato, 1951).

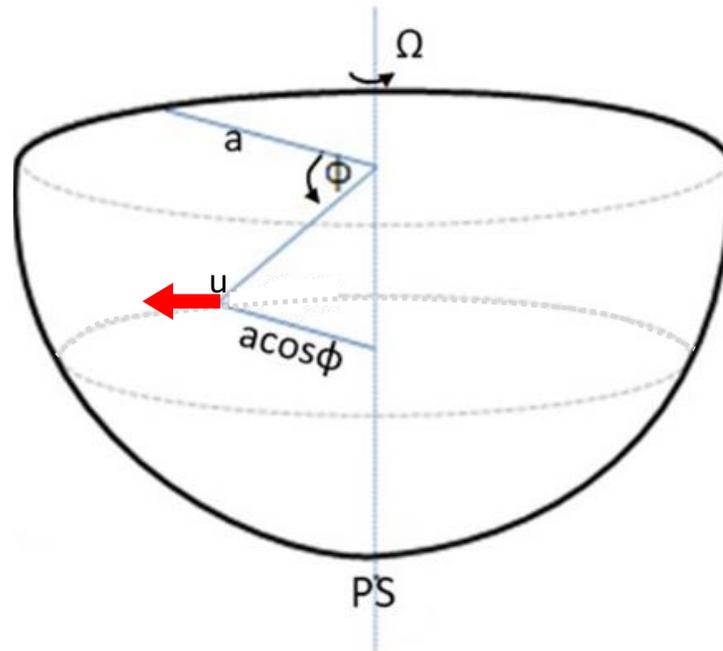


Figura 2.2 - Esquema da componente do momento angular em torno do eixo de rotação da Terra. PS = Polo Sul. Fonte: Adaptado de Peixoto e Oort (1992) para o Hemisfério Sul.

2.1.2. Corrente de Jato Polar

A CJP possui uma maior variação latitudinal em relação ao CJS, podendo variar entre 40°S-60°S (Gallego *et al.*, 2005), estando mais próximo do equador durante o inverno. A CJP está associada ao gradiente horizontal de temperatura em superfície observado nas zonas frontais (Palmén; Newton, 1969; Holton, 2004). Essa relação entre o gradiente de temperatura em superfície e o máximo de vento em altitude pode ser calculada através da equação do Vento Térmico, que na verdade é uma relação para o cisalhamento vertical do vento:

$$\frac{\partial v_g}{\partial \ln p} = -\frac{R}{f} \mathbf{k} \times \nabla_p T \quad (2.2)$$

Onde: \mathbf{V}_g é o Vento Geostrófico no nível de pressão a ser considerado e $\nabla_p T$ é o gradiente de temperatura no nível de pressão de interesse (p), R é a constante do gás para o ar seco, f é o parâmetro de *Coriolis* e \mathbf{k} é o vetor unitário na direção vertical do rotacional. Dessa forma, na presença de um gradiente horizontal de temperatura, o vento geostrófico deve apresentar um cisalhamento vertical, com valores máximos na troposfera superior. Com isso, o vento térmico

(\mathbf{V}_T) é dado como a diferença do vento geostrófico (\mathbf{V}_g) em duas camadas (p_1 e p_0) com temperatura média \underline{T} .

$$V_T = V_g(p_1) - V_g(p_0) = -\frac{R}{f} \int_{p_0}^{p_1} (k \times \nabla_p T) d \ln p \quad (2.3)$$

$$u_T = -\frac{R}{f} \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_p \ln \left(\frac{p_0}{p_1} \right) \quad (2.4)$$

$$v_T = \frac{R}{f} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)_p \ln \left(\frac{p_0}{p_1} \right) \quad (2.5)$$

2.2. Circulações Direta e Indireta

A velocidade do vento nas correntes de jato não é uniforme em toda sua extensão horizontal, havendo regiões com máximos e mínimos locais ao longo ou embebidos no eixo da corrente de jato (Figura 2.3). Esses núcleos de ventos máximos são chamados “*Jet Streaks*”, ou apenas jatos (Palmén; Newton, 1969). Esses máximos deslocam-se ao longo do eixo, no mesmo sentido do escoamento (Medina, 1976), porém com menor velocidade do que o vento (Palmén; Newton, 1969).

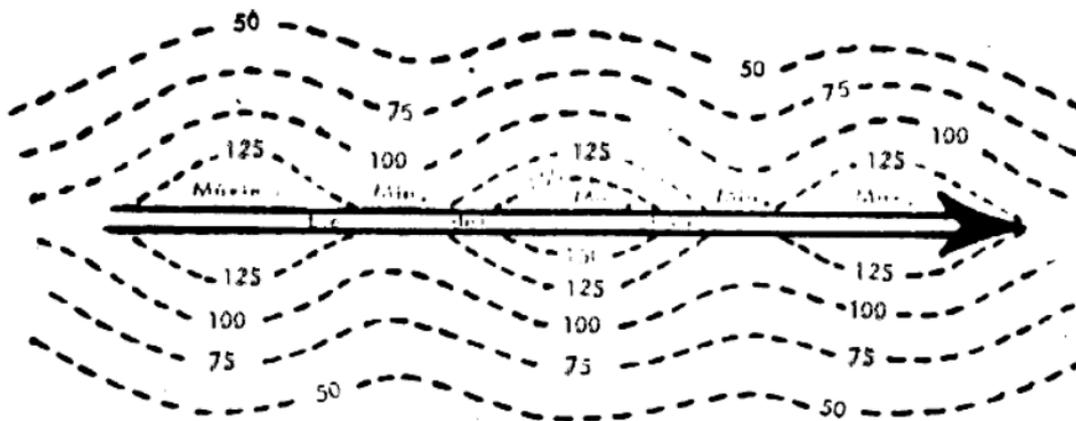


Figura 2.3 - Representação esquemática do eixo da corrente de jato. Fonte: MEDINA (1976).

A presença do jato indica que algum processo de ajuste dos campos de massa e de vento está ocorrendo nas regiões de entrada (onde as parcelas aceleram) e saída (desaceleram) do jato, sendo regiões de confluência e difluência, respectivamente, para manter o campo do vento geostrófico quase não-divergente (Ray, 1986). Assim, movimentos nessas regiões teriam alguma componente ageostrófica devido às mudanças de velocidade (Sechrist; Whitaker, 1979).

O resultado das mudanças na velocidade do vento nas regiões de entrada e saída do jato são devido a componente zonal da equação simplificada do movimento em coordenadas de pressão:

$$\frac{du}{dt} - fv = -\frac{\partial\phi}{\partial x} \quad (2.6)$$

A componente meridional do vento geostrófico é dada por:

$$v_g = \frac{1}{f} \frac{\partial\phi}{\partial x} \quad (2.7)$$

Dessa forma, a Equação (2.6) pode ser reescrita como:

$$\frac{du}{dt} - fv = -fv_g \Rightarrow \frac{du}{dt} = fv_{ag} \quad (2.8)$$

Onde:

$$v_{ag} = v - v_g \quad (2.9)$$

Assim, para o HS, onde $f < 0$, na entrada do jato (onde $du/dt > 0$), a componente ageostrófica do vento é negativa ($v_{ag} < 0$), sendo direcionada para menores alturas geopotenciais (equador para os polos), favorecendo uma região de divergência na EE do jato (Figura 2.4a - A-A'). Na região de saída ($du/dt < 0$), a componente ageostrófica é positiva ($v_{ag} > 0$), sendo direcionada dos polos para o equador, favorecendo uma região de divergência na Saída Polar (SP) do jato (Figura 2.4a - B-B'). Essas regiões de divergência na EE e SP do jato favorecem a convergência em baixos níveis e o movimento vertical ascendente, contribuindo para o desenvolvimento e intensificação das instabilidades em escala sinótica na superfície.

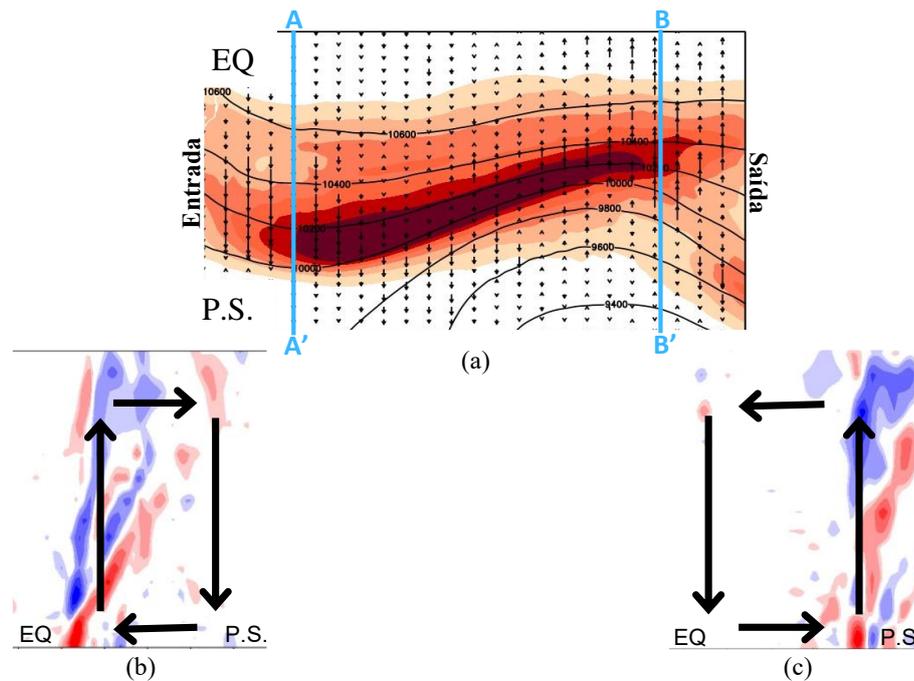


Figura 2.4 - Exemplo de movimento ageostrófico próximo ao jato para 12Z8jul2020. (a) Magnitude do vento em tons de laranja, altura geopotencial em linhas pretas contínuas e componente meridional do vento ageostrófico em vetores pretos. (b) Circulação direta (entrada do jato) representada pela divergência (positiva – tons de azul; negativa – tons de vermelho); (c) Circulação indireta (saída do jato) representada pela divergência (positiva – tons de azul; negativa – tons de vermelho). Fonte: Autor.

Analisando o corte da seção vertical (A-A') na Figura 2.4a, na região de entrada do jato, onde o padrão de divergência horizontal para circulação vertical pode ser observado na Figura 2.4b, nota-se uma circulação termicamente direta, com ar quente ascendendo e ar frio subsidindo. Nessa representação, o ar quente encontra-se à esquerda do jato (EQ na Figura 2.4a). Assim, no lado quente, há uma área de divergência acima da área de convergência em baixos níveis (Figura 2.4b), o que favorece o movimento vertical ascendente e o levantamento do ar quente. Já no lado frio da entrada do jato (P.S da Figura 2.4a), há convergência em altos níveis, com divergência em superfície. Nessa situação, as parcelas de ar são forçadas a descer, por causa da tropopausa, colaborando para subsidência do ar frio.

Para o corte da seção vertical B-B' (Figura 2.4a), na região de saída do jato, nota-se, na Figura 2.4c, uma circulação termicamente indireta, com ar frio ascendendo ao sul e ar quente subsidindo ao norte. Nessa representação, há uma região de convergência no lado quente (EQ), e divergência em baixos níveis (Figura 2.4c), dessa forma, as parcelas de ar quente são forçadas a descer. Já no lado frio (P.S.), observa-se divergência em níveis superiores, e convergência na

superfície (Figura 2.4c), o que favorece o movimento ascendente e, conseqüentemente, o levantamento do ar frio.

2.3. Vorticidade Relativa

A VR, associada a movimentos ciclônicos no HS, é muito utilizada para detecção de instabilidades em superfície (Gramcianinov, 2019; Reboita, 2008; Reboita *et al.*, 2010; Sinclair, 1994). A VR (ζ) é definida como a componente vertical (\mathbf{k}) do rotacional do vetor velocidade ($\nabla \times \mathbf{U}$).

$$\zeta = \mathbf{k} \cdot (\nabla \times \mathbf{U}) = \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ u & v & w \end{vmatrix} = \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) \mathbf{k} \quad (2.10a)$$

$$\zeta = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \quad (2.10b)$$

Embora existam diversos parâmetros utilizados para identificação de sistemas ciclônicos, tais como Pressão ao Nível Médio do Mar (PNMM) e o geopotencial, a VR permite a detecção de eventos fracos e que se deslocam rapidamente, que são mascarados pelo fluxo de grande escala (Hoskins; Hodges, 2002; Sinclair, 1994). Sinclair (1994) mostrou que o uso da VR próxima à superfície aumentou a habilidade e detecção dos ciclones, além de identificar os sistemas de escala subsinótica, os quais não seriam encontrados pelo campo de PNMM, como o caso das baixas polares, típicas das massas de ar das retaguardas de frentes frias (FFs).

Segundo Rodrigues *et al.* (2019), a VR negativa é um bom parâmetro indicador de sistemas sinóticos e responde em faixas de intensidade a cada fenômeno meteorológico, como descrito na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Escala de vorticidade relativa para sistemas sinóticos (Fonte: Adaptado de Rodrigues *et al.* 2019).

Vorticidade Relativa (10^{-4} s^{-1})	Vento Máximo (nós)	Designação	Sistema Sinótico
-2	25	Muito Fresco Força 6	Cavado
-3	30	Forte Força 7	Cavado
-4	30	Forte Força 7	Frente Fria
-5	35	Muito Forte Força 8	Frente Fria
-6	35	Muito Forte Força 8	Ciclone; Frente Fria; ZCAS*
-7	35	Muito Forte Força 8	Ciclone; Frente Fria; ZCAS*
-8	40	Muito Forte Força 8	Ciclone; Frente Fria
≤ -9	45	Duro Força 9	Ciclone

*ZCAS = Zona de Convergência do Atlântico Sul

2.4. Climatologia das Bacias de Campos e Santos

O clima no litoral na costa Sul e Sudeste do Brasil, próximo às bacias de Campos e Santos, é influenciado diretamente pela presença do Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) e dos sistemas transientes que afetam a região (Dereczynski; Menezes, 2015). Os maiores valores de PNMM ocorrem no inverno, devido a chegada de massas de ar migratórias de origem polar e a posição do ASAS, que se encontra mais ao norte e mais próximo do continente Sul-Americano, enquanto os menores valores são observados no verão

(Dereczynski; Menezes, 2015; Carvalho, 2018). Nessa estação, nota-se uma região de baixa pressão sobre a BS (Carvalho, 2018). A direção predominante do vento durante o ano é de nordeste, visto que as bacias se encontram na borda oeste do ASAS, com intensidade entre 2,5 e 6 m/s (5 e 12 nós). As maiores intensidade do vento são observadas durante o verão e primavera, quando os gradientes de pressão estão mais intensos, uma vez que essa região se encontra sob a interface de sistemas de baixa pressão, que atuam sobre o continente, e o ASAS (Dereczynski; Menezes, 2015; Carvalho, 2018). Na BS, um maior gradiente de temperatura é observado no inverno, variando entre 18° e 22°C, e na primavera na BC, entre 22° e 24°C (Carvalho, 2018).

No que diz respeito aos sistemas transientes que afetam a BC e a BS, as FFs são menos frequentes no verão, aumentando o número de ocorrência em direção a latitudes tropicais durante o ano (Figura 2.5). No inverno, as FFs alcançam latitudes menores devido à forte baroclinia observada nessa estação (Foss *et al.*, 2017). Já na primavera, ocorre a maior frequência de FFs na costa Sul e Sudeste do Brasil (Figura 2.5d - quadrado vermelho), o que também é identificado por outros autores (Andrade, 2005; Souza *et al.*, 2020). Tal sistema pode ocasionar, além de chuvas intensas (Andrade; Cavalcanti, 2008), ventos fortes antes e após sua passagem (Dereczynski; Menezes, 2015; Silva, 2021).

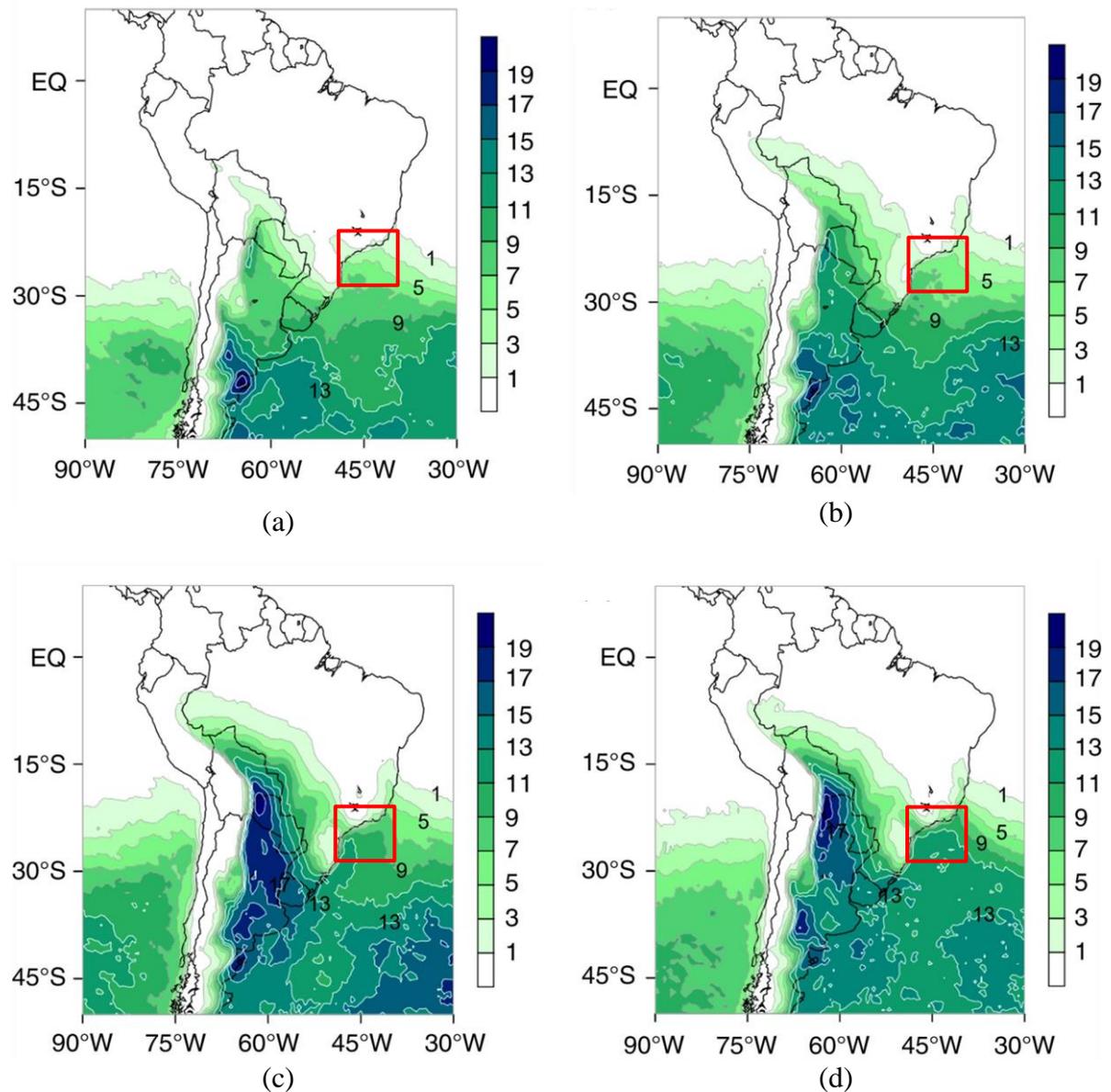


Figura 2.5 - Média sazonal do número de frentes frias na América do Sul para cada ponto de grade em 925 hPa, entre os anos de 1979 a 2010, para: (a) verão; (b) outono; (c) inverno; (d) primavera. Quadrado vermelho indica a posição das bacias de Campos e Santos. FONTE: Adaptado de Foss *et al.* (2017).

Em relação aos ciclones, Reboita (2008) e Gramcianinov (2019, 2020b) identificaram uma região ciclogênica na costa Sudeste do Brasil (Figura 2.6), ao norte de 30°S (região da BS), principalmente durante o verão austral (Gramcianinov *et al.*, 2020b). Tais sistemas ocasionam ventos intensos, devido ao forte gradiente de pressão associado a eles (Holton, 2004). Nessa região, o fluxo de umidade em baixos níveis e forte divergência em altos níveis são os principais mecanismos para a ciclogênese (Gramcianinov, 2019). Já os sistemas de

mesoescala, apesar de menos frequentes do que os de escala sinótica, podem gerar ventos extremos, ocasionando impactos significativos nas operações da região (Silva *et al.*, 2022; Melo; Rodrigues; Palmeira, 2022).

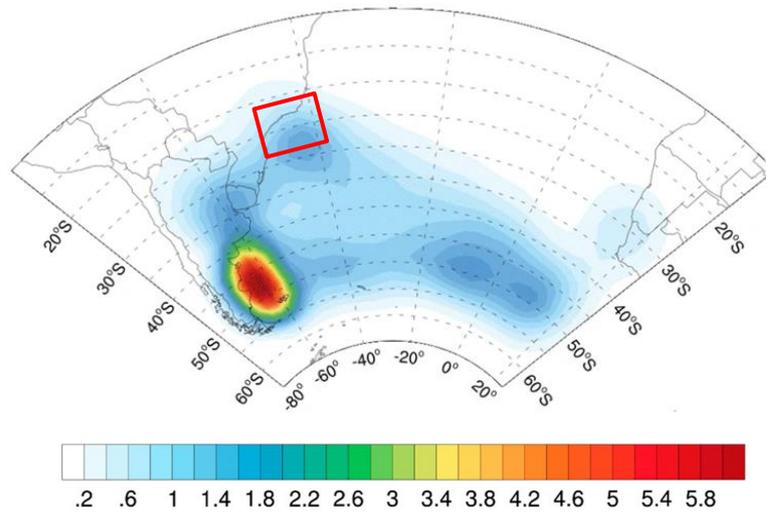


Figura 2.6 - Densidade de ciclogênese para o verão (DJF), entre os anos de 1979 a 2010. A unidade de densidade é ciclogênese por mês por área, onde a unidade de área equivale a 10^6 km². Quadrado vermelho indica a posição das bacias de Campos e Santos. Fonte: Adaptado de Gramcianinov (2019).

3. DADOS E METODOLOGIA

Neste capítulo, são apresentados os dados utilizados e a metodologia aplicada para identificar o nível do jato que melhor representa as situações de instabilidade em superfície, (causadas por sistemas sinóticos), na BC e na BS. Além disso, são explicitados também os critérios utilizados para identificação, seleção e classificação dos sistemas sinóticos que atuaram nesta região.

3.1. Área de Estudo

A BC e a BS, localizadas sobre o Oceano Atlântico, na costa Sul e Sudeste brasileira (Figura 3.1), entre Vitória (Espírito Santo) e Florianópolis (Santa Catarina), são as principais bacias produtoras petrolíferas do país (Petrobras, 2022). A BS é a maior bacia sedimentar da plataforma continental brasileira. Nela, estão presentes expressivos campos de exploração do pré-sal, cuja produção teve início em 2010. A BC é a segunda maior bacia produtora de petróleo e gás natural do Brasil, sendo responsável por 30% de toda produção nacional, e onde também estão localizados grandes laboratórios para desenvolvimento de novas tecnologias. Tal região é afetada por diversos sistemas atmosféricos durante todo o ano, entre eles, as FFs, os ciclones e os sistemas de mesoescala (Dereczynski; Menezes, 2015).

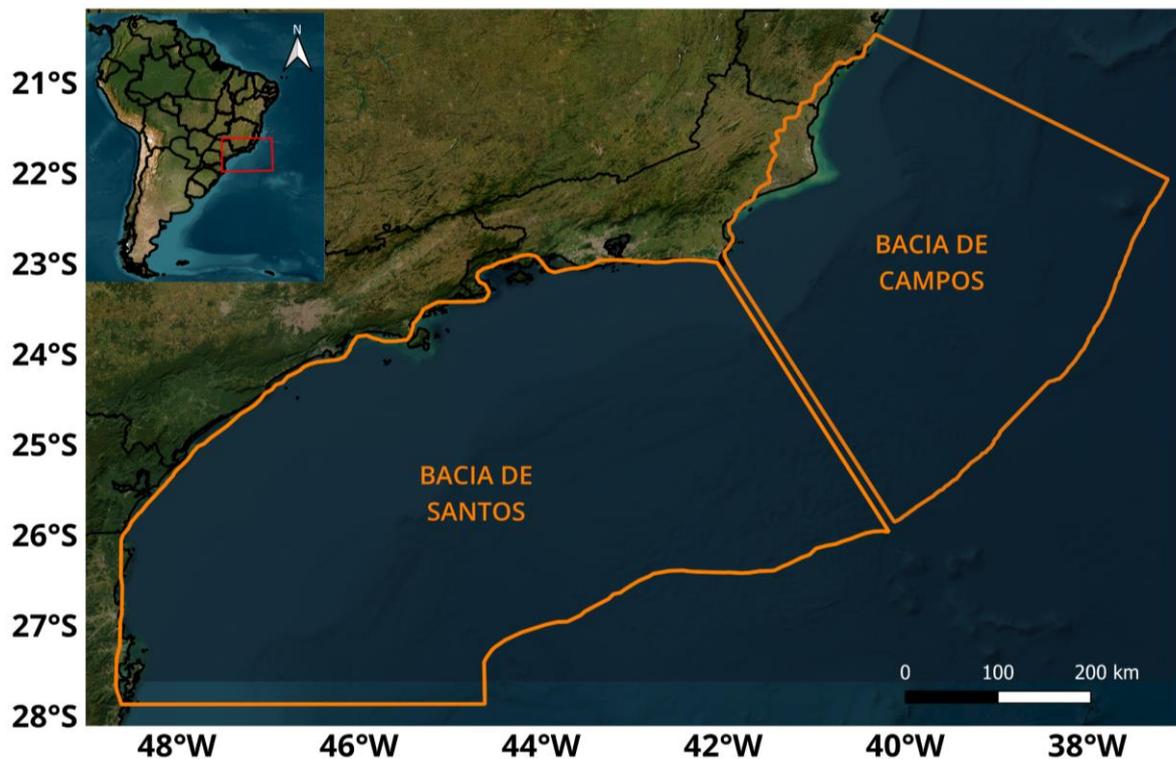


Figura 3.1 - Mapa das bacias de Santos e Campos (delimitada pela linha laranja), localizadas sobre o Oceano Atlântico, aproximadamente entre os paralelos 28 e 20°S e meridianos 049 e 037°W.

3.2. Dados

No presente estudo, utilizou-se informações da 5ª geração de reanálises do *European Centre for Medium-Range Weather Forecast* (ECMWF), denominada ERA5. Essa reanálise foi produzida utilizando *Integrated Forecast System* (IFS), versão CY41R2, usado no sistema de previsão operacional do ECMWF em 2016 (Hersbach *et al.*, 2020). A ERA5 possui resolução espacial de 31 km, 137 níveis verticais e resolução temporal de 1 hora. Para elaboração dos campos atmosféricos, as seguintes variáveis foram utilizadas: PNMM, VR em 1000 hPa, Altura Geopotencial em 1000 e 500 hPa e componentes zonal e meridional do vento em diversos níveis atmosféricos para o período de dezembro de 2019 a novembro de 2020.

Ademais, cartas sinóticas da Marinha do Brasil e imagens do satélite GOES-16 (série 16 do *Geostationary Operational Environmental Satellite*) no canal do infravermelho (canal 13) e vapor d'água (canal 8), obtidas a partir do site da Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (DSA/INPE), foram utilizadas para análise e confirmação dos casos identificados.

3.3. Metodologia

3.3.1. Identificação das Instabilidades em Superfície

A identificação das instabilidades em escala sinótica em superfície foi realizada a partir do algoritmo TRACK e da análise de campos horários de PNMM e VR em 1000 hPa. Para seleção dos eventos, considerou-se apenas os casos totalmente oceânicos, com VR menor ou igual a $-2 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ e duração mínima de 6 horas, os mesmos critérios utilizados por Rodrigues *et al.* (2019).

No primeiro momento, a detecção dos sistemas foi feita utilizando o TRACK, que é um método automatizado de identificação de sistemas transientes, utilizando a VR, em 1000 hPa a qual permite rastrear suas trajetórias (Hodges, 1994, 1995, 1999). Com o intuito de identificar apenas os sistemas em escala sinótica, o campo de vorticidade foi filtrado espectralmente, considerando apenas os números de onda total $5 \leq n \leq 42$ (ondas de escala sinótica – Gramcianinov, 2020b). Após o rastreamento, apenas os sistemas com duração mínima de 6h e que passaram na região de estudo (Figura 3.1) foram selecionados. Contudo, ao considerar os critérios supracitados, apenas 21 dos 40 sistemas identificados pelo algoritmo foram selecionados, observando, assim uma deficiência do algoritmo em rastrear alguns casos em 1000 hPa.

Dessa forma, procedeu-se com uma análise manual dos campos horários de PNMM e VR em 1000 hPa, sendo contabilizado apenas quando o sistema atuava sobre a área de estudo (Figura 3.1) e cumpria os critérios propostos por Rodrigues *et al.* (2019). Nesse estudo, os autores elaboraram uma escala de VR para sistemas sinóticos, relacionando-os com a escala Beaufort de intensidade do vento (Tabela 2.1), e que foi utilizada para classificação dos casos selecionados no presente trabalho. Dessa forma, os eventos identificados foram classificados como cavado (-2 a $-4 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$), FF (-4 a $-8 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$), ciclone ($\leq -6 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$) ou outros sistemas.

Após a identificação manual dos eventos, campos horários de espessura da camada entre 1000 e 500 hPa com PNMM e imagens de satélite também foram analisados, em cada caso, com a finalidade de classificar os sistemas em conjunto com a escala de vorticidade proposta.

3.3.2. Identificação do Nível do Jato

Após a seleção dos casos, buscou-se, para cada um dos eventos selecionados, o nível em que o núcleo do jato, mais próximo da região de interesse, apresentou maiores magnitudes. Para tal, campos de intensidade do vento em 300, 250 e 200 hPa foram elaborados. Selecionou-se, para cada estação do ano, o nível que melhor representa o núcleo do jato em situações com VR em 1000 hPa nas bacias.

Compostos sazonais de magnitude do vento foram elaborados, a fim de identificar a posição do núcleo do jato que favorece a intensificação de instabilidades na área de estudo. A composição foi feita considerando 3 horas antes do horário inicial de cada caso, apenas para o nível identificado anteriormente.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Análise dos Sistemas

No período entre dezembro de 2019 e novembro de 2020, foi identificado um total de 89 sistemas que atuaram na região de estudo e atingiram os critérios propostos por Rodrigues *et al.* (2019), descritos no item 3.2.1.

A principal diferença entre o TRACK e análise manual foi em relação à intensidade da VR. Durante o rastreamento realizado pelo algoritmo, a vortacidade foi filtrada espectralmente, considerando somente os números de onda entre 5 e 42 (ondas de escala sinótica), eliminando os sinais de escalas menores. Dessa forma, os valores identificados pelo TRACK foram inferiores aos observados nos campos, considerando a mesma ordem de grandeza (10^{-5}). Além disso, a escala proposta identificou sistemas muito intensos, com VR da ordem de 10^{-4} , o que indica que as instabilidades encontradas possuem maior influência de escalas inferiores à sinótica. Contudo, apenas a classificação sinótica dos sistemas foi realizada.

A Figura 4.1 apresenta a distribuição mensal e sazonal dos sistemas no decorrer do período analisado. Os eventos em dezembro de 2019 não atingiram os critérios propostos, portanto não foram contabilizados. Dos 89 eventos identificados que atuaram na área de interesse no ano de 2020, 54% foram classificados como FF, 26% como ciclones, 9% como cavados e 11% como outros sistemas. Em relação à distribuição mensal (Figura 4.1a), nota-se que as FFs ocorreram durante todo o ano na região, com maior recorrência em fevereiro, junho, julho e agosto de 2020 (6 casos), o que também foi observado por outros autores para períodos maiores (Bonnet *et al.*, 2018; Oliveira, 1986; Satyamurty *et al.*, 1998). Já os ciclones apresentaram maior número de casos em fevereiro, setembro e outubro de 2020, enquanto Reboita *et al.* (2010) identificaram sua máxima frequência em maio, no período entre 1990 e 1999. Marrafon *et al.* (2021) encontraram maio e outubro como meses ligeiramente mais ciclogênicos no Atlântico Sul, corroborando os estudos anteriores. Os cavados foram mais frequentes em novembro de 2020, o que também foi visto na climatologia elaborada por Escobar *et al.* (2019). Os demais sistemas, chamados de Outros Eventos (que não foram classificados como cavado, FF ou ciclone), foram observados somente em janeiro, fevereiro, março e outubro de 2020, com maior ocorrência em março de 2020 (5 casos). De uma forma geral, a distribuição dos eventos ao longo dos meses foi semelhante, com exceção de abril e maio que apresentaram o menor número de casos.

No que diz respeito à distribuição sazonal (Figura 4.1b), nota-se um maior número de casos na primavera (SON - 28 casos), seguido pelo verão (DJF) e inverno (JJA), com 23 casos em cada estação, e outono (MAM - 15 casos). De acordo com a climatologia para região (Andrade, 2005; Dereczynski; Menezes, 2015; Foss *et al.*, 2017), os sistemas atmosféricos, principalmente FFs, são mais frequentes durante a primavera. Contudo, nesse ano, o maior número de frentes ocorreu durante o inverno (18 casos). Silva *et al.* (2023) analisaram casos de FFs que ocasionaram ventos intensos na BS, no período entre 2011 e 2017, e observaram que a maior parte dos eventos que acarretaram ventos com Força 7 na escala Beaufort (acima de 28 nós) ocorreram durante o inverno.

Na primavera e no verão, nota-se uma maior ocorrência de ciclones (11 e 7 casos, respectivamente) e cavados (4 casos) nas bacias em 2020. Reboita, Da Rocha e Ambrizzi (2012) destacaram a importância do transporte de calor e umidade pelo jato de baixos níveis (JBN) a leste dos Andes para as ciclogêneses na costa sul-sudeste do Brasil e Uruguai. Nessas estações, os eventos de JBN são mais frequentes (Vera *et al.*, 2006). Vale ressaltar que a área de estudo se localiza em uma das três regiões ciclogênicas da América do Sul, identificadas por Gramscianinov *et al.* (2019) e Reboita *et al.* (2010), no Sudeste do Brasil. Nessa localidade, os autores observaram maior atividade ciclogênica durante os meses de primavera e verão, o que corrobora os resultados obtidos.

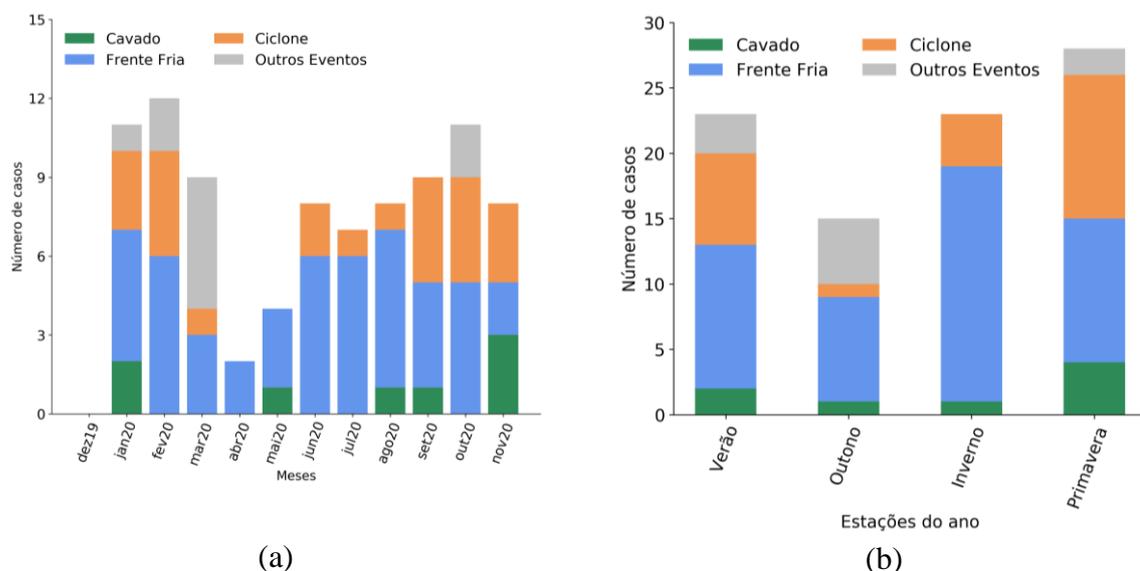


Figura 4.1 - Ocorrência mensal (a) e sazonal (b) dos sistemas que atuaram nas BC e BS, com VR menor que $2 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ e duração mínima de 6 horas, entre dezembro de 2019 e novembro de 2020. Número de Cavados estão em verde, Frentes Frias em azul, Ciclones em laranja e Outros Eventos em cinza.

4.2. Análise do Nível do Jato

Na Figura 4.2 e Tabela 4.1, observa-se o número de eventos em que a intensidade do vento no núcleo do jato foi maior, e os valores de mínima, média e máxima velocidade observados em cada nível, por estação do ano. Nota-se que o núcleo do jato em 300 hPa foi intenso em apenas 3 casos, sendo 2 na primavera (1 em setembro e 1 em outubro). Nesse nível, a maior velocidade identificada foi de 90 m/s (175 nós - Tabela 4.1) às 22Z do dia 03/10/2020. Nessa ocasião, o jato estava em, aproximadamente, 35°S, na retaguarda de uma FF que atuava sobre o oceano. Por ser uma estação de transição, a primavera ainda apresenta características do inverno, com incursão de sistemas frontais de acentuada magnitude (Foss *et al.*, 2017). Além disso, a máxima ocorrência de eventos, em 2020, ocorreu nessa época do ano (Figura 4.1b), o que contribuiu para a identificação de maiores intensidades do núcleo no menor nível analisado. Nos demais casos em 300 hPa, as máximas magnitudes observadas foram de 45 m/s (90 nós - inverno) e 60 m/s (120 nós - primavera) (Tabela 4.1).

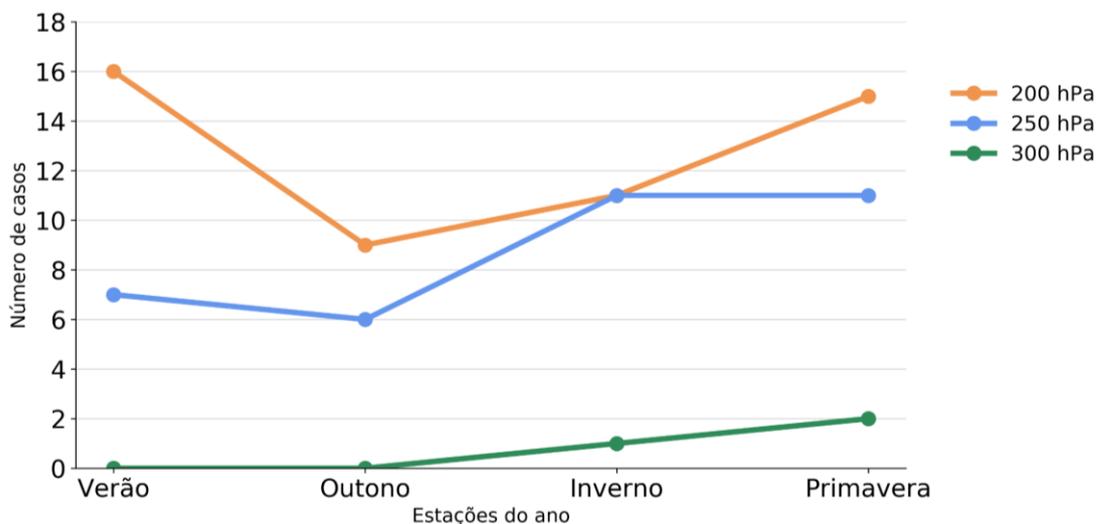


Figura 4.2 - Número de casos, em cada nível, com maior magnitude no núcleo do jato, para cada estação do ano.

Tabela 4.1 - Velocidade mínima (Mín), média (Méd) e máxima (Máx) observada, em m/s, no núcleo do jato, de acordo com os casos identificados em cada nível e considerando todos os 89 casos identificados (Total), para cada estação do ano.

Estação do ano	Verão (DJF)			Outono (MAM)			Inverno (JJA)			Primavera (SON)		
	Velocidade (m/s)											
Nível	Mín	Méd	Máx	Mín	Méd	Máx	Mín	Méd	Máx	Mín	Méd	Máx
300 hPa		-			-			45		60	75	90
250 hPa	40	65	90	40	58	85	40	75	95	45	65	85
200 hPa	40	58	80	45	57	75	45	70	95	50	64	75
Total	40	60	90	40	57	85	40	72	95	45	65	90

Nota-se certa similaridade entre 250 e 200 hPa, com diferença de 3-4 casos entre os níveis em todas as estações, exceto no verão, e a mesma quantidade em ambos no inverno (Figura 4.2). Durante o inverno, os gradientes de temperatura são mais acentuados, e as massas de ar frio avançam até latitudes menores (Peixoto; Oort, 1992; Garreaud, 2009), o que contribui para uma troposfera menos espessa e para as maiores velocidades serem observadas em níveis mais baixos. Ademais, em 2020, observou-se uma maior frequência de FFs nessa época do ano (Figura 4.1b), contribuindo para a intensificação do gradiente de temperatura em superfície e da magnitude do vento. As maiores velocidades máximas foram observadas em 250 hPa em todas as estações do ano, alcançando 95 m/s (185 nós) no núcleo do jato durante o inverno (Tabela 4.1).

O nível de 200 hPa apresentou o maior número de casos com núcleo mais intenso em quase todas as estações do ano, sendo o verão e a primavera com maior ocorrência (Figura 4.2). Visto que a área de estudo deste trabalho encontra-se em uma região tropical e subtropical, a baixa atmosfera é mais espessa (Peixoto; Oort, 1992). Sendo assim, o núcleo do jato é observado com maior frequência em níveis mais elevados. Como citado anteriormente, a maior diferença entre o número de eventos em 250 e 200 hPa ocorreu no verão (Figura 4.2). Nessa estação, o gradiente meridional de temperatura está deslocado para sul (Hall *et al.* 2015; Panetta 1993), as massas de ar frio dificilmente alcançam latitudes menores, e a troposfera está mais espessa, contribuindo para que as maiores magnitudes do vento sejam observadas no nível analisado mais elevado.

Analisando somente os níveis de 250 e 200 hPa, observa-se, na Tabela 4.1, que os maiores valores de velocidade média e máxima foram encontrados durante o inverno, enquanto os maiores mínimos ocorreram na primavera. Zimmermann (2017) observou, nas longitudes de 050W e 040W, velocidades acima de 60 m/s no núcleo da CJS em mais de 45% dos dias nos meses de inverno (JJA). No verão, o autor identificou, em mais de 50% dos dias, velocidades entre 30-39 m/s. Nessa estação, ocorreram os menores valores mínimos, em ambos os níveis em 2020 (Tabela 4.1). Pena-Ortiz *et al.* (2013) também identificaram menores magnitudes média do núcleo do jato no verão no período entre 1958 e 2008. Contudo, a menor média foi observada no outono, em 200 hPa (Tabela 4.1). Entretanto, nota-se os mesmos valores de velocidade média no verão em 200 hPa e no outono em 250 hPa. As estações de transição (outono e primavera) apresentaram os mesmos valores de velocidade máxima em ambos os níveis, inferiores às outras estações. Além disso, a velocidade média foi similar. De uma forma geral, nota-se uma variabilidade sazonal da magnitude do vento, o que também foi observado em outros estudos (Hall *et al.*, 2015; Krishnamurti, 1961; Pena-Ortiz *et al.*, 2013; Riehl *et al.*, 1954; Zimmermann, 2017), com os maiores valores no inverno, diminuindo conforme avança para o verão. Contudo, em 2020, as menores magnitudes foram observadas no outono.

As maiores velocidades médias foram observadas em 250 hPa, o que indica que os jatos foram mais intensos nesse nível. Apesar disso, na maioria dos casos, a maior magnitude do núcleo do jato ocorreu em 200 hPa (Figura 4.2). Dessa forma, tal nível foi o que melhor representou o jato em situações de VR em superfície na região de interesse em 2020. Assim, a análise a seguir será realizada utilizando apenas 200 hPa.

4.3. Análise da Posição do Jato

Na Figura 4.3, observam-se os compostos sazonais de magnitude do vento em 200 hPa, considerando 3 horas antes do horário inicial da VR em 1000 hPa para cada caso identificado e analisado no ano de 2020. Tais compostos foram elaborados a fim de identificar a posição do jato que contribuiu para a formação ou intensificação de instabilidades nas bacias.

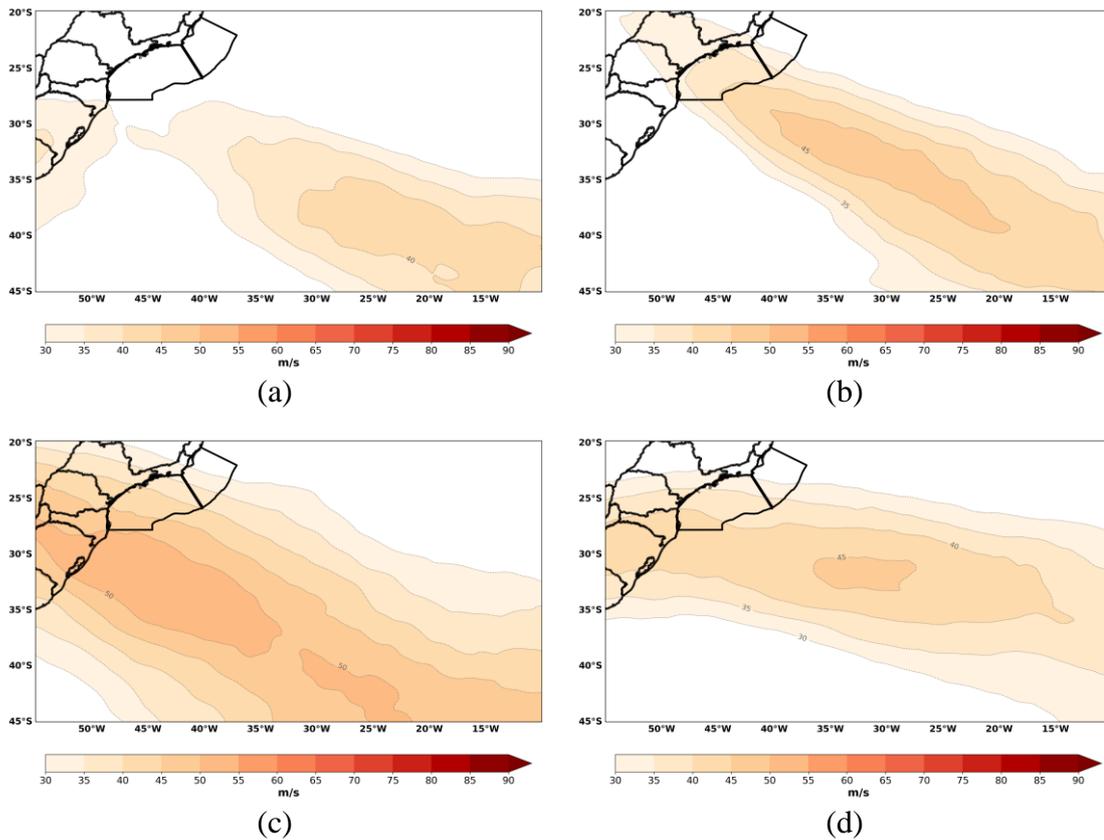


Figura 4.3 - Composto de magnitude do vento para o nível de 200 hPa, considerando 3 horas antes do horário inicial da vorticidade relativa em 1000 hPa em cada caso, para: (a) verão, (b) outono, (c) inverno e (d) primavera.

Nota-se, na Figura 4.3, uma variação sazonal da posição do núcleo do jato durante o ano, sendo mais afastado do continente no verão, em função do menor gradiente térmico horizontal, e aproximando-se durante o ano, posicionando-se sobre o Sul do Brasil no inverno. Observa-se pouca influência do jato na região de estudo durante o verão, não atuando sobre as bacias (Figura 4.3a). Além disso, destaca-se a presença de um núcleo menos intenso sobre o Rio Grande do Sul. O mesmo foi observado por Pena-Ortiz *et al.* (2013), que identificaram uma maior frequência de ocorrência do núcleo do jato sobre o Sul do Brasil durante o verão. Ademais, o jato encontrava-se em sua posição mais ao sul, em 40°S 020°W (Figura 4.3a). Geralmente, as correntes de jato posicionam-se mais próximas ao polo nessa época do ano, devido ao gradiente de temperatura mais deslocado para essa direção (Hall *et al.* 2015; Krishnamurti, 1961; Palmén; Newton, 1969; Panetta 1993). No outono (Figura 4.3b), o núcleo do jato encontrava-se em, aproximadamente, 35°S 030°W, e a BC estava localizada próxima à EE do núcleo do jato. Devido à componente ageostrófica do vento, observa-se, nessa região, divergência em altos níveis, o que favorece a convergência em baixos níveis e o movimento

vertical ascendente, contribuindo para o desenvolvimento e intensificação das instabilidades em superfície (Holton, 2004).

No inverno (Figura 4.3c), o núcleo do jato estava em sua posição mais a norte e oeste, em torno de 30°S 046°W, atuando sobre o continente e toda BS e BC. Entretanto, durante seu deslocamento pode favorecer a intensificação de instabilidade em superfície na região. Além disso, o padrão de chuva nas regiões costeiras, incluindo as BS e BC, pode ser modificado pelo avanço do anticiclone pós frontal sobre o continente, advectado pelos ventos de quadrante sul na superfície (Foss *et al.*, 2017). Já na primavera (Figura 4.3d), a BC, assim como no outono (Figura 4.3b), estava posicionada próxima a EE do jato. No entanto, o jato encontrava-se de forma mais zonal, com núcleo em 32°S 031°W (Figura 4.3d). Desta forma, as estações de transição em 2020, devido ao posicionamento do jato em altos níveis, dispuseram de condições mais favoráveis à instabilidade em superfície. Vale ressaltar que tais estações apresentam situações mais suscetíveis a instabilidades devido à combinação da termodinâmica com o cisalhamento do vento (Romero *et al.*, 2007). Segundo Nascimento (2005), os processos físicos que originam tempo severo na região tropical e subtropical do Brasil ocorrem primeiro na mesoescala, delimitados por um ambiente sinótico, onde várias características presentes em ambas as escalas são suporte para o desenvolvimento de instabilidades em superfície.

4.4. Estudo de Casos

4.4.1. Caso Outono: 11z 21/03/2020 - 04z 22/03/2020

Para a análise sinótica dos casos selecionados, considerou-se o período de vida do sistema, tendo como data inicial o horário em que a VR atingiu $-2.10^{-4} s^{-1}$ na área de estudo, o horário em que a VR atingiu o menor valor próximo a região de interesse, e o horário final, quando a VR apresentava valores acima de $-2.10^{-4} s^{-1}$. Às 11Z do dia 21 de março de 2020 (Figura 4.4a), observa-se uma banda de nuvens convectivas profundas atuando sobre o oceano, próximo ao litoral do ES e sobre o norte da BC, sugerindo a atuação de uma FF na região. Nos horários seguintes, nota-se a intensificação do núcleo convectivo, em 20°S 035°W, dentro da banda de nebulosidade, apresentando duas regiões com temperatura menor que $-70^{\circ}C$ (Figura 4.4b). Às 21Z do mesmo dia, a banda de nebulosidade encontrava-se próxima ao sul da Bahia, onde observa-se nuvens convectivas profundas. Próximo a 20°S 035°W formou-se um novo sistema de baixa pressão (Figura 4.4b). A partir de então, os núcleos convectivos presentes nessa região começaram a se dissipar sobre o oceano, e a intensificar sobre o sul da Bahia.

Sobre o oceano, ainda havia nuvens convectivas profundas, porém com topos menos frios do que nos horários anteriores (Figura 4.4c).

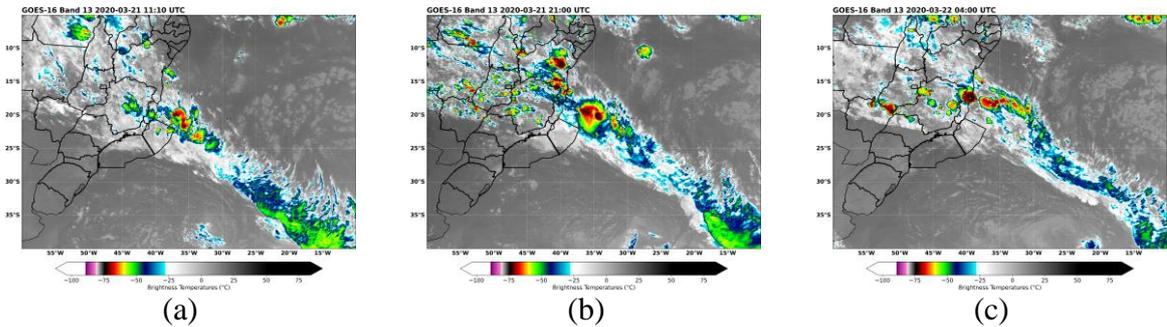


Figura 4.4 - Imagem do satélite GOES-16 no canal 13 às: a) 11Z do dia 21/03/2020; b) 21Z do dia 21/03/2020 e c) 04Z do dia 22/03/2020.

A Figura 4.5 apresenta os campos de PNMM, espessura da camada entre 1000 e 500 hPa, VR em 1000 hPa, umidade específica e linha de corrente em 850 hPa para os mesmos horários em que foram analisadas as imagens de satélite. A VR em superfície, assim como o gradiente de espessura, a confluência das linhas de corrente e a umidade (Figura 4.5a, d) indicam a atuação da FF observada na imagem de satélite (Figura 4.4a). Nota-se, também, um mínimo de VR, em 23°S 040°W, associado a um centro de baixa pressão de 1010 hPa, sobre o norte da BC e litoral do Espírito Santo (Figura 4.5a). Em 850 hPa (Figura 4.5d), observa-se valores de umidade específica acima de 14 g/kg, próximos a posição da VR em 1000 hPa, contribuindo para o abaixamento da pressão na região. Além disso, as linhas de corrente indicam um cavado ao sul da baixa pressão em superfície, fornecendo suporte termodinâmico para a sua intensificação. Conforme o sistema se desloca para nordeste, há a diminuição da VR, alcançando valores de $-5.10^{-4} \text{ s}^{-1}$ às 21Z do dia 21 de março, associada a um centro de baixa pressão de 1008 hPa, posicionado em 23°S 034°W (Figura 4.5b), corroborando o que foi observado na imagem de satélite (Figura 4.4b). Nesse horário, havia a presença de um cavado, em 850 hPa, em fase com o sistema de baixa pressão em superfície (Figura 4.5e). Nos horários seguintes, a baixa pressão enfraquece, assim como a VR, que, a partir de 04Z do dia 22 de março, apresentou valores maiores que $-2.10^{-4} \text{ s}^{-1}$ (Figura 4.5c). Contudo, em 850 hPa, ainda era possível observar uma circulação ciclônica em, aproximadamente 19°S 034°W, com alto teor de umidade (Figura 4.5f), fornecendo suporte para a nebulosidade observada na Figura 4.4c.

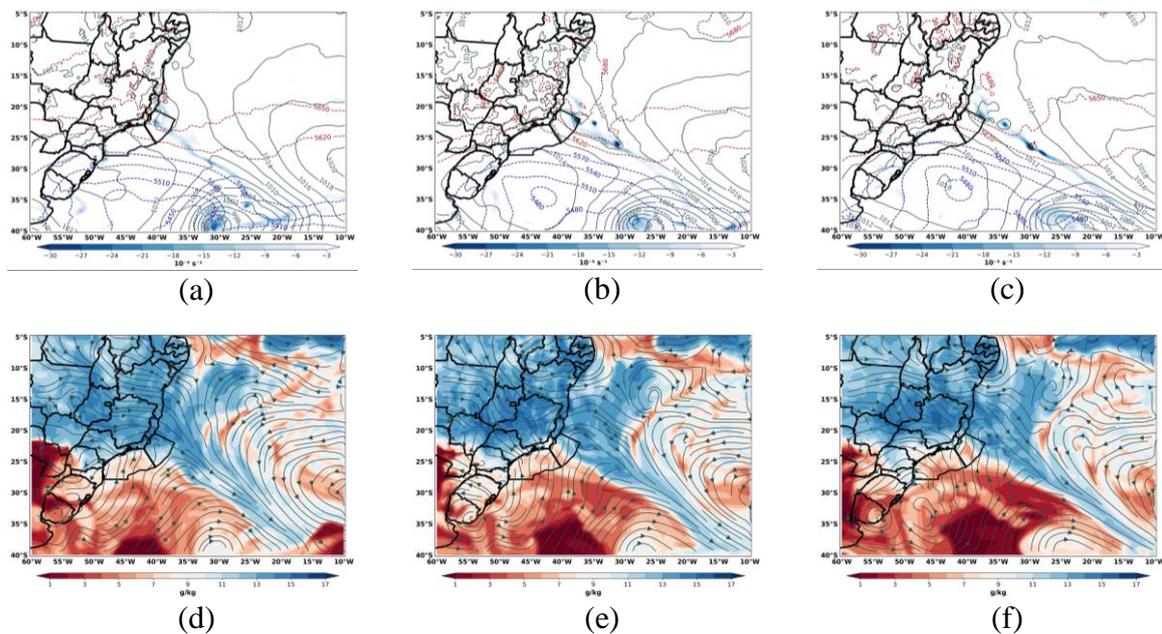


Figura 4.5 - Campos de Pressão ao Nível Médio do Mar (hPa - Linha cinza contínua), Espessura da camada entre 1000 e 500 hPa (mgp - linha azul e vermelha tracejada) e Vorticidade Relativa em 1000 hPa (10^{-5} s^{-1} - tons de azul) - linha superior - e Umidade Específica (g/kg - sombreado) e Linha de Corrente em 850 hPa - linha inferior - às: a) e d) 11Z do dia 21/03/2020; b) e e) 21Z do dia 21/03/2020; c) e f) 04Z do dia 22/03/2020.

Com o intuito de analisar a contribuição da componente de altos níveis no desenvolvimento e intensificação da convecção, é possível observar, na Figura 4.6, a magnitude do vento, a componente meridional do vento ageostrófico e a divergência em 300, 250 e 200 hPa, para 3 horas antes do horário inicial do evento - às 08z do dia 21 de março de 2020. Nessa ocasião, observa-se as menores magnitudes e a menor área de atuação do jato em 300 hPa (Figura 4.6a). Já em 250 e 200 hPa, nota-se os mesmos valores de velocidade no núcleo do jato (acima de 55 m/s - 107 nós), posicionado em, aproximadamente, 29°S (Figura 4.6b,c). Em ambos os níveis, a região de interesse encontrava-se próxima a Saída Equatorial do jato, caracterizada pela componente meridional do vento ageostrófico direcionada para o equador, que não contribui para o desenvolvimento de instabilidade em superfície. Em todos os níveis, nota-se uma circulação anticiclônica sobre o continente, com centro em Goiás em 250 e 200 hPa, e sobre o oceano em 300 hPa (Figura 4.6d, e, f). Além disso, havia divergência sobre a região de estudo, sendo os menores valores observados em 300 e os maiores em 200 hPa (Figura 4.6d, e, f). Em 200 hPa (Figura 4.6f), nota-se, sobre o nordeste da BC, a difluência das linhas de corrente e uma região de forte divergência, favorecendo o transporte de umidade, observada em 850 hPa, para camadas superiores, contribuindo para a intensificação da vorticidade em superfície.

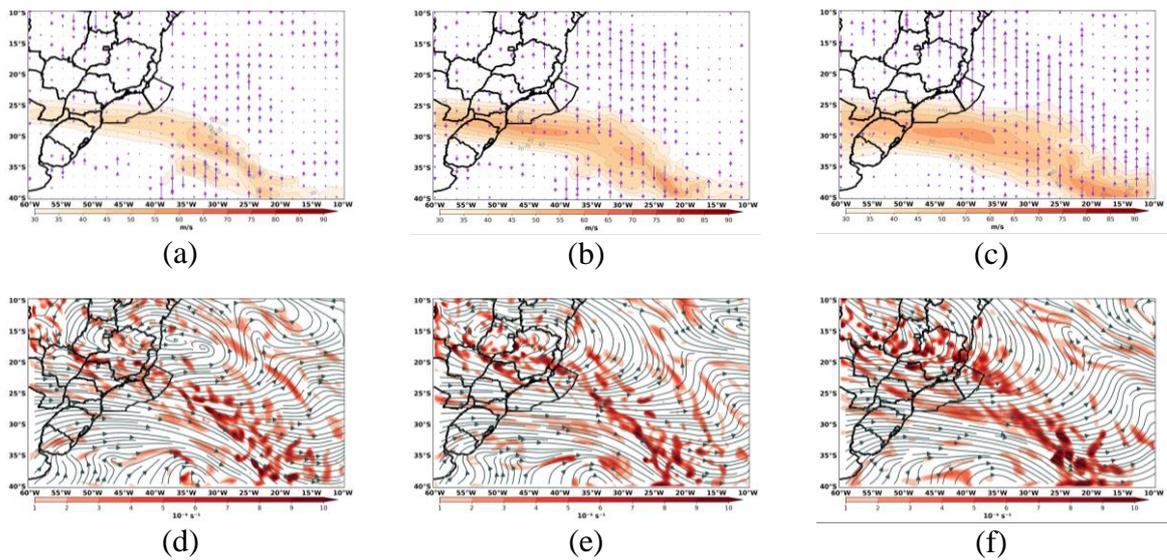


Figura 4.6 - Campos de magnitude do vento (m/s - cores e linha) e componente meridional do vento ageostrófico (vetor) - linha superior - e divergência (10^{-5} s^{-1}) e linha de corrente - linha inferior - às 08Z do dia 21 de março de 2020, em: a) e d) 300 hPa; b) e e) 250 hPa; c) e f) 200 hPa.

Nos horários a seguir, o jato se deslocou para leste, favorecendo a intensificação da instabilidade na superfície, além de influenciar no deslocamento do sistema. As menores magnitudes ainda foram observadas em 300 hPa (Figura 4.7 - coluna da esquerda). O núcleo se intensificou, alcançando as maiores intensidades (55m/s ou 107 nós) às 21Z do dia 21 (Figura 4.7d), posicionando-se em $31^{\circ}\text{S } 028^{\circ}\text{W}$, com pouca influência na região de interesse. Às 01Z do dia 22, um novo núcleo, com velocidade de 50 m/s (97 nós), se formou em $28^{\circ}\text{S } 041^{\circ}\text{W}$, e se manteve até o horário final considerado (Figura 4.7g). Em 250 hPa (Figura 4.7b), o núcleo do jato apresentou magnitude de 50 m/s (ou 97 nós) em $29^{\circ}\text{S } 040^{\circ}\text{W}$, e permaneceu com tal velocidade próximo a essa região. Às 17Z do dia 21, um novo núcleo se intensificou próximo a 055°W , alcançando 60 m/s (ou 117 nós) às 21Z (Figura 4.7e). Nos horários seguintes, o jato começou a influenciar a região de interesse, posicionada na EE do jato nos horários finais (Figura 4.7h). O nível de 200 hPa apresentou as maiores velocidades no núcleo do jato (60 m/s ou 117 nós - Figura 4.7c). Às 21Z, a BC passou a ser influenciada pela EE do jato (Figura 4.7f), e permaneceu assim até o final (Figura 4.7i). A partir de 22Z do dia 21, o núcleo do jato em 200 hPa passou a ter magnitude acima de 65 m/s (126 nós).

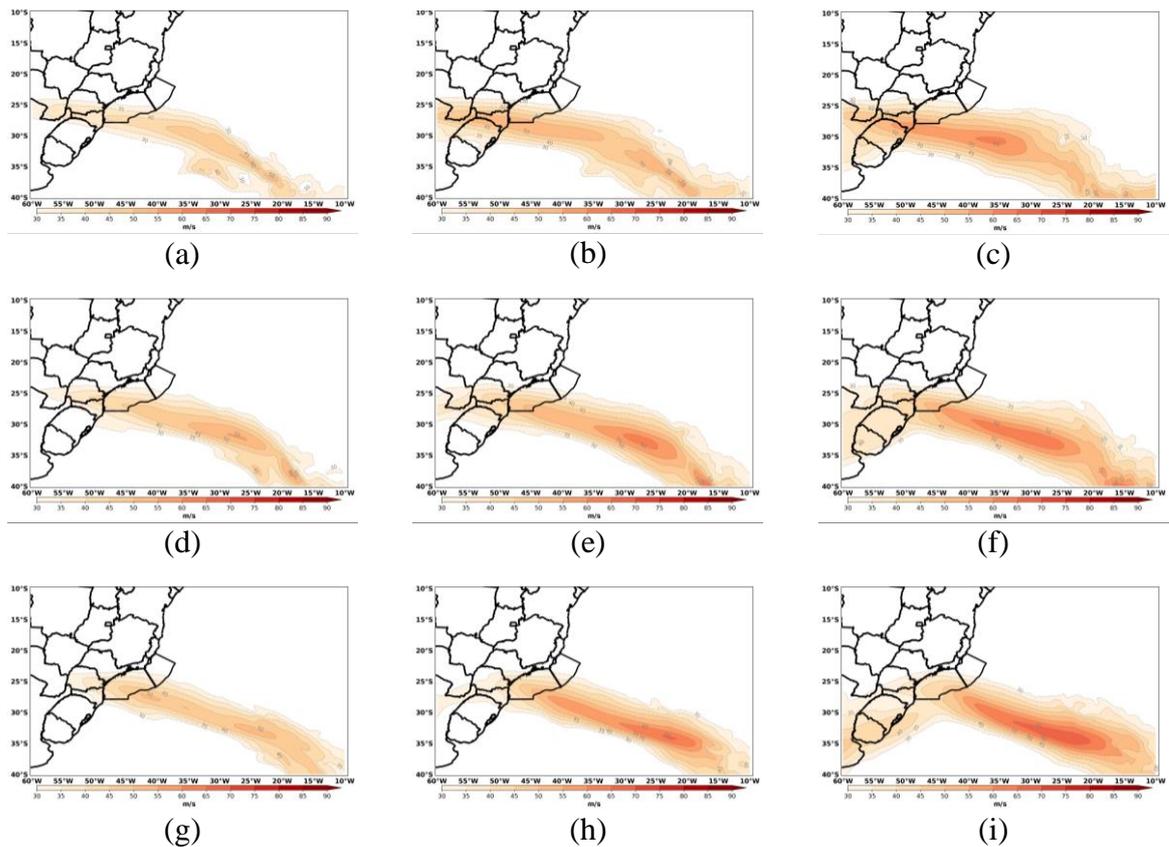


Figura 4.7 - Magnitude do vento (m/s) em 300 (coluna da esquerda), 250 (coluna do meio) e 200 hPa (coluna da direita) às: a), b), c) 11Z do dia 21/03/2020; d), e), f) 21Z do dia 21/03/2020; g), h), i) 04Z do dia 22/03/2020.

Uma vez que a maior velocidade observada, próxima a área de estudo, ocorreu por volta de 22Z do dia 21 de março de 2020, considerou-se esse horário para a análise a seguir (Figura 4.8). No campo de magnitude do vento (Figura 4.8, linha superior), nota-se as maiores velocidades em 200 hPa. Além disso, a BC e parte da BS estavam localizadas na EE do jato, caracterizada pela componente meridional do vento ageostrófico direcionada para o polo (Figura 4.8c). Em tal região, observa-se divergência, que pode ser encontrada na área de estudo em todos os níveis (Figura 4.8 - linha inferior), o que contribuiu para o movimento vertical ascendente, convergência em baixos níveis e desenvolvimento de instabilidades. Contudo, os maiores valores de divergência foram observados a leste do cavado de onda curta em 200 hPa, posicionado em 21°S 038°W, onde as linhas de corrente difluem (Figura 4.8f), sendo essa uma região favorável ao movimento vertical ascendente. Nessa área, nota-se uma circulação ciclônica e alto teor de umidade em baixos níveis, contribuindo para a manutenção da convecção observada na imagem de satélite (Figura 4.4b). Dessa forma, 200 hPa é o que melhor representa o JAN para esse caso, uma vez que as maiores magnitudes foram observadas nesse

nível. Além disso, apesar da posição do jato não ter tido grande influência na intensificação da VR em superfície, as linhas de corrente e a divergência foram melhor representadas.

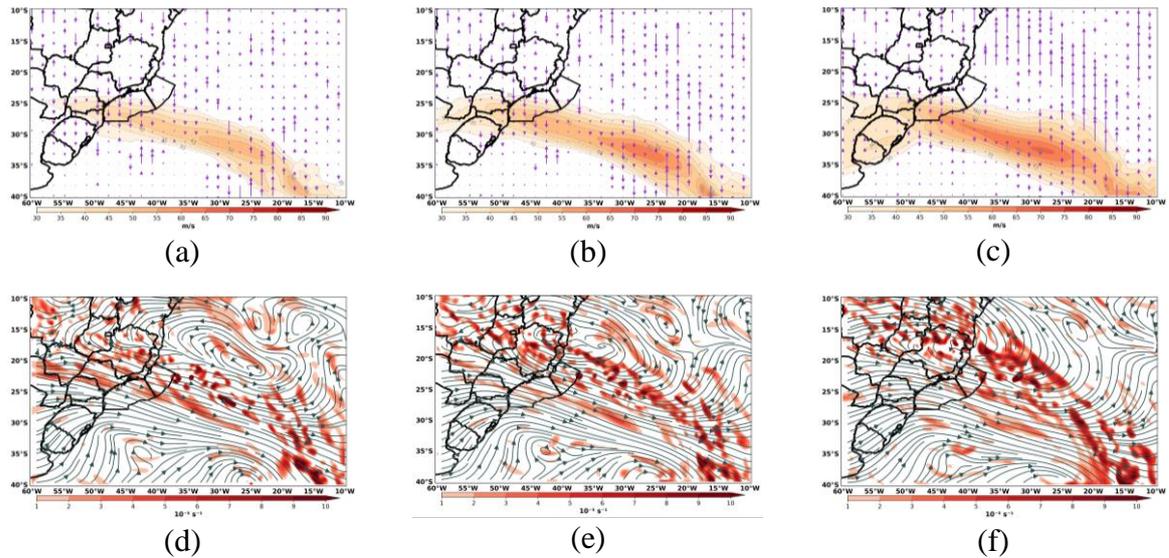


Figura 4.8 - Campos de magnitude do vento (m/s - cores e linha) e componente meridional do vento ageostrófico (vetor) - linha superior - e divergência (10^{-5} s^{-1}) e linha de corrente - linha inferior - às 22Z do dia 21 de março de 2020, em: a) e d) 300 hPa; b) e e) 250 hPa; c) e f) 200 hPa.

4.4.2. Caso Primavera: 22z 20/09/2020 - 23z 21/09/2020

Assim como o primeiro caso analisado, considerou-se o período de vida do sistema tendo como data inicial do evento o horário em que a VR atingiu $-2 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ na área de estudo, às 22Z do dia 20 de setembro de 2020 (Figura 4.9a). Nesse horário, observa-se uma banda de nuvens convectivas sobre a região de estudo, sugerindo a atuação de uma FF. Sobre o sul da BS, entre o litoral de São Paulo e Santa Catarina, nota-se a presença de nuvens rasas - tons de cinza na imagem de satélite - (Figura 4.9a). Nos horários seguintes (Figura 4.9b), a banda de nebulosidade encontrava-se próxima ao norte do estado do Rio de Janeiro. Contudo, nota-se a presença de nuvens convectivas em sua retaguarda, em $25^{\circ}\text{S } 042^{\circ}\text{W}$. A partir de então, os núcleos sobre o oceano enfraquecem, se deslocando para leste com temperaturas menos frias do que no horário inicial. No entanto, novos núcleos se desenvolvem sobre o continente, observados sobre o Rio de Janeiro e Paraná (Figura 4.9c).

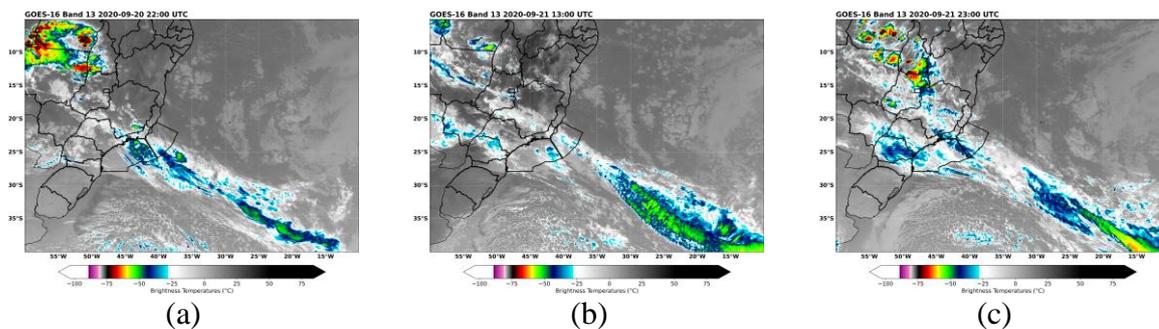


Figura 4.9 - Imagem do satélite GOES-16 no canal 13 às: a) 22Z do dia 20/09/2020; b) 13Z do dia 21/09/2020; c) 23Z do dia 21/09/2020.

A Figura 4.10 apresenta os campos de PNMM, espessura da camada entre 1000 e 500 hPa, VR em 1000 hPa e umidade específica e linha de corrente em 850 hPa para os mesmos horários em que foram analisadas as imagens de satélite. A VR em superfície, assim como o gradiente de espessura e umidade (Figura 4.10a, d) indicam a atuação e posição da FF, observada na imagem de satélite (Figura 4.9a). Além disso, observa-se uma região de VR no litoral norte de São Paulo, associado a um cavado invertido que atuava na região, posicionado em, aproximadamente, $24^{\circ}\text{S } 045^{\circ}\text{W}$, (Figura 4.10a). Em 850 hPa (Figura 4.10d), nota-se valores acima de 10 g/kg de umidade específica na mesma posição da VR em 1000 hPa, com as linhas de corrente difluindo da região. Conforme a FF se deslocava para leste, havia o aprofundamento do cavado em um centro de baixa pressão de 1018 hPa, em $23^{\circ}\text{S } 044^{\circ}\text{W}$ (Figura 4.10b). Às 13Z do dia 21, a VR associada ao sistema de baixa pressão alcançou valores de $-5 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ (Figura 4.10b). Além disso, nota-se a confluência das linhas de corrente em 850 hPa para a região da baixa pressão, contribuindo para a manutenção da umidade e da convecção observada (Figura 4.10e). Nos horários seguintes, a VR permaneceu significativa próxima à costa, passando a aumentar às 20Z do dia 21. A partir de 23Z do dia 21, a VR alcançou valores acima de $-2 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ e a baixa pressão não estava mais configurada (Figura 4.10c). Contudo, em 850 hPa (Figura 4.10f), ainda havia confluência das linhas de corrente para o estado do Rio de Janeiro, fornecendo suporte para a nebulosidade observada na Figura 4.8c.

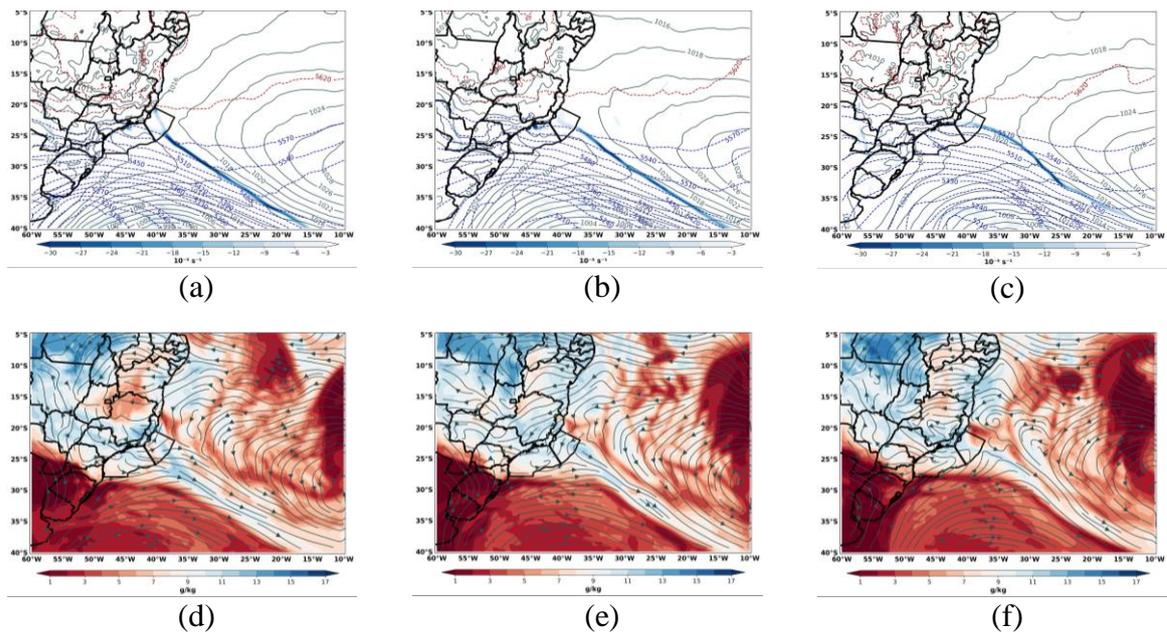


Figura 4.10 - Campos de Pressão ao Nível Médio do Mar (hPa - Linha cinza contínua), Espessura da camada entre 1000 e 500 hPa (mgp - linha azul e vermelha tracejada) e Vorticidade Relativa em 1000 hPa (10^{-5} s^{-1} - tons de azul) - linha superior - e Umidade Específica (g/kg - sombreado) e Linha de Corrente em 850 hPa - linha inferior - às: a) e d) 22Z do dia 20/09/2020; b) e e) 13Z do dia 21/09/2020; c) e f) 23Z do dia 21/09/2020.

A fim de analisar a contribuição da componente de altos níveis no desenvolvimento e intensificação da convecção, é possível observar, na Figura 4.11, a magnitude do vento, a componente meridional do vento ageostrófico e a divergência em 300, 250 e 200 hPa, para 3 horas antes do horário inicial do evento - às 19z do dia 20 de setembro de 2020. Nessa ocasião, o jato apresentava diferentes características em todos os níveis, sendo mais intenso em 250 hPa, com valores de até 80 m/s (155 nós) em seu núcleo, posicionado em 35°S 033°W, e menos intenso em 200 hPa (Figura 4.11a, b, c). Além disso, nota-se, em 200 hPa, a presença de dois núcleos menos intensos, em relação aos outros níveis, enquanto em 300 e 250 hPa havia a presença de um único núcleo sobre o oceano. Ademais, o jato atuou sobre uma área maior, principalmente sobre o continente, onde é possível observar mais um núcleo em, aproximadamente 25°S 060°W, alcançando latitudes menores do que 20°S, em 250 e 200 hPa (Figura 4.11b, c). Contudo, sobre o continente, nota-se maiores magnitudes em 200 hPa, especialmente em parte do Sudeste e Sul do Brasil, Paraguai e nordeste da Argentina (Figura 4.11c). Em todos os níveis, observa-se divergência a leste do cavado, que atuou sobre o Centro-Sul do Brasil (Figura 4.11d, e, f). Entretanto, os maiores valores encontravam-se em 300 hPa, próximo ao litoral norte do estado de São Paulo, onde a instabilidade se desenvolveu (Figura 4.11d). Divergência em altos níveis favorece a convergência em baixos níveis e o movimento

vertical ascendente. Tais características podem ser observadas na EE do jato, região que se encontrava a BS em 300 hPa, caracterizada pela componente ageostrófica do vento direcionada para o polo (Figura 4.11a). Dessa forma, a divergência nesse nível contribuiu para o transporte da umidade, observada em 850 hPa, para camadas superiores, favorecendo a formação de nuvens convectivas.

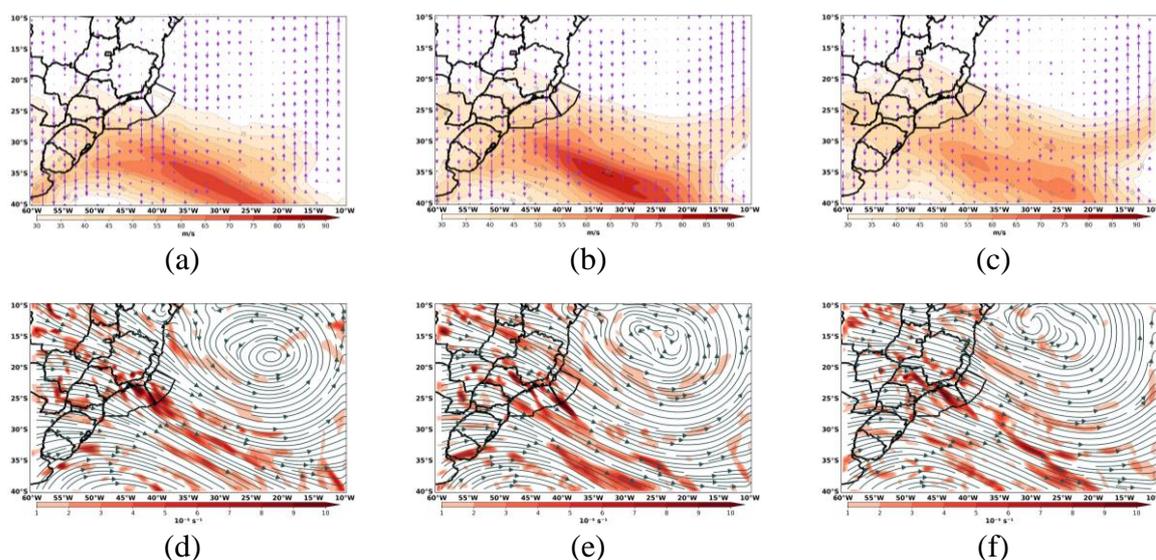


Figura 4.11 - Campos de magnitude do vento (m/s - cores e linha) e componente meridional do vento ageostrófico (vetor) - linha superior - e divergência (10^{-5} s^{-1}) e linha de corrente - linha inferior - às 19Z do dia 20 de setembro de 2020, em: a) e d) 300 hPa; b) e e) 250 hPa; c) e f) 200 hPa.

Nos horários posteriores, durante o desenvolvimento do sistema, o jato se deslocou para nordeste, influenciando no deslocamento da FF em superfície (Figura 4.12). Em 300 hPa (Figura 4.12 - coluna da esquerda), apesar do afastamento do núcleo do jato, com velocidade de 75 m/s (146 nós), a área de estudo continuava sendo influenciada pelo sistema nesse nível, mantendo-se em sua EE (Figura 4.12a). A partir de 13Z do dia 21 de setembro (Figura 4.12d), um novo núcleo se intensificou sobre sudoeste da BS, alcançando 60 m/s (117 nós) às 18Z. Novos núcleos se formaram ao sul da BS nesse nível, mantendo-a na EE do jato, região favorável ao desenvolvimento de instabilidades (Figura 4.12g). Em 250 hPa (Figura 4.12b), a velocidade do núcleo foi de 75 m/s (145 nós), posicionado em 37°S 033°W, e persistiu até às 02Z do dia 21, quando começou a intensificar. Às 13Z do mesmo dia, nota-se a atuação de um novo núcleo, em 30°S 043°W, alcançando 60 m/s (117 nós) às 17Z, mantendo as bacias na EE do jato. Conforme o jato se distanciou das bacias, a EE deixou de atuar na região de interesse, fornecendo pouco suporte nesse nível (Figura 4.12h). Em 200 hPa observa-se as menores velocidades durante todo o evento (Figura 4.12 - coluna da direita). No horário inicial (Figura

4.12c), a área de estudo estava sob atuação do jato, visto que toda região se encontrava com velocidade acima de 30 m/s (58 nós) nesse nível, com pouca influência da EE do núcleo do jato. O núcleo que estava sobre o continente passava pela BS e, às 13Z do dia 21, encontrava-se em 30°S 040°W, posicionando-se de forma a não contribuir para o desenvolvimento de instabilidades na região (Figura 4.12f), alcançando 60 m/s (117 nós) às 15Z. À medida que se deslocava para leste, o jato deixou de influenciar a região (Figura 4.12i).

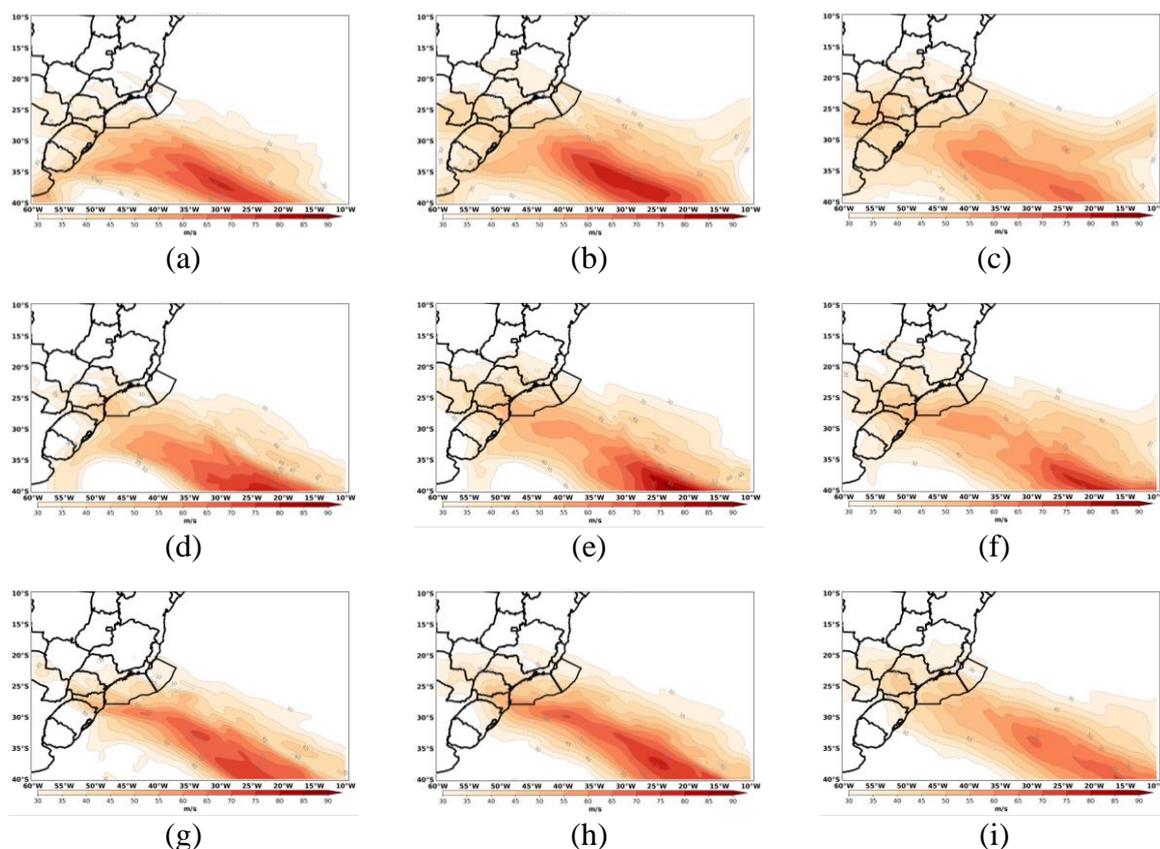


Figura 4.12 - Magnitude do vento (m/s) em 300 (coluna da esquerda), 250 (coluna do meio) e 200 hPa (coluna da direita) às: a), b), c) 22Z do dia 20 de setembro de 2020; d), e), f) 13Z do dia 21/09/2020; g), h), i) 23Z do dia 21/09/2020.

Uma vez que a maior velocidade observada, próxima a área de estudo, ocorreu por volta de 18Z do dia 21 de setembro de 2020 em todos os níveis, considerou-se esse horário para a análise a seguir (Figura 4.13). No campo de magnitude do vento, ambos os níveis apresentaram valores de 60 m/s (117 nós) no núcleo do jato (Figura 4.13 - linha superior). Entretanto, o nível de 300 hPa foi o que se localizou mais próximo à área de estudo, em 29°S 042°W, mantendo-a sobre a influência de sua EE, caracterizada pela componente meridional do vento ageostrófico direcionada para o polo (Figura 4.13a). Em 250 hPa, encontrava-se levemente mais afastado,

em 30°S 041°W, com pouca contribuição da EE do jato na região (Figura 4.13b). Em 200 hPa, o núcleo encontrava-se mais afastado, em 30°S 037°W (Figura 4.13c). No que diz respeito a divergência (Figura 4.13 - linha inferior), nota-se valores menos intensos nas bacias, em relação ao primeiro horário analisado (Figura 4.11 - linha inferior). Já entre os níveis, observa-se que, em 200 hPa, havia uma maior região de influência da divergência na BS (Figura 4.13f). Sendo assim, apesar dos níveis de 300 e 250 hPa apresentarem características semelhantes e a mesma velocidade no núcleo, em algumas situações, o nível que melhor representou o jato nesse evento foi 300 hPa, uma vez que a maior magnitude do núcleo próxima a área de estudo foi observada nesse nível. Além disso, durante o período analisado, observou-se que a posição do jato em 300 hPa contribuiu para a intensificação da VR em superfície.

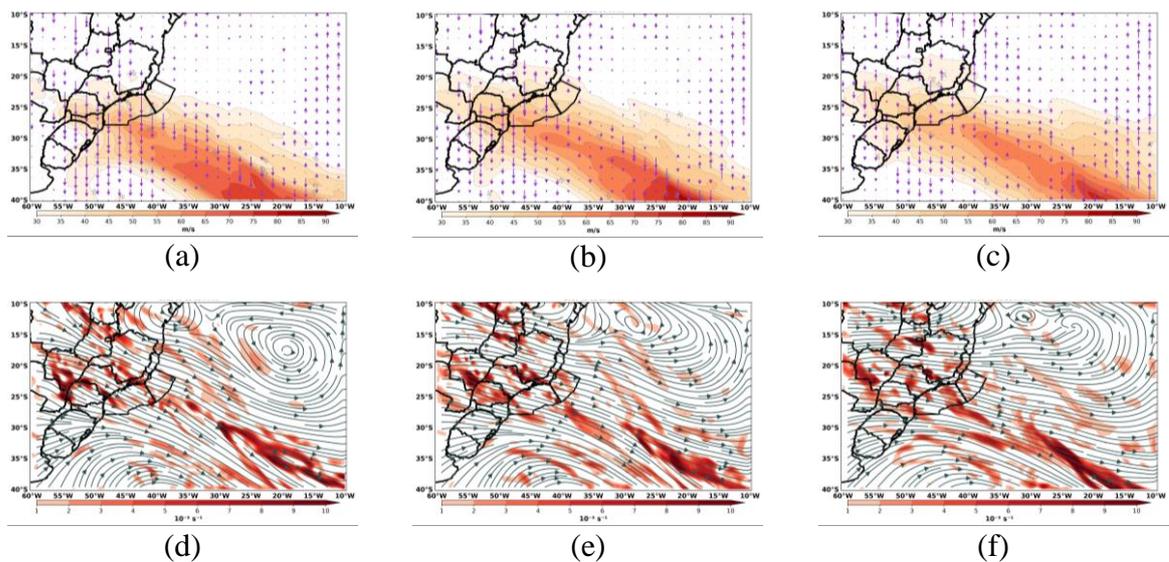


Figura 4.13 - Campos de magnitude do vento (m/s - cores e linha) e componente meridional do vento ageostrófico (vetor) - linha superior - e divergência (10^{-5} s^{-1}) e linha de corrente - linha inferior - às 18Z do dia 21 de setembro de 2020, em: a) e d) 300 hPa; b) e e) 250 hPa; c) e f) 200 hPa.

5. CONCLUSÃO

Esse trabalho teve por objetivo identificar o nível que melhor representa o JAN, com o intuito de responder a seguinte questão: “Qual o nível em altitude que melhor caracteriza a influência da componente de altos níveis para as instabilidades em superfície na região das BC e BS?”. O expressivo transporte marítimo e aéreo nestas regiões motivou tal pesquisa. Para isso, analisou-se campos de magnitude do vento em 300, 250 e 200 hPa, em situações com VR em 1000 hPa nas BC e BS entre dezembro de 2019 e novembro de 2020. No período analisado, 89 eventos foram identificados, seguindo os critérios propostos por Rodrigues *et al.* (2019). Destes, 54% foram classificados como FFs, 26% como ciclones, 9% como cavados e 11% como Outros Eventos. Quanto à distribuição sazonal desses sistemas, a maior ocorrência de FFs foi observada no inverno (18 casos), de ciclones na primavera (11 casos), de outros eventos no outono (5 casos) e de cavados na primavera e verão (4 casos em cada).

A análise do campo de magnitude do vento durante os eventos identificados indicou que as maiores velocidades foram observadas no inverno, enquanto as menores no outono. Além disso, notou-se uma variação da velocidade do jato, sendo possível observar a mesma magnitude do núcleo em diferentes níveis, o que foi corroborado pela análise dos estudos de casos. Os níveis de 250 e 200 hPa apresentaram números de casos semelhantes em todas as estações do ano, exceto no verão, onde foram identificados 16 casos com maior magnitude no núcleo em 200 hPa, e 7 casos em 250 hPa. Já no inverno, a quantidade de casos em ambos os níveis foi a mesma (11 casos cada). Em geral, dos 89 casos selecionados, as maiores velocidades do jato foram observadas em 200 hPa em 51 eventos, 35 em 250 hPa, e apenas 3 em 300 hPa.

Em relação à posição horizontal do núcleo do jato, observou-se uma variação sazonal durante o período analisado, sendo mais próximo do continente durante o inverno, e mais afastado no verão. Nas estações de transição (outono e primavera), notou-se uma contribuição da posição do jato na intensificação da VR observada nas BC e BS, visto que se encontravam em sua EE. Devido à componente ageostrófica do vento, em tal região ocorreu divergência, o que favoreceu a convergência em baixos níveis e o movimento vertical ascendente, contribuindo para a intensificação de sistemas na superfície. Já no verão e no inverno, observou-se pouca influência do jato na área de interesse. Contudo, durante seu deslocamento, pode fornecer suporte para o desenvolvimento de instabilidades na região.

Durante a análise dos estudos de casos, observou-se diferentes posições do jato entre os níveis, ressaltando a importância de identificar aquele que melhor representa o sistema na região

de interesse. Uma avaliação no nível não adequado pode levar a conclusões errôneas da contribuição dessa componente na intensificação da instabilidade em superfície. Além disso, notou-se que, em alguns casos, 300 hPa pode fornecer suporte para os sistemas em superfície próximo a região subtropical.

Por fim, para o ano de 2020, observou-se que quando o núcleo do jato está posicionado em, aproximadamente, 33°S 030°W, influencia na intensificação de instabilidades na região de interesse. Além disso, o nível que melhor representa o jato nessas situações é 200 hPa, visto que apresentou as maiores magnitudes no núcleo na maioria dos casos identificados, sendo a circulação ageostrófica bem representada também nesse nível.

Sugere-se, para trabalhos futuros:

- Aplicar a metodologia sugerida para uma maior série temporal de dados, uma vez que esses resultados compreendem apenas o ano de 2020;
- Com o aumento da série temporal, investigar a partir de qual velocidade o jato pode ser considerado fraco, moderado ou forte;
- Aumentar a área de estudo avaliada, sendo possível identificar diferentes níveis representativos para cada região, como por exemplo, Bacia de Pelotas;
- Verificar se há relação entre a velocidade do núcleo do jato e a intensidade da instabilidade em superfície;
- Avaliar as características e/ou intensidade das massas de ar que contribuem para o nível do jato ser 300 ou 250 hPa na região das bacias;
- Avaliar a contribuição do JAN por tipo de sistema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CAMMAS, J.; RAMOND, D. Analysis and Diagnosis of the Composition of Ageostrophic Circulations in Jet-Front Systems. **Monthly Weather Review**, v. 117, n. 11, p. 2447-2462, 1989. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1989\)117%3C2447:AADOTC%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1989)117%3C2447:AADOTC%3E2.0.CO;2).

CAMPOS, A. M. V. **Modelos conceituais de formação da Corrente de Jato no Nordeste Brasileiro**. 2010. 94f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Universidade Federal de Alagoas, Maceió, AL, 2010.

CARVALHO, N. O. **Climatologia da Bacia de Santos**. 2018. 73f. Monografia (Bacharel em Meteorologia) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2018.

COELHO, L. A. F.; NUNES, A. B. Eventos Recentes de Chuva Intensa na Cidade do Rio de Janeiro: Análise Sinótica. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 3, p. 994-1012, 2020. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v13.3.p994-1012>.

CRUZ, G. S. **Manutenção zonal da Corrente de Jato sobre a América do Sul**. 2003. 100f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, 2003.

DE MELO, A. C. C.; PALMEIRA, A. C. P. A.; MENEZES, W. F. Identificação e caracterização de Baixas Polares sobre a Península Antártica e mares adjacentes. **Sistemas & Gestão**, v. 16, n. 3, p. 278-285, 2022. DOI: <https://doi.org/10.20985/1980-5160.2021.v16n3.1721>.

DERECZYNSKI, C. P.; MENEZES, W. F. Meteorologia da Bacia de Campos. *In*: Martins, R.P., Grossmann-Matheson, G.S., editores. **Meteorologia e Oceanografia**. Rio de Janeiro: Elsevier. Habitats, 2015, v. 2. p. 1-54. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-85-352-6208-7.50008-8>.

ESCOBAR, G. Jato de Altos Níveis. *In*: CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J.; SILVA, M. G. A. J.; SILVA DIAS, M. A. F. (Org.). **Tempo e Clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009, cap. 8, p. 127-134.

FEDOROVA, N.; LEVIT, V.; CAMPOS, A. M. V. Brazilian Northeast Jet Stream: association with synoptic-scale systems. **Met. Apps**, v. 25, n. 2, p. 261-268, 2018. <https://doi.org/10.1002/met.1693>.

GALLEGO, D. *et al.* A new look for the Southern Hemisphere jet stream. **Climate Dynamics**, v. 24, p. 607-621, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00382-005-0006-7>.

Garreaud R. D. The Andes climate and weather. **Adv. Geosci.**, v. 22, p. 3–11, 2009. DOI: <https://doi.org/10.5194/adgeo-22-3-2009>.

GRAMCIANINOV, C. B. *et al.* Analysis of Atlantic extratropical storm tracks characteristics in 41 years of ERA5 and CFSR/CFSv2 databases. **Ocean Engineering**, v. 216, 108111, ISSN 0029-8018. 2020a. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108111>.

GRAMCIANINOV, C. B. *et al.* Extreme waves generated by cyclonic winds in the western portion of the South Atlantic Ocean. **Ocean Engineering**, v. 213, 107745, ISSN 0029-8018. 2020b. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107745>.

GRAMCIANINOV, C. B. *et al.* Relation Between Cyclone Evolution and Fetch Associated With Extreme Wave Events in the South Atlantic Ocean. **ASME. J. Offshore Mech. Arct. Eng.**, v. 143, n. 6: 061202. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4051038>.

GRAMCIANINOV, C. B.; HODGES, K. I.; CAMARGO, R. The properties and genesis environments of South Atlantic cyclones. **Clim Dyn**, v. 53, p. 4115–4140, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00382-019-04778-1>.

GRIMM, A. M. Notas de aula sobre Meteorologia Básica. 1999. Disponível em: <https://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/>.

GUEDES, R.L. **Condições de grande escala associado a sistemas convectivos de mesoescala sobre a região central da América do Sul**. 1985. **XXf**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 1985.

Hall, R. *et al.* Drivers of North Atlantic Polar Front jet stream variability. **Int. J. Climatol**, v. 35, p. 1697-1720, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.4121>.

HASTENRATH, S. **Climate dynamics of the tropics**. Updated ed. Climate and Circulation of the Tropics: Kluwer Academic Publishers. 488p. 1991.

HERSBACH H, *et al.* The ERA5 global reanalysis. **QJR Meteorol Soc**, v. 146, p. 1999–2049, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/qj.3803>.

HODGES, K. I. A general method for tracking analysis and its application to meteorological data. **Mon. Weather Rev**, v. 122, p. 2573–2586, 1994. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1994\)122%3C2573:AGMFTA%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1994)122%3C2573:AGMFTA%3E2.0.CO;2).

HODGES, K. I. Adaptive constraints for feature tracking. **Mon. Weather Rev**, v. 127, p. 1362–1373, 1999. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1999\)127%3C1362:ACFFT%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1999)127%3C1362:ACFFT%3E2.0.CO;2).

HODGES, K. I. Feature tracking on the unit sphere. **Mon. Weather Rev**, v. 123, p. 3458–3465, 1995. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1995\)123%3C3458:FTOTUS%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1995)123%3C3458:FTOTUS%3E2.0.CO;2).

HOLTON, J. R. **An Introduction to Dynamic Meteorology**. 4th ed. [S.I.]: Elsevier, 2004.

HOSKINS, B. J.; HODGES, K. I. New Perspectives on the Northern Hemisphere Winter Storm Tracks. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 59, n. 6, p. 1041–1061. 2002. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2002\)059%3C1041:NPOTNH%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2002)059%3C1041:NPOTNH%3E2.0.CO;2).

KEYSER, D. A.; JOHNSON, D. R. Effects of Diabatic Heating on the Ageostrophic Circulation of an Upper Tropospheric Jet Streak. **Monthly Weather Review**, v. 112, n. 9, p. 1709–1724, 1984. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1984\)112%3C1709:EODHOT%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1984)112%3C1709:EODHOT%3E2.0.CO;2).

KRISHNAMURTI, T. N. *et al.* The Role of Upper Level Diffluence in the Tropical Easterly Jet in the Formation of the Recent Strongest Atlantic Hurricanes. **EarthArXiv**, 2018. DOI: <https://doi.org/10.31223/osf.io/7yafp>.

LARA, K. S. *et al.* Condições atmosféricas de grande escala associadas a três eventos de tornados ocorridos no Estado do Rio Grande do Sul, Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 12, n. 4, p. 1310–1326, 2019. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v12.4.p1310-1326>.

SILVA, J. M. *et al.* Cold fronts responsible for intense winds in the Santos Basin, Brazilian Southeast Offshore Region. **Atmosfera**, [S. l.], v. 37, p. 533–550, 2023. DOI: <https://doi.org/10.20937/ATM.53187>.

MARRAFON, V. H.; REBOITA, M. S.; DA ROCHA, R. P.; CRESPO, N. M. Ciclones Extratropicais no Hemisfério Sul: Comparação Entre Diferentes Reanálises. **Revista Brasileira de Climatologia**, [S. l.], v. 28, p. 48–73, 2021. Disponível em: <https://ojs.ufgd.edu.br/index.php/rbelima/article/view/14339>. Acesso em: 9 abr. 2024.

MEDINA, M. *Meteorologia básica sinóptica*. Madrid: Paraninfo, 1976.

MELAMED-TURKISH, K.; TAYLOR, P. A.; LIU, J. Upper-level winds over eastern North America: A regional jet stream climatology. **Int J Climatol.**, v. 38, n. 13, p. 4740–4757, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.5693>.

MELO, A. C. C.; RODRIGUES, K. S; PALMEIRA, A. C. P. A. Dupla formação de Nuvem Vírgula invertida sobre o Atlântico Sudoeste. *In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 22, 2022, Bauru. Anais[...]*. Bauru: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2022. p. 169-181. Disponível em: https://cbmet.com.br/files/anais_cbmet22_texto.pdf.

NASCIMENTO, E. L. Previsão de Tempestades Severas utilizando-se Parâmetros Convectivos e Modelos de Mesoescala: Uma Estratégia Operacional Adotável no Brasil? **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 20, n. 1, p. 121-140, 2005.

PALMÉN, E; NEWTON, C. W. Atmospheric Circulation Systems. **Their Structure and Physical Interpretation**. New York, London: Academic Press, 1969.

PANETTA, R. L. Zonal jets in wide baroclinically unstable regions: persistence and scale selection. **J. Atmos. Sci.**, v. 50(14), p. 2073–2106, 1993. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1993\)050%3C2073:ZJIWBU%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1993)050%3C2073:ZJIWBU%3E2.0.CO;2).

PEIXOTO, J. P.; OORT, A. H. Angular Momentum Cycle. *In: _____*. **Physics of Climate**. 1st. ed. New York: American Institute of Physics Melville, 1992. p. 241–269.

PETROBRÁS. **Bacias**. Disponível em: <https://petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/principais-operacoes/bacias/>. Acesso em: 27 jun. 2022.

PEZZI, L. P.; CAVALCANTI, I. F. A. O jato subtropical sobre a América do Sul no período de 1980 a 1989. *In: Congresso Brasileiro de Meteorologia, 8., 1994, Belo Horizonte. Anais[...]*. Belo Horizonte, v.2, 1994. p. 148-151.

PEZZI, L. P.; ROSA, M. B.; BATISTA, N. N. M. A corrente de jato subtropical sobre a América do Sul. **Climanálise Edição Especial de Outubro**. Edição especial comemorativa de 10 anos. 1996.

PINHEIRO, H. R. **Validação do método track para identificação objetiva dos vórtices ciclônicos de altos níveis em regiões subtropicais**. 2010. 160f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, SP, 2010.

RAMOS, E. C. P.; NUNES, A. B.; CASSOL MACHADO, L. G. Study of a Mesoscale Convective Complex associated with the coupling between jets in South America. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 3, p. 1367-1381, 2021. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.3.p1367-1381>.

RAY, P. S. **Mesoscale Meteorology and Forecasting**. Boston: American Meteorological Society, 1986. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-935704-20-1>.

REBOITA, M. S.; Da ROCHA, R. P.; AMBRIZZI, Tércio. Dynamic and climatological features of cyclonic developments over southwestern South Atlantic Ocean. **Horizons in Earth Science Research**. Hauppauge: Nova Science Publishers, v. 6, p. 135-160, 2012.

REITER, E. R. **Jet Stream Meteorology**. [S.I.]: The University of Chicago Press, 1969.

RODRIGUES, K. S. *et al.* BRAMS model performance for significant event involving Brazilian platform ship. **Natural Hazards**, v. 110, n. 3, p. 2277–2302, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11069-021-05037-5>.

RODRIGUES, K. S. *et al.* Proposta de Escala de Vorticidade Relativa para Sistemas Convectivos na Região das Bacias de Campos e Santos. *In: XIII Simpósio sobre Ondas, Marés, Engenharia Oceânica e Oceanografia por Satélite*, 2019, Arraial do Cabo. Anais de Resumos [...]. Arraial do Cabo: [s.n.], 2019. Disponível em: https://numa.lamce.coppe.ufrj.br/DATA/producao/2019/Anais_XIII_OMARSAT.pdf

SATO, T. Dynamics of the Jet Stream. **Papers in Meteorology and Geophysics**, v. 2, n. 2, p. 132–149, 1951. DOI: https://doi.org/10.2467/mripapers1950.2.2_132.

SCHNEIDER, Tapio. The General Circulation of the Atmosphere. **Annual Review of Earth and Planetary Sciences**, v. 34, n. 1, p. 655–688, 1 maio 2006. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.34.031405.125144>.

SECHRIST, F. S.; WHITTAKER, T. M. Evidence of jet stream vertical circulations. **Monthly Weather Review**, v. 107, p. 1014-1021, 1979.

SILVA DIAS, M. A. F. Sistemas de mesoescala e previsão de tempo a curto prazo. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 2 , n. 1, p. 133-150, 1987.

SILVA, J. M. **Característica dos Sistemas Frontais Responsáveis por Ventos Intensos na Bacia de Santos**. 53f. Monografia (Bacharel em Meteorologia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2021. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11422/16779>.

SILVA, J. M. *et al.* Análise do Jato de Altos Níveis: um estudo de caso na Bacia de Santos. *In: Congresso Brasileiro de Meteorologia*, 22., 2022, Bauru. **Anais [...]**. Bauru: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2022. p. 156-164. Disponível em: https://cbmet.com.br/files/anais_cbmet22_texto.pdf.

SILVA, J. M. *et al.* Sistemas Meteorológicos que afetam a Bacia de Santos: Climatologia. *In: VIII Simpósio Internacional de Climatologia*, 2019, Belém. **Anais** [...]. Belém: [s.n.], 2019.

SINCLAIR, M. R. An Objective Cyclone Climatology for the Southern Hemisphere. **Monthly Weather Review**, v. 122, n. 10, p. 2239-2256, 1994. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1994\)122%3C2239:AOCCT%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1994)122%3C2239:AOCCT%3E2.0.CO;2).

SOUZA, J. N. *et al.* Climatologia de sistemas sinóticos na região da Bacia de Santos. *In: XIX Encontro dos alunos de Pós-graduação em Meteorologia do CPTEC/INPE*, 2020, On-line. **Resumos, pôsteres** [...]. São José dos Campos: INPE, 2020. Disponível em: <http://urlib.net/ibi/8JMKD3MGPDW34R/449SASB?ibiurl.backgroundlanguage=pt-BR>.

UCCELLINI, L. W.; JOHNSON, D. R. The coupling of upper and lower tropospheric jet streaks and implications for the development of severe convective storms. **Monthly Weather Review**, v. 107, n. 6, p. 682-703, 1979. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1979\)107%3C0682:TCOUAL%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1979)107%3C0682:TCOUAL%3E2.0.CO;2).

Vera, C. *et al.* The South American Low-Level Jet Experiment. **Bull. Amer. Meteor. Soc.**, v. 87, p. 63–78, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1175/BAMS-87-1-63>.

World Meteorological Organization (WMO). **International Meteorological Vocabulary. Publication WMO**, 1992.

ZIMMERMANN, D. F. R. **Subtropical Jet Climatology over South America**. 2017. 106f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2017.

APÊNDICE A - LISTAGEM COM OS CASOS IDENTIFICADOS NO ESTUDO.

Tabela A.1 - Ocorrência de casos de vorticidade relativa menores que $-2 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ em 1000 hPa, na área de estudo, para o período entre dezembro de 2019 e novembro de 2020.

Caso	Data Inicial Vort	Posição Inicial	Posição Final	Data Final Vort	Duração (h)	Vel Máx Núcleo (m/s)	Nível	Posição Núcleo	Data Vel Máx Núcleo	Sistema
VERÃO										
1	20z 03/01/2020	24°S 040°W	29°S 040°W	06z 05/01/2020	34	55	200	34°S 023°W	21z 04/01/2020	Ciclone
2	06z 09/01/2020	28°S 041°W	29°S 039°W	22z 09/01/2020	16	45	200	33°S 042°W	16z 09/01/2020	Outros
3	08z 11/01/2020	28°S 048°W	26°S 041°W	21z 12/01/2020	32	80	200	37°S 042°W	22z 11/01/2020	Ciclone
4	13z 13/01/2020	24°S 039°W	22°S 032°W	02z 15/01/2020	37	55	200	33°S 040°W	14z 13/01/2020	FF
5	16z 16/01/2020	28°S 046°W	24°S 039°W	22z 19/01/2020	78	80	200	36°S 038°W	03z 17/01/2020	FF
6	22z 18/01/2020	22°S 039°W	22°S 038°W	20z 19/01/2020	22	40	200	32°S 040°W	07z 19/01/2020	FF
7	14z 21/01/2020	22°S 037°W	24°S 036°W	00z 22/01/2020	10	45	250	33°S 044°W	14z 21/01/2020	Cavado
8	03z 22/01/2020	19°S 040°W	29°S 042°W	12z 25/01/2020	81	50	200	31°S 040°W	18z 24/01/2020	Ciclone

Caso	Data Inicial Vort	Posição Inicial	Posição Final	Data Final Vort	Duração (h)	Vel Máx Núcleo (m/s)	Nível	Posição Núcleo	Data Vel Máx Núcleo	Sistema
9	01z 24/01/2020	23°S 040°W	24°S 038°W	00z 25/01/2020	23	50	200	31°S 040°W	18z 24/01/2020	Cavado
10	22z 24/01/2020	21°S 041°W	33°S 032°W	20z 25/01/2020	22	60	250	36°S 036°W	14z 25/01/2020	FF
11	20z 25/01/2020	21°S 039°W	24°S 034°W	11z 27/01/2020	39	50	200	25°S 040°W	02z 26/01/2020	FF
12	18z 03/02/2020	26°S 044°W	27°S 046°W	21z 05/02/2020	51	40	250	30°S 040°W	05z 04/02/2020	Ciclone
13	10z 04/02/2020	26°S 038°W	26°S 037°W	23z 04/02/2020	13	55	200	32°S 024°W	21z 04/02/2020	FF
14	08z 10/02/2020	23°S 042°W	25°S 034°W	04z 11/02/2020	20	90	250	38°S 020°W	23z 10/02/2020	FF
15	09z 10/02/2020	24°S 045°W	23°S 044°W	15z 10/02/2020	6	55	250	30°S 038°W	11z 10/02/2020	FF
16	03z 11/02/2020	23°S 042°W	29°S 032°W	05z 13/02/2020	50	90	250	38°S 016°W	21z 11/02/2020	Ciclone
17	01z 13/02/2020	24°S 40°W	30°S 036°W	23z 13/02/2020	22	65	200	34°S 035°W	13z 13/02/2020	Ciclone

Caso	Data Inicial Vort	Posição Inicial	Posição Final	Data Final Vort	Duração (h)	Vel Máx Núcleo (m/s)	Nível	Posição Núcleo	Data Vel Máx Núcleo	Sistema
18	02z 13/02/2020	23°S 041°W	25°S 042°W	08z 14/02/2020	30	50	200	28°S 040°W	15z 13/02/2020	Outros
19	05z 21/02/2020	27°S 042°W	28.5°S 37°W	20z 21/02/2020	15	65	200	40°S 030°W	18z 21/02/2020	FF
20	05z 22/02/2020	24°S 041°W	30°S 018°W	23z 24/02/2020	66	75	250	38°S 029°W	21z 22/02/2020	Ciclone
21	13z 22/02/2020	24°S 044°W	24°S 042°W	20z 22/02/2020	7	55	200	28°S 049°W	13z 22/02/2020 0	Outros
22	15z 26/02/2020	27°S 047°W	30.5°S 31°W	18z 27/02/2020	27	70	200	34°S 042°W	01z 27/02/2020	FF
23	08z 28/02/2020	21°S 039°W	21.5°S 038°W	21z 28/02/2020	13	70	200	37°S 027°W	17z 28/02/2020	FF
OUTONO										
1	00z 01/03/2020	22,5°S 042°W	23°S 043°W	21z 01/03/2020	21	85	250	37°S 026°W	18z 01/03/2020	Outros
2	17z 01/03/2020	23°S 041°W	22°S 041°W	02z 02/03/2020	9	40	250	25°S 046°W	00z 02/03/2020	Outros

Caso	Data Inicial Vort	Posição Inicial	Posição Final	Data Final Vort	Duração (h)	Vel Máx Núcleo (m/s)	Nível	Posição Núcleo	Data Vel Máx Núcleo	Sistema
3	05z 02/03/2020	21°S 040°W	21,5°S 41°W	13z 02/03/2020	8	45	200	26°S 042°W	12z 02/03/2020	Outros
4	15z 02/03/2020	23°S 041°W	23°S 044°W	05z 03/03/2020	14	45	200	26.5°S 042°W	16z 02/03/2020	Outros
5	22z 02/03/2020	24°S 045°W	24°S 047°W	08z 03/03/2020	10	40	250	29.5°S 043°W	01z 03/03/2020	Outros
6	05z 03/03/2020	24°S 042°W	34°S 028°W	00z 07/03/2020	91	50	200	24°S 042°W	20z 06/03/2020	Ciclone
7	00z 05/03/2020	21°S 040°W	2.5°S 036°W	21z 05/03/2020	21	40	250	25°S 042°W	06z 05/03/2020	FF
8	04z 21/03/2020	23°S 042°W	23°S 042°W	10z 21/03/2020	6	60	200	30°S 037°W	10z 21/03/2020	FF
9	11z 21/03/2020	22.5°S 040°W	22°S 038°W	04z 22/03/2020	16	65	200	32°S 029°W	22z 21/03/2020	FF
10	01z 08/04/2020	26°S 038°W	25°S 031°W	02z 09/04/2020	25	70	250	29°S 040°W	11z 08/04/2020	FF
11	03z 15/04/2020	26°S 048°W	26°S 044°W	11z 15/04/2020	8	55	200	25°S 046°W	11z 15/04/2020	FF

Caso	Data Inicial Vort	Posição Inicial	Posição Final	Data Final Vort	Duração (h)	Vel Máx Núcleo (m/s)	Nível	Posição Núcleo	Data Vel Máx Núcleo	Sistema
12	16z 02/05/2020	25°S 042°W	24°S 034°W	11z 03/05/2020	18	50	200	23°S 047°W	17z 02/05/2020	FF
13	03z 07/05/2020	27.5°S 037°W	23°S 031°W	09z 08/05/2020	30	75	200	27°S 032°W	06z 08/05/2020	FF
14	04z 24/05/2020	24°S 041°W	25°S 034°W	20z 25/05/2020	40	70	200	24°S 045°W	01z 25/05/2020	FF
15	20z 24/05/2020	27°S 048°W	27°S 048°W	02z 25/05/2020	6	70	250	34°S 054°W	23z 24/05/2020	Cavado
INVERNO										
1	08z 02/06/2020	24°S 047°W	24°S 046°W	14z 02/06/2020	6	75	200	29°S 045°W	10z 02/06/2020	FF
2	00z 07/06/2020	26°S 048°W	28°S 045°W	08z 07/06/2020	8	45	300	31°S 051°W	08z 07/06/2020	FF
3	23z 09/06/2020	28°S 047°W	27°S 040°W	19z 10/06/2020	20	70	250	34°S 036°W	07z 10/06/2020	Ciclone
4	09z 11/06/2020	27°S 037°W	30°S 032°W	20z 12/06/2020	35	40	250	30°S 031°W	20z 11/06/2020	Ciclone

Caso	Data Inicial Vort	Posição Inicial	Posição Final	Data Final Vort	Duração (h)	Vel Máx Núcleo (m/s)	Nível	Posição Núcleo	Data Vel Máx Núcleo	Sistema
5	20z 25/06/2020	28,5°S 048°W	28°S 034°W	02z 27/06/2020	30	75	250	32°S 043°W	08z 26/06/2020	FF
6	04z 26/06/2020	24,5°S 046°W	23,5°S 044°W	10z 26/06/2020	6	45	200	23°S 046°W	06z 26/06/2020	FF
7	06z 27/06/2020	24°S 045°W	31°S 014°W	21z 29/06/2020	63	95	250	38°S 037°W	11z 27/06/2020	FF
8	03z 28/06/2020	21,5°S 041°W	20,5°S 039°W	10z 28/06/2020	7	65	200	27°S 049°W	08z 28/06/2020	FF
9	01z 02/07/2020	22°S 040°W	26,5°S 027°W	01z 03/07/2020	24	85	250	35°S 022°W	21z 02/04/2020	FF
10	06Z 07/07/2020	26°S 048°W	28°S 047°W	23z 07/07/2020	17	95	200	37°S 038°W	19z 07/07/2020	FF
11	04z 09/07/2020	24,5°S 046°W	24,5°S 037°W	03z 10/07/2020	23	90	250	32°S 048°W	08Z 09/07/2020	FF
12	20z 11/07/2020	26°S 048°W	25°S 046°W	06z 12/07/2020	10	55	200	23°S 050°W	01z 12/07/2020	Ciclone

Caso	Data Inicial Vort	Posição Inicial	Posição Final	Data Final Vort	Duração (h)	Vel Máx Núcleo (m/s)	Nível	Posição Núcleo	Data Vel Máx Núcleo	Sistema
13	10z 14/07/2020	23°S 041°W	23°S 037°W	00z 15/07/2020	14	75	250	30°S 041°W	12z 14/07/2020	FF
14	12z 25/07/2020	28.5°S 047°W	26°S 041°W	14z 26/07/2020	26	85	250	34°S 045°W	20z 25/07/2020	FF
15	22z 28/07/2020	27.5°S 043°W	21°S 039°W	00z 31/07/2020	50	70	250	36°S 032°W	16z 29/07/2020	FF
16	04z 12/08/2020	24°S 046°W	24°S 044°W	13z 12/08/2020	9	50	200	20°S 048°W	10z 12/08/2020	FF
17	08z 14/08/2020	24°S 045°W	24°S 044°W	17z 14/08/2020	9	55	200	23°S 053°W	12z 14/08/2020	Ciclone
18	07z 15/08/2020	25,5°S 048°W	23°S 041°W	01z 16/08/2020	18	70	200	24°S 051°W	22z 15/08/2020	FF
19	22z 15/08/2020	28°S 048°W	27°S 044°W	12z 16/08/2020	14	75	250	34°S 042°W	08z 16/08/2020	FF
20	01z 17/08/2020	26°S 048°W	30°S 033°W	15z 18/08/2020	38	70	250	21°S 042°W	22z 17/08/2020	FF
21	22z 19/08/2020	23°S 042°W	21°S 040°W	13z 20/08/2020	15	90	200	33°S 045°W	23z 19/08/2020	FF

Caso	Data Inicial Vort	Posição Inicial	Posição Final	Data Final Vort	Duração (h)	Vel Máx Núcleo (m/s)	Nível	Posição Núcleo	Data Vel Máx Núcleo	Sistema
22	01z 20/08/2020	26°S 041°W	23°S 030°W	02z 25/08/2020	120	85	200	32°S 046°W	01z 20/08/2020	FF
23	02z 31/08/2020	23,5°S 044°W	23°S 041°W	12z 31/08/2020	10	90	200	37°S 049°W	07z 31/08/2020	Cavado
PRIMAVERA										
1	23Z 04/09/2020	23°S 043°W	24°S 042°W	06Z 05/09/2020	7	70	200	33,5°S 043°W	01z 05/09/2020	Ciclone
2	04z 07/09/2020	27,5°S 048°W	27,5°S 048°W	19z 07/09/2020	15	75	200	33°S 048°W	19z 07/09/2020	Cavado
3	04z 08/09/2020	27°S 046°W	27°S 040°W	00Z 10/09/2020	30	75	200	31°S 049°W	00z 09/09/2020	FF
4	22z 12/09/2020	24°S 046°W	24°S 044°W	15z 13/09/2020	17	65	200	38°S 051°W	07z 13/09/2020	Ciclone
5	23z 14/09/2020	26°S 043°W	21°S 040°W	13z 15/09/2020	14	80	250	36°S 037°W	00z 15/09/2020	FF
6	22z 17/09/2020	23°S 043°W	24°S 042°W	08z 18/09/2020	10	60	200	27°S 044°W	23z17/09/2 020	Ciclone

Caso	Data Inicial Vort	Posição Inicial	Posição Final	Data Final Vort	Duração (h)	Vel Máx Núcleo (m/s)	Nível	Posição Núcleo	Data Vel Máx Núcleo	Sistema
7	08z 20/09/2020	27°S 040°W	23,5°S 034°W	15z 22/09/2020	55	85	250	37°S 026°W	07z 21/09/2020	FF
8	22Z 20/09/2020	24°S 045°W	23°S 044°W	23z 21/09/2020	25	60	300	29°S 042°W	18z 21/09/2020	FF
9	23z 22/09/2020	21°S 041°W	19,5°S 040°W	18z 23/09/2020	19	50	250	26°S 040°W	16z 23/09/2020	Ciclone
10	22z 03/10/2020	22°S 041°W	21°S 040°W	11z 04/10/2020	12	90	300	35°S 028°W	22z 03/10/2020	Outros
11	00z 07/10/2020	21,5°S 040°W	21Z 040°W	13z 07/10/2020	13	60	200	29°S 034°W	00z 07/10/2020	Outros
12	16z 08/10/2020	25°S 043°W	25°S 042°W	22z 08/10/2020	6	75	250	31°S 045°W	20z 08/10/2020	FF
13	17z 09/10/2020	26,5°S 045°W	25°S 040°W	19z 10/10/2020	26	85	250	33°S 033°W	01z 10/10/2020	FF
14	04z 10/10/2020	25°S 038°W	30°S 020°W	12z 11/10/2020	32	75	200	31°S 032°W	09z 10/10/2020	Ciclone
15	15z 10/10/2020	22°S 039°W	38°S 017°W	00z 12/10/2020	33	60	200	29°S 047°W	05z 11/10/2020	FF

Caso	Data Inicial Vort	Posição Inicial	Posição Final	Data Final Vort	Duração (h)	Vel Máx Núcleo (m/s)	Nível	Posição Núcleo	Data Vel Máx Núcleo	Sistema
16	07z 14/10/2020	27,5°S 043°W	27°S 043°W	13z 14/10/2020	6	45	250	28°S 042°W	07z 14/10/2020	FF
17	08z 14/10/2020	24°S 044°W	25°S 044°W	16z 14/10/2020	8	50	250	27°S 046°W	14z 14/10/2020	FF
18	02z 25/10/2020	22°S 041°W	25,5°S 037°W	11z 27/10/2020	57	70	200	29°S 025°W	12z 25/10/2020	Ciclone
19	06z 25/10/2020	28°S 048°W	26,8°S 048°W	18z 25/10/2020	12	50	250	28°S 053°W	07z 25/10/2020	Ciclone
20	05z 30/10/2020	23,5°S 042°W	33°S 020°W	06Z 03/11/2020	96	70	200	30°S 047°W	08z 30/10/2020	Ciclone
21	03z 06/11/2020	27°S 039°W	30°S 043°W	02z 07/11/2020	23	85	250	36,5°S 016°W	03z 06/11/2020	Ciclone
22	10z 06/11/2020	24°S 040°W	29,5°S 034°W	12z 07/11/2020	26	45	250	28,5°S 037°W	19z 06/11/2020	Ciclone
23	02z 11/11/2020	26°S 043°W	26°S 042°W	11z 11/11/2020	9	55	200	29°S 048°W	10z 11/11/2020	Cavado
24	16z 11/11/2020	26,5°S 040°W	28,7°S 043°W	19z 12/11/2020	27	50	200	30°S 041°W	16z 11/11/2020	Cavado

Caso	Data Inicial Vort	Posição Inicial	Posição Final	Data Final Vort	Duração (h)	Vel Máx Núcleo (m/s)	Nível	Posição Núcleo	Data Vel Máx Núcleo	Sistema
25	14z 12/11/2020	28°S 040°W	28,5°S 041°W	12z 13/11/2020	22	50	200	28°S 049°W	14z 12/11/2020	Cavado
26	12z 13/11/2020	27°S 038°W	32°S 036°W	17z 14/11/2020	29	55	200	31°S 032°W	00z 14/11/2020	Ciclone
27	16z 19/11/2020	24°S 039°W	30°S 026°W	17z 22/11/2020	73	70	200	30°S 038°W	18z 19/11/2020	FF
28	02z 20/11/2020	22°S 040°W	22,5°S 033°W	21z 21/11/2020	43	60	250	28°S 041°W	02z 20/11/2020	FF

