



**Universidade Federal do Rio de Janeiro
Centro de Ciências Matemáticas e da Natureza
Instituto de Geociências
Departamento de Meteorologia**

**CLIMATOLOGIA DE CICLONES E FRENTES FRIAS E
INFLUÊNCIA DE TELECONEXÕES NA
REGIÃO DA BACIA DE SANTOS**

Juan Neres de Souza

Orientadora: Prof.^a Dra. Claudine Pereira Dereczynski

Coorientadora: Prof.^a Dra. Fernanda Cerqueira Vasconcellos

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

Rio de Janeiro, RJ
Junho, 2023

CLIMATOLOGIA DE CICLONES E FRENTES FRIAS E INFLUÊNCIA DE TELECONEXÕES NA REGIÃO DA BACIA DE SANTOS

Juan Neres de Souza

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

Aprovada por:

Dra. Claudine Pereira Dereczynski
Departamento de Meteorologia – IGEO – UFRJ

Dra. Fernanda Cerqueira Vasconcellos
Departamento de Meteorologia – IGEO – UFRJ

Dra. Chou Sin Chan
Divisão de Modelagem Numérica do Sistema Terrestre – INPE

Dr. Fabricio Polifke da Silva
Departamento de Meteorologia – IGEO – UFRJ

Dr. Wanderson Luiz Silva
Departamento de Meteorologia – IGEO – UFRJ

Rio de Janeiro, RJ
Junho, 2023

Dedico esta monografia ao meu falecido avô
José Valter Neres de Souza.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus avós, Zelma e Valter, aos meus pais, Paula e Junior, e a todos os meus familiares que me apoiaram ao longo desta jornada e que amo de coração. Me enche de felicidade poder compartilhar e dedicar mais uma vitória a vocês.

Às minhas orientadoras, Fernanda e Claudine, por todos os ensinamentos dentro e fora das salas de aula. Agradeço por todas as oportunidades que me proporcionaram e por sempre celebrarem minhas conquistas. Sem vocês eu não teria conseguido completar esta etapa da minha vida e por isto serei eternamente grato. Vocês são mulheres incríveis e espero poder me tornar um profissional tão dedicado e competente assim como vocês são.

Aos meus amigos que sempre me apoiaram e que foram essenciais para que eu pudesse chegar até aqui. Agradeço especialmente à Ana Clara, Anna Bazzanela, Catharine Freire, David Aquino, Eduardo Gouvêa, Fernando Bergara, Gabriel Lopes, Gabriel Sampaio, Gabriel Sancção, Gleiciane Bueno, Guilherme Pimenta, Gustavo Roriz, Isabela Costa, Isadora Rody, Jamyle Magalhães, João Gabriel, Juliana Medeiros, Júlio Amaral, Malu Rocha, Matheus Henrique, Matheus Paulo, Michael Mendes, Moacir Silveira, Natasha Carvalho, Pedro Fioroti, Rebeca Lyra, Roberto Baltazar, Tatyane Chaves, Verônica Vieira, Vinicius Calixto, Vinícius Rolim, Vitor Cavalcanti, Vitor Erthal, Wallace Ferreira e Will Martins.

Ao meu namorado Miguel por todo amor e companheirismo. Agradeço por estar sempre ao meu lado nesta difícil caminhada e por me ajudar em literalmente todos os âmbitos da minha vida.

A todos os professores do Departamento de Meteorologia da UFRJ que contribuíram para a minha formação acadêmica e profissional, em especial aos professores Ana Cristina, Edilson, Fabricio, Renata, Wallace e Wanderson.

Ao Dr. Kevin Hodges pela grande ajuda com o programa TRACK, além de ter sido extremamente solícito em todos os momentos da realização desta pesquisa.

A toda a equipe GEAR do INEA pela oportunidade e pelo aprendizado ao longo do meu período de estágio, em especial à Ana Carolina, Brunna, Clarisse, Georgia, Leonardo, Michelle e Patrycia.

À Petrobras pelo suporte financeiro e fomento a esta pesquisa através do Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) “Caracterização da Meteorologia e do Clima de Ondas na Bacia de Santos” – Processo 2018/00067-1.

SUMÁRIO

RESUMO.....	VI
ABSTRACT	VII
LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE TABELAS.....	XIII
LISTA DE ABREVIACÕES.....	XIV
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS.....	2
2 REVISO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 CICLONES.....	4
2.2 FRENTES FRIAS	6
3 DADOS E METODOLOGIA.....	9
3.1 DADOS	9
3.1.1 REANÁLISE ERA5	9
3.1.2 <i>EXTENDED RECONSTRUCTED SEA SURFACE TEMPERATURE VERSION 5</i>	10
3.1.3 <i>GLOBAL PRECIPITATION CLIMATOLOGY PROJECT</i>	10
3.1.4 SATÉLITE GOES	10
3.2 METODOLOGIA.....	11
3.2.1 DETECÇÃO DOS CICLONES	11
3.2.2 DETECÇÃO DAS FRENTES FRIAS	12
3.2.3 VERIFICAÇÃO DOS MÉTODOS OBJETIVOS.....	12
3.2.4 DEFINIÇÃO DOS ANOS EXTREMOS	13
4 RESULTADOS	15
4.1 VERIFICAÇÃO DOS MÉTODOS OBJETIVOS	15
4.2 CLIMATOLOGIA DE CICLONES.....	16
4.2.1 FREQUÊNCIA E VARIABILIDADE INTERANUAL	16
4.2.2 ESTATÍSTICAS ESPACIAIS.....	17
4.3 CLIMATOLOGIA DE FRENTES FRIAS	22
4.3.1 FREQUÊNCIA E VARIABILIDADE INTERANUAL	22
4.4 ANÁLISE DOS COMPOSTOS DOS ANOS EXTREMOS.....	23
5 CONCLUSES	48
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	50

RESUMO

A Bacia de Santos (BS), localizada na costa sul/sudeste brasileira, estendendo-se desde Florianópolis (SC) até Cabo Frio (RJ), é uma importante região petrolífera *offshore* brasileira. Devido à intensificação da produção e do escoamento de petróleo e gás natural e, conseqüentemente, do aumento do tráfego de embarcações na bacia, torna-se necessário compreender a climatologia da região. Os ciclones e os sistemas frontais são os principais sistemas meteorológicos sinóticos na BS, que determinam as mudanças nas condições de tempo na região. O objetivo deste trabalho é apresentar uma climatologia (período 1991-2020) da frequência desses sistemas na área de estudo. O rastreamento dos ciclones foi realizado através do programa TRACK, utilizando saídas de vorticidade relativa do ar em 850 hPa provenientes da Reanálise ERA5 do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF). Para contabilização das frentes frias utilizou-se também a Reanálise ERA5, considerando, no intervalo de um dia para o outro, os seguintes critérios: i) queda na temperatura do ar em 925 hPa; ii) aumento na pressão atmosférica ao nível médio do mar (PNMM) e iii) componente meridional do vento em 925 hPa positiva. Os resultados indicaram maior frequência de frentes frias na primavera (14 sistemas) e menor frequência no verão (10 sistemas), com total de 49 sistemas, em média, por ano. Com relação aos ciclones, há uma maior (menor) quantidade atravessando a região no verão (inverno), com uma média de aproximadamente 3 (2) ciclones por estação, totalizando 10 sistemas anualmente. A intensidade média da vorticidade relativa dos ciclones na BS foi maior na primavera e verão, alcançando $3 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ em quase toda a bacia. O tempo de vida médio dos ciclones na BS foi de 5 a 6 horas, com máximos no verão e outono. Sua velocidade média variou entre 30 e 50 km/h, com máximos no inverno e primavera. Além disso, foram gerados compostos para os anos de maior e menor frequência de frentes frias e ciclones, utilizando novamente a Reanálise ERA5, a fim de verificar as principais diferenças nos padrões sinóticos entre tais anos extremos.

ABSTRACT

The Santos Basin (SB), located on the south/southeast coast of Brazil, extending from Florianópolis (SC) to Cabo Frio (RJ), is an important Brazilian offshore oil region. Due to the intensification of the production and flow of oil and natural gas and, consequently, the increase in vessel traffic in the basin, it is necessary to understand the climatology of the region. Cyclones and frontal systems are the main synoptic meteorological systems in the SB, which determine changes in weather conditions in the region. The aim of this work is to present a climatology (period 1991-2020) of the frequency of these systems in the area of study. Cyclone tracking was performed using the TRACK program, using relative air vorticity at 850 hPa outputs from the ERA5 Reanalysis of the European Center for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). The ERA5 Reanalysis was also used to calculate the cold fronts, considering the following criteria from one day to another: i) drop in air temperature at 925 hPa; ii) increase in sea level pressure (SLP) and iii) meridional wind component at 925 hPa positive. The results indicated a higher frequency of cold fronts in the spring (14 systems) and a lower frequency in the summer (10 systems), with a total of 49 systems, on average, per year. In relation to cyclones, there is a greater (lesser) amount crossing the region in the summer (winter) with an average of approximately 3 (2) cyclones per season, totaling 10 systems annually. The average intensity of relative vorticity of cyclones in the SB was higher in spring and summer, reaching $3 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ in almost the entire basin. The average lifetime of cyclones in the SB was 5 to 6 hours, with maximums in summer and autumn. Its average speed varied between 30 and 50 km/h, with maximums in winter and spring. In addition, composites were generated for the years with the highest and lowest frequency of cold fronts and cyclones, using the ERA5 Reanalysis again, in order to verify the main differences in the synoptic patterns between such extreme years.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Mapa da Bacia de Santos, localizada sobre o Oceano Atlântico, aproximadamente entre os paralelos 28°S e 23°S e meridianos 49°W e 41°W e suas três subdivisões: Área Rasa (azul), Área Profunda (verde) e Área Cabo Frio (vermelha). O campo em sombreado indica a batimetria da região (m).....	2
Figura 2.1 - Distribuição anual de ciclogênese para América do Sul. Fonte: Extraído de Gan & Rao (1991).	4
Figura 2.2 - Densidade de ciclogêneses (10^{-4} km^{-2}) no período de verão nos anos de 1990 a 1999. Extraído de Reboita (2008), com resultados indicando zonas preferenciais para ciclogênese. O quadrado preto destaca uma nova região ciclogênética, além das anteriormente destacadas por Gan & Rao (1991).....	5
Figura 2.3 - Modelo conceitual de uma frente fria evoluindo na América do Sul. Fonte: Extraído de Dereczynski & Menezes (2016).....	6
Figura 2.4 - (a) Frequência média de frentes frias por estação do ano para o período de 1980-2002 em cada uma das áreas descritas em (b). Fonte: Extraído de Andrade, 2005. 7	
Figura 2.5 - Evolução diária dos compostos, do tempo “t-1” ao tempo “t+3” do vento em superfície (vetor) e anomalias de temperatura em 925 hPa (sombreado), para as 50 frentes frias mais fortes que atingiram as regiões Sul e Sudeste do Brasil entre 1979 e 2005. Fonte: Extraído de Cavalcanti & Kousky (2009).	8
Figura 4.1 - Frequência e desvios-padrão de ciclones na BS por estação do ano e anualmente. Os valores são apresentados para a bacia como um todo (Total) e também para suas subdivisões Rasa, Profunda e Cabo Frio. Climatologia obtida a partir dos dados da Reanálise ERA5 para o período de 1991-2020.....	16
Figura 4.2 - Frequência média de ciclones por ano na BS. Valores apresentados para a área total da BS. Climatologia obtida a partir dos dados da Reanálise ERA5 para o período de 1991-2020. Anos com maior (menor) frequência de ciclones encontram-se destacados em vermelho (azul).....	17
Figura 4.3 – Densidade de ciclogêneses [ciclones por unidade de área] durante o período de 1991-2020 nas estações de: a) Verão; b) Outono; c) Inverno e d) Primavera. A BS se encontra destacada em linha grossa.....	18
Figura 4.4 – Intensidade média da vorticidade relativa dos ciclones [10^{-5} s^{-1}] durante o período de 1991-2020 nas estações de: a) Verão; b) Outono; c) Inverno e d) Primavera. A BS se encontra destacada em linha grossa.....	19

Figura 4.5 – Tempo de vida médio dos ciclones [dias] durante o período de 1991-2020 nas estações de: a) Verão; b) Outono; c) Inverno e d) Primavera. A BS se encontra destacada em linha grossa.....	20
Figura 4.6 – Velocidade média dos ciclones [km.h^{-1}] durante o período de 1991-2020 nas estações de: a) Verão; b) Outono; c) Inverno e d) Primavera. A BS se encontra destacada em linha grossa.	21
Figura 4.7 - Frequência e desvios-padrão de frentes frias na BS por estação do ano e anualmente. Os valores são apresentados para a bacia como um todo (Total) e também para suas subdivisões Rasa, Profunda e Cabo Frio. Climatologia obtida a partir dos dados da Reanálise ERA5 para o período de 1991-2020.....	22
Figura 4.8 - Frequência média de frentes frias por ano na BS. Valores apresentados para a área total da BS. Climatologia obtida a partir dos dados da Reanálise ERA5 para o período de 1991-2020. Anos com maior (menor) frequência de frentes frias encontram-se destacados em vermelho (azul).	23
Figura 4.9 - Compostos de anomalia de temperatura do ar em 850 hPa [$^{\circ}\text{C}$], com relação ao período 1991-2020, durante os anos de: (a) máxima frequência de ciclones (1997, 2005, 2006, 2008, 2010 e 2015); (b) máxima frequência de frentes frias (1996, 1998, 1999, 2003, 2009 e 2013); (c) mínima frequência de ciclones (1992, 1994, 2003, 2014, 2018 e 2019) e (d) mínima frequência de frentes frias (1997, 2001, 2006, 2010, 2011 e 2012). Áreas com confiança estatística de 95% estão pontilhadas.....	24
Figura 4.10 - Compostos de anomalia de precipitação [mm.dia^{-1}], com relação ao período 1991-2020, durante os anos de: (a) máxima frequência de ciclones (1997, 2005, 2006, 2008, 2010 e 2015); (b) máxima frequência de frentes frias (1996, 1998, 1999, 2003, 2009 e 2013); (c) mínima frequência de ciclones (1992, 1994, 2003, 2014, 2018 e 2019) e (d) mínima frequência de frentes frias (1997, 2001, 2006, 2010, 2011 e 2012). Áreas com confiança estatística de 95% estão pontilhadas.	26
Figura 4.11 - Compostos de anomalia de PNMM [hPa], com relação ao período 1991-2020, durante os anos de: (a) máxima frequência de ciclones (1997, 2005, 2006, 2008, 2010 e 2015); (b) máxima frequência de frentes frias (1996, 1998, 1999, 2003, 2009 e 2013); (c) mínima frequência de ciclones (1992, 1994, 2003, 2014, 2018 e 2019) e (d) mínima frequência de frentes frias (1997, 2001, 2006, 2010, 2011 e 2012). Áreas com confiança estatística de 95% estão pontilhadas.	27
Figura 4.12 - Compostos de anomalia de altura geopotencial em 700 hPa [m], com relação ao período 1991-2020, durante os anos de: (a) máxima frequência de ciclones (1997,	

2005, 2006, 2008, 2010 e 2015); (b) máxima frequência de frentes frias (1996, 1998, 1999, 2003, 2009 e 2013); (c) mínima frequência de ciclones (1992, 1994, 2003, 2014, 2018 e 2019) e (d) mínima frequência de frentes frias (1997, 2001, 2006, 2010, 2011 e 2012). Áreas com confiança estatística de 95% estão pontilhadas..... 29

Figura 4.13 - Compostos de anomalia de radiação solar líquida em superfície [$W.m^{-2}$], com relação ao período 1991-2020, durante os anos de: (a) máxima frequência de ciclones (1997, 2005, 2006, 2008, 2010 e 2015); (b) máxima frequência de frentes frias (1996, 1998, 1999, 2003, 2009 e 2013); (c) mínima frequência de ciclones (1992, 1994, 2003, 2014, 2018 e 2019) e (d) mínima frequência de frentes frias (1997, 2001, 2006, 2010, 2011 e 2012). Áreas com confiança estatística de 95% estão pontilhadas. Para as variáveis do balanço de energia (Radiação Solar e Termal em Superfície e Fluxo de Calor Latente e Sensível em Superfície) é importante ressaltar que a Reanálise ERA5 considera os fluxos da superfície para a atmosfera como negativos. 30

Figura 4.14 - Compostos de anomalia de radiação termal líquida em superfície [$W.m^{-2}$], com relação ao período 1991-2020, durante os anos de: (a) máxima frequência de ciclones (1997, 2005, 2006, 2008, 2010 e 2015); (b) máxima frequência de frentes frias (1996, 1998, 1999, 2003, 2009 e 2013); (c) mínima frequência de ciclones (1992, 1994, 2003, 2014, 2018 e 2019) e (d) mínima frequência de frentes frias (1997, 2001, 2006, 2010, 2011 e 2012). Áreas com confiança estatística de 95% estão pontilhadas. Para as variáveis do balanço de energia (Radiação Solar e Termal em Superfície e Fluxo de Calor Latente e Sensível em Superfície) é importante ressaltar que a Reanálise ERA5 considera os fluxos da superfície para a atmosfera como negativos. 32

Figura 4.15 - Compostos de anomalia de fluxo de calor latente em superfície [$W.m^{-2}$], com relação ao período 1991-2020, durante os anos de: (a) máxima frequência de ciclones (1997, 2005, 2006, 2008, 2010 e 2015); (b) máxima frequência de frentes frias (1996, 1998, 1999, 2003, 2009 e 2013); (c) mínima frequência de ciclones (1992, 1994, 2003, 2014, 2018 e 2019) e (d) mínima frequência de frentes frias (1997, 2001, 2006, 2010, 2011 e 2012). Áreas com confiança estatística de 95% estão pontilhadas. Para as variáveis do balanço de energia (Radiação Solar e Termal em Superfície e Fluxo de Calor Latente e Sensível em Superfície) é importante ressaltar que a Reanálise ERA5 considera os fluxos da superfície para a atmosfera como negativos. 33

Figura 4.16 - Compostos de anomalia de fluxo de calor sensível em superfície [$W.m^{-2}$], com relação ao período 1991-2020, durante os anos de: (a) máxima frequência de ciclones (1997, 2005, 2006, 2008, 2010 e 2015); (b) máxima frequência de frentes frias (1996,

1998, 1999, 2003, 2009 e 2013); (c) mínima frequência de ciclones (1992, 1994, 2003, 2014, 2018 e 2019) e (d) mínima frequência de frentes frias (1997, 2001, 2006, 2010, 2011 e 2012). Áreas com confiança estatística de 95% estão pontilhadas. Para as variáveis do balanço de energia (Radiação Solar e Termal em Superfície e Fluxo de Calor Latente e Sensível em Superfície) é importante ressaltar que a Reanálise ERA5 considera os fluxos da superfície para a atmosfera como negativos. 35

Figura 4.17 - Compostos de anomalia de cobertura total de nuvens, com relação ao período 1991-2020, durante os anos de: (a) máxima frequência de ciclones (1997, 2005, 2006, 2008, 2010 e 2015); (b) máxima frequência de frentes frias (1996, 1998, 1999, 2003, 2009 e 2013); (c) mínima frequência de ciclones (1992, 1994, 2003, 2014, 2018 e 2019) e (d) mínima frequência de frentes frias (1997, 2001, 2006, 2010, 2011 e 2012). Áreas com confiança estatística de 95% estão pontilhadas. 37

Figura 4.18 - Compostos de anomalia de linha de corrente em 850 hPa, com relação ao período 1991-2020, durante os anos de: (a) máxima frequência de ciclones (1997, 2005, 2006, 2008, 2010 e 2015); (b) máxima frequência de frentes frias (1996, 1998, 1999, 2003, 2009 e 2013); (c) mínima frequência de ciclones (1992, 1994, 2003, 2014, 2018 e 2019) e (d) mínima frequência de frentes frias (1997, 2001, 2006, 2010, 2011 e 2012). 39

Figura 4.19 - Compostos dos anos de máxima frequência de ciclones (1997, 2005, 2006, 2008, 2010 e 2015) de: a) Anomalia de velocidade potencial [$10^6 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ – sombreado] e anomalia de vento divergente [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ – vetor] em 200 hPa; b) Anomalia de TSM [$^{\circ}\text{C}$], áreas com confiança estatística de 95% estão pontilhadas; c) Divergência do fluxo ondulatório [$10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ – sombreado] e função corrente [contorno] em 200 hPa e d) Anomalia de Linha de Corrente em 200 hPa. Anomalias com relação ao período 1991-2020. 41

Figura 4.20 - Compostos dos anos de máxima frequência de frentes frias (1996, 1998, 1999, 2003, 2009 e 2013) de: a) Anomalia de velocidade potencial [$10^6 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ – sombreado] e anomalia de vento divergente [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ – vetor] em 200 hPa; b) Anomalia de TSM [$^{\circ}\text{C}$], áreas com confiança estatística de 95% estão pontilhadas; c) Divergência do fluxo ondulatório [$10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ – sombreado] e função corrente [contorno] em 200 hPa e d) Anomalia de Linha de Corrente em 200 hPa. Anomalias com relação ao período 1991-2020. 43

Figura 4.21 – Compostos dos anos de mínima frequência de ciclones (1992, 1994, 2003, 2014, 2018 e 2019) de: a) Anomalia de velocidade potencial [$10^6 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ – sombreado] e

anomalia de vento divergente [m.s^{-1} – vetor] em 200 hPa; b) Anomalia de TSM [$^{\circ}\text{C}$], áreas com confiança estatística de 95% estão pontilhadas; c) Divergência do fluxo ondulatório [10^{-6} m.s^{-2} – sombreado] e função corrente [contorno] em 200 hPa e d) Anomalia de Linha de Corrente em 200 hPa. Anomalias com relação ao período 1991-2020.	45
Figura 4.22 - Compostos dos anos de mínima frequência de frentes frias (1997, 2001, 2006, 2010, 2011 e 2012) de: a) Anomalia de velocidade potencial [$10^6 \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ – sombreado] e anomalia de vento divergente [m.s^{-1} – vetor] em 200 hPa; b) Anomalia de TSM [$^{\circ}\text{C}$], áreas com confiança estatística de 95% estão pontilhadas; c) Divergência do fluxo ondulatório [10^{-6} m.s^{-2} – sombreado] e função corrente [contorno] em 200 hPa e d) Anomalia de Linha de Corrente em 200 hPa. Anomalias com relação ao período 1991-2020.	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Modelo da Tabela de Contingência para avaliação dos métodos objetivos. Adaptado de (Wilks, 1995).....	12
Tabela 4.1 - Tabela de Contingência para os casos de ciclones na BS durante o outono de 2008 e primavera de 2010.	15
Tabela 4.2 - Tabela de Contingência para os casos de frentes frias na BS durante a primavera de 2004.	15

LISTA DE ABREVIACÕES

AF	Alta Migratória Fria
ASAS	Alta Subtropical do Atlântico Sul
B	<i>Bias</i>
BS	Bacia de Santos
CDS	<i>Climate Data Store</i>
CFSR	<i>Climate Forecast System Reanalysis</i>
ECMWF	<i>European Centre for Medium-Range Weather Forecasts</i>
ENOS	El-Niño Oscilação Sul
ERSSTv5	<i>Extended Reconstructed Sea Surface Temperature Version 5</i>
FAR	<i>False Alarm</i>
GOES	<i>Geostationary Operational Environmental Satellite</i>
GPCP	<i>Global Precipitation Climatology Project</i>
ICOADS	<i>International Comprehensive Ocean-Atmosphere Dataset</i>
MERRA-2	<i>Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Application v2</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NCAR	<i>National Center for Atmospheric Research</i>
NCEP	<i>National Centers for Environmental Prediction</i>
NOAA	<i>National Oceanic & Atmospheric Administration</i>
PNMM	Pressão ao Nível Médio do Mar
POD	Probabilidade de Detecção
SAM	Modo Anular Sul
TS	<i>Threat Score</i>
TSM	Temperatura da Superfície do Mar
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul

1 INTRODUÇÃO

A Bacia de Santos (BS), localizada no Oceano Atlântico, em sua maior parte na costa sudeste brasileira (Figura 1.1), estendendo-se desde Florianópolis (Santa Catarina) até Cabo Frio (Rio de Janeiro), é uma importante região petrolífera *off-shore* brasileira. Na BS estão presentes expressivos campos de exploração do pré-sal, cuja produção teve início em 2010 e em 2016 já respondia por mais de 70% da produção da Petrobrás nessa camada. O pré-sal é uma formação rochosa localizada no subsolo da costa brasileira, que se estende entre os estados de Santa Catarina e Espírito Santo, atingindo uma área de 800 km de extensão por 200 km de largura (<http://www.petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/areas-de-atuacao/exploracao-e-producao-de-petroleo-e-gas/pre-sal/>).

A motivação para realização deste trabalho se deve ao fato da intensificação da produção e do escoamento de petróleo e gás natural e, conseqüentemente, do aumento do tráfego de embarcações na BS, demandando uma maior compreensão da climatologia da região.

A importância deste trabalho para o setor de petróleo, gás natural, energia e biocombustíveis compreende desde servir como subsídio ao planejamento e gestão ambiental da região até apoiar as operações de produção e escoamento de petróleo e gás natural na BS. Dessa forma, um maior entendimento do comportamento dos ciclones e dos sistemas frontais, que são os principais sistemas atmosféricos responsáveis pela geração de chuvas e ventos fortes na região de estudo, se faz necessário.

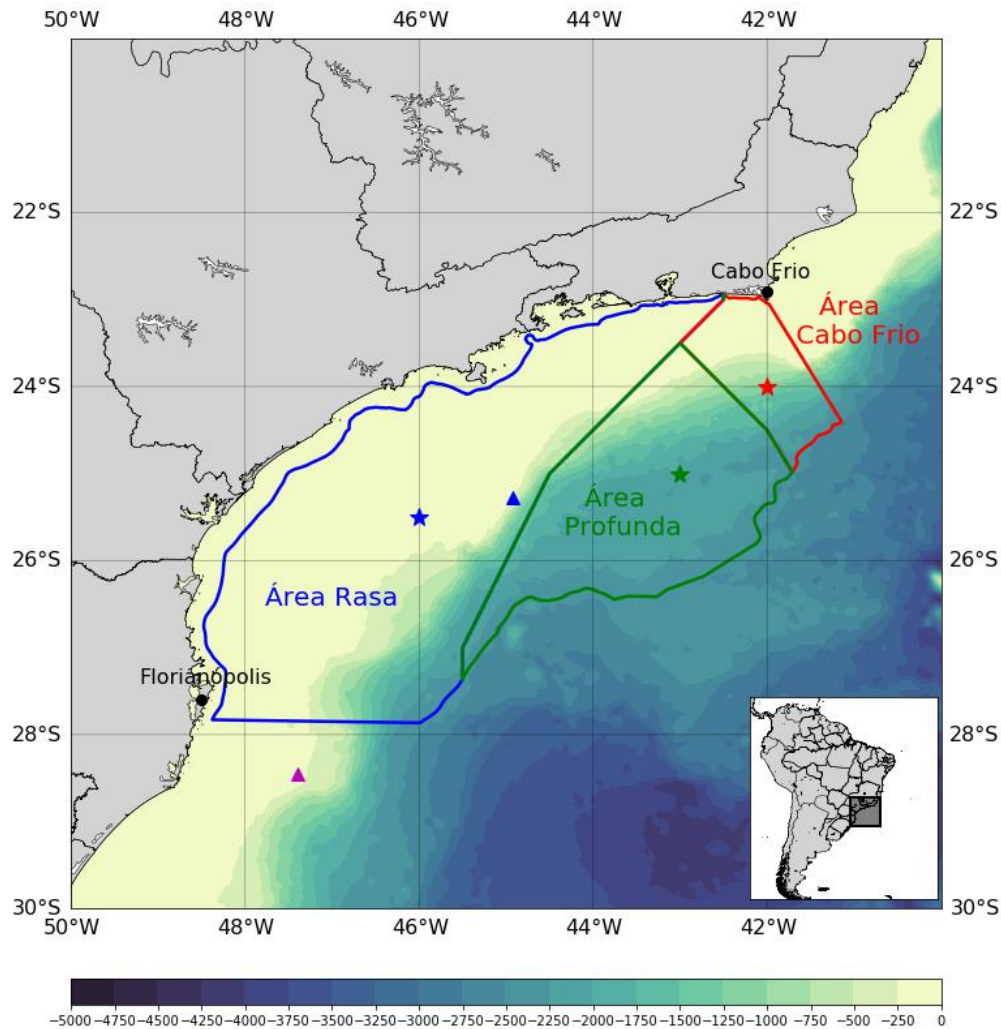


Figura 1.1 - Mapa da Baía de Santos, localizada sobre o Oceano Atlântico, aproximadamente entre os paralelos 28°S e 23°S e meridianos 49°W e 41°W e suas três subdivisões: Área Rasa (azul), Área Profunda (verde) e Área Cabo Frio (vermelha). O campo em sombreado indica a batimetria da região (m).

1.1 OBJETIVOS

Devido à grande importância dos ciclones e sistemas frontais na modulação do tempo e clima sobre a região da BS, o objetivo deste trabalho é desenvolver uma climatologia desses sistemas na região.

Como objetivos específicos, destacam-se:

- Utilização de métodos objetivos e avaliação de suas habilidades para identificar a ocorrência de ciclones e frentes frias;
- Investigação das possíveis causas para ocorrência das maiores e menores frequências anuais de ambos os sistemas (ciclones e frentes frias).

Este trabalho está organizado em cinco capítulos, sendo este primeiro uma breve introdução do tema. O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica sobre as características dos ciclones e dos sistemas frontais. No Capítulo 3 encontra-se a descrição dos dados e das metodologias utilizadas na detecção de cada um dos sistemas e a verificação dos métodos objetivos. O Capítulo 4 mostra os resultados obtidos da frequência de ambos os sistemas, as estatísticas espaciais dos ciclones e as análises físicas dos anos de extremos máximos e mínimos de ciclones e frentes frias. Por fim, no Capítulo 5 encontram-se as conclusões deste trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CICLONES

Os ciclones são centros de baixa pressão relativa com circulação ciclônica (horária) no Hemisfério Sul (Ahrens, 2011). Os ciclones extratropicais (tropicais) possuem um núcleo frio (quente) profundo e são assimétricos (simétricos) na sua fase madura. Já os ciclones subtropicais apresentam ambas as estruturas dos ciclones extratropicais e tropicais. Eles são assimétricos, porém não frontais, possuem um núcleo quente em baixos níveis e um núcleo frio em altos níveis (Hart, 2003).

De acordo com Gan & Rao (1991), na região do continente sul-americano existem duas áreas preferenciais para a ocorrência de ciclogêneses (Figura 2.1), que estão localizadas a leste da Cordilheira dos Andes: uma sobre o golfo de San Matias, na Argentina (aproximadamente 42,5°S/62,5°W) e outro sobre o Uruguai (aproximadamente 32,5°S/55°W). Apesar da ocorrência de ciclones ao longo de todo o ano, essas duas regiões possuem sazonalidades diferentes. O núcleo do Uruguai (Golfo de San Matias) apresenta uma maior (menor) quantidade de ciclones durante o inverno (verão). Uma estimativa preliminar da frequência anual de ciclones extratropicais na BS, de acordo com a Figura 2.1 seria de aproximadamente entre 10 e 20 ciclones por ano. Contudo, é importante realçar que em Gan & Rao (1991) a contabilização do número de ciclones foi feita de forma subjetiva, através da análise de 10 anos de cartas de superfície do período de janeiro de 1979 a dezembro de 1988.

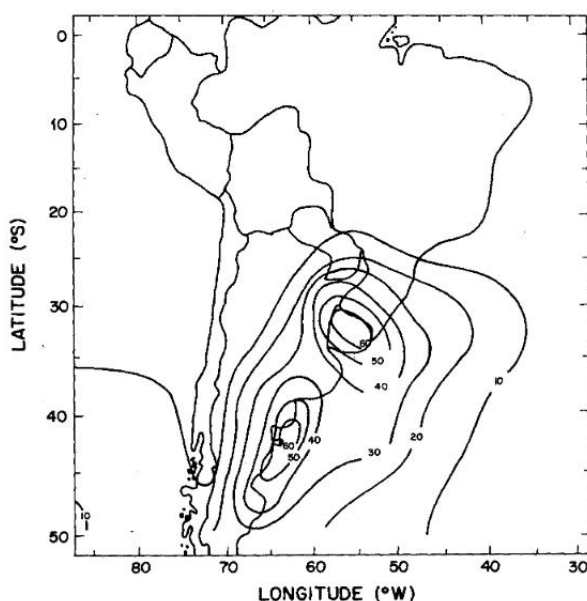


Figura 2.1 - Distribuição anual de ciclogênese para América do Sul. Fonte: Extraído de Gan & Rao (1991).

Reboita (2008) e Sinclair (1996), em estudos mais recentes, têm indicado a região leste do Sul/Sudeste do Brasil, ao norte de 30°S, sobre o Oceano Atlântico, como outra área ciclogênética na América do Sul, destacada na Figura 2.2 pelo quadrado preto. Essa terceira região possui maior frequência de ciclones durante o verão. Apesar disso, segundo Gan & Rao (1991), no total, a maior frequência de ciclogêneses sobre a América do Sul ocorre nos meses de inverno. Beu & Ambrizzi (2006) realizaram um estudo climatológico dos ciclones na América do Sul, utilizando um esquema numérico desenvolvido por Murray & Simmonds (1991) em 30 anos da Reanálise do *National Centers for Environmental Prediction - National Center for Atmospheric Research* (NCEP-NCAR). Mesmo com uma climatologia mais completa e recente, seus resultados concordam com a maior frequência geral de ciclones durante o inverno, descrita por Gan & Rao (1991). Eles também mostraram que há uma redução significativa da frequência de ciclones do inverno para as demais estações. Além disso, no inverno, há um maior número de ciclones se formando sobre o continente, passando pela Argentina, Uruguai ou Brasil e se deslocando em seguida para o Oceano Atlântico.

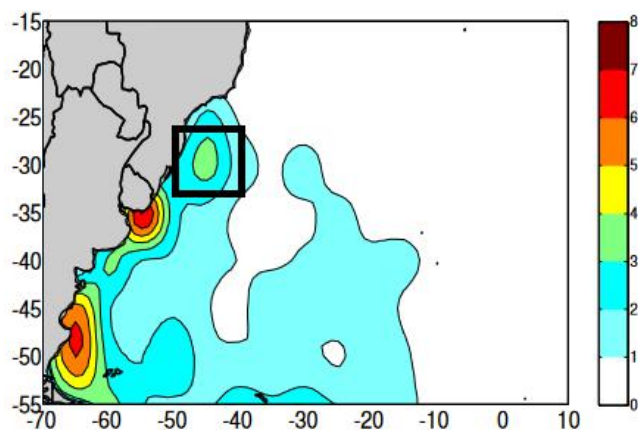


Figura 2.2 - Densidade de ciclogêneses (10^{-4} km^{-2}) no período de verão nos anos de 1990 a 1999. Extraído de Reboita (2008), com resultados indicando zonas preferenciais para ciclogênese. O quadrado preto destaca uma nova região ciclogênética, além das anteriormente destacadas por Gan & Rao (1991).

Além dos ciclones extratropicais, a região da BS também é afetada por ciclones subtropicais. Gozzo et al. (2014) desenvolveram uma climatologia de ciclones subtropicais no Atlântico Sul. Eles mostraram que esses ciclones possuem maior (menor) frequência durante o verão e outono (inverno), mas com uma alta variabilidade interanual. Tanto a maior frequência de ciclogênese (formação do ciclone), quanto a de ciclólise (dissipação do ciclone) ocorrem na região da BS.

2.2 FRENTE FRIAS

Segundo Bjerknes (1919), uma frente é a zona de transição entre duas massas de ar com características físicas distintas e fortes gradientes de temperatura e umidade, o que é atualmente chamada de zona frontal. Mais recentemente, a literatura passou a definir a frente como sendo a intersecção da superfície frontal com o nível da superfície ou qualquer outro nível, e é esta intersecção que é representada nas cartas sinóticas de superfície ou altitude (Oliveira et al., 2001; Vianello & Alves, 1991). Um sistema frontal clássico é composto por uma frente fria, uma frente quente e um centro de baixa pressão em superfície, denominado ciclone (Bjerknes, 1919). Um sistema frontal típico que evolui sobre a América do Sul (Figura 2.3), tem uma configuração atmosférica constituída da presença da Alta Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) em sua dianteira (linha pontilhada vermelha) e um sistema de alta pressão frio, também conhecido como “Alta Migratória Fria” (AF) em sua retaguarda (linha pontilhada azul claro), avançando em direção ao ASAS. Entre os dois sistemas de alta pressão, encontra-se regiões de pressões mais baixas, com a presença da frente fria (linha azul escura com triângulos em sua borda), da frente quente (linha vermelha escura com meio círculos em sua borda) e de um ciclone extratropical na retaguarda (denotado pela letra B) na região de oclusão do sistema frontal (linha lilás).

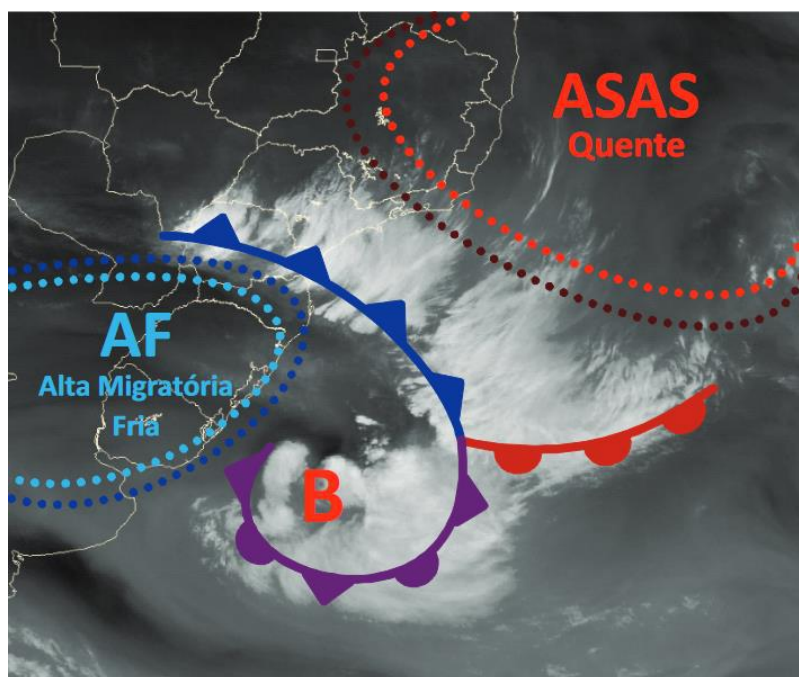


Figura 2.3 - Modelo conceitual de uma frente fria evoluindo na América do Sul. Fonte: Extraído de Dereczynski & Menezes (2016).

Os sistemas frontais são de grande importância devido ao fato de provocarem mudanças significativas no tempo, incluindo chuvas intensas e ventos fortes. As frentes frias, onde a massa de ar frio desloca a massa de ar quente na superfície, são facilmente identificadas em imagens de satélite. Elas atuam durante todo o ano sobre a América do Sul e geralmente se deslocam de sudoeste para nordeste sobre o continente e Oceano Atlântico adjacente (Andrade, 2005; Oliveira, 1986). Andrade (2005) avaliou a climatologia das frentes frias em diversas regiões da América do Sul (Figura 2.4). Seus resultados mostraram que a frequência de frentes frias diminui em direção ao equador. Para as Regiões Sul e Sudeste (Áreas 4, 5, 6 e 7), a menor frequência de frentes ocorre durante o verão, aumentando gradativamente até um máximo na primavera. Considerando apenas as áreas próximas à BS (Áreas 4 e 6), ocorrem em média 56 frentes frias durante o ano: 12 no verão, 14,5 no outono, 14 no inverno e 15,5 na primavera.

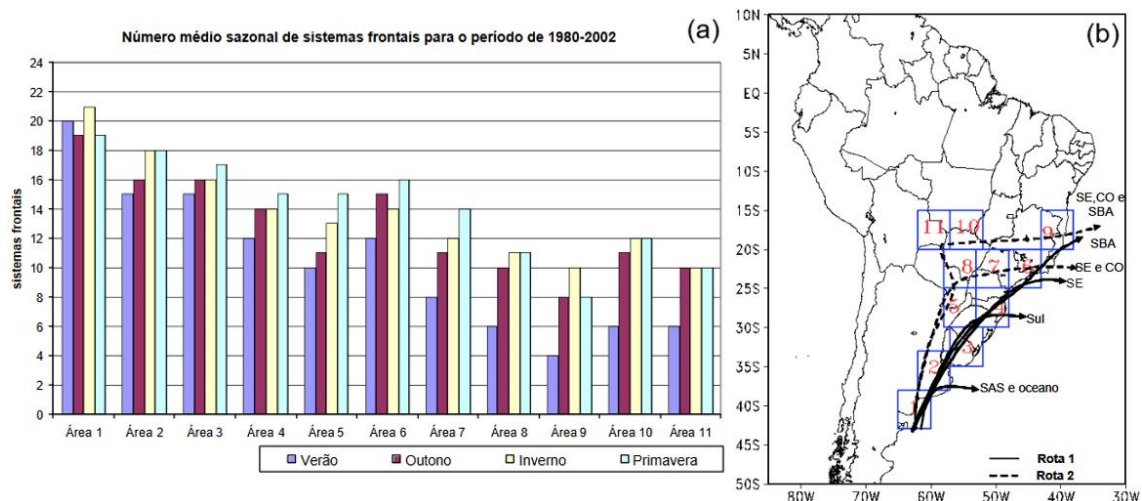


Figura 2.4 - (a) Frequência média de frentes frias por estação do ano para o período de 1980-2002 em cada uma das áreas descritas em (b). Fonte: Extraído de Andrade, 2005.

Cavalcanti & Kousky (2009) estudaram a passagem de sistemas frontais sobre diversos aspectos, utilizando-se dos dados associados aos 50 casos mais intensos entre os anos de 1979 e 2005. Dos compostos desses 50 casos foi possível extrair uma série de informações a respeito do comportamento de algumas variáveis atmosféricas ao longo de uma passagem de sistema frontal sobre essas regiões do Brasil, incluindo o Atlântico Sul. Tais resultados foram compilados e organizados em forma de figuras, como a Figura 2.5, que apresenta as variáveis vento à superfície (vetor) e anomalia de temperatura em 925 hPa (sombreado). No momento inicial da formação do sistema frontal, (tempo “t-1”), o escoamento sobre a região continental ao sul do Brasil encontra-se de Norte, confluindo

sobre o oceano com um escoamento de sudoeste vindo da porção sul da Argentina. No momento em que a frente se organiza (tempo “t”), a presença do ASAS pode ser percebida claramente na dianteira do sistema, e as configurações nos campos de vento em superfície e anomalias de temperatura em 925 hPa são consistentes com uma frente fria localizada na região central da Argentina, se estendendo até o Atlântico Sul. Nesse momento a confluência sobre o oceano aparece de forma mais marcante, com um escoamento intenso de noroeste proveniente da Região Sul do Brasil encontrando o mesmo escoamento de sudoeste vindo da Argentina, porém a confluência encontra-se deslocada para nordeste de sua posição anterior. Quando o sistema frontal chega ao sul do Brasil (tempo “t+1”), o escoamento de sudoeste encontra-se cada vez mais deslocado para norte, já atingindo a porção continental da Região Sul Brasileira e a BS, e já existe uma marcante convergência de escoamento sobre a Região Sudeste. Nesse mesmo momento também pode-se observar a alta migratória fria muito bem configurada na retaguarda da posição da frente, e que se desloca para nordeste, acompanhando a frente fria. Nos tempos subsequentes (“t+2” e “t+3”) o sistema frontal continua a avançar, atingindo a Região Sudeste e fazendo com que os ventos sobre essa região se tornem de padrão sudoeste. Tal padrão de ventos já é capaz de promover advecção fria e ocasionar queda significativa das temperaturas nas Regiões Sul e Sudeste do Brasil, incluindo áreas costeiras e oceânicas. Além da queda de temperatura, tais ventos, quando intensos, são capazes de produzir transtornos nas áreas onde atingem.

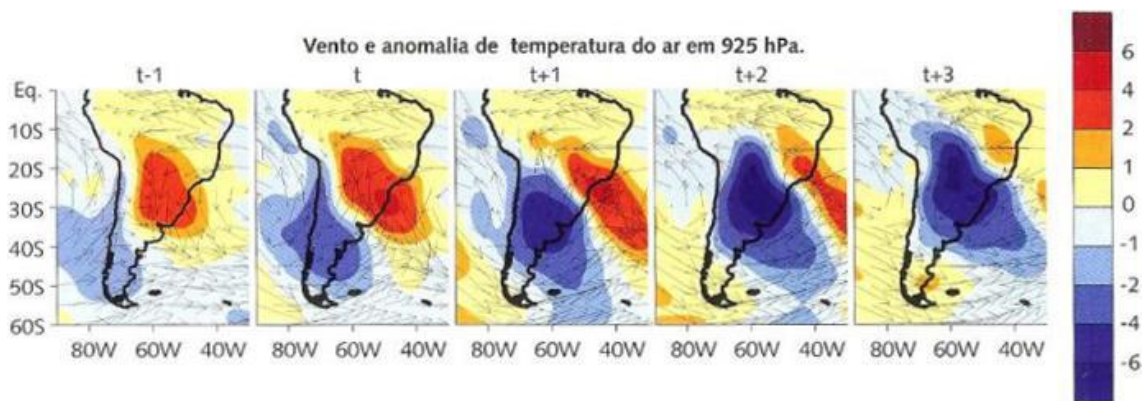


Figura 2.5 - Evolução diária dos compostos, do tempo “t-1” ao tempo “t+3” do vento em superfície (vetor) e anomalias de temperatura em 925 hPa (sombreado), para as 50 frentes frias mais fortes que atingiram as regiões Sul e Sudeste do Brasil entre 1979 e 2005. Fonte: Extraído de Cavalcanti & Kousky (2009).

3 DADOS E METODOLOGIA

Neste capítulo são apresentados os conjuntos de dados que serão utilizados nos métodos objetivos, na verificação desses métodos e nas análises físicas (Seção 3.1). Também são apresentadas as metodologias para detectar os sistemas sinóticos, para verificar os métodos objetivos, para definir os anos extremos e para criação dos compostos (Seção 3.2).

3.1 DADOS

3.1.1 REANÁLISE ERA5

A ERA5 é a quinta geração de reanálise global produzida pelo *European Centre for Medium-Range Weather Forecast* (ECMWF). Ela começou a ser produzida no início de 2016 e em janeiro de 2019, o conjunto completo horário desde 1979 até o presente foi disponibilizado no *Climate Data Store* (CDS) do *Copernicus Climate Change Service*. Além de sua alta resolução espacial de $0,25^\circ \times 0,25^\circ$, a ERA5 apresenta várias inovações em relação à antecessora reanálise ERA-Interim, incluindo saídas horárias e uma estimativa de incertezas. A reanálise ERA5 é gerada em grade Gaussiana, ou seja, usando diferentes números de pontos de grade ao longo de diferentes latitudes. Em seguida, é feita uma conversão para uma grade regular, mantendo a separação em pontos de grade em metros aproximadamente constante, ou seja, 31 km para a reanálise em alta resolução (determinística) e 63 km para os produtos dos membros do conjunto (probabilística). Na vertical, essa reanálise apresenta 137 níveis, desde 1000 hPa até 1 hPa (Hersbach et al., 2020).

Neste trabalho, foram utilizadas as saídas horárias de Vorticidade Relativa em 850 hPa [s^{-1}], Pressão ao Nível Médio do Mar (PNMM) [hPa], Temperatura do Ar em 925 hPa [$^\circ C$] e Componente Meridional do Vento em 925 hPa [$m.s^{-1}$], além de saídas mensais de PNMM [hPa], Temperatura do Ar em 850 hPa [$^\circ C$], Altura Geopotencial em 200 e 700 hPa [m], Componentes Zonal e Meridional do Vento em 200 e 850 hPa [$m.s^{-1}$], Cobertura Total de Nuvens, Radiação Solar e Termal Líquida em Superfície [$W.m^{-2}$] e Fluxo de Calor Latente e Sensível em Superfície [$W.m^{-2}$], do período de 1991 a 2020.

3.1.2 *EXTENDED RECONSTRUCTED SEA SURFACE TEMPERATURE VERSION 5*

Os dados mensais de Temperatura da Superfície do Mar (TSM) [°C], do período de 1991 a 2020, utilizados neste trabalho foram obtidos através do *Extended Reconstructed Sea Surface Temperature Version 5* (ERSSTv5). O ERSST é baseado no conjunto de dados de TSM derivados do *International Comprehensive Ocean–Atmosphere Dataset* (ICOADS) com uma resolução espacial de 2,0° x 2,0° (Huang et al., 2017). Utilizou-se a versão 5 do ERSST devido à melhora, em relação à sua versão anterior (ERSSTv4), da representação da variabilidade espacial e temporal sobre os oceanos globais.

3.1.3 *GLOBAL PRECIPITATION CLIMATOLOGY PROJECT*

Os dados mensais de Precipitação [mm.dia⁻¹], do período de 1991 a 2020, foram obtidos do *Global Precipitation Climatology Project* (GPCP) com uma resolução espacial de 2,5° x 2,5° (Adler et al., 2003). Estes dados são derivados de observações em superfície e estimativas de precipitação por canais de satélites de órbita baixa e de canais infravermelhos de satélites de órbita geostacionária. A vantagem da utilização do GPCP é sua cobertura global, incluindo áreas oceânicas. Além disso, o GPCP possui uma ótima correspondência com a precipitação de estações no Brasil tropical e subtropical.

3.1.4 *SATÉLITE GOES*

A série *Geostationary Operational Environmental Satellite* (GOES) é essencial para a observação contínua do ambiente terrestre devido ao fornecimento de dados (atmosféricos e oceânicos) e imagens avançadas para usuários públicos, comerciais e cientistas. Neste trabalho, foram utilizadas as imagens do canal infravermelho do GOES, que é um satélite geostacionário operado por esforços colaborativos entre a *National Oceanic & Atmospheric Administration* (NOAA) e a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA).

3.2 METODOLOGIA

3.2.1 DETECÇÃO DOS CICLONES

A climatologia dos ciclones foi gerada utilizando saídas horárias de vorticidade relativa em 850 hPa da reanálise ERA5. O período analisado foi 1991-2020 e os resultados foram obtidos para as áreas apresentadas na Figura 1.1. Para a identificação dos ciclones, utilizou-se um programa com método lagrangeano chamado TRACK (Hodges, 1994).

O TRACK é projetado para ser executado em uma esfera a fim de evitar o uso de projeções que possam introduzir *bias*, entretanto, a identificação inicial do ciclone é realizada em uma projeção polar estereográfica para evitar *bias* gerados ao usar uma projeção latitude-longitude, particularmente em latitudes médias e altas. Os ciclones são inicialmente identificados como mínimos no campo de vorticidade relativa e então são refinados pela determinação dos locais fora de grade usando a interpolação B-spline e minimização das quedas mais atenuadas, produzindo rastreamentos mais suaves. O TRACK identifica todos os pontos característicos dos ciclones no conjunto de dados e, em seguida, esses pontos são agrupados em trajetórias chamadas “trilhas ciclônicas”. Primeiro, o algoritmo utiliza o método do vizinho mais próximo, que verifica o ponto mais próximo com as mesmas características e o associa à trajetória.

Além do método objetivo de identificação e rastreamento dos ciclones, o TRACK também utiliza limiares para remover sistemas estacionários que possuam tempo de vida menor que um determinado intervalo de tempo (por exemplo, dois dias) e deslocamento menor que um intervalo de quilômetros (por exemplo, 500 km) (Hodges, 1994, 1995, 1999). Optou-se pelo limiar de 8 horas para o tempo de vida mínimo e 500 km para a distância mínima de deslocamento. Neste trabalho, o TRACK foi configurado para detectar as trajetórias dos ciclones em todo o Hemisfério Sul, com o objetivo de minimizar possíveis perdas de trajetórias no processo de delimitação da área na BS. Após a detecção feita pelo TRACK, foram selecionados apenas os ciclones que atuaram na região da BS.

Além disso, o TRACK também possui uma ferramenta de cálculo estatístico e, neste trabalho, serão apresentadas algumas variáveis contendo estatísticas espaciais dos ciclones, como densidade de ciclogênese [ciclones por unidade de área], intensidade média da vorticidade relativa [10^{-5} s^{-1}], tempo de vida médio [dias] e velocidade média [km.h^{-1}].

3.2.2 DETECÇÃO DAS FRENTE FRIAS

A climatologia das frentes frias foi realizada utilizando saídas horárias da Reanálise ERA5 para o período 1991-2020. As seguintes variáveis foram utilizadas: PNMM, temperatura do ar em 925 hPa e componente meridional do vento também em 925 hPa. Aplicou-se a metodologia proposta por Andrade (2005), que considera a média diária em uma área das variáveis descritas acima. Para contabilizar a passagem das frentes frias, foi avaliado se no intervalo de um dia para o outro, considerando a média dos pontos da área analisada, ocorreria: i) queda de 0,1 °C na temperatura do ar em 925 hPa; ii) aumento de 0,1 hPa na PNMM e iii) componente meridional do vento em 925 hPa positiva. Essa metodologia foi aplicada para as áreas apresentadas na Figura 1.1.

3.2.3 VERIFICAÇÃO DOS MÉTODOS OBJETIVOS

Para verificarmos a eficiência dos métodos objetivos de detecção de ciclones e frentes frias, foram avaliadas estações do ano em que ocorreu uma alta frequência desses sistemas. Como os ciclones possuem uma ocorrência menor que as frentes na BS, optou-se por avaliar duas estações, outono de 2008 e primavera de 2010 (total de 18 casos detectados pelo método). Para as frentes, escolheu-se a primavera de 2004 (18 casos detectados pelo método). A verificação ocorreu através da comparação com imagens de satélite no canal infravermelho nesses períodos, criando Tabelas de Contingência 2x2 (Tabela 3.1), e de índices estatísticos. Na Tabela 3.1, o termo “a” se aplica a casos detectados pelo método e observados nas imagens de satélite, o termo “b”, casos detectados pelo método, mas que não foram observados nas imagens de satélite, o termo “c”, não detectados pelo método, mas observados nas imagens de satélite e o termo “d” implica em dias onde não houve ocorrência do sistema (sem observação e sem detecção). Visto que o objetivo é avaliar se os métodos conseguem identificar os eventos, optou-se por não utilizar o termo “d”.

Tabela 3.1 - Modelo da Tabela de Contingência para avaliação dos métodos objetivos. Adaptado de (Wilks, 1995).

	Observado	Não Observado
Detectado	a	b
Não Detectado	c	d

Os índices estatísticos utilizados estão listados abaixo:

a. Índice Crítico de Acerto (*Threat Score*):

$$TS = \frac{a}{a + b + c} \quad (\text{Equação 3.1})$$

No qual o melhor caso é 1 e o pior é 0.

b. Índice de Falso Alarme (*False Alarm*)

$$FAR = \frac{b}{a + b + c} \quad (\text{Equação 3.2})$$

No qual o melhor caso é 0 e o pior é 1.

c. Probabilidade de Detecção

$$POD = \frac{b}{a + c} \quad (\text{Equação 3.3})$$

No qual o melhor caso é 1 e o pior é 0.

d. Viés (*Bias*)

$$B = \frac{a + b}{a + c} \quad (\text{Equação 3.4})$$

No qual $B > 1$, significa que o método superestimou a ocorrência do evento, $B < 1$, o método subestimou e $B = 1$, o método não está enviesado.

3.2.4 DEFINIÇÃO DOS ANOS EXTREMOS

A partir da climatologia da frequência dos ciclones e frentes frias, foram selecionados os quintis máximos e mínimos de cada sistema sinótico, ou seja, os anos em que ocorreram mais e menos sistemas, respectivamente, a fim de verificar as condições atmosféricas e oceânicas, que possam ter influenciado nesses anos extremos. Foram selecionados os anos 1997, 2005, 2006, 2008, 2010 e 2015 como as máximas ocorrências de ciclones e os anos 1992, 1994, 2003, 2014, 2018 e 2019 como as mínimas. Já para as frentes frias, foram os anos 1996, 1998, 1999, 2003, 2009 e 2013 como as máximas ocorrências e os anos 1997, 2001, 2006, 2010, 2011 e 2012 como as mínimas.

Para gerar os compostos destes anos extremos e realizar a análise física, foram utilizadas as saídas mensais de PNMM [hPa], Temperatura do Ar em 850 hPa [°C], Altura Geopotencial em 200 e 700 hPa [m], Componentes Zonal e Meridional do Vento em 200

e 850 hPa [m.s^{-1}], Cobertura Total de Nuvens, Radiação Solar e Termal Líquida em Superfície [W.m^{-2}] e Fluxo de Calor Latente e Sensível em Superfície [W.m^{-2}] da Reanálise ERA5, e dados mensais de TSM [$^{\circ}\text{C}$] do ERSSTv5 e Precipitação [mm.dia^{-1}] do GPCP. Para cada um destes campos, foram calculadas anomalias com relação à climatologia (1991-2020) com confiança estatística de 95%, utilizando a tabela T-Student bicaudal (Wilks, 2006).

Para as variáveis do balanço de energia (Radiação Solar e Termal Líquida em Superfície e Fluxo de Calor Latente e Sensível em Superfície) é importante ressaltar que a Reanálise ERA5 considera os fluxos da superfície para a atmosfera como negativos.

Para identificar anomalias de circulação atmosférica e suas fontes, foram calculadas anomalias de velocidade potencial, de vento divergente e do fluxo de atividade ondulatória utilizando as Componentes Zonal e Meridional do Vento [m.s^{-1}] e Altura Geopotencial [m] em 200 hPa. O fluxo de atividade ondulatória de Takaya e Nakamura (2001) é formulado em coordenadas cilíndricas no plano lat-lon, como por exemplo:

$$\begin{aligned}
 W = \frac{p \cos\Phi}{2|U|} & \left\{ \frac{U}{a^2 \cos^2\Phi} \left[\left(\frac{\partial\Psi'}{\partial\lambda} \right)^2 - \Psi' \frac{\partial^2\Psi'}{\partial\lambda^2} \right] \right. \\
 & + \frac{V}{a^2 \cos^2\Phi} \left[\frac{\partial\Psi'}{\partial\lambda} \frac{\partial\Psi'}{\partial\Phi} - \Psi' \frac{\partial^2\Psi'}{\partial\lambda\partial\Phi} \right] \frac{U}{a^2 \cos^2\Phi} \left[\frac{\partial\Psi'}{\partial\lambda} \frac{\partial\Psi'}{\partial\Phi} \right. \\
 & \left. \left. - \Psi' \frac{\partial^2\Psi'}{\partial\lambda\partial\Phi} \right] + \frac{V}{a^2} \left[\left(\frac{\partial\Psi'}{\partial\lambda} \right)^2 - \Psi' \frac{\partial^2\Psi'}{\partial\lambda^2} \right] \right\} + C_U M
 \end{aligned} \quad (\text{Equação 3.5})$$

Na Equação 3.5, U e V são a média zonal das componentes zonal e meridional do vento, respectivamente, Ψ' é o componente estacionário da função corrente em 200 hPa, Φ é a latitude, λ é a longitude, a é o raio da Terra, p é o nível de pressão em 200 hPa e as quantidades C_U e M representam a velocidade de fase na direção zonal e a transferência de momento para vórtices quase-geostróficos. Visto que a quantidade $C_U M$ mostra o efeito da propagação de fase da onda atmosférica, ondas estacionárias apresentam $C_U M$ igual a zero. Para estimar onde os grupamentos de ondas nascem ou se dissipam, utiliza-se a divergência de W, no qual valores positivos indicam fontes de ondas e valores negativos indicam sumidouros de ondas.

4 RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados os resultados da climatologia da frequência dos ciclones e frentes frias e suas respectivas variabilidades interanuais. Além disso, são apresentadas algumas características médias dos ciclones e a eficiência dos métodos objetivos.

Também se elabora uma análise física dos anos extremos de máximos e mínimos de ciclones e frentes frias, utilizando compostos, com o objetivo de avaliar fatores que contribuíram para os resultados encontrados. Dessa forma, são analisados os campos de anomalia das variáveis apresentadas na Seção 3.2.4.

4.1 VERIFICAÇÃO DOS MÉTODOS OBJETIVOS

A Tabela de Contingência para os casos de ciclones (Tabela 4.1) mostra um índice de acerto mediano, entretanto, ainda com bons resultados. O Índice Crítico de Acerto (Equação 3.1) foi de 57%, o Índice de Falso Alarme (Equação 3.2), 33%, a Probabilidade de Detecção (Equação 3.3), 80% e o Viés (Equação 3.4), 1,20 (superestimado).

Tabela 4.1 - Tabela de Contingência para os casos de ciclones na BS durante o outono de 2008 e primavera de 2010.

	Observado	Não Observado
Detectado	12	6
Não Detectado	3	-

Para os casos de frentes frias, a Tabela de Contingência (Tabela 4.2) mostra que a maior parte dos casos observados foram detectados pelo método. O Índice Crítico de Acerto foi de 76%, o Índice de Falso Alarme, 11%, a Probabilidade de Detecção, 84% e o Viés de 0,94 (subestimado).

Tabela 4.2 - Tabela de Contingência para os casos de frentes frias na BS durante a primavera de 2004.

	Observado	Não Observado
Detectado	16	2
Não Detectado	3	-

4.2 CLIMATOLOGIA DE CICLONES

4.2.1 FREQUÊNCIA E VARIABILIDADE INTERANUAL

Os resultados da frequência dos ciclones foram obtidos para as subáreas Rasa, Profunda e Cabo Frio e para a Área Total da BS (Figura 1.1). Os resultados mostram uma variação entre as subáreas e a Área Total (Figura 4.1), apresentando os maiores valores na Área Rasa. As maiores frequências ocorrem no verão e as menores, no inverno. Esse resultado está de acordo trabalhos prévios (Reboita et al., 2010), que apontam uma região ciclogênica próximo ao litoral da Região Sudeste do Brasil, com um máximo durante o verão. Nota-se que os desvios-padrão dos ciclones são altos, quando comparados aos valores médios, chegando a ultrapassar o valor médio em todas as estações para a Área Cabo Frio. Na região da BS como um todo passam em torno de 10 ciclones por ano, sendo aproximadamente 3 no verão, 2 no outono, 2 na primavera e 2 no inverno.

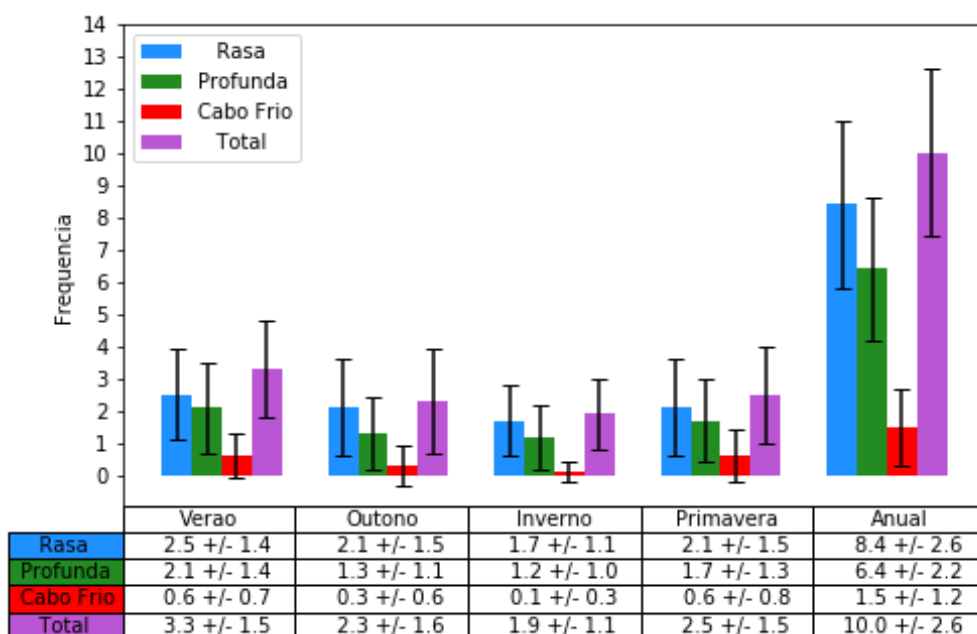


Figura 4.1 - Frequência e desvios-padrão de ciclones na BS por estação do ano e anualmente. Os valores são apresentados para a bacia como um todo (Total) e também para suas subdivisões Rasa, Profunda e Cabo Frio. Climatologia obtida a partir dos dados da Reanálise ERA5 para o período de 1991-2020.

Apesar do total anual médio na BS ser de 10 ciclones, a Figura 4.2 mostra que há uma grande variabilidade interanual na BS. Destacam-se os anos de 1994, 2014, 2018 e

2019, com valores de apenas 6 ciclones cada, e os anos de 2010 e 2015, com ocorrência de 16 ciclones cada.

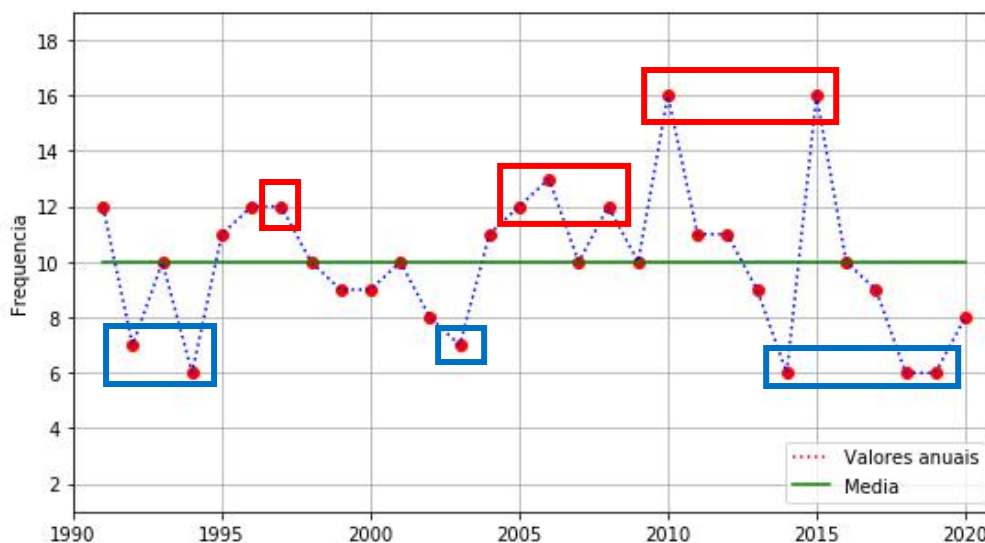


Figura 4.2 - Frequência média de ciclones por ano na BS. Valores apresentados para a área total da BS. Climatologia obtida a partir dos dados da Reanálise ERA5 para o período de 1991-2020. Anos com maior (menor) frequência de ciclones encontram-se destacados em vermelho (azul).

4.2.2 ESTATÍSTICAS ESPACIAIS

Analisando a densidade de ciclogêneses (Figura 4.3) verifica-se as três regiões ciclogênicas previamente identificadas em outros estudos, bem como suas sazonalidades. As regiões ciclogênicas encontradas coincidem com as encontradas por Gan & Rao (1991) e Reboita (2008), portanto, as análises aqui apresentadas irão considerar a posição dos centros de máxima ciclogênese sobre o Golfo de San Matias ($47^{\circ}\text{S}/65^{\circ}\text{W}$), sobre o Uruguai ($30^{\circ}\text{S}/60^{\circ}\text{W}$) e sobre a costa sul/sudeste do Brasil ($25^{\circ}\text{S}/45^{\circ}\text{W}$). É possível observar que, durante todas as estações do ano, o centro sobre o Golfo de San Matias se mostra bem configurado, apresentando sua maior intensidade durante o verão (Figura 4.3a). Por outro lado, o centro localizado sobre o Uruguai também se mostra configurado durante todas as estações, porém apresenta seu valor máximo durante o inverno (Figura 4.3c). Ambos os resultados encontrados concordam com as análises de Gan & Rao (1991). Já a terceira região ciclogênica sobre a costa sul/sudeste do Brasil se mostra configurada apenas durante o verão (Figura 4.3a), apresentando

densidade bem menor quando comparada aos demais centros, concordando com os resultados de Reboita (2008). Na região da BS, é possível identificar uma maior densidade de ciclogêneses em todas as subáreas durante o verão (Figura 4.3a), coincidindo com o máximo do centro sobre o sul/sudeste do Brasil. Além disso, nota-se valores também no sul da Área Rasa e na Área Profunda durante a primavera (Figura 4.3d).

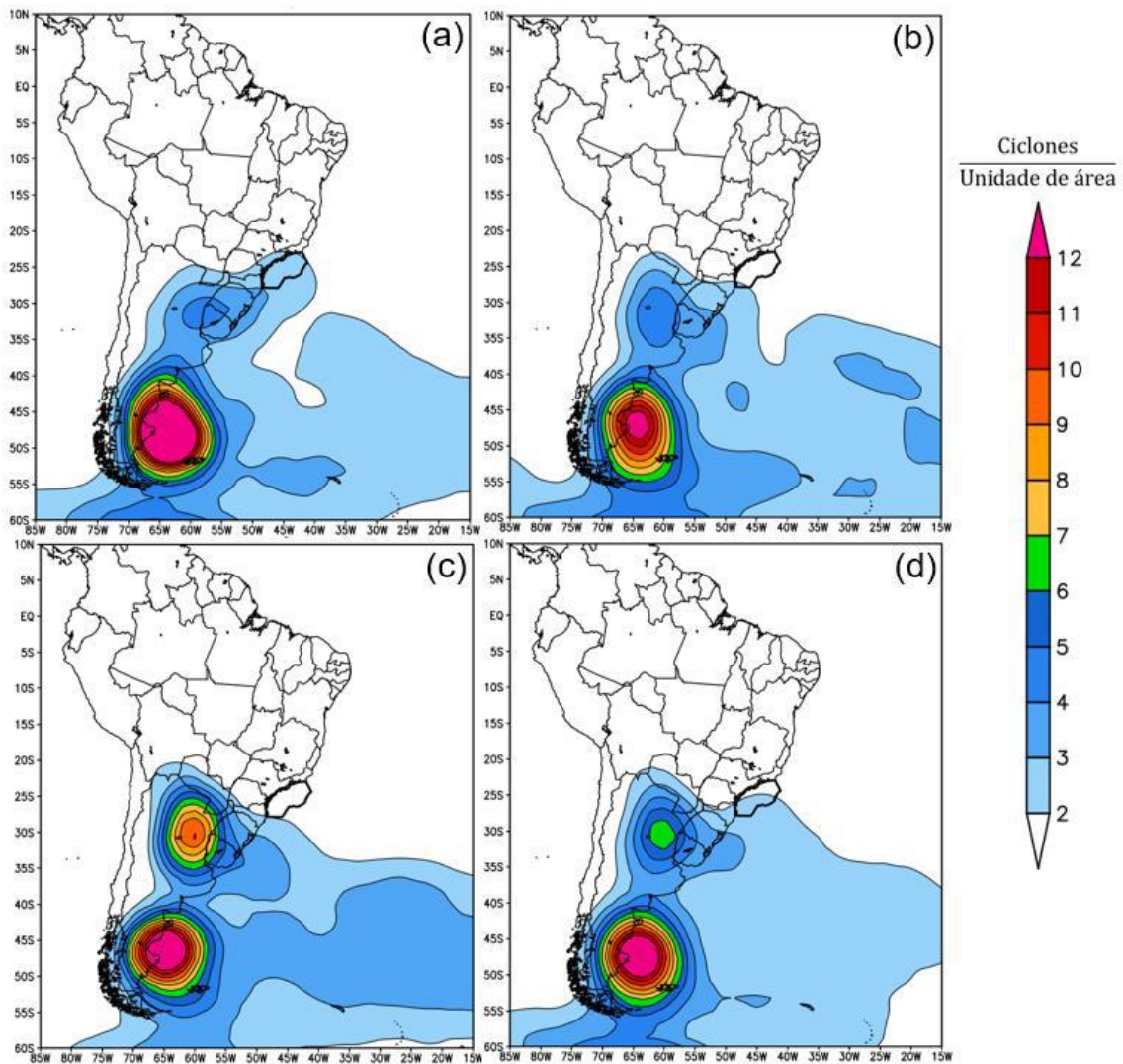


Figura 4.3 – Densidade de ciclogêneses [ciclones por unidade de área] durante o período de 1991-2020 nas estações de: a) Verão; b) Outono; c) Inverno e d) Primavera. A BS se encontra destacada em linha grossa.

A figura de intensidade média da vorticidade relativa dos ciclones (Figura 4.4), mostra que a maior intensidade dos ciclones (valores acima de $5,5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) ocorre na região central do Oceano Atlântico Sul Subtropical em todas as estações, podendo estar associada ao ramo ascendente da célula de Ferrel. Entretanto, as menores intensidades

(valores entre 2 e $2,5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) ocorrem no continente sobre a região central da fronteira entre o Chile e a Argentina ($35^{\circ}\text{S}/70^{\circ}\text{W}$) também em todas as estações. Na região da BS, verifica-se, em média, um valor de $2,5$ a $3,5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ da intensidade dos ciclones em todas as estações. Além disso, na porção sul da Área Rasa, há a ocorrência de um máximo de intensidade de até $4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ durante o inverno (Figura 4.4c) e a primavera (Figura 4.4d).

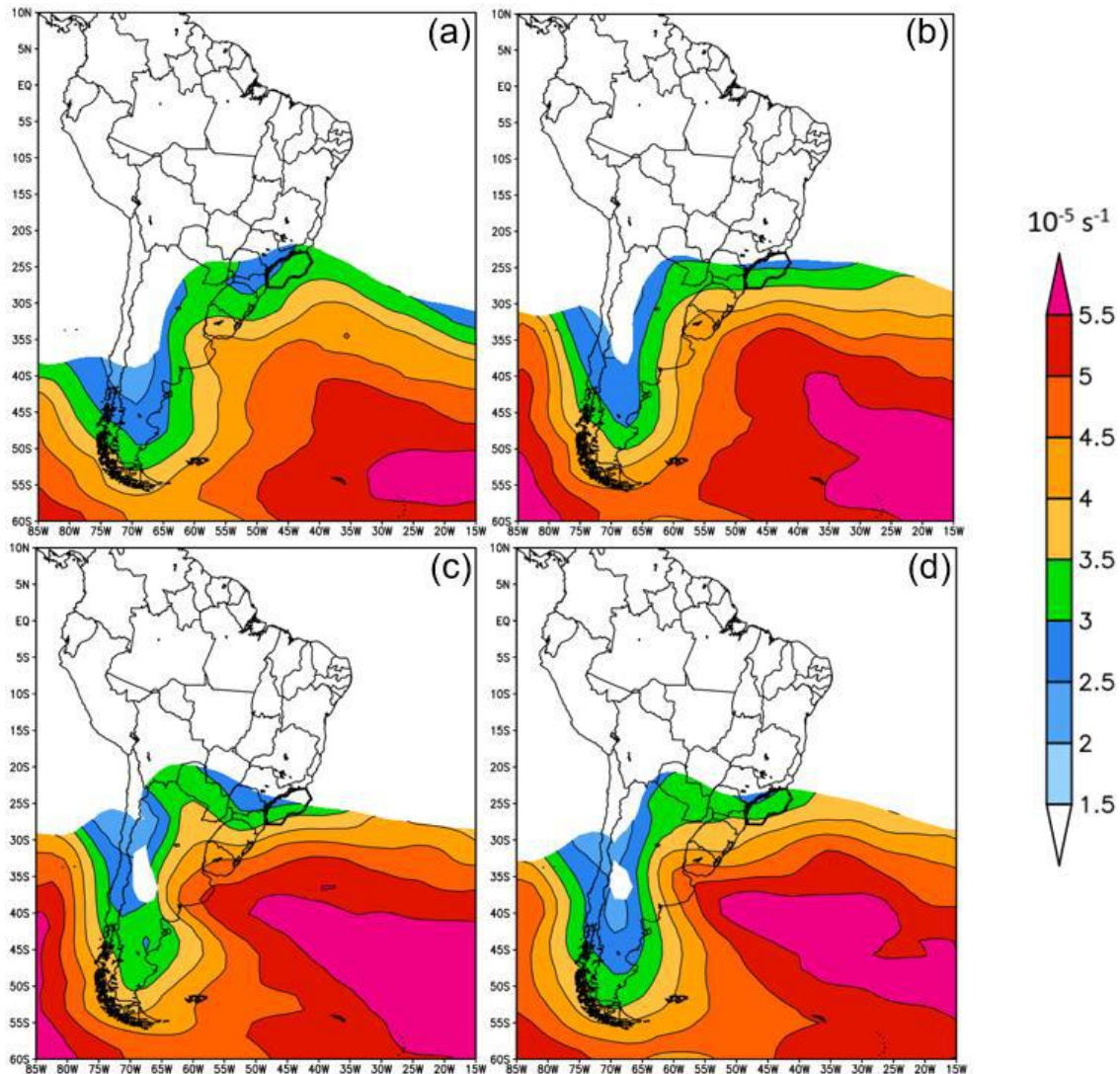


Figura 4.4 – Intensidade média da vorticidade relativa dos ciclones [10^{-5} s^{-1}] durante o período de 1991-2020 nas estações de: a) Verão; b) Outono; c) Inverno e d) Primavera. A BS se encontra destacada em linha grossa.

Analisando o tempo de vida médio dos ciclones (Figura 4.5), nota-se que os ciclones possuem duração média em torno de 5 a 6,5 dias durante todas as estações. Entretanto, é possível observar valores acima de 6,5 dias na porção norte da Argentina e no Paraguai

durante a primavera (Figura 4.5d). Há também a ocorrência de ciclones com tempo de vida inferior a 5 dias na região da Patagônia e Oceano adjacente durante o inverno (Figura 4.5c) e em pontos isolados, como na região central da fronteira entre Chile e Argentina durante a primavera (Figura 4.5d). Na região da BS, os ciclones possuem tempo de vida similar à média do Oceano Atlântico Sul (5 a 6,5 dias), porém sua duração máxima (6,5 dias) ocorre durante o outono (Figura 4.5b) e sua duração mínima (5 dias) ocorre durante o inverno (Figura 4.5c) e durante a primavera (Figura 4.5d).

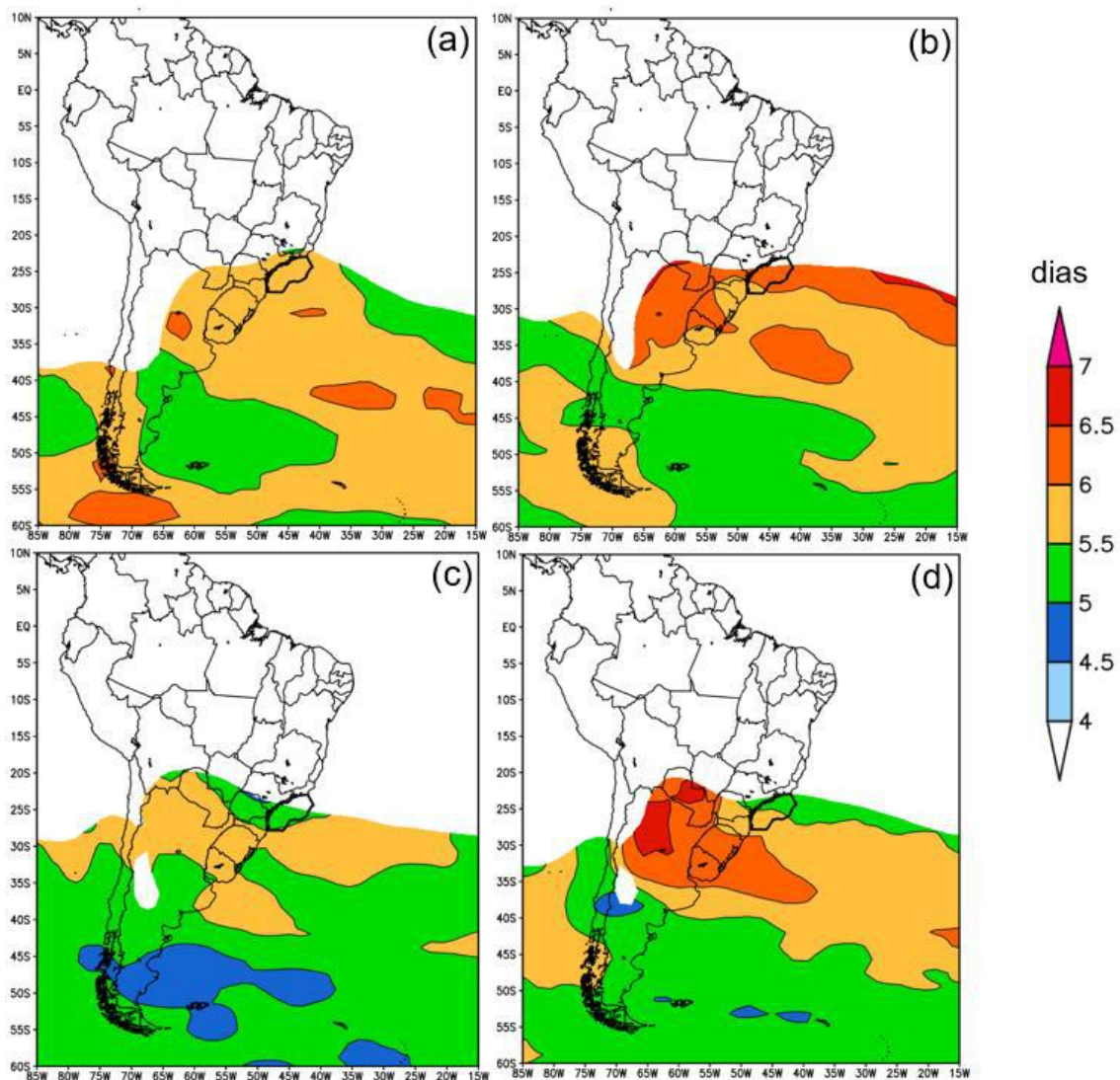


Figura 4.5 – Tempo de vida médio dos ciclones [dias] durante o período de 1991-2020 nas estações de: a) Verão; b) Outono; c) Inverno e d) Primavera. A BS se encontra destacada em linha grossa.

Com relação à velocidade média dos ciclones (Figura 4.6), observa-se os maiores valores (acima de 65 km.h^{-1}) na região do cone sul da América do Sul durante todas as estações e na porção central do Oceano Atlântico Sul Subtropical durante o verão (Figura 4.6a) e o inverno (Figura 4.6c). Em geral, a velocidade dos ciclones varia de valores mais baixos (25 km.h^{-1}) em latitudes menores até valores mais altos (60 km.h^{-1}) em latitudes mais altas. Na região da BS, há uma alta variabilidade espacial intersazonal com as velocidades variando de apenas 30 a 40 km.h^{-1} durante o outono (Figura 4.6b) até 30 a 55 km.h^{-1} na primavera (Figura 4.6d).

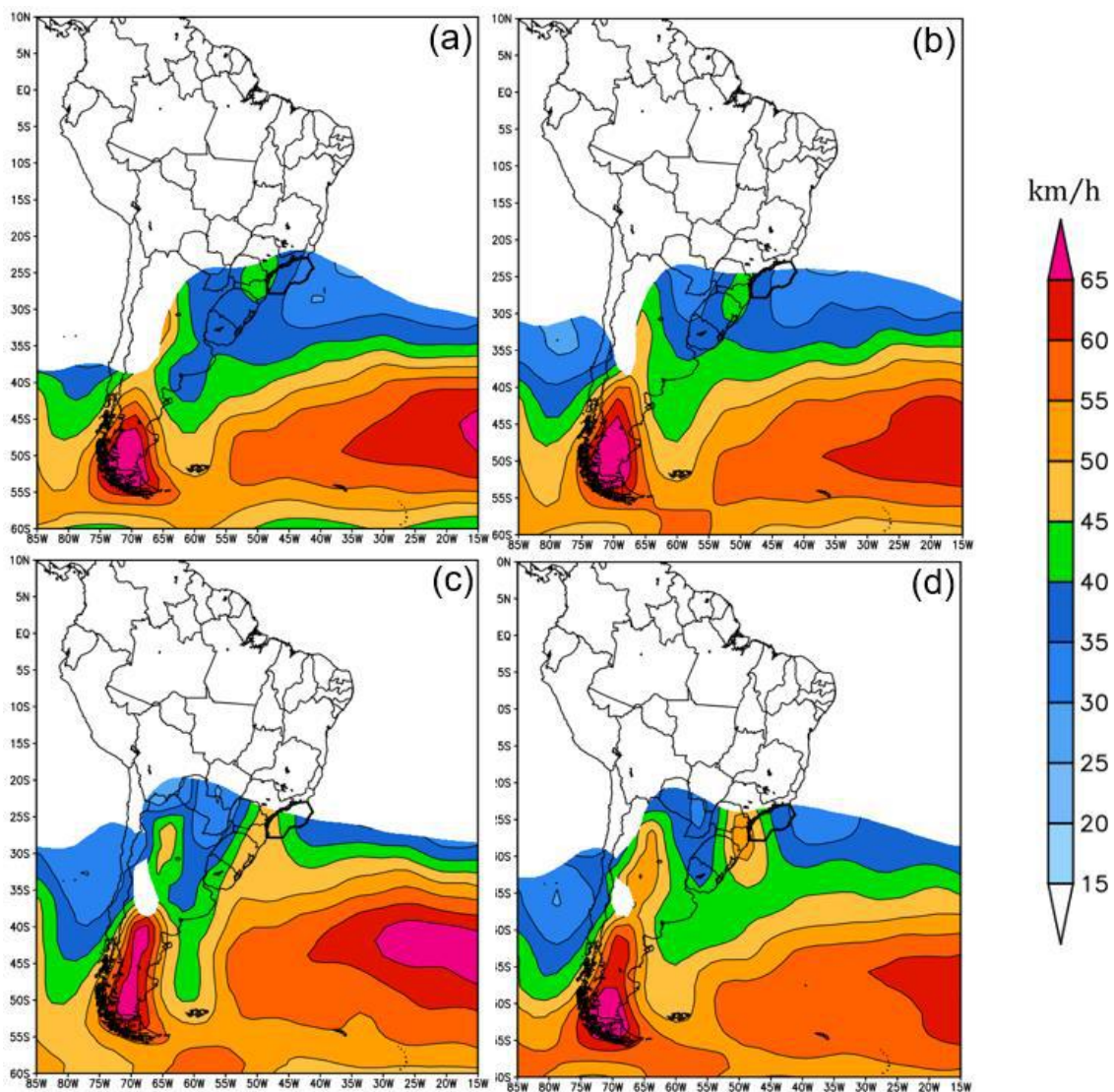


Figura 4.6 – Velocidade média dos ciclones [km.h^{-1}] durante o período de 1991-2020 nas estações de: a) Verão; b) Outono; c) Inverno e d) Primavera. A BS se encontra destacada em linha grossa.

4.3 CLIMATOLOGIA DE FRENTES FRIAS

4.3.1 FREQUÊNCIA E VARIABILIDADE INTERANUAL

Os resultados da contabilização das frentes frias mostraram uma menor variação entre as subáreas (Áreas Rasa, Profunda e Cabo Frio) e a Área Total da BS (em comparação com os resultados dos ciclones), com valores maiores (menores) na Área Rasa (Cabo Frio) em todas as estações e também no total anual (Figura 4.7). Aproximadamente, a menor frequência de frentes na BS ocorre no verão (10), aumentando no outono (12) e inverno (13) até chegar a um máximo na primavera (14), totalizando-se 49 sistemas no ano. Esse resultado é ligeiramente inferior ao calculado por Andrade (2005) para as Áreas 4 e 6 (Figura 2.4).

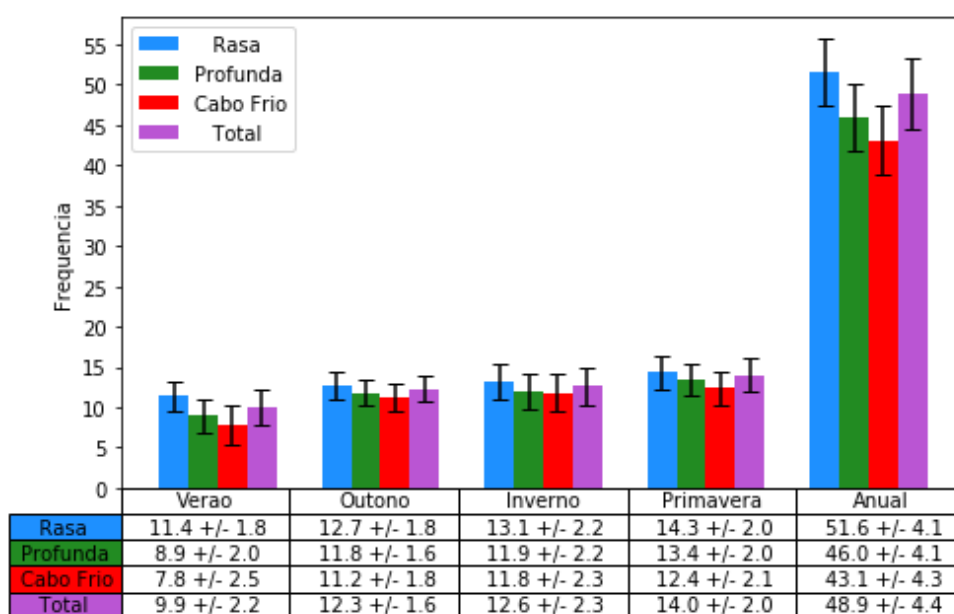


Figura 4.7 - Frequência e desvios-padrão de frentes frias na BS por estação do ano e anualmente. Os valores são apresentados para a bacia como um todo (Total) e também para suas subdivisões Rasa, Profunda e Cabo Frio. Climatologia obtida a partir dos dados da Reanálise ERA5 para o período de 1991-2020.

Apesar do total anual médio na BS ser de 48,9 frentes, sua variabilidade interanual é bastante elevada (Figura 4.8). Destacam-se os anos de 2001 e 1997 com apenas 40 e 43 frentes, respectivamente, e os anos de 2003 e 2009, com ocorrência de 58 e 59 sistemas, respectivamente.

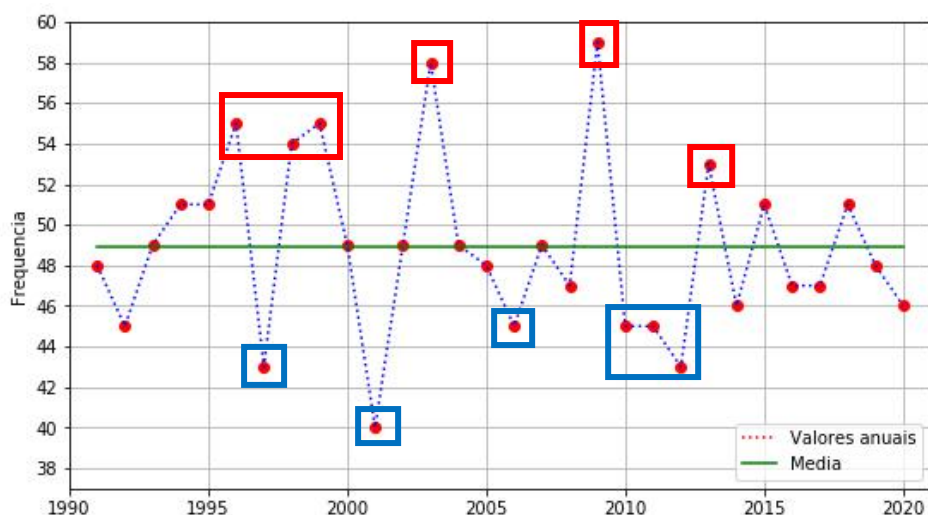


Figura 4.8 - Frequência média de frentes frias por ano na BS. Valores apresentados para a área total da BS. Climatologia obtida a partir dos dados da Reanálise ERA5 para o período de 1991-2020. Anos com maior (menor) frequência de frentes frias encontram-se destacados em vermelho (azul).

4.4 ANÁLISE DOS COMPOSTOS DOS ANOS EXTREMOS

A Figura 4.9 apresenta o campo médio das anomalias de temperatura do ar em 850 hPa para os anos de máxima frequência de ciclones (Figura 4.9a), máxima frequência de frentes frias (Figura 4.9b), mínima frequência de ciclones (Figura 4.9c) e mínima frequência de frentes frias (Figura 4.9d). Todas as figuras apresentam anomalias positivas de temperatura em grande parte do continente, variando entre 0,1 e 0,6 °C, com sua maior intensidade nas Regiões Sul e Sudeste do Brasil no período de mínima frequência de ciclones (Figura 4.9c). Os resultados mostram que há a presença de uma anomalia negativa de temperatura na costa da região sudeste da América do Sul (Figura 4.9a) possivelmente associada a uma maior ocorrência de ciclones, enquanto que há uma intensa anomalia positiva na mesma região (Figura 4.9c), podendo estar associada a uma menor ocorrência de ciclones. Isso também justifica a diferença entre as anomalias positivas relativamente mais fracas na região da BS nos anos de máxima frequência de ciclones e mais fortes nos anos de mínima frequência. Nota-se na Figura 4.9b (máxima frequência de frentes frias) uma baixa anomalia negativa de temperatura, centrada em aproximadamente 35°S, alcançando a costa da Região Sul do Brasil e o sul da BS, possivelmente associada a uma maior incursão de frentes frias nessas latitudes. Essa anomalia negativa não está presente na Figura 4.9d (mínima frequência de frentes frias)

e nota-se apenas uma anomalia positiva na BS, concordando com uma menor incursão de frentes. Essas anomalias negativas descritas acima devem-se ao fato da nebulosidade associada aos ciclones diminuir a incidência de radiação solar, consequentemente, amenizando as temperaturas no local que atuam (vide discussão mais adiante) e da AF associada aos sistemas frontais, que gera uma queda na temperatura na região de atuação.

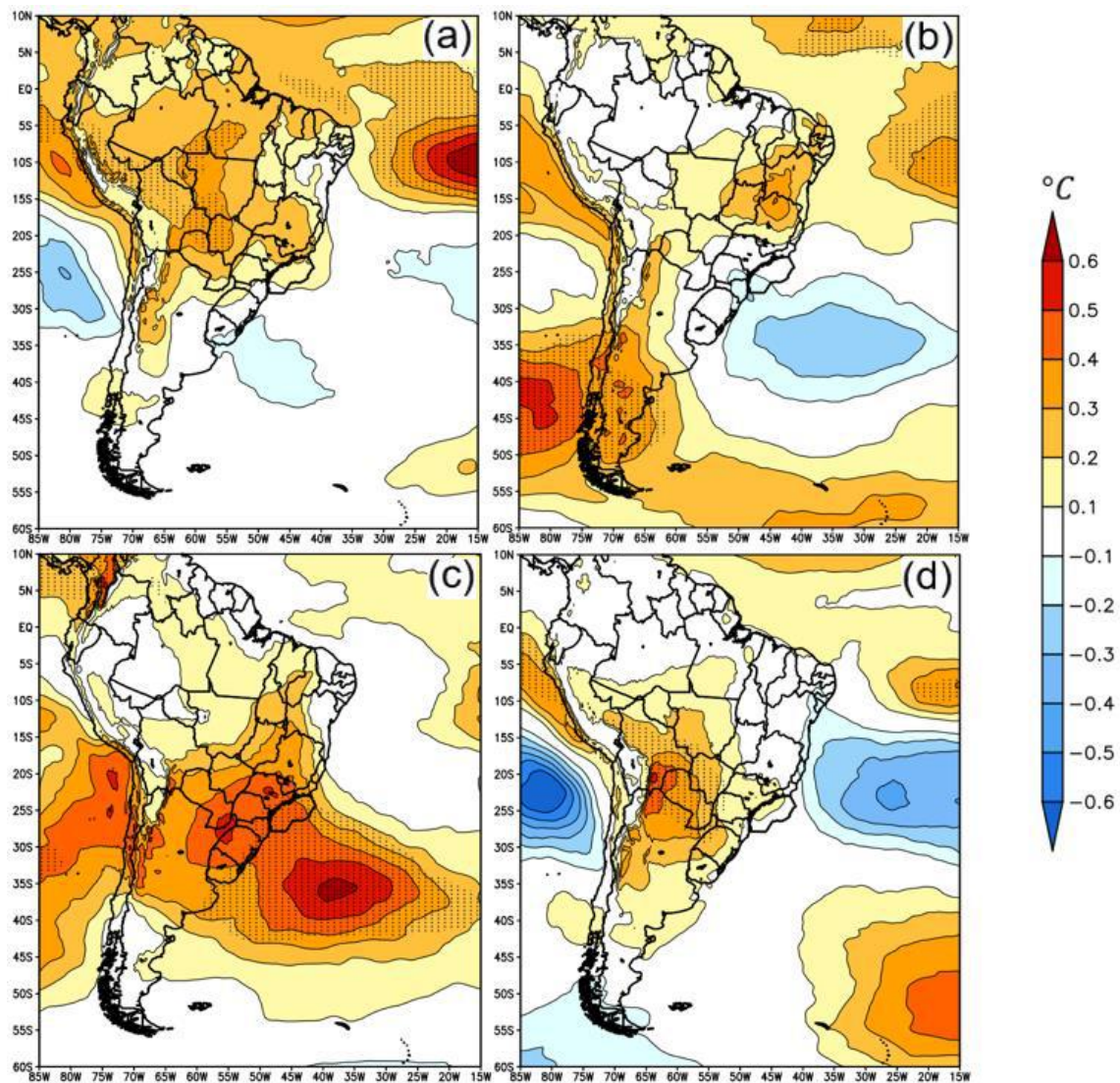


Figura 4.9 - Compostos de anomalia de temperatura do ar em 850 hPa [°C], com relação ao período 1991-2020, durante os anos de: (a) máxima frequência de ciclones (1997, 2005, 2006, 2008, 2010 e 2015); (b) máxima frequência de frentes frias (1996, 1998, 1999, 2003, 2009 e 2013); (c) mínima frequência de ciclones (1992, 1994, 2003, 2014, 2018 e 2019) e (d) mínima frequência de frentes frias (1997, 2001, 2006, 2010, 2011 e 2012). Áreas com confiança estatística de 95% estão pontilhadas.

A Figura 4.10 apresenta o campo médio das anomalias de precipitação para os anos de máxima frequência de ciclones (Figura 4.10a), máxima frequência de frentes frias (Figura 4.10b), mínima frequência de ciclones (Figura 4.10c) e mínima frequência de frentes frias (Figura 4.10d). Diferente da variável apresentada anteriormente (temperatura do ar em 850 hPa), não há um padrão similar entre as figuras de precipitação. Entretanto, é possível identificar um padrão dipolo com sinais opostos entre a Figura 4.10a e a Figura 4.10c, onde nota-se anomalias negativas (positivas) na região sudeste da América do Sul e anomalias positivas (negativas) mais ao norte na Figura 4.10a (Figura 4.10c). Na região da BS, há a atuação de uma anomalia negativa de precipitação na Figura 4.10c e, por outro lado, na Figura 4.10a e na Figura 4.10d, encontra-se anomalias positivas na área Cabo Frio e anomalias negativas na parte sul da BS. A anomalia positiva de precipitação próxima à região da BS (Figura 4.10a) pode estar associada a uma maior atuação de ciclones na região, enquanto que a anomalia negativa em toda a BS (Figura 4.10c) está possivelmente associada a uma menor atuação de ciclones, devido à esses sistemas aumentarem os acumulados de chuva nos locais que atuam. Esses resultados estão de acordo com os apresentados na Figura 4.9. Por outro lado, os máximos e mínimos de incursão de frentes não apresentam um padrão claramente distinto entre si.

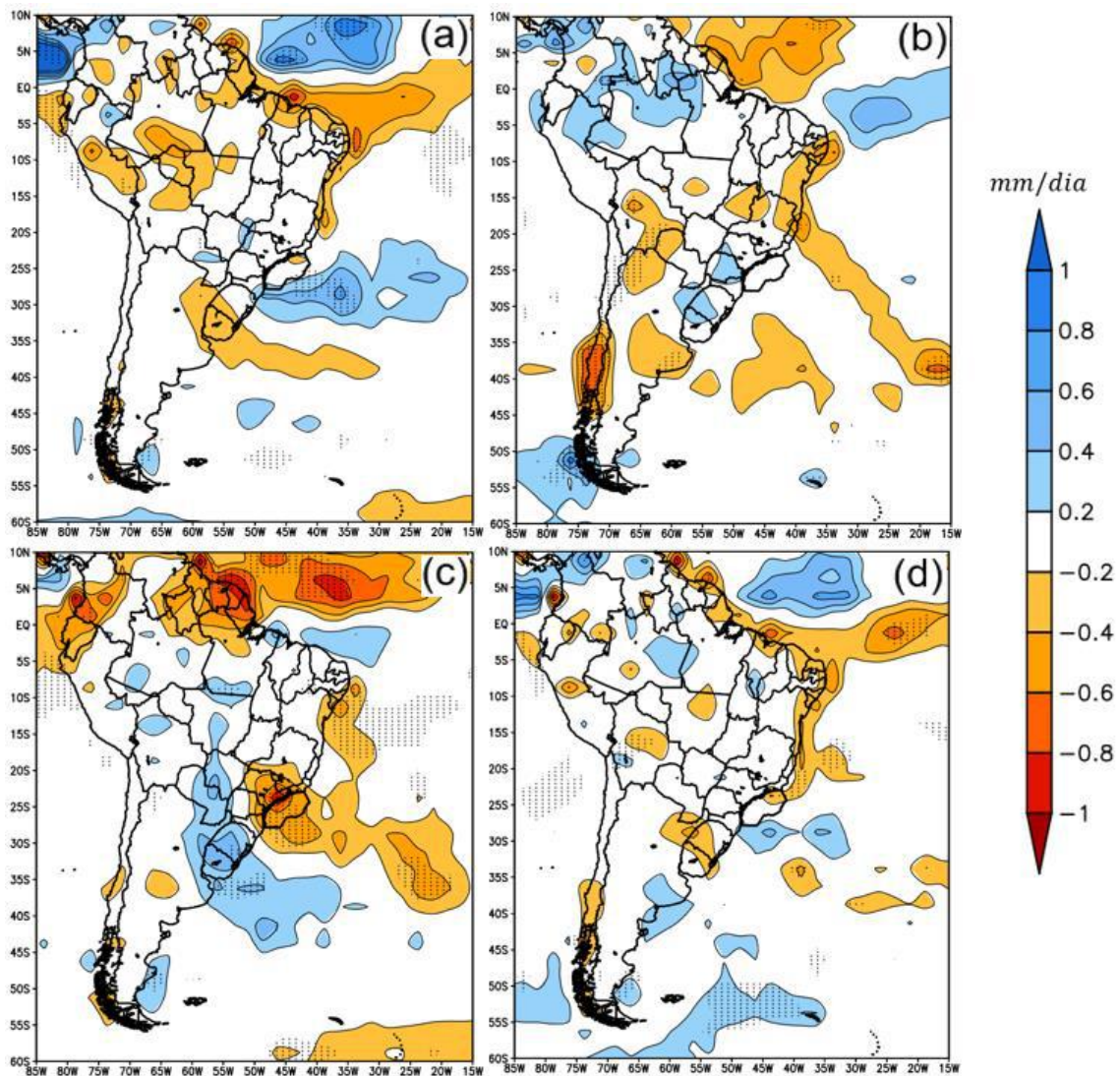


Figura 4.10 - Compostos de anomalia de precipitação [$\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$], com relação ao período 1991-2020, durante os anos de: (a) máxima frequência de ciclones (1997, 2005, 2006, 2008, 2010 e 2015); (b) máxima frequência de frentes frias (1996, 1998, 1999, 2003, 2009 e 2013); (c) mínima frequência de ciclones (1992, 1994, 2003, 2014, 2018 e 2019) e (d) mínima frequência de frentes frias (1997, 2001, 2006, 2010, 2011 e 2012). Áreas com confiança estatística de 95% estão pontilhadas.

A Figura 4.11 apresenta o campo médio das anomalias de PNMM para os anos de máxima frequência de ciclones (Figura 4.11a), máxima frequência de frentes frias (Figura 4.11b), mínima frequência de ciclones (Figura 4.11c) e mínima frequência de frentes frias (Figura 4.11d). A Figura 4.11a (máxima frequência de ciclones) e Figura 4.11d (mínima frequência de frentes frias) apresentam uma intensa anomalia positiva na porção central do Oceano Atlântico Sul, indicando possíveis atuações de bloqueios atmosféricos e uma intensificação da parte sul do ASAS. Essa intensificação está coerente com uma menor

propagação de frentes frias para norte. Entretanto, não impediria a formação de ciclones na costa sudeste do Brasil. Nos anos de mínima frequência de ciclones (Figura 4.11c), há uma anomalia positiva em toda região tropical do continente e Oceano Atlântico, indicando uma intensificação do ASAS, o que dificulta a formação de ciclones na região. Além disso, nota-se uma anomalia positiva na porção sul do continente e sobre parte da BS na Figura 4.11b, podendo estar associada a uma maior incursão de frentes frias, pois, após a passagem das frentes, há a atuação de uma alta pressão migratória na região. Por outro lado, nota-se uma anomalia negativa na porção central do continente na Figura 4.11d possivelmente associada a uma menor incursão de frentes frias.

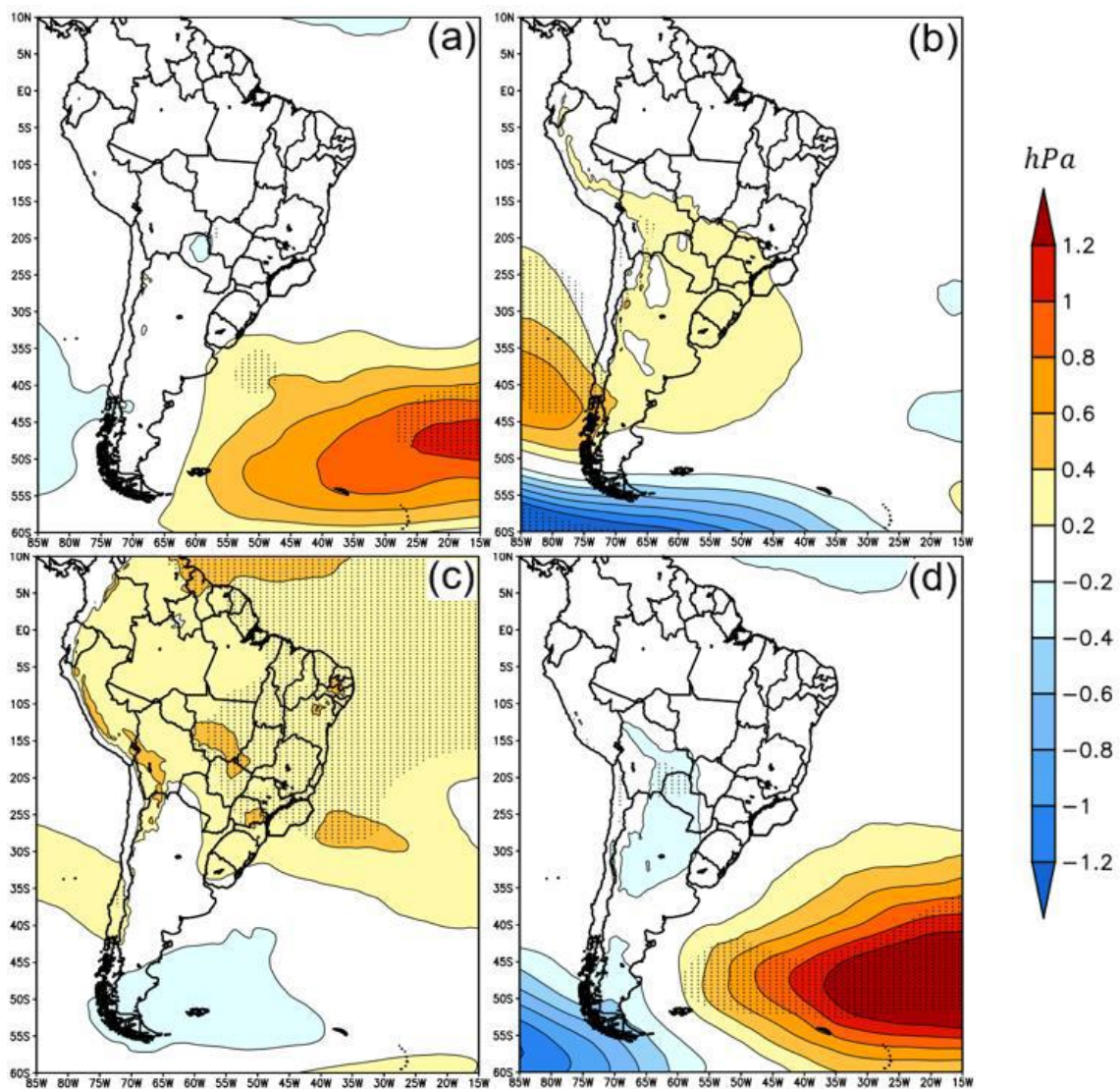


Figura 4.11 - Compostos de anomalia de PNMM [hPa], com relação ao período 1991-2020, durante os anos de: (a) máxima frequência de ciclones (1997, 2005, 2006, 2008, 2010 e 2015); (b) máxima frequência de frentes frias (1996, 1998, 1999, 2003, 2009 e

2013); (c) mínima frequência de ciclones (1992, 1994, 2003, 2014, 2018 e 2019) e (d) mínima frequência de frentes frias (1997, 2001, 2006, 2010, 2011 e 2012). Áreas com confiança estatística de 95% estão pontilhadas.

A Figura 4.12 apresenta o campo médio das anomalias de altura geopotencial em 700 hPa para os anos de máxima frequência de ciclones (Figura 4.12a), máxima frequência de frentes frias (Figura 4.12b), mínima frequência de ciclones (Figura 4.12c) e mínima frequência de frentes frias (Figura 4.12d). Todas as figuras, exceto a Figura 4.12c, apresentam uma configuração característica da fase positiva do Modo Anular Sul (SAM). O SAM é o principal modo de variabilidade extratropical no Hemisfério Sul, caracterizado por oscilações de massas atmosféricas entre médias e altas latitudes (Thompson & Wallace, 2000), em que sua fase positiva apresenta uma gangorra de pressão com anomalias positivas em latitudes médias e anomalias negativas em latitudes altas. Entretanto, os centros de anomalias positivas de latitudes médias mudam em cada composto, com um centro bem definido sobre o Atlântico nas Figura 4.12a e Figura 4.12d, o que é coerente com as características de bloqueio discutidas nos resultados anteriores. Já na Figura 4.12c, a configuração do SAM não se encontra bem definida, porém nota-se anomalias positivas de altura geopotencial em toda a região da BS, ratificando a intensificação do ASAS. As anomalias positivas de altura geopotencial em toda a BS (Figura 4.12c) novamente não estão presentes na Figura 4.12a e podem estar associados a menor atuação de ciclones na região. A ausência do centro de anomalia positiva no Atlântico na Figura 4.12b pode estar associado a uma maior incursão de frentes frias.

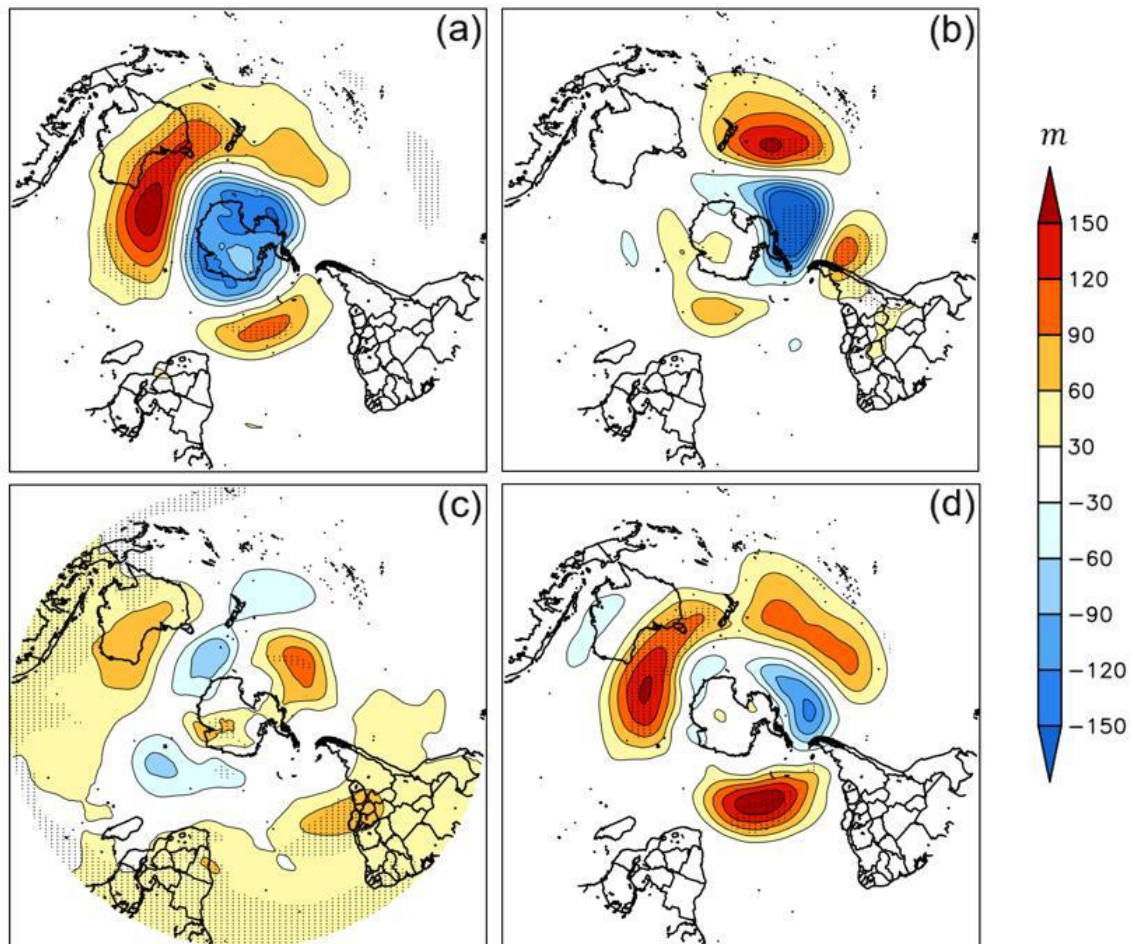


Figura 4.12 - Compostos de anomalia de altura geopotencial em 700 hPa [m], com relação ao período 1991-2020, durante os anos de: (a) máxima frequência de ciclones (1997, 2005, 2006, 2008, 2010 e 2015); (b) máxima frequência de frentes frias (1996, 1998, 1999, 2003, 2009 e 2013); (c) mínima frequência de ciclones (1992, 1994, 2003, 2014, 2018 e 2019) e (d) mínima frequência de frentes frias (1997, 2001, 2006, 2010, 2011 e 2012). Áreas com confiança estatística de 95% estão pontilhadas.

A Figura 4.13 apresenta o campo médio das anomalias de radiação solar líquida em superfície para os anos de máxima frequência de ciclones (Figura 4.13a), máxima frequência de frentes frias (Figura 4.13b), mínima frequência de ciclones (Figura 4.13c) e mínima frequência de frentes frias (Figura 4.13d). Há novamente uma relação relativamente oposta entre as anomalias da Figura 4.13a e Figura 4.13c, no qual nota-se anomalias negativas (positivas) na região da BS na Figura 4.13a (Figura 4.13c), indicando menor (maior) incidência de radiação solar na região. Algo similar ocorre na Figura 4.13b e Figura 4.13d, porém, na Figura 4.13d, as anomalias positivas não predominam em toda a BS, pois há uma anomalia negativa na parte sul da BS. Os resultados mostram que uma maior ocorrência de ciclones e frentes frias está associada a uma menor incidência de

radiação solar na superfície devido à nebulosidade presente em ambos os sistemas. Esta menor incidência de radiação solar pode justificar as anomalias negativas de temperatura em baixos níveis na Figura 4.9b e anomalias positivas relativamente mais fracas na Figura 4.9a. Similarmente, é possível associar a maior incidência de radiação solar nos anos de mínima frequência de ciclones e frentes frias com as temperaturas mais altas na Figura 4.9c e Figura 4.9d.

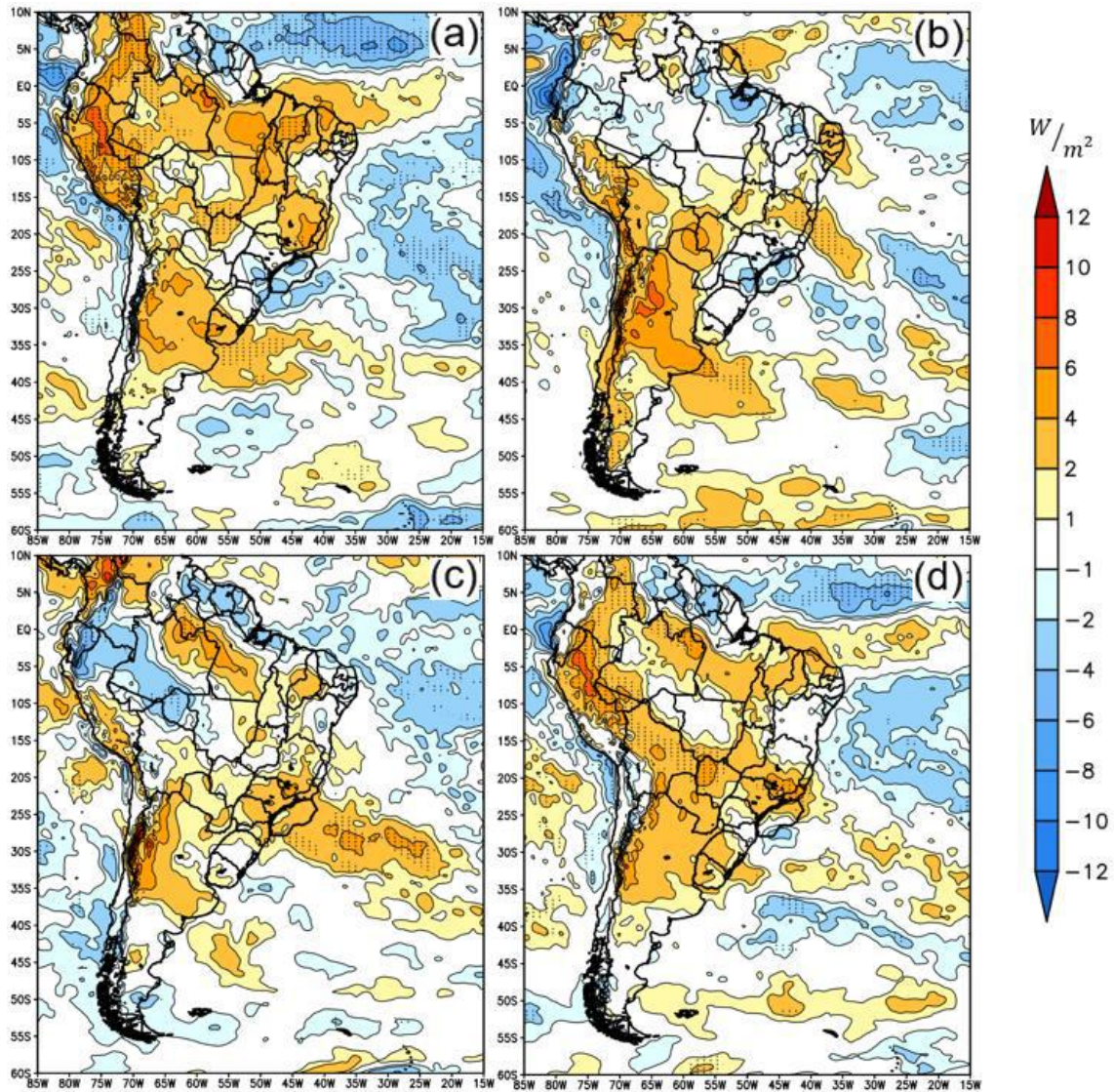


Figura 4.13 - Compostos de anomalia de radiação solar líquida em superfície [$W \cdot m^{-2}$], com relação ao período 1991-2020, durante os anos de: (a) máxima frequência de ciclones (1997, 2005, 2006, 2008, 2010 e 2015); (b) máxima frequência de frentes frias (1996, 1998, 1999, 2003, 2009 e 2013); (c) mínima frequência de ciclones (1992, 1994, 2003, 2014, 2018 e 2019) e (d) mínima frequência de frentes frias (1997, 2001, 2006, 2010, 2011 e 2012). Áreas com confiança estatística de 95% estão pontilhadas. Para as variáveis do balanço de energia (Radiação Solar e Termal em Superfície e Fluxo de Calor Latente

e Sensível em Superfície) é importante ressaltar que a Reanálise ERA5 considera os fluxos da superfície para a atmosfera como negativos.

A Figura 4.14 apresenta o campo médio das anomalias de radiação termal líquida em superfície para os anos de máxima frequência de ciclones (Figura 4.14a), máxima frequência de frentes frias (Figura 4.14b), mínima frequência de ciclones (Figura 4.14c) e mínima frequência de frentes frias (Figura 4.14d). Todas as figuras apresentam uma anomalia negativa em grande parte do continente, como na parte norte da Argentina e do Paraguai (Figura 4.14b) ou na Região Sudeste do Brasil (Figura 4.14c), indicando uma intensificação na radiação termal emergente nessas regiões. Na região da BS, é possível identificar anomalias apenas na Figura 4.14d, onde há anomalias negativas na parte norte da BS. Os resultados mostram que nos arredores da BS, nos anos de máxima frequência de ciclones e frentes frias, há um menor fluxo de radiação termal (anomalias negativas relativamente mais fracas na Figura 4.14a e anomalias positivas na Figura 4.14b), indicando mais nebulosidade na região associada à atuação desses sistemas. Por outro lado, nos anos de mínima frequência de ciclones e frentes frias, há um maior fluxo de radiação termal (anomalias negativas mais intensas na Figura 4.14c e Figura 4.14d), devido à menor nebulosidade na região. Isso está de acordo com os resultados apresentados na Figura 4.13.

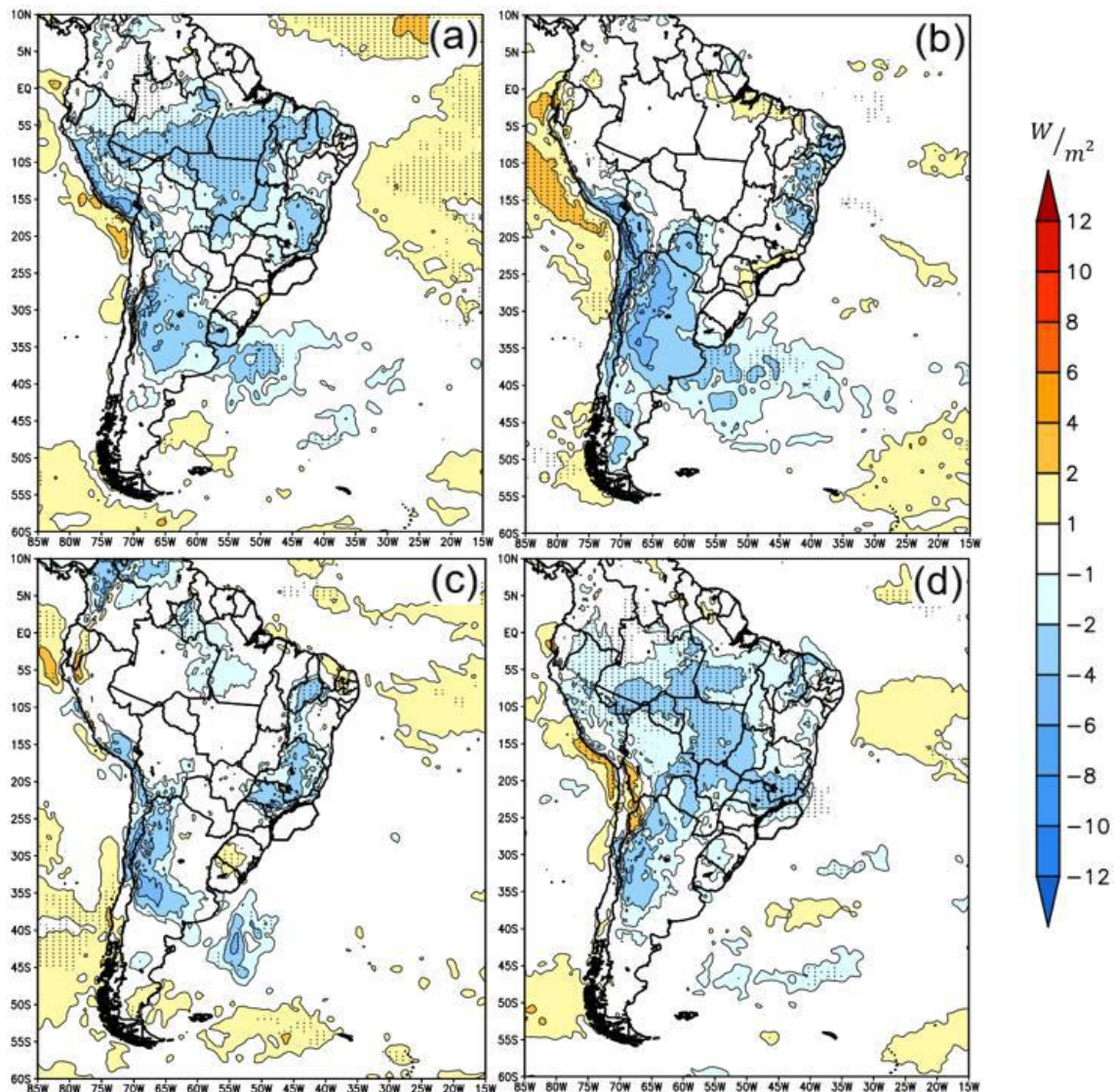


Figura 4.14 - Compostos de anomalia de radiação termal líquida em superfície [$W \cdot m^{-2}$], com relação ao período 1991-2020, durante os anos de: (a) máxima frequência de ciclones (1997, 2005, 2006, 2008, 2010 e 2015); (b) máxima frequência de frentes frias (1996, 1998, 1999, 2003, 2009 e 2013); (c) mínima frequência de ciclones (1992, 1994, 2003, 2014, 2018 e 2019) e (d) mínima frequência de frentes frias (1997, 2001, 2006, 2010, 2011 e 2012). Áreas com confiança estatística de 95% estão pontilhadas. Para as variáveis do balanço de energia (Radiação Solar e Termal em Superfície e Fluxo de Calor Latente e Sensível em Superfície) é importante ressaltar que a Reanálise ERA5 considera os fluxos da superfície para a atmosfera como negativos.

A Figura 4.15 apresenta o campo médio das anomalias do fluxo de calor latente em superfície para os anos de máxima frequência de ciclones (Figura 4.15a), máxima frequência de frentes frias (Figura 4.15b), mínima frequência de ciclones (Figura 4.15c)

e mínima frequência de frentes frias (Figura 4.15d). No continente, predominam fortes anomalias positivas, como no nordeste do Brasil e norte da Argentina (Figura 4.15b) associados a menor liberação de calor latente no local. Para os casos de ciclones (Figura 4.15a e Figura 4.15c), há claramente uma maior liberação de calor latente no Oceano Atlântico durante a máxima frequência (Figura 4.15a). Entretanto, nos compostos de frente frias (Figura 4.15b e Figura 4.15d), não há grandes distinções das anomalias de calor latente no oceano entre a máxima e mínima frequência. Na região da BS, encontra-se apenas anomalias negativas em todas as figuras, com valores mais altos nos compostos de mínima frequência (Figura 4.15c e Figura 4.15d), indicando menor disponibilidade de calor latente na região nesses casos.

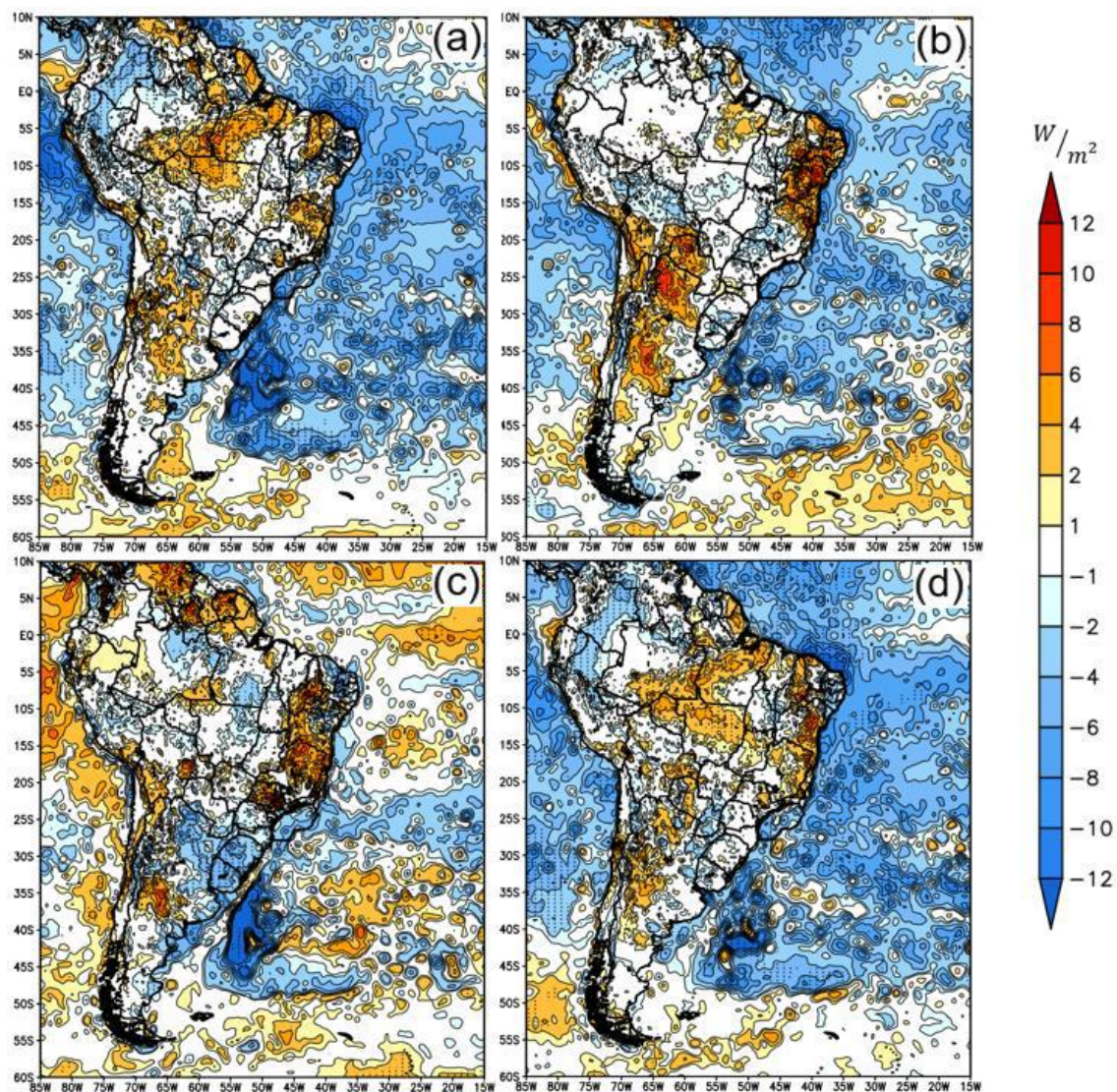


Figura 4.15 - Compostos de anomalia de fluxo de calor latente em superfície [$W \cdot m^{-2}$], com relação ao período 1991-2020, durante os anos de: (a) máxima frequência de ciclones (1997, 2005, 2006, 2008, 2010 e 2015); (b) máxima frequência de frentes frias (1996,

1998, 1999, 2003, 2009 e 2013); (c) mínima frequência de ciclones (1992, 1994, 2003, 2014, 2018 e 2019) e (d) mínima frequência de frentes frias (1997, 2001, 2006, 2010, 2011 e 2012). Áreas com confiança estatística de 95% estão pontilhadas. Para as variáveis do balanço de energia (Radiação Solar e Termal em Superfície e Fluxo de Calor Latente e Sensível em Superfície) é importante ressaltar que a Reanálise ERA5 considera os fluxos da superfície para a atmosfera como negativos.

A Figura 4.16 apresenta o campo médio das anomalias do fluxo de calor sensível em superfície para os anos de máxima frequência de ciclones (Figura 4.16a), máxima frequência de frentes frias (Figura 4.16b), mínima frequência de ciclones (Figura 4.16c) e mínima frequência de frentes frias (Figura 4.16d). Em geral, sobre o continente, predominam fortes anomalias negativas (positivas) nas regiões com anomalias positivas (negativas) da figura anterior (Figura 4.15), indicando a relação oposta entre menor fluxo de calor latente e maior fluxo de calor sensível. Assim como na Figura 4.15, há também uma relação oposta, com maior (menor) liberação de calor sensível no Oceano Atlântico na máxima (mínima) frequência de ciclones na Figura 4.16a (Figura 4.16c). Essa relação oposta não ocorre nos compostos de frequência de frentes frias (Figura 4.16b e Figura 4.16d). Na região da BS, verifica-se alguns pontos isolados de anomalias negativas de calor sensível em todas as figuras, exceto na Figura 4.16c. No continente próximo a BS, nos anos de máxima frequência de ciclones e frentes frias, há um menor fluxo de calor sensível (anomalias positivas na Figura 4.16a e neutralidade na Figura 4.16b), indicando mais nebulosidade na região associada à atuação desses sistemas. Por outro lado, nos anos de mínima frequência de ciclones e frentes frias, há um maior fluxo de calor sensível (anomalias negativas na Figura 4.16c e Figura 4.16d), devido à menor nebulosidade na região. Esses resultados concordam com os apresentados na Figura 4.13, Figura 4.14 e Figura 4.15.

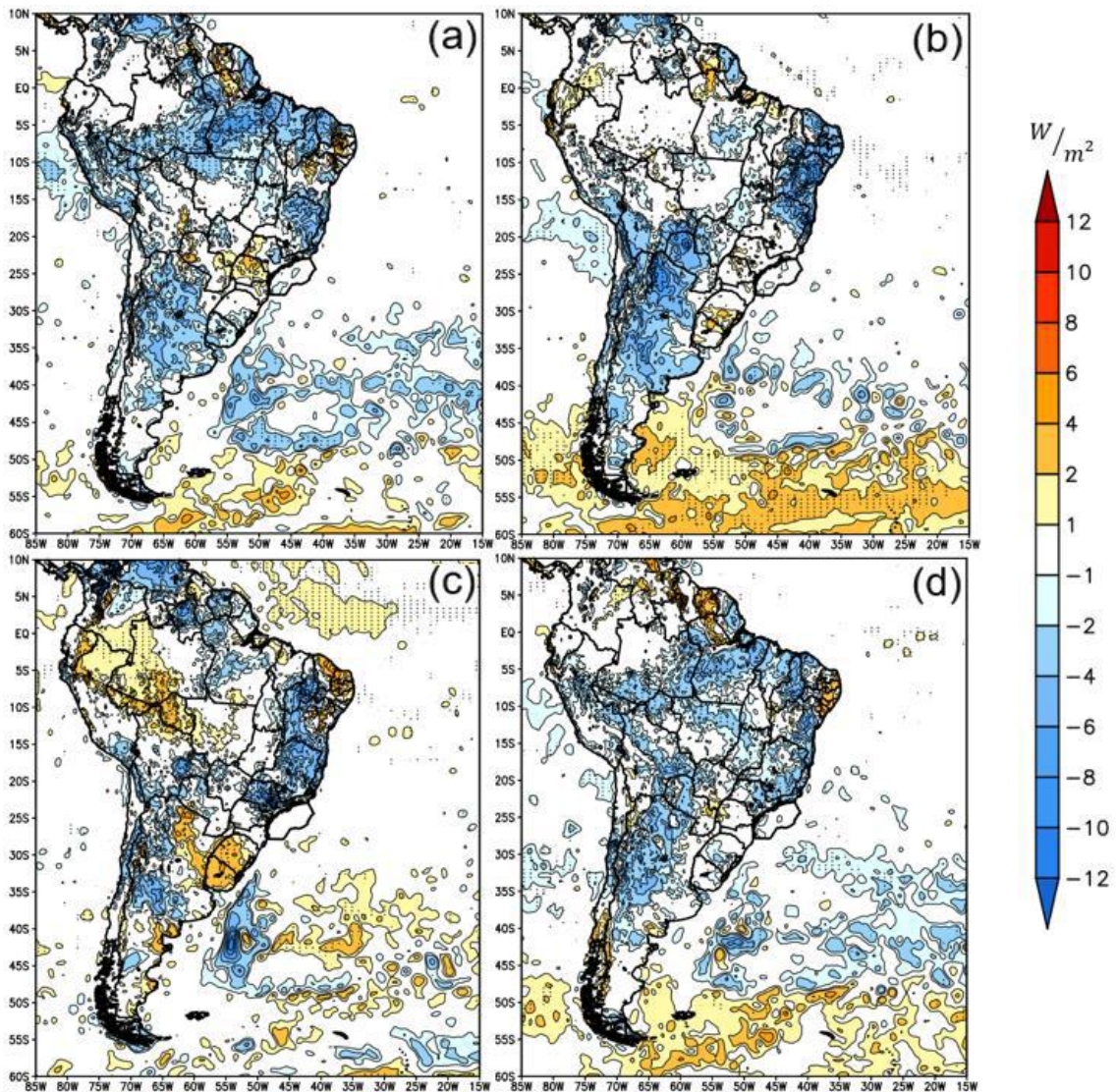


Figura 4.16 - Compostos de anomalia de fluxo de calor sensível em superfície [$W \cdot m^{-2}$], com relação ao período 1991-2020, durante os anos de: (a) máxima frequência de ciclones (1997, 2005, 2006, 2008, 2010 e 2015); (b) máxima frequência de frentes frias (1996, 1998, 1999, 2003, 2009 e 2013); (c) mínima frequência de ciclones (1992, 1994, 2003, 2014, 2018 e 2019) e (d) mínima frequência de frentes frias (1997, 2001, 2006, 2010, 2011 e 2012). Áreas com confiança estatística de 95% estão pontilhadas. Para as variáveis do balanço de energia (Radiação Solar e Termal em Superfície e Fluxo de Calor Latente e Sensível em Superfície) é importante ressaltar que a Reanálise ERA5 considera os fluxos da superfície para a atmosfera como negativos.

A Figura 4.17 apresenta o campo médio das anomalias de cobertura total de nuvens para os anos de máxima frequência de ciclones (Figura 4.17a), máxima frequência de frentes frias (Figura 4.17b), mínima frequência de ciclones (Figura 4.17c) e mínima

frequência de frentes frias (Figura 4.17d). A Figura 4.17a e a Figura 4.17d apresentam certa similaridade com boa parte do continente com anomalias negativas, principalmente na porção central da Amazônia, indicando menos nebulosidade nessas regiões, o que estaria de acordo com as características de bloqueio apresentadas na Figura 4.11 e Figura 4.12. Além disso, uma menor incursão de frentes frias resulta em menos auxílio na organização do corredor de umidade e, conseqüentemente, da convecção da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS). Na Figura 4.17b, nota-se que as anomalias negativas ficam mais restritas ao cone sul da América do Sul e há um aumento da nebulosidade em uma faixa que envolve a região da BS, o que seria coerente com o aumento de frentes frias atuando nessa região. Para o composto de mínima frequência de ciclones (Figura 4.17c), as anomalias de nebulosidade apresentam-se mais fracas e abrangendo menores áreas. Entretanto, há uma menor quantidade de nuvens no Oceano Atlântico próximo à BS, o que seria coerente com uma menor atuação de ciclones nessa área.

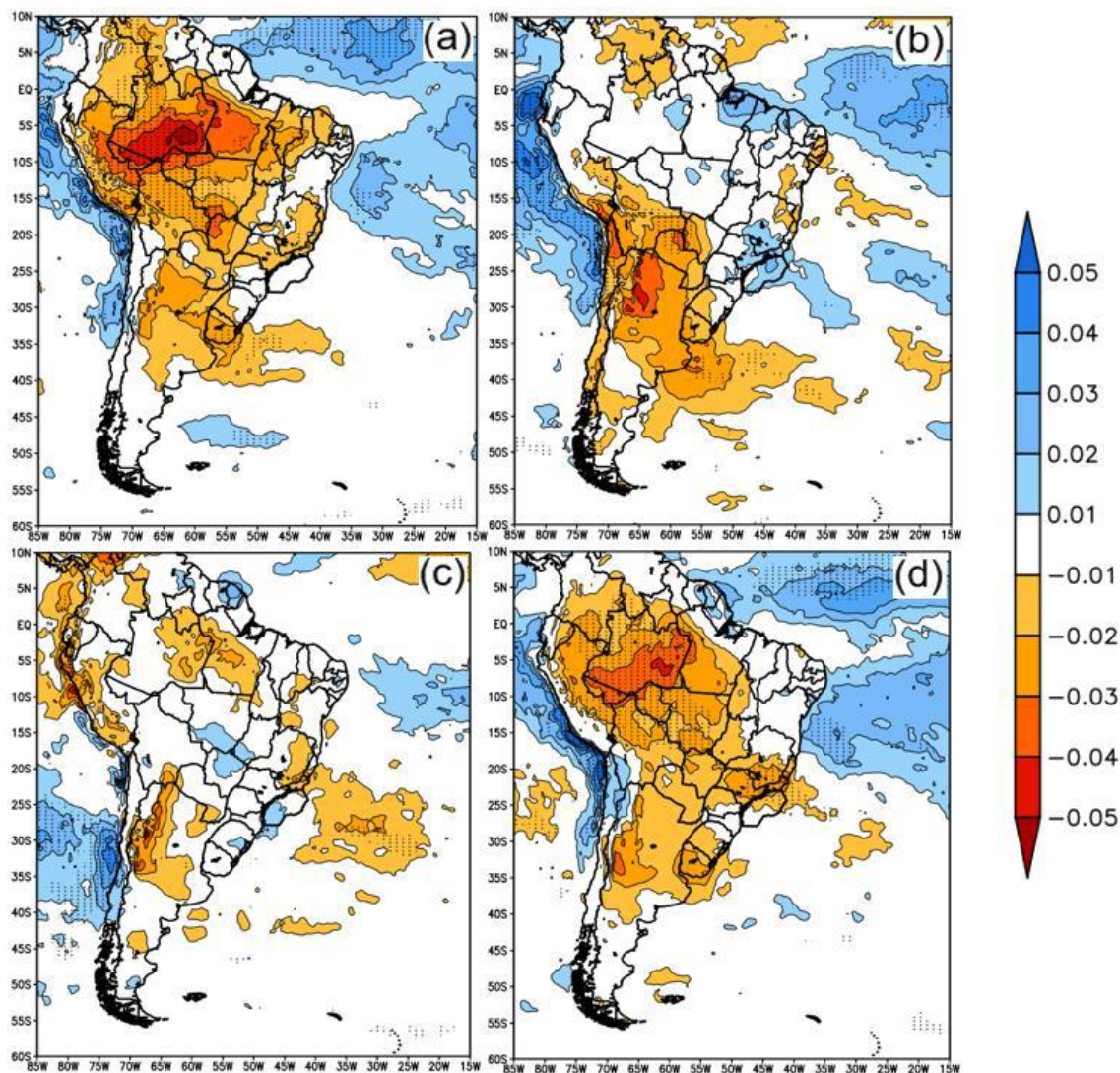


Figura 4.17 - Compostos de anomalia de cobertura total de nuvens, com relação ao período 1991-2020, durante os anos de: (a) máxima frequência de ciclones (1997, 2005, 2006, 2008, 2010 e 2015); (b) máxima frequência de frentes frias (1996, 1998, 1999, 2003, 2009 e 2013); (c) mínima frequência de ciclones (1992, 1994, 2003, 2014, 2018 e 2019) e (d) mínima frequência de frentes frias (1997, 2001, 2006, 2010, 2011 e 2012). Áreas com confiança estatística de 95% estão pontilhadas.

O campo médio das anomalias de linha de corrente em 850 hPa, plotadas a partir dos valores médios das componentes zonal e meridional do vento, para os anos de máxima frequência de ciclones (Figura 4.18a), máxima frequência de frentes frias (Figura 4.18b), mínima frequência de ciclones (Figura 4.18c) e mínima frequência de frentes frias (Figura 4.18d) mostram-se coerentes com a PNMM (Figura 4.11). A Figura 4.18a e Figura 4.18d apresentam anomalias anticiclônicas centradas em aproximadamente 50°S/15°W, indicando um escoamento bloqueado e concordando com as anomalias da Figura 4.11.

Nota-se que na Figura 4.18a, essa anomalia termina no sul do Brasil, seguida ao norte por uma anomalia ciclônica, o que favoreceria a formação de ciclones. Já na Figura 4.18d, a anomalia anticiclônica no Oceano Atlântico se estende até latitudes mais baixas, gerando um fortalecimento da atuação da ASAS, anomalias de ventos de leste na região da BS e dificultando a passagem das frentes frias. Na Figura 4.18b (máxima frequência de frentes frias), há uma anomalia ciclônica na região subtropical do Oceano Atlântico, indicando um enfraquecimento do ASAS. Além disso, identifica-se anomalias de ventos de sul alcançando a BS, associados a uma maior incursão de frentes frias na região. Na Figura 4.18c (mínima frequência de ciclones), nota-se uma anomalia anticiclônica centrada sobre a BS, indicando um aumento na pressão da região associado à uma menor ocorrência de ciclones.

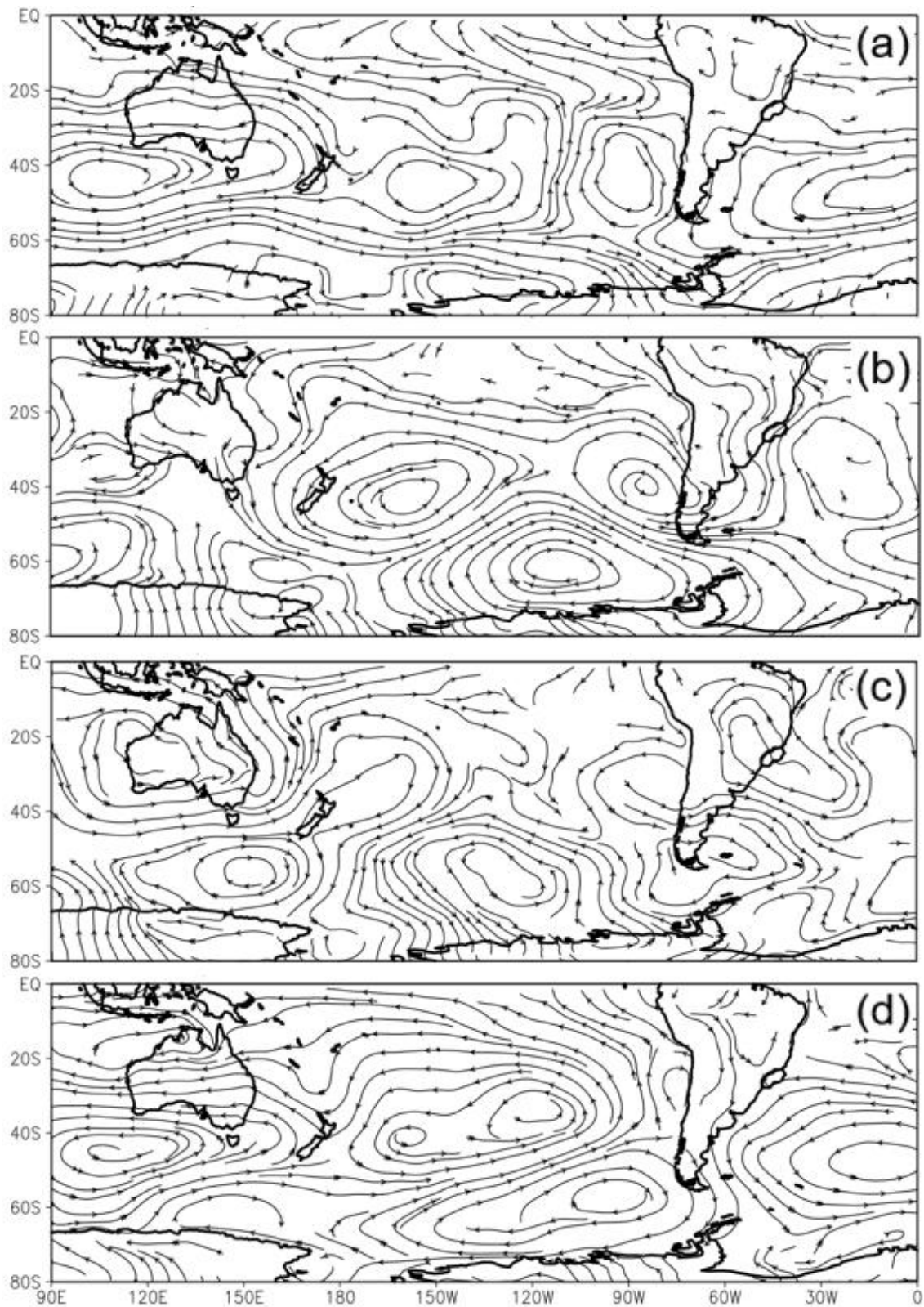


Figura 4.18 - Compostos de anomalia de linha de corrente em 850 hPa, com relação ao período 1991-2020, durante os anos de: (a) máxima frequência de ciclones (1997, 2005, 2006, 2008, 2010 e 2015); (b) máxima frequência de frentes frias (1996, 1998, 1999,

2003, 2009 e 2013); (c) mínima frequência de ciclones (1992, 1994, 2003, 2014, 2018 e 2019) e (d) mínima frequência de frentes frias (1997, 2001, 2006, 2010, 2011 e 2012).

Os campos médios das anomalias de velocidade potencial e vento divergente em 200 hPa (Figura 4.19a), das anomalias de TSM (Figura 4.19b), da divergência do fluxo ondulatório e função corrente em 200 hPa (Figura 4.19c), e das anomalias de linha de corrente em 200 hPa (Figura 4.19d) para os anos de máxima frequência de ciclones é apresentado na Figura 4.19. Em geral, nota-se a circulação em altos níveis (Figura 4.19d) nas latitudes médias e altas está coerente com a fase positiva do SAM (Figura 4.12a). As forçantes das ondas de Rossby são mais presentes ao sul de áreas onde a magnitude do vento divergente é mais expressiva e podem ocorrer em regiões com aquecimento tropical, onde a maior divergência em altos níveis está associada à convecção profunda. Dessa forma, águas mais quentes sobre o Oceano Pacífico Sul Subtropical, em aproximadamente 40°S/150°W e sobre o Pacífico equatorial leste (Figura 4.19b) levam a movimentos ascendentes atmosféricos, gerando anomalias de divergência em altos níveis (Figura 4.19a) ao sul das áreas aquecidas, se tornando fontes de ondas de Rossby (Figura 4.19c, valores positivos). Os trens de ondas desencadeados por estas fontes de ondas de Rossby (Figura 4.19d) se propagam até o oceano Atlântico Subtropical Sul, criando os centros positivos observados no oeste do Pacífico e Atlântico (Figura 4.19d, Figura 4.12a, Figura 4.18a).

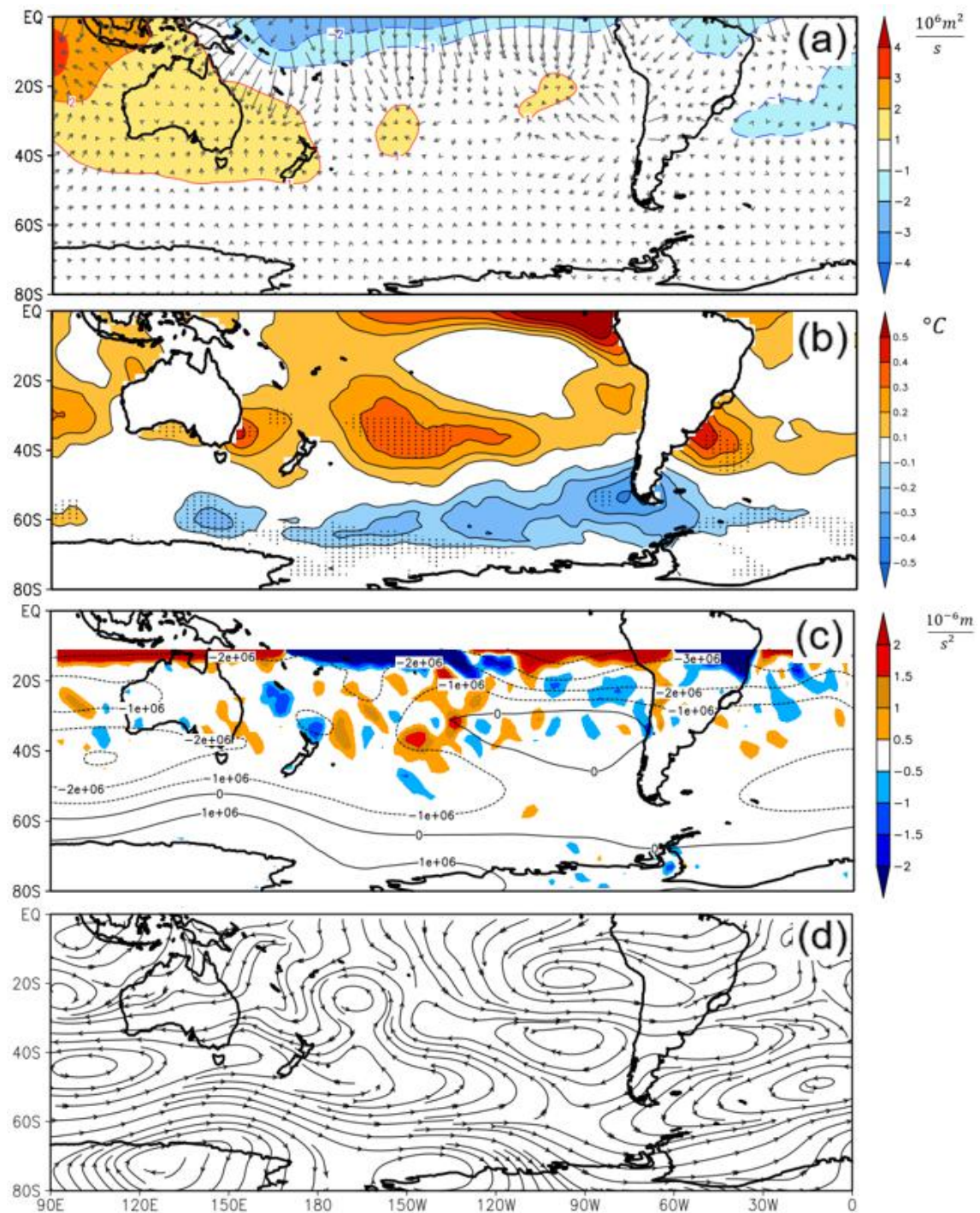


Figura 4.19 - Compostos dos anos de máxima frequência de ciclones (1997, 2005, 2006, 2008, 2010 e 2015) de: a) Anomalia de velocidade potencial [$10^6 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ – sombreado] e anomalia de vento divergente [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ – vetor] em 200 hPa; b) Anomalia de TSM [$^{\circ}\text{C}$], áreas com confiança estatística de 95% estão pontilhadas; c) Divergência do fluxo ondulatório [$10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ – sombreado] e função corrente [contorno] em 200 hPa e d) Anomalia de Linha de Corrente em 200 hPa. Anomalias com relação ao período 1991-2020.

Os campos médios das anomalias de velocidade potencial e vento divergente em 200 hPa (Figura 4.20a), das anomalias de TSM (Figura 4.20b), da divergência do fluxo ondulatório e função corrente em 200 hPa (Figura 4.20c), e das anomalias de linha de corrente em 200 hPa (Figura 4.20d) para os anos de máxima frequência de frentes frias é apresentado na Figura 4.20. Na Figura 4.20b, as águas mais quentes sobre o Oceano Pacífico Sul Subtropical, em aproximadamente 40°S/170°W, levam a movimentos ascendentes atmosféricos, gerando anomalias de divergência em altos níveis (Figura 4.20a) nessas regiões de anomalias positivas de TSM. Fontes de ondas de Rossby, mostradas através de valores positivos na Figura 4.20c, foram observadas nas regiões onde foram identificados ventos divergentes. Os trens de ondas desencadeados por estas fontes de ondas de Rossby (Figura 4.20d) se propagam até o Oceano Atlântico Subtropical Sul, onde há a atuação de uma anomalia ciclônica em altos níveis no sudeste da América do Sul, se estendendo para o Atlântico (Figura 4.20d). Essa anomalia ciclônica sobre o Atlântico em baixos (Figura 4.18b) e altos níveis, influencia o aumento da nebulosidade da região (Figura 4.17b), diminuindo a incidência de radiação solar (Figura 4.13b) e, conseqüentemente, gerando anomalias negativas de TSM na região (Figura 4.20b).

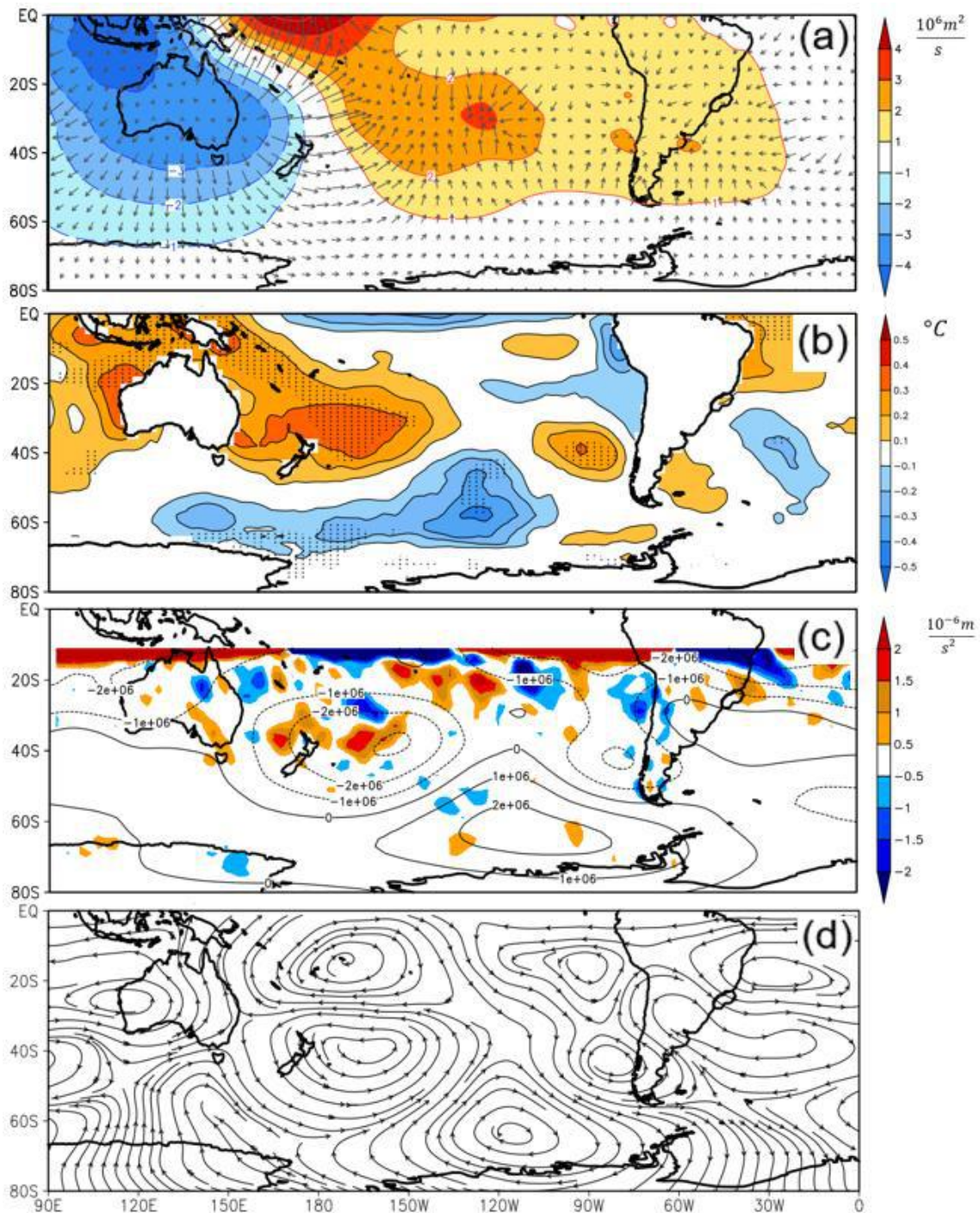


Figura 4.20 - Compostos dos anos de máxima frequência de frentes frias (1996, 1998, 1999, 2003, 2009 e 2013) de: a) Anomalia de velocidade potencial [$10^6 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ – sombreado] e anomalia de vento divergente [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ – vetor] em 200 hPa; b) Anomalia de TSM [$^{\circ}\text{C}$], áreas com confiança estatística de 95% estão pontilhadas; c) Divergência do fluxo ondulatório [$10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ – sombreado] e função corrente [contorno] em 200 hPa e d) Anomalia de Linha de Corrente em 200 hPa. Anomalias com relação ao período 1991-2020.

Os campos médios das anomalias de velocidade potencial e vento divergente em 200 hPa (Figura 4.21a), das anomalias de TSM (Figura 4.21b), da divergência do fluxo ondulatório e função corrente em 200 hPa (Figura 4.21c), e das anomalias de linha de corrente em 200 hPa (Figura 4.21d) para os anos de mínima frequência de ciclones é apresentado na Figura 4.21. Na Figura 4.21b, as águas mais quentes sobre o Oceano Pacífico Sul Subtropical, em aproximadamente 40°S/150°W, levam a movimentos ascendentes atmosféricos, gerando anomalias de divergência em altos níveis (Figura 4.21a) nessas regiões de anomalias positivas de TSM. Fontes de ondas de Rossby, mostradas através de valores positivos na Figura 4.21c, foram observadas nas regiões onde foram identificados ventos divergentes. Os trens de ondas desencadeados por estas fontes de ondas de Rossby (Figura 4.21d) se propagam até o oceano Atlântico Subtropical Sul, onde há a atuação de uma anomalia anticiclônica em altos e baixos níveis ao sul da BS (Figura 4.18c e Figura 4.21d, respectivamente), influenciando na diminuição da nebulosidade da região (Figura 4.17c), aumentando a incidência de radiação solar (Figura 4.13c), gerando anomalias positivas de TSM (Figura 4.21b).

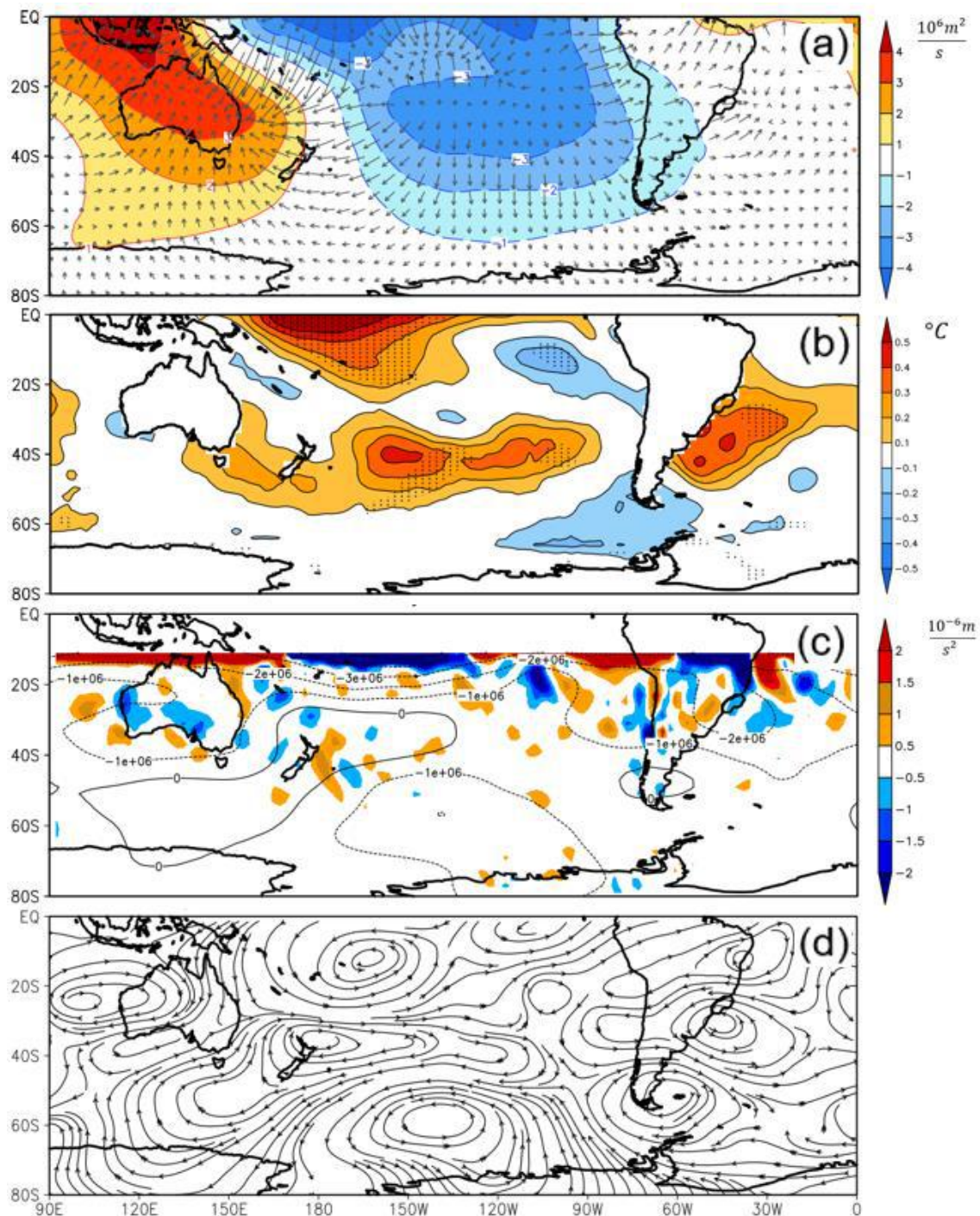


Figura 4.21 – Compostos dos anos de mínima frequência de ciclones (1992, 1994, 2003, 2014, 2018 e 2019) de: a) Anomalia de velocidade potencial [$10^6 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ – sombreado] e anomalia de vento divergente [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ – vetor] em 200 hPa; b) Anomalia de TSM [$^{\circ}\text{C}$], áreas com confiança estatística de 95% estão pontilhadas; c) Divergência do fluxo ondulatório [$10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ – sombreado] e função corrente [contorno] em 200 hPa e d) Anomalia de Linha de Corrente em 200 hPa. Anomalias com relação ao período 1991-2020.

Os campos médios das anomalias de velocidade potencial e vento divergente em 200 hPa (Figura 4.22a), das anomalias de TSM (Figura 4.22b), da divergência do fluxo ondulatório e função corrente em 200 hPa (Figura 4.22c), e das anomalias de linha de corrente em 200 hPa (Figura 4.22d) para os anos de mínima frequência de frentes frias é apresentado na Figura 4.22. Na Figura 4.22b, as águas mais quentes sobre o Oceano Pacífico Sul Subtropical, em aproximadamente 35°S/180°W e sobre o Pacífico equatorial próximo à costa da América do Sul, levam a movimentos ascendentes atmosféricos, gerando anomalias de divergência em altos níveis (Figura 4.22a) nessas regiões de anomalias positivas de TSM. Fontes de ondas de Rossby, mostradas através de valores positivos na Figura 4.20c, foram observadas nas regiões onde foram identificados ventos divergentes. Os trens de ondas desencadeados por estas fontes de ondas de Rossby (Figura 4.22d) se propagam até o Oceano Atlântico Subtropical Sul, onde há a atuação de uma anomalia anticiclônica em baixos e altos níveis na porção central do Oceano Atlântico Sul (Figura 4.18d e Figura 4.22d, respectivamente), uma configuração típica de bloqueio. Essa anomalia anticiclônica influencia na diminuição da nebulosidade da região (Figura 4.17d), aumentando a incidência de radiação solar (Figura 4.13d) e, conseqüentemente, gerando anomalias positivas de TSM (Figura 4.22b).

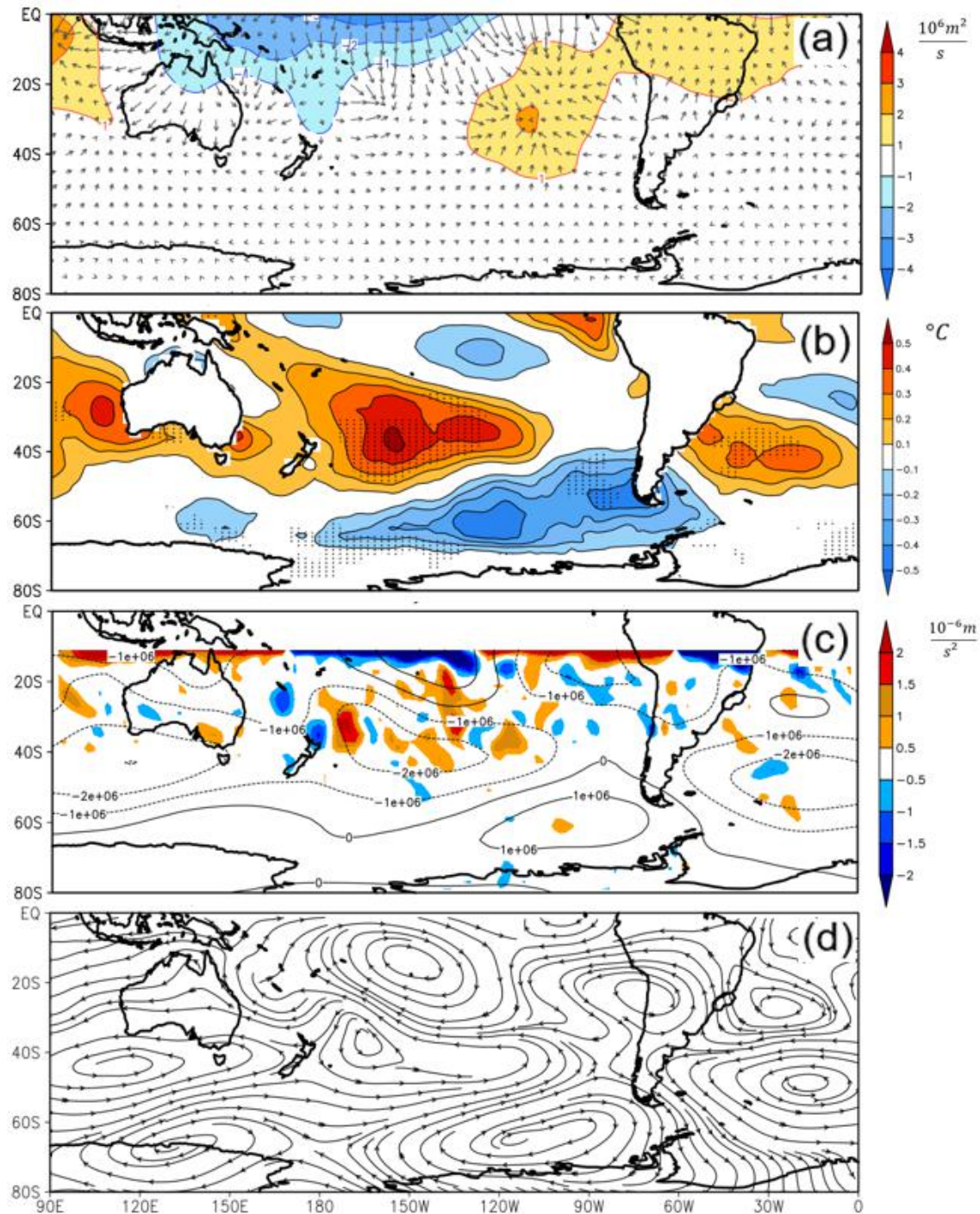


Figura 4.22 - Compostos dos anos de mínima frequência de frentes frias (1997, 2001, 2006, 2010, 2011 e 2012) de: a) Anomalia de velocidade potencial [$10^6 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ – sombreado] e anomalia de vento divergente [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ – vetor] em 200 hPa; b) Anomalia de TSM [$^{\circ}C$], áreas com confiança estatística de 95% estão pontilhadas; c) Divergência do fluxo ondulatório [$10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ – sombreado] e função corrente [contorno] em 200 hPa e d) Anomalia de Linha de Corrente em 200 hPa. Anomalias com relação ao período 1991-2020.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho teve como objetivo desenvolver uma climatologia, para o período de 1991 a 2020, dos principais sistemas sinóticos que impactam nas condições de tempo na BS: os ciclones e as frentes frias.

Para gerar a climatologia da frequência desses sistemas, foram utilizadas as saídas da reanálise ERA5 aplicadas ao programa TRACK (Hodges, 1994) para detecção dos ciclones e à metodologia proposta por Andrade (2005) para detecção das frentes frias.

Os resultados encontrados para a média dos ciclones, sazonal e anualmente, coincidiram com estudos previamente desenvolvidos como o de Reboita, Da Rocha, et al. (2010), que apresentam uma maior frequência de ciclones no verão (3) e menor frequência no inverno (2). Destacou-se também uma notável diferença entre a frequência das subáreas e da Área Total da BS. Além disso, os ciclones apresentaram uma alta variabilidade interanual ao longo de todo período estudado.

Através das análises estatísticas dos ciclones, foram identificadas as três regiões ciclogênicas da América do Sul, assim como encontrado por Gan & Rao (1991) e Reboita (2008), com seus valores médios coincidindo também com esses estudos. Uma dessas regiões, apesar de menos intensa, se encontra exatamente sobre a BS e possui sua maior intensidade durante o verão, justificando os valores máximos encontrados nessa estação. Os ciclones que atuaram na BS apresentaram sua maior intensidade média da vorticidade relativa no inverno e primavera ($4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$), seu maior tempo de vida médio no outono (6,5 dias) e sua maior velocidade média na primavera (55 km.h^{-1}).

Os resultados encontrados para a média das frentes frias apresentaram valores mínimos de frequência no verão (10), aumentando durante o ano até alcançar seus valores máximos na primavera (14). Esses resultados, apesar de inferiores aos encontrados por Andrade (2005), ainda se mostram relevantes e confiáveis. Por outro lado, notou-se pouca diferença entre as subáreas e a Área Total da BS, porém, similarmente aos ciclones, verificou-se também uma alta variabilidade interanual das frentes frias.

Na região da BS, foi observado, durante os anos de maior frequência de ciclones, que houve a presença de anomalias positivas de TSM e temperatura do ar, e de anomalias negativas de radiação solar, calor latente e calor sensível, além de anomalias de vento de oeste em altos níveis. Enquanto que, nos anos de menor frequência de ciclones, houve a presença de anomalias positivas de TSM, temperatura do ar, PNMM, radiação solar e cobertura de nuvens, e de anomalias negativas de precipitação, e calor latente, além de

anomalias de vento de sudeste em altos níveis e anomalias anticiclônicas em baixos níveis.

Por outro lado, nos anos de maior frequência de frentes frias, foram observadas anomalias positivas de TSM, PNMM e cobertura de nuvens, e de anomalias negativas de temperatura do ar, radiação solar, calor latente e calor sensível, além de anomalias de vento de noroeste em altos níveis e de sul em baixos níveis. Já nos anos de menor frequência de frentes frias, foram observadas anomalias positivas de TSM, temperatura do ar, e de anomalias negativas de precipitação, radiação termal, calor latente, calor sensível e cobertura de nuvens, além de anomalias de vento de sul em altos níveis e de leste em baixos níveis.

Ainda no âmbito das análises dos compostos, à exceção dos anos de mínima frequência de ciclones, em todos os extremos notou-se a atuação da fase positiva do SAM com centros de anomalias positivas bem definidos nos anos de maior frequência de ciclones e menor frequência de frentes frias sobre o Oceano Atlântico. Ademais, foi possível identificar regiões de nascente de ondas de Rossby, que se propagaram até a região da BS e afetaram as condições atmosféricas locais em todos os anos estudados.

Por fim, como recomendação para trabalhos futuros, sugere-se estudar as interações dos resultados apresentados neste trabalho com a atuação de padrões de teleconexão, como o El-Niño Oscilação Sul (ENOS) e o SAM. Outra adição para este trabalho seria desenvolver uma nova climatologia utilizando outras reanálises, como o *Climate Forecast System Reanalysis* (CFSR) ou a *Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Application v2* (MERRA-2), a fim de confrontar com os resultados obtidos neste trabalho, aumentando a confiabilidade das análises.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adler, R. et al. (2003). The version 2 global precipitation climatology project (GPCP) monthly precipitation analysis (1979-present). *Journal of Hydrometeorology*, 4, 1147–1167.
- Ahrens, C. D. (2011). Essentials of meteorology. *Brooks/Cole*.
- Andrade, K. M. (2005). *Climatologia e comportamento dos sistemas frontais sobre a América do Sul*.
- Beu, C. M. L., & Ambrizzi, T. (2006). Variabilidade Interanual E Intersazonal Da Frequência De Ciclones No Hemisfério Sul. *Dados*, 44–55.
- Bjerknes, J. (1919). ON THE STRUCTURE OF MOVING CYCLONES. *Monthly Weather Review*, 47(2), 95–99. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1919\)47<95:OTSOMC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1919)47<95:OTSOMC>2.0.CO;2)
- Cavalcanti, I. F. A., & Kousky, V. (2009). Frentes Frias sobre o Brasil. Em *Tempo e Clima no Brasil* (p. 135–145).
- Dereczynski, C. P., & Menezes, W. F. (2016). Meteorologia Da Bacia De Campos. Em *Meteorologia e Oceanografia*. Elsevier Editora Ltda. <https://doi.org/10.1016/b978-85-352-6208-7.50008-8>
- Gan, M. A., & Rao, V. B. (1991). Surface Cyclogenesis over South America. *Monthly Weather Review*, 119, 1293–1302.
- Gozzo, L. F., da Rocha, R. P., Reboita, M. S., & Sugahara, S. (2014). Subtropical Cyclones over the Southwestern South Atlantic: Climatological Aspects and Case Study. *Journal of Climate*, 27(22). <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00149.1>
- Hart, R. E. (2003). A Cyclone Phase Space Derived from Thermal Wind and Thermal Asymmetry. *Monthly Weather Review*, 131(4), 585–616. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2003\)131<0585:ACPSDF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2003)131<0585:ACPSDF>2.0.CO;2)
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., ... Thépaut, J. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, qj.3803. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Hodges, K. I. (1994). A General Method for Tracking Analysis and Its Application to Meteorological Data. *Monthly Weather Review*, 122(11). [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1994\)122<2573:AGMFTA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1994)122<2573:AGMFTA>2.0.CO;2)

- Hodges, K. I. (1995). Feature Tracking on the Unit Sphere. *Monthly Weather Review*, 123(12). [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1995\)123<3458:FTOTUS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1995)123<3458:FTOTUS>2.0.CO;2)
- Hodges, K. I. (1999). Adaptive Constraints for Feature Tracking. *Monthly Weather Review*, 127(6). [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1999\)127<1362:ACFFT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1999)127<1362:ACFFT>2.0.CO;2)
- Huang B., Thorne P. W., Banzon V. F., Boyer T., Chepurin G., Lawrimore J. H., Menne M. J., Smith T. M., Vose R. S., & Zhang H. (2017). NOAA Extended Reconstructed Sea Surface Temperature (ERSST) Version 5. *Upgrades, validations, and intercomparisons. Journal of Climate*, 30, 8179–8205.
- Murray, R. J., & Simmonds, I. (1991). A numerical scheme for tracking cyclone centres from digital data. Part II: Application to January and July general circulation model simulations. *Australian Meteorological Magazine*, 39, 167–180.
- Oliveira, A. S. (1986). *Interações entre sistemas frontais na América do Sul e convecção na Amazônia*.
- Oliveira, L. L., Vianello, R. L., & Ferreira, N. J. (2001). *Meteorologia Fundamental*. Edifapes.
- Reboita, M. S. (2008). *Ciclones Extratropicais sobre o Atlântico Sul: Simulação Climática e Experimentos de Sensibilidade*.
- Reboita, M. S., da Rocha, R. P., Ambrizzi, T., & Sugahara, S. (2010). South Atlantic Ocean cyclogenesis climatology simulated by regional climate model (RegCM3). *Climate Dynamics*, 35(7), 1331–1347. <https://doi.org/10.1007/s00382-009-0668-7>
- Sinclair, M. R. (1996). A Climatology of Anticyclones and Blocking for the Southern Hemisphere. *Monthly Weather Review*, 124(2), 245–264. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1996\)124<0245:ACOAAB>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1996)124<0245:ACOAAB>2.0.CO;2)
- Takaya, K., Nakamura, H., 2001. A Formulation of a Phase-Independent Wave-Activity Flux for Stationary and Migratory Quasigeostrophic Eddies on a Zonally Varying Basic Flow. *Journal of the Atmospheric Sciences* 58. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2001\)058<0608:AFOAPI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2001)058<0608:AFOAPI>2.0.CO;2)
- Thompson, D. W. J., & Wallace, J. M. (2000). Annular Modes in the Extratropical Circulation. Part I: Month-to-Month Variability*. *Journal of Climate*, 13(5), 1000–1016. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2000\)013<1000:AMITEC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013<1000:AMITEC>2.0.CO;2)
- Vianello, R. L., & Alves, A. R. (1991). *Meteorologia básica e aplicações*. Universidade Federal de Viçosa.

- Wilks, D. S. (1995). Statistical methods in the atmospheric sciences. Em *International geophysics series CN - QC874.5 .W55 2006* (2nd ed). Academic Press.
- Wilks, D. S. (2006). *Statistical methods in the atmospheric sciences*. Academic Press (International Geophysics Series 91).