

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**QUARENTA ANOS DE CICLOGÊNESE EXPLOSIVA
NA REGIÃO SUL DO BRASIL**

PEDRO AMARAL REIS

ORIENTADOR: Prof. Dr. FRANCISCO ELISEU AQUINO

PORTO ALEGRE

2022

**QUARENTA ANOS DE CICLOGÊNESE EXPLOSIVA
NA REGIÃO SUL DO BRASIL**

Dissertação de Mestrado Acadêmico em
Geografia no Programa de Pós-Graduação
em Geografia na Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, avaliada pela banca
examinadora:

Dra. Venisse Schossler
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
INCT da Criosfera

Prof. Dr. Daniel Pires Bitencourt
Fundacentro

Dra. Carolina Barnez Gramcianinov
Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas
Universidade de São Paulo

Porto Alegre, 2022

CIP - Catalogação na Publicação

Reis, Pedro Amaral
Quarenta anos de Ciclogênese Explosiva na Região
Sul do Brasil / Pedro Amaral Reis. -- 2022.
64 f.
Orientador: Francisco Eliseu Aquino.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Programa
de Pós-Graduação em Geografia, Porto Alegre, BR-RS,
2022.

1. Climatologia. 2. Ciclones Explosivos. 3. ENOS.
4. Eventos Extremos. I. Aquino, Francisco Eliseu,
orient. II. Título.

Agradecimentos

Minha primeira manifestação de gratidão é dedicada à minha família. Primeiramente aos meus pais que me proporcionaram uma vida com amor, segurança e o conforto necessário para que eu fosse em busca dos meus sonhos. Meu irmão, Arthur, um dos meus maiores exemplos, por me ensinar diariamente, direta ou indiretamente, como me tornar uma pessoa melhor e mais empática. Ao Bruno, meu primo-irmão, genial, inspirador e um ombro sempre presente.

Letícia, minha companheira de vida, meu reduto de paz. Teria sido quase impossível passar por esse período do mestrado e da pandemia sem sua presença. Agradeço pelo carinho e compreensão no apoio de toda essa jornada.

Ao meu orientador, Francisco Eliseu Aquino, por tantos anos de orientação e amizade. Sua dedicação a todo o Centro Polar e Climático e o NOTOS é motivo de inspiração e orgulho de todos orientandos e colegas.

Meus colegas de laboratório, com menção especial a Dra. Venisse Schossler, pelo carinho e auxílio ao meu desenvolvimento acadêmico, sendo fundamental para concretização da minha primeira publicação internacional. Também agradeço a Pedro, Rafaela, Isaias, Ronaldo e Cláudia, por todas as trocas e ensinamentos, por fazerem do CPC um espaço pulsante de conhecimento e diversão.

Agradeço a Dra. Carolina Gramcianinov e ao Professor Ricardo Camargo, pela confiança e parceria no compartilhamento de conhecimento e experiência fundamentais para concretização desse trabalho.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela possibilidade de cursar o mestrado com bolsa de estudos, permitindo maior tranquilidade para execução do trabalho. Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da UFRGS, pela organização e sustentação de um programa de pós-graduação de qualidade. Agradeço, por fim, a Universidade Federal do Rio Grande do Sul, que desde 2014 me oferece a oportunidade de estudar de forma gratuita e com excelência.

Resumo

O aumento das temperaturas globais é responsável pelas mudanças climáticas ao longo do século XXI, onde se espera um aumento de eventos meteorológicos extremos. Ciclones extratropicais explosivos são fenômenos associados a grande volume de precipitação, vendavais e granizo, e nas regiões costeiras também se associa a marés de tempestade. Este estudo apresenta uma nova climatologia de eventos de ciclogênese explosiva na Região Sul do Brasil, e investiga a sua relação com os anos mais quentes dos registros modernos, e também com anos de El Niño Oscilação-Sul (ENOS) Muito Forte (anomalias positivas superiores ou iguais a 2,0°C). O sistema TRACK é utilizado para identificação e avaliação dos ciclones, a partir dos dados de vorticidade do vento em 850 hPa. O banco de dados utilizado para o *tracking* é da reanálise climática ERA5, do ECMWF, com resolução temporal de 1h para o período de 1980-2019. A Região Sul do Brasil apresenta em média 2,7 ($\pm 1,7$) ciclones explosivos por ano, média de aprofundamento da pressão central em 24h de 25,6 ($\pm 6,5$) hPa, média do ponto mais profundo de 973,5 hPa e com intensidade média de 1,34 ($\pm 0,38$) TNA. A ocorrência de ciclones explosivos está relacionada ao ENOS positivo, onde nas primaveras há uma média de 1 ciclone explosivo, frente a 0,59 de anos neutros ou de ENOS negativo. Em anos de ENOS Muito Forte a média de casos é de 1 ciclone explosivo forte ao ano, frente a 0,5 de anos neutros ou de ENOS negativo. A presença do Jato de Baixos Níveis da América do Sul, associado às Correntes de Jato tem influência positiva em intensificar os ciclones da Região Sul do Brasil.

Palavras-Chave: ciclones explosivos; ENOS; climatologia; eventos extremos.

Abstract

The increase in global temperatures is responsible for climate change throughout the 21st century, where an increase in extreme weather events is expected. Explosive extratropical cyclone is phenomena associated to large amounts of precipitation, windstorms and hail, and in coastal regions are often associated with storm surges. This study presents a new climatology of explosive cyclogenesis events in the southern Brazil, and investigates their relationship with the warmest years in modern records, and also with Very Strong El Niño Southern-Oscillation (ENSO) years (positive anomalies greater than or equal to 2.0° C). The TRACK system is used to identify and evaluate cyclones, based on wind vorticity data at 850 hPa. The database used for tracking is from the ERA5 climate reanalysis, by ECMWF, with a temporal resolution of 1h for the period 1980-2019. The southern Brazil has an average of 2.7 (± 1.7) explosive cyclones per year, average central pressure deepening in 24 hours of 25.6 (± 6.5) hPa, average of the deepest point of 973.5 hPa and with an average intensity of 1.34 (± 0.38) NDR. The occurrence of explosive cyclones is related to positive ENSO, where in spring there is an average of 1 explosive cyclone, compared to 0.59 of neutral or negative ENSO years. In Very Strong ENSO years, the average number of cases is 1 strong explosive cyclone per year, compared to 0.5 in neutral or negative ENSO years. The presence of the South American Low-Level Jet, associated with the Jet Streams, has a positive influence on intensifying the cyclones in the southern Brazil.

Key Words: explosive cyclones; ENSO; climatology; extreme events.

Lista de Abreviaturas

| | |
|--------------|---|
| AS | América do Sul |
| BNOA | Baixa do Noroeste da Argentina |
| CFSR | Climate Forecast System Reanalysis |
| DOI | Dipolo do Oceano Índico |
| ECWMF | European Centre for Medium-Range Weather Forecast |
| EN | El Niño |
| ENOS | El Niño Oscilação Sul |
| HS | Hemisfério Sul |
| IPCC | International Panel on Climate Change |
| JAN | Jato de Alto Nível |
| JBN | Jato de Baixos Níveis |
| LN | La Niña |
| NASA | National Aeronautics and Space Administration |
| NCEP | National Center for Environmental Prediction |
| NOAA | National Oceanic and Atmospheric Administration |
| PNMM | Pressão ao Nível Médio do Mar |
| OAA | Oscilação Antártica |
| OAS | Oceano Atlântico Sul |
| ONI | Oceanic Niño Index |
| TSM | Temperatura da Superfície do Mar |

Lista de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Anomalia da Temperatura da Superfície do Mar (°C) nos períodos a) 1982-83, b) 1997-98 e c) 2015-16, em comparação com o período 1990-2020, pelo modelo ERA5..... | 10 |
| Figura 2 – Ocorrência global da ciclogênese de ciclones extratropicais nos meses de inverno no Hemisfério Norte (a) e Hemisfério Sul (b) entre 1958-2001. As unidades representam o número de ciclones por 10^4 km ² | 11 |
| Figura 3 – Estágios da evolução de ciclones extratropicais, em modelo aplicado ao Hemisfério Norte..... | 15 |
| Figura 4 – Distribuição anual de isolinhas de frequência de ciclogênese entre 1979-1988 | 20 |
| Figura 5 – Mapa de densidade de ciclogênese (ciclone por 10^6 km ²), com as quatro zonas ciclogênicas no domínio do Oceano Atlântico Sul | 21 |
| Figura 6 – Temperatura Média Anual e tendência para o Sul do Brasil nos períodos | 25 |
| Figura 7 – Precipitação média anual do Rio Grande do Sul entre (a) 1945-1974 e (b) 1975-2004..... | 26 |
| Figura 8 – Área de Estudo | 28 |
| Figura 9 – Possíveis áreas de análise do El Niño Oscilação Sul | 29 |
| Figura 10 – Índice Niño Oceânico entre 1950-2016..... | 30 |
| Figura 11 – Distribuição anual de ciclones extratropicais com gênese na RG1 e RG2 | 36 |
| Figura 12 – Distribuição anual de ciclones explosivos com gênese na RG1 e RG2 | 36 |
| Figura 13 – Rota ciclônica nas 24h de desenvolvimento explosivo por década. | 38 |
| Figura 14 – Ciclones Explosivos da RG2 | 39 |
| Figura 15 – Latitude média das rotas ciclônicas por estação. | 40 |
| Figura 16 – Ocorrência mensal de ciclones explosivos na RG1. | 41 |
| Figura 17 – Ocorrência sazonal de ciclones explosivos na RG1. | 42 |
| Figura 18 – Histograma de intensidade dos ciclones explosivos da RG1. | 44 |
| Figura 19 – Distribuição dos ciclones explosivos da RG1 por intensidade. | 45 |
| Figura 20 – Distribuição por intensidade dos ciclones explosivos da RG2. Quadrados = Moderados, triângulos = Fracos. | 45 |
| Figura 21 – Intensidade dos ciclones explosivos da RG1 e RG2 por estação. | 46 |
| Figura 22 – Intensidade dos ciclones explosivos da RG1 e RG2 por década. | 47 |
| Figura 23 – Distribuição sazonal de ciclones explosivos entre 1980-2019..... | 48 |

Lista de Tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Principais climatologias de ciclones extratropicais da América do Sul e Oceano Atlântico Sul..... | 24 |
| Tabela 2 – ONI - média móvel de 3 meses dos El Niño Muito Fortes | 31 |
| Tabela 3 – Classificação de intensidade de ciclones explosivos..... | 34 |
| Tabela 4 – Intensidade dos ciclones explosivos na RG1 e RG2 entre 1980-2019. ... | 43 |
| Tabela 5 – Intensidade dos ciclones explosivos por estação | 46 |
| Tabela 6 – Ocorrência e intensidade de ciclones explosivos na RG1 nos anos mais quentes da Região Sul do Brasil..... | 49 |
| Tabela 7 – Ocorrência de ciclones explosivos na RG1 e RG2 em relação ao ENOS | 50 |
| Tabela 8 – Ocorrência e intensidade de ciclones explosivos na RG1 e RG2 em anos de EN Muito Forte. | 51 |

Sumário

| | |
|---|-----------|
| 1. Introdução | 9 |
| 1.1 Contextualização..... | 9 |
| 1.2 Justificativa..... | 12 |
| 1.3.1 Objetivo | 13 |
| 2. Referencial Teórico | 14 |
| 2.1 Ciclogênese..... | 14 |
| 2.2 Estrutura e intensificação | 14 |
| 2.3 Identificação e classificação | 16 |
| 2.4 Ciclones Explosivos | 18 |
| 2.5 Ciclogênese na América do Sul e Oceano Atlântico Sul..... | 19 |
| 2.6 Projeções | 25 |
| 3. Dados e Métodos | 28 |
| 3.1 Área de estudo..... | 28 |
| 3.2 Temperatura no Sul do Brasil..... | 29 |
| 3.3 Índice Niño | 29 |
| 3.4 Reanálises Climáticas..... | 31 |
| 3.5 Tracking e banco de dados de ciclones extratropicais..... | 32 |
| 3.6 Identificação e Classificação de ciclones explosivos..... | 33 |
| 4. Resultados e Discussões | 35 |
| 4.1 Climatologia de ciclones explosivos..... | 35 |
| 4.2 Classificação de intensidade | 43 |
| 4.3 Ciclones Explosivos e ENOS | 49 |
| 5. Conclusões | 52 |
| Referências Bibliográficas | 54 |

1. Introdução

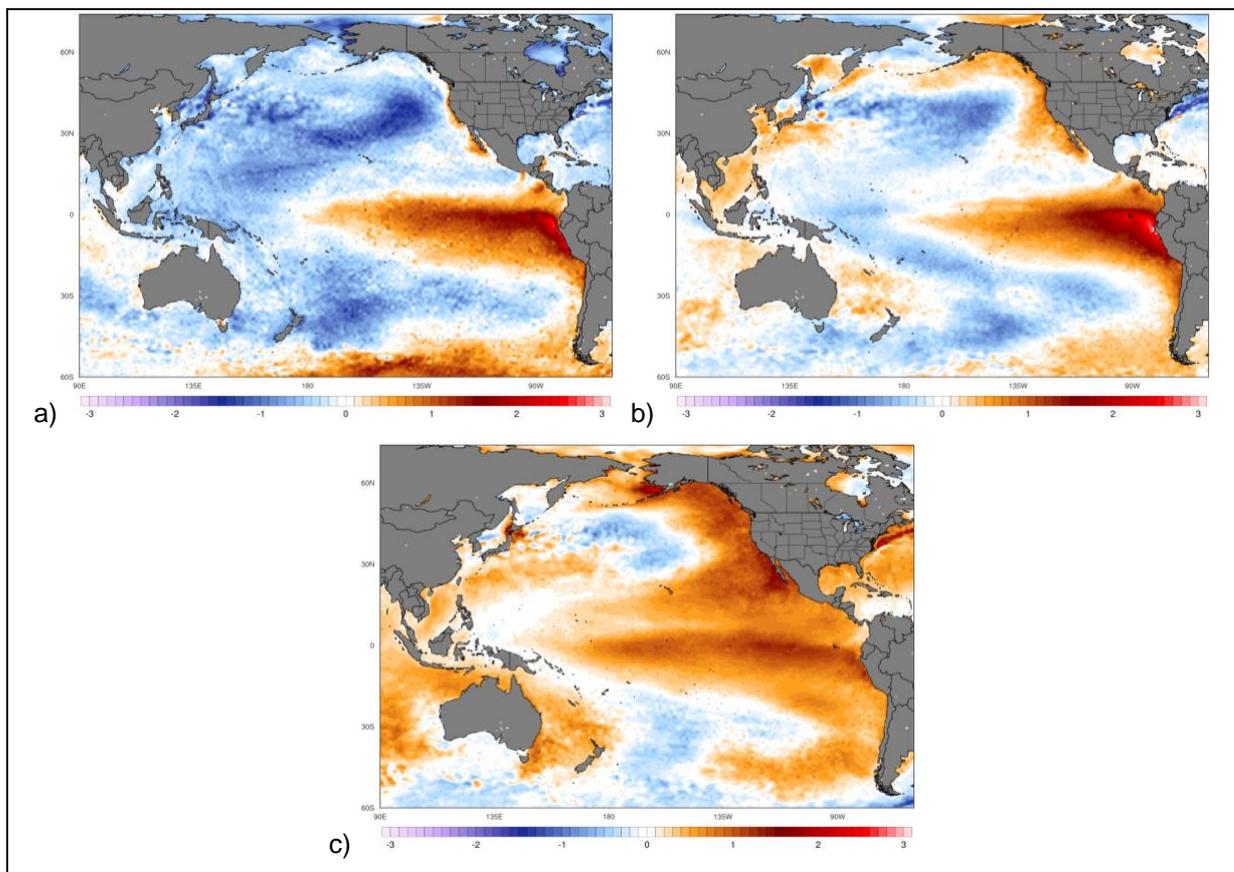
1.1 Contextualização

A interferência humana no sistema climático global, acentuada nos últimos séculos, tem gerado um aumento da preocupação científica, governamental e pública quanto às consequências das mudanças climáticas e a degradação ambiental para a continuidade da vida na Terra. Segundo a Plataforma Intergovernamental sobre Biodiversidade e Serviços Ecossistêmicos (IPBES, 2018), 75% da superfície terrestre encontra-se degradada, e Kennedy *et al.* (2019) apontam que apenas 5% não sofreu interferência humana. Analisando o último século, mesmo trabalhos com estimativas cautelosas (CEBALLOS *et al.*, 2015; CEBALLOS *et al.*, 2017) identificam que a Sexta Extinção em Massa de biodiversidade terrestre está em curso.

Observando as forçantes do clima global - ciclos orbitais e solares, assim como vulcanismos, cobertura de nuvens e uso da terra -, o aumento de gases de efeito estufa antropogênicos mostra-se como principal fator do aumento das temperaturas globais na modernidade (FORSTER *et al.*, 2007; IPCC, 2021). Desta forma, o aquecimento médio global registrado desde 1880 é de aproximadamente 1°C, sendo o período de 2010-2020 o mais quente dos registros modernos (NOAA, 2021). Nesse cenário, o incremento de vapor d'água na atmosfera e as alterações no balanço de energia propiciam novos padrões climáticos, assim como o aumento de eventos meteorológicos extremos e desastres em diferentes partes do globo.

As variações da temperatura média anual do planeta, assim como as alterações nos regimes de precipitação, podem ocorrer devido a processos naturais transferência de calor do sistema climático de escalas anuais e decenais. O modo de variabilidade climática El Niño-Oscilação Sul (ENOS) em sua fase positiva, por exemplo, pode ser visto como uma troca de calor do reservatório oceânico para a atmosfera, aumentando a temperatura em superfície (BARRY e CHORLEY, 2013). A alteração de fases (positiva, neutra e negativa) do ENOS gera variações climáticas em todo o globo, podendo levar diferentes regiões a regimes de secas ou de inundações. Durante o período de 1980-2020 a alteração de fases do ENOS foi abruptamente positiva (superior a 2,0° C) em apenas 3 momentos: 1982-83, 1997-98 e 2014-16 (NOAA, 2019), sendo classificados como Muito Forte (Figura 1).

Figura 1 – Anomalia da Temperatura da Superfície do Mar (°C) nos períodos a) 1982-83, b) 1997-98 e c) 2015-16, em comparação com o período 1990-2020, pelo modelo ERA5.



Fonte: Climate Reanalyzer (2021).

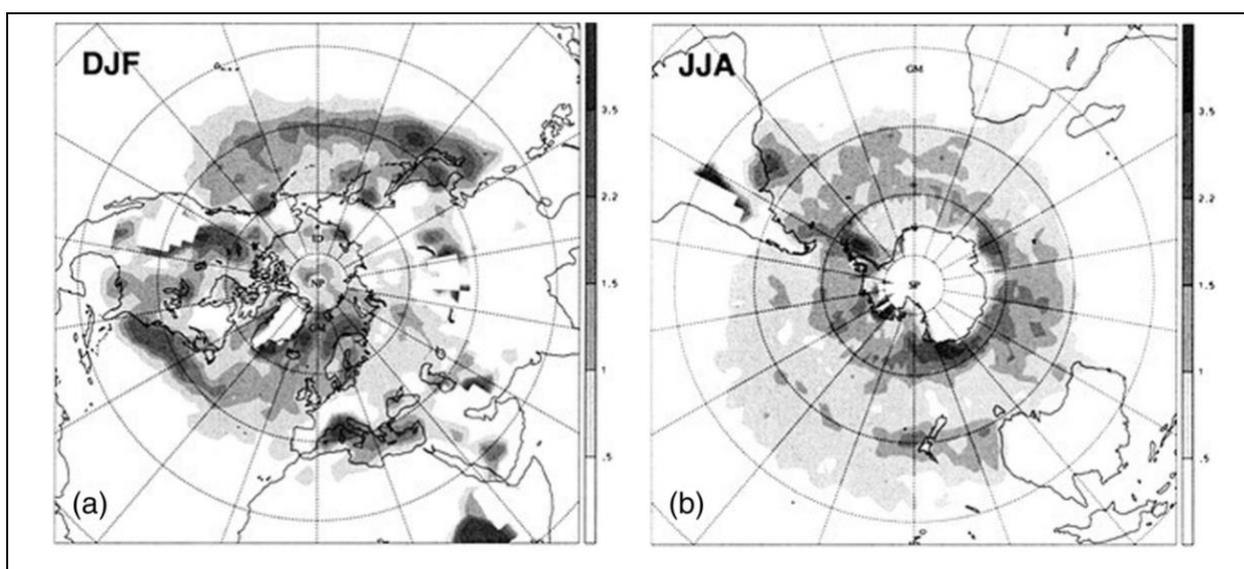
O Sul do Brasil é sensível a essas variações e mudanças de temperatura e precipitação do sistema global. Ernst (2019) aponta para um aumento de temperatura constante de 1901 a 2018, onde os cinco anos mais quentes da Região ocorreram no século XXI, quatro deles na década de 2010. Quanto ao regime de chuvas, no Rio Grande do Sul (RS), há um aumento progressivo na quantidade de água precipitada desde a década de 40 (GROISMAN *et al.*, 2004; VIANA *et al.*, 2006).

O avanço científico nas áreas de meteorologia e climatologia durante os últimos dois séculos, principalmente a partir de dados de satélite e a da era da informatização, permitiu que muitos mecanismos e fenômenos atmosféricos fossem descobertos e estudados. Nesse caminho, em razão da grande importância no transporte de calor, umidade e quantidade de movimento, além de mudanças no tempo das regiões onde atuam, os ciclones extratropicais e suas rotas ciclônicas (*storm track*, em inglês) se mostraram peças essenciais da circulação geral da atmosfera e vem sendo estudados desde o século XIX (GAN e SELUCHI, 2009; SCHULTZ *et al.* 2019). No Hemisfério Norte (HN), são responsáveis por até 90% da

precipitação total em algumas regiões (HAWCROFT *et al.*, 2012) e até 75% da precipitação do inverno em áreas do mediterrâneo (ZAPPA *et al.*, 2015). No Hemisfério Sul (HS), são fundamentais na climatologia da precipitação sobre a região extratropical da América do Sul (AS) (PEREIRA, 2013).

Mesmo que inicialmente sua identificação fosse através de manifestação nos campos de pressão em superfície, para compreender quais são locais e condições da ocorrência de ciclogênese foi preciso um olhar para a alta troposfera e as correntes de jato. As rotas ciclônicas se estabelecem nas áreas preferidas de atuação das correntes de jato, que controlam a gênese, movimento e ciclólise de sistemas de pressão de escala sinótica (SCHULTZ *et al.* 2019). Assim, a partir de climatologias de ciclones extratropicais (Figura 2) sabemos que há tendência de ocorrência em regiões específicas do globo (WERNLI e SCHWIERZ, 2006; REBOITA *et al.* 2015), onde há uma máxima de ciclogênese que ocorre ao longo do Oceano Atlântico Norte e Oceano Pacífico Norte, para o HN e ao longo do Oceano Atlântico Sul (OAS) e leste da Austrália e Nova Zelândia no HS (SCHULTZ *et al.* 2019). Gramcianinov *et al.* (2019) aponta a existência de quatro áreas ciclogenéticas no OAS, estando o Sul do Brasil inserido em duas delas. Como veremos no próximo capítulo, a geografia da AS favorece a formação desses sistemas, por fatores de influência orográfica e oceânica.

Figura 2 – Ocorrência global da ciclogênese de ciclones extratropicais nos meses de inverno no Hemisfério Norte (a) e Hemisfério Sul (b) entre 1958-2001. As unidades representam o número de ciclones por 10^4 km^2 .



Fonte: Schultz *et al.* (2019), adaptado de Wernly e Schwierz (2006).

Reboita et al. (2018) analisam a influência de modos de variabilidade climática na ciclogênese no HS. Embora o número de ciclones apresente similaridade quando comparadas suas fases positivas, negativas e neutras, os diferentes padrões modificam as regiões preferenciais da sua ocorrência e diferem na frequência de fenômenos fortes (quando a pressão central do ciclone é inferior a 980 hPa).

Quando ganham intensidade, esses fenômenos são responsáveis pela intensificação das ondas oceânicas em grande parte da costa oeste do OAS (da ROCHA *et al.*, 2004; SCHOSSLER *et al.*, 2019) e por tempestades associadas a queda de granizo e vendavais (REIS, 2018). Dentre os ciclones extratropicais foi objeto de análise desse trabalho aqueles que apresentam rápido aprofundamento da sua pressão central, aproximadamente 1 hPa por hora durante 24 horas, classificados como ciclones explosivos (SANDERS e GYAKUM 1980). Esse fenômeno é raro em comparação a população total de ciclones, porém pode ser responsável por desastres quando ocorrem sobre o continente ou em porções oceânicas próximas.

Globalmente, sua ocorrência é maior durante o inverno, e sua frequência no HS é menos conhecida em relação ao Hemisfério Norte (GAN e RAO 1991; ALLEN *et al.* 2010). Essa categoria de ciclones também tem se tornado menos prevalente nas médias latitudes e mais comum nas altas latitudes em ambos os hemisférios desde 1970 (Allen *et al.* 2010). Avaliando as características desse fenômeno na região ciclogênética da AS, Bitencourt et al. (2013) identificaram que eles não ocorrem ao norte de 27° S, possuem maior raio, menor pressão central, além de ventos médios com intensidade 60% maior em relação aos ciclones não explosivos. Segundo Reis *et al.* (2020) a ocorrência desse fenômeno também está relacionada aos fluxos de umidade e calor transportado pelo Jato de Baixos Níveis (JBN) da Região Amazônica.

1.2 Justificativa

Sabe-se que as mudanças climáticas podem acarretar em alterações na distribuição de ciclones extratropicais, o que inclui seus locais de ocorrência, trajetórias, frequência e intensidade (LIMA, 2013). Gramcianinov (2018) ao identificar quatro diferentes regiões ciclogênicas no OAS, possibilita a análise em maior detalhamento sobre as diferentes características de ciclogênese da AS. Diferentemente de trabalhos anteriores, como Gan e Rao (2001) e Bitencourt et al. (2013), esse trabalho se propõe a identificar e analisar os eventos ocorridos na região que abrange o Sul e Sudeste do Brasil, distinguindo-os dos eventos que ocorrem na

região ciclogênica mais ao sul. O refinamento das reanálises climáticas na última década também permite que melhores análises sejam realizadas, atualizando e expandindo as climatologias existentes até o momento.

Sanders (1986) propõe a classificação de intensidade de ciclones explosivos em Fraco, Moderado e Forte. Embora já tenha sido empregada em trabalhos de estudo de caso (REIS *et al.* 2020; SCHOSSLER *et al.* 2020) e até em análises climatológicas (BITENCOURT *et al.* 2013) na AS, a sua distribuição temporal e espacial de ciclones explosivos de acordo com sua intensidade ainda são desconhecidas.

A rápida intensificação de ciclones depende também de características individuais de mesoescala, sendo assim necessário considerar o impacto das mudanças climáticas nesses sistemas (FYFE, 2003). Dessa forma, ao analisar a intensidade ciclônica nos anos mais quentes, assim como os anos de ENOS Muito Forte espera-se obter indícios do comportamento de ciclones extratropicais explosivos na AS em um cenário de planeta mais aquecido.

1.3.1 Objetivo

Investigar a ocorrência de ciclones explosivos na Região Sul do Brasil.

1.3.2 Outros objetivos

- Construir a climatologia de ciclones explosivos da Região Sul do Brasil;
- Investigar a tendência da ciclogênese explosiva;
- Avaliar intensidade da ciclogênese explosiva no Sul do Brasil;
- Investigar a relação de ciclogênese explosiva com anos de EN Muito Forte;

2. Referencial Teórico

2.1 Ciclogênese

A Ciclogênese é o processo de formação e desenvolvimento de circulação ciclônica na atmosfera. De acordo com Gramscianinov (2018), ciclones podem ser categorizados como tropicais, subtropicais e extratropicais, onde as características de gênese são agrupadas por faixas latitudinais. O referencial teórico apresentado nesse capítulo se propõe a apresentar o estado da arte em relação ao conhecimento sobre ciclones extratropicais. Os tópicos estão organizados em: Estrutura e intensificação, afim de definir as características gerais de gênese e desenvolvimento; Identificação e classificação, apresentando os diferentes métodos de identificação; um tópico apenas para descrição do conhecimento sobre Ciclones explosivos; Ciclogênese na América do Sul e Oceano Atlântico Sul, aprofundando a discussão sobre a ocorrência desse fenômeno na área de estudo; e por fim, Projeções da ocorrência desse fenômeno no século XXI.

2.2 Estrutura e intensificação

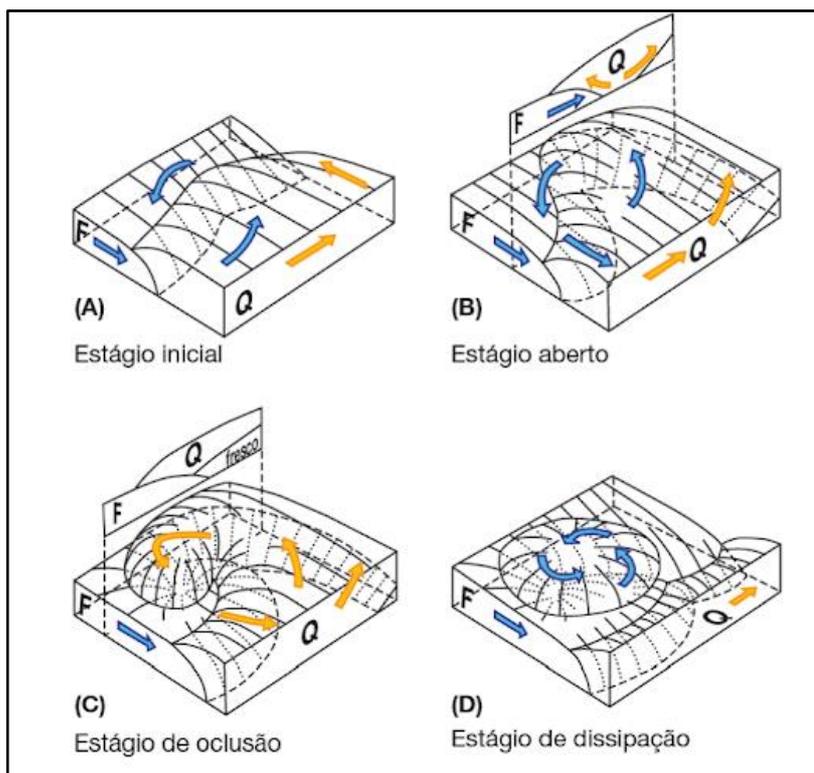
Bjerknes e Solberg (1922) propõem que a instabilidade baroclínica é considerada um dos mecanismos fundamentais para o desenvolvimento de um ciclone extratropical. A atmosfera baroclínica é definida como o estado onde a densidade depende tanto à pressão quanto a temperatura do ar, e onde o vento geostrófico varia com a altura e é relacionado com o gradiente horizontal de temperatura pela equação do vento térmico (AMS, 2012). Ela está associada à conversão de energia potencial em energia cinética, intensificando a circulação secundária e o movimento de rotação do ciclone (GAN e SELUCHI, 2009).

Henry (1922) descreve o primeiro modelo conceitual de ciclogênese baseado na instabilidade baroclínica, criado por Bjerknes e Solberg (1922). A ideia central dos autores é de que ciclones extratropicais se formam ao longo de linhas de descontinuidade que separam as massas de origem polar (fria) das de origem tropical (quente).

Strahler (1965) representa a interação entre massas nos estágios de desenvolvimento de um ciclone extratropical no modelo de Bjerknes e Solberg. Em superfície, o processo de formação se inicia (Figura 3) a partir de uma onda de pequena amplitude sobre a frente polar estacionária e se intensifica até o ponto de

maior desenvolvimento, o que caracteriza seu estágio maduro ou aberto. Posteriormente, denomina-se estágio de oclusão quando há o avanço da frente fria sobre a frente quente; e, por fim, o estágio de dissipação do ciclone, também chamado de ciclólise. Esse fenômeno cobre uma área entre 1500 km e 3000 km de diâmetro, com duração de quatro a sete dias (BARRY e CHORLEY, 2012).

Figura 3 – Estágios da evolução de ciclones extratropicais, em modelo aplicado ao Hemisfério Norte.



Fonte: Strahler (1965), retirado de Barry e Chorley (2012).

É a partir do avanço tecnológico, principalmente a partir da metade do Século XX, com sensoriamento remoto, observações do ar em superfície e altitude, modelos numéricos, que o conhecimento sobre o ciclo de vida dos ciclones extratropicais se transformou. Os principais avanços mostram que: 1) as frentes são muitas vezes consequência da ciclogênese, ao invés de sua causa; 2) as frentes não são necessariamente estruturalmente contínuas ao longo da troposfera e respondem a diferentes processos dinâmicos em superfície e altitude; 3) a ciclogênese é melhor compreendida como uma consequência da instabilidade baroclínica e a interação com altos níveis, superfície e anomalias de vorticidade potencial geradas de forma diabática, ao invés de instabilidades frontais; e 4) o caminho para o desenvolvimento de ciclones extratropicais inclui não apenas a ciclogênese associada a um limite

frontal, mas também a ciclogênese em correntes de ar polares, e na transição de ciclones tropicais para extratropicais (SCHULTZ *et al.*, 2019).

Schultz *et al.* (2019) aponta que nas décadas de 1980 e 1990 havia uma necessidade de um melhor entendimento a cerca da previsão, ainda pobre, de ciclones extratropicais explosivos. Como resultado de extensas pesquisas, um novo modelo conceitual foi proposto por Saphiro e Keyser (1990), onde sobretudo, a principal diferença foi a não inclusão do processo de oclusão ao final do ciclo de vida do ciclone, mas sim o estágio onde as frentes fria e quente se tornam alinhadas perpendicularmente uma a outra.

A atividade ciclogênética também é influenciada por barreiras orográficas, a partir da perturbação do escoamento zonal de oeste. Ao formarem uma crista a barlavento e um cavado a sotavento via conservação da vorticidade potencial, cadeias de montanhas como os Andes favorecem a ocorrência ciclônica à leste. A influência orográfica já foi descrita em outras cadeias montanhosas, como no Alpes, onde dois tipos de ciclogênese identificadas possuíam o bloqueio do ar frio em baixos níveis pelas montanhas (PILCHER e STEINACKER, 1987), e também nas Montanhas Rochosas, onde há o favorecimento de ciclogênese, associada em alguns casos a tempo severo (HOBBS *et al.*, 1990).

Além disso, as águas costeiras no inverno - por estar mais aquecida que o continente - costumam favorecer o desenvolvimento de ciclones. Isso se dá pois a ciclogênese ocorre onde e quando a advecção de vorticidade ciclônica em altos níveis posiciona-se a uma zona baroclínica nos baixos níveis (GAN e SELUCHI, 2009). Ambos fatores são grandes responsáveis pela grande atividade ciclogênética da AS e do sudoeste do OAS, e serão explorados nas seções seguintes.

2.3 Identificação e classificação

A identificação de ciclones e de suas trajetórias vem sendo estudada através de diferentes variáveis atmosféricas e métodos ao longo das últimas décadas, passando por processos manuais, até chegar aos algoritmos automatizados de rastreamento disponíveis atualmente. As técnicas iniciais eram compostas por análises manuais de cartas sinóticas (TALJAARD, 1967). De acordo com Gramcianinov (2018), na década seguinte, avanços na qualidade dos dados com o surgimento de dados tabulares de modelos de previsão de tempo permitiram uma identificação mais eficiente da atividade ciclônica. Entretanto, identificar e catalogar a

posição ciclônica manualmente se provou uma tarefa tediosa e consumidora de muito tempo (MURRAY e SIMMONDS, 1991).

Dessa forma, os principais sistemas de rastreamento automatizados surgem na década de 90. Esses sistemas, além de indicar a posição dos ciclones, permitiram extrair informações das características sinóticas dos eventos. Murray e Simmonds (1991) apresentam um esquema capaz de identificar os centros de baixa pressão nos campos de pressão ao nível médio do mar (PNMM), e mapear seu caminho da gênese à ciclólise. Posteriormente, Sinclair (1994) propõe um esquema baseado na vortacidade ciclônica em 1000 hPa, identificando as principais zonas ciclogênicas do HS. Similarmente, Hodges (1994, 1995) cria o TRACK analisando a vortacidade ciclônica dos ventos em 850 hPa. O sistema de Hodges é utilizado em Gramcianinov *et al.* (2019) pois possibilita a identificação de ciclones que poderiam ser perdidos na análise dos campos de PNMM.

Sinclair (1994) compara o uso das variáveis de PNMM e de vortacidade relativa para a detecção de ciclones na AS, apontando que a última é a mais indicada para estudos na região. Isso ocorre, pois, o fluxo de fundo (*background flow*) pode mascarar os primeiros momentos da ciclogênese nos campos de PNMM. Entre 20 e 40° S o gradiente de pressão em superfície é intenso e pode impedir o aparecimento de isóbaras fechadas antes do ciclone mover-se para latitudes mais altas ou antes que ele se intensifique. Assim, o uso da vortacidade relativa permite que um sistema fraco e de rápido deslocamento seja identificado em seu estágio inicial (SINCLAIR, 1994; HOSKINS e HODGES, 2002; GRAMCIANINOV *et al.*, 2019). Reboita *et al.* (2018), mostram que o refinamento dos dados de reanálises climáticas ao longo do tempo possibilita a identificação de um maior número de sistemas na AS através do uso de vortacidade relativa.

Além de sua identificação, por serem associados a chuvas intensas e a fortes ventos, foram criadas maneiras de se avaliar a intensidade dos ciclones extratropicais. Essas avaliações podem ser feitas pela análise do incremento de vortacidade ciclônica associada ao ciclone, ou simplesmente, pelo aprofundamento da pressão no centro do ciclone (GAN e SELUCHI, 2009). É consenso considerar uma ciclogênese intensa quando a sua pressão central seja inferior a 980 hPa.

Lim e Simmonds (2007) avaliam a intensificação dos ciclones a partir de sua estrutura vertical, onde ciclones bem desenvolvidos (da superfície à 500 hPa) diferem-se dos pouco desenvolvidos, que não costumam passar de 700 hPa. Dessa forma,

entende-se que quanto menor for a inclinação e, conseqüentemente, a distância entre centro em superfície e em 500 hPa, mais organizada é sua estrutura. Dentre o total de ciclones extratropicais no HS, foi identificado um aumento na proporção de ciclones com estrutura vertical bem desenvolvida, assim como da distância de inclinação dos centros (superfície-500 hPa) entre 1979-2001.

2.4 Ciclones Explosivos

Na busca de compreender a ocorrência de ciclones extratropicais vigorosos, alguns estudos de caso como Bergeron (1954) e Riehl (1980) definiam esses sistemas como furacões extratropicais. Porém, foi a partir de Sanders e Gyakum (1980) que o termo ciclone bomba ou explosivo foi cunhado. A categoria de ciclones explosivos foi criada para classificar ciclones que possuem rápida queda da pressão central, com queda de aproximadamente 1mb por hora durante 24h, e um rápido aumento do vento geostrófico que reflete em ventos mais fortes em superfícies (SANDERS e GYAKUM 1980; WATSON *et al.* 2000). Devido ao seu rápido desenvolvimento, um ciclone explosivo é capaz de gerar fortes ventos, intensa precipitação e condições marítimas adversas como aumento da altura de ondas e marés de tempestade. Seus impactos são documentados tanto em terra, quanto em alto mar (GYAKUM, 1983; BUCKLEY, 1983; LEBLOND, 1984; REIS *et al.*, 2020; SCHOSSLER *et al.* 2020).

São fenômenos predominantemente marítimos e de estação fria. Sua ocorrência especialmente sobre o oceano indica que a troca de energia entre a superfície e a baixa atmosfera é importante (KUO *et al.*, 1991). Sanders e Gyakum (1980) investigaram se haveria dependência de um mínimo de temperatura da superfície do mar para intensificação de ciclones extratropicais explosivos, assim como há para a ocorrência de ciclones tropicais. Essa dependência não foi identificada, com ciclones explosivos ocorrendo sobre temperaturas entre 0° e 23°C. Entretanto, os autores destacam que o avanço rápido de massas de ar frio sobre fortes gradientes de temperatura da superfície do mar, contribuem para uma rápida ciclogênese. Essa hipótese é corroborada por Bitencourt *et al.* (2013), onde autores apontam que cerca de 49,4% dos ciclones explosivos na AS apresentam toda trajetória sobre o oceano e outros 23,5% apresentam início da ciclogênese sobre o continente, mas que apenas se tornam explosivos ao ingressar no domínio oceânico.

Como apontado no primeiro capítulo, a estação preferencial de ocorrência é o inverno e sua frequência no HS é menos precisa em relação ao HN (GAN e RAO

1991; ALLEN *et al.* 2010). Segundo Allen *et al.* (2010), esse fenômeno tem se tornado menos prevalente nas médias latitudes e mais comum nas altas latitudes em ambos os hemisférios desde 1970. Os autores ainda apontam que no HS as áreas preferenciais de ocorrência foram identificadas se estendendo entre 70°-10° O, e 30°-50° S. De acordo com Gan e Seluchi (2009), a previsão de ciclones explosivos ainda representa um grande desafio para os modelos numéricos e para os previsores.

Uma das características que os diferem dos ciclones não explosivos é seu desenvolvimento vertical. Nesse sentido, Lim e Simmonds (2007) descrevem e caracterizam as diferenças entre ciclones com desenvolvimento vertical bem organizado (da superfície até 500 hPa), daqueles que não se desenvolvem acima de 700 hPa. Em geral, ciclones explosivos apresentam desenvolvimento vertical bem organizado quando atingem a fase madura no HS e uma inclinação vertical com desvio para oeste de em média 300 km entre o centro em superfície e o centro em 500 hPa. De acordo com os autores, a proporção entre os ciclones bem organizados apresenta crescimento entre a população total de ciclones no HS e que as distâncias entre os centros de superfície e 500 hPa apresenta diminuição entre 1979 e 2001. Essa tendência de intensificação também é apontada pelos autores na análise da taxa de aprofundamento da pressão central dos ciclones, onde foi encontrado crescimento estatisticamente significativo de fenômenos com queda de pelo menos 1 hPa por hora.

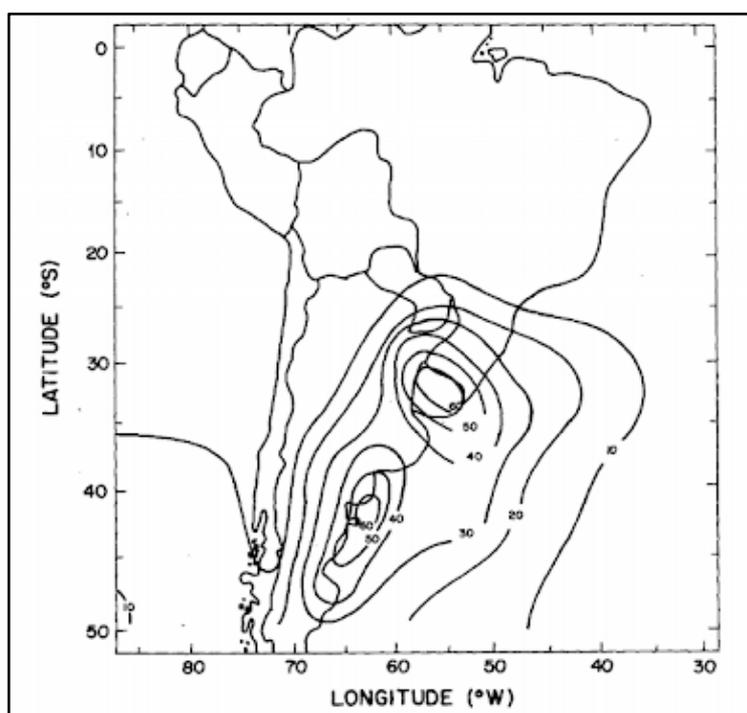
2.5 Ciclogênese na América do Sul e Oceano Atlântico Sul

Diversos trabalhos propõem e abordam a climatologia de ciclones extratropicais no mundo e HS (SINCLAIR, 1995; HART, 2003; ALLEN *et al.*, 2010; REBOITA *et al.*, 2015; XIA *et al.*, 2016) e no OAS (TALJAARD, 1967; RIVERO e BISCHOFF, 1971; GAN e RAO, 1991; SINCLAIR, 1996; BITENCOURT *et al.*, 2013; REBOITA, 2008; REBOITA *et al.*, 2018; JANTSCH, 2019; GRAMCIANINOV *et al.*, 2019). Nestes trabalhos, pelo menos duas áreas ciclogênicas são identificadas para o OAS, como destacado por Gan e Rao (1991), centrada sobre o Uruguai e mais intensa no inverno, e sobre a costa argentina (40° S; 65° W) com predominância no verão (Figura 4). Estes definem a ciclogênese a partir do primeiro aparecimento da primeira isóbara fechada nas cartas sinóticas de PNMM.

A não delimitação prévia de uma área de estudo no OAS permitiu que Gramcianinov *et al.* (2019) identificassem quatro zonas ciclogênicas distintas na região (Figura 5): a principal no centro da costa Argentina entre 50° S e 45° S; ao

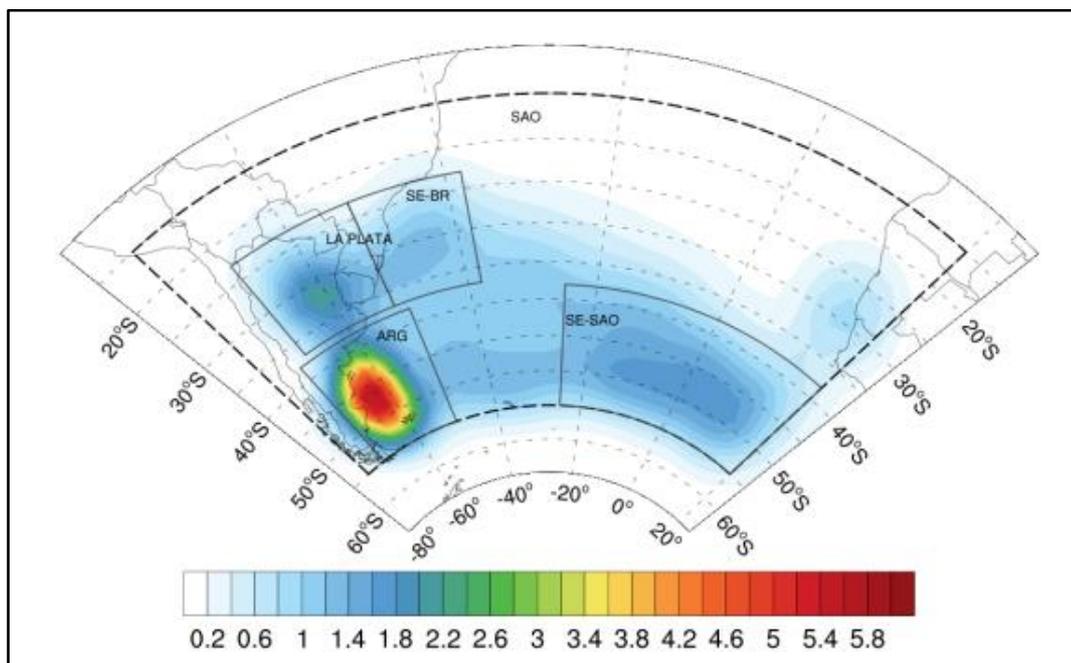
Nordeste da Argentina e Uruguai, próximo à descarga do Rio da Prata em 30° S; na costa Sul e Sudeste do Brasil entre 30° S e 25° S; e uma quarta região encontrada no sudeste do OAS, centrada em 55° S e 10° W. A localização média da atuação de ciclones extratropicais é chamada de rota ciclônica (ou *storm track*, em inglês). Entre 45° S e 55° S situa-se a principal rota do OAS. A zona ciclogênética que cobre o RS faz parte da rota ciclônica secundária do OAS. Segundo a autora, durante o verão, esse braço secundário se origina mais ao norte (30°S), enquanto nas outras estações localiza-se mais ao sul, entre 30° S e 35° S.

Figura 4 – Distribuição anual de isolinhas de frequência de ciclogênese entre 1979-1988



Fonte: Gan e Rao (1991).

Figura 5 – Mapa de densidade de ciclogênese (ciclone por 10^6 km^2), com as quatro zonas ciclogênicas no domínio do Oceano Atlântico Sul



Fonte: Gramcianinov *et al.* 2019.

Os diferentes métodos de detecção de ciclogênese levaram a diferentes climatologias para a frequência anual de sua ocorrência no OAS e AS. Em ordem cronológica de publicação, a Tabela 1 evidencia a discrepância de número de casos anuais registrados, que variam entre 17 e 411 casos. Essa diferença se dá principalmente pelas diferentes metodologias, áreas de estudo, variáveis atmosféricas, e banco de dados empregados. Destaca-se, entretanto, que quando analisadas somente o domínio ciclogênético entre 15 e 45° S, a média anual varia entre aproximadamente 40 e 65 casos.

Como já mencionados, fatores como orografia e a presença oceânica podem levar a intensificação da ciclogênese. Nesse caminho, Gan (1992) aponta que há influência da orografia sobre a ciclogênese na AS ao analisar dois casos de ciclogênese. Para melhor compreender essa influência, Seluchi e Saulo (1998) simularam o avanço de um ciclone sobre a AS com e sem a presença de topografia da Cordilheira, e apontam que o efeito orográfico retarda e intensifica a formação ciclônica.

A leste da Cordilheira dos Andes, dois sistemas de baixa pressão ocorrem de forma distinta, porém auxiliam na formação e intensificação da ciclogênese no Sudeste da AS. A Baixa do Noroeste Argentino (BNOA) e a Baixa do Chaco, por muito

tempo foram descritas como apenas um sistema (Depressão Termo-Orográfica do Noroeste Argentino) em decorrência da baixa resolução das reanálises globais para região central da AS (SELUCHI e SAULO, 2012). A BNOA é descrita como um sistema orográfico-termal, onde no verão austral é conduzida por uma baixa termal em superfície e no inverno pela forçante orográfica dos Andes. Normalmente localiza-se em 30° S, próximo aos Andes associado aos efeitos do barlavento. Segundo o Met Office (2021), esse efeito ocorre quando uma parcela de vento avança para uma região montanhosa e é forçado a subir e assim que passa pela barreira é defletido para baixo buscando voltar para seu nível original, onde então a oscilação se estabelece. Essa oscilação pode persistir por dezenas ou centenas de quilômetros e pode ocasionar ventos intensos em todos os níveis da troposfera.

A Baixa do Chaco, por outro lado, ainda não teve seus processos de formação e sua estrutura dinâmica e termodinâmica não são tão conhecidos (SELUCHI e SAULO, 2012). Seluchi e Saulo (2010) destacam que uma das características desse sistema é a resposta ao aquecimento da baixa e média troposfera, provocado pelo balanço positivo de calor do solo, pela liberação do calor latente devido a convecção (no verão), e pela influência de sistemas transientes (na primavera).

Em associação com esses dois sistemas de baixa pressão, a topografia da AS também é responsável pelo surgimento do Jato de Baixos Níveis (JBN). Os JBN são ventos de fluxo meridional observados na baixa atmosfera (velocidade máxima em torno de 2000 m de altitude) ao longo de cadeias montanhosas. Sua presença na AS é um fator importante no transporte de umidade para as regiões subtropicais, mesmo que ainda não tenha sido possível quantificar a porcentagem dessa contribuição (MARENGO *et al.*, 2009). De acordo com Montini *et al.* (2019), durante os últimos 40 anos (1979-2016) há um significativo aumento no fluxo de umidade transportada pelo JBN em direção a Região Sul do Brasil nas estações de primavera, verão e outono. Além disso, os autores ressaltam que na variabilidade interanual, a intensidade e frequência do JBN é significativamente modulada pelo ENOS, sendo mais forte e frequente em anos de EN do que nos de LN.

Nicolini *et al.* (2004) criam duas categorias de classificação no que diz respeito à posição latitudinal de saída do JBN, denominadas Evento de Jato do Chaco (EJC), quando a saída se localiza em latitudes a sul de 25° S, e Não-Evento de Jato do Chaco (NEJC), cuja saída se dá a norte de 25° S. Nascimento (2008) identificou que os JBN de característica EJC favorecem maiores volumes de precipitação sobre o sul do RS,

Uruguai e noroeste da Argentina. Em estudo de caso, Reis *et al.* (2020) aponta a influência do JBN com característica EJC na intensificação de uma ciclogênese explosiva no Sul do Brasil, onde se identificou através da análise de isótopos estáveis que a água da chuva precipitada possuía origem na Região Amazônica.

Bitencourt *et al.* (2013) teve como objetivo analisar a frequência de ciclones explosivos no sudeste da AS. Em sua consistente base de dados, identificou que a influência oceânica no desenvolvimento ciclônica é crucial para o caráter explosivo, onde 72,9% dos casos entre 1957-2010, evoluem para esse estágio quando adentram o domínio. Bitencourt *et al.* (2013) apontam que ciclones explosivos são raros quando comparados a população total de ciclones na AS, onde apenas entre 4,1% e 2,4% foram classificados como bomba. O autor ainda destaca que dessa população, 81% foram classificados como Fracos, 16,5% Moderados e apenas 2 eventos foram Fortes, de acordo com a classificação de intensidade de Sanders (1986).

Quantos aos modos de variabilidade climática, o primeiro estudo quanto a suas influências na ciclogênese da AS (Gan e Rao, 1991) apresentava um aumento de sua frequência em anos de EN e uma diminuição nas fases positivas da Oscilação Antártica (OAA). Entretanto, Reboita *et al.* (2015) avaliando o HS, aponta que as diferentes fases do ENOS, a OAA e o Dipolo do Oceano Índico (DOI), possuem similaridade na frequência de ciclones em relação aos anos neutros. Na realidade, aponta a autora, os diferentes padrões influenciam nas rotas ciclônicas, e na intensidade dos fenômenos. Assim é observado em Schossler *et al.* (2020), onde a ocorrência concomitante de duas ciclogêneses explosivas no HS, foi intensificada pela inversão da fase positiva para negativa da OAA, associada ao Padrão de Onda 3.

Tabela 1 – Principais climatologias de ciclones extratropicais da América do Sul e Oceano Atlântico Sul

| Trabalho | Período | Área | Variável de identificação | Metodologia de identificação | Banco de dados | Casos totais | Média de Casos anuais |
|-----------------------------------|-----------|--|---------------------------|---|-----------------------|--------------|-----------------------|
| Gan e Rao (1991) | 1979-1988 | 15°-50° S; 90°-30° W | PNMM | Gan e Rao, 1991 | Cartas Sinóticas IEA* | 1091 | 109 |
| Bitencourt <i>et al.</i> (2013) | 1957-2010 | 15°-45° S; 60°-20° W | PNMM | Murray e Simmonds, 1991; Simmonds e Murray, 1999; Simmonds <i>et al.</i> , 1999 | NCEP-I | 3483 | 72,5 |
| Rocha <i>et al.</i> (2016) | 2003-2013 | 15°-35° S; 50°-30° W | PNMM | Mendes <i>et al.</i> , 2009; Hart, 2003; Pezza e Ambrizzi, 2003; Gan e Rao, 1991) | ERA-Interim | 169** | 17** |
| Reboita <i>et al.</i> (2018) | 1979-2005 | 15°-55° S; 80°-20° W (excluindo domínio continental) | Vorticidade em 850 hPa | Reboita <i>et al.</i> 2010 | RegCM4 | 283 | 10,8 |
| | | | | | HadGEM2-ES | 260 | 10 |
| | | | | | CFSR | 252 | 9,6 |
| | | | | | ERA-Interim | 233 | 8,9 |
| | | | | | ERA-40 | 218 | 8,3 |
| | | | | | NCEP-I | 194 | 7,4 |
| | | | | | NCEP-II | 194 | 7,4 |
| Jantsch (2019) | 2000-2016 | 15°-40° S; 60°-30° W | PNMM | Gan 1992; Rocha <i>et al.</i> 2016 | CFSR e CFSv2 | 684 | 40,24 |
| Gramcianinov <i>et al.</i> (2019) | 1980-2010 | 23°-37° S; 68°-38° W | Vorticidade em 850 hPa | Hodges (1994, 1995) | CSFR | 2013 | 67,1 |

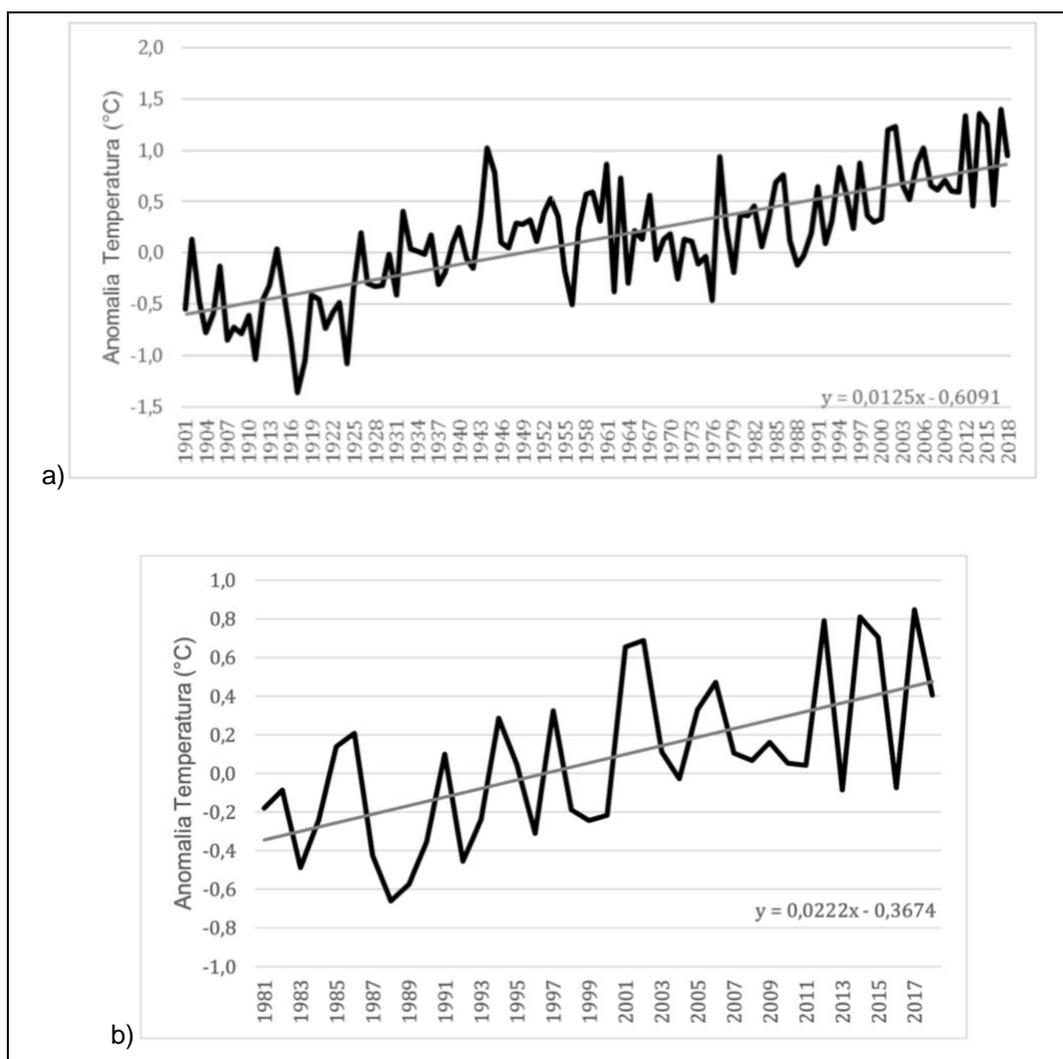
*Instituto de Atividades Espaciais

**Durante os meses de outubro a abril

2.6 Projeções

Segundo o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climática (IPCC, 2021) o aquecimento do sistema climático é inequívoco, e desde a década de 1950, muitas das mudanças observadas não possuem precedentes nas últimas décadas a milênio. Também é apontado que o período de 1982 a 2012 é provavelmente o mais quente do HN (onde tal medição pode ser feita com grau médio de confiança) desde 1400. De acordo com a GISS/NASA (2021), os anos de 2016 e 2020 empatam no posto de mais quentes dos últimos 140 anos, estando 1,02°C acima da climatologia 1951-1980. No Sul do Brasil, as séries temporais de anomalias de temperatura média anual de 1901 – 2018 e 1981 – 2018 (Figura 6a, 6b) apresentam tendências de +0,0125°C por ano, e +0,0222°C por ano, respectivamente (ERNST, 2019).

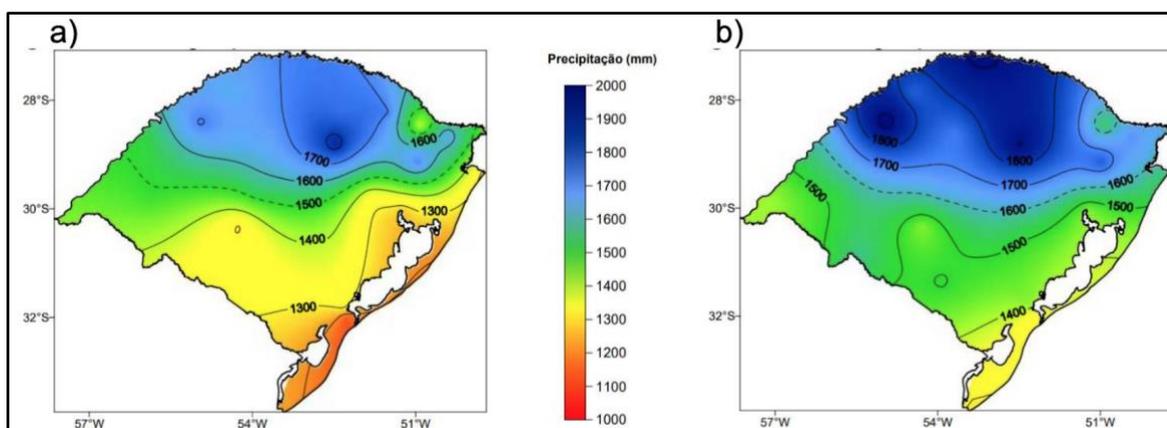
Figura 6 – Temperatura Média Anual e tendência para o Sul do Brasil nos períodos (a) 1901-2018 e (b) 1981-2018.



Fonte: Ernst (2019).

Considerando valores dos modelos climáticos regionais e do IPCC, Ambrizzi *et al.* (2018) aponta para um aquecimento médio de até 6° C no norte da AS, um aumento na precipitação na Região da Bacia do Prata, bem como uma diminuição na frequência de ciclones no sul do continente, entre 2070-2100. O aumento no volume de chuvas no RS já vem sendo observado. Viana *et al.* (2006) compararam duas séries recentes (Figura 7) com 30 anos de observações (1945-1974 e 1975-2004) a partir de médias anuais de precipitação de 24 estações meteorológicas. A Região Sul sofre periodicamente com extremos de precipitação, muitas vezes modulados pelo ENOS em suas diferentes fases. Em episódios canônicos, como o de 2015/2016, a frequência de extremos aumenta (Cavalcanti *et al.*, 2015).

Figura 7 – Precipitação média anual do Rio Grande do Sul entre (a) 1945-1974 e (b) 1975-2004



Fonte: Viana *et al.*, 2006.

Em um clima mais quente e úmido, a atividade ciclônica é amplificada (WILLISON *et al.*, 2015), havendo indicações de que ciclones intensos venham a ser mais frequentes no futuro (LAMBERT e FYFE, 2006; LIM e SIMMONDS, 2009; MIZUTA *et al.*, 2011). A utilização do modelo climático global CMIP3 no cenário A1B para o Hemisfério Norte (MIZUTA *et al.*, 2011) detectou um aumento na frequência de ciclones intensos (pressão central abaixo de 980 hPa) e uma diminuição de 10% a 20% do número total de ciclones.

Entretanto, trabalhos apontam a tendência de redução da frequência de ciclones extratropicais nas médias latitudes do HS e no OAS (FYFE, 2003; REBOITA *et al.*, 2018; GRAMCIANINOV, 2018). Parte deste decréscimo pode ser explicado pelo redirecionamento das rotas ciclônicas para as regiões polares (FYFE, 2003). De acordo com Mizuta *et al.* (2011), o maior aquecimento em baixos níveis nas altas

latitudes, em comparação aos trópicos, explicaria a redução da baroclinia em médias latitudes.

Reboita *et al.* (2018) projetam menor frequência de ciclones extratropicais no futuro próximo (de -6,5% a -3,6%, entre 2020-2050) e distante (de -11,4% e -10,4%, entre 2070-2098) para o OAS, a partir da técnica de downscaling dinâmico do modelo regional Regional Climate Model version 4 (RegCM4), no modelo climático global Hadley Global Environment Model 2 - Earth System (HadGEM2-ES) para o cenário RCP8.5. Por outro lado, o estudo indica que as principais características dos ciclones, notadamente o tempo de vida (entre 2,3 e 2,5 dias), vortacidade relativa inicial (entre $-3,0$ e $-2,7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$), a distância percorrida (entre 1908 e 1930 km) e a velocidade média, permanecerão similares à atualidade. Quanto à precipitação, a redução na frequência de ciclones, tende a gerar uma redução de até 15% entre 2070-2098, porém a quantidade de água precipitada por evento não foi explorada. Reboita *et al.* (2021a) aponta para um aumento da precipitação no inverno associada a ciclones explosivos para o domínio do OAS.

Gramcianinov (2018), a partir do HadGEM2-ES RCP8.5, aponta para um decréscimo de aproximadamente 10% na ciclogênese do OAS decorrente do redirecionamento polar das rotas ciclônicas. Por outro lado, identifica-se um incremento de 6,1% (3,6%) na atividade ciclônica na região da Bacia do Prata durante o verão (inverno) e um incremento na sua intensidade ao norte de 35°S. A autora repete o experimento com *downscaling* do modelo regional Weather Research and Forecasting Model (WRF, versão 3.7), inserido no HadGEM2-ES no cenário RCP8.5, onde a mesma tendência de aumento na região é projetada, com ciclogênese mais frequente e intensa entre 20° e 30° S. Essa mudança decorre do aumento do transporte de umidade em baixos níveis (fortalecimento dos JBN) e pela advecção de calor e umidade em altos níveis (a partir do fortalecimento das correntes de jato).

Em referência a projeção de ocorrência de ciclones explosivos a literatura ainda se mostra incipiente. Reboita *et al.* (2021a) aponta que no HS durante os meses de inverno, há uma tendência de aumento até o final do século XXI da ciclogênese explosiva para os domínios da AS e do continente africano. O aumento na frequência seria acompanhado de um aumento da profundidade da pressão central, porém de um menor tempo de vida. Os autores ainda destacam um aumento da contribuição desses eventos na precipitação, uma vez que haveria um aumento dos processos diabáticos para seu fortalecimento.

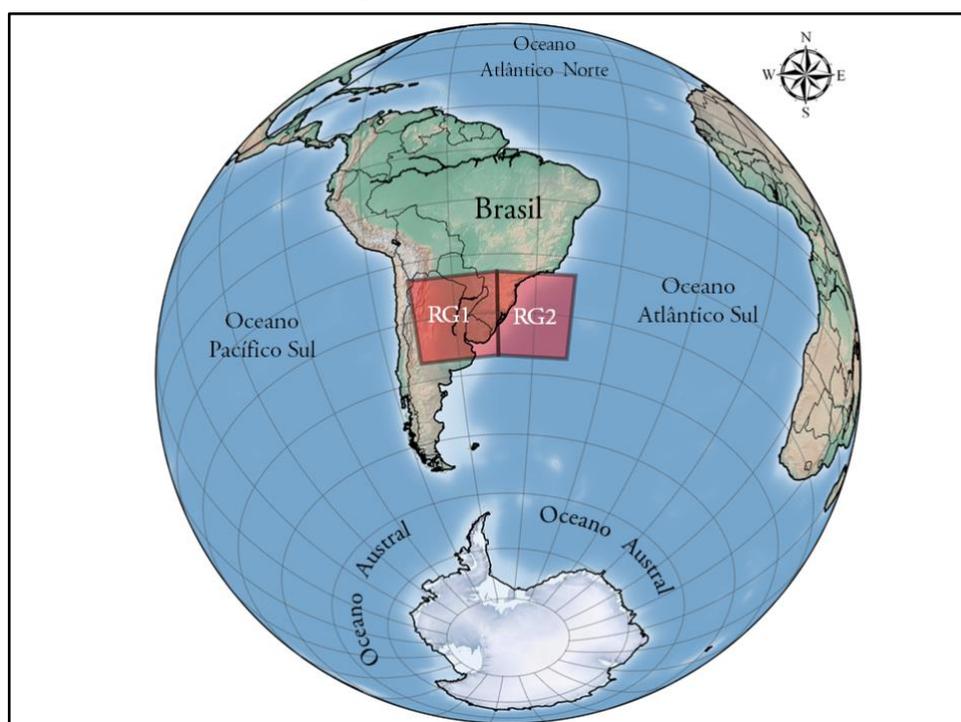
3. Dados e Métodos

3.1 Área de estudo

A Região Sul do Brasil é composta pelos Estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná. Para identificar apenas a ciclogênese que se origina ou desloca-se pela Região, serão utilizadas duas das quatro áreas ciclogenéticas do OAS, identificadas na Figura 8, definidas por Gramcianinov *et al.* (2019): La Plata (RG1), abrangendo o noroeste da Argentina e Uruguai (entre 23° e 37°S e 68° e 52°W); e o Sudeste do Brasil (RG2), abrangendo estados do Sul e Sudeste brasileiro (entre 23° e 37°S e 52° e 38°W).

Apesar da proximidade, segundo Gramcianinov (2018) as regiões apresentam diferentes características quanto a ciclogênese. A primeira diferença destacada é quanto a geografia física das duas regiões, sendo a RG1 marcada pela continentalidade e proximidade da Cordilheira dos Andes, diante da RG2 que abrange principalmente porções oceânicas. Quanto a sazonalidade da ciclogênese, a autora destaca que o inverno é a estação mais ativa da RG1, enquanto a RG2 não possui estação definida. O trabalho de Gramcianinov (2018) aponta que a RG1 e a RG2 foram a segunda e a terceira áreas ciclogenéticas do OAS entre 1979 e 2010, respectivamente.

Figura 8 – Área de Estudo



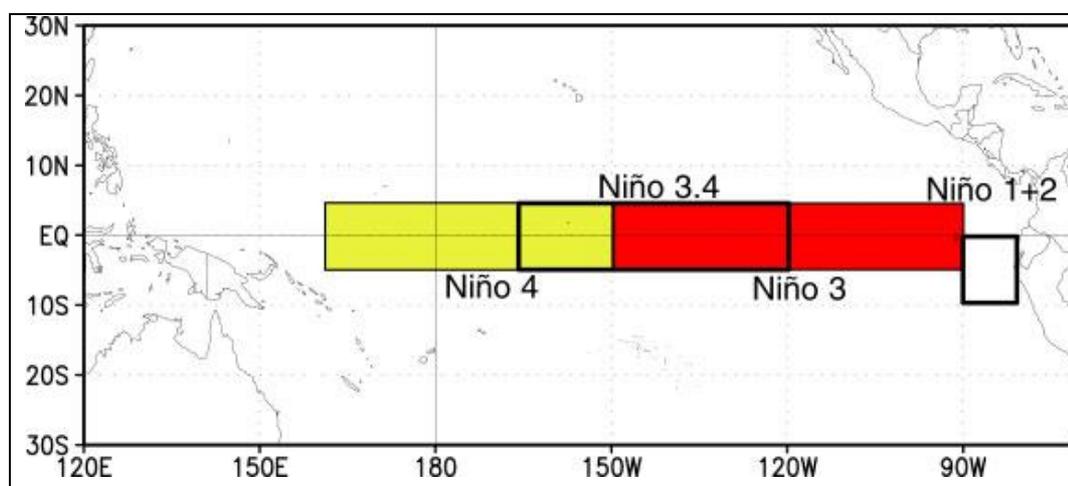
3.2 Temperatura no Sul do Brasil

A definição dos anos mais quentes foi feita a partir do banco de dados de Ernst (2019). Sua análise é feita a partir da base de dados da Climatic Research Unit (CRU) versão 4.03, da *University of East Anglia*. Os dados são de anomalias de temperatura máxima, média e mínima no período de 1901-2018, e possuem resolução espacial de 0,5° latitude x 0,5° longitude. O cálculo foi feito a partir dos 249 pontos de grade pertencentes a Região Sul do Brasil. De acordo com Ernst (2019) os anos mais quentes nessa região foram 2017 (+0,8°C), 2014 (+0,8°C), 2012 (+0,8°C), 2015 (+0,7°C) e 2002 (+0,7°C).

3.3 Índice Niño

A ocorrência do modo de variabilidade climática ENOS pode ser examinada em diferentes regiões do Pacífico Equatorial (Figura 9), entretanto todas baseiam-se na análise da média de temperatura da superfície do mar (TSM). A região mais comumente analisada é a 3.4 (5°N-5°S, 120°-170°W), de onde é extraído o *Oceanic Niño Index* (ONI) (TRENBERTH e NOAA, 2019). O cálculo do ONI decorre da média móvel de 3 meses da TSM a partir do banco de dados *Extended Reconstructed Sea Surface Temperature v5* (ERSSTv5). Neste Índice, são considerados *El Niño* e *La Niña* (LN) quando as anomalias de temperatura igualam ou superam +/- 0,5 °C durante pelo menos 5 médias consecutivas.

Figura 9 – Possíveis áreas de análise do El Niño Oscilação Sul

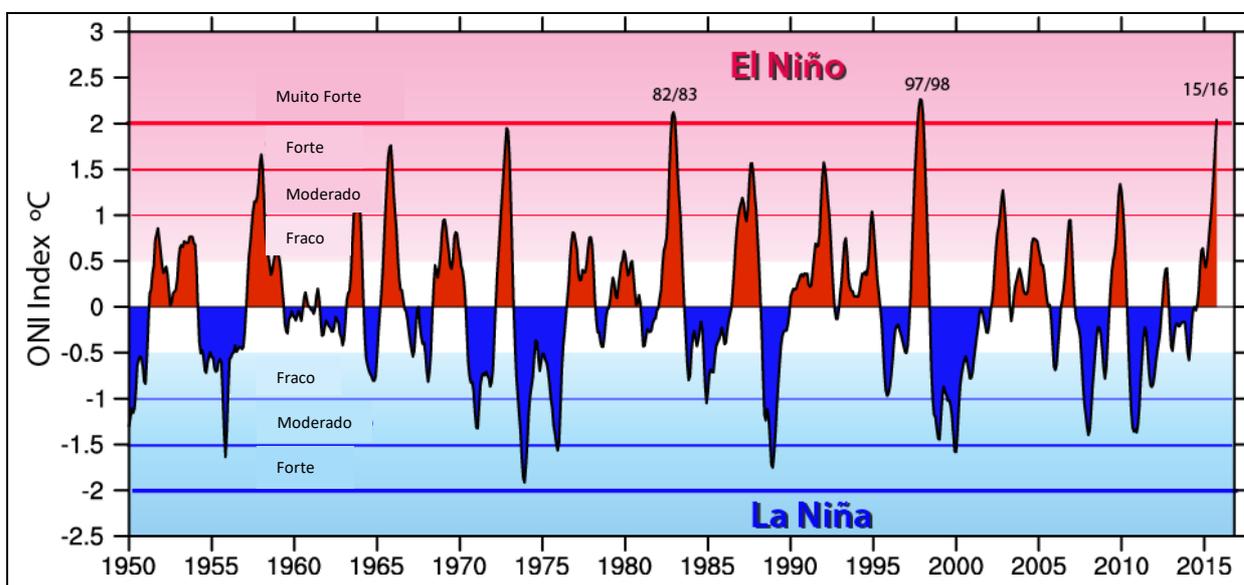


Fonte: NOAA (2005)

Em decorrência do aumento global das temperaturas oceânicas, o cálculo de anomalias do ONI (Figura 10) foi adaptado. Em um planeta em aquecimento acentuado, comparar as temperaturas com climatologia fixa ocasiona a perda de identificação de eventos ou até sua errônea classificação. A média feita em um período de base centrado em 30 anos significa que episódios de EN e LN são definidos pela sua climatologia contemporânea. A nova metodologia possibilitou a identificação de novos eventos de LN, assim como a reclassificação de intensidade de eventos de EN (NOAA, 2020).

Neste trabalho, serão analisados os eventos de EN classificados como Muito Forte na metodologia do índice ONI. Dessa forma, são considerados Muito Forte os eventos que ultrapassam $+2,0^{\circ}\text{C}$ de anomalia por pelo menos 1 média móvel do período 1979-2019. Estes eventos ocorreram somente 3 vezes nos registros modernos e se situam entre a década de 1980 e de 2010. São eles: 1982/83, 1997/98 e 2015/16 (Tabela 2).

Figura 10 – Índice Niño Oceânico entre 1950-2016



Fonte: Trenberth e NOAA (2020).

Tabela 2 – ONI - média móvel de 3 meses dos El Niño Muito Fortes

| ANO | DJF | JFM | FMA | MAM | AMJ | MJJ | JJA | JAS | ASO | SON | OND | NDJ |
|------|------|------|------|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|
| 1982 | 0.0 | 0.1 | 0.2 | 0.5 | 0.7 | 0.7 | 0.8 | 1.1 | 1.6 | 2.0 | 2.2 | 2.2 |
| 1983 | 2.2 | 1.9 | 1.5 | 1.3 | 1.1 | 0.7 | 0.3 | -0.1 | -0.5 | -0.8 | -1.0 | -0.9 |
| 1997 | -0.5 | -0.4 | -0.1 | 0.3 | 0.8 | 1.2 | 1.6 | 1.9 | 2.1 | 2.3 | 2.4 | 2.4 |
| 1998 | 2.2 | 1.9 | 1.4 | 1.0 | 0.5 | -0.1 | -0.8 | -1.1 | -1.3 | -1.4 | -1.5 | -1.6 |
| 2014 | -0.4 | -0.4 | -0.2 | 0.1 | 0.3 | 0.2 | 0.1 | 0.0 | 0.2 | 0.4 | 0.6 | 0.7 |
| 2015 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.8 | 1.0 | 1.2 | 1.5 | 1.8 | 2.1 | 2.4 | 2.5 | 2.6 |
| 2016 | 2.5 | 2.2 | 1.7 | 1.0 | 0.5 | 0.0 | -0.3 | -0.6 | -0.7 | -0.7 | -0.7 | -0.6 |

Fonte: CPC/NOAA, 2020.

3.4 Reanálises Climáticas

A reanálise de dados é o processo pelo qual os dados climáticos observados são assimilados num modelo numérico, para obtenção de uma interpolação física em uma grade regular. Leva-se em conta a topografia, a cobertura vegetal e a evolução temporal dos processos como radiação solar, turbulência, convecção e os processos de dinâmica de fluídos associados (BARRY e CARLETON, 2001; BIAZETO *et al.*,2006). De acordo com Dee *et al.* (2015), as reanálises são alimentadas a cada 6-12 horas por 7-9 milhões de dados observacionais (satélites, radiossondas, boias, aeronaves e navios) e tornam-se consistentes para análises. Entretanto, o rápido desenvolvimento das reanálises, já estão disponíveis produtos com até 1 hora de resolução, como o ERA5 do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF).

As reanálises possuem ampla aplicação nas ciências atmosféricas, não apenas em centros meteorológicos operacionais, mas também, entre outras funções, para avaliar o impacto das mudanças no sistema observacional, para calibrar o processo de modelagem, e obter climatologias atualizadas para avaliação de anomalias em previsões (HERSBACH *et al.* 2020).

Substituindo a reanálise ERA-Interim que deixou de ser atualizada em setembro de 2019, a reanálise climática ERA5 é o mais recente produto da ECMWF e pertence a família ERA5 de dados juntamente com o ERA5.1 e o ERA Land:

- ERA5: é a reanálise climática que abrangia inicialmente o período de 1979 até a atualidade e atualmente acrescentou de forma preliminar dados entre 1950 e 1978. Os dois períodos seguem sendo disponibilizados de forma separada pois, embora os dados do período preliminar tenham produzido resultados satisfatórios, por outro lado apresentam ciclones tropicais exageradamente intensos. Os dados são disponíveis em resolução espacial de 31 km e resolução temporal de 1 hora, em 137 níveis da atmosfera entre superfície e até 80 km de altitude.

Esses produtos são disponibilizados de forma gratuita e online no formato GRIB ou NetCDF.

3.5 Tracking e banco de dados de ciclones extratropicais

O banco de dados da identificação de ciclones extratropicais é estruturado a partir do sistema de tracking TRACK de Hodges (1994, 1995), adaptado e validado por Gramcianinov (2018). A identificação é feita a partir dos campos de vento zonal e meridional em 850 hPa, com dados ERA-5, com intervalo de 1-1 hora para o período de 1980-2019. Por apresentarem vorticidade relativa negativa no HS, os ciclones são identificados determinando um mínimo local em uma projeção polar estereográfica que, de acordo com Sinclair (1997), é vital para prevenir o viés latitudinal. O limiar de vorticidade relativa adotado para as mínimas locais foi de $-1.0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$.

De acordo com Gramcianinov (2018), após o rastreamento de sistemas a partir do método de vizinho mais próximo, apenas os sistemas que duraram mais de 24 horas e obtiveram um deslocamento entre o ponto inicial e final de pelo menos 1000 km foram contabilizados para análise. Após a validação do rastreamento, descrito em Gramcianinov (2018), foram adicionados aos ciclones identificados outras variáveis de interesse para a análise da intensidade dos eventos, porém sem a necessidade de novos cálculos, como PNMM, máxima velocidade do vento em 925 hPa, altura geopotencial em 500 hPa, entre outras. Para esse trabalho, foi de interesse

apenas a variável de PNMM, necessária para identificar ciclones explosivos com o método de Murray e Simmonds (1991) descrito no próximo subcapítulo.

O presente trabalho dedica-se a investigar apenas os processos ciclogênicos de ciclones extratropicais. Admite-se, entretanto, a possibilidade de que ciclones subtropicais sejam contabilizados como extratropicais. Isso ocorre porque o sistema TRACK não faz distinção os processos termodinâmicos necessário para tal. Ciclones subtropicais, também conhecidos como sistemas híbridos, apresentam, simultaneamente, características de ciclones tropicais (núcleo quente em superfície) e extratropicais (núcleo frio no meio e topo). Após eventos extremos de precipitação relacionados a esse fenômeno, notadamente o Ciclone Catarina em 2004, trabalhos como Gozzo *et al.* (2014) dedicaram-se aos estudos climatológicos desse tipo de sistema, indicando que ao menos 30% dos ciclones na costa sudeste do Brasil podem ser classificados como subtropicais.

3.6 Identificação e Classificação de ciclones explosivos

Para identificar quais foram os ciclones explosivos foi utilizado a metodologia de Murray e Simmonds (1991) aplicando a Taxa Normalizada de Aprofundamento da Pressão Central (TNAc, Equação 1).

Eq. 1

$$TNAc = (\text{sen}60^\circ / \text{sen} \phi) \cdot (\Delta p_c / 24 \text{ hPa})$$

Onde ϕ é a latitude média entre as 24 horas de maior aprofundamento da pressão central, e Δp_c a diferença entre a pressão central em superfície do momento de maior profundidade em relação há 24 horas atrás. Essa equação tem como objetivo de corrigir o cálculo para qualquer faixa latitudinal, onde o aprofundamento da PNMM em 24 horas pode ser de 12 hPa na latitude de 25°, até 28 hPa nos polos para atingir o valor mínimo para classificação de ciclone explosivo. O cálculo foi realizado através de um script em linguagem Python, onde os dados de entrada foram coletados manualmente através das planilhas resultantes do sistema TRACK.

Foram contabilizados apenas os eventos que tiveram ciclogênese na área de estudo, incluindo aqueles que se tornam explosivos fora dela. Porém são desconsiderados possíveis eventos que tenham tido gênese em outras áreas e terem em algum momento do seu ciclo, adentrado a área de estudo. Não é esperado que

eventos tenham sido perdidos no processo, pois a região é a limítrofe entre trópico e extratropical. Segundo Bitencourt *et al.* (2013) entre 1957 e 2010 não houve evento de ciclogênese explosiva a norte de 27° S. Também não é esperado que ciclones com gênese ao sul da área de estudo possam ter gerado divergência significativa nos resultados pelo caráter dos sistemas de apresentarem deslocamento com rota em direção sudeste.

Também foi definido não contabilizar os ciclones que tiveram gênese na área de estudo, porém apresentaram intensificação e tornaram-se explosivos à leste de 0° de longitude. Isso teve como objetivo descartar os sistemas que passam por processos de nova intensificação já distantes da AS.

Após a identificação e com os valores de TNAc, os ciclones explosivos foram classificados quanto a sua intensidade de acordo com o Sanders (1986) apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Classificação de intensidade de ciclones explosivos.

| Taxa Normalizada de Aprofundamento da Pressão central (TNAc) | Classificação |
|---|----------------------|
| $1.0 \leq \text{TNAc} < 1.3$ | Fraco |
| $1.3 \leq \text{TNAc} < 1.8$ | Moderado |
| $\text{TNAc} \geq 1.8$ | Forte |

4. Resultados e Discussões

Nesse capítulo são apresentados os resultados das análises, assim como sua discussão. Em primeiro lugar, seguindo a ordem dos objetivos propostos, é apresentada a climatologia de ciclones explosivos para o Sul do Brasil entre 1980 e 2019, com resultados gerais, por década e sazonais. Ainda neste subcapítulo, são investigadas as tendências no comportamento dos sistemas nestes 40 anos. Em segundo lugar, é realizada a classificação dos ciclones por intensidade, onde são discutidos sua temporalidade e espacialização. Por fim, as duas últimas análises dizem respeito às possíveis relações entre ciclogêneses explosivas no Sul do Brasil e anos de EN Muito Forte, assim como anos mais quentes dos registros modernos nesta região.

4.1 Climatologia de ciclones explosivos

Como primeiro passo para identificação dos ciclones explosivos, primeiramente foram identificados todos os ciclones ocorridos na RG1 e RG2 no período entre 1980 e 2019. Dessa forma, foram encontrados 2742 ciclones extratropicais, sendo 1698 na RG1 e 1044 na RG2. Sua distribuição temporal pode ser vista na Figura 11. A RG1 apresenta média anual de 42,45 ($\pm 4,7$) ciclogêneses, enquanto a RG2 apresenta 25 ($\pm 4,6$). Esses resultados se assemelham aos de Gramcianinov *et al.* (2019), onde RG1 e RG2 tiveram valores de 37,3 ($\pm 3,1$) e 27,6 ($\pm 2,2$) respectivamente, e de Jantsch (2019) com 40,2 casos.

Aos ciclones totais identificados foi aplicado a TNAC de Murray e Simmonds (1991). Assim, chegou-se aos números de 109 e 3 ciclones explosivos para a RG1 e RG2 (Figura 12), esses valores representam aproximadamente 6,4% dos casos totais da RG1 e apenas 0,3% dos casos da RG2. A média anual de casos da RG1 é de 2,7 ($\pm 1,7$), onde os cinco anos com maior número de casos foram 1984 (9 casos), 1980 (6), 2006 (6), 1992 (5) e 2018 (5), e apenas o ano de 1995 não houve ocorrência na região. Para a RG2, os três ciclones encontrados ocorreram nos anos de 1982, 1990 e 2005.

Apesar da aparente diminuição de casos de ciclones explosivos nos últimos 40 anos na RG1, não foi identificada tendência estatisticamente significativa de redução de eventos. Esse fato torna-se relevante, a partir do momento em que estudos apontam para uma transição das rotas ciclônicas das regiões subtropicais, para o Oceano Austral (Geng and Sugi, 2003; Bengtsson *et al.*, 2006; Pinto *et al.*,

2007; Ulbrich *et al.*, 2009; Fyfe, 2003; Mizuta, 2012). Identifica-se assim, que o Sul do Brasil manteve a ocorrência anual de ciclones explosivos estável.

Figura 11 – Distribuição anual de ciclones extratropicais com gênese na RG1 e RG2 entre 1980-2019.

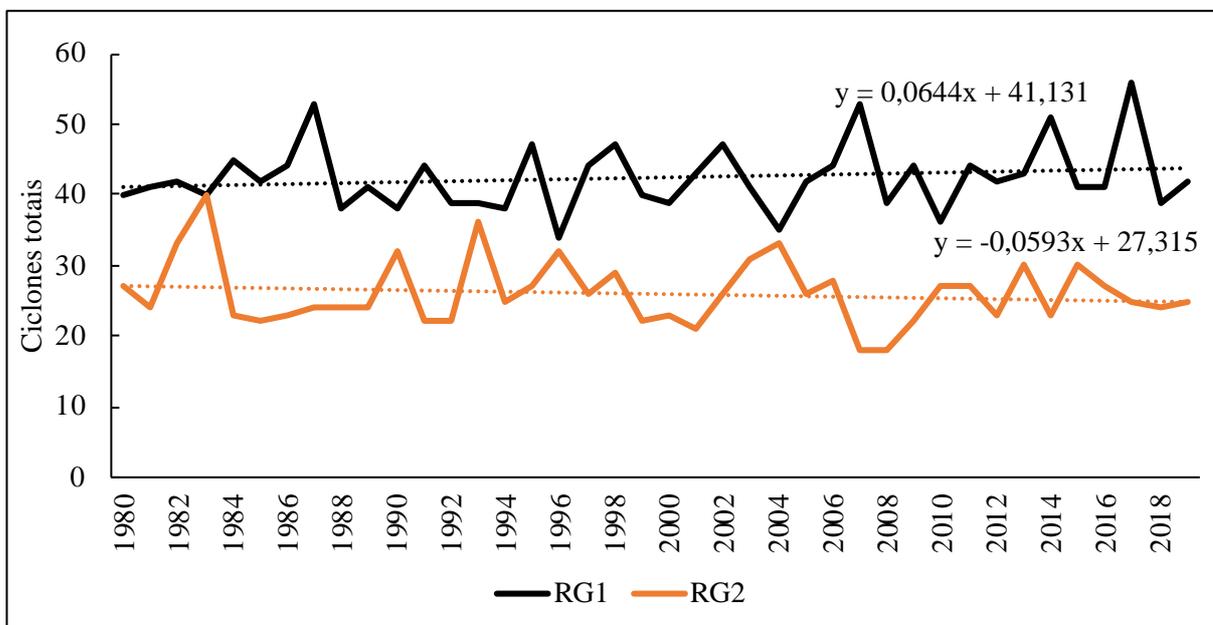
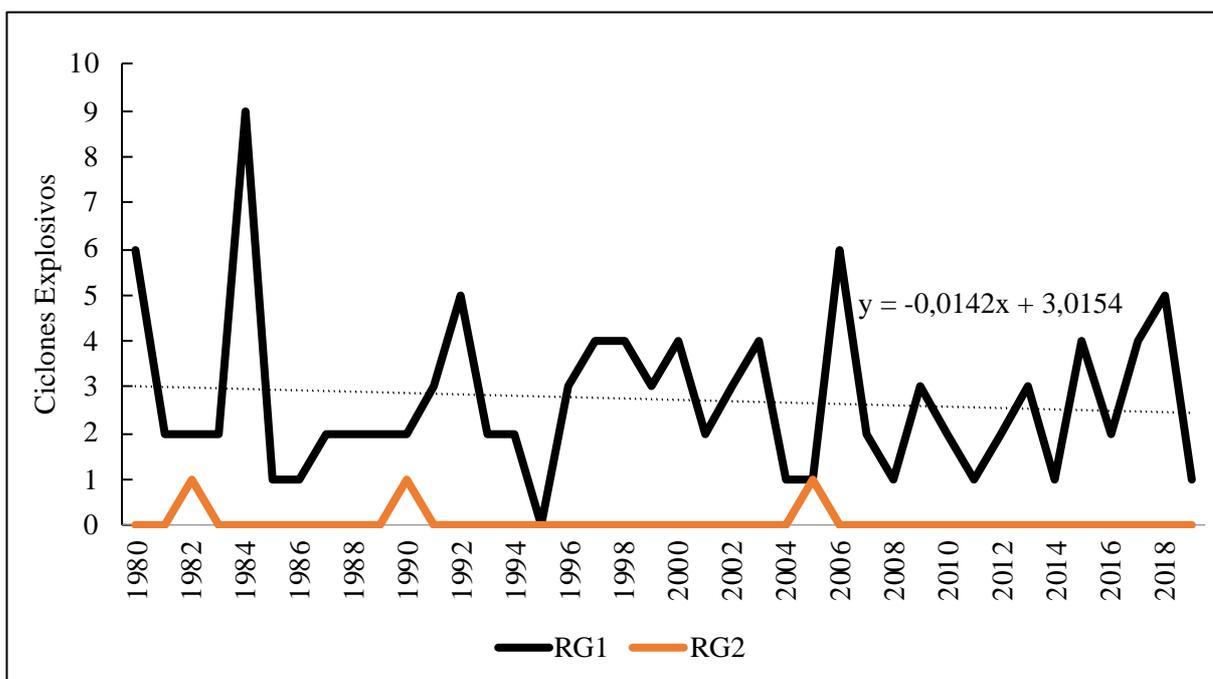


Figura 12 – Distribuição anual de ciclones explosivos com gênese na RG1 e RG2 entre 1980-2019.



A Figura 13 apresenta a trajetória de maior aprofundamento em 24 horas dos ciclones explosivos originados na RG1 por década. Vemos que a principal área se mantém localizada entre as latitudes 33° S e 42° S e entre as longitudes 60° O e 45° O. Durante esse período de aprofundamento os ciclones apresentaram rota em direção sudeste, para a região de ciclólise, entre a costa do Sul do Brasil e do Uruguai, até o meio do OAS (HOSKINS e HODGES, 2005; GRAMCIANINOV, 2018). Dentre os três ciclones registrados na RG2, dois apresentaram características distintas, com direção sudoeste, no deslocamento de maior aprofundamento (Figura 14).

Destaca-se a diferença entre as regiões na capacidade de produzir ciclones explosivos. A partir desse resultado, compreende-se como as diferentes características na geografia física das, embora próximas, duas regiões, como descrito no subcapítulo Área de Estudo, influencia o fortalecimento ou não da ciclogênese. Gramcianinov (2018) aponta que a RG2 apresenta a maior vortacidade inicial dentre as três regiões ciclogênicas próximas a costa do OAS, esse fato, porém, não parece ser suficiente para desencadear a sustentação e intensificação ao desenvolvimento explosivo. Dessa forma, entende-se que há um papel decisivo dos processos termodinâmicos associados a Cordilheira dos Andes para a gênese de ciclones explosivos.

Gramcianinov (2018) aponta que ao norte de 35° S, as forçantes em baixos níveis são mais críticas para o processo de ciclogênese, com transporte de umidade tropical via JBN e a Alta Subtropical do Atlântico Sul. De acordo com Wang e Fu (2004) o JBN tem sua ocorrência controlada pelo acoplamento de um cavado em altos níveis e um fluxo zonal em baixos níveis. Tendo sua sazonalidade relativa aos ventos de oeste, os JBN atuam para tornar os ciclones nos meses de inverno mais intensos.

Diante dessa diferença, ressalta-se, também a possível influência do refinamento do banco de dados utilizado no trabalho. A resolução temporal em estudos anteriores, por limitação das reanálises disponíveis naquele momento, foram de 12-12h ou de 6-6h (GAN e RAO, 1991; BITENCOURT *et al.*, 2013). A utilização de dados da reanálise ERA 5 de 1-1h possivelmente faz com que eventos de ciclogênese sejam identificados nos primeiros momentos de vida, ainda sobre a RG1, antes de se deslocarem e intensificarem sobre a RG2 (GRAMCIANINOV, 2020).

Figura 13 – Rota ciclônica nas 24h de desenvolvimento explosivo por década.
a) 1980-89 b) 1990-99 c) 2000-09 e d) 2010-19.

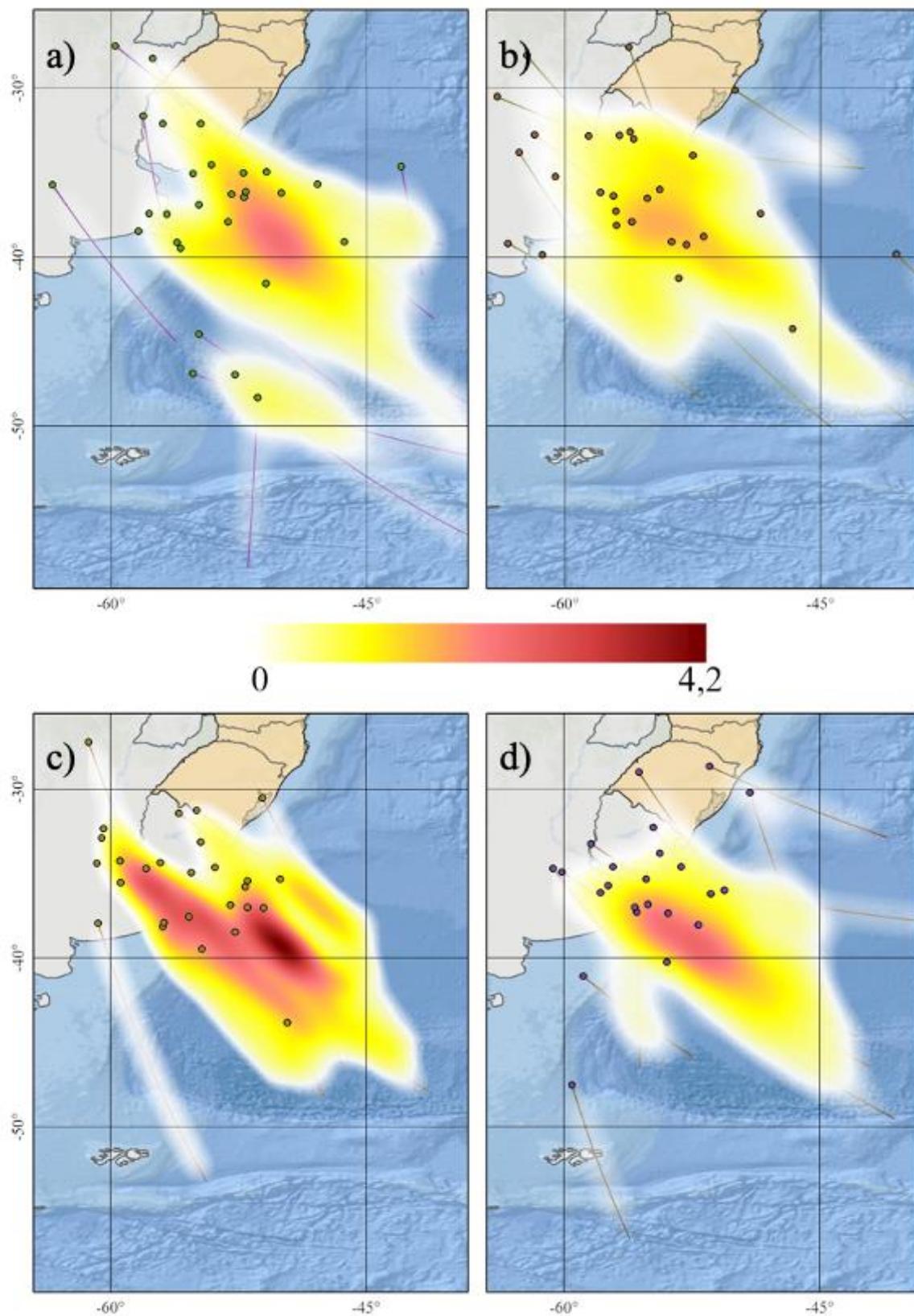
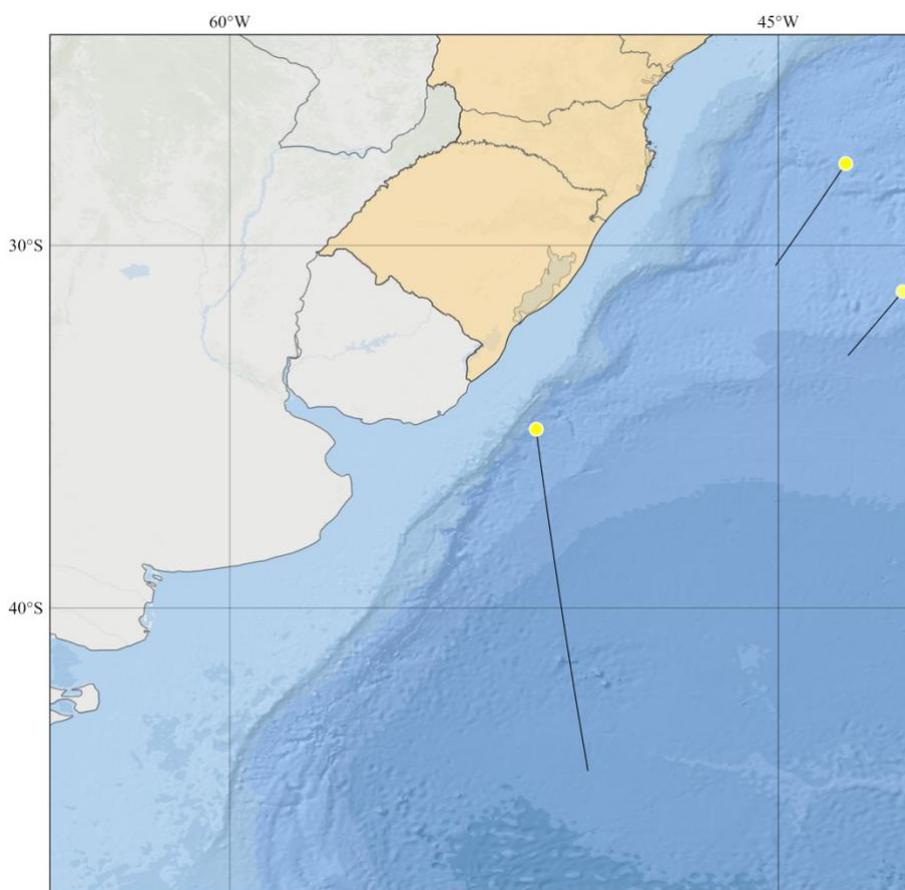
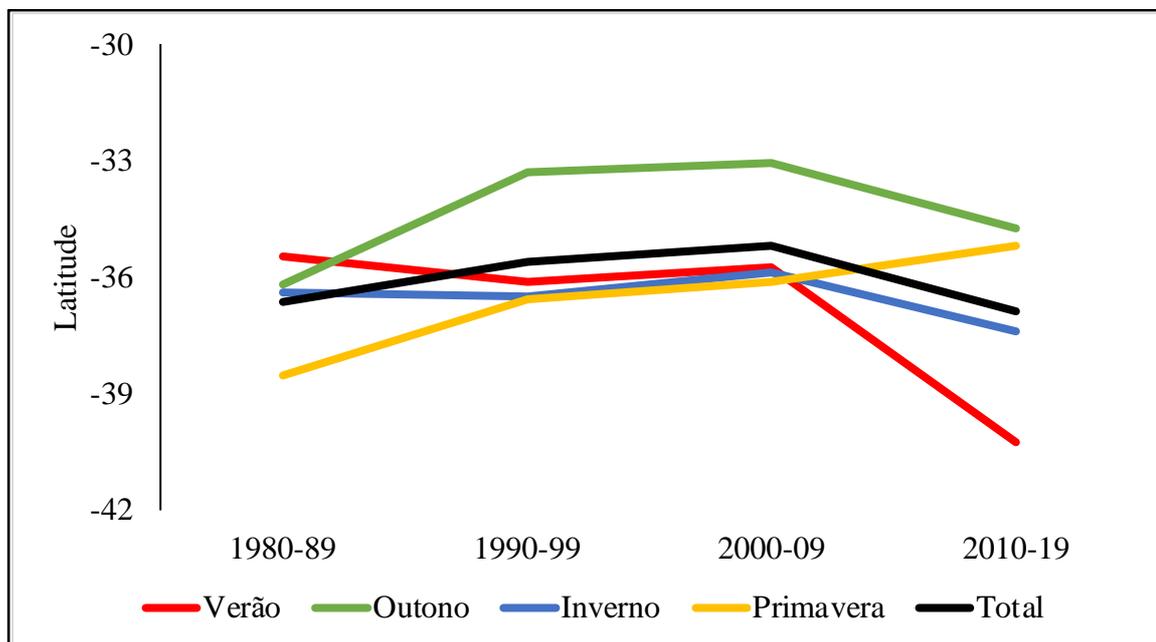


Figura 14 – Ciclones Explosivos da RG2

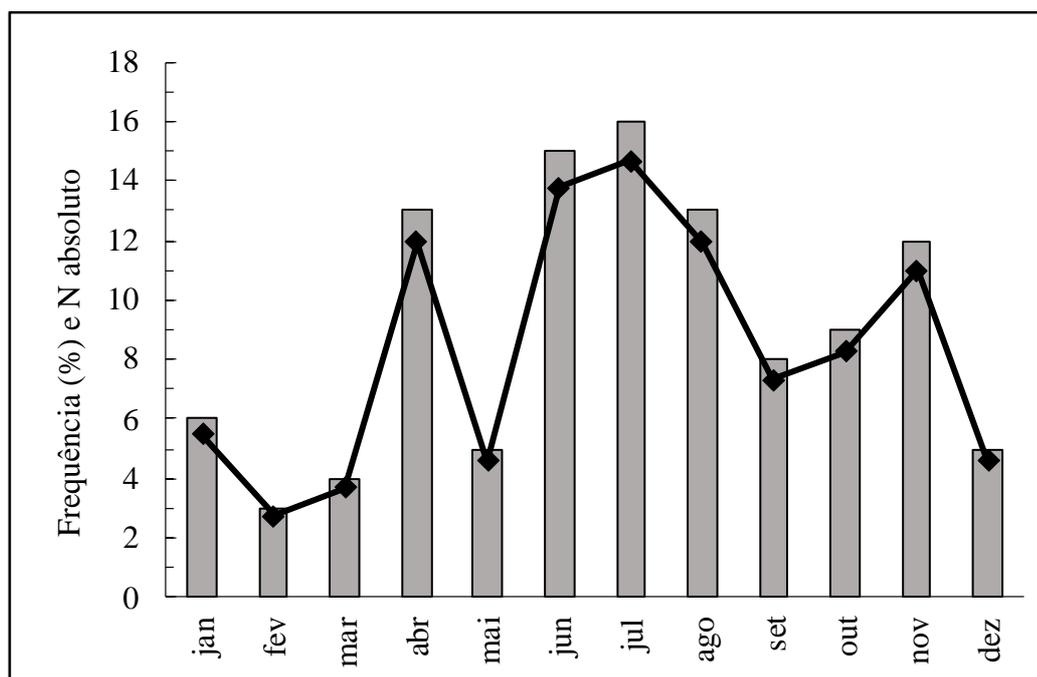
Também foi analisado a latitude média por década das 24 horas de maior intensificação dos ciclones explosivos para compreender possíveis alterações nas suas rotas ciclônicas durante a série temporal. Na Figura 15 vê-se um durante duas décadas um deslocamento a norte, seguido de um declínio na última década para -36,8. A primavera é a única estação que se manteve em direção as médias latitudes durante a série. O verão foi a estação com maior deslocamento das rotas em direção às altas latitudes. A mudança de sentido na última década pode estar relacionada com a migração aos polos da circulação extratropical, como as correntes de jato e ventos de oeste (YANG *et al.*, 2020).

Outras duas tendências têm sido associadas a alterações na circulação extratropical do HS: a OAA positiva e a expansão da Célula de Hadley (FYFE *et al.*, 1999; THOMPSON e SOLOMON, 2002; SEIDEL e RANDEL, 2007). Essas tendências estão associadas ao aquecimento global (NGUYEN *et al.*, 2013; ADAM *et al.*, 2014; SOLMAN e ORLANSKI, 2014; D'AGOSTINO e LINELLO, 2017).

Figura 15 – Latitude média das rotas ciclônicas por estação.

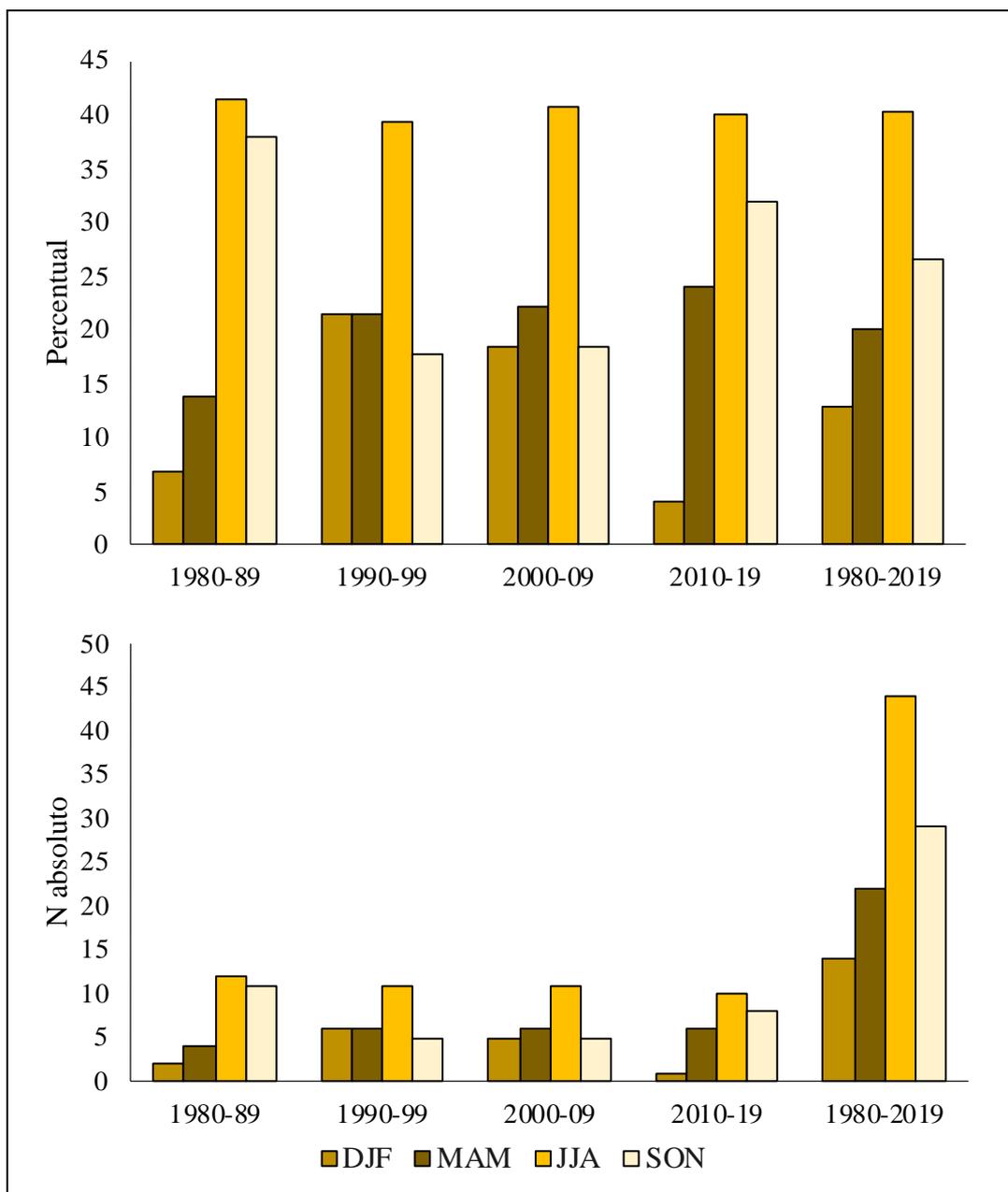


Na análise mensal, destaca-se em a ocorrência da ciclogênese com preferência pelos meses frios (Figura 16), sendo o inverno responsável por ~40% dos casos em todas as quatro décadas analisadas, resultados em conformidade com as climatologias prévias da região. O maior número de casos ocorreu no mês de julho, e a ocorrência se mostrou irregular durante o ano, com picos nos meses de abril e novembro. O mês com o menor número de casos foi fevereiro, assim como o verão se apresenta como estação de menor ocorrência. Esses resultados diferem em alguns aspectos da climatologia mensal de Bitencourt *et al.* (2013), onde após um pico de casos no mês de junho, e há um constante e lento decréscimo nos meses subsequentes.

Figura 16 – Ocorrência mensal de ciclones explosivos na RG1.

Entretanto, quando observado sazonalmente (Figura 17), o mesmo padrão observado por Bitencourt *et al.* (2013) é encontrado, onde após o inverno, a primavera é a estação de maior frequência. Os resultados também indicam que durante as décadas de 1990-1999 e 2000-2009 houve uma redução de ciclones explosivos na primavera e aumento nos meses de verão (Figura 17).

De forma geral, a ocorrência de ciclones explosivos no verão é rara, com apenas 14 casos na série histórica, e apenas 1 caso na última década. Gramcianinov (2018) aponta que a região possui grande variabilidade sazonal na ocorrência de ciclones, onde o verão possui menos de 20% das ocorrências registradas no inverno. Essa diferença nessa proporção foi menor na análise de ciclones explosivos, onde casos de verão representaram 31% dos registrados nos meses de inverno. Durante o verão a proporção de ciclones explosivos relativa ao total de casos foi de 4,4%, enquanto no inverno foi de 7,6%. Esse resultado corrobora os achados de Gramcianinov (2018) que aponta, que em geral, os ciclones do OAS, apresentam uma menor vorticidade ciclônica no verão em relação ao inverno.

Figura 17 – Ocorrência sazonal de ciclones explosivos na RG1.

Como apontado por Bitencourt *et al.* (2013), os ciclones explosivos da AS possuem dependência dos fatores oceânicos, com a maior proporção de casos estando associada ao domínio oceânico, seja no início da trajetória explosiva, ou ao atingir o ponto de maior profundidade sobre essa área. Neste trabalho identificou-se que 38% dos casos iniciaram a sua trajetória explosiva sobre o continente, mas toda a população de casos atingiu a máxima profundidade sobre o OAS. A década de 1990 apresentou a maior proporção de casos iniciando sobre o continente (50%), seguida pelas décadas de 2000 (40%), 2010 (33%) e 1980 (31%). Já análise sazonal, foi

possível verificar que a estação do outono se destaca pela quantidade de eventos que iniciaram a trajetória explosiva ainda sobre o continente, com 63% dos casos, frente a inverno (30%), verão (35%) e primavera (34%).

4.2 Classificação de intensidade

Gramscianinov (2018) aponta que os ciclones da RG1 são em média os mais intensos no domínio do OAS mesmo em latitudes mais baixas (30° S) e também atingem a maior intensidade média próximos da costa. A maior intensidade se dá tanto em termos de vorticidade, quanto na velocidade do vento em 925 hPa.

Seguindo os critérios de Sanders (1986) os ciclones identificados foram classificados quanto a sua intensidade. A Tabela 4 apresenta a quantidade de eventos por intensidade ocorridos na RG1 e RG2. Os ciclones apresentaram uma média de aprofundamento da pressão central em 24h de 25,6 ($\pm 6,5$) hPa e média do ponto mais profundo de 973,5 hPa. Esse resultado evidencia a intensidade dos ciclones na área de estudo, onde a média da intensidade é de 1,34 ($\pm 0,38$) TNA (Figura 18). Embora mais raros, destaca-se que os ciclones explosivos fortes representaram ~19% dos casos. Não ocorreram ciclones explosivos fortes da RG2.

Tabela 4 – Intensidade dos ciclones explosivos na RG1 e RG2 entre 1980-2019.

| Intensidade | RG1 | RG2 |
|-------------|-----|-----|
| Fraco | 47 | 1 |
| Moderado | 40 | 2 |
| Forte | 21 | 0 |

Figura 18 – Histograma de intensidade dos ciclones explosivos da RG1.

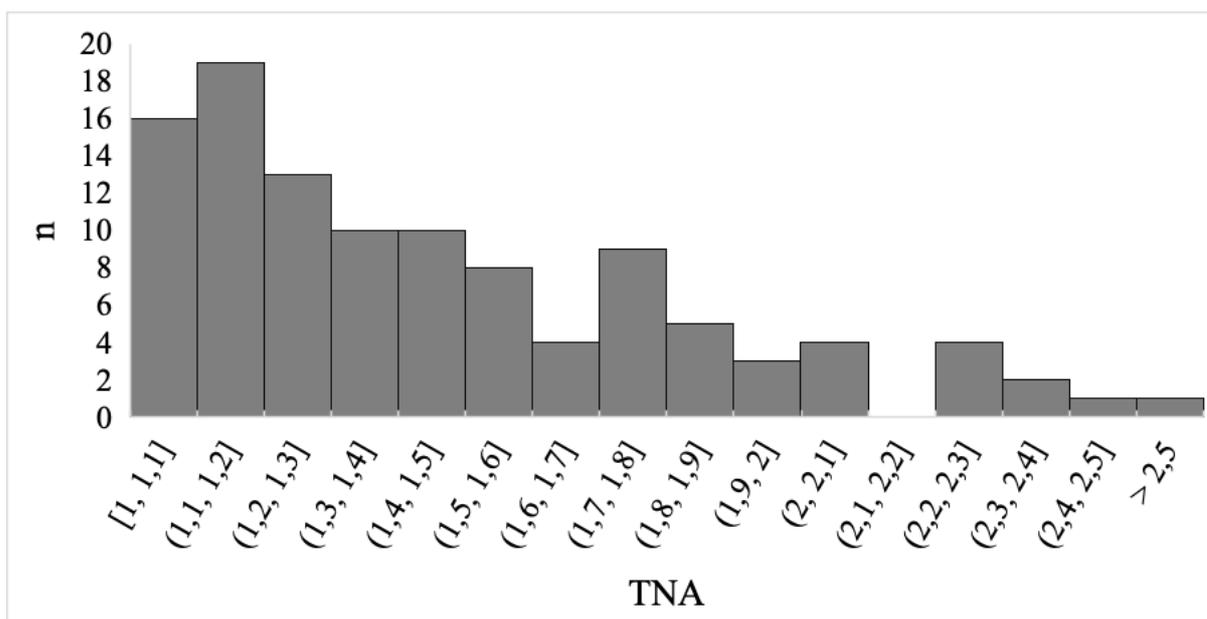


Figura 19 e 20 apresentam a distribuição espacial de acordo com o grau de intensidade para RG1 e RG2. Nessa análise é possível observar que a densidade das rotas se dá na mesma faixa latitudinal. Entretanto, ciclones explosivos fortes apresentaram a concentração de rotas mais ao norte e apresentaram a menor velocidade de deslocamento nas 24 horas de maior aprofundamento.

Como apontado por Gramcianinov (2018) os ciclones da RG1 e RG2 estão associados a ventos e precipitação intensa, e ao possuir um ciclo de vida confinado próximo a costa da AS, faz com que mesmo poucos casos por ano possam impactar diretamente a região costeira. Ao se investigar a proporção de ciclones que iniciaram sua trajetória ainda sobre o continente, de acordo com sua intensidade, os resultados se mostraram similares, com fracos (38%), moderados (37,5%) e fortes (42%). Dessa forma, embora casos de ciclones explosivos sejam relativamente raros, possuem um potencial alto de impactar e gerar desastres quando ocorrem próximos ao continente (SCHOSSLER *et al.*, 2020; REIS *et al.*, 2020).

Figura 19 – Distribuição dos ciclones explosivos da RG1 por intensidade.
a) Fracos, b) Moderados, c) Fortes.

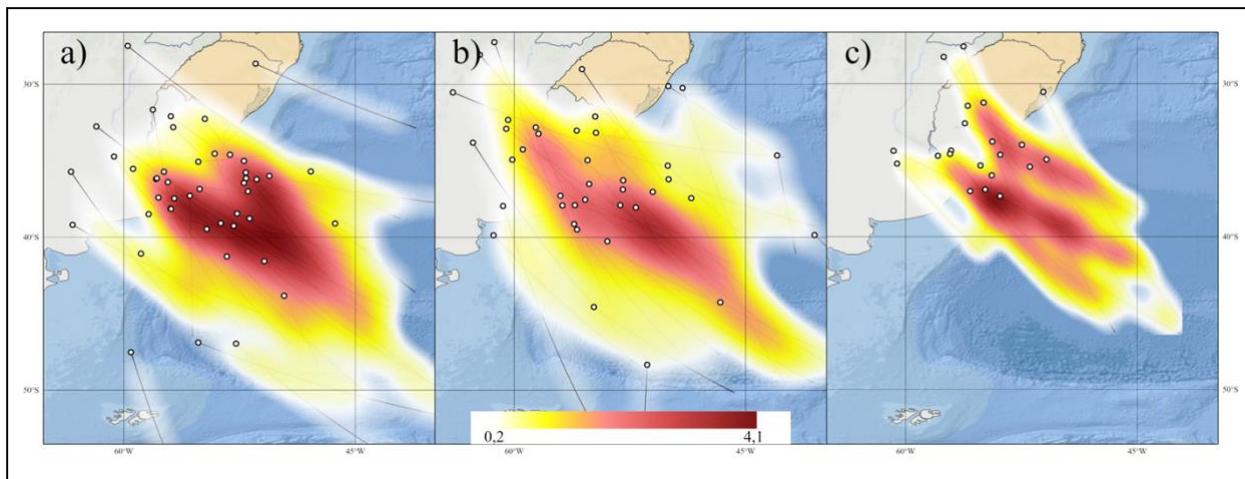
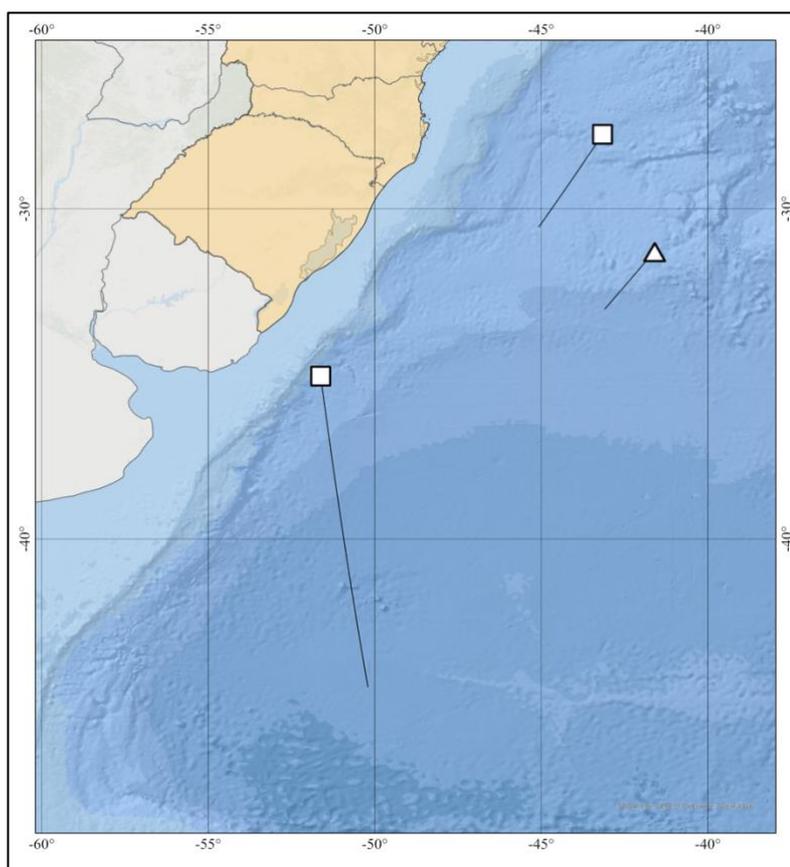


Figura 20 – Distribuição por intensidade dos ciclones explosivos da RG2. Quadrados = Moderados, triângulos = Fracos.



Na classificação de intensidade sazonal, vemos, de acordo com a Tabela 5, que nos meses frios, a RG1 além de possuir maior atividade ciclogênica, apresenta

em números absolutos, os ciclones mais intensos, com a ocorrência de 10 ciclones explosivos fortes. A primavera, segunda estação com maior número de casos, possui a menor proporção de casos fortes na série. O outono, terceira estação em número de casos, apresentou a maior proporção de casos fortes, além disso, foi a estação responsável pela ocorrência de 2 eventos da RG2. No verão, estação de menor ocorrência, destaca-se a ocorrência do evento mais intenso em toda série, identificado no mês de dezembro de 2003, com 2,56 TNA e queda da pressão central em 24h de 40,8 hPa (destaque na Figura 21).

Tabela 5 – Intensidade dos ciclones explosivos por estação

| Intensidade | Verão | Outono | Inverno | Primavera |
|-------------|-------|--------|---------|-----------|
| Fraco | 6 | 7 | 18 | 16 |
| Moderado | 6 | 9 | 15 | 10 |
| Forte | 2 | 6 | 10 | 3 |

A Figura 22 apresenta a evolução da intensidade dos ciclones explosivos durante cada década da série temporal. Identifica-se um constante aumento de intensidade entre 1980 e 2010, com um decréscimo registrado na última década. Esse fato decorre da maior ocorrência de casos na primavera das décadas de 1980 e de 2010.

Figura 21 – Intensidade dos ciclones explosivos da RG1 e RG2 por estação.

Azul = verão, laranja = outono, cinza = inverno, amarelo = primavera.

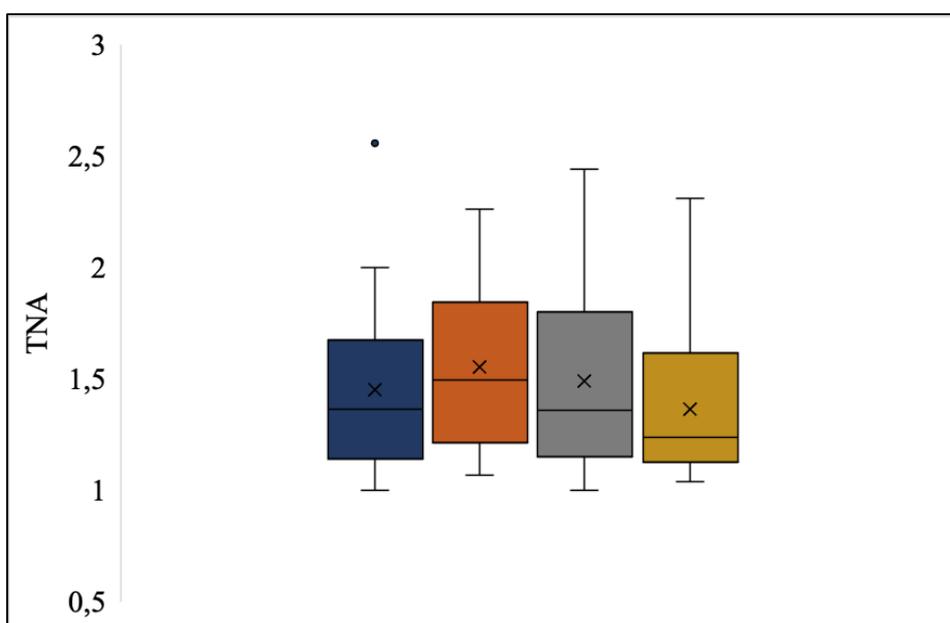
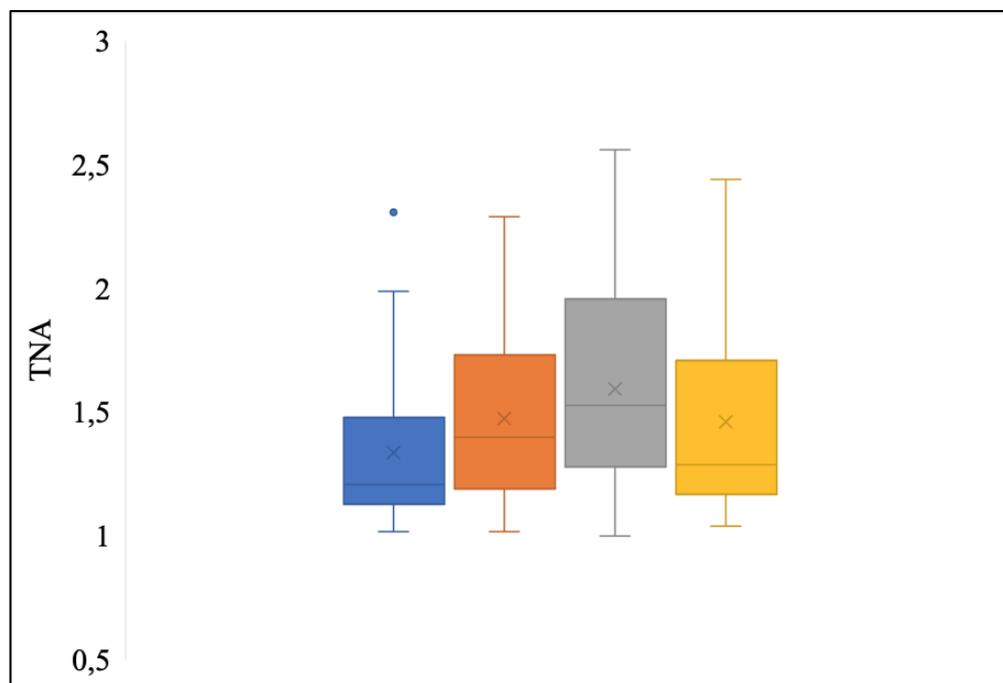
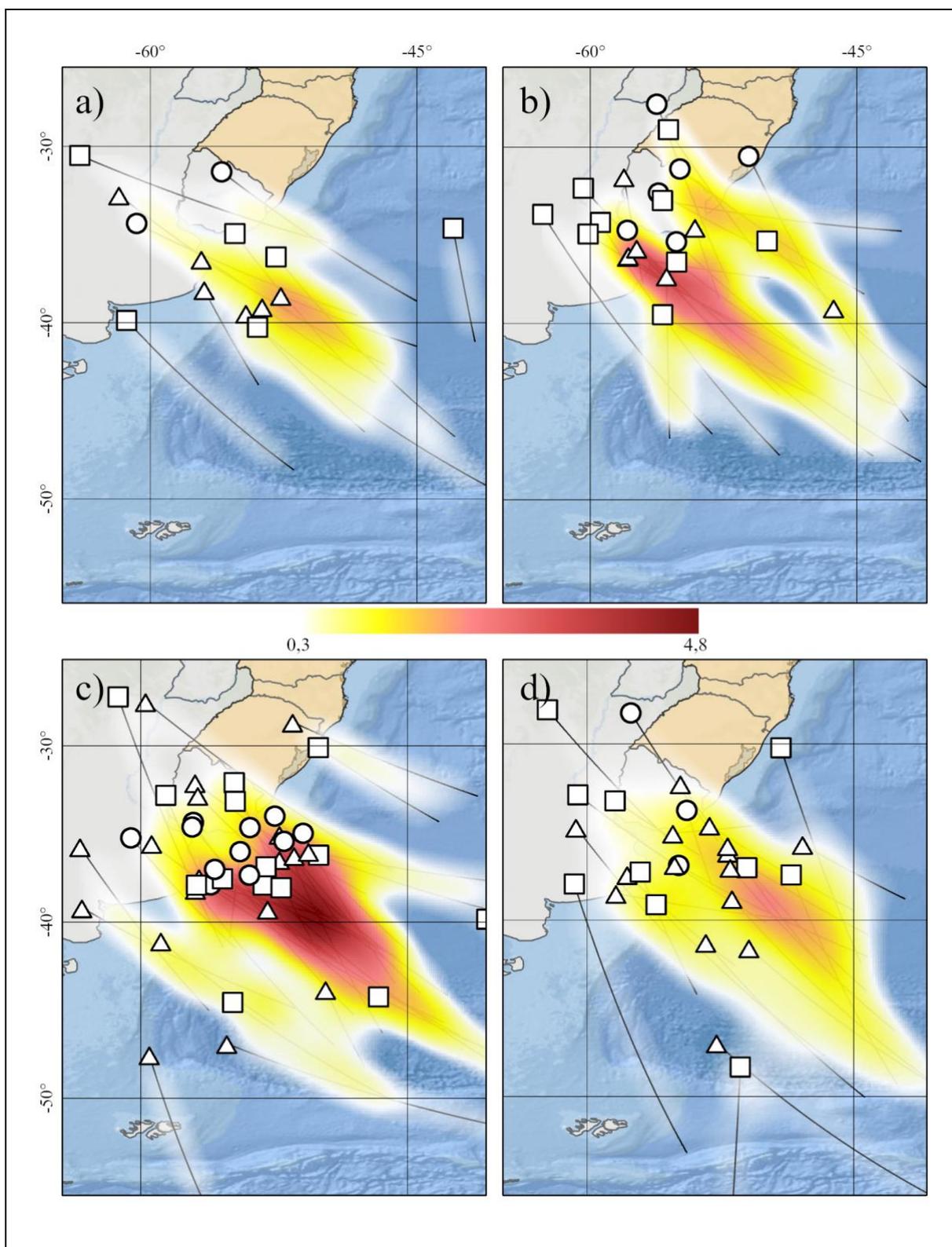


Figura 22 – Intensidade dos ciclones explosivos da RG1 e RG2 por década.
Azul = 1980/89, laranja = 1990/99, cinza = 2000/09, amarelo = 2010/19.



A posição das rotas ciclônicas no período de maior aprofundamento apresenta maior concentração próximos a 40° S em todas as estações (Figura 23). Apenas o verão não registrou eventos iniciando a norte de 30° S, o que pode ser explicado pelo posicionamento mais ao sul dos JAN nessa estação. A proporção de ciclones que iniciam sua trajetória explosiva sobre o continente se manteve homogênea durante verão (35%), inverno (30%) e primavera (34%). Porém o outono se destaca com 63% de casos com origem terrestre, indicando que essa estação tem potencial para gerar mais impacto e desastres relacionados a eventos explosivos.

Figura 23 – Distribuição sazonal de ciclones explosivos entre 1980-2019. (a) verão; (b) outono; (c) inverno; (d) primavera. A intensidade é marcada por triângulos (fraco), quadrados (moderado) e círculos (forte).



Um dos objetivos desse trabalho é investigar a relação entre os anos mais quentes dos registros modernos no Sul do Brasil com a ocorrência de ciclones explosivos no Sul do Brasil. De acordo com Ernst (2019) os anos mais quentes nessa região foram 2017, 2014, 2012, 2015 e 2002, e os ciclones identificados podem ser identificados na Tabela 6. Não foi encontrada relação das temperaturas anuais na ocorrência de ciclones explosivos.

Tabela 6 – Ocorrência e intensidade de ciclones explosivos na RG1 nos anos mais quentes da Região Sul do Brasil.

| Ano | Anomalia Temp (°C) | CEx Fraco | CEx Moderado | CEx Forte |
|------|--------------------|-----------|--------------|-----------|
| 2017 | +0,8 | 3 | 0 | 1 |
| 2014 | +0,8 | 1 | 0 | 0 |
| 2012 | +0,8 | 1 | 1 | 0 |
| 2015 | +0,7 | 3 | 0 | 1 |
| 2002 | +0,7 | 0 | 2 | 1 |

4.3 Ciclones Explosivos e ENOS

Um dos objetivos desse trabalho é investigar a relação de eventos de ENSO positivo, em especial aqueles ocorridos em anos de EN Muito Forte no Sul do Brasil. A ocorrência desses eventos foram entres os anos de 1982/83, 1997/98 e 2015/16. Outros eventos de EN ocorreram nos anos de 1986, 1987, 1991, 1994, 2002, 2004, 2006, 2009, 2018 e 2019.

Para esses períodos analisados, são observados dois aspectos. Primeiramente quanto ao número de ocorrências de ciclogênese explosiva em cada evento de EN (Tabela 7) e em segundo a análise da intensidade desses eventos. Como bem documentado na literatura, há um entendimento do efeito de atraso na resposta atmosférica às anomalias oceânicas relacionadas ao ENOS, onde as alterações na troposfera superior (200 hPa) ocorrem entre 1 e 3 meses após as anomalias de TSM (NEWELL e WEARE 1976; REID *et al.* 1989; YULAEVA e WALLACE 1994; KUMAR e HOERLING 2003). A quantificação dos eventos de ciclogênese explosiva ocorridos em cada evento de EN Muito Forte segue essa orientação.

Considerando que anos de EN representaram 13 dos 40 anos da série analisada, aponta-se uma notória relação com a ocorrência de casos explosivos na

área de estudo (Tabela 7). Esse aspecto foi observado principalmente na primavera da RG1. Dentre os 29 eventos ocorridos na primavera na série 1980-2019, 13 casos (44,8%) ocorreram em anos de EN, registrando assim, média de 1 ciclone explosivo em primaveras de EN e 0,59 em anos neutros ou de LN. Por outro lado, em anos de EN há menor ocorrência de ciclones explosivos no outono (20% dos casos totais). Esses resultados corroboram os trabalhos que apontam 1) para a modulação das rotas ciclônicas em direção as médias latitudes em anos de EN, e 2) a influência do JBN na ciclogênese da área de estudo em anos de EN. De acordo com Reboita *et al.* (2014), o ENOS modula a posição das rotas ciclônicas, porém não afeta o número de ocorrências no HS, onde em anos de EN há um aumento na ocorrência de ciclones totais entre 60° e 30° S na primavera, enquanto em anos de LN há um decréscimo nos ciclones ocorridos entre 30° e 20° S.

Como já discutido anteriormente, o JBN é um importante mecanismo de fortalecimento da ciclogênese na Região. Em anos de EN há um incremento na ocorrência e intensidade do JBN (MONTINI *et al.*, 2019), que está associado ao fortalecimento do ramo subtropical dos jatos em altos níveis e do fortalecimento e proximidade da Alta Subtropical do Atlântico Sul a AS, o oposto ocorre em anos de LN, (REBOITA *et al.*, 2021b). Ambos estão associados à esteira de ondas de Rossby resultante do Padrão Pacífico-América do Sul. Esse aumento ocorre principalmente durante a primavera (MONTINI *et al.* 2019) e foi encontrado nos estudos de caso de ciclones explosivos de Reis *et al.* (2020) e Schossler *et al.* (2020).

Tabela 7 – Ocorrência de ciclones explosivos na RG1 e RG2 em relação ao ENOS.

| Fase | Verão | Outono | Inverno | Primavera |
|--------------|-------|--------|---------|-----------|
| EN | 5 | 5 | 15 | 13 |
| Neutro ou LN | 9 | 19 | 30 | 16 |

A ocorrência do evento de EN Muito Forte de 1982/83 teve duração de 15 médias móveis de 3 meses, de abril/1982 a junho/1983. Nesse período foram registrados 4 ciclones explosivos, sendo 3 na RG1 e 1 na RG2. O evento de 1997/98 teve duração de 13 médias móveis de 3 meses, de maio/1997 a maio/1998, onde foram registrados 5 ciclones explosivos, todos registrados na RG1. O evento de 2015/16 teve duração de 19 médias móveis de 3 meses, de novembro/2014 a maio/2016, com 5 ciclones explosivos, todos registrados na RG1 (Tabela 8).

Tabela 8 – Ocorrência e intensidade de ciclones explosivos na RG1 e RG2 em anos de EN Muito Forte.

| EN Muito Forte | CEx Fraco | CEx Moderado | CEx Forte |
|----------------|-----------|--------------|-----------|
| 1982/83 | 2 | 1 | 1 |
| 1997/98 | 0 | 4 | 1 |
| 2015/16 | 4 | 0 | 1 |

Vemos assim, que a quantidade de ciclones explosivos por evento de EN Muito Forte está dentro da média de casos anuais. É válido ressaltar que dentre os 3 casos de ciclones explosivos encontrados na RG2 em toda a série 1980-2019, um deles ocorreu no evento de 1982/83. Podendo assim, ser indício da influência de EN Muito Forte em intensificar a ciclogênese da região.

Em segundo lugar, temos a análise da intensidade dos eventos. Nesse aspecto, se destaca a média de 1 ciclone explosivo Forte por evento de EN Muito Forte, sendo superior à média de 0,5 casos anuais da mesma intensidade observados na série histórica.

Também se identifica que alguns dos ciclones explosivos ocorridos durante esses eventos de EN Muito Forte estão entre os mais intensos da série. O ciclone ocorrido no mês de julho/2015 é o segundo mais intenso da série, com 2,44 TNA de intensidade e queda máxima da pressão em 24h de 44,9 hPa. Já o ciclone ocorrido em novembro/1982 é o quarto de maior intensidade, com 2,31 TNA e queda máxima da pressão em 24h de 40,7 hPa.

Gan e Rao (1991) apontaram para a maior ocorrência de ciclones em anos de EN em comparação aos anos de LN. Nesse aspecto também foi possível identificar que os dez eventos mais intensos da série ocorreram preferencialmente em períodos de EN (7 ocorrências).

5. Conclusões

Esse trabalho teve como objetivo aprofundar o conhecimento sobre a ocorrência de ciclones explosivos no Sul do Brasil, ao se analisar os últimos 40 anos de duas áreas ciclogênicas que abarcam a Região.

Em relação ao número absoluto de eventos explosivos (110 casos), não foi possível apontar tendência de aumento ou diminuição na série (1980-2019). Ao mesmo tempo, a latitude média do momento de maior intensidade dos ciclones explosivos não apresentou alterações significativas. Essas duas constatações sugerem que de forma geral, a transição das rotas ciclônicas não se alterou no período para os eventos explosivos. Diferentemente dos ciclones extratropicais não explosivos, conforme outros trabalhos observaram tendência de deslocamento em direção ao Oceano Austral.

Os ciclones explosivos nessa Região Sul (RG1 e RG2) são raros e representam 0,2% da população total de ciclones encontrados. A relação entre casos totais e explosivos aumenta para 6,4% quando observado apenas a RG1. Assim, foi possível compreender que embora ambas RG1 e RG2 tenham capacidade de gerar eventos ciclônicos, a RG1 é a única que mantém constante ocorrências de eventos explosivos ao longo da série, sendo responsável por 97% dos casos explosivos. Esses resultados reforçam a importância dos processos termodinâmicos relacionados a orografia da AS para o desenvolvimento de ciclones explosivos e ao papel do contraste entre oceano e atmosfera na amplificação do cavado.

Na avaliação sazonal, encontrou-se 14 casos no verão, 22 casos no outono, 44 casos no inverno e 29 na primavera. O inverno se destaca como estação de maior ocorrência, com 40% dos casos, e também com o maior número de ciclones explosivos fortes (10) e moderados (15) da Região Sul. O outono, apesar de terceira estação em número de casos, em média, apresenta casos mais intensos (TNAc média de 1,55), com a maior proporção de ciclones explosivos fortes por casos totais. O outono também é responsável pela maior proporção de eventos que iniciam a trajetória explosiva sobre o continente (63%).

Na análise decenal, não houve diferença significativa em número de casos, com média de 27 casos por década. Também se identificou que na última década, há uma diminuição de eventos explosivos durante o verão, assim como deslocamento para latitudes mais altas da rota ciclônica nas 24h de maior aprofundamento. Esse

fato relaciona-se com a atual tendência positiva da OAA e da expansão da Célula de Hadley, associadas ao aquecimento global antropogênico.

A avaliação de intensidade dos ciclones explosivos também indica que não há tendência estatisticamente significativa de redução ou aumento de intensidade dos eventos explosivos durante os últimos 40 anos. Durante o período, os ciclones explosivos apresentaram uma média de aprofundamento da pressão central em 24h de 25,6 ($\pm 6,5$) hPa, média do ponto mais profundo de 973,5 hPa, com intensidade média de 1,34 ($\pm 0,38$) TNA.

Avaliou-se relação entre anos de EN Muito Forte e ciclones explosivos na Região Sul. Trabalhos anteriores já apontavam maior frequência de ciclones na Região em anos de ENOS positivo. Neste estudo, encontrou-se que durante eventos de EN Muito Forte, ciclones explosivos fortes ocorreram com o dobro da frequência da média anual da série 1980-2019 (1 caso ao ano, enquanto em anos neutros ou de ENOS negativo a média é de 0,5 casos). Durante anos de EN também se constatou que as estações de transição apresentam comportamentos distintos, onde nos outonos a proporção de ciclones explosivos é 22% menor em anos de EN do que em relação a anos neutros ou de LN. Por outro lado, 44% dos ciclones explosivos da primavera ocorreram em anos de EN, que representam apenas 13 dos 40 anos do período analisado. Esse fato explica-se pelo fortalecimento dos JBN nas primaveras de EN, um dos principais agentes da intensificação da ciclogênese na Região Sul.

Uma das hipóteses desse trabalho se mostrou nula. Ela diz respeito a relação entre as temperaturas anuais da Região com a ocorrência de ciclones explosivos. Embora a literatura aponte para um cenário de ciclones explosivos mais frequentes e intensos no Século XXI em decorrência das mudanças climáticas, o método utilizado não foi capaz identificar se o já registrado aumento de temperaturas médias pode ter influenciado a ciclogênese explosiva nos últimos 40 anos.

Para trabalhos futuros sugere-se explorar a relação do transporte de umidade tropical via JBN na ocorrência de ciclones explosivos da Região Sul. Também o uso de modelos climáticos para projeções de ocorrência de ciclones explosivos para a Região Sul nos cenários de emissões avaliados pelo IPCC (2021).

Referências Bibliográficas

ADAM, O.; SCHNEIDER, T.; HARNIK, N. Role of changes in mean temperatures versus temperature gradients in the recent widening of the Hadley circulation. **Journal of Climate**, 2014, v. 27, p. 7450–7461.

ALLEN, J.T.; PEZZA, A.B.; BLACK, M.T. Explosive Cyclogenesis: A Global Climatology Comparing Multiple Reanalyzes. **Journal of Climate**, 2010, v. 23, p. 6468-6484.

AMBRIZZI, T; REBOITA, M.S.; da ROCHA, R.P.; LLOPART, M. The state-of-the-art and fundamental aspects of regional climate modeling in South America. **Annals of The New York Academy of Science**, Special Issue: Climate Sciences, 2018, p. 1-23.

BARRY, R.G.; CHORLEY, R.J. **Atmosfera, Tempo e Clima**. Porto Alegre: Bookman. 9 ed. 2013, 512 p.

BENGTSSON, L.; HODGES K. I.; ROECKNER, E. Storm tracks and climate change. **Journal of Climate**, 2006, v. 19, n. 15, p. 3518–3543

BITENCOURT, D.P.; FUENTES, M.V.; CARDOSO, C.S. Climatologia de ciclones explosivos para a área ciclogênica da América do Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, 2013, v. 28, n.1.

CAVALCANTI, I. F. A.; CARRIL, A. F.; PENALBA, O. C. Precipitation extremes over La Plata basin – Review and new results from observation and climate simulations. **Journal of Hidrology**, 2015, v. 523, p. 211–230.

CEBALLOS, G.; EHRLICH, P.R.; BARNOSKY, A.D.; GARCÍA, A.; PRINGLE, R.M.; PALMER, T.M. Accelerated modern human–induced species losses: Entering the sixth mass extinction. **Science Advances**, 2015, v. 1, n. 5, p. 1-5.

CEBALLOS, G.; EHRLICH, P.R.; DIRZO, R. Biological annihilation via the ongoing sixth mass extinction signaled by vertebrate population losses and declines. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, 2017, v. 114, n. 30, p. 6089-6096.

CLIMATE REANALYZER. **Climate Change Institute**, University of Maine, USA. Disponível em: <<https://ClimateReanalyzer.org>>. Acessado em: 15/04/2021.

CPC – Climate Prediction Center; NOAA. **Cold & Warm Episodes by Season**. 2020, acessado em: https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php

COPERNICUS CLIMATE CHANGE SERVICE (C3S). ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate. **Copernicus Climate Change Service Climate Data Store (CDS)**, 2017. Disponível em: <<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home>>. Acessado em: 20/05/2020

D'AGOSTINO, R.; LIONELLO, P. Evidence of global warming impact on the evolution of the Hadley circulation in ECMWF centennial reanalyses. **Climate Dynamics**. 2017, v. 48, p. 3047–3060;

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

DEE, D.; FASULLO, J.; SHEA, D.; WALSH, J. e National Center for Atmospheric Research Staff (Eds). **The Climate Data Guide: Atmospheric Reanalysis: Overview & Comparison Tables**. [2019] acessado em: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/atmosphericreanalysis-overviewcomparison-tables>.

ERNST, M.F. **Anomalias de temperatura no Sul do Brasil nos 4 anos mais quentes dos últimos 100 anos**. Trabalho de Conclusão de Curso, (Bacharelado em Geografia), UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

FORSTER, P.; RAMASWAMY, V.; ARTAXO, P.; *et al.* Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. In: **Climate Change 2007: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor e H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido e Nova Iorque, NY, EUA. 2007, p. 131-217.

FYFE, J. C.; BOER, G. J.; FLATO, G. M. The Arctic and Antarctic oscillations and their projected changes under global warming. **Geophys Res Lett**, 1999, v. 26, p. 1601–1604.

FYFE, J.C. Extratropical Southern Hemisphere Cyclones: Harbingers of Climate Change? **Journal of Climate**, 2003, v. 16, p. 2802-2805.

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

GAN, M.A.; SELUCHI, M.E. Ciclones e Ciclogênese. In: CAVALCANTI, I.F.A.; FERREIRA, N.J.; SILVA, M.G.A.J. e DIAS, M.A.F.S (orgs.). **Tempo e Clima no Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2009. p. 111-125.

GENG, Q.; SUGI, M. Possible change of extratropical cyclone activity due to enhanced greenhouse gases and sulfate aerosols - Study with a high-resolution AGCM. **Journal of Climate**, 2003, v. 16, n. 13, p. 2262–2274.

GRAMCIANINOV, C.B. **Changes in South Atlantic Cyclones due Climate Change (Mudanças nos Ciclones do Atlântico Sul devido às Mudanças Climáticas)**. Tese (Doutorado no Departamento de Ciências Atmosféricas do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas) – USP – Universidade de São Paulo. São Paulo, 2018.

GRAMCIANINOV, C.B.; HODGES, K.I.; de CAMARGO, R. The properties and genesis environments of South Atlantic cyclones. **Climate Dynamics**, 2019, v. 53, p. 4115-4140.

GRAMCIANINOV, C.B.; CAMPOS, R.M.; de CAMARGO, R. Analysis of Atlantic extratropical storm tracks characteristics in 41 years of ERA5 and CFSR/CFSv2 databases. **Ocean Engineering**, 2020, v. 216, p. 1-13.

GROISMAN, P.Y.; KNIGHT, R.W.; EASTERLING, D.R.; KARL, T.R.; HEGERL, G.C.; RAZUVAEV, V.N. Trends in Intense Precipitation in the Climate Record. **Journal of Climate**, 2004, v. 18, p. 1326-1350.

HART, R.E. A Cyclone Phase Space Derived from Thermal Wind and Thermal Asymmetry. **Monthly Weather Review**, 2003, v. 131, p. 585-616.

HAWCROFT, M.K.; SHAFFREY, L.C.; HODGES, K.I.; & DACRE, H.F. How much Northern Hemisphere precipitation is associated with extratropical cyclones? **Geophysical Research Letters**, 2012, v. 39.

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

HENRY, A.J. J. Bjerknes and H. Solberg: On meteorological conditions for the formation of rain. **Monthly Weather Review**, 1992, v. 50, p. 402–404.

HOBBS, P. V.; J. D. LOCATELLI; J. E. MARTIN. Cold fronts aloft and the forecasting of precipitation and severe weather east of the Rocky Mountains. **Wea. Forecasting**, 1990, v. 5, p. 613–626.

HODGES, K.I. A general-method for tracking analysis and its application to meteorological data. **Monthly Weather Review**, 1994, v. 122, n. 11, p. 2573–2586

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

IPCC, 2021: Summary for Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [MassonDelmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. **Cambridge University Press**. In Press.

JANTSCH, M. **Climatologia de ciclones extratropicais na Região Sul do Brasil de 2000 a 2016**. Dissertação de Mestrado, UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2019.

KENNEDY, C.M.; OAKLEAF, J.R.; THEOBALD, D.M.; MORDO, S.B.; KIESECKER, J. Managing the middle: A shift in conservation priorities based on the global human modification gradient. **Global Change Biology**, 2019, v. 25, n. 3, p. 811-826.

KUMAR, A.; HOERLING, M. P. The Nature and Causes for the Delayed Atmospheric Response to El Niño. **Journal of Climate**, 2003, v. 16, n. 9, p. 1391-1403.

KUO, Y-H.; REED, R.J.; LOW-NAM, S. Effects of surface energy during the early development and rapid intensification stages of seven explosive cyclones in the Western Atlantic. **Monthly Weather Review**, v. 119, n.2, p.457-476, 1991.

LAMBERT, S. J.; FYFE, J. C. Changes in winter cyclone frequencies and strengths simulated in enhanced greenhouse warming experiments: Results from the models participating in the IPCC diagnostic exercise. **Climate Dynamics**, 2006, v. 26, n. 7–8, p. 713–728.

LIM, E.P.; SIMMONDS, I. Effect of tropospheric temperature change on the zonal mean circulation and SH winter extratropical cyclones. **Climate Dynamics**, 2009, v. 33, n. 1, p. 19–32.

MET OFFICE. **What are Lee Waves?** c2020. Disponível em: <<https://www.metoffice.gov.uk/weather/learn-about/weather/types-of-weather/wind/lee-waves>>. Acessado em: 15 de ago. de 2020.

MIZUTA, R.; MATSUEDA, M.; ENDO, H.; YUKIMOTO, S. Future change in extratropical cyclones associated with change in the upper troposphere. **Journal of Climate**, 2011, v. 24, p. 6456–6470

MIZUTA, R. Intensification of extratropical cyclones associated with the polar jet change in the CMIP5 global warming projections. **Geophys. Res. Lett.**, 2012, v. 39 n. 19, p. 1–6.

MONTINI, T. L.; JONES, C.; CARVALHO, L. M. V. The South American Low-Level Jet: A New Climatology, Variability, and Changes. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, 2019, v. 128, n. 3, 1200-1218.

MURRAY, R.J.; SIMMONDS, I. A numerical scheme for tracking cyclone centres from digital data. Part I: Development and operation of the scheme. **Australian Meteorological Magazine**, 1991, v. 39, p. 167–180.

NASCIMENTO, M.G. **Análise dos impactos dos jatos de baixos níveis sobre a Bacia do Prata**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia), INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2008, 208 p.

NEWELL, R. E.; WEARE, B. C. Factors governing tropospheric mean temperature. **Science**, 1976, v. 194, p. 1413–1414.

NGUYEN, H.; EVANS, A.; LUCAS, C.; SMITH, I.; TIMBAL, B. The Hadley circulation in reanalysis: climatology, variability, and change. **Journal of Climate**, 2013, v. 26, p. 3357–3376;

NOAA. **Four El Niño Regions**. 2005, acessado em: https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/nino_regions.shtml

PICHLER, H.; STEINACKER, R. On the synoptics and dynamics of orographically induced cyclones in the Mediterranean. **Meteor. Atmos. Phys.**, 1987, v. 36, p. 108–117.

PINTO, J. G.; ULBRICH, U.; LECKEBUSCH, G. C., *et al.* Changes in storm track and cyclone activity in three SRES ensemble experiments with the ECHAM5/MPI-OM1 GCM. **Climate Dynamics**, 2007, v. 29, n. 2-3, p. 195–210.

PEREIRA, N. **Impactos dos ciclones extratropicais em eventos extremos de precipitação na Bacia do Rio da Prata**. Dissertação de Mestrado, USP – Universidade de São Paulo. São Paulo, 2013.

REBOITA, M.S. **Ciclones extratropicais sobre o Atlântico Sul: Simulação climática e experimentos de sensibilidade**. Tese de Doutorado, USP – Universidade de São Paulo, São Paulo. 2008.

REBOITA, M.S.; ROCHA, R.P.; AMBRIZZI, T; SUGAHARA, S. South Atlantic Ocean cyclogenesis climatology simulated by regional climate model (RegCM3). **Climate Dynamics**, 2010, v. 35, n. 7, p. 1331-1347.

REBOITA, M.S.; DA ROCHA, R.P.; AMBRIZZI, T.; GOUVEIA, C. D. Trend and teleconnection patterns in the climatology of extratropical cyclones over the Southern Hemisphere. **Climate Dynamics**, 2015, v. 45, n. 7–8, p. 1929–1944.

REBOITA, M.S.; SOUZA, M.R.; LLOPART, M. Extratropical cyclones over the southwestern South Atlantic Ocean: HadGEM2-ES and RegCM4 projections. **International Journal of Climatology**, 2018, p. 1-14.

REBOITA, M. S.; CRESPO, N.M.; TORRES, J.A., *et al.* Future changes in winter explosive cyclones over the Southern Hemisphere domains from the CORDEX-CORE ensemble. **Climate Dynamics**, 2021a, v. 57, p. 3303-3322.

REBOITA, M. S.; AMBRIZZI, T.; CRESPO, N. M. *et al.* Impacts of teleconnection patterns on South America climate. **Annals of the New York Academy of Sciences**, 2021b, p. 1-31.

REID, G. C.; GAGE, K. S.; MCAFEE, J. R. The thermal response of the tropical atmosphere to variations in equatorial Pacific sea-surface temperatures. **J. Geophys. Res.**, 1989, v. 94, p. 14705–14716.

REIS, P.A. **Análise sinótica e composição isotópica da precipitação de um ciclone explosivo no Rio Grande do Sul**. Trabalho de Conclusão de Curso, (Bacharelado em Geografia), UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

REIS, P.A.; AQUINO, F.E.; SCHOSSLER, V., *et al.* Tropical-Antarctic connections of an explosive cyclone in southern Brazil: rainfall stable isotope ratios and atmospheric analysis. **Advances in Polar Science**, 2020, v. 31, n. 2, p. 103-111.

RIVERO, O.R.; BISCHOFF, S.A. Ciclogénesis, movimiento y distribución de depresiones em los océanos Atlántico y Pacífico Sur durante el período abril 1967 – marzo 1968. **Meteorologica**, 1971, v. 2, p. 414-423.

ROCHA, F.P.; ARAVÉQUIA, J.A.; RIBEIRO, B.Z. Estudo de Ciclones e de Padrões de Circulação Atmosférica no Oceano Atlântico Sul Próximo à Costa das Regiões Sul e

Sudeste do Brasil Usando Dados da Reanálise do Era-Interim. **Revista Brasileira de Meteorologia**, 2016, v. 31, n. 2, p. 141-156.

SAHA, S.; MOORTHY, S. HUA-LU, P. The NCEP climate forecast system reanalysis. **Bull. American Meteorological Society**, 2010. v. 91. p. 1015-1057.

SANDERS, F.; GYAKUM, J.R. Synoptic-Dynamic Climatology of the “Bomb”. **Monthly Weather Review**, 1980, v. 1008, p. 1589-1606.

SCHOSSLER, V.; AQUINO, F.E.; REIS, P.A.; SIMÕES, J.C. Antarctic atmospheric circulation anomalies and explosive cyclogenesis in the spring of 2016. **Theoretical and Applied Climatology**, 2020.

SCHULTZ, D. M.; BOSART, L. F.; COLLE, B. A. *et al.* Chapter 16: Extratropical Cyclones: A Century of Research on Meteorology’s Centerpiece. **A. Met. Soc.**, 2019, p. 1-56.

SEIDEL, D. J.; RANDEL, R. J. Recent widening of the tropical belt: Evidence from tropopause observations. **J Geophys Res.** 2007, v. 112.

SELUCHI, M.E.; SAULO, A.C. Possible mechanisms yielding an explosive coastal cyclogenesis over South America: experiments using a limited area model. **Australian Meteorology Magazine**, 1998, v. 47, p. 309-320.

SELUCHI M.E., A.C. SAULO: Mecanismos físicos associados à formação da Baixa do Chaco. **Anais do XVI Congresso Brasileiro de Meteorologia**, 2010.

SELUCHI, M. E.; SAULO, A. C. Baixa do Noroeste Argentino e Baixa do Chaco: características, diferenças semelhanças. **Revista Brasileira de Meteorologia**, 2012, v. 27-1, p. 49-60.

SHAPIRO, M. A.; KEYSER, D. Fronts, jet streams, and the tropopause. **Meteor. Soc.**, 1990, p. 167–191.

SIMMONS, A.; SOCI, C.; NICOLAS, J.; *et al.* Global stratospheric temperature bias and other stratospheric aspects of ERA5 and ERA5.1. **ECMWF Technical Memoranda**, 2020, v. 859, p. 1-40.

SINCLAIR, M.R. An objective cyclone climatology for the Southern Hemisphere. **Monthly Weather Review**, 1994, v. 122 (10), p. 2239–2256.

SOLMAN, S. A.; ORLANSKI, I. Poleward shift and change of frontal activity in the Southern Hemisphere over the last 40 years. **Journal of Atmospheric Science**, 2014, v. 71, p. 539–552.

TALJAARD, J.J. Development, distribution and movement of cyclones and anticyclones in the Southern Hemisphere during the IGY. **Journal of Applied Meteorology**, 1967, v. 6 (6), p. 973–987.

THOMPSON, D. W. J.; SOLOMON, S. Interpretation of recent Southern Hemisphere climate change. **Science**, 2002, v. 296, p. 895–899.

TRENBERTH, K.; National Center for Atmospheric Research Staff (Eds). **The Climate Data Guide: Nino SST Indices (Nino 1+2, 3, 3.4, 4; ONI and TNI)**. 2020, acessado em: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/nino-sst-indices-nino-12-3-34-4-oni-and-tni>.

ULBRICH, U.; LECKEBUSCH G. C.; PINTO, J. G. Extra-tropical cyclones in the present and future climate: A review. **Theoretical and Applied Climatology**, 2009, v. 96, n. (1-2), p. 117–131.

VIANA, D.R.; AQUINO, F.E.; MATZENAUER, R. Comportamento Espaço-Temporal da Precipitação no Rio Grande do Sul entre 1945-1974 e 1975-2004. **Anais do XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia**. 2006

WANG, H.; FU, R. Influence of Cross-Andes Flow on the South American Low-Level Jet. **Journal of Climate**. 2004, v. 17 (6), p. 1247-1262.

WERNLI, H.; SCHWIERZ, C. Surface Cyclones in the ERA-40 Dataset (1958–2001). Part I: Novel Identification Method and Global Climatology. **Journal of the Atmospheric Sciences**, 2006, v. 63, n. 10, p. 2486-2507.

WILLISON, J.; ROBINSON, W.A.; LACKMANN, G.M. North Atlantic storm-track sensitivity to warming increases with model resolution. **Journal of Climate**, 2015, v. 28, p. 4513–4524

XIA, L.; von STORCH, H.; FESER, F.; WU, J. A study of quasi-millennial extratropical winter cyclone activity over the Southern Hemisphere. **Climate Dynamics**, 2016, v. 47, p. 2121–2138.

YULAEVA, E.; WALLACE, J. M. The signature of ENSO in global temperature and precipitation fields derived from micro-wave sounding unit. **Journal of Climate**, 1994, v. 7, p. 1719–1736.

ZAPPA, G.; HAWCROFT, M.K.; SHAFFREY, L.; BLACK, E.; BRAYSHAW, D.F. Extratropical cyclones and the projected decline of winter Mediterranean precipitation in the CMIP5 models. **Climate Dynamics**, 2015, v. 45, p. 1727–1738.