

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS**

**IDENTIFICAÇÃO DE TENDÊNCIAS NA PRECIPITAÇÃO E
ATIVIDADE CICLÔNICA NA AMÉRICA DO SUL**

VITOR HUGO DE ALMEIDA MARRAFON

ITAJUBÁ (MG), BRASIL

2021

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS**

**IDENTIFICAÇÃO DE TENDÊNCIAS NA PRECIPITAÇÃO E
ATIVIDADE CICLÔNICA NA AMÉRICA DO SUL**

VITOR HUGO DE ALMEIDA MARRAFON

Dissertação submetida como parte do Programa de Pós-graduação em Meio Ambiente e Recursos Hídricos, sendo parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Orientadora: Dr^a Michelle Simões Reboita

Coorientadora: Dr^a Rosmeri Porfirio da Rocha(IAG/ USP)

ITAJUBÁ (MG), BRASIL

2021

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS**

**IDENTIFICAÇÃO DE TENDÊNCIAS NA PRECIPITAÇÃO E
ATIVIDADE CICLÔNICA NA AMÉRICA DO SUL**

Vitor Hugo de Almeida Marrafon

Dissertação aprovada pela banca examinadora em 5 de Março de 2021 conferindo ao autor o título de **Mestre em Ciências em meio Ambiente e Recursos Hídricos**.

Banca Examinadora:

Profa. Dra. Michelle Simões Reboita (Orientadora)
Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI

Profa. Dra. Rosmeri Porfírio da Rocha (Coorientadora)
Universidade de São Paulo – USP

Dr. Eduardo Marcos de Jesus
Universidade de São Paulo – USP

Prof. Dr. Enrique Vieira Mattos
Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI

**Itajubá (MG), Brasil
2021**

Aos meus amados pais, Andrea Margarete de Almeida Marrafon e Regis Mari Marrafon, e ao meu irmão, Vinicius Mari Marrafon, por todo amor, carinho e apoio durante toda minha trajetória.

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

De antemão gostaria de me desculpar com todos aqueles que não citei diretamente, não se sintam menos importantes, é que a memória é fraca e o espaço curto, mas todos tem um lugar guardado no meu coração.

Aos meus amados pais, Regis Mari Marrafon e Andrea Margarete de Almeida Marrafon por todos os conselhos, amor, ensinamento, incentivos, carinho e apoio em toda minha trajetória desde a pré-escola, sou pessoa que sou hoje graças a vocês, serei eternamente grato.

Ao meu querido irmão, Vinicius Mari Marrafon, por todo suporte e consideração e, por sempre permitir que eu te ensine sobre o pouco que sei, assim sempre me mantendo motivado a aprender mais.

À minha querida orientadora profa. Dra. Michelle Simões Reboita, por toda paciência, suporte, compreensão, conselhos e ensinamentos durante toda a minha trajetória acadêmica, e por me guiar durante todo esse estudo (e outros muitos), sou eternamente grato pela sua amizade e orientação.

À minha amada namorada Cristiana Faria Goulart, por todo seu companheirismo, amor, carinho, apoio, incentivo, por sempre me trazer leveza, paz e nunca me deixar ficar para baixo ou desistir mesmo quando a situação pareça insustentável.

Aos meus amigos, Pedro Ygor Corrêa, Luiz Renato Salvador e Guilherme Borges, por todas as risadas, trocas de ideia, amizade e companheirismo.

Aos meus amigos e companheiros de orientadora, Bruna Andrelina Silva, Thales Teodoro e Bruno Capucin, por todos os momentos de felicidade e apoio em todos os momentos.

À todas as pessoas que passaram pela república Caos (incluindo agregados), pela amizade, paciência, aprendizado e por serem minha segunda família desde o início da graduação.

À toda turma de Ciências Atmosféricas de 2014, por todo companheirismo e apoio, vocês são os melhores.

Para os(as) professores(as), Michelle Simões Reboita, Sâmia Calheiros, Roger Rodrigues Torres, Arcilan Assireu, Fabrina Bolzan, Marcelo de Paula Corrêa, Vanessa Silveira, Enrique Mattos por todo conhecimento que hoje é base para o meu trabalho e pesquisas. Em especial para os meus orientadores Roger Rodrigues Torres e Michelle Simões Reboita, por toda ajuda e orientação, vocês foram essenciais para minha formação.

Ao Dr. Eduardo Marcos de Jesus, por toda ajuda imprescindível para o desenvolvimento deste estudo, em especial para o capítulo 3.

À todos que compuseram minha banca, a Prof^a Dr^a Rosmeri Porfírio, a Prof^o Dr^o Enrique Vieira Mattos, o Dr^o Eduardo Marcos de Jesus e à minha orientadora. Ficam minha meus eternos agradecimentos.

A universidade, ao Instituto de Recursos Naturais, ao POSMARH e a todos os docentes e colegas do curso de Mestrado em Meio Ambiente que tive contato durante esses dois últimos anos por me motivarem como aluno e por fazerem papel fundamental no meu desenvolvimento acadêmico e formação profissional. À CAPES, instituição de fomento que financiou esse estudo durante 1 ano.

“Coragem, coragem, se o que você quer é aquilo que pensa e faz
Coragem, coragem, eu sei que você pode mais”
Raul Seixas - Por quem os sinos dobram

*“Run, rabbit run
Dig that hole, forget the sun
And when at last the work is done
Don't sit down it's time to dig another one”*
Pink Floyd – Breathe

RESUMO

MARRAFON, Vitor Hugo de Almeida. **IDENTIFICAÇÃO DE TENDÊNCIAS NA PRECIPITAÇÃO E ATIVIDADE CICLÔNICA NA AMÉRICA DO SUL**. 2021. 90 f. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Instituto de Recursos Naturais, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2021.

Este estudo apresenta as principais características climatológicas e das tendências, para a precipitação, considerando índices de extremos, e atividades ciclônicas, na América do Sul e Atlântico Sul, respectivamente. A análise da precipitação foi realizada a partir de dados disponibilizados pelo *Climate Prediction Center (CPC-NOAA)* no período de 1979-2019. O rastreamento dos ciclones foi realizado considerando dados de pressão reduzida ao nível médio do mar de 6 diferentes reanálises, incluindo duas centenárias. A partir de ciclones rastreados em simulações para clima presente e futuro provenientes do *The Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5)*, foram analisadas as características climatológicas e de tendências para os diferentes tipos de ciclogênese. A classificação dos tipos de ciclogênese é realizada em três etapas: o primeiro para identificar e rastrear os ciclones no oceano Atlântico Sul com base na vorticidade relativa em 925 hPa; aplicação da metodologia do *Cyclone Phase Space* para síntese da estrutura térmica dos ciclones e o por fim, separar os ciclones com base em suas características térmicas. Os principais resultados desse estudo mostram que em grande parte da América do Sul, principalmente na banda que se estende da Amazônia em direção à região sudeste do Brasil (região da bacia do Prata), as tendências indicam menor (maior) disponibilidade de água no ciclo hidrológico. Para as atividades ciclônicas, as reanálises com maior resolução são as que fornecem o maior número de ciclones, mas isso não afeta as características climatológicas. Para todo o Hemisfério Sul o NCEP20C mostra tendência positiva e estatisticamente significativa da frequência de ciclones, enquanto a ERA20C indica tendência negativa. Os ciclones intensos (que atingem pressão central menor do que 980 hPa) apresentaram tendência de aumento em todas as reanálises. Considerando os diferentes tipos de ciclones, para o período de 2020-2050 (2051-2080), o *ensemble* dos Modelos de Circulação Global (MCGs) e do *downscaling* dinâmico utilizando o RegCM4 projetam ligeira redução (aumento) na frequência de ciclones tropicais quando comparados ao clima presente (1979-2005). Uma das hipóteses iniciais do estudo era que num cenário de aquecimento, haveria um incremento no número de TT, entretanto os resultados obtidos não indicam mudança na frequência desses sistemas já que tanto no clima presente quanto futuro o número de transições é de ~2,8 sistemas por década em ambos os *ensembles*.

Palavras-chave: Precipitação, tendências, ciclogênese, mudanças climáticas, transição tropical, CPS

ABSTRACT

MARRAFON, Vitor Hugo de Almeida. **IDENTIFICATION OF TRENDS IN PRECIPITATION AND CYCLONIC ACTIVITY IN SOUTH AMERICA**. 2021. 90 p. Dissertation (Master in Environment and Water Resources) - Institute of Natural Resources, Federal University of Itajubá, Itajubá, 2021.

This study presents the main climatological characteristics and trends, for precipitation, considering extreme rates, and cyclonic activities, in South America and the South Atlantic, respectively. Precipitation analysis was performed from data provided by the Climate Prediction Center (CPC-NOAA) in the period 1979-2019. Cyclone tracking was performed considering data from reduced pressure at sea level from 6 different reanalyses, including two centenarian ones. From cyclones tracked in simulations for present and future climate from The Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5), the climatological characteristics and trends for the different types of cyclogenesis were analyzed. The classification of cyclogenesis types is carried out in three stages: the first to identify and track cyclones in the South Atlantic Ocean based on the relative vorticity at 925 hPa; application of the Cyclone Phase Space methodology to synthesize the thermal structure of the cyclones and finally, separate the cyclones based on their thermal characteristics. The main results of this study show that in a large part of South America, mainly in the band that extends from the Amazon towards the southeastern region of Brazil (region of the Prata basin), the trends indicate less (greater) availability of water in the cycle hydrological. For cyclonic activities, reanalysis with higher resolution are the ones that provide the greatest number of cyclones, but this does not affect the climatological characteristics. For the entire Southern Hemisphere, the NCEP20C shows a positive and statistically significant trend in the frequency of cyclones, while the ERA20C indicates a negative trend. For Intense cyclones (reaching central pressure less than 980 hPa) showed an increasing trend in all reanalyses. Considering the different types of cyclones, for the period 2020-2050 (2051-2080), the ensemble of Global Circulation Models (MCGs) and dynamic downscaling using RegCM4 project a slight reduction (increase) in the frequency of tropical cyclones when compared to the present climate (1979-2005). One of the initial hypotheses of the study was that in a warming scenario, there would be an increase in the number of TT, however the results obtained do not indicate a change in the frequency of these systems since in both the present and future climate the number of transitions is ~ 2.8 systems per decade in both ensembles.

Keywords: Precipitation, trends, cyclogenesis, climate change, tropical transition, Cyclone Phase Space

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

FIGURA 1.1 - MÉDIA ANUAL E SAZONAL DO TOTAL DA PRECIPITAÇÃO (MM) NO PERÍODO DE 1979 A 2019 E REGIÕES COM TENDÊNCIA POSITIVA (AZUL) E NEGATIVA (VERMELHO) DA PRECIPITAÇÃO COM SIGNIFICÂNCIA ESTATÍSTICA ($A=0.05$) DESTACADA EM HACHURADO..22

FIGURA 1.2 - MÉDIA ANUAL E SAZONAL DO MAIOR ACUMULADO DE PRECIPITAÇÃO EM 5 DIAS CONSECUTIVOS (MM) NO PERÍODO DE 1979 A 2019 E REGIÕES COM TENDÊNCIA POSITIVA (AZUL) E NEGATIVA (VERMELHO) COM SIGNIFICÂNCIA ESTATÍSTICA ($A=0.05$)..22

FIGURA 1.3 - MÉDIA ANUAL E SAZONAL DO MÁXIMO NÚMERO DIAS CONSECUTIVOS ÚMIDOS NO PERÍODO DE 1979 A 2019 E REGIÕES COM TENDÊNCIA POSITIVA (AZUL) E NEGATIVA (VERMELHO) COM SIGNIFICÂNCIA ESTATÍSTICA ($A=0.05$).24

FIGURA 1.4 - MÉDIA ANUAL E SAZONAL DO MÁXIMO NÚMERO DIAS CONSECUTIVOS SECOS NO PERÍODO DE 1979 A 2019 E REGIÕES COM TENDÊNCIA POSITIVA (AZUL) E NEGATIVA (VERMELHO) COM SIGNIFICÂNCIA ESTATÍSTICA ($A=0.05$).24

FIGURA 1.5 - MÉDIA ANUAL E SAZONAL DO PERCENTIL 95 DA DISTRIBUIÇÃO DE PRECIPITAÇÃO NO PERÍODO DE 1979 A 2019 E REGIÕES COM TENDÊNCIA POSITIVA (AZUL) E NEGATIVA (VERMELHO) COM SIGNIFICÂNCIA ESTATÍSTICA ($A=0.05$).....25

FIGURA 1.6 - MÉDIA ANUAL E SAZONAL DO NÚMERO DE DIAS COM PRECIPITAÇÃO MAIOR DO QUE A DO PERCENTIL DE 95% NO PERÍODO DE 1979 A 2019 E REGIÕES COM TENDÊNCIA POSITIVA (AZUL) E NEGATIVA (VERMELHO) COM SIGNIFICÂNCIA ESTATÍSTICA ($A=0.05$).26

FIGURA 1.7 - HY-INT CALCULADO PARA O VERÃO. REGIÕES COM TENDÊNCIA POSITIVA ESTÃO DESTACADAS COM HACHURADO AZUL, E NEGATIVA, COM HACHURADO VERMELHO.....26

CAPÍTULO 2

FIGURA 2.1 - FREQUÊNCIA ANUAL DE TODOS OS CICLONES EXTRATROPICAIS CONSIDERANDO AS DIFERENTES REANÁLISES: (A) HEMISFÉRIO SUL E (B) OCEANO ATLÂNTICO SUL. A FIGURA TAMBÉM MOSTRA O NÚMERO DE OBSERVAÇÕES DE SUPERFÍCIE ASSIMILADAS NAS REANÁLISES DO NCEP (LINHA CINZA, OBTIDA DE COMPO ET AL., 2011) E NAS DO ECMWF (LINHA PRETA, OBTIDA DE POLI ET AL., 2016). ALÉM DISSO, É MOSTRADA A CORRELAÇÃO DA SÉRIE DO NÚMERO DE OBSERVAÇÕES, OBSN PARA O NCEP E OBSE PARA O ECMWF, COM AS SÉRIES TEMPORAIS DA FREQUÊNCIA DE CICLONES DAS RESPECTIVAS REANÁLISES.....40

FIGURA 2.2 - FREQUÊNCIA ANUAL DOS CICLONES QUE EM ALGUM MOMENTO DO CICLO DE VIDA CONSEGUEM ATINGIR PRESSÃO CENTRAL MENOR OU IGUAL A 980 HPA NAS DIFERENTES REANÁLISES: (A) HEMISFÉRIO SUL E (B) OCEANO ATLÂNTICO SUL.....41

FIGURA 2.3 - MÉDIA ANUAL DA PNMM (HPA) NA ÁREA QUE COMPREENDE TODO O HEMISFÉRIO SUL, NA REANÁLISE NCEP20C (LINHA AZUL) E ERA20C (LINHA ROXA).....43

FIGURA 2.4 - ÍNDICE ANUAL DA OSCILAÇÃO DECADAL DO PACÍFICO (PDO EM INGLÊS, BARRAS), OBTIDO DE [HTTPS://WWW.NCDC.NOAA.GOV/TELECONNECTIONS/PDO/](https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/pdo/), E SÉRIES TEMPORAIS, SEM TENDÊNCIA, DA ANOMALIA DA FREQUÊNCIA DOS CICLONES EXTRATROPICAIS NO HS (TODOS OS SISTEMAS IDENTIFICADOS): NCEP20C (LINHA AZUL) E ERA20C (LINHA ROXA). AS SÉRIES TEMPORAIS DAS REANÁLISES CENTENÁRIAS SE ESTENDEM ATÉ 2010. A ANOMALIA DOS CICLONES É EM RELAÇÃO AO PERÍODO 1900 A 2010.....43

FIGURA 2.5 - SÉRIE TEMPORAL DO ÍNDICE ANUAL DA OSCILAÇÃO MULTIDECADAL DO PACÍFICO OBTIDO DE [HTTPS://WWW.PSL.NOAA.GOV/DATA/CORRELATION/AMON.US.DATA](https://www.psl.noaa.gov/data/correlation/amon.us.data), E SÉRIES TEMPORAIS, SEM TENDÊNCIA, DA ANOMALIA DA FREQUÊNCIA DOS CICLONES EXTRATROPICAIS (TODOS OS SISTEMAS IDENTIFICADOS). A) PARA O HS E NCEP20C (LINHA AZUL) E ERA20C (LINHA ROXA). A ANOMALIA DOS CICLONES É CALCULADA EM RELAÇÃO À

CLIMATOLOGIA DO PERÍODO 1900 A 2010; B) PARA O HS NO NCEP1, NCEP2, ERAI E ERA5 E C) PARA O ATLÂNTICO SUL NO NCEP1, NCEP2, ERAI E ERA5. EM B E C AS ANOMALIAS FORAM COMPUTADAS CONSIDERANDO O PERÍODO DE 1980 A 2018. NOS TRÊS PAINÉIS SÃO MOSTRADAS AS CORRELAÇÕES DAS SÉRIES ANUAIS DA OCORRÊNCIA DE CICLONES E O ÍNDICE AMO. SÓ A CORRELAÇÃO ENTRE O NCEP20C E O AMO POSSUI SIGNIFICÂNCIA ESTATÍSTICA COM 95% DE CONFIANÇA.45

FIGURA 2.6 - CICLO ANUAL DA FREQUÊNCIA DE TODOS OS CICLONES IDENTIFICADOS PELO ALGORITMO (COLUNA DA ESQUERDA) E DAQUELES COM $P \leq 980$ HPA (COLUNA DA DIREITA) EM ALGUM MOMENTO DO CICLO DE VIDA NAS DIFERENTES REANÁLISES. ANÁLISES PARA TODO O HS E OCEANO ATLÂNTICO SUL. NAS FIGURAS, AS BARRAS INDICAM O DESVIO-PADRÃO.....47

FIGURA 2.7 - MÉDIA SAZONAL (CORES) DA DENSIDADE DA POSIÇÃO INICIAL (CICLOGÊNESES) DE TODOS OS CICLONES IDENTIFICADOS PELO ALGORITMO NO VERÃO (COLUNA ESQUERDA) E INVERNO (COLUNA DA DIREITA) NAS DIFERENTES REANÁLISES. A UNIDADE DA FIGURA É 10^5 KM^{-2} . EM HACHURADO É MOSTRADA AS REGIÕES ONDE A TENDÊNCIA DA DENSIDADE É POSITIVA (AZUL) E NEGATIVA (VERMELHA). NA COLUNA DA ESQUERDA SÃO IDENTIFICADAS AS TRÊS REGIÕES CICLOGENÉTICAS NA COSTA LESTE DA AMÉRICA DO SUL (RG1, RG2 E RG3)..51

FIGURA 2.8 - MÉDIA SAZONAL (CORES) E DESVIO-PADRÃO (LINHAS) DA DENSIDADE DA TRAJETÓRIA DE TODOS OS CICLONES IDENTIFICADOS NO VERÃO (COLUNA ESQUERDA) E INVERNO (COLUNA DA DIREITA) NAS DIFERENTES REANÁLISES. A UNIDADE DA FIGURA É $(10^{-3} \text{ CICLONES GRAUS LAT}^{-2})$52

FIGURA 2.9 - MÉDIA SAZONAL (CORES) DA PRESSÃO CENTRAL (HPA) DE TODOS OS CICLONES IDENTIFICADOS NO VERÃO (COLUNA ESQUERDA) E INVERNO (COLUNA DA DIREITA) NAS DIFERENTES REANÁLISE.53

CAPÍTULO 3

FIGURA 3.1 - DOMÍNIO E TOPOGRAFIA (METROS; SOMBREADO) DE SIMULAÇÃO DO REGCM4 (LINHA LARANJA) E ÁREA UTILIZADA NO RASTREAMENTO DOS CICLONES (LINHA AZUL, 15-57°S; 81°-21W).....65

FIGURA 3.2 - FLUXOGRAMAS (A) MOSTRANDO AS ETAPAS PARA A CLASSIFICAÇÃO DOS TIPOS DE CICLONES E (B) DAS TRANSIÇÕES TROPICAIS.....70

FIGURA 3.3 - (A) FREQUÊNCIA ANUAL E (B) CICLO ANUAL DE CICLONES SUBTROPICAIS NO OCEANO ATLÂNTICO SUL ENTRE 1979 E 2005 OBTIDA POR GOZZO ET AL. (2014, LINHA PRETA), DE JESUS ET AL. (2021, LINHA VERDE) E NESTE ESTUDO (LINHA LARANJA..73

FIGURA 3.4 - DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA DOS CICLONES SUBTROPICAIS IDENTIFICADOS NA ERA-INTERIM ENTRE 1979 E 2005 COM BASE NA TSM ($^{\circ}\text{C}$) REGISTRADA (A) NA GÊNESE DESSES SISTEMAS E (B) AO LONGO DE TODO O CICLO DE VIDA...74

FIGURA 3.5 - FREQUÊNCIA ANUAL E O CICLO ANUAL DOS CICLONES (A,B) EXTRATROPICAIS E (C,D) TROPICAIS NO CLIMA PRESENTE (1979-2005) E FUTURO (2020-2050 E 2051-2080). AS REGIÕES SOMBREADAS EM (A, C) INDICAM O INTERVALO ENTRE A MÁXIMA E MÍNIMA FREQUÊNCIA ANUAL ENCONTRADA EM CADA MEMBRO DOS MODELOS.77

FIGURA 3.6 - LOCALIZAÇÃO DAS TT EM CADA PROJEÇÃO CLIMÁTICA DOS (A) MCGS E DO (B) REGCM4.78

FIGURA 3.7 - PARÂMETROS DO CPS E TSM AO LONGO DO CICLO DE VIDA DO CICLONE CATARINA OCORRIDO EM MARÇO DE 2004, DE ACORDO COM REANÁLISE ERA-INTERIM. OS ESTÁGIOS DO CICLO DE VIDA SÃO INDICADOS NA FIGURA.).....79

FIGURA 3.8 - IMAGENS DE SATÉLITE NO CANAL INFRAVERMELHO DURANTE A TT DO CATARINA. OS TEMPOS SINÓTICOS SÃO INDICADOS EM CADA PAINEL COM A HORA SEGUIDA

PELO NÚMERO DO DIA EM MARÇO DE 2004. ADAPTADO DE MCTAGGART-COWAN ET AL. (2006).....80

FIGURA 3.9 - EVOLUÇÃO TEMPORAL DA MÉDIA DOS PARÂMETROS DO CPS DESDE 18 HORAS ANTES (-18 H) DA TRANSIÇÃO TROPICAL (0 H) ATÉ 18 HORAS APÓS (+18H): (A) PARÂMETRO B, (B) PARÂMETRO $-V_T^L$ E (C) PARÂMETRO $-V_T^U$81

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1

TABELA 1.1 - DESCRIÇÃO DOS ÍNDICES CLIMÁTICOS COMPUTADOS.....19

CAPÍTULO 2

TABELA 2.1 - RESUMO DE ESTUDOS, A PARTIR DE 2010, USANDO DIFERENTES REANÁLISES PARA IDENTIFICAR CICLONES E AS TENDÊNCIAS ASSOCIADAS EM DIFERENTES PARTES DO GLOBO. NA TABELA, HS SIGNIFICA HEMISFÉRIO SUL, HN HEMISFÉRIO NORTE, PNMM PRESSÃO AO NÍVEL MÉDIO DO MAR E VORT, VORTICIDADE.....33

TABELA 2.2 - CARACTERÍSTICAS DAS REANÁLISES UTILIZADAS NO ESTUDO..35

TABELA 2.3 - TENDÊNCIA (ÂNGULO DE INCLINAÇÃO DA RETA) DAS SÉRIES DE FREQUÊNCIA ANUAL DE CICLONES EXTRATROPICAIS OBTIDO COM O TESTE DE MANN-KENDALL. VALOR POSITIVO INDICA TENDÊNCIA POSITIVA E NEGATIVO, TENDÊNCIA NEGATIVA. VALORES COM SIGNIFICÂNCIA ESTATÍSTICA AO NÍVEL DE 95% ESTÃO DESTACADOS EM NEGRITO...39

TABELA 2.4 - MÉDIA SAZONAL DA FREQUÊNCIA DE TODOS OS CICLONES IDENTIFICADOS NO HS E OCEANO ATLÂNTICO SUL.....45

TABELA 2.5 - MÉDIA SAZONAL DA FREQUÊNCIA DOS CICLONES QUE ATINGEM $P \leq 980$ HPA EM ALGUM MOMENTO DO CICLO DE VIDA NO HS E OCEANO ATLÂNTICO SUL.....45

CAPÍTULO 3

TABELA 3.1 - LIMIARES DE FLEXIBILIZAÇÃO PARA A CLASSIFICAÇÃO DE CICLONES SUBTROPICAIS.....68

TABELA 3.2 - TENDÊNCIA DA FREQUÊNCIA DE CICLONES EXTRATROPICAIS E TROPICAIS POR DÉCADA CALCULADA COM O TESTE NÃO PARAMÉTRICO DE MAN-KENDALL. TENDÊNCIAS COM SIGNIFICÂNCIA ESTATÍSTICA AO NÍVEL DE 90% SÃO DESTACADAS EM NEGRITO.....74

TABELA 3.3 - NÚMERO DE OCORRÊNCIA DE TT MÉDIO POR DÉCADA. PARA CADA MODELO DE PROJEÇÃO NUMÉRICA NO CLIMA PRESENTE E PERÍODOS FUTUROS.....75

SUMÁRIO

I. INTRODUÇÃO GERAL	15
II. CAPÍTULO 1 - CARACTERÍSTICAS DA PRECIPITAÇÃO NA AMÉRICA DO SUL REVELADAS ATRAVÉS DE ÍNDICES CLIMÁTICOS	17
1.1. INTRODUÇÃO.....	17
1.2. METODOLOGIA.....	19
1.3. RESULTADOS	20
1.4. CONCLUSÕES.....	27
1.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	27
III. CAPÍTULO 2 - CICLONES EXTRATROPICAIS NO HEMISFÉRIO SUL: COMPARAÇÃO ENTRE DIFERENTES REANÁLISES	31
2.1. INTRODUÇÃO.....	31
2.2. METODOLOGIA.....	35
2.2.1. Dados	35
2.2.2. Algoritmo de Identificação e Rastreamento dos Ciclones.....	35
2.2.3. Análises.....	37
2.3 RESULTADOS	38
2.3.1. Frequência anual e Tendências	38
2.3.2. Sazonalidade	45
2.3.3. Outras características climatológicas	47
2.4. CONCLUSÕES.....	53
2.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	55
IV. CAPÍTULO 3 - CICLONES TROPICAIS E TRANSIÇÕES TROPICAIS NO OCEANO ATLÂNTICO SUL PROJETADAS COM O RegCM4 e MCGs	60
3.1. INTRODUÇÃO.....	60
3.2. METODOLOGIA.....	63
3.2.1. Dados	63
3.2.2. Classificação dos Tipos de Ciclones.....	64
3.2.2.1 Rastreamento dos Ciclones	64
3.2.2.2 Estrutura térmica dos Ciclones	65

3.2.2.3 Classificação dos Ciclones.....	67
2.2.3. Análises.....	70
3.3 RESULTADOS	71
3.3.1. Validação do Algoritmo de Classificação dos Tipos de Ciclones	71
2.3.2. Climatologias dos Ciclones Extratropicais, Tropicais e de TT	73
2.3.3. Características das Transições Tropicais	77
3.4. CONCLUSÕES.....	81
3.5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	82
V. CONCLUSÕES GERAIS	86
VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS GERAIS	88

I. INTRODUÇÃO GERAL

Desde o século XIX, o aumento da temperatura média da Terra tem sido associada à maior concentração de gases do efeito estufa, como o CO₂ (Mitchell, 1989). A partir da segunda metade do século XX, aumenta o interesse da comunidade científica com relação às mudanças climáticas com a primeira *World Climate Conference* em Genebra no ano de 1979 e a criação do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) em 1988, tal como o número de trabalhos a fim de entender o processo de mudança do clima e identificar regiões com maior vulnerabilidade e, mais recentemente, ações para adaptação e mitigação de seus impactos (Miller et al., 2018; Berrang-Ford et al., 2019).

Com auxílio de modelos numéricos do sistema climático, tem sido apresentada a influência humana no balanço de energia global e, conseqüentemente, no clima do planeta, uma vez que os relatórios do IPCC (2007, 2013) mostram que o incremento na temperatura média do planeta observado nas últimas décadas não pode ser reproduzido pelos modelos sem considerar o componente antrópico. Os modelos climáticos, tanto globais quanto regionais, são uma poderosa ferramenta para estudos diagnósticos do clima presente e passado, prognósticos para os próximos meses e projeções climáticas para as próximas décadas (Ambrizzi et al., 2018), sendo as projeções feitas com base em cenários que levam em consideração suposições com relação às atividades antrópicas e os efeitos naturais no futuro.

Apesar do *hindcast* dos modelos ser avaliado antes da realização de projeções para o clima futuro, existem várias incertezas associadas a diversos fatores, como por exemplo, a necessidade de esquemas de parametrizações para processos em escala espacial inferior a grade do modelo, o conhecimento incompleto do estado atual da atmosfera que serve como condição inicial para as simulações numéricas, suposições acerca dos cenários futuros etc. (Latif, 2011; Knutti; Sedláček, 2013; Gettelman et al., 2016).

O *The Coupled Model Intercomparison Project Phase 5* (CMIP5) reúne em torno de 40 modelos climáticos globais com simulações que vão do clima passado até o final do século XXI, permitindo reduzir as incertezas por meio da análises de *ensembles* e *spreads* dos diversos modelos e, fornecendo subsídios para os inúmeros estudos que compõem o relatório do IPCC. A partir dos modelos globais do CMIP5 e suas regionalizações, por meio do *downscaling* dinâmico de modelos climáticos regionais, vários estudos vêm sendo desenvolvidos para América do Sul (Torres; Marengo, 2014; Lovino et al., 2018; Reboita et al., 2018; Marengo et al., 2020) e ao redor do mundo (Irving et al., 2012; Wang et al., 2014; Li et al., 2016; Bártok et al., 2017; Kamworapan; Surussavadee, 2019).

Os relatórios do IPCC (2007, 2013) indicam aumento da frequência e intensidade de eventos extremos (por exemplo secas, ondas de calor e de frio, enchentes, deslizamentos, tempestades etc.) que podem ter relação direta com as alterações do clima. Com ênfase na América do Sul, em 2004, a costa do Brasil foi afetada pelo primeiro furacão registrado no Atlântico Sul (McTaggart-Cowan et al., 2006; Iwabe et al., 2011) e, em 2019 foi observado o primeiro ciclone com gênese tropical pura (Reboita et al., 2021). Também são observados registros de eventos de seca no sudeste do Brasil, em 2001 e 2014 (Coelho et al., 2015) e secas na Amazônia em 1997/1998, 2005 e 2010 (Marengo et al., 2008, 2011), entre outros. Tais eventos causam diversos danos socioeconômicos, uma vez que impactam diretamente no setor energético, agrícola, disponibilidade hídrica e estarem associados a eventos extremos como enchentes, ventos intensos e deslizamentos de terra (PBMC, 2016).

Um exemplo desses impactos foi o caso do furacão Catarina, que causou prejuízos superiores à 425 milhões de dólares (McTaggart-Cowan et al., 2006).

Em vista disso, é de suma importância entender como as mudanças no clima afetam a frequência e intensidade dos eventos meteorológicos que impactam diretamente a sociedade podendo causar diversas perdas socioeconômicas. Assim, o presente estudo tem como objetivo geral fornecer um panorama das tendências na precipitação sobre a América do Sul e de ciclones no Atlântico Sul. Já os objetivos específicos são:

- identificar as tendências de eventos extremos de precipitação na América do Sul no clima presente ;
- comparar a climatologia de ciclones extratropicais em 6 reanálises, sendo duas centenárias ;
- apresentar as mudanças projetadas para os ciclones extratropicais, tropicais e de transição tropical.

Ressalta-se que os objetivos específicos nem sempre estão interconectados. Por exemplo, não está sendo avaliado o impacto da precipitação causada pelos ciclones na costa, para maiores detalhes sobre esse tema consultar Reboita et al. (2020). Essa dissertação está dividida em 3 capítulos, que apresentam a climatologia e as tendências para precipitação e atividade ciclônica na América do Sul e oceano Atlântico Sul, em que:

- O capítulo I descreve as características da precipitação a partir de dados provenientes do CPC e considerando índices de extremos propostos pelo *Expert Team on Climate Change Detection and Indices* (ETCCDI), para o período de 1979 a 2019;
- O capítulo II apresenta as características da atividade ciclônica, independente do tipo de gênese, para o Atlântico Sul, considerando 6 diferentes reanálises provenientes do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) e do *National Centre for Environmental Prediction* (NCEP)
- No capítulo III, são classificados o tipo de ciclogêneses e os identificados os caoss de Transição Tropical (TT) para os períodos de 1979-2005, 2020-2050 e 2051-2080, para isso são utilizados dados provenientes de projeções climáticas de modelos globais provenientes do CMIP5 e, suas regionalizações. Para classificação dos ciclones e identificação das TT são considerados os 3 parâmetros que provenientes do *Cyclone Phase Space* (CPS).

II . CAPÍTULO 1 - CARACTERÍSTICAS DA PRECIPITAÇÃO NA AMÉRICA DO SUL REVELADAS ATRAVÉS DE ÍNDICES CLIMÁTICOS *

*Artigo publicado na Revista Brasileira de climatologia, disponível em: <https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/72181/40775>

1.1 INTRODUÇÃO

O ciclo hidrológico é de extrema importância tanto para o sistema climático quanto para a sociedade. Por exemplo, a distribuição sazonal da precipitação influencia diretamente atividades como a agricultura e seu excesso ou déficit pode causar inundações ou secas e consequências negativas para muitas culturas. Como a simples quantificação da precipitação pode esconder aspectos relevantes do ciclo hidrológico (Giorgi et al., 2014), têm sido elaborados índices considerados como padrões para estudos climáticos que detectam diferentes características da precipitação, como os eventos extremos, que podem ser definidos como eventos que são tão raros quanto o 10º e 90º percentis da distribuição de probabilidades da variável analisada (Zhang et al., 2011). Estes eventos estão associados a por exemplo, casos de chuva intensa, longos períodos úmidos e secos, ondas de frio e calor, etc. O *Expert Team on Climate Change Detection and Indices* (ETCCDI; <http://etccdi.pacificclimate.org/>) desenvolveu 27 índices, que caracterizam eventos climáticos extremos, a fim de facilitar a caracterização da variabilidade e mudanças no clima e a intercomparação dos resultados quando os índices são calculados com diferentes conjuntos de dados e/ou em regiões distintas do globo. Muitos desses índices focam-se na precipitação.

Mudanças nos padrões da precipitação ocorrem de maneiras distintas como, por exemplo, alterações na duração e intensidade de períodos chuvosos (Song et al., 2011), e o uso de índices, como os desenvolvidos pelo ETCCDI, é um consenso para identificação e atribuição desses eventos extremos (Sillmann et al., 2013a-b).

A frequência, magnitude e duração dos eventos extremos chuvosos têm aumentado em décadas recentes em diversas regiões do globo e são projetados a aumentar no futuro (IPCC, 2013). Turco et al. (2015) mostram que as diferenças observadas na precipitação média anual entre 1981-2010 e 1951-1980 não possuem mesmo sinal em todo o globo, sendo que na América do Sul (AS) há diferença positiva em grande parte da bacia do Prata (formada pelo nordeste da Argentina, sul do Paraguai, Uruguai e centro-sul do Brasil) no verão e diferença negativa, em alguns setores dessa bacia, no inverno. Nessa mesma estação do ano, predomina sinal negativo em quase todo o continente sul-americano. Skansi et al. (2013) realizaram uma análise anual considerando o período de 1950 a 2010 para a precipitação total e para o máximo número de dias consecutivo secos (CDD) na AS. Aumento da tendência do total

anual de precipitação é claro na região da bacia do Prata e com oscilação de sinal no sudeste do Brasil. Com relação ao CDD, ao norte de 30°S predomina tendência positiva. Soares et al. (2016) mostram a tendência do total sazonal da precipitação na AS no período de 1955 a 2004. Em todas as estações do ano, exceto no inverno, predomina tendência positiva de precipitação na bacia do Prata e negativa na Amazônia. Grande parte do centro-oeste e sudeste do Brasil também apresentam tendência negativa, exceto no inverno.

Sobre o Brasil, Salviano et al. (2016) determinaram a tendência da precipitação mensal no período de 1961 a 2011. Entre julho a setembro predominam tendências negativas no oeste do Estado do Amazonas e no Acre. Já em dezembro e março, há tendência positiva no Estado de Minas Gerais. Também em Minas Gerais, Silva (2013) obteve, no verão (DJF), predomínio de tendências positivas e estatisticamente significativas de extremos chuvosos acima do percentil de 90%. Resultado similar foi obtido por Reis et al. (2018) que analisaram o período de outubro a março e o percentil de 95%. Considerando estudos mais regionais, na região metropolitana de São Paulo (Marengo et al., 2013; 2020; Obregon et al., 2014) observaram um aumento na precipitação sazonal e anual e na frequência e intensidade dos eventos extremos de chuva.

Enquanto as tendências observadas na temperatura sobre o globo mostram um sinal claro de aumento e em todas as estações do ano, isso não ocorre com a precipitação (IPCC, 2013) e, conseqüentemente, com o ciclo hidrológico. Sabe-se que uma atmosfera mais quente implica em maior pressão de vapor de saturação (como descreve a equação de Clausius-Clapeyron) e, conseqüentemente, em mais vapor no ar (Palazzi e Provenzale, 2016). Como o vapor d'água é um gás de efeito estufa, contribui para aumentar ainda mais a temperatura do ar e gera um efeito positivo de retroalimentação: aumenta a temperatura, aumenta a evaporação. Isso deveria contribuir para o aumento de chuva sobre toda a superfície do globo. Entretanto, a atmosfera não é estática e os ventos, por exemplo, contribuem para o transporte de umidade de uma região a outra. Fato que pode explicar, em parte, porque a precipitação não aumenta em todo o globo da mesma forma que ocorre em relação à temperatura.

Uma maneira de detectar a intensidade do ciclo hidrológico sobre as diferentes porções do globo é através do índice de intensidade hidroclimática (*hydroclimatic intensity* - HY-INT; Giorgi et al., 2011). Esse índice integra métricas da intensidade da precipitação com a duração dos períodos secos: $HY-INT = INT \times DSL$, onde INT é a média da intensidade da precipitação (total da precipitação num dado período dividido pelo número de dias com chuva) e DSL é a média da duração (em dias) dos períodos secos. Portanto, se o HY-INT for calculado para um período longo, fornecerá um valor médio das características hidroclimáticas de uma região e permitirá identificar estações ou anos anômalos. Como em

grande parte da AS a estação chuvosa ocorre principalmente no verão, é de interesse o cálculo do HY-INT para esse período.

Como na AS há maior número de estudos locais/regionais e muito poucos que trazem uma visão em escala continental das características da precipitação em termos de índices climáticos. O objetivo deste estudo é sintetizar as tendências para os índices extremos de precipitação para toda América do Sul. Com as análises que são apresentadas, é possível identificar as tendências para as mudanças no clima da AS.

1.2 METODOLOGIA

Nesse estudo são utilizadas as análises de precipitação diária do *Climate Prediction Center* (CPC, <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.cpc.globalprecip.html>) no período de 1979 a 2019. Esses dados cobrem o globo com resolução horizontal de 0,5° e são gerados através da interpolação de informações medidas por pluviômetros (Chen et al., 2008).

Os índices climáticos apresentados (**Tabela 1.1**) focam nas características da variável precipitação e são calculados para as estações do ano (verão: DJF, outono: MAM, inverno: JJA e primavera: SON) e para o período anual; exceto o HY-INT, que é computado apenas para o verão. Como o período de estudo é de 1979 a 2019, há 41 estações do ano (por exemplo, 41 verões). Então a precipitação diária, dentro de cada uma das 41 estações, é utilizada no cálculo dos índices (**Tabela 1.1**), o que fornece uma série temporal para cada índice.

Tabela 1.1 - Descrição dos índices climáticos computados durante o estudo.

Sigla	Nome do Índice	Definição do Índice	Unidade	Período que é aplicado
PRCTOT	Total de precipitação	Acumulado de precipitação	mm	Sazonal Anual
R95p	Percentil de 95%	Pr é a precipitação diária de um dia úmido ($Pr \geq 1$ mm). Considere um determinado período, inicialmente são selecionados os dias com $Pr \geq 1$ mm. Após, é computado o percentil de 95% e, na sequência, pode ser identificado o número de dias com Pr acima do valor do percentil. Com isso, obtêm-se a intensidade e frequência dos eventos extremos	mm	Sazonal Anual
RX5day	Precipitação máxima em 5 dias	Máximo valor do total de precipitação(acumulado) dentro de um intervalo de 5 dias consecutivos. O intervalo de 5 dias é móvel* (ex., soma do dia 1 a 5, 2 a 6 etc.). De	mm	Sazonal Anual

		acordo com Frich et al. (2002), esse índice é usado para descrever mudanças no risco de inundações devido a condições de chuva forte numa sequência de dias. * https://www.rdocumentation.org/packages/climdex.pcic/versions/0.7-4/topics/climdex.rx5day%2C%20climdex.rx1day		
CDD	Dias secos consecutivos	Maior número de dias consecutivos com Pr < 1 mm. De acordo com Sillmann et al. (2013b), esse índice é um indicador de secas.	dias	Sazonal Anual
CWD	Dias úmidos consecutivos	Maior número de dias consecutivos com Pr ≥ 1 mm.	dias	Sazonal Anual
HY-INT	Intensidade hidroclimática	Integra métricas da intensidade da precipitação com a da duração dos períodos secos.	adimensional	Verão

A média da série temporal de cada índice é apresentada em mapa e, sobre ela, as regiões com tendência positiva do índice e estatisticamente significativa (cor azul) são indicadas com hachurado. O mesmo é feito para a tendência negativa (cor vermelha). A tendência é calculada com o método de regressão linear simples, enquanto a significância estatística, com o teste t de Student (Stevenson, 2001) e considerando $\alpha = 0,05$ (confiança de 95%).

Como os índices climáticos do ETCCDI são amplamente descritos na literatura, aqui só é apresentada em detalhes a metodologia do HY-INT (Giorgi et al., 2011). As etapas para obtenção desse índice são:

- define-se o período de estudo. Por exemplo, 1979 a 2019. Assim, $i=1979\dots2019$, o subíndice 'i' indica que é utilizado o valor anual de determinada variável
- definir se a análise será anual ou sazonal (DJF, MAM, JJA e SON)
- calcular a média da precipitação dos dias úmidos (precipitação diária > 1 mm) para cada estação ou ano do período de estudo (no caso em estudo se tem uma série de 41 dados)
- calcular a média climatológica do item (c): \underline{INT}
- identificar a duração de cada período seco consecutivo dentro da estação ou ano e calcular a média (no caso em estudo se tem uma série de 41 dados)
- calcular a média climatológica do item (e): \underline{DSL}
- $HY - INT_i = \frac{INT_i}{INT} \frac{DSL_i}{DSL}$. Esse índice tem valores positivos e é adimensional.

1.3 RESULTADOS

A **Figura 1.1** mostra a climatologia do total sazonal e anual da precipitação na AS. Os maiores volumes de chuva ocorrem entre a Amazônia e o sudeste do Brasil (região da Zona de Convergência do Atlântico Sul - ZCAS) no verão (**Figura 1.1b**) e decrescem até serem expressivos somente no extremo norte da AS e sul do Brasil no inverno (**Figura 1.1d**). Na primavera, os totais de precipitação voltam a aumentar. A variabilidade sazonal da precipitação ao norte de 25°S está associada ao sistema de monção da América do Sul (Reboita et al., 2010; Marengo et al., 2012; Ashfaq et al., 2020). Como aqui o objetivo não é explicar as causas da variabilidade sazonal e espacial da precipitação, deixa-se como referência sobre o assunto o estudo de Reboita et al. (2010). Em termos de tendência dos volumes de precipitação (**Figura 1.1**), na maior parte da AS há tendência negativa e estatisticamente significativa (hachurado vermelho), o que indica que os volumes de precipitação sazonal e anual estão diminuindo ao longo dos anos. Resultado que concorda com estudos regionalizados, como o de Debortoli et al. (2015), que mostram o decréscimo nos totais de precipitação durante a estação chuvosa no sul do Amazonas e nos Estados de Mato Grosso e Rondônia. Tendências positivas (hachurado azul) considerando o período anual ocorrem no noroeste da AS e em parte da bacia do Prata; sazonalmente as tendências seguem o padrão da anual, mas com menores áreas com significância estatística no inverno. Esses resultados se assemelham aos de Soares et al. (2016), que analisaram a AS no período de 1955 a 2004, Araújo e Brito (2011) para o Estado da Bahia e Ávila et al. (2019) para os Andes colombianos.

O padrão espacial do maior volume de precipitação acumulado em 5 dias em termos sazonais e anual (**Figura 1.2**) é muito similar ao da climatologia da precipitação total (**Figura 1.1**). No verão, na região da ZCAS, os valores máximos apresentam tendência negativa e significativa. Nas demais estações, na mesma região da ZCAS, também há sinais de tendência negativa, bem como no norte da AS (**Figura 1.2**). Esses sinais da tendência se assemelham aos do estudo de Skansi et al. (2013). Por outro lado, numa escala mais regional, Santos et al. (2012) mostraram tendência positiva do acumulado de chuva em 5 dias em Manaus no período de 1971 a 2007. Resultado que também é obtido na **Figura 1.2a**.

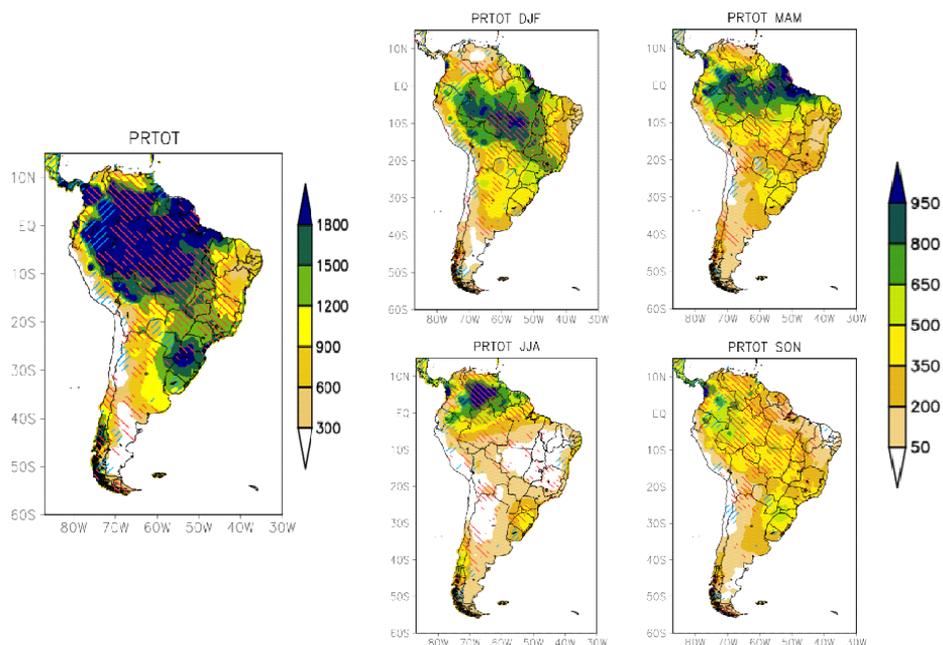


Figura 1.1 - Média anual e sazonal do total da precipitação (mm) no período de 1979 a 2019 e regiões com tendência positiva (azul) e negativa (vermelho) da precipitação com significância estatística ($\alpha=0.05$) destacada em hachurado.

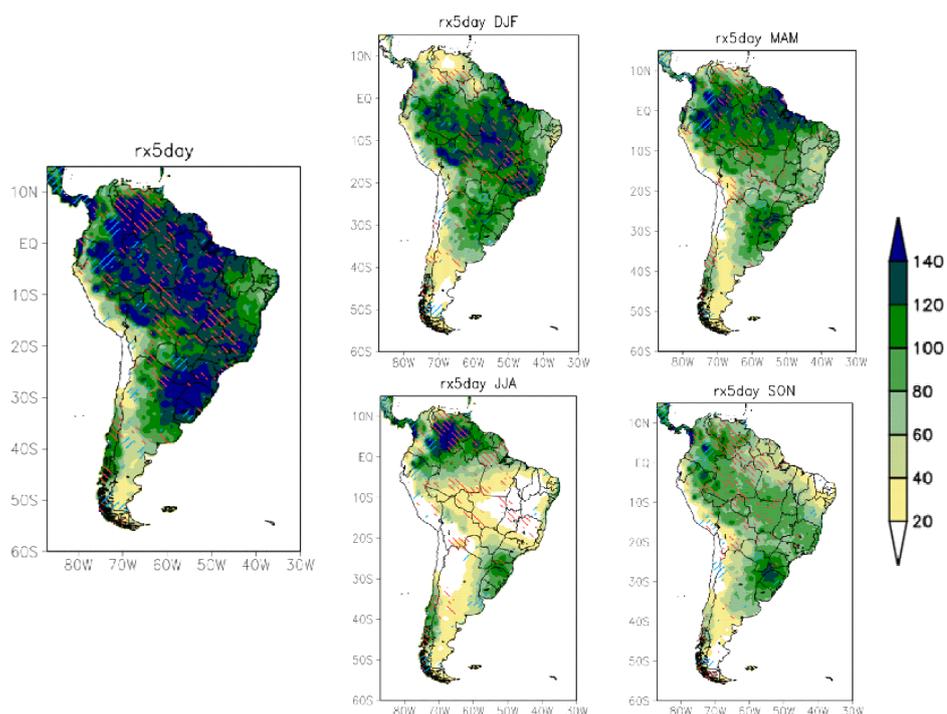


Figura 1.2 - Média anual e sazonal do maior acumulado de precipitação em 5 dias consecutivos (mm 5dias⁻¹) no período de 1979 a 2019 e regiões com tendência positiva (azul) e negativa (vermelho) com significância estatística ($\alpha=0.05$).

Associado ao decréscimo dos totais sazonais e anual da precipitação (**Figura 1.1**) também há, em quase todo o continente sul americano, tendência negativa significativa da ocorrência de dias úmidos consecutivos (**Figura 1.3**) e tendência positiva significativa da

ocorrência de dias secos consecutivos (**Figura 1.4**), mas esta se concentrando na região da ZCAS no verão e primavera. As informações apresentadas nas **Figuras 1.3** e **1.4** são obtidas da seguinte forma: em cada ano (estação) é identificada a maior sequência de dias consecutivos úmidos (precipitação diária maior ou igual a 1 mm) e secos (precipitação diária menor do que 1 mm); com isso é obtida uma série temporal sobre a qual é calculada a sua média e tendência. Em termos de valores médios, no verão e outono, a maior sequência de dias úmidos ocorre entre o litoral do Pará e Amapá (mais de 28 dias) - (**Figura 1.3b-c**). No verão, na região da ZCAS também ocorrem períodos com duração média entre 21-28 dias. No inverno, a sequência de dias úmidos decresce na maior parte do continente, sendo os maiores períodos encontrados no extremo norte da AS (**Figura 1.3d**). Embora predomine tendência negativa na duração da sequência de dias chuvosos (isso é, menos dias chuvosos) sobre o continente, no centro da Colômbia, sul do Peru e no Paraguai predominam tendências positivas ao longo do ano (**Figura 1.3**).

A média da sequência de dias secos é maior no inverno (mais do que 50 dias consecutivos) e ocorre sobre as regiões centro-oeste, sudeste e nordeste do Brasil, ao longo dos Andes e no centro norte da Argentina (**Figura 1.4d**). Na primavera, o número de dias secos consecutivos decresce e os maiores valores são registrados na região nordeste do Brasil e nos Andes (**Figura 1.4e**). No verão, entre as latitudes de 30°S e o equador, a sequência de dias secos é menor do que 10 dias. Em termos de tendência, no centro da Colômbia e sul do Peru, regiões onde o número de dias úmidos consecutivos mostraram tendência de aumento, também são locais de tendência significativa da redução do número de dias secos consecutivos. Tendência positiva da sequência de dias secos ocorre na região da ZCAS no verão e primavera, oeste da Amazônia no outono e norte da AS no inverno (**Figura 1.4**). Esses resultados concordam com os de Skansi et al. (2013). Além disso, a **Figura 1.4** mostra que na Bahia há estações do ano com tendência de aumento do número de dias secos consecutivos e a **Figura 1.3** que há tendência de decréscimo dos dias úmidos consecutivos, o que concorda com Araújo e Brito (2011). Esses sinais da tendência também são obtidos no Estado do Pará, concordando com Santos e Oliveira (2017), e em grande parte das regiões norte e nordeste do Brasil, de forma similar ao estudo de da Silva et al. (2018).

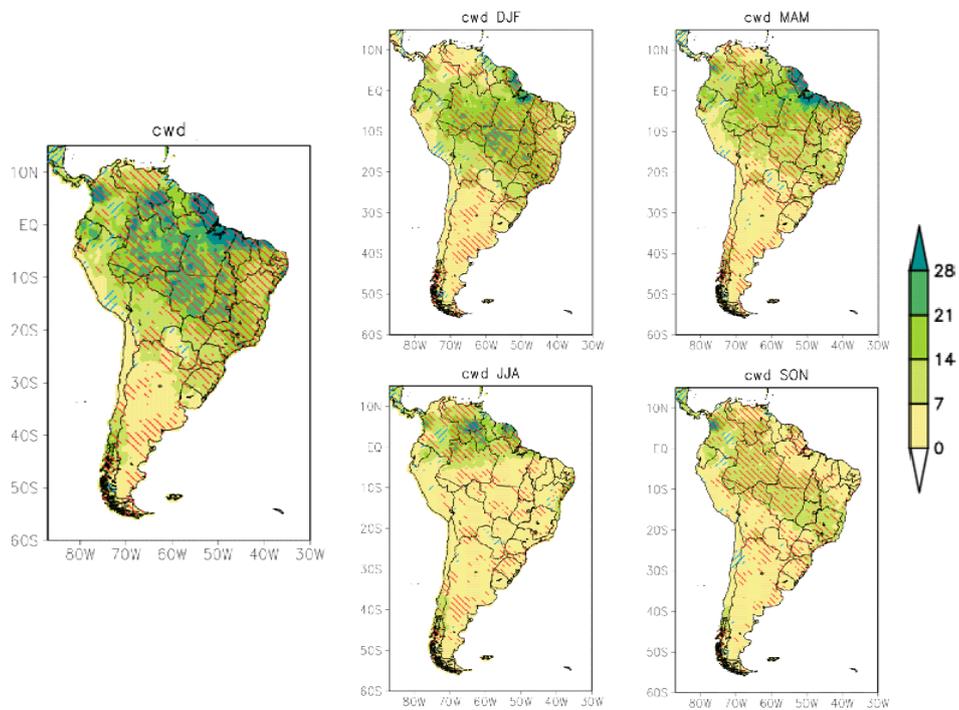


Figura 1.3 - Similar à **Figura 1.2**, mas para os dias consecutivos úmido (dias).

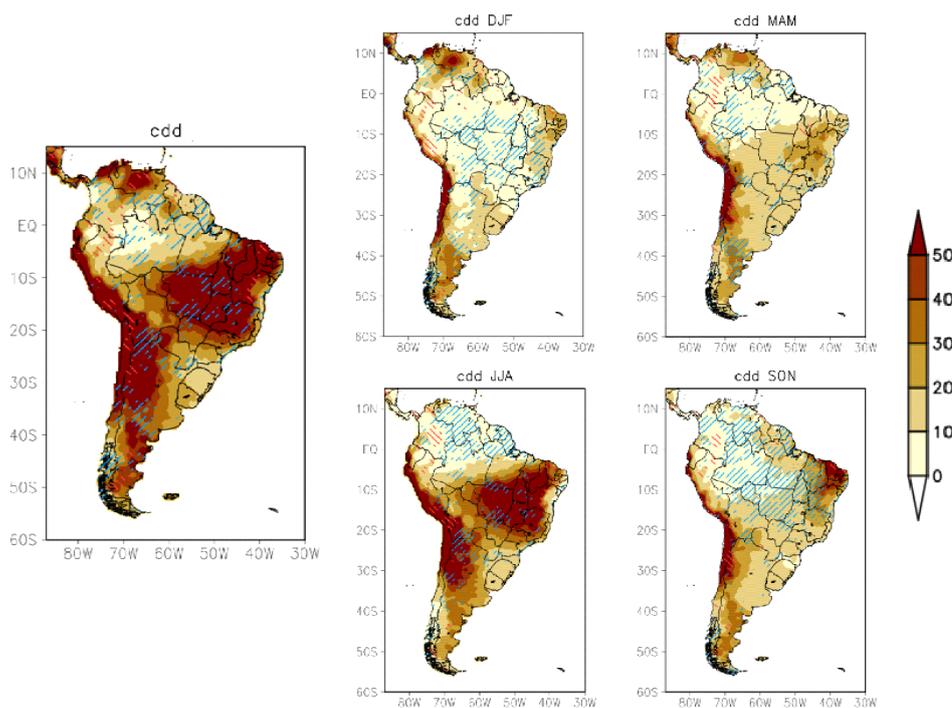


Figura 1.4 - Similar à **Figura 1.2**, mas para os dias consecutivos secos (dias).

Uma maneira de identificar eventos extremos de chuva diária é através do cômputo de percentis em uma dada série temporal. Para a elaboração da **Figura 1.5**, o percentil de 95% foi identificado em cada período de verão, formando uma série temporal de 41 tempos (o mesmo foi realizado para as demais estações do ano e para o período anual). Na figura é

mostrada a média do percentil no período de 1979 a 2019 e a tendência dos acumulados de chuva identificados pelo percentil. Embora a região da ZCAS mostre precipitação de 35 a 55 mm como percentil de 95% no verão, os maiores limiares são obtidos na região da bacia do Prata, sendo superiores a 55 mm (**Figura 1.5b**). No outono, os elevados valores do percentil de 95% cobrem a maior área da bacia do Prata, comparados às demais estações do ano. Já, no inverno, há redução dos valores na maior parte do continente e os máximos ocorrem no norte da AS. Solman e Blázquez (2019) determinaram o percentil de 95% para a precipitação na AS com os mesmos dados utilizados no presente estudo (CPC), mas no período de outubro a março de 1979-2005. Embora, se tenha diferenças em período e definição de estação, ambos os estudos mostram o mesmo padrão espacial do percentil de 95% e com similaridades nos valores (é importante lembrar que a **Figura 1.5** mostra a média do percentil obtido em cada ano).

Em grande parte da AS, predomina tendência positiva e significativa do percentil de 95%, o que indica que os totais de chuva considerados como eventos extremos estão aumentando ao longo do período analisado. Resultados similares foram obtidos por Marengo et al. (2009) no período de 1961 a 1990. Em estudos mais regionalizados, Santos et al. (2012) identificaram tendência positiva do percentil de 95% em Manaus, o que também é registrado na **Figura 1.5**. Já o norte do Pará (**Figura 1.5**) mostra tendência negativa do percentil de 95% concordando com o estudo de Santos e Oliveira (2017). Em alguns setores da região da ZCAS, como entre o sul do Tocantins, norte de Goiás e noroeste de Minas Gerais, também há tendência negativa do percentil de 95%. No centro-sul do Brasil, são registradas tendências positivas e que estão em acordo com os estudos de em Zilli et al. (2016) e Zandonadi et al. (2015). Com relação ao Estado de São Paulo, há predomínio de tendência positiva significativa no sul do Estado (**Figura 1.5**). Embora tal registro não apareça tanto na capital paulista (talvez devido à escala do mapa), Marengo et al. (2020) mostra aumento dos limiares de chuva considerados extremos.

A informação do percentil médio, mostrado em colorido na **Figura 1.5**, foi utilizada como limiar para identificar os dias em que o acumulado diário de chuva é superior ao do percentil. Isso foi realizado para cada estação do ano e período anual, obtendo para cada uma série temporal de 41 tempos. Dessa forma, a média do número de dias considerados como dias de eventos extremos e a tendência são apresentados na **Figura 1.6**.

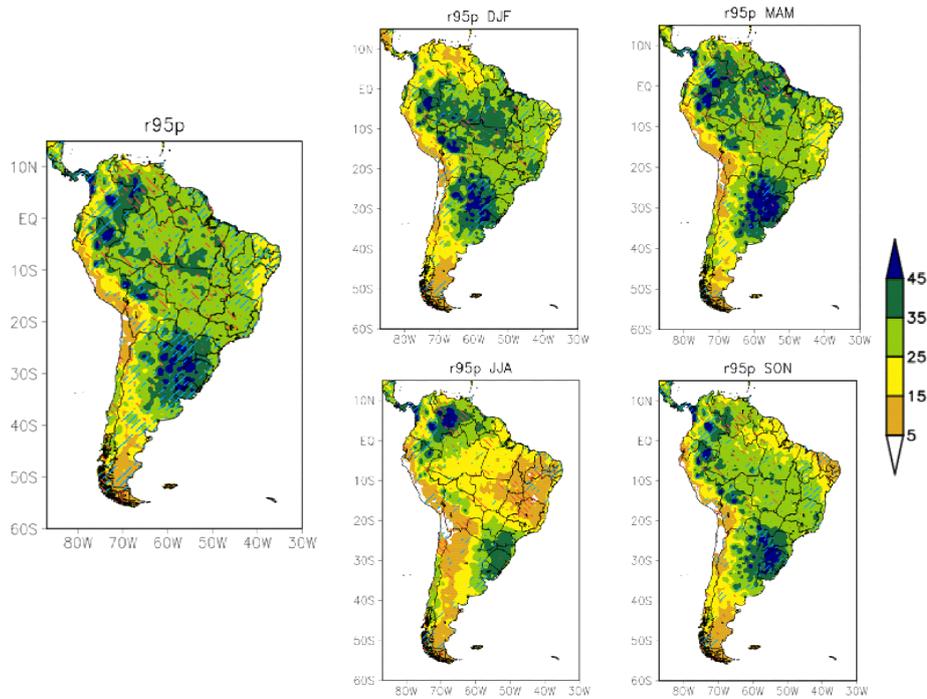


Figura 1.5 - Similar à **Figura 1.2**, mas para o percentil de 95% (mm dia⁻¹).

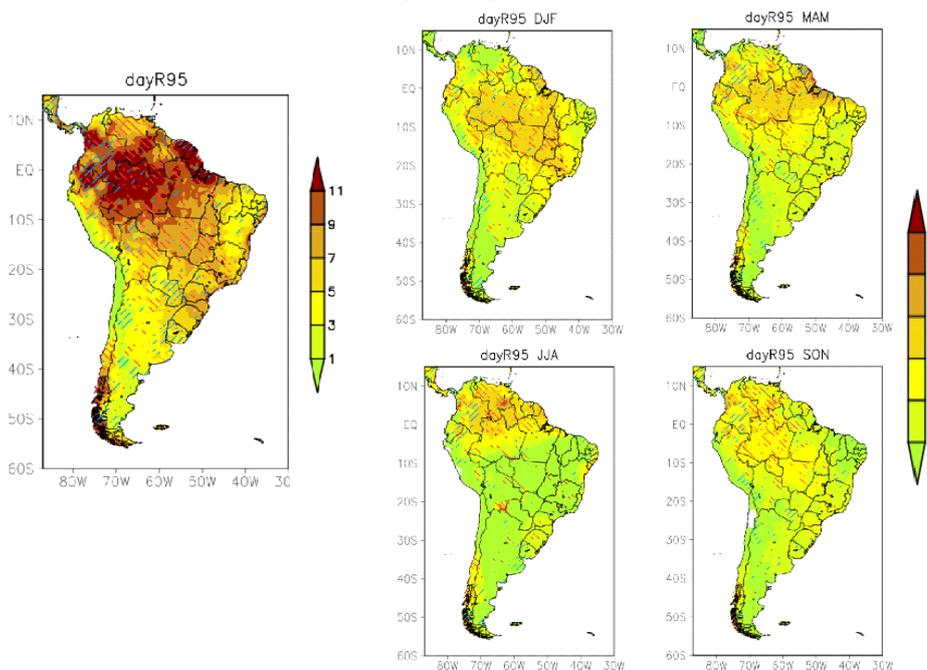


Figura 1.6 - Similar à **Figura 1.2**, mas para o número de dias com precipitação maior do que a do percentil de 95% (dias).

O padrão espacial da média dos dias considerados eventos extremos se assemelha ao padrão da climatologia do total de precipitação (**Figura 1.1**), indicando que os extremos ocorrem nos locais onde em determinada época do ano é esperado valores elevados de precipitação. De forma geral, o sinal da tendência dos dias considerados eventos extremos chuvosos corresponde ao da tendência do percentil de 95% (**Figura 1.5**). Algumas regiões com tendência positiva são: noroeste da AS, Paraguai, Uruguai e litoral do nordeste do Brasil.

No verão, há sinais de tendência positiva na Amazônia, sul do Brasil e São Paulo (**Figura 1.6b**).

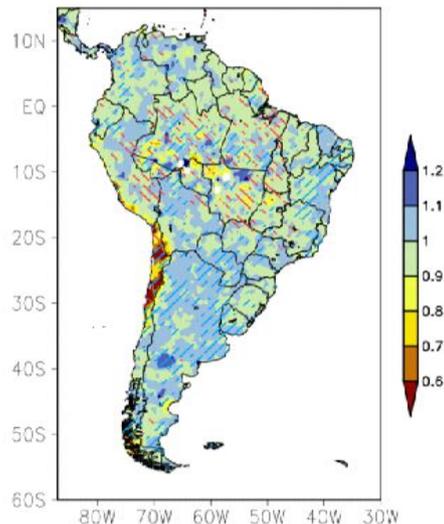


Figura 1.7 - HY-INT calculado para o verão. Regiões com tendência positiva estão destacadas com hachurado azul, e negativa, com hachurado vermelho.

Considerando que o verão é a estação mais chuvosa na maior parte da AS, calculou-se para esta estação do ano o HY-INT (**Figura 1.7**). No Brasil, os menores valores desse índice são encontrados nas regiões norte e centro-oeste do país e em parte da região sudeste, entre os Estados de Minas Gerais e São Paulo, o que indica uma redução de disponibilidade de água no ciclo hidrológico e, nessas mesmas regiões, há tendência negativa do índice. Ao sul de 25°S, o índice mostra maiores valores e com tendência positiva. A interpretação do índice pode ser feita da seguinte forma: na região da ZCAS, por exemplo, os outros índices calculados indicaram decréscimo dos totais sazonais e anual de chuva, redução dos dias úmidos consecutivos e aumento dos dias secos consecutivos, o que gera um valor baixo para o HY-INT. Por outro lado, ao sul de 25°S, foram registradas menores áreas com tendências significativas: não há muitas áreas com tendência significativa nos totais sazonais e anual de precipitação, nem de dias consecutivos úmidos e secos, mas há um aumento no limiar do percentil de 95% e, em alguns setores, até tendência positiva do aumento de dias com extremos chuvosos. Portanto, essas características levam a maior disponibilidade de água no ciclo hidrológico.

1.4 CONCLUSÕES

Este estudo fornece uma visão em escala continental das características da precipitação, no período de 1979 a 2019, reveladas através de índices climáticos. De maneira

geral, há tendência com significância estatística do decréscimo dos totais sazonais e anual da precipitação, dos acumulados de 5 dias e de dias úmidos consecutivos e do aumento dos dias secos consecutivos no norte da AS e na região da ZCAS. Já na região da bacia da Prata há tendências mais expressivas no aumento do percentil de 95% e no número de eventos que ultrapassam esse limiar.

Os resultados obtidos deixam evidente que há redução da distribuição temporal da chuva, sendo os eventos de precipitação mais concentrados. Por exemplo, o número de dias consecutivos secos está aumentando e o de dias consecutivos úmidos diminuindo, enquanto o limiar de chuva considerado extremo está aumentando. Isso pode causar grandes problemas sociais como inundações, alagamentos e deslizamento de terras.

1.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, W.S.; BRITO, J.I.B. Indices of trends of climatic changes for the states of the Bahia and Sergipe by means of daily precipitation indices and its relation with SST's of the Pacific and Atlantic. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 26(4):541-554, 2011.

ÁLVARO, A.; GUERRERO, F. C.; ESCOBAR, Y.C. ; JUSTINO, F. Recent Precipitation Trends and Floods in the Colombian Andes. *Water*, 11(2), 379 - 401, 2019.

ASHFAQ, M.; CAVAZOS, T.; REBOITA, M.S.; TORRES-ALAVEZ, J.A.; IM, E. ; OLUSEGUN, C. F.; ALVES, L.; KEY, K.; ADENIYI, M.O.; TALL, M.; SYLLA, M.B.; MEHMOOD, S.; ZAFAR, Q.; DAS, S.; DIALLO, I.; COPPOLA, E.; GIORGI, F. Robust Late 21st Century Shift in Regional Monsoons in RegCM-CORDEX Simulations. Submetido ao *Climate Dynamics*, 2020.

CHEN, M.; SHI, W.; XIE, P.; SILVA, V.B.S.; KOUSKY, V.E.; HIGGINS, R.W.; JANOWIAK, J.E. Assessing objective techniques for gauge-based analyses of global daily precipitation. *Journal of Geophysical Research*, 113(D4): 1-13, 2008.

DA SILVA, P.E.; SILVA, C. M. S.; SPYRIDES, M. H. C.; ANDRADE, L.M.B. Precipitation and air temperature extremes in the Amazon and northeast Brazil. *International Journal of Climatology*, 39(2): 579-595, 2019.

DEBORTOLI, N. S.; DUBREUIL, V.; FUNATSU, B.; DELAHAYE, F.; OLIVEIRA, C. H.; RODRIGUES-FILHO, S.; SAITO, C. H.; FETTER, R. Rainfall patterns in the Southern Amazon: a chronological perspective (1971 - 2010). *Climatic Change*, 132(2): 251-264, 2015.

FRICH, P.; ALEXANDER, L.; DELLA-MARTA, P.; GLEASON, B.; HAYLOCK, M.; KLEIN TANK, A.; Peterson, T. Observed coherent changes in climate extremes during the second half of the twentieth century. *Climate Research*, 19: 193–212, 2002.

GIORGI, F.; COPPOLA, E.; RAFFAELE, F. A consistent picture of the hydroclimatic response to global warming from multiple indices: Models and observations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 119(20): 695-708, 2014.

GIORGI, F.; IM, E.-S.; COPPOLA, E.; DIFFENBAUGH, N.S.; GAO, X.J.; MARIOTTI, L.; SHI, Y. Higher Hydroclimatic Intensity with Global Warming. *Journal of Climate*, 24(20): 5309-5324, 2011.

IPCC, 2013: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp, doi:10.1017/CBO9781107415324.

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M.; AMBRIZZI, T.; YOUNG, A.; BARRETO, N. J. C.; RAMOS A. M. Trends in extreme rainfall and hydrogeometeorological disasters in the Metropolitan Area of São Paulo: a review. *Annals of the New York Academy of Sciences*, Special Issue, 2020.

MARENGO, J. A.; JONES, R.; ALVES, L. M.; VALVERDE, M. C. Future change of temperature and precipitation extremes in South America as derived from the PRECIS regional climate modeling system. *International Journal of Climatology*, 29(15): 2241-2255, 2009.

MARENGO, J. A.; LIEBMANN, B.; GRIMM, A. M.; MISRA, V.; DIAS, P. L. S.; CAVALCANTI, I. F. A.; CARVALHO, L. M. V.; BERBERY, E. H.; AMBRIZZI, T.; VERA, C.; SAULO, C.; NOGUES-PAUGLE, J.; ZIPSER, E.; SETH, A.; ALVES, L. M. Review recent developments on the South American monsoon system. *International Journal of Climatology*, v. 32, p. 1-21, 2012.

MARENGO, J., OBREGON, G., RAMIREZ, V. Observed and projected changes in rainfall extremes in the Metropolitan Area of São Paulo. *Climate Research*, 57(1): 61-72, 2013.
Obregon, G.O.; Marengo, J.A.; Nobre, C.A. Rainfall and climate variability: long-term trends in the METropolitan Area of São Paulo in the 20th century. *Climate research*, 61: 93-1071, 2014.

PALAZZI, E.; PROVENZALE, A. Water in the climate system. In: Provenzale, A.; Palazzi, E.; Fraedrich, K. (eds) *The Fluid Dynamics of Climate*. CISM International Centre for Mechanical Sciences, vol 564. Springer, Vienna, 2016.

REBOITA, M. S.; GAN, M. A.; DA ROCHA, R. P.; AMBRIZZI, T. Regimes de Precipitação na América do Sul: Uma Revisão Bibliográfica. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 25:185-204, 2010.

REIS, A. L., SILVA, M. S.; REGIS, M. V.; SILVEIRA, W. W.; SOUZA, A. C.; REBOITA, M. S.; CARVALHO, V. S. B. Climatology and extreme rainfall events in the state of Minas Gerais. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 11(2):652-660, 2018.

SALVIANO, M. F.; GROppo, J. D.; PELLEGRINO, G. Q. Análise de Tendências em Dados de Precipitação e Temperatura no Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 31(1):64-73, 2016.

SANTOS, C. A. C. D., SATYAMURTY, P.; SANTOS, E. M. D. Tendências de índices de extremos climáticos para a região de Manaus-AM. *Acta Amazonica*, 42(3): 329-336, 2012.

SANTOS, C. A.; OLIVEIRA, V. G. Trends in Extreme Climate Indices for Pará State, Brazil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 32(1): 13-24, 2017.

SILVA, E. D. *Estudo da precipitação no estado de Minas Gerais – MG*. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e recursos Hídricos) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 70f. 2013.

SILLMANN, J.; KHARIN, V. V.; ZHANG, X.; ZWIERS, F. W.; BRONAUGH, D. Climate extremes indices in the CMIP5 multimodel ensemble: Part 1. Model evaluation in the present climate. *Journal of Geophysical Research*, 118: 1-18, 2013a.

SILLMANN, J.; KHARIN, V. V.; ZWIERS, F. W.; ZHANG, X.; BRONAUGH, D. Climate extremes indices in the CMIP5 multi-model ensemble. Part 2: Future climate projections. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118 (6) :2473-2493, 2013b.

SKANSI, M. D. L. M.; BRUNET, M.; SIGRÓ, J.; AGUILAR, E.; ANDRÉS, J.; GROENING, A.; BENTACUR, O. J.; ROSA, Y.; GEIER, C.; LEONOR, R.; AMAYA, C.; JÁCOME, H.; MALHEIROS, A.; ORIA, C.; MAX, A.; SALLONS, S.; VILLAROEL, C.; MARTÍNEZ, R.; ALEXANDER, L. V.; JONES, P. D. Warming and wetting signals emerging from analysis of changes in climate extreme indices over South America. *Global and Planetary Change*, 100:295–307, 2013.

SOARES, D. B.; LEE, H.; LOIKITH, P. C.; BARKHORDARIAN, A.; MECHOSO, C.R. Can significant trends be detected in surface air temperature and precipitation over South America in recent decades? *International Journal of Climatology*, 37(3): 1483 - 1493, 2016.

SOLMAN, S. A.; BLÁZQUEZ, J. Multiscale precipitation variability over South America: analysis of the added value of CORDEX RCM simulations. *Climate Dynamics*, 53, 1547–1565, 2019.

SONG Y.; ACHBERGER, C.; LINDERHOLM, H.W. Rain-season trends in precipitation and their effect in different climate regions of China during 1961–2008. *Environmental Research Letters*, 6(3) : 1-8, 2011.

STEVENSON, W. J. *Estatística Aplicada à Administração*. Harbra, 2001.

TURCO, M.; PALAZZI, E.; VON HARDENBERG, J.; PROVENZALE, A. Observed climate change hotspots, *Geophysical Research Letters*, 42(9): 3521-3528, 2015.

ZANDONADI, L.; ACQUAOTTA, F.; FRATIANNI, S.; ZAVATTINI, J.A. Changes in precipitation extremes in Brazil (Paraná River Basin). *Theoretical and applied climatology*, 123(3-4), 741-756, 2015.

ZILLI, M. T.; CARVALHO, L. M. V; LIEBMANN, B.; SILVA, M. A. A comprehensive analysis of trends in extreme precipitation over southeastern coast of Brazil. *International Journal of Climatology*, 37: 2269-2279, 2017.

III. CAPÍTULO 2 - CICLONES EXTRATROPICAIS NO HEMISFÉRIO SUL: COMPARAÇÃO ENTRE DIFERENTES REANÁLISES *

*Artigo aceito na RBCLIM e será incluso na próxima edição

2.1 INTRODUÇÃO

Os ciclones, independentemente do tipo (extratropical, subtropical ou tropical), são de grande interesse à comunidade científica e à população por causarem modificações no tempo e clima das regiões onde atuam. Os ciclones extratropicais são aqueles que se formam fora das regiões tropicais e associados à presença de gradientes horizontais de temperatura do ar em superfície e à influência de ondas no escoamento em médios/altos níveis da atmosfera (Celemín, 1984; Reboita et al., 2017). O estudo das características climáticas (regiões de gênese, deslocamento, tempo de vida etc.) dos ciclones extratropicais ao longo do século XX é uma forma importante utilizada na compreensão das tendências nos extremos de precipitação (Kunkel et al., 2012) e ventos (Vessey et al., 2020).

Os ciclones extratropicais podem ser estudados através de dados de reanálises, que são uma combinação de dados observados e modelados. Como há diferentes métodos de assimilação de dados, diferentes configurações dos modelos atmosféricos e resolução horizontal usadas nesses modelos, isso faz com que os conjuntos de reanálises tenham diferenças entre si, o que pode gerar incertezas nos resultados da atividade ciclônica (Hodges et al., 2008, 2011; Allen et al., 2010). Diante disso, estudos têm sido realizados a fim de comparar as características climatológicas dos ciclones em diferentes reanálises (**Tabela 2.1**). Por exemplo, Befort et al. (2016) encontraram diferenças na tendência dos ciclones na reanálise NCEP-20C e ERA-20C tanto no Hemisfério Sul (HS) quanto no Hemisfério Norte (HN). Tilinina et al. (2013) analisaram a tendência dos ciclones extratropicais no HN registrada em 5 reanálises. Somente na reanálise NCEP1 e ERAI que foi obtida tendência linear positiva e significativa, de 1 a 2% por década, no número total de ciclones. Chang e Yau (2016) compararam a atividade ciclônica no HN de 5 reanálises com a proveniente de dados de radiossondagem. Enquanto as reanálises mostraram aumento da tendência, os dados de radiossonda indicaram decréscimo na frequência dos ciclones. Reboita et al. (2015) mostraram que a tendência de todos os ciclones identificados no Hemisfério Sul (HS), obtida com a reanálise NCEP1, é de aumento e que esse aumento é influenciado pelo maior número de ciclones intensos. Já Reboita et al. (2018) compararam a frequência de ciclones no oceano Atlântico Sul em 5 reanálises (NCEP1, NCEP2, ERA-40, ERAI e CFSR). A reanálise CFSR foi a que registrou maior frequência de ciclones enquanto a NCEP1 e NCEP2, a menor ocorrência desses sistemas. Fato que pode ser explicado pela melhor resolução espacial do

modelo que gera a reanálise do CFSR, o que acaba resolvendo melhor os centros de circulação ciclônica. Estudo similar foi realizado por Crespo et al. (2020a) que compararam a climatologia de três reanálises (ERA5, ERAI e CFSR), usando o mesmo algoritmo de rastreamento de Reboita et al. (2018). Os autores observaram que o CFSR detecta maior número de ciclone, enquanto a ERAI o menor. de Jesus et al. (2020) identificaram os ciclones no oceano Atlântico Sul num *ensemble* das reanálises ERAI e CFSR através de um algoritmo baseado em mínimos de vorticidade relativa ciclônica no período de 1979 a 2005. Foi obtida tendência negativa na frequência de ciclones. Embora Reboita et al. (2015) não tenham mostrado a tendência só para o oceano Atlântico Sul, considerando todo o HS, há tendência negativa entre 1980 e 2000. Todos os trabalhos citados, exceto o de Reboita et al. (2018) e de Jesus et al. (2020), utilizaram algoritmos baseados em pressão ao nível médio do mar (PNMM) para identificação e rastreamento dos ciclones.

Além das incertezas decorrentes da fonte de dados, a climatologia de ciclones também pode ter incertezas associadas à variável atmosférica utilizada para a identificação desses sistemas, bem como ao algoritmo utilizado (Leonard et al., 1999; Neu et al., 2013). Por exemplo, Vessey et al. (2020) verificaram menor número de ciclones no Ártico usando a PNMM do que a vorticidade e essa diferença chega a quase 50% nos meses de dezembro a fevereiro. Crespo (2019), comparando duas climatologias de ciclones, no período 1979-2019, uma obtida com dados de PNMM e outra com a vorticidade relativa do vento a 925 hPa da ERAI, verificou que a densidade ciclogénica obtida com as duas variáveis é similar em regiões subtropicais, sobre o continente e próximo à costa. No entanto, em latitudes médias, há maior frequência de ciclones quando a vorticidade relativa é usada. Além disso, os sistemas aparecem ligeiramente deslocados para sudoeste em comparação com aqueles identificados com base na PNMM.

A **Tabela 2.1**, que sintetiza vários trabalhos a partir de 2010, mostra que há mais estudos comparando a climatologia de ciclones em diferentes reanálises para o HN do que para o HS. No HS, os estudos para o Atlântico Sul não são tão escassos, mas, em geral, utilizam apenas um conjunto de dados. Portanto esse trabalho tem como diferencial o uso de 6 diferentes reanálises a fim de reduzir as incertezas. O objetivo desse estudo é determinar a climatologia de ciclones extratropicais no HS em 6 reanálises e avaliar o sinal da tendência da frequência dos ciclones.

Tabela 2.1 - Resumo de estudos, a partir de 2010, usando diferentes reanálises para identificar ciclones e as tendências associadas em diferentes partes do globo. Na tabela, HS significa Hemisfério Sul, HN Hemisfério Norte, PNMM pressão ao nível médio do mar e Vort, vorticidade.

Referência	Reanálise	Período	Variável utilizada para detecção dos ciclones	Área de estudo	Tipo de climatologia (todos os ciclones ou apenas os intensos)	Reanálise com maior e menor número de ciclones	Tendência para frequência de ciclones
Allen et al. (2010)	ERA40, ERAI, NCEP2, JRA25	1979-2008	PMNM	HS e HN	Profundos	+ERAI -NCEP2	+ ERAI, ERA40, NCEP2 e JRA-25
Hodges et al. (2011)	ERAI, JRA25, CFSR, MERRA	11979-2009 DDJF: HN JJA: HS	PMNM e Vort	HS e HN	Total e intensos	Merra apresenta um maior número de ciclones produces a higher number of pressure-intensive cyclones than the CFSR as to vorticity	Não apresentado
Wang et al. (2013)	NCEP1, NCEP20C	1951-2010	PMNM	HS e HN	Total	+NCEP1 -NCEP20C	+ NCEP1 e NCEP20C
Tilinina et al. (2013)	NCEP2, JRA25, ERAI, MERRA, CFSR	1979-2010	PMNM	HN	Total	+ MERRA - NCEP2	+ NCEP2 e ERAI
					Intensos	+ MERRA - NCEP2	Todas reanálises apresentam tendência negative para última década do estudo
Tilinina et al. (2014)	ERAI, MERRA, CFSR, ASR	2000-2010	PMNM	Ártico	Total	+ ASR	Sem tendência
					Intensos	+ASR	Negativa
Reboita et al. (2015)	NCEP1	1980-2012	PMNM	HS	Total		Positiva
					Intensos		Positiva
					Rasos		Negativa
Chang e Yau (2016)	NCEP2, ERA40, JRA55, NCEP20C, ERA20C	DJF 1959-2010	PMNM	HN	Total	- NCEP20C	Positiva para todos os ciclones, com exceção da resultado obtido por radiossonda.
Wang et al. 2016	ERA20C, NCEP20C, JRA55, MERRA,	1979-2001	PMNM	HS e HN	Total	+ MERRA - NCEP20C	Em geral, dados desde 1958 até 2010 apresentam

	CFSR, ERAI, ERA40, NCEP1, NCEP2						tendência positiva
Befort et al. (2016)	NCEP20C, ERA20C	1901-2008	PMNM	HS e HN	Total	+ ERA20C and there is a substantial difference between 1931-1960	HN: + ERA20C e - NCEP20C HN: + ERA20C
Grieger et al. (2018)	ERAI	1979-2008	PMNM, Vort e altura geopotencial	Região Subantártica	Total		Positiva
Reboita et al. (2018)	CFSR, ERAI, ERA40, NCEP1, NCEP2	1979-2005	Vort	Atlântico Sul	Total	+ CFSR - NCEP1 e NCEP2	Não apresentada
Zahn et al. (2018)	ERAI, MERRA2, CFSR, JRA25	1981-2010	PMNM	Ártico	Total		ERAI e Merra + durante DJF CFSR e JRA55 -
					Intensos	Similar em todas reanálises	Apenas JRA55 -
Bloomfield et al. (2018)	ERA20C, ERAI, ensemble CERA20C and ERA20C	1900 - 2010	Vort	HN	Total		Não apresentada
Wickström et al. (2019)	ERAI	DJF: 1979-2016	PMNM	Atlântico Norte	Intensos		+ERAI
Kayano et al. (2019)	NCEP2	1970-2017	Vort	Pacífico Sul e Atlântico Sul	Intensos		Negativa
Crespo (2019)	ERAI	1979-2017	PMNM e Vort	HS	Total		Não apresentada
Crespo et al. (2020a)	ERAI, ERA5, CFSR	1979-2018	Vort	Atlântico Sul	Total	+CFSR - ERAI	Não apresentada
de Jesus et al. (2020)	Ensemble CFRS e ERAI	1979-2005	Vort	Atlântico Sul	Total		Todo período, tendência negativa; entre 1989-2005, tendência positiva
Vessey et al. (2020)	ERAI, JRA55, MERRA2, CFSR	1980-2017	PMNM e Vort	Ártico	Total	Semelhante em todas reanálises. O número de ciclones foi maior quando identificado por meio da vortacidade.	Sem tendência significativa

2.2 METODOLOGIA

2.2.1 Dados

Nesse estudo são utilizados dados de PNMM a cada 6 horas de 6 reanálises: 3 do *National Centre for Environmental Prediction*-NCEP (NCEP1, NCEP2 e NCEP20C) e 3 do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF; ERAI, ERA5 e ERA20C), conforme mostra a **Tabela 2.2**. Essas reanálises diferem em resolução espacial bem como nos métodos de assimilação de dados e nas configurações dos modelos que as produzem.

O estudo abrange dois períodos em função dos dados disponíveis: um período longo (1900-2010), que inclui as reanálises centenárias NCEP20C e ERA20C, e um curto (1980-2018), que engloba as outras 4 reanálises.

Antes de aplicar o algoritmo para a identificação e rastreamento dos ciclones, todas as reanálises foram interpoladas para a mesma grade com resolução de 2,5° seguindo Kodama et al. (2019). Isso suaviza o campo de pressão e evita a identificação de ruído como sendo um ciclone em dados com alta resolução horizontal (como a ERA5), que recebem a denominação de ciclones espúrios ou não realísticos (Sinclair, 1994).

Tabela 2.2 Características das reanálises utilizadas no estudo.

Reanálise	Resolução horizontal	Período	Referência
NCEP1	2.5° x 2.5°	1980 - 2018	https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep_reanalysis.html (Kalnay et al., 1996)
NCEP2	2.5° x 2.5°	1980 - 2018	https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/wesley/reanalysis2/kana/reanl2-1.htm (Kanamitsu et al., 2002)
NCEP20C	2.0° x 2.0°	1900 - 2010	https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/20thC_Rean/ (Compo et al., 2011)
ERA-Interim	0.75° x 0.75°	1980 - 2018	https://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily/levtype=sfc/ (Berrisford et al., 2011).
ERA5	0.25° x 0.25°	1980 - 2018	https://cds.climate.copernicus.eu/#/search?text=ERA5&type=dataset (Hersbach et al., 2019)
ERA20C	1.25° x 1.25°	1900 - 2010	https://apps.ecmwf.int/datasets/data/era20c-daily/levtype=sfc/type=an/ (Poli et al., 2016)

2.2.2 Algoritmo de Identificação e Rastreamento dos Ciclones

O esquema utilizado para identificar e rastrear os ciclones nesse estudo é o de Murray e Simmonds (1991a,b), desenvolvido na Universidade de Melbourne, Austrália. Esse algoritmo fez parte de um projeto que envolveu a intercomparação de 15 algoritmos de identificação de ciclones extratropicais (Neu et al., 2013), chamado *Intercomparison of Mid*

Latitude Storm Diagnostics (IMILAST). Recentemente, também foi utilizado para rastrear ciclones na região subantártica (Grieger et al., 2018). Além disso, o algoritmo de Murray e Simmonds tem sido utilizado desde 2004 pelo Grupo de Estudos Climáticos da Universidade de São Paulo (GrEC-USP; www.grec.iag.usp.br) e mostra boa performance na identificação dos ciclones extratropicais no Hemisfério Sul (Pezza e Ambrizzi, 2003; Reboita et al., 2015) e em outras regiões do globo (Leckebusch e Ulbrich, 2004; Pinto et al., 2005; Leckebusch et al., 2006; Kruschke et al., 2014; Befort et al., 2016).

A PNMM a cada 6 horas é a variável utilizada no algoritmo. A literatura tem discutido se é a vorticidade ou a PNMM a variável mais apropriada para a identificação de ciclones. Não há resposta única para essa questão, pois cada variável possui aspectos positivos e negativos (detalhes sobre esse assunto são apresentados em Reboita, 2008). O projeto IMILAST, por exemplo, inclui algoritmos tanto baseados em pressão quanto em vorticidade e um resultado geral é que ambos algoritmos apresentam resultados semelhantes em latitude baixas e médias e, algoritmos que utilizam vorticidade fornecem maiores frequências de ciclones nas latitudes mais altas (Neu et al., 2013).

Inicialmente o algoritmo interpola a PNMM de grade regular para polar-estereográfica, centrada no HS, usando o método de interpolação de *splines* bicúbicas. A identificação dos centros de baixa pressão inicia-se procurando um *array* (conjunto de pontos de grade) com valor máximo do Laplaciano da pressão. A posição do mínimo local de pressão é, então, encontrada por uma aproximação iterativa ao centro do elipsoide com melhor representação da pressão em superfície, o que também é feito através de *splines* bicúbicas. O Laplaciano da pressão é considerado uma medida da intensidade do sistema. A fim de excluir sistemas fracos, os centros de baixa pressão que não atingirem um valor mínimo pré-estabelecido do Laplaciano de pressão são excluídos (Simmonds et al., 1999). Como o Laplaciano da pressão é proporcional à vorticidade geostrófica relativa ciclônica, tal método se aproxima ao dos algoritmos baseados em vorticidade relativa para identificar os ciclones, como o usado por Sinclair (1994) e Reboita et al. (2010, 2018).

O procedimento de rastreamento dos ciclones envolve três estágios: (a) a posição subsequente de um centro de baixa pressão é inicialmente prevista, (b) a probabilidade de identificação entre o ciclone projetado e cada centro de baixa presente no novo horário sinótico é calculada e (c) a combinação da posição de um ciclone num dado tempo (t) e o tempo seguinte ($t+dt$) é baseada na maior probabilidade de associação entre os centros identificados entre dois horários consecutivos (maiores detalhes sobre o método são apresentados em Simmonds et al., 1999, 2003).

O esquema de Murray e Simmonds possui um grande número de parâmetros que devem ser configurados pelo usuário. Aqui, são utilizadas as configurações propostas por

Pezza e Ambrizzi (2003) e utilizadas, também, por Reboita et al. (2015). Essas configurações incluem, por exemplo, o parâmetro “iopmxc” que se estabelecido como zero indica somente a inclusão de baixas com isóbaras fechadas e o parâmetro “mscrn” que representa o método de *tracking*, o qual quando definido como 2 corresponde ao método do máximo laplaciano da pressão. Essas opções foram utilizadas no presente estudo.

O algoritmo fornece a trajetória de cada ciclone (latitude e longitude) ao longo do ciclo de vida, bem como estatísticas em relação à densidade da trajetória (SD), pressão central (PC), intensidade, raio (R) e profundidade (D) dos ciclones. A SD corresponde ao número de sistemas que passam numa determinada área sendo normalizada pela área. A medida da intensidade do ciclone é fornecida pelo campo do Laplaciano da pressão (calculado entre o centro do sistema e as vizinhanças) e, de acordo com Simmonds e Murray (1999), deve exceder a $0,2 \text{ hPa } (^{\circ} \text{ lat})^{-2}$ para o sistema não ser descartado. D é a diferença de pressão entre o centro do sistema e a região na qual o Laplaciano é zero (o que dá a ideia da isóbara mais externa do ciclone), enquanto R é a distância entre esses dois pontos (Lim e Simmonds, 2007). Todas as estatísticas são apresentadas em grade com resolução horizontal de 2.5° .

A climatologia realizada no presente estudo só inclui os ciclones que apresentarem tempo de vida igual ou superior a 24 horas e que se formaram ao sul de 20°S (isso evita a inclusão de sistemas tropicais). A frequência dos ciclones é definida como o número de sistemas por mês, por estação do ano (DJF, MAM, JJA e SON) e por ano.

2.2.3 Análises

O estudo apresenta as climatologias dos ciclones no HS e, também, para a região do Oceano Atlântico Sul (definida aqui pela região entre 80°W - 20°E e 90° - 20°S), já que muitos ciclones extratropicais se formam nessa região impactando a costa leste da América do Sul. As estatísticas são calculadas para o conjunto de todos os ciclones com tempo de vida igual ou superior a 24 horas e também para o conjunto de sistemas intensos, isto é, sistemas que apresentam pressão central igual ou inferior a 980 hPa em algum momento do seu ciclo de vida (Tilinina et al., 2013, 2014; Reboita et al., 2015). Além disso, são apresentadas a climatologia sazonal das densidades de ciclogêneses e de trajetórias e da pressão central de todos os sistemas identificados. Como a densidade das ciclogêneses (posição inicial dos ciclones) não é fornecida pelo algoritmo, essa foi calculada considerando a área de $2.5^{\circ}\times 2.5^{\circ}$ e normalizada pela mesma área.

A tendência da frequência dos ciclones é obtida através do método de regressão linear calculado a partir dos mínimos quadrados. O teste não paramétrico de significância estatística de Mann-Kendall (Kendall, 1938) é utilizado como um indicador da significância

estatística da tendência considerando nível de confiança de 95%. Todas as análises descritas aqui são realizadas para as 6 reanálises definidas na **Tabela 2.2**.

2.3 RESULTADOS

2.3.1 Frequência Anual e Tendências

As frequências anuais de ciclones extratropicais considerando todos os ciclones identificados pelo algoritmo (**Figura 2.1**) e daqueles que apresentam pressão menor ou igual a 980 hPa ($P \leq 980$ hPa) em algum momento do ciclo de vida (**Figura 2.2**) são apresentadas para o HS e apenas para o Oceano Atlântico Sul. Para o HS e todos os ciclones (**Figura 2.1a**), entre as reanálises centenárias (NCEP20C e ERA20C), o NCEP20C apresenta tendência positiva acentuada e estatisticamente significativa, enquanto a ERA20C mostra tendência negativa significativa. O sinal da tendência e indicação das que são estatisticamente significativas ao nível de 95% de confiança são mostrados na **Tabela 2.3**. Considerando as reanálises atuais, todas mostram tendência positiva significativa, exceto a ERA5. Quando se consideram os sistemas com $P \leq 980$ hPa (**Figura 2.2a**), ambas as reanálises centenárias indicam tendência positiva e estatisticamente significativa. Os resultados obtidos aqui concordam com vários dos estudos compilados na **Tabela 2.1** como, por exemplo, Allen et al. (2010) que mostraram tendência positiva da frequência de ciclones profundos na ERAI e NCEP2 e Reboita et al. (2015) que mostraram resultado semelhante usando o NCEP1, além de Wang et al. (2016) e Grieger et al. (2018) que obtiveram tendência positiva considerando todos os ciclones registrados no NCEP20C e ERAI, respectivamente.

Considerando todos os ciclones no Oceano Atlântico Sul (**Figura 2.1b**), a ERA20C mostra tendência negativa da frequência de sistemas enquanto o NCEP20C revela tendência positiva, o que concorda com a análise hemisférica. No caso dos sistemas intensos (**Figura 2.2b**) no Atlântico Sul, todas as 6 reanálises indicam tendência positiva, mas com a ERAI e ERA5 não mostrando tendência com significância estatística (**Tabela 2.3**).

As principais informações das **Figuras 2.1** e **2.2** são: (a) que todos os conjuntos de dados concordam que o número de ciclones intensos está aumentando com o passar dos anos. No HS, o número de ciclones intensos, nas reanálises atuais, tem aumentado entre 6 (ERA5) a 16 (NCEP1) ciclones/década; (b) que as reanálises com uma resolução horizontal mais refinada fornecem maior número de ciclones, o que resulta em maior frequência de ciclones na ERA5, seguida da ERAI e das reanálises do NCEP e (c) que há grande diferença nas frequências de ciclones registradas nas reanálises centenárias (ERA20C e NCEP20C).

Com relação ao item (b), mesmo que todas as reanálises tenham sido interpoladas para a mesma resolução horizontal, elas preservam suas informações originais; de forma que aquelas com maior resolução horizontal conseguem resolver maior número de ciclones (Tilinina et al., 2013; Hodges et al., 2017; Reboita et al., 2018).

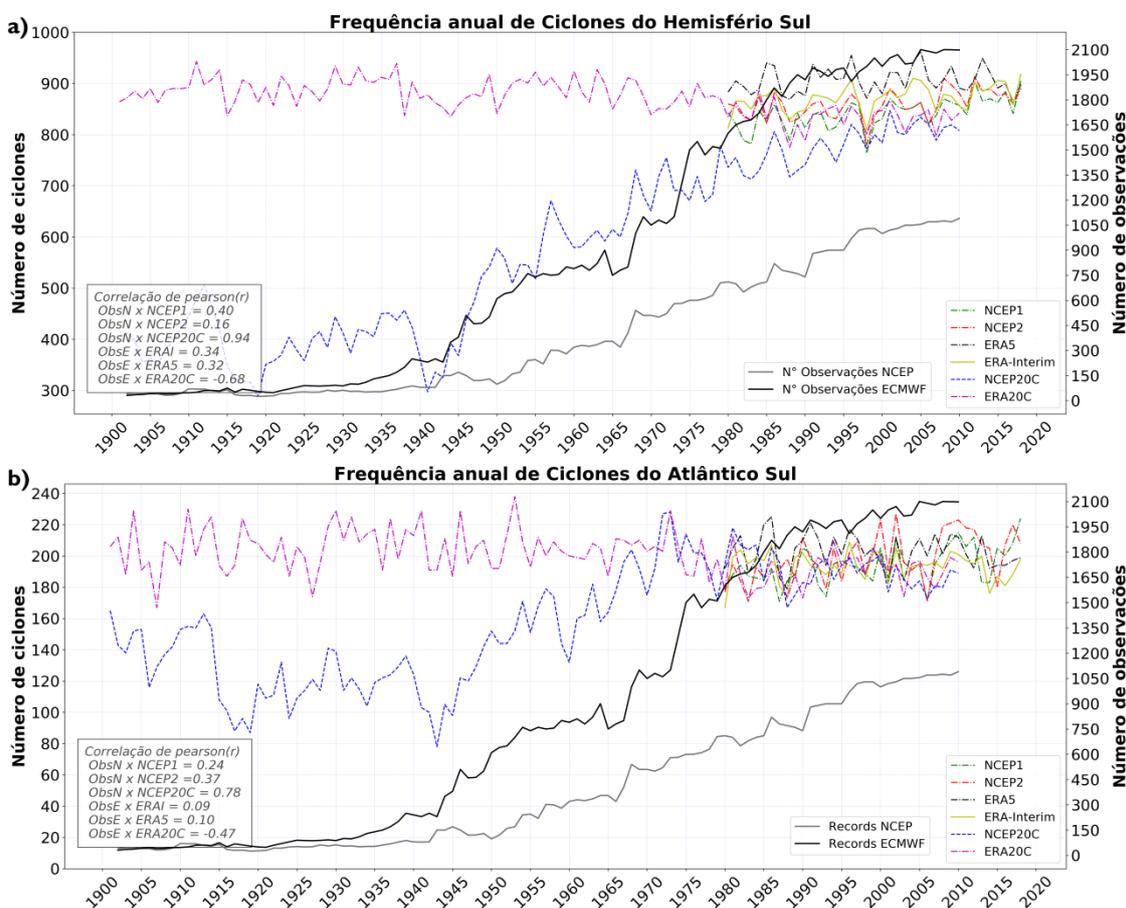


Figura 2.1 Frequência anual de todos os ciclones extratropicais considerando as diferentes reanálises: (a) Hemisfério Sul e (b) oceano Atlântico Sul. A figura também mostra o número de observações de superfície assimiladas nas reanálises do NCEP (linha cinza, obtida de Compo et al., 2011) e nas do ECMWF (linha preta, obtida de Poli et al., 2016). Além disso, é mostrada a correlação da série do número de observações, ObsN para o NCEP e ObsE para o ECMWF, com as séries temporais da frequência de ciclones das respectivas reanálises; as correlações significativas ao nível de 95% de confiança estão destacadas em negrito.

Tabela 2.3 Tendência (ângulo de inclinação da reta) das séries de frequência anual de ciclones extratropicais obtido com o teste de Mann-Kendall. Valor positivo indica tendência positiva e negativo, tendência negativa. Valores com significância estatística ao nível de 95% estão destacados em negrito.

Reanálise	Todos os Ciclones		Ciclones com $P \leq 980$ hPa	
	Hemisfério Sul	Atlântico Sul	Hemisfério Sul	Atlântico Sul
NCEP1	1.53	0.56	1.60	0.46
NCEP2	1.10	0.75	1.44	0.58
ERA5	0.23	-0.13	0.67	0.04
ERAInterim	1.10	-0.10	0.97	0.12
NCEP20C	5.21	0.87	4.22	0.63
ERA20C	-0.59	-0.17	1.11	0.23

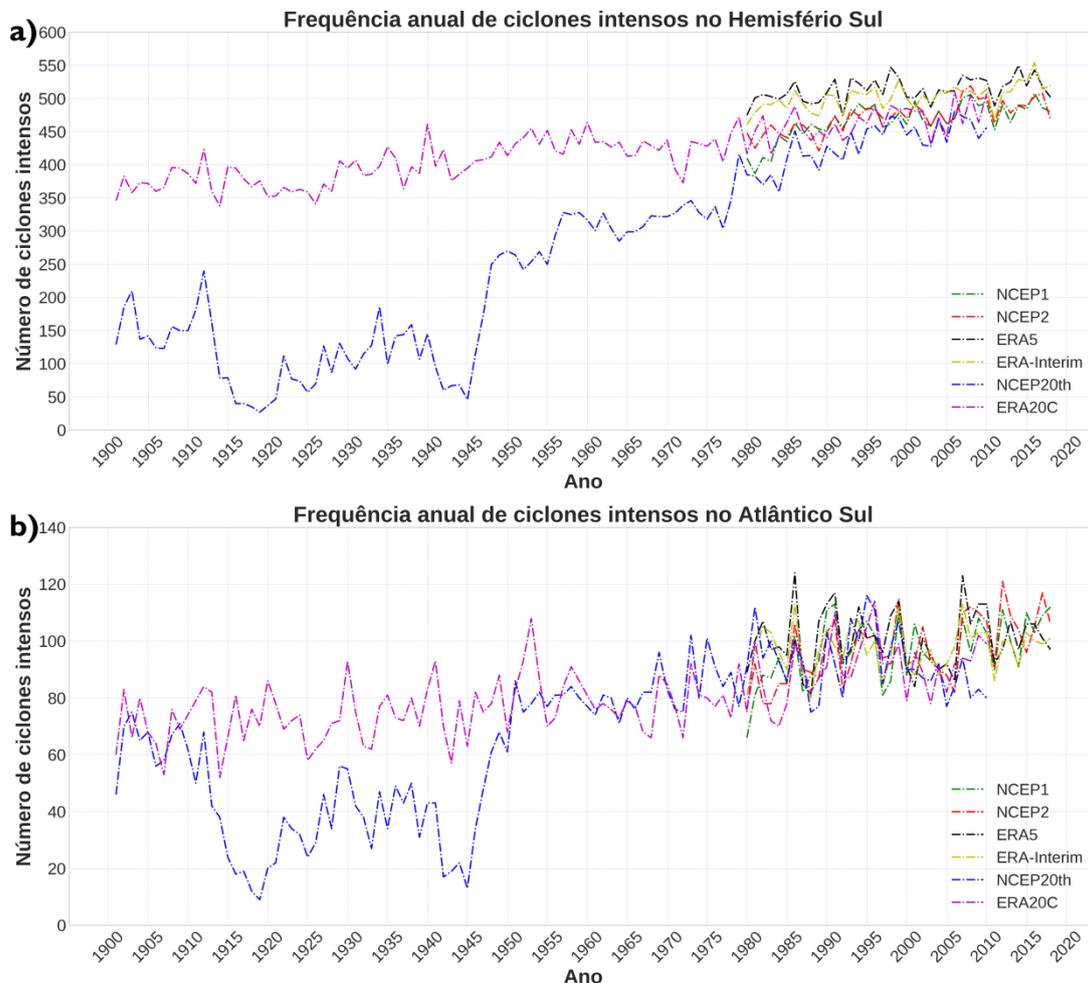


Figura 2.2 - Frequência anual dos ciclones que em algum momento do ciclo de vida conseguem atingir pressão central menor ou igual a 980 hPa nas diferentes reanálises: (a) Hemisfério Sul e (b) oceano Atlântico Sul.

Para elucidar a diferença na frequência de ciclones entre as reanálises centenárias (item c) alguns pontos são abordados aqui. O primeiro deles é verificar a relação entre o número de observações em superfície assimiladas ao longo dos anos nos modelos numéricos para a geração dessas reanálises. Para a reanálise NCEP20C, a informação foi obtida através da conversão da Figura 3b de Compo et al. (2011) em série temporal. Já para a ERA20C, foi extraída da Figura 1a de Poli et al. (2016). As séries temporais do número de observações assimiladas são apresentadas na **Figura 2.1** juntamente com a frequência anual de ciclones. Nota-se que há uma tendência linear positiva no número de observações assimiladas tanto no NCEP20C quanto no ERA20C, mas com maior número de informações assimiladas na ERA20C do que no NCEP20C a partir de 1940. Enquanto o aumento da frequência anual de ciclones no NCEP20C indica associação com o aumento de observações assimiladas, isso não ocorre na ERA20C, uma vez que há uma ligeira diminuição na frequência dos ciclones. Portanto, sugere-se que o modelo numérico usado na geração da reanálise NCEP20C é mais sensível ao número de dados assimilados do que o do ERA20C. O resultado obtido aqui também concorda com Wang et al. (2013), que mencionam que a reanálise NCEP20C apresenta não homogeneidades no número de ciclones e que isso está associado com a

mudança no número de dados observados assimilados durante o século XX. Outro fato é que a ERA20C assimila observações de vento à superfície sobre os oceanos, que é uma variável relevante para identificação de ciclones, principalmente no HS onde predominam os oceanos. O NCEP20C não faz tal assimilação. Além disso, há diferenças nos esquemas de assimilação de dados entre as reanálises.

Outra comparação se refere à média da PNMM. A hipótese aqui para a diferença no número de ciclones seria que a reanálise NCEP20C apresenta pressão atmosférica mais altas nas primeiras décadas do que a reanálise ERA20C; assim poderia gerar ciclones mais fracos e menos duradouros que não seriam detectados pelo algoritmo. A **Figura 2.3** compara a média anual da PNMM, computada considerando todo o HS, e revela que até 1955 ambas as reanálises possuem média anual (1009,4 hPa NCEP20C e 1008,7 hPa ERA20C) ligeiramente maior do que a do período mais atual (1008 hPa NCEP20C e 1007,6 ERA20C) e que, de forma geral, a diferença entre os dois períodos é de 1 hPa. Embora a PNMM da reanálise do NCEP20C seja ligeiramente mais alta do que a da ERA20C isso não explica a diferença na frequência dos ciclones, desde que essa diferença é praticamente constante durante todo o período (**Figura 2.3**).

As **Figuras 2.1a** e **2.3** indicam que as séries temporais possuem uma mudança de padrão a partir de aproximadamente 1955. Isso poderia sugerir a atuação de algum modo de teleconexão da atmosfera de baixa frequência que favoreceu tal configuração. Nesse contexto, a **Figura 2.4** mostra o índice anual da Oscilação Decadal do Pacífico (ODP ou PDO em inglês; Mantua et al., 1997) juntamente com a séries temporais, sem tendência, das anomalias anuais da frequência de ciclones nas reanálises. A ODP é um padrão de variabilidade climática natural de baixa frequência caracterizada por anomalias de sinais opostos (temperatura da superfície do mar, pressão atmosférica etc.) entre o Pacífico tropical e o Pacífico Norte, sendo que nesse último as anomalias são mais intensas (Mantua et al., 1997). Uma hipótese é que os períodos com a fase positiva da ODP (anomalias positivas de temperatura da superfície do mar no Pacífico tropical) podem ser favoráveis à redução da pressão atmosférica em latitudes austrais e, conseqüentemente, favorecer maior frequência de ciclones. De 1900 a 1955, a ODP muda de fase positiva para negativa e depois para positiva, não mostrando constância numa única fase, portanto, não justifica o padrão da pressão atmosférica mostrado na **Figura 2.3**. Após 1955 há uma preferência pela fase negativa da ODP, o que seria favorável ao aumento de pressão (desfavorável aos ciclones) e, portanto, indicando tendência oposta à mostrada na **Figura 2.3** em que há registro de PNMM média anual mais baixa. Conforme demonstrado na **Figura 2.4**, a partir da análise visual e do coeficiente de correlação de Pearson, não há relação entre a ODP e a frequência dos ciclones.

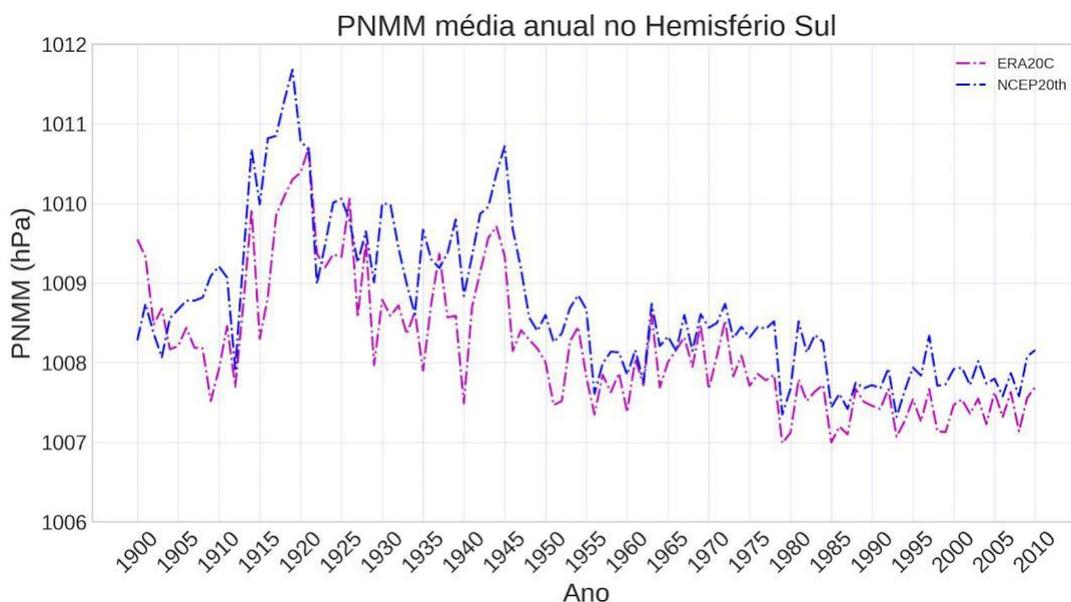


Figura 2.3 - Média anual da PNMM (hPa) na área que compreende todo o Hemisfério Sul, na reanálise NCEP20C (linha azul) e ERA20C (linha roxa).

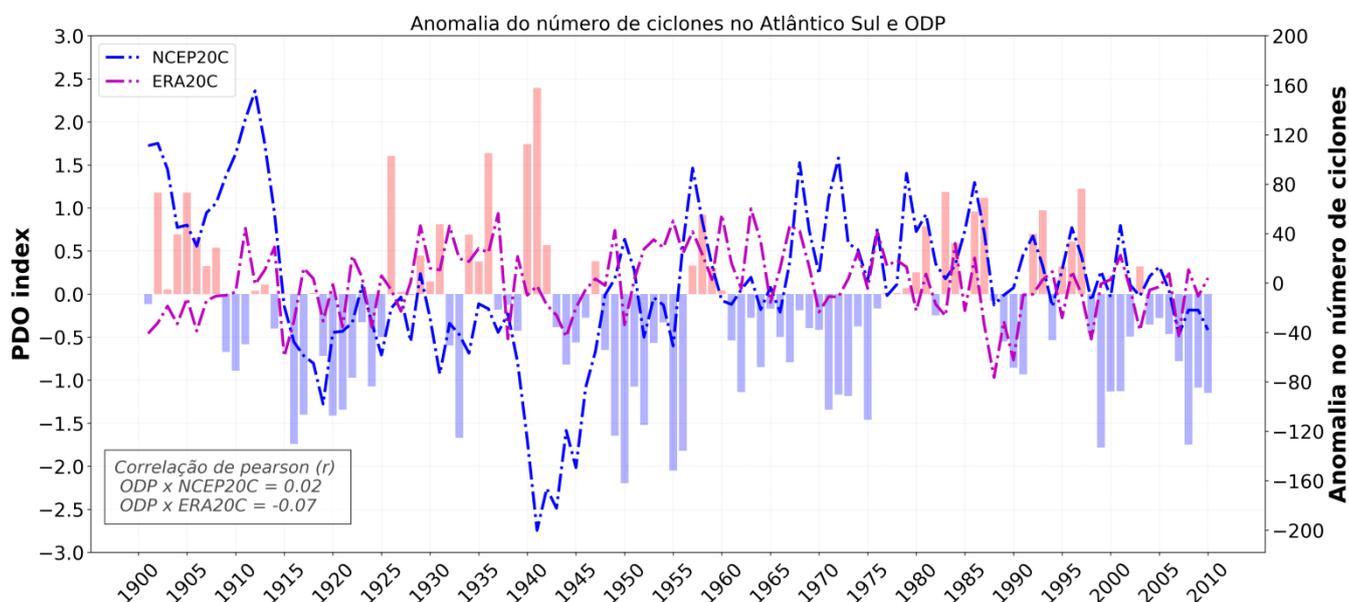


Figura 2.4 - Índice anual da Oscilação Decadal do Pacífico (PDO em inglês, barras), obtido de <https://www.ncdc.noaa.gov/teleconnections/pdo/>, e séries temporais, sem tendência, da anomalia da frequência dos ciclones extratropicais no HS (todos os sistemas identificados): NCEP20C (linha azul) e ERA20C (linha roxa). As séries temporais das reanálises centenárias se estendem até 2010. A anomalia dos ciclones é em relação ao período 1900 a 2010.

Outro padrão de variabilidade de baixa frequência que pode impactar a ocorrência dos ciclones é a Oscilação Multidecadal do Atlântico (OMA ou AMO em inglês; Kayano et al., 2019), que é caracterizada por anomalias de temperatura da superfície do mar no Atlântico Norte. Os períodos com anomalias frias (quentes) correspondem à fase fria (quente) da OMA (Enfield et al., 2001) e podem perdurar por 20 a 40 anos (https://www.aoml.noaa.gov/phod/amo_faq.php). Kayano et al. (2019) verificaram que a OMA apresentou fase negativa entre 1979-1993 (que coincidiu com a fase positiva da ODP) e positiva entre 2003-2017 (que coincidiu com uma oscilação da ODP de positiva – 2003-2006 –

para negativa – 2014-2017). Essas fases são evidentes na **Figura 2.5a**, que inicia em 1948, pois é quando o índice da OMA é disponibilizado pela NOAA. O ano final na figura é 2010, pois é o último ano disponível nas reanálises centenárias.

A **Figura 2.5a** mostra o índice anual da OMA juntamente com a série das anomalias da frequência anual (sem tendência) de ciclones no HS das reanálises centenárias. A reanálise NCEP20C apresenta claramente um padrão inverso ao da OMA, com anomalias positivas (negativas) de ciclones em períodos de fase fria (quente) da OMA, o que caracteriza um coeficiente de correlação de -0,47 (com significância estatística ao nível de 95% de confiança). Por outro lado, a relação inversa entre a frequência de ciclones da ERA20C com a OMA só ocorre em períodos mais curtos do que na reanálise NCEP20C. Por exemplo, entre 1973 e 1979 há anomalias positivas da ocorrência de ciclones na ERA20C concomitantemente com a fase fria da OMA. A mesma análise da **Figura 2.5a** foi realizada considerando apenas o período de 1980 a 2018 para todos os ciclones identificados no HS (**Figura 2.5b**) e somente no Atlântico Sul (**Figura 2.5c**) nas reanálises NCEP1, NCEP2, ERAI e ERA5. De forma geral, há correlação negativa entre as séries temporais da ocorrência de ciclones e a OMA com maiores correlações (embora sem significância estatística) nas reanálises do ECMWF (**Figura 2.5b-c**).

Os relações mostradas na **Figura 2.5** concordam com os de Kayano et al. (2019) que analisaram a relação dos ciclones na região entre o Pacífico Sudeste e o Oceano Atlântico Sul, no período de 1979 a 2017, considerando a reanálise NCEP2 e as estações do verão e inverno. Os autores obtiveram maior (menor) frequência de ciclones em ambos os oceanos e estações do ano na fase fria (quente) da OMA. Kayano et al. (2019) associaram essas relações com os padrões distintos das anomalias de temperatura da superfície do mar no HS em ambas as fases da OMA. Por exemplo, na fase negativa (positiva) da OMA nas altas e médias latitudes há anomalias positivas (negativas) de temperatura da superfície do mar.

Em suma, mesmo que a frequência de ciclones tenha uma resposta à OMA, essa também não explica a diferença nas tendências entre as reanálises centenárias.

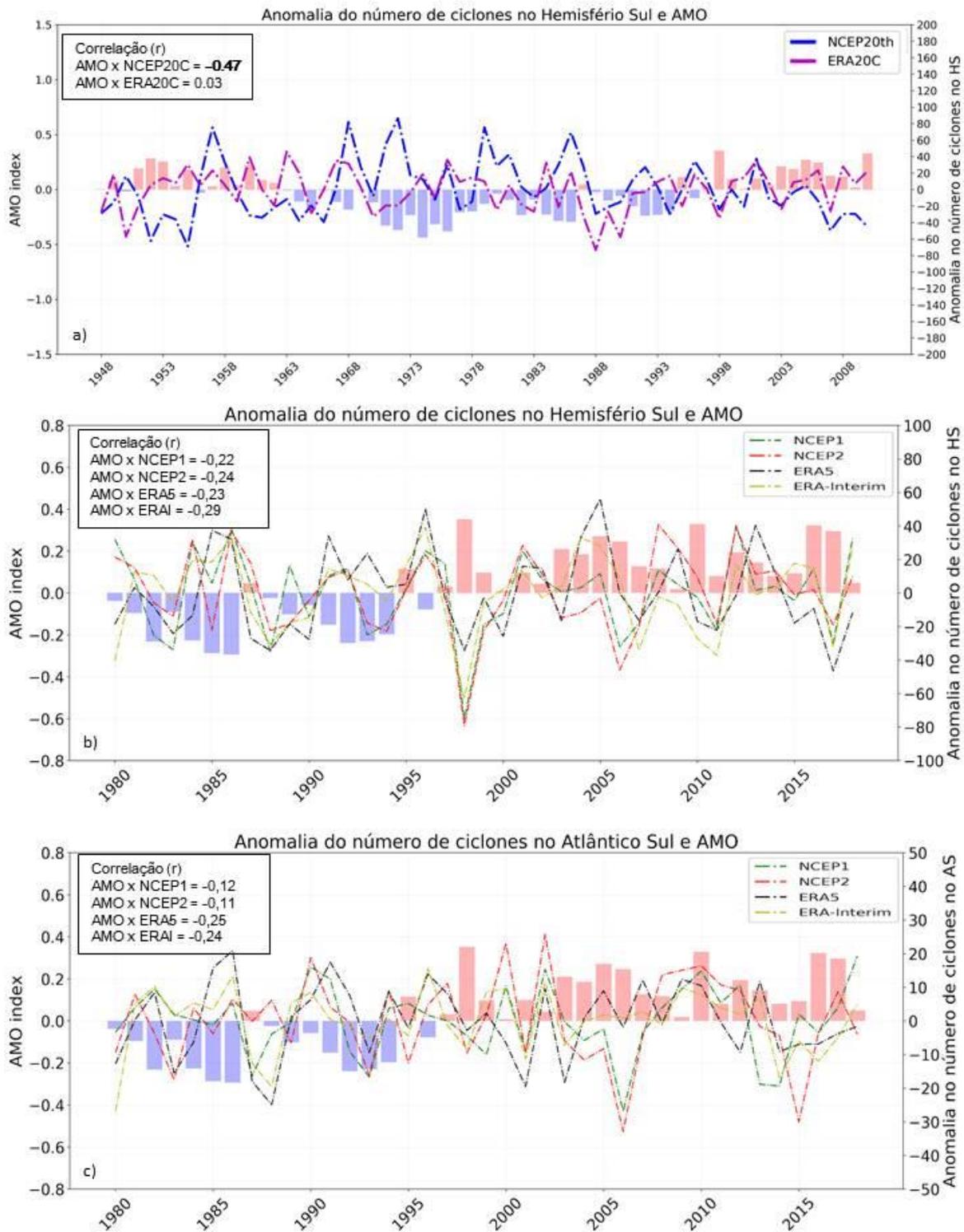


Figura 2.5 - Série temporal do índice anual da Oscilação Multidecadal do Atlântico obtido de <https://www.psl.noaa.gov/data/correlation/amon.us.data>, e séries temporais, sem tendência, da anomalia da frequência dos ciclones extratropicais (todos os sistemas identificados). a) Para o HS e NCEP20C (linha azul) e ERA20C (linha roxa). A anomalia dos ciclones é calculada em relação à climatologia do período 1900 a 2010; b) para o HS no NCEP1, NCEP2, ERAI e ERA5 e c) para o Atlântico Sul no NCEP1, NCEP2, ERAI e ERA5. Em b e c as anomalias foram computadas considerando o período de 1980 a 2018. Nos três painéis são mostradas as correlações das séries anuais da ocorrência de ciclones e o índice AMO. Só a correlação entre o NCEP20C e o AMO possui significância estatística com 95% de confiança.

2.3.2 Sazonalidade

O ciclo anual da frequência de todos os ciclones extratropicais e daqueles mais intensos ($P \leq 980$ hPa) no HS é caracterizado por maior ocorrência de sistemas nos meses de inverno e menor nos de verão em todas as reanálises, com exceção do NCEP20C para os sistemas intensos (Figura 2.6a,c; Tabelas 2.4 e 2.5). Esse resultado concorda com vários estudos como, por exemplo, Simmonds e Keay (2000) e Reboita et al. (2015). Quando a análise é restrita ao oceano Atlântico Sul (Figura 2.6b,d), a maior frequência de ciclones, tanto para todos os sistemas quanto para os intensos, ocorre de modo muito similar entre o outono e o inverno (Tabela 2.4), resultado que também é similar ao de Reboita et al. (2010) especificamente para o Atlântico Sul. Já Reboita et al. (2018) obteve o inverno como a estação mais ciclogênica uma vez que utilizou uma área menor para o rastreamento de ciclones, o que pode ter afetado a climatologia.

Com relação à variabilidade dos dados, o desvio-padrão se mostra similar entre as reanálises, exceto na NCEP20C em que apresenta os maiores desvios em relação à média do conjunto (Figura 2.6).

Tabela 2.4 - Média sazonal da frequência de todos os ciclones identificados no HS e oceano Atlântico Sul.

Reanálise	Hemisfério Sul				Atlântico Sul			
	DJF	MAM	JJA	SON	DJF	MAM	JJA	SON
NCEP1	64,0	71,3	72,3	66,7	15,2	16,8	16,2	14,9
NCEP2	64,5	73,3	74,0	67,9	15,2	17,5	16,9	15,3
ERA5	69,1	75,6	77,8	72,6	15,5	17,5	17,1	15,9
ERA1	66,1	73,2	75,3	69,3	14,7	16,5	16,5	15,1
NCEP20C	43,2	45,8	50,4	44,8	11,9	13,3	13,8	12,2
ERA20C	66,1	73,9	76,9	71,2	15,3	17,3	17,4	16,4

Tabela 2.5 - Média sazonal da frequência dos ciclones que atingem $P \leq 980$ hPa em algum momento do ciclo de vida no HS e oceano Atlântico Sul.

Reanálise	Hemisfério Sul				Atlântico Sul			
	DJF	MAM	JJA	SON	DJF	MAM	JJA	SON
NCEP1	33,2	40,2	40,5	37,7	7,5	8,3	8,0	7,6
NCEP2	33,6	40,9	41,4	37,9	7,3	8,4	8,3	7,6
ERA5	36,3	43,6	45,3	41,9	7,5	8,6	8,8	7,9
ERA1	35,4	43,3	44,3	40,4	7,2	8,3	8,5	7,7
NCEP20C	18,8	22,1	21,7	22,2	5,0	6,2	5,3	5,5
ERA20C	27,1	36,8	39,1	35,5	5,4	7,4	7,0	6,7

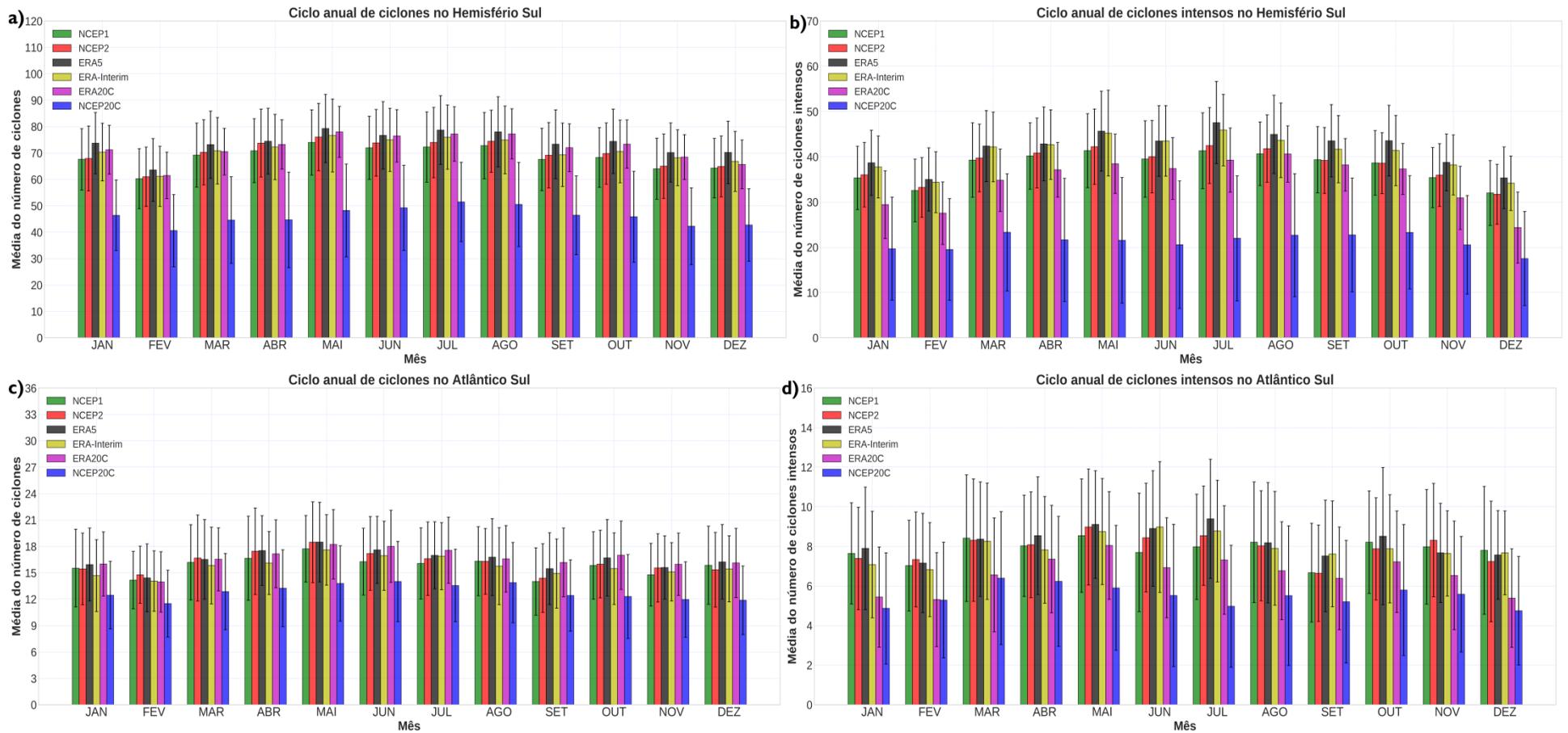


Figura 2.6 - Ciclo anual da frequência de todos os ciclones identificados pelo algoritmo (coluna da esquerda) e daqueles com $P \leq 980$ hPa (coluna da direita) em algum momento do ciclo de vida nas diferentes reanálises. Análises para todo o HS e oceano Atlântico Sul. Nas figuras, as barras indicam o desvio-padrão.

2.3.3 Outras Características Climatológicas

A **Figura 2.7** mostra as regiões favoráveis à gênese de todos os ciclones no verão e inverno juntamente com a informação das regiões em que há tendência positiva (hachurado azul) e negativa (hachurado vermelho) de ciclogêneses. O teste de hipótese para as tendências não é aplicado uma vez que as ciclogêneses apresentam muita variabilidade espacial de forma que muitos valores zeros aparecem nas séries temporais afetando a qualidade de testes estatísticos (Pezza et al., 2012; Reboita et al., 2018, 2020). Numa análise geral da **Figura 2.7**, o cinturão de latitude 50° - 70° S é região mais ciclogênica do HS. Entretanto, há dois setores nesse cinturão com maior frequência de ciclones: um próximo de 170° E e outro a leste da Península Antártica, como também obtido por Crespo (2019). Apenas o NCEP20C (**Figura 2.7f,l**) mostra uma diferença nessa característica, ou seja, mais ciclones a oeste da Península que a leste. As reanálises do ECMWF, com destaque para a ERA20C, revelam que há predomínio de tendência negativa da frequência de ciclones entre 40° e 55° S e positiva em latitudes mais altas, padrão semelhante ao encontrado em projeções climáticas (Reboita et al., 2018, 2020). O NCEP20C, em ambas as estações do ano, se diferencia mostrando tendência negativa próximo de 60° S e ao sul da América do Sul e positiva em latitudes mais altas. Apesar dessa diferença, o NCEP20C também aumento da frequência de ciclones em latitudes mais altas nos anos mais recentes.

O setor leste dos continentes, próximo de 30° S, também é propício à ciclogênese e com maior frequência de sistemas no inverno, concordando com Reboita et al. (2018, 2020). Na América do Sul, 30° S está próximo do extremo sul do Brasil e Uruguai, o que engloba a região ciclogênica denominada de RG2 por Reboita et al. (2010) e que às vezes também é referida como Uruguai (Crespo et al., 2020b). Na RG2 há tendência positiva na frequência de ciclones na reanálise NCEP20C e nas demais reanálises nota-se um gradiente de tendência, em geral, positiva nas cercanias do Uruguai e negativa ao redor. A tendência positiva destacada na RG2 também é mostrada por Reboita et al. (2015).

A costa leste da América do Sul possui outras duas regiões ciclogênicas: a costa sudeste/sul do Brasil (RG1) e costa sudeste/sul da Argentina (RG3). Enquanto a frequência de ciclones na RG2 é maior no inverno, nessas outras duas é no verão (**Figura 2.7**), sendo que a RG1 praticamente se descaracteriza como ciclogênica no inverno. No verão, as reanálises NCEP1 e NCEP2 mostram as RG1 e RG2 bem definidas (com dois núcleos separados, **Figura 2.7a-b**), enquanto as demais reanálises mostram um único núcleo alongado, em geral, com um dos setores desse núcleo (norte ou sul) com maior densidade ciclogênica.

Reboita et al. (2012) apresentam os mecanismos físicos associados às três regiões ciclogênicas na costa leste da América do Sul. De forma breve, as ciclogêneses na RG1 estão mais associadas a processos termodinâmicos, enquanto que na RG3 predominam processos baroclínicos e de regeneração de ciclones por processos de ganho de vorticidade ciclônica por estiramento da coluna de ar do escoamento que cruza a cordilheira dos Andes nas latitudes a cerca de 45°S (Hoskins e Hodges, 2005). Na RG2, as ciclogêneses são favorecidas pelas ondas em níveis médios da atmosfera que viajam do Pacífico em direção ao Atlântico, pelo transporte de calor e umidade realizado pelo jato de baixos níveis a leste dos Andes, pelo cavado semi-estacionário em função da topografia andina bem como pelos gradientes horizontais de temperatura em superfície (Gan e Rao, 1991; Vera et al., 2002; Reboita et al., 2012). Com relação à tendência da frequência de ciclogêneses, em geral, as reanálises indicam tanto no verão quanto no inverno, tendências negativas na RG3, enquanto que na RG1 o sinal é mais variável: as reanálises do NCEP e a ERA20C mostram tendência positiva e a ERA5 e a ERA-Interim tendência negativa próximo à costa sudeste do Brasil e positivo em direção à região sul.

A **Figura 2.8** mostra a média da densidade da trajetória de todos os ciclones identificados nos HS no verão e inverno que são, respectivamente, as estações com menor e maior frequência desses sistemas, enquanto a **Figura 2.9** apresenta a média da pressão no centro dos sistemas.

A característica comum em todas as reanálises (**Figura 2.8**) é que no verão a trajetória dos ciclones é mais concentrada num cinturão ao redor da Antártica enquanto que no inverno se expande para os subtropicais; fato que está associado ao deslocamento norte-sul da região de gradiente meridional de temperatura mais intenso, ou seja, da zona baroclínica. No HS, a zona baroclínica migra para norte (sul) no inverno (verão) contribuindo para a ocorrência de ciclones extratropicais mais afastados (próximos) da Antártica. Essa característica sazonal é evidente na **Figura 2.9**, pois enquanto no verão os gradientes meridionais da pressão atmosférica (indicado pela variação acentuada das cores) se concentram ao longo de 45°S, no inverno estão deslocados para norte.

No inverno (**Figura 2.8g-l**), também é evidente um cinturão de maior densidade de ciclones que se estende do sudeste da Austrália ao sul da América do Sul. Além disso, há um núcleo intenso de densidade de sistemas nas cercanias da Nova Zelândia. A costa leste da América do Sul também apresenta intensa atividade de sistemas em ambas as estações do ano. Outro fato que chama a atenção na **Figura 2.8** é que, tanto no verão quanto no inverno, o cinturão de ciclones ao redor da Antártica enfraquece entre a Península Antártica e o oceano austral ao sul do oceano Atlântico. Talvez isso seja uma resposta da geografia peculiar tanto

da América do Sul, que se estende mais para sul do que os continentes africano e australiano, e da projeção da Península Antártica em direção às menores latitudes. A comparação das seis reanálises na **Figura 2.8** mostra que o padrão espacial da densidade da trajetória dos ciclones é similar entre elas, exceto na NCEP20C que mostra densidade de ciclones menor do que as demais reanálises (**Figura 2.8f,i**).

Com relação à pressão central dos sistemas (**Figura 2.9**), o inverno apresenta maiores contrastes nos valores da pressão que o verão, isto é, no inverno os sistemas possuem pressões menores nas cercanias da Antártica, enquanto na região subtropical as pressões são mais altas. No verão há menor contraste entre as altas latitudes e os subtrópicos. Embora ocorram diferenças nas médias da pressão central entre as reanálises, o padrão espacial é similar. Entre as reanálises centenárias, o NCEP20C mostra pressões médias maiores do que o ERA20C, o que já indicava a **Figura 2.3**.

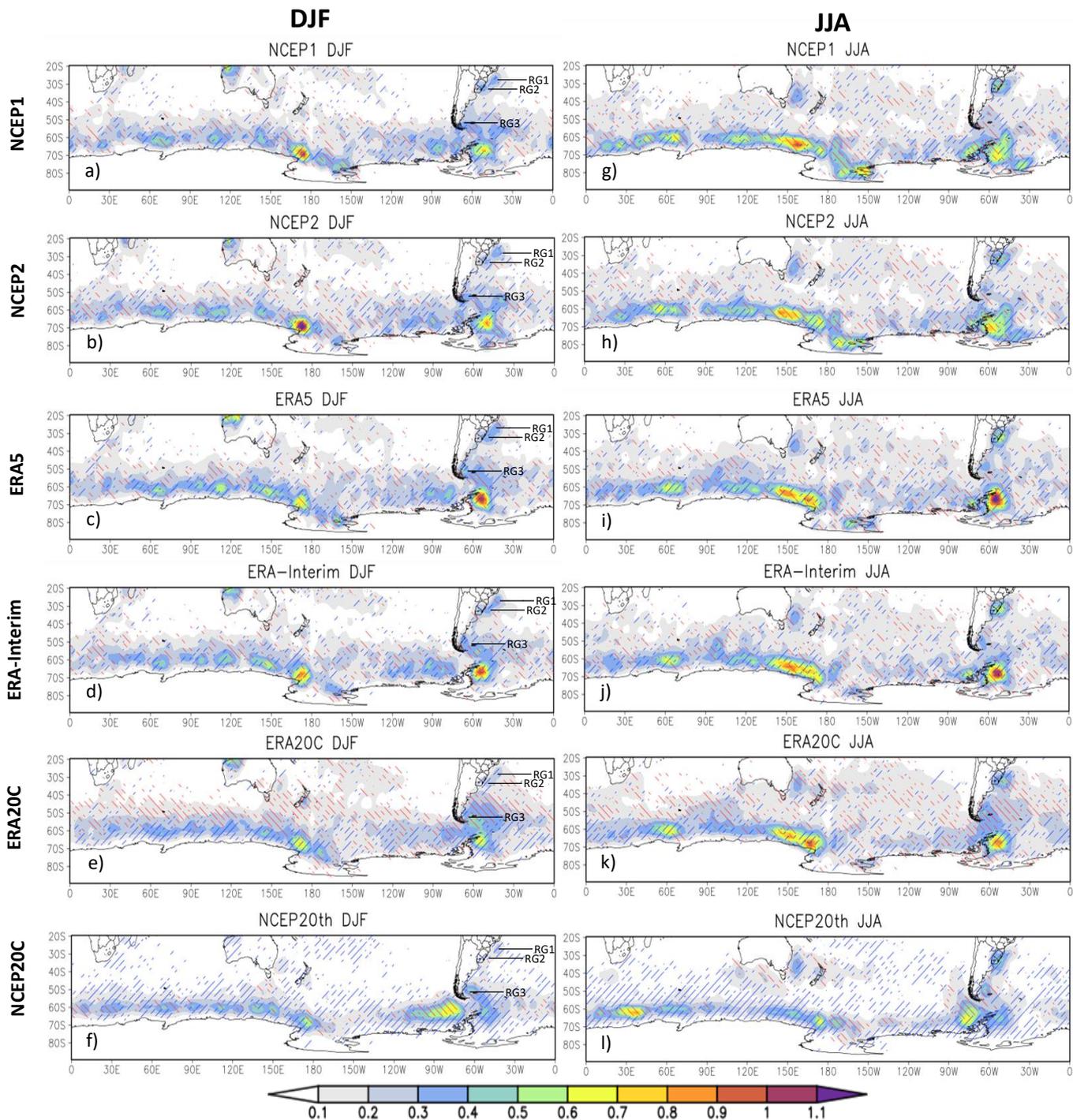


Figura 2.7 - Média sazonal (cores) da densidade da posição inicial (ciclogêneses) de todos os ciclones identificados pelo algoritmo no verão (coluna esquerda) e inverno (coluna da direita) nas diferentes reanálises. A unidade da figura é 10^{-5} km^{-2} . Em hachurado é mostrada as regiões onde a tendência da densidade é positiva (azul) e negativa (vermelha). Na coluna da esquerda são identificadas as três regiões ciclogenéticas na costa leste da América do Sul (RG1, RG2 e RG3).

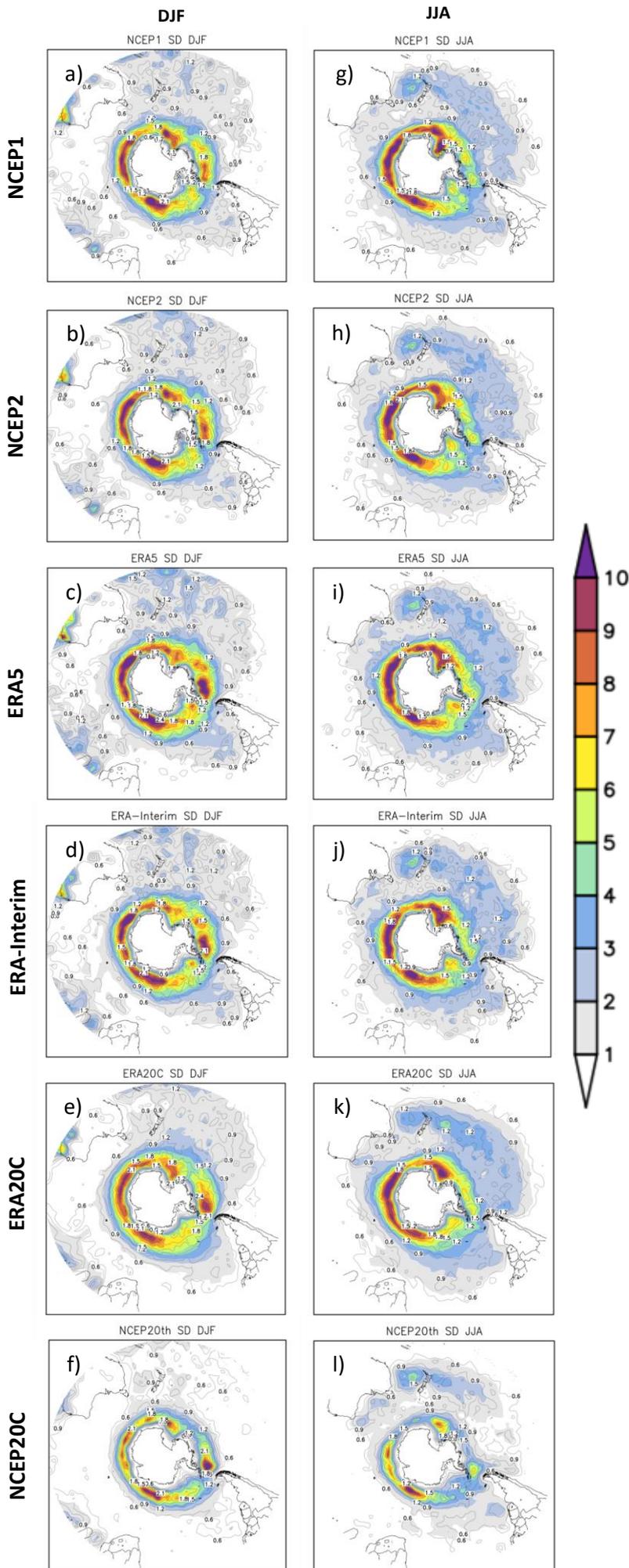


Figura 2.8 - Média sazonal (cores) e desvio-padrão (linhas) da densidade da trajetória de todos os ciclones identificados no verão (coluna esquerda) e inverno (coluna da direita) nas diferentes reanálises. A unidade da figura é (10^{-3} ciclones graus lat^{-2}).

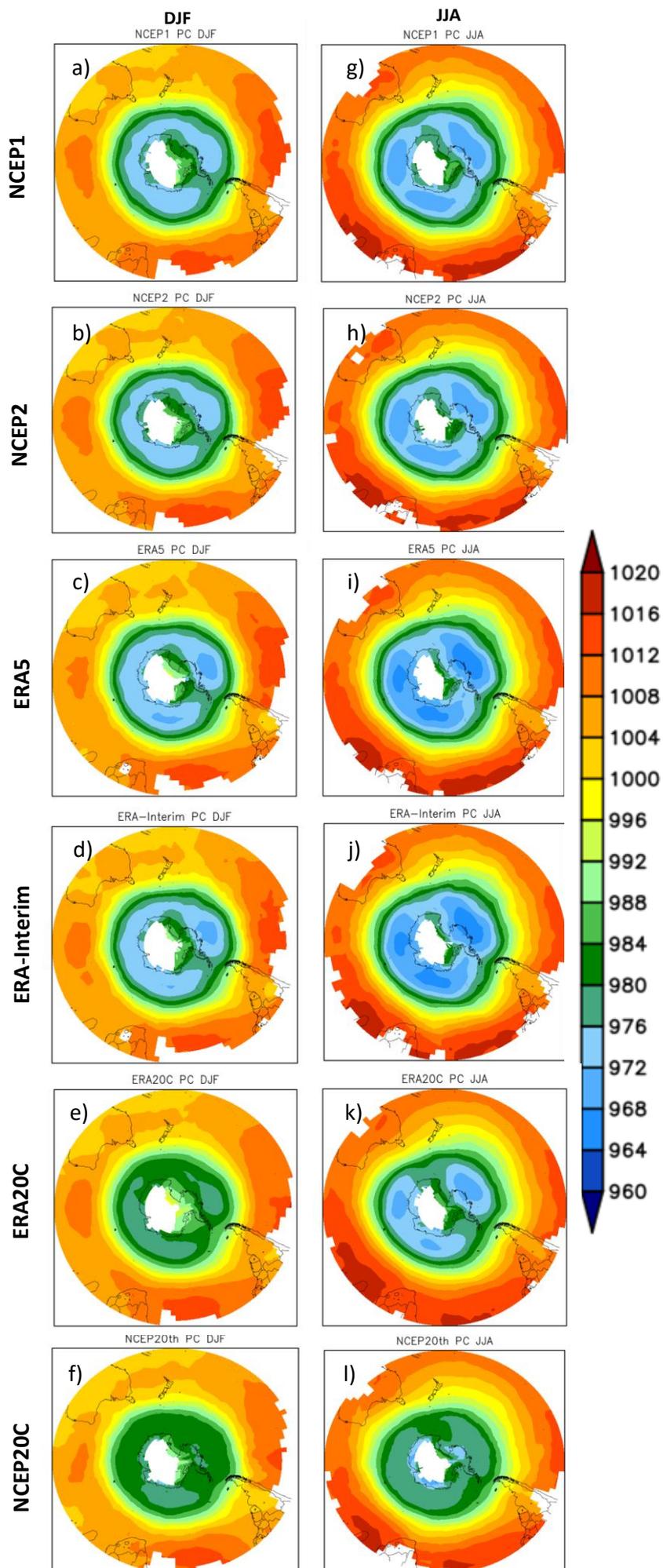


Figura 2.9 - Média sazonal (cores) da pressão central (hPa) de todos os ciclones identificados no verão (coluna esquerda) e inverno (coluna da direita) nas diferentes reanálise

2.4 CONCLUSÕES

Este estudo comparou a climatologia de ciclones no HS em 6 reanálises: duas centenárias (1900-2010) e quatro cobrindo um período mais recente (1980-2010). As análises focaram em todos os ciclones identificados e no conjunto de sistemas que atingiram pressão central menor ou igual a 980 hPa em algum momento do ciclo de vida (sistemas intensos). Neste trabalho, os ciclones foram identificados através da PNMM. Entre os principais resultados têm-se que:

- há grande diferença na frequência de ciclones registrados nas reanálises centenárias, principalmente no período anterior à 1970. No NCEP20C, o número de ciclones aumenta com o aumento de dados de superfície assimilados na reanálise, porém na ERA20C isso não ocorre. Isso resultaria da assimilação adicional do vento próximo à superfície, contribuindo para identificação de ciclones e para padrão mais homogêneo ao longo do tempo na frequência de ciclones na ERA20C ;

- para o HS e Atlântico Sul, considerando todos os ciclones das reanálises centenárias, o NCEP20C apresenta tendência positiva acentuada e significativa enquanto a ERA20C se mostra mais homogênea e com tendência negativa significativa da frequência de ciclones;

- para o HS e sistemas intensos, ambas as reanálises centenárias indicam tendência positiva e estatisticamente significativa da frequência de ciclones entre 1900-2010;

- para o HS e todos os ciclones, as reanálises do ECMWF (ERA1 e ERA5) indicam tendência negativa da frequência de ciclones entre 1980-2018;

- para sistemas intenso, as reanálises mais recentes mostram tendência positiva para os sistemas entre 1980-2018, mas somente as tendências do NCEP são estatisticamente significativas. O número de ciclones intensos têm aumentado entre 6 (ERA5) a 16 (NCEP1) ciclones/década;

- as reanálises mais recentes (ERA1 e ERA5) obtidas por meio de modelos com maior resolução horizontal fornecem maior número de ciclones;

- sobre a sazonalidade dos ciclones extratropicais, quando todos os ciclones são considerados e só aqueles com $P \leq 980$ hPa no HS, há maior ocorrência nos meses de inverno e menor nos de verão. Quando a análise é restrita ao oceano Atlântico Sul, a maior frequência de ciclones, tanto de todos os sistemas quanto só de intensos, é muito similar entre o outono e o inverno;

- o cinturão de latitude entre 50° e 70° S é a região mais ciclogênica do HS. Nas latitudes próximo de 30° S, o setor a leste dos continentes também são regiões mais favoráveis às ciclogêneses;

- as reanálises centenárias indicam predomínio da tendência negativa da frequência de ciclones em latitudes médias e positiva em latitudes mais altas, fato que concorda com os estudos de mudanças climáticas;

- a costa leste da América do Sul apresenta três regiões ciclogênicas: a costa sul/sudeste do Brasil (RG1) e sul/sudeste da Argentina (RG3) com maior frequência de ciclones no verão e a costa do extremo sul do Brasil e Uruguai (RG2) com maior frequência de ciclones no inverno;

- na RG1 as reanálises do NCEP e a ERA20C mostram tendência positiva, enquanto a ERA5 e ERAI indicam tendência negativa próximo à costa sudeste do Brasil e positiva em direção à região sul; na RG2 há tendência positiva na frequência de ciclones na reanálise NCEP20C e um gradiente de tendência positiva, em geral, nas cercanias do Uruguai e negativa ao redor, nas demais reanálises, já na RG3 as reanálises indicam, tanto no verão quanto no inverno, tendências negativas.

- não foi encontrada correlação entre a série anual das anomalias da frequência de ciclones e da ODP, enquanto há correlação negativa com a OMA.

Por fim, ressalta-se que mesmo não sendo possível afirmar qual é a reanálise mais realística, em função da inexistência de uma base de dados proveniente somente de observações para a realização de validação, a maior parte das características climáticas dos

ciclones nas diferentes reanálises são convergentes, o que fornece confiabilidade para o entendimento dos ciclones no HS.

2.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

BEFORT, D. J.; WILD, S.; KRUSCHKE, T.; ULBRICH, U.; LECKEBUSCH, G. C. Different long-term trends of extra-tropical cyclones and windstorms in ERA-20C and NOAA-20CR reanalyses. *Atmospheric Science Letters*, 17(11): 586-595, 2016.

BERRISFORD, P.; DEE, D.; POLI, P.; *et al.* The ERA-Interim archive, version 2.0. *ERA Report Series*, 2011. Available in <https://www.ecmwf.int/en/elibrary/8174-era-interim-archive-version-20>

BLOOMFIELD, H. C.; SHAFFREY, L. C.; HODGES, K. I.; VIDALE, P. L. A critical assessment of the long term changes in the wintertime surface Arctic Oscillation and Northern Hemisphere storminess in the ERA20C reanalysis. *Environmental Research Letters*, 13(9): p. 94004., 2018. doi: <https://doi.org/10.1088/17489326/aad5c5>

CELEMÍN, A. H. *Meteorologia Práctica*. Edición del Autor, Mar del Plata, República Argentina, 313 pp, 1984.

CHANG, E. K.; YAU, A. M. Northern Hemisphere winter storm track trends since 1959 derived from multiple reanalysis datasets. *Climate Dynamics*, 47(5-6): 1435-1454, 2016.

COMPO, G. P.; WHITAKER, J. S.; SARDESHMUKH, P. D.; *et al.* The twentieth century reanalysis project. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137(654): 1-28, 2011.

COPERNICUS CLIMATE CHANGE SERVICE (C3S). *ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate*, 2017.

CRESPO, N. M. A potential vorticity perspective on cyclones over South America. Tese de Doutorado em Meteorologia, IAG/USP, 104p., 2019. DOI:10.11606/T.14.2019.tde-17122019-154313.

CRESPO, N. M.; DA ROCHA, R. P.; DE JESUS, E. M. Cyclone density and characteristics in different reanalyses dataset over South America. *EGU General Assembly*, 2020a, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-11316>.

CRESPO, N. M.; DA ROCHA, R. P.; SPRENGER, M.; WERNLI, H. A potential vorticity perspective on cyclogenesis over centre-eastern South America. *International Journal of Climatology*, 1–16, 2020b. <https://doi.org/10.1002/joc.6644>.

DE JESUS, E.; DA ROCHA, R. P.; CRESPO, N. M.; REBOITA, M. S.; GOZZO, L. F. Multi-model climate projections of the main cyclogenesis hot-spots and associated winds in

South America eastern coast. *Climate Dynamics*, 2020. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05490-1>

ENFIELD, D. B.; MESTAS-NUÑEZ, A. M.; TRIMBLE, P. J. The Atlantic multidecadal oscillation and its relation to rainfall and river flows in the continental U.S. *Geophysical Research Letters*, 28(10): 2077-2080, 2001.

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

GRIEGER, J.; LECKEBUSCH, G. C.; RAIBLE, C. C.; RUDEVA, I.; SIMMONDS, I. Subantarctic cyclones identified by 14 tracking methods, and their role for moisture transports into the continent. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 70(1): 1-18, 2018.

HERSBACH, H., BELL, B.; BERRISFORD, P.; HORÁNYI, A.; MUÑOZ-SABATER, J.; NICOLAS, J. P.; RADU, R.; SCHEPERS, D.; SIMMONS, A.; SOCI, C.; DEE, D. ECMWF Global Reanalysis: goodbye ERA-Interim, hello ERA5. *ECMWF Newsletter*, 159: 17-24, 2019.

HODGES, K. I. Confidence intervals and significance tests for spherical data derived from feature tracking. *Monthly Weather Review*, 136(5): 1758-1777, 2008.

HODGES, K. I.; LEE, R. W.; BENGTSSON, L. A comparison of extratropical cyclones in recent reanalysis ERA-Interim, NASA MERRA, NCEP CFSR, and JRA-25. *Journal of Climate*, 24(18): 4888-4906, 2011.

HODGES, K.; COBB, A.; VIDALE, P. L. How well are tropical cyclones represented in reanalysis datasets? *Journal of Climate*, 30: 5243-5264, 2017.

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

KALNAY, E.; KANAMITSU, M.; KISTLER, R.; *et al.* The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77(3): 437-472, 1996.

KANAMITSU, M.; EBISUZAKI, W.; WOOLLEN, J.; YANG, S.-K.; HNILO, J. J.; FIORINO, M.; POTTER, G. L. NCEP/DOE AMIP-II reanalysis (R-2), *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 83: 1631 – 1643, 2002.

KAYANO, M. T.; ROSA, M. B.; RAO, V. B.; ANDREOLI, R. V.; SOUZA, R. A. F. Relations of the Low-Level Extratropical Cyclones in the Southeast Pacific and South Atlantic to the Atlantic Multidecadal Oscillation. *Journal of Climate*, 32: 4167-4178, 2019.

KENDALL, M. G. A new measure of rank correlation. *Biometrika*, 30(1/2): 81-93, 1938.

KODAMA, C.; STEVENS, B.; MAURITSEN, T.; SEIKI, T.; SATOH, M. A New Perspective for Future Precipitation Change from Intense Extratropical Cyclones. *Geophysical Research Letters*, 46(21): 12435-12444, 2019.

- KUNKEL, K. E.; EASTERLING, D. R.; KRISTOVICH, D. A.; GLEASON, B.; STOECKER, L.; SMITH, R. Meteorological causes of the secular variations in observed extreme precipitation events for the conterminous United States. *Journal of Hydrometeorology*, 13(3): 1131-1141, 2012.
- KRUSCHKE, T.; RUST, H. W.; KADOW, C.; LECKEBUSCH, G. C.; ULBRICH, U. Evaluating decadal predictions of northern hemispheric cyclone frequencies. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 66(1): p.22830, 2014.
- LECKEBUSCH, G. C.; ULBRICH, U. On the relationship between cyclones and extreme windstorm events over Europe under climate change. *Global and Planetary Change*, 44(1-4): 181-193, 2004.
- LECKEBUSCH, G. C.; KOFFI, B.; ULBRICH, U.; PINTO, J. G.; SPANGEHL, T.; ZACHARIAS, S. Analysis of frequency and intensity of European winter storm events from a multi-model perspective, at synoptic and regional scales. *Climate Research*, 31(1): 59-74, 2006.
- LEONARD, S. R.; TURNER, J.; VAN DER WAL, A. An assessment of three automatic depression tracking schemes. *Meteorological Applications*, 6(2): 173-183, 1999.
- LIM, E. P.; SIMMONDS, I. Southern Hemisphere winter extratropical cyclone characteristics and vertical organization observed with the ERA-40 data in 1979–2001. *Journal of Climate*, 20(11): 2675-2690, 2007.
- MANTUA, N. J.; HARE, S. R.; ZHANG, Y.; WALLACE, J. M.; FRANCIS, R. C. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(6): 1069-1080, 1997.
- 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*, 39(3): 155-166, 1991a.
- MURRAY, R. J.; SIMMONDS, I. A numerical scheme for tracking cyclone centres from digital data. Part II: application to January and July general circulation model simulations. *Australian Meteorological Magazine*, 39(3): 167-180, 1991b.
- NEU, U.; AKPEROV, M.; BELLENBAUM, N., *et al.* MILAST: A Community Effort to Intercompare Extratropical Cyclone Detection and Tracking Algorithms. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 94 (4): 529-547, 2013.
- PEZZA, A. B.; AMBRIZZI, T. Variability of Southern Hemisphere cyclone and anticyclone behavior: Further analysis. *Journal of Climate*, 16(7): 1075-1083, 2003.
- PEZZA, A. B.; RASHID, H. A.; SIMMONDS, I. Climate links and recent extremes in Antarctic sea ice, high-latitude cyclones, Southern Annular Mode and ENSO. *Climate Dynamics*, 38(1-2): 57-73, 2012.

- PINTO, J. G.; SPANGEHL, T.; ULBRICH, U.; SPETH, P. Sensitivities of a cyclone detection and tracking algorithm: individual tracks and climatology. *Meteorologische Zeitschrift*, 14(6): 823-838, 2005.
- POLI, P.; HERSBACH, H.; DEE, D. P.; *et al.*. ERA-20C: An atmospheric reanalysis of the twentieth century. *Journal of Climate*, 29(11): 4083-4097, 2016.
- REBOITA, M. S. *Ciclones extratropicais sobre o Atlântico Sul: Simulação climática e experimentos de sensibilidade* (Tese de doutorado), Universidade de São Paulo (IAG/USP), 2008.
- REBOITA, M. S.; DA ROCHA, R. P.; AMBRIZZI, T.; SUGAHARA, S. (2010). South Atlantic Ocean cyclogenesis climatology simulated by regional climate model (RegCM3). *Climate Dynamics*, 35(7-8): 1331-1347, 2010.
- REBOITA, M. S.; DA ROCHA, R. P.; AMBRIZZI, T. Dynamic and Climatological Features of Cyclonic Developments over Southwestern South Atlantic Ocean, In: Veress, B.; Szigethy, J. (Org.). *Horizons in Earth Science Research*, 6: 135-160, 2012.
- 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*, 45(7-8): 1929-1944, 2015.
- REBOITA, M. S.; GAN, M. A.; DA ROCHA, R. P.; CUSTÓDIO, I. S. Ciclones em Superfície nas Latitudes Austrais: Parte I-Revisão Bibliográfica. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 32(2): 171-186, 2017.
- REBOITA, M. S.; DA ROCHA, R. P.; DE SOUZA, M. R.; LLOPART, M. Extratropical cyclones over the southwestern South Atlantic Ocean: HadGEM2-ES and RegCM4 projections. *International Journal of Climatology*, 38(6): 2866-2879, 2018.
- REBOITA, M. S.; REALE, M.; DA ROCHA, R. P.; GIORGI, F.; GIULIANI, G.; COPPOLA, E.; NINO, R. B. L.; LLOPART, M., TORRES, J. A.; CAVAZOS, T. Future Changes in the Wintertime Cyclonic Activity over the CORDEX-CORE Southern Hemisphere domains in a Multi-Model Approach. *Climate Dynamics*, doi: 10.1007/s00382-020-05317-z, 2020.
- SIMMONDS, I.; BI, D.; HOPE, P. Atmospheric water vapor flux and its association with rainfall over china in summer. *Journal of Climate*, 12(5): 1353-1367, 1999.
- SIMMONDS, I. R.J.; MURRAY, R.M. A refinement of cyclone tracking methods with data from FROST. *Australian Meteorological Magazine* 28: 617-622, 1999.
- SIMMONDS, I.; KEAY, K. Mean Southern Hemisphere extratropical cyclone behavior in the 40-year NCEP–NCAR reanalysis. *Journal of Climate*, 13(5): 873-885, 2000.
- SIMMONDS, I.; KEAY, K.; LIM, E. P. Synoptic activity in the seas around Antarctica. *Monthly Weather Review*, 131(2): 272-288, 2003.
- SINCLAIR, M. R. An objective cyclone climatology for the Southern Hemisphere. *Monthly Weather Review*, 122(10): 2239-2256, 1994.

TILININA, N.; GULEV, S. K.; RUDEVA, I.; KOLTERMANN, P. Comparing cyclone life cycle characteristics and their interannual variability in different reanalyses. *Journal of Climate*, 26(17): 6419-6438, 2013.

TILININA, N.; GULEV, S. K.; BROMWICH, D. H. New view of Arctic cyclone activity from the Arctic system reanalysis. *Geophysical Research Letters*, 41(5): 1766-1772, 2014.

VERA, C. S.; VIGLIAROLO, P. K.; BERBERY, E. H. Cold Season Synoptic-Scale Waves over Subtropical South America. *Monthly Weather Review*, 130: 684-699, 2002.

VESSEY, A. F.; HODGES, K. I.; SHAFFREY, L. C. *et al.* An inter-comparison of Arctic synoptic scale storms between four global reanalysis datasets. *Climate Dynamics*, 54: 2777–2795, 2020.

WANG, X. L.; FENG, Y.; COMPO, G. P.; SWAIL, V. R.; ZWIERS, F. W.; ALLAN, R. J.; SARDESHMUKH, P. D. Trends and low frequency variability of extra-tropical cyclone activity in the ensemble of twentieth century reanalysis. *Climate Dynamics*, 40(11-12): 2775-2800, 2013.

WANG, X. L.; FENG, Y.; CHAN, R.; ISAAC, V. Inter-comparison of extra-tropical cyclone activity in nine reanalysis datasets. *Atmospheric Research*, 181: 133-153, 2016.

WICKSTRÖM, S.; JONASSEN, M. O.; VIHMA, T.; UOTILA, P. Trends in cyclones in the high-latitude North Atlantic during 1979–2016. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2019.

ZAHN, M.; AKPEROV, M.; RINKE, A.; FESER, F.; MOKHOV, I. I. Trends of cyclone characteristics in the Arctic and their patterns from different reanalysis data. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123(5): 2737-2751, 2018.

IV. CAPÍTULO 3 - CICLONES TROPICAIS E TRANSIÇÕES TROPICAIS NO OCEANO ATLÂNTICO SUL PROJETADAS COM O RegCM4 e MCGs

3.1 INTRODUÇÃO

O oceano Atlântico Sul apresenta condições climatológicas propícias à gênese de ciclones extratropicais (Gan; Rao, 1991; Hoskins; Hodges, 2005; Reboita et al., 2010, 2012; 2015; 2018a; de Jesus et al., 2020) e subtropicais (Gozzo et al., 2014, 2017; Reboita et al., 2018a) e, em raras ocasiões, de ciclones tropicais (Pezza e Simmonds, 2005; McTaggart-Cowan et al., 2006; Lauton et al., 2021; Reboita et al., 2021). Entretanto, esses tipos de ciclones não necessariamente permanece com as mesmas características desde à gênese ao decaimento, por exemplo, um ciclone pode se formar como ciclone extratropical, passar por um estágio intermediário de subtropical ou híbrido e se transformar em tropical (processo chamado de transição tropical - TT). Por isso, a atmosfera é considerada um *continuum* (BEVEN, 1997; Hart, 2003). A TT foi o que originou o primeiro ciclone tropical, chamado de Catarina, registrado no Atlântico Sul desde o início da era-satelital (Pezza e Simmonds, 2005; McTaggart-Cowan et al., 2006). Já o ciclone tropical Iba ocorrido em 2019 foi uma ciclogênese tropical pura e decaiu como extratropical (Reboita et al., 2021).

De maneira breve, os ciclones extratropicais possuem gênese associada a gradientes horizontais de temperatura em superfície (região de baroclinia) e à divergência de massa à jusante de cavados em médios e altos níveis da atmosfera (Charney, 1947; Celemín, 1984; Carlson, 1991; Gan e Rao, 1991; Reboita et al., 2012; Catto et al., 2019). No oceano Atlântico Sul, Reboita et al. (2018a), utilizando 5 diferentes reanálises e um algoritmo baseado na vorticidade relativa, mostram que a frequência média anual de ciclones extratropicais é de ~225 sistemas/ano, sendo o inverno a estação mais ciclogênética. Com relação aos ciclones tropicais, esses têm gênese, preferencialmente, entre as latitudes de 5° a 20°, em ambos os hemisférios, e são associados à transferência de fluxos de calor latente e sensível do oceano para a atmosfera e posterior liberação de calor latente por condensação (Gray, 1968; Emanuel, 1991). Esses sistemas causam *momentum* sobre o oceano gerando *upwelling* e mistura, o que leva à redução da temperatura da superfície do mar por onde passam (Jullien et al., 2012). Os ciclones tropicais são sistemas não-frontais e com núcleo quente, o que os difere dos ciclones extratropicais. O núcleo quente é verticalmente alinhado, profundo (estende-se da superfície até a tropopausa) e mais quente nas camadas superiores da troposfera (Emanuel, 2003). A

grande extensão vertical do núcleo quente é a chave da sustentação do ciclone tropical pelos fluxos de calor latente intensos da superfície do oceano, segundo a teoria *Wind Induced Surface Heat Exchange* (WISHE – Emanuel, 1987). Desde o início da era-satelital foram registrados dois ciclones tropicais no oceano Atlântico Sul: o Catarina em 2004, que foi o produto de uma TT, e o Iba em 2019, que nasceu como ciclone tropical puro (Reboita et al., 2021). Uma maneira de verificar se as condições ambientais são propícias à gênese de sistemas tropicais é através do índice de potencial de gênese de ciclones tropicais. Camargo et al. (2014) mostram que a reanálise do NCEP indica condições de gênese na costa sudeste do Brasil e que em projeções futuras também há condições para a formação desses sistemas (Camargo 2013; Camargo et al., 2014). Recentemente, Silva e Reboita (2021) computaram a climatologia mensal do índice de gênese nos oceanos ao redor da América do Sul usando a reanálise ERA5. Foi mostrado potencial mais acentuado entre Janeiro e Abril na costa sudeste do Brasil. Os autores chamam a atenção para que a existência de potencial não implica obrigatoriamente na ocorrência de ciclones tropicais.

Os ciclones subtropicais podem ter gênese como subtropical (como o caso do ciclone Anita em Março de 2010), ou ser a fase de transição de sistemas extratropicais para tropicais ou vice-versa (como o caso do furacão Catarina em Março de 2004 que, teve gênese extratropical transicionou para uma fase subtropical antes de chegar ao estágio de ciclone tropical), ou simplesmente a fase em que tropicais ou extratropicais podem decair. Em geral, os ciclones subtropicais possuem núcleo frio em altos níveis, como os ciclones extratropicais e os Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCANs, também conhecidos por *cutoff lows*), e quente em baixos níveis, como os ciclones tropicais, o que lhes confere também o nome de sistemas híbridos. Os ciclones subtropicais que se originam no oceano Atlântico Sul possuem gênese associada principalmente à divergência de massa à jusante de um cavado de pequena amplitude ou VCAN em níveis médios e altos da atmosfera, fraco cisalhamento vertical do vento e a convergência de fluxos de umidade em baixos níveis da atmosfera (Gozzo et al., 2014, 2017; Reboita et al., 2019a; da Rocha et al., 2019). Gozzo et al. (2014) e de Jesus et al. (2021) mostram que a região do Atlântico Sul, próxima à costa da região sul/sudeste do Brasil, é o local preferencial de gênese dos ciclones subtropicais. Além disso, Gozzo et al. (2014) indicam que a frequência média anual de ciclones subtropicais é de ~7,2 sistemas/ano e que o verão é a estação com maior ocorrência desses sistemas no Atlântico Sul.

Com relação à TT, Davis e Bosart (2004) descrevem os mecanismos desse processo através de dois paradigmas: um em que o precursor do ciclone tropical é um ciclone extratropical fraco (TT fraca) e outro que é forte (TT forte). A distinção deve-se ao fato de

que o ciclone extratropical forte é capaz de induzir trocas mar-ar, como descrito na teoria WISHE (troca de calor na superfície induzida pelo vento; Emanuel, 1987), enquanto que o ciclone extratropical fraco é apenas um agente organizador de convecção. No caso do ciclone extratropical forte, além da indução dos fluxos turbulentos mar-ar, há redução do cisalhamento vertical do vento através de processos diabáticos. A redução do cisalhamento ocorre tanto pelo escoamento divergente em altos níveis devido à convecção quanto pela redistribuição da vorticidade potencial (VP). Ambos tendem a homogeneizar os gradientes horizontais de VP acima do centro do ciclone. Do ponto de vista sinótico, a TT ocorre à medida que os ciclones saem do ambiente baroclínico e adentram um ambiente barotrópico. Uma dessas transições ocorreu na formação do Catarina (McTaggart-Cowan et al., 2006). Esse sistema tropical se desenvolveu a partir de um ciclone extratropical pré-existente numa região onde um bloqueio do tipo-dipolo contribuiu para reduzir o cisalhamento vertical do vento e a TSM estava mais quente do que o normal. A TT é frequente na bacia do Atlântico Norte que, de acordo com McTaggart-Cowan et al. (2008), 28% dos furacões registrados nessa bacia provêm de TT. Já na bacia do Atlântico Sul, McTaggart-Cowan et al. (2013) destacam que há condições ambientais propícias tanto para a TT classificada como fraca quanto para forte. Além disso, os autores mostram, através de dados observados, a ocorrência de dois casos de TT forte próximos à costa sul/sudeste do Brasil. Provavelmente, um é o caso Catarina.

Vários estudos mencionam que a convecção profunda é o prelúdio da formação dos ciclones tropicais; porém no oeste do Pacífico Norte, esses sistemas podem ocorrer sem tal situação (Chang et al., 2017). Ainda de acordo com Chang et al. (2017), os ciclones tropicais podem se formar associados à influência de uma forçante em altos níveis. Vários dias antes da formação do ciclone tropical, um máximo de VP aparece na troposfera superior e, posteriormente, se redistribui para baixos-médios níveis e se associa à convecção profunda podendo gerar um evento de transição tropical. Nesse contexto, Chang et al. (2019) descreveram um caso de TT no oeste do Pacífico Norte. O ciclone extratropical teve suporte da intrusão de VP da estratosfera. Posteriormente, o cavado na alta troposfera favoreceu a formação de uma *cutoff low* (processo que pode ser decorrente da quebra da onda de Rossby). Essa transição é suportada pela liberação de calor latente via convecção profunda; como a *cutoff low* possui centro frio, gera instabilidade em níveis mais baixos. Em baixos níveis, a intensificação da vorticidade está associada com a convergência do fluxo de umidade. À medida que a vorticidade em baixos níveis se intensifica sobre as águas mais quentes em direção ao oeste do oceano Pacífico Norte, a convergência de umidade favorece a convecção

profunda. O acúmulo subsequente de calor latente redistribui a VP na troposfera e conduz à formação do ciclone tropical. O processo descrito é basicamente o apresentado por Davis e Bosart (2006) e que também é destacado na revisão de Martius e Rivière (2016). Bentley e Metz (2016) descreveram um caso incomum de TT no leste do oceano Pacífico Norte. O ciclone extratropical se desenvolveu corrente abaixo de um cavado na alta troposfera e apresentou seclusão quente. A partir do aprisionamento de ar quente no centro do ciclone e o aquecimento adicional via calor sensível na direção mar-ar, o ciclone evoluiu para um sistema tropical.

Para se definir se um ciclone é do tipo extratropical, subtropical ou tropical, bem como se possui transições ao longo do ciclo de vida, pode-se utilizar a metodologia do espaço de fase dos ciclones (*Cyclone Phase Space – CPS*) de Hart (2003). O CPS utiliza três parâmetros para descrever a estrutura dinâmica e termodinâmica dos ciclones (Hart, 2003): a espessura da camada 600-900 hPa e o vento térmico na baixa troposfera (600-900 hPa) e na alta troposfera (300-600 hPa). A metodologia do CPS tem sido aplicada tanto para estudos de caso (Dias Pinto et al., 2013; Dutra et al., 2017; Gozzo et al., 2017; Reboita et al., 2019b; 2021) quanto para climatologias no Atlântico Sul (Evans e Braun, 2012; Gozzo et al., 2014; de Jesus et al., 2021).

Diante do exposto, o objetivo deste estudo é classificar os tipos de ciclones no oceano Atlântico Sul em três projeções climáticas do *Regional Climate Model version 4* (RegCM4) e nos modelos do *Coupled Model Intercomparison Project* (CMIP5) que forneceram as condições de fronteira ao modelo regional, a fim de descrever a climatologia dos ciclones que nascem como tropicais e daqueles com transição tropical no oceano Atlântico Sul no clima presente e futuro.

3.2 METODOLOGIA

3.2.1 Dados

Os dados utilizados neste estudo são projeções climáticas de modelos globais do CMIP5 e do modelo regional RegCM4 e a reanálise ERA-Interim (Dee et al., 2011) do *European Centre for Medium Range Weather Forecasts* (ECMWF). Os modelos globais utilizados são HadGEM2-ES (Collins et al. 2011), MPI-ESM-MR (Giorgetta et al. 2013) e GFDL-ESM2M (Dunne et al. 2012). Esses modelos também dirigiram o RegCM4, que foi integrado com 50 km de resolução horizontal, no domínio da América do Sul, sugerido pelo

Coordinated Regional Downscaling Experiment (CORDEX) (Figura 1), e no período de 1979 a 2080. O cenário climático considerado é o *Representative Concentration Pathway 8.5 (RCP8.5; Van Vuuren et al., 2011)*. Detalhes dessas projeções podem ser encontrados, por exemplo, em Reboita et al. (2018b). No presente estudo são analisados três *timeslices*: 1979-2005, 2020-2050 e 2051-2080.

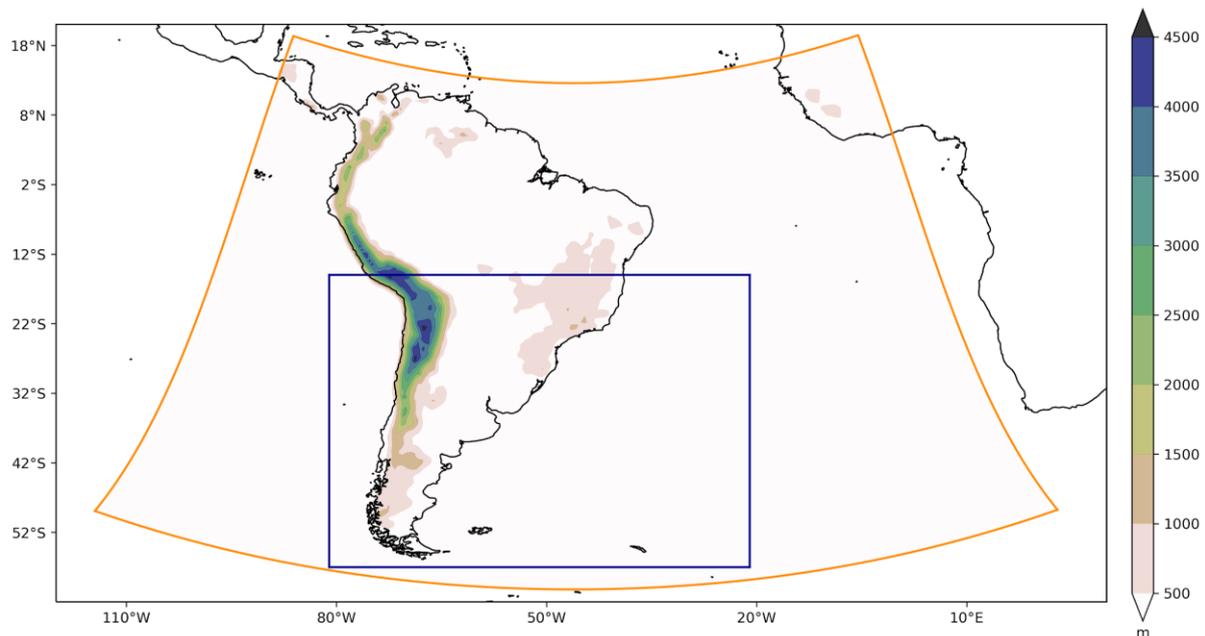


Figura 3.1 - Domínio e topografia (metros; sombreado) de simulação do RegCM4 (linha laranja) e área utilizada no rastreamento dos ciclones (linha azul, 15-57°S; 81°-21W).

3.2.2 Classificação dos Tipos de Ciclones

A classificação dos tipos de ciclones envolve a utilização de três algoritmos: (1) algoritmo de identificação e rastreamento dos ciclones, (2) algoritmo para determinar a estrutura térmica dos ciclones com base na metodologia do CPS e (3) algoritmo para a classificação dos ciclones. O terceiro algoritmo foi desenvolvido para esse estudo em linguagem Python com base nos critérios de Jesus et al. (2021). Na sequência são apresentados detalhes dos três algoritmos.

3.2.2.1 Rastreamento dos Ciclones

A base de dados de ciclones utilizada no estudo é a de de Jesus et al. (2020). Esses autores, utilizaram o algoritmo de *tracking* de ciclones de Reboita et al. (2010) nos dados da ERA-Interim e nas projeções climáticas dos modelos globais e regional a cada 6 horas. O

algoritmo identifica os ciclones com base na técnica do vizinho mais próximo, isto é, um ponto de grade é candidato a ser um ciclone se possui vorticidade relativa ciclônica menor do que os pontos vizinhos. No algoritmo foi utilizada a vorticidade relativa em 925 hPa. Embora a área de rastreamento dos sistemas incluir parte do oceano Pacífico (**Figura 3.1**), nas climatologias foram considerados apenas os ciclones que tiveram gênese no oceano Atlântico. Além disso, apenas os ciclones que apresentaram vorticidade menor ou igual a $1,5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ e tempo de vida de maior ou igual a 24 horas.

3.2.2.2 Estrutura Térmica dos Ciclones

Uma vez obtida a base de dados das trajetórias dos ciclones, o próximo passo é descrever a evolução da estrutura térmica desses sistemas. Portanto, a metodologia do CPS foi aplicada aos ciclones no Atlântico Sul identificados no rastreamento.

O algoritmo do CPS, desenvolvido por Hart (2003), requer duas informações de entrada: um arquivo com a trajetória do ciclone (latitude e longitude em cada horário sinótico), o que foi obtido com o algoritmo de Reboita et al. (2010), e o campo de altura geopotencial em níveis verticais nos horários sinóticos ao longo do ciclo de vida dos ciclones. Se é de interesse mostrar a intensidade do vento no diagrama de resultado, o usuário também tem que fornecer as componentes zonal e meridional do vento no nível de 925 hPa.

O CPS calcula três parâmetros: simetria térmica (B), vento térmico em baixos níveis da atmosfera ($-V_T^L$) e vento térmico em altos níveis ($-V_T^U$). O parâmetro B é obtido calculando-se a média da diferença de altura geopotencial entre 600 e 900 hPa, em um raio de 500 km a partir do centro do ciclone, entre os lados direito e esquerdo do sistema, que é definido com base no sentido de deslocamento:

$$B = h(\underline{Z_{600 \text{ hPa}} - Z_{900 \text{ hPa}} |_R} - \underline{Z_{600 \text{ hPa}} - Z_{900 \text{ hPa}} |_L}) \quad (1)$$

sendo Z é a altura geopotencial (m) dos níveis de 600 e 900 hPa, os índices R e L indicam os lados direito e esquerdo do sistema respectivamente, h refere-se ao valor de +1 para o HN e -1 para o HS.

$B < 10$ m indica que não há diferenças na espessura da camada entre ambos os lados do ciclone, situação que mostra praticamente a ausência de gradientes horizontais de

temperatura, o que é característico dos ciclones tropicais. Já $B > 10$ m indicam que o sistema está em um ambiente mais baroclínico, que é característico de ciclones extratropicais.

No CPS, o vento térmico (diferença vetorial do vento geostrófico entre dois níveis de pressão) é estimado através da perturbação da altura geopotencial do ciclone (ΔZ), dada pela Equação 2, entre as camadas 600-900 hPa ($-V_T^L$) e 300-600 hPa ($-V_T^U$). Em outras palavras, é calculado o gradiente da altura geopotencial dentro de um raio de 500 km entre as camadas de 900, 600 e 300 hPa e feita diferença entre o nível mais afastado da superfície e o mais próximo, conforme mostram as equações 3 e 4.

$$\Delta Z = Z_{MAX} - Z_{MIN} \quad (2)$$

em que Z_{MAX} é a altura geopotencial máxima em um nível de pressão dentro do raio de 500 km da tempestade e Z_{MIN} , a altura geopotencial mínima. A estrutura vertical do ciclone (núcleo frio *versus* quente) é definida pela derivada de ΔZ , aplicada para duas camadas troposféricas:

$$\frac{\partial(\Delta Z)}{\partial \ln(p)} \Big|_{900 \text{ hPa}}^{600 \text{ hPa}} = -|V_T^L| \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\Delta Z)}{\partial \ln(p)} \Big|_{600 \text{ hPa}}^{300 \text{ hPa}} = -|V_T^U| \quad (4)$$

Nos ciclones tropicais, como o vento é, em geral, mais intenso próximo à superfície e tende a enfraquecer com a altura no centro do ciclone (raio de 500 km), ΔZ irá diminuir com a altura e as derivadas das equações 3 e 4 mostram valor negativo, uma vez que o vento térmico pode ser definido como o cisalhamento do vento geostrófico; como há o sinal negativo na frente dos termos do lado direito das equações, logo $-V_T^L$ e $-V_T^U$ devem ser maiores do que zero indicando a presença de um sistema tropical. Como os ciclones extratropicais estão associados a gradientes horizontais de temperatura em superfície, isso implica em ventos que aumentam de intensidade com o aumento da altura na atmosfera. Dessa forma, ΔZ aumenta com a altura e as derivadas das equações 3 e 4 mostram valor positivo; como há o sinal negativo na frente dos termos do lado direito das equações, logo $-V_T^L$ e $-V_T^U$ devem ser menores do que zero indicando a presença de um sistema extratropical.

Na descrição geral da teoria do CPS é dito que os ciclones tropicais devem apresentar $-V_T^U > 0$, mas isso é apenas uma forma de simplificar a explicação, pois a atmosfera não

possui limiares rígidos. Por exemplo, um ciclone tropical com núcleo raso não mostra exatamente $-V_T^U > 0$, mas valores que podem estar entre -50 e 0, como é caso de vários ciclones tropicais mostrados por Hart em seu *website* (<http://moe.met.fsu.edu/cyclonephase/archive/index.html>) e também como o ciclone Iba documentado por Reboita et al. (2021).

O CPS fornece um arquivo para cada ciclone com os três parâmetros a cada passo de tempo do ciclone. Essas saídas são utilizadas como entrada no algoritmo de classificação dos ciclones.

3.2.2.3 Classificação dos Tipos de Ciclones

A partir da saída do CPS é feita a separação dos tipos de ciclones desejados. O algoritmo utilizado aqui foi desenvolvido em linguagem Python e separa os ciclones nos seus diferentes tipos e também identifica as TT. Esse é o diferencial em relação ao algoritmo de de Jesus et al. (2021), que só implementaram a classificação dos ciclones subtropicais.

Para facilitar o entendimento da metodologia é apresentado na **Figura 3.2** um fluxograma das etapas envolvidas na classificação dos ciclones. A classificação dos tipos de ciclones foca na fase inicial de vida desses sistemas e em sistemas com gênese no oceano (ou até 180 km dentro do continente). Para isso, é utilizada uma máscara com resolução horizontal de 1 km disponível através da biblioteca pública do Python *global_land_mask* (<https://pypi.org/project/global-land-mask/>). Há critérios específicos para cada tipo de ciclone (detalhes abaixo). Então, primeiro o algoritmo identifica os extratropicais, depois os subtropicais e tropicais. Por fim, uma reavaliação é feita nos extratropicais e subtropicais para identificação de TT.

Ciclone extratropical: um ciclone será classificado como extratropical se:

- tiver gênese a sul de 20°S e
- nas primeiras 36 horas do ciclo de vida (7 passos de tempo) apresentar $B > 25$ m para garantir a presença de gradiente horizontal de temperatura, $-V_T^L < -50$ e $-V_T^U < -80$.

Nesses critérios há uma flexibilização que pode ocorrer em até 2 passos de tempo durante as 36 horas iniciais, os limiares da flexibilização são 20 m para o B, $-V_T^L < -30$ e $-V_T^U < -60$. Além disso, dentro dos 7 primeiros tempos é permitida uma falha dos critérios apresentados, tanto para limiares padrões, quanto para as flexibilizações.

Ciclone subtropical: um ciclone será classificado como subtropical se:

- tiver gênese a norte de 40°S e durante a suas primeiras 36 horas (7 passos de tempo) apresentar $-25 \leq B \leq 25$ m, $-V_T^L \geq -50$ e $-V_T^U \leq -10$.

Entretanto, esses limiares não precisam ocorrer em todos os 7 passos de tempo. de Jesus (2020) após vários testes de sensibilidade para reproduzir objetivamente a climatologia de ciclones subtropicais de Gozzo et al. (2014), que se baseiam não só nos parâmetros do CPS, mas também na configuração de diferentes campos atmosféricos, mostra que é necessário a utilização de limiares mais flexíveis e que variam por estação do ano (**Tabela 3.1**): verão e outono, inverno e primavera, pois os ciclones apresentam características mais similares dos parâmetros do CPS entre tais estações do ano. Assim, é permitido que dentro dos 7 passos de tempo, haja flexibilização em 2 tempos (consecutivos ou não), isto é, que ocorram valores entre os limiares mostrados na **Tabela 3.1**, com exceção do $-V_T^L$ para o verão e outono, que pode ser flexibilizado em até 3 tempos.

Tabela 3.1 Limiares de flexibilização para a classificação de ciclones subtropicais.

Verão e Outono	Inverno e Primavera
$-50 < B < 50$	$-35 < B < 35$
$VTI < -127,5$	$VTI < -75$
$VTU > 17,5$	$VTU > 11$

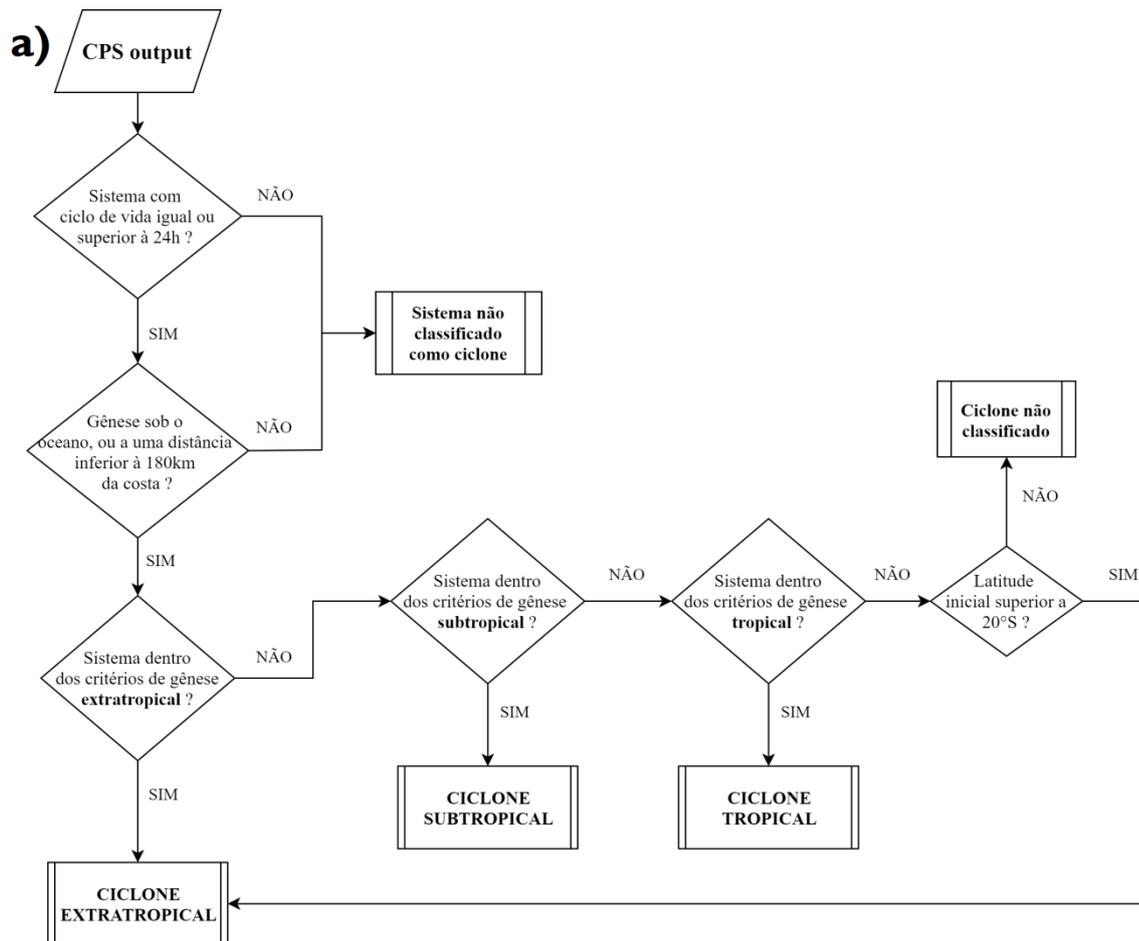
Ciclone tropical: um ciclone será classificado como tropical se:

- tiver gênese da região tropical até 40°S e
- durante as suas primeiras 24 horas (5 passos de tempo) deve apresentar $-10 < B < 10$ m para garantir a ausência de gradiente horizontal de temperatura, $-V_T^L > 0$ e $-V_T^U > -50$.

Um critério adicional é que dentro dos 5 passos de tempo pelo menos um tem que ter $-V_T^U > 0$. Os ciclones tropicais de núcleo médio/raso embora tenham $-V_T^U < 0$, nos primeiros passos de tempo sempre mostram valor positivo próximo de zero. Isso também ajuda a diferenciar casos de subtropicais e tropicais.

Transição tropical: os ciclones que foram classificados com gênese na categoria de extratropical e subtropical são reavaliados. Após o período de 36 h a partir da gênese (isto é, a partir do *timestep* 8) é verificado se: em algum momento do ciclo de vida o ciclone mantém nas próximas 36 h valor de $-10 < B < 10$ m, $-V_T^L > -5$ e $-V_T^U > -50$ em latitude menor do

que 35°S, sendo permitida até 2 falhas (flexibilização) para os critérios do CPS. Os sistemas que satisfazem esses critérios são classificados como casos de TT.



b) TRANSIÇÃO TROPICAL (TT)

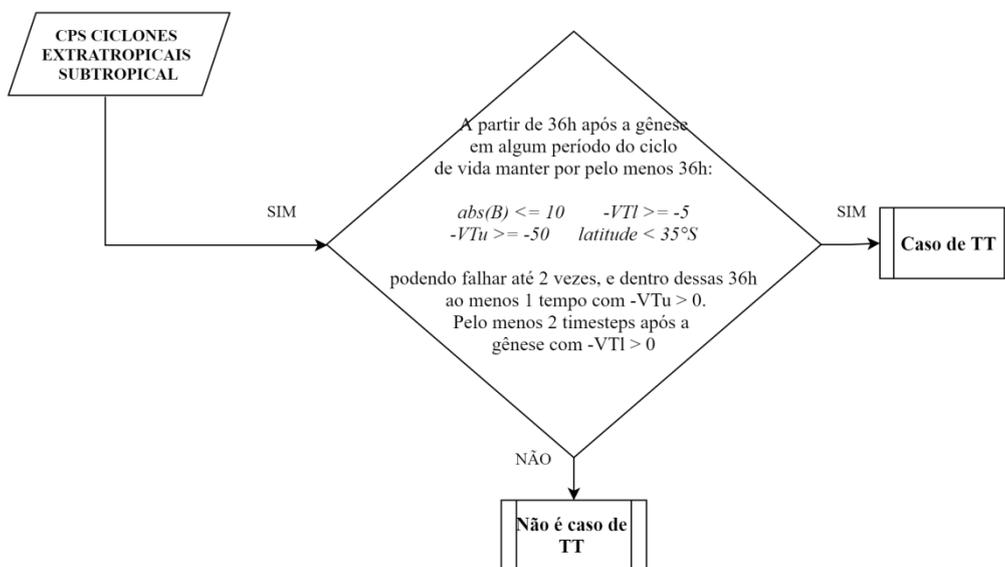


Figura 3.2 - Fluxogramas (a) mostrando as etapas para a classificação dos tipos de ciclones e (b) das transições tropicais

3.2.3 Análises

O estudo apresenta inicialmente a validação do algoritmo de classificação automática para os sistemas híbridos, considerando a detecção automática desenvolvida por de Jesus et al. (2021) e a detecção manual de Gozzo et al (2014), para avaliação são considerados os indicadores estatísticos raiz do erro quadrático médio (RMSE, em inglês) e da correlação de Pearson (r), apresentados nas equações 5 e 6, respectivamente.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(Ei - Oi)^2}{N}} \quad (5)$$

$$r = \frac{\sum(Ei - \bar{E})(Oi - \bar{O})}{\sqrt{\sum(Ei - \bar{E})^2 \sum(Oi - \bar{O})^2}} \quad (6)$$

em que, E é o número de ciclones subtropicais classificados automaticamente, O é o número de ciclones subtropicais detectados por Gozzo et al. (2014), o indicadores subscritos e superescritos indicam, respectivamente, o valor anual e a média de todo período do número de sistemas híbridos.

Em seguida, é considerado o *ensemble* dos ciclones classificados pelo MCGs e RegCM4 para as análises do ciclo anual e a tendência, nos períodos: 1979-2005, 2020-2050 e 2051-2080. A significância estatística da tendência foi calculada por período de análise utilizando o teste não paramétrico de Mann Kendall modificado por Yue e Wang (2004) considerando o nível de confiança de 90%. Para a aplicação do teste foi utilizada uma biblioteca pública em Python que engloba diversas variantes do teste não paramétrico de Mann Kendall, mas detalhes com relação à biblioteca são apresentados por Hussain et al. (2019).

Também é apresentada uma breve descrição da primeira TT documentada no Atlântico Sul (caso do furacão Catarina, em março de 2004), com base no CPS proveniente da ERA-Interim. Para os MCGs e RegCM, em cada período, é apresentado as coordenadas inicial de cada TT e a variabilidade de cada parâmetro do CPS no período de 18 h antes a 18 h após a ocorrência da TT.

3.3 RESULTADOS

3.3.1 Validação do Algoritmo de Classificação dos Tipos de Ciclones

Antes da aplicação do algoritmo para a classificação dos tipos de ciclones, assim como de Jesus et al. (2021), o algoritmo construído é validado através de comparação com a climatologia de ciclones subtropicais de Gozzo et al. (2014). A climatologia de Gozzo et al. (2014) utiliza a reanálise ERA-Interim e o domínio de *tracking* dos ciclones se restringe a 50°S-10°S. A **Figura 3.3a** mostra a série temporal da frequência anual de ciclones subtropicais nos três estudos (Gozzo et al., 2014; de Jesus et al., 2021 e o presente estudo), enquanto a **Figura 3.3b** mostra o ciclo anual. Embora, os algoritmos de de Jesus et al. (2021) e o usado aqui utilizem os mesmos critérios para os sistemas subtropicais, diferenças entre os resultados podem ocorrer devido à: (a) resolução horizontal da máscara oceano/continente utilizada (os autores utilizaram resolução de 0,125° enquanto aqui a resolução foi de 0,01°) e (b) pré-processamento da classificação (os autores distribuem os ciclones em uma grade com resolução de 0,125° antes da classificação dos sistemas, enquanto neste estudo é considerada as coordenadas provenientes do *tracking*). Na **Figura 3.3a** é obtida correlação de 0,84 e erro médio quadrático de 1,43 entre o resultado do presente estudo com o de Gozzo et al. (2014), enquanto de Jesus et al. (2021) obtém 0,82 e 1,82 respectivamente. O ciclo anual também é bem reproduzido com a maior frequência de ciclones subtropicais no verão e menor no inverno (**Figura 3.3b**). Uma vez que o algoritmo desenvolvido para o presente estudo apresenta ótima performance na classificação dos ciclones subtropicais, esse é empregado para a classificação de todos os tipos de ciclones com base nos critérios descritos na **seção 3.2.2.3**.

Como os resultados do trabalho não enfocarão as projeções dos ciclones subtropicais, aqui é apresentada somente uma informação adicional sobre esses sistemas no Atlântico Sul para comparação com Evans e Braun (2012). Tais autores mostraram que a gênese de ciclones subtropicais ocorre preferencialmente em regiões com TSM entre 19-20°C. Porém, comparando-se a climatologia da TSM (Reboita, 2008; Silva e Reboita, 2021) com a localização dos ciclones identificados por Gozzo et al. (2014), percebe-se que a TSM é mais quente do que a apresentada por Evans e Braun (2012). Então, a distribuição de frequência da TSM no momento da gênese e ao longo do ciclo de vida dos ciclones subtropicais foi calculada, com base na reanálise ERA-Interim, no período de 1979 a 2005. A **Figura 3.4a** mostra que há maior frequência de gênese entre 24-26°C que é acima dos 19-20°C mostrado

por Evans e Braun (2012). Considerando todo o ciclo de vida dos ciclones subtropicais (Figura 3.4b), também há maior ocorrência de sistemas sobre TSMs de 24-26°C. A diferença em relação à Evans e Braun (2012) é que esses autores incluem sistemas mais a sul do que as demais climatologias. Isso sugere a possível inclusão na climatologia de sistemas que não sejam subtropicais.

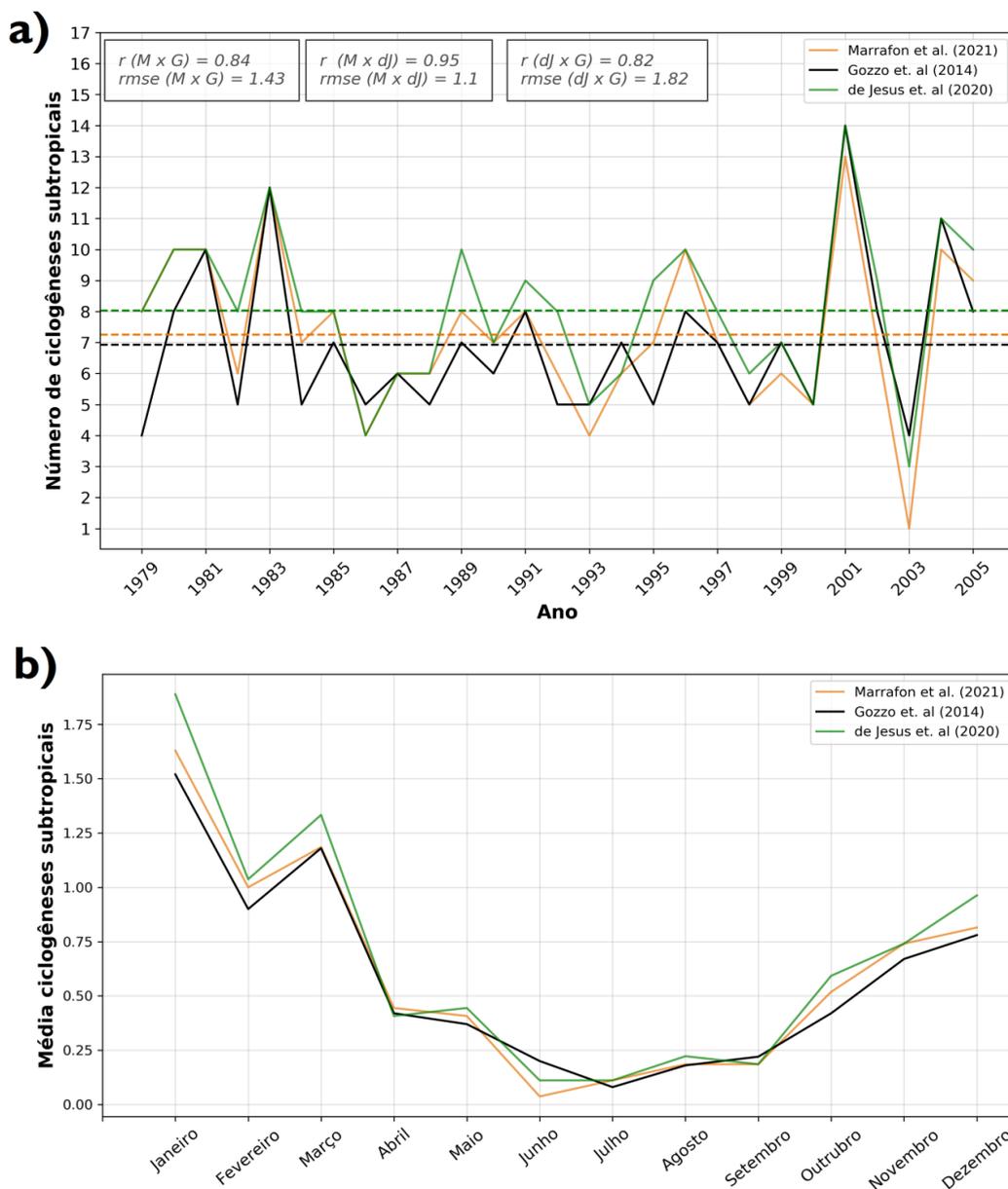


Figura 3.3 - (a) Frequência anual e **(b)** ciclo anual de ciclones subtropicais no oceano Atlântico Sul entre 1979 e 2005 obtida por Gozzo et al. (2014, linha preta), de Jesus et al. (2021, linha verde) e neste estudo (linha laranja).

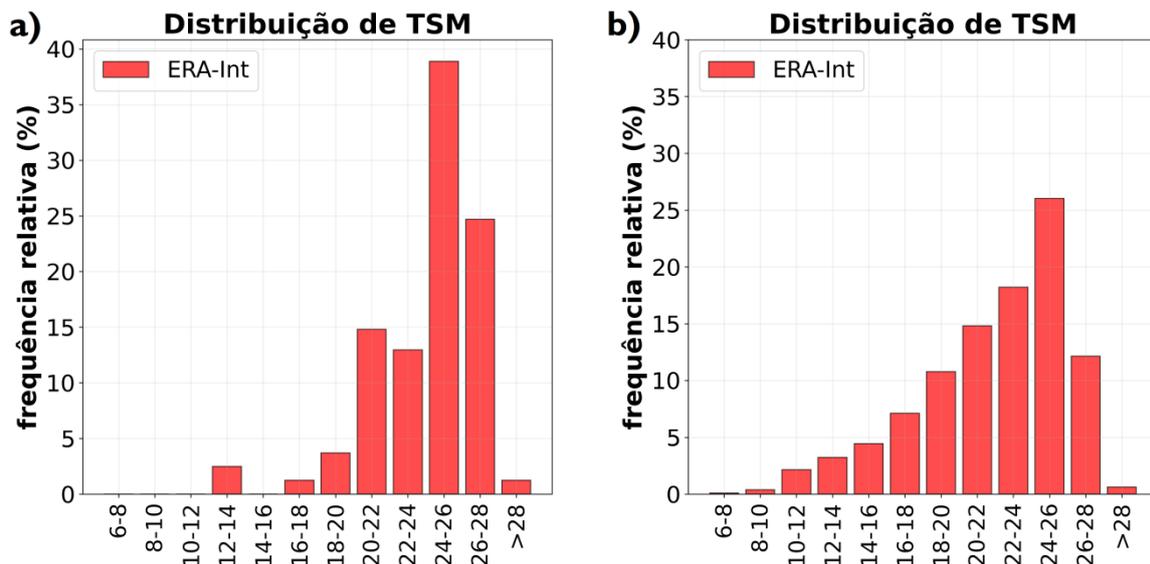


Figura 3.4 - Distribuição de frequência dos ciclones subtropicais identificados na ERA-Interim entre 1979 e 2005 com base na TSM (°C) registrada (a) na gênese desses sistemas e (b) ao longo de todo o ciclo de vida.

3.3.2 Climatologias dos Ciclones Extratropicais, Tropicais e de TT

Nessa seção, a frequência anual e o ciclo anual dos ciclones tropicais e das TT são apresentados para o clima presente e futuro. Além disso, é incluída a climatologia dos sistemas extratropicais. Os resultados para os ciclones subtropicais não são apresentados uma vez que há uma análise detalhada desses sistemas em de Jesus et al. (2021). Além disso, de Jesus et al. (2020, 2021) mostram que o RegCM4 tem habilidade em reproduzir a climatologia dos ciclones no clima presente, por isso (e por motivos de brevidade) aqui não serão mostradas as validações dos modelos com a reanálise. Outro motivo para a não apresentação da validação é que o foco do estudo é nas tendências projetadas pelos modelos.

A **Figura 3.5a** mostra a frequência anual dos ciclones extratropicais enquanto a **Figura 3.5b**, o ciclo anual. O RegCM4 simula maior frequência de ciclones extratropicais do que o *ensemble* dos MCGs, o que pode estar relacionado à uma resolução horizontal mais refinada após a regionalização (*ensemble* RegCM4; Sinclair, 1994), entretanto, ambos mostram tendência negativa de ocorrência desses sistemas até 2080, como apresentado na **Tabela 3.2**. O padrão do ciclo anual dos ciclones extratropicais segue a literatura, com a maior frequência no inverno (Gan; Rao, 1991; Reboita et al., 2015, 2018a). A média mensal dos ciclones no clima presente mostrada na **Figura 3.5b** é menor do que a média de ~19 sistemas/mês em Reboita et al. (2018a) e das análises mensais apresentadas em

www.grec.iag.usp.br, devido à diferença no tamanho das regiões analisadas. O ciclo anual dos ciclones nos *ensembles* também deixa claro a diminuição da frequência desses sistemas no clima futuro, o que concorda, por exemplo, com Reboita et al. (2020).

Considerando os ciclones tropicais (**Figura 3.5c-d**), ou seja, sistemas que têm gênese nessa categoria, os modelos simulam a ocorrência de pelo menos um ciclone por ano no Atlântico Sul no clima presente. Isso é uma deficiência dos modelos visto que no Atlântico Sul desde a era satelital até 2005 só há o registro do furacão Catarina em 2004, e que foi um evento de TT (mais detalhes na próxima seção). Yanasse et al. (2014) também não mostram essa frequência de ciclones tropicais no Atlântico Sul no período de 1981 a 2011 em dados de reanálise. Por outro lado, Hodges et al. (2017), ao compararem 6 reanálises com dados observados (IBTrACS) entre 1979 a 2012, mostraram a ocorrência de um ciclone tropical por ano no oceano Atlântico Sul nos dados do IBTrACS, enquanto ~7 sistemas por ano em cada reanálise. Reboita et al. (2021) sugeriram que os critérios usados por Hodges et al. (2017) identificaram ciclones subtropicais ao invés de tropicais nas reanálises, já que o número obtido é similar ao da climatologia de subtropicais de Gozzo et al. (2014).

Tabela 3.2 - Tendência da frequência de ciclones extratropicais e tropicais por década calculada com o teste não paramétrico de Man-Kendall. Tendências com significância estatística ao nível de 90% são destacadas em negrito.

Período	MCGs		RegCM4	
	Extratropical	Tropical	Extratropical	Tropical
1979-2005	-2,9	0	-1,1	0
2020-2050	-0,5	0	-3,3	-0,03
2051-2080	-4,4	-0,04	-3,5	0,24

O ciclo anual dos ciclones tropicais mostra maior frequência entre os meses de janeiro a abril, período em que as águas do Atlântico Sul estão mais aquecidas e que há maior potencial de gênese de ciclones tropicais na costa brasileira conforme mostrado por Silva e Reboita (2021). Entretanto, há uma diferença entre os *ensembles* no clima presente: enquanto o *ensemble* dos MCGs mostra maior ocorrência de ciclones tropicais no mês de fevereiro, o RegCM4 mostra em março. Por outro lado, ambos concordam que a maior frequência desses sistemas no clima futuro é no mês de fevereiro. Em termos de clima futuro, os *timeslices* mostram algumas diferenças. No período de 2020-2050 é projetado redução da frequência dos ciclones tropicais comparado ao presente em ambos os *ensembles*, sendo projetada uma redução de 37,8% para o RegCM e 31,6% para o MCGs, enquanto no período de 2051-2080 é projetado aumento da frequência desses sistemas em 22,1% para o *ensemble* RegCM quando

comparado ao presente, em contrapartida para o mesmo período no *ensemble* MCGs é encontrada uma redução de 25%.

Como os ciclones são classificados pelas características da estrutura térmica obtidas dentro das primeiras 36 horas de vida, isso significa que eles podem evoluir para outra fase ao longo do ciclo de vida. Assim, uma nova avaliação foi realizada, após as primeiras 36 h, a fim de identificar as TT. Uma hipótese inicial era de que o número de TT seria grande no clima futuro, excedendo muito ao número de ciclones tropicais em decorrência das condições oceânicas mais quentes no clima futuro (Franco et al., 2020). Entretanto, os resultados não indicam isso. Pelo contrário, há um pequeno número desses eventos em cada projeção como é mostrado na **Tabela 3.3** e na **Figura 3.6**. O número de TT é bem variável em cada membro dos ensembles, mas em termos de valor médio, tanto no clima presente quanto futuro, nos MCGs e no RegCM4 há em média ~2,8 sistemas por década, considerando período estudado. Portanto, o número de TT é muito menor do que dos ciclones tropicais (**Figura 3.5**). Uma característica que se destaca na **Figura 3.6** é que há maior frequência de TT próximo à costa do Brasil nos MCGs do que no RegCM4, em que os sistemas aparecem afastados da costa.

Tabela 3.3 Número de ocorrência de TT médio por década. para cada modelo de projeção numérica no clima presente e períodos futuros.

	Período	HadGEM-ESM2	GFDL	MPI	Ensemble
GCM	1979-2005	5,2	1,5	3,3	3,3
	2020-2050	2,6	0,9	4,5	2,7
	2051-2080	2,3	1,3	5	2,9
RCM	1979-2005	0,7	1,1	6,7	2,9
	2020-2050	0	1	6,5	2,5
	2051-2080	0,6	1,3	6	2,6

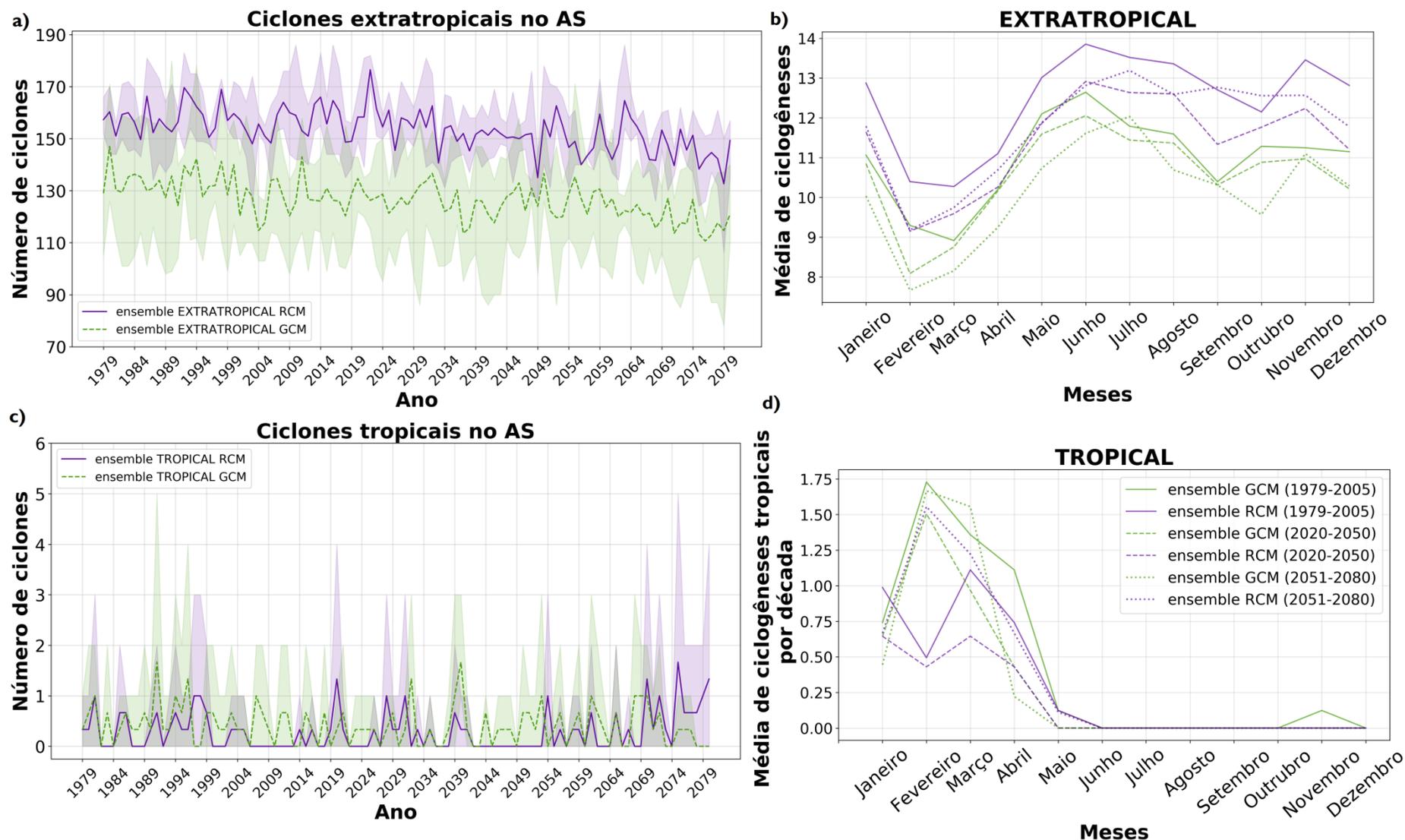


Figura 3.5 - Frequência anual e o ciclo anual dos ciclones (a,b) extratropicais e (c,d) tropicais no clima presente (1979-2005) e futuro (2020-2050 e 2051-2080). As regiões sombreadas em (a, c) indicam o intervalo entre a máxima e mínima frequência anual encontrada em cada membro dos

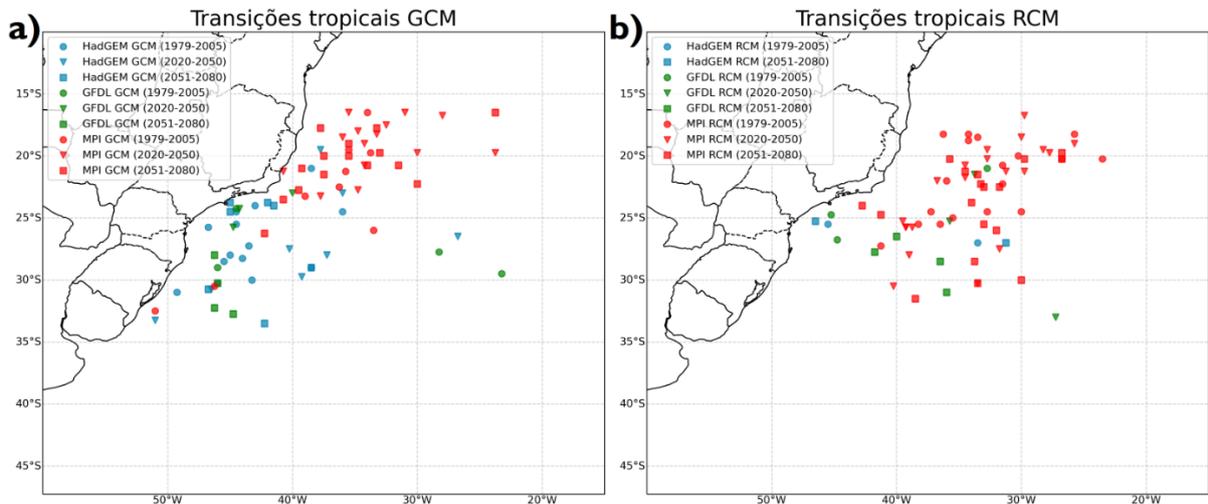


Figura 3.6 - Localização das TT em cada projeção climática dos (a) MCGs e do (b) RegCM4.

3.3.3 Características das Transições Tropicais

A fim de ilustrar/caracterizar um episódio de TT, inicia-se com a descrição da TT do furacão Catarina, identificado na reanálise ERA-Interim, mas não reproduzido pelas simulações climáticas. Na sequência são mostrados os valores médios dos parâmetros do CPS para os casos de TT indicados na **Tabela 3.3**.

O resultado do CPS para o caso da TT que resultou no furacão Catarina é apresentado na **Figura 3.7**, juntamente com a TSM obtida através da reanálise ERA-Interim. O algoritmo de rastreamento de ciclones identifica o início do sistema no dia 21 de março às 1200 UTC como um sistema em fase extratropical, já que $-V_T^L$ e $-V_T^U$ são < -50 e $B > 25$ m; nesse momento a TSM é de $26,1^\circ\text{C}$. Essa característica segue até o dia 21 de março às 1800 UTC. A partir das 0000 UTC do dia 22 de março, o sistema adquire características subtropicais, uma vez que o parâmetro $-V_T^L$ começa apresentar valores superiores (tendendo ao positivo) a -50 e B apresenta um valor de $23,92$ m. Ao longo do ciclo de vida, o parâmetro $-V_T^U$ tende a valores positivos, de forma que no dia 26 às 0600 UTC tem valor acima de -50 ($-39,6$) enquanto $-V_T^L$ apresenta valor de $14,96$ e B é $-0,69$ caracterizando a TT, a partir daí, o ciclone decai como sistema tropical. Na TT do Catarina a TSM é de $24,8^\circ\text{C}$ (**Figura 3.7**), valor similar ao obtido por McTaggart-Cowan et al. (2006) a partir de dados de análise do *Global Forecast System* (GFS) com espaçamento de grade de 1° provenientes do *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP).

Com relação às fases do sistema, McTaggart-Cowan et al. (2006) fizeram a classificação a partir da análise da pressão, intensidade do vento, TSM, cisalhamento vertical

do vento, função de corrente e imagens de satélite no canal infravermelho (**Figura 3.8**). Segundo os autores, o início fase híbrida é a partir do dia 24 de março às 0000 UTC e a TT no dia 25 às 0000 UTC. Quando comparado ao algoritmo de classificação utilizado neste estudo, McTaggart-Cowan et al. (2006) apresentam um início tardio para a fase híbrida e um adiantamento da TT, já que o resultado do CPS mostra que no dia 22 às 18 UTC o sistema já apresentava $-V_T^L > 0$ e $B \sim 10$ m caracterizando um sistema de núcleo quente com baixa assimetria, e uma fase subtropical de acordo com os limiares propostos por Gozzo et al. (2014). Com relação à TT, McTaggart-Cowan et al. (2006) apresentam o início da fase tropical (25 de março às 0000 UTC), quando a nebulosidade começa a se organizar ao redor do centro do sistema mostrando bandas espiraladas (**Figura 3.8**), traços característicos da nebulosidade de ciclones tropicais (Reboita et al., 2017); entretanto o olho do sistema começa a se organizar apenas no dia 26 às 0000 UTC, que é próximo ao início da fase tropical apresentada pelos parâmetros do CPS com início no dia 26 às 0600 UTC.

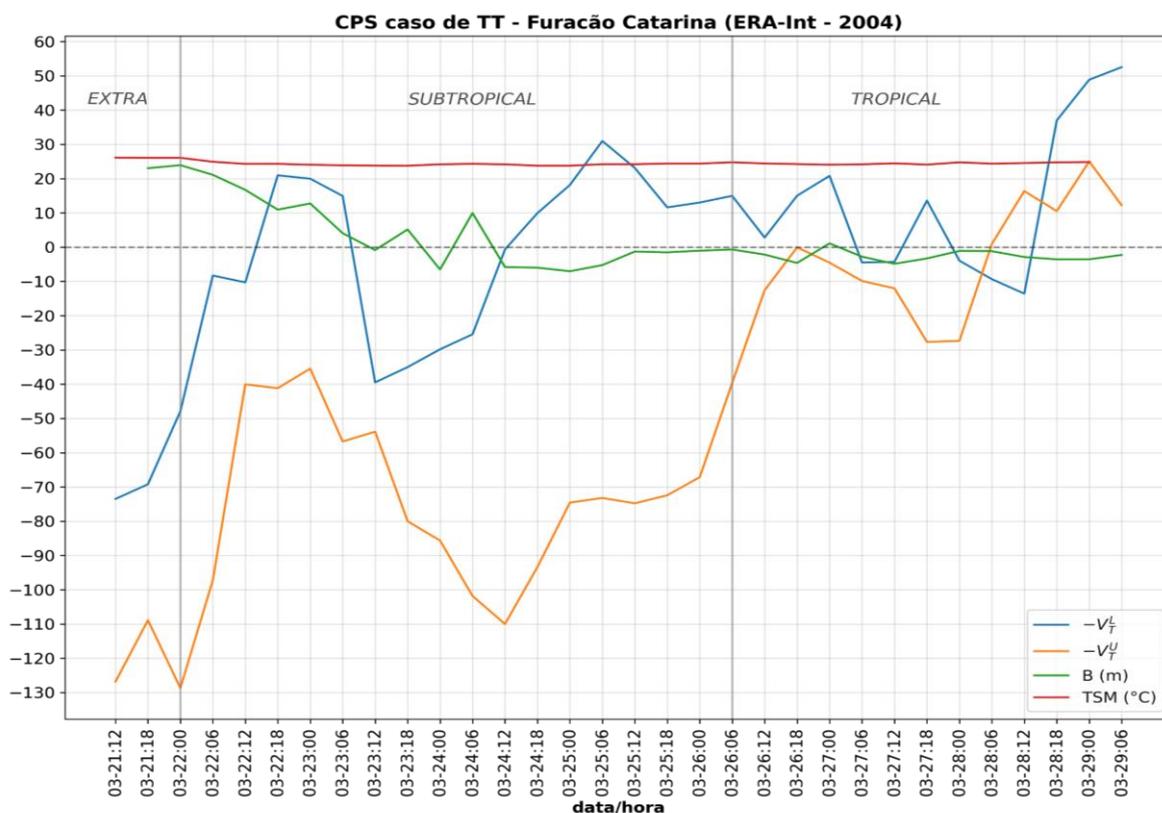


Figura 3.7 - Parâmetros do CPS e TSM ao longo do ciclo de vida do ciclone Catarina ocorrido em março de 2004, de acordo com reanálise ERA-Interim. Os estágios do ciclo de vida são indicados na figura.

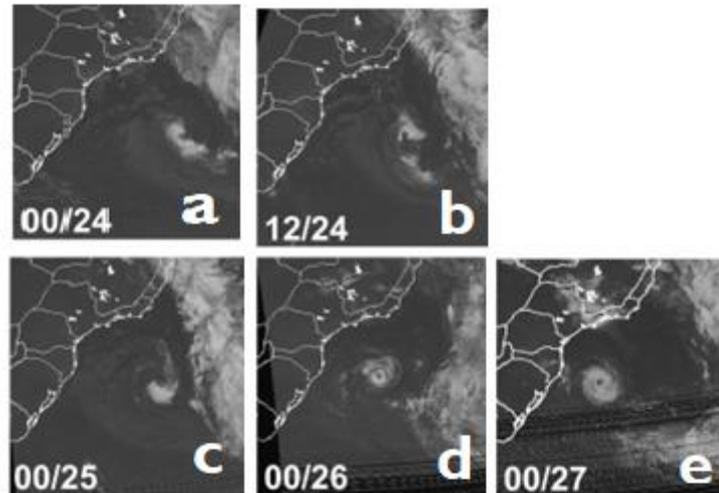


Figura 3.8 - Imagens de satélite no canal infravermelho durante a TT do Catarina. Os tempos sinóticos são indicados em cada painel com a hora seguida pelo número do dia em março de 2004. Adaptado de McTaggart-Cowan et al. (2006).

Na **Figura 3.9** é mostrada a evolução temporal dos parâmetros do CPS desde 18 horas antes (-18 h) da TT (0 h) até 18 horas após (+18h) através de *boxplots*. Os *boxplots* consideram os parâmetros do CPS de todos os casos identificados por *timeslice* para o RegCM4 e MCGs. Considerando o parâmetro B (**Figura 3.9a**), 18 h antes da TT os ciclones já mostram valores médios menores do que 10 m, porém com *outliers* em módulo acima de 50 m; os valores médios de B tendem a diminuir até o momento da TT (0 h). Com relação à variância, os maiores valores são obtidos antes da TT, com maior número de ocorrências por volta de 10 m, mas a partir da TT a variância reduz e a maior parte dos valores são distribuídos em torno de 0 m. Em termos de clima futuro, a média do B tem um ligeiro aumento no futuro comparado ao presente no período prévio à TT no RegCM4 enquanto o *ensemble* dos MCGs mostra sinal oposto, isto é, B mais simétrico no futuro.

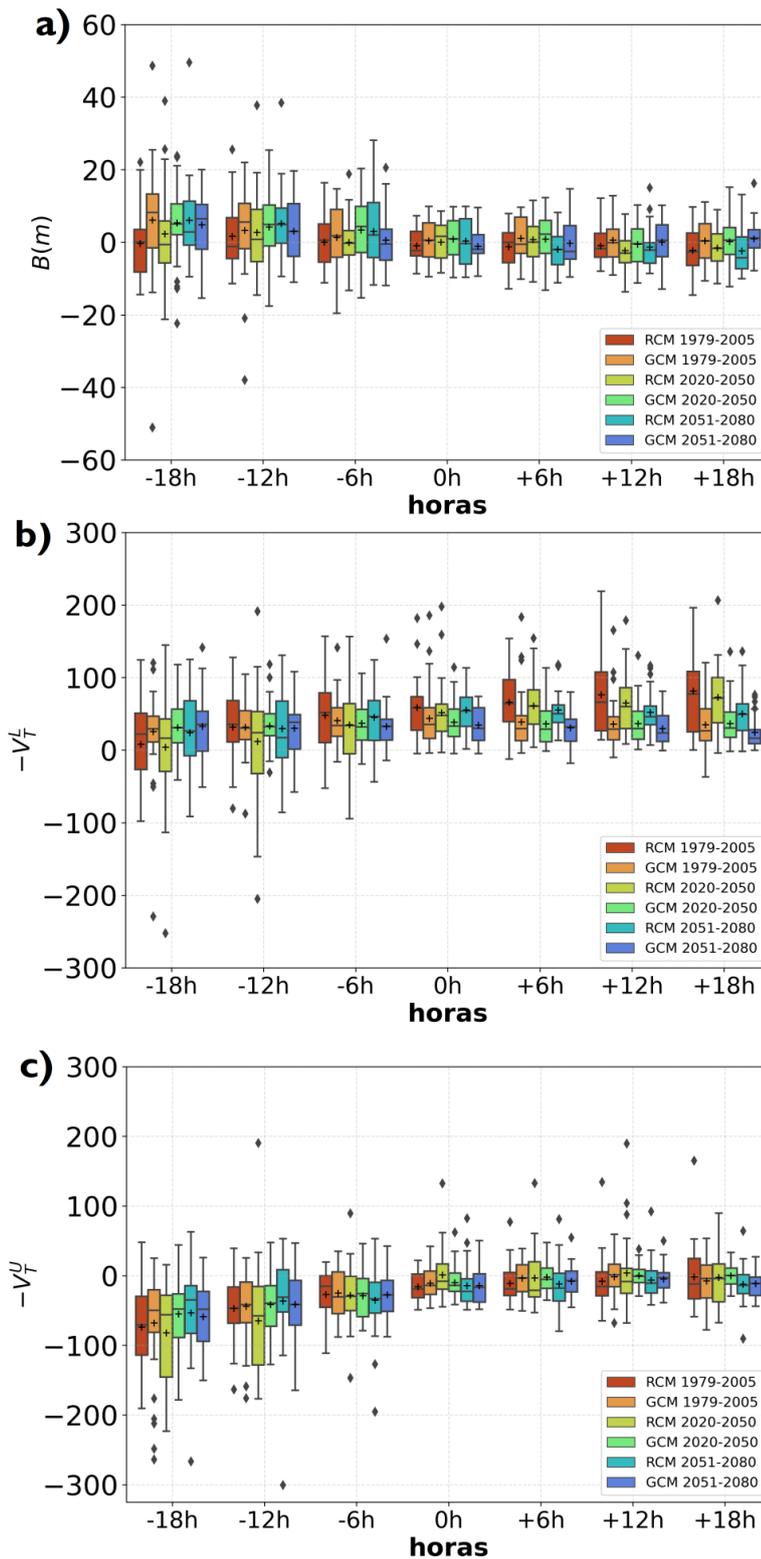


Figura 3.9 - Evolução temporal da média dos parâmetros do CPS desde 18 horas antes (-18 h) da transição tropical (0 h) até 18 horas após (+18h): (a) parâmetro B, (b) parâmetro $-V_T^L$ e (c) parâmetro $-V_T^U$.

O parâmetro $-V_T^L$ (**Figura 3.9b**), em ambos os *ensembles*, indica aumento do valor médio em direção a valores positivos desde -18 h a +18 h, o que significa que os ciclones estão adquirindo/intensificando o núcleo quente em baixos níveis da atmosfera. A maior

variabilidade para o $-V_T^L$ é obtida no *ensemble* do RegCM4, com destaque para o período presente, que após a TT mantém a variância semelhante aos tempos que antecedem a transição. Em termos de clima futuro, ambos *ensembles* projetam uma diminuição para a variância e o valor médio de $-V_T^L$, principalmente, no período de 2051-2080.

Por fim, o parâmetro $-V_T^U$ (**Figura 3.9c**) mostra que os ciclones no RegCM4 antes da TT possuem núcleo frio bem mais configurado (valores mais negativos de $-V_T^U$) do que no MCGs. Por outro lado, a partir da TT ambos *ensembles* e todos os *timeslices* mostram valores em média próximos a 0. Lembra-se aqui, que um ciclone tropical, não necessariamente precisa ter $-V_T^U$ positivo, como mostrado nos casos apresentados em (site do Hart: <http://moe.met.fsu.edu/cyclonephase/>). Vale ressaltar que a TT só é caracterizada quando todos os 3 parâmetros são satisfeitos. Entretanto, em horários prévios à TT, os parâmetros podem apresentar valores excedendo algum dos limiares, o que afeta a média desses, principalmente antes da TT, onde as maiores variâncias são encontradas em todos os parâmetros e períodos avaliados (isto é, antes da TT em média os parâmetros podem apresentar valores que satisfaçam os critérios de TT). Uma síntese da **Figura 3.9** é que os ciclones no RegCM4, em geral, possuem os parâmetros do CPS com maior variância quando comparados aos MCGs.

3.4 CONCLUSÃO

Esse é um dos primeiros estudos que classifica os diferentes tipos de ciclones no oceano Atlântico Sul em projeções climáticas e, com certeza, o primeiro que foca nas TT. Foram analisadas as projeções do RegCM4 e de três MCGs que forneceram as condições de fronteira ao modelo regional. Os períodos de análise foram 1970-2005, 2020-2050 e 2051-2080 e para o cenário RCP8.5. Para a realização do estudo foram empregados três algoritmos: identificação e rastreamento dos ciclones, estrutura térmica dos ciclones e classificação dos tipos de ciclones. Esse terceiro foi implementado no presente estudo e validado com a climatologia de ciclones subtropicais de Gozzo et al. (2014). Os resultados desse autor foram reproduzidos e, portanto, o algoritmo pode ser aplicado ao propósito do estudo. Como a climatologia de ciclones subtropicais nas projeções utilizadas no presente estudo é apresentada em de Jesus et al. (2021), aqui esses sistemas não foram incluídos. Em termos de ciclones extratropicais, tropicais e TT, os principais resultados obtidos foram:

- os ensembles mostram redução na frequência dos ciclones extratropicais no clima futuro sendo maior no período 2051-2080;

- os ensembles projetam para 2020-2050 redução na frequência dos ciclones tropicais comparado ao presente e aumento no período de 2051-2080;

- o *ensemble* dos MCGs apresenta um maior número de TT próximo a costa do Brasil/

- ambos *ensembles* apresentam menor frequência de TT do que de sistemas com gênese tropical e

- a maior variabilidade entre os parâmetros do CPS é obtida nas horas que antecedem a TT.

3.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BEVEN, J. L.,. A study of three ‘‘hybrid’’ storms. Preprints, 22d Conf. on Hurricanes and Tropical Meteorology, Fort Collins, CO, *American Meteorological Society*, 2: 645–646, 1997.

BENTLEY, A. M.; METZ, N. D. Tropical transition of an unnamed, high-latitude, tropical cyclone over the eastern North Pacific. *Monthly Weather Review*, 144(2): 713-736, 2016.

CAMARGO, S. J. Global and regional aspects of tropical cyclone activity in the CMIP5 models. *Journal of Climate*, 26(24): 9880-9902, 2013.

CAMARGO, S. J.; TIPPETT, M. K.; SOBEL, A. H.; VECCHI, G. A.; ZHAO, M. Testing the performance of tropical cyclone genesis indices in future climates using the HiRAM model. *Journal of Climate*, 27(24): 9171-9196, 2014.

CARLSON, T. N. Mid-latitude weather systems, 1991.

CATTO, J. L.; ACKERLEY, D.; BOOTH, J. F.; CHAMPION, A. J.; COLLE, B. A.; PFAHL, S.; PINTO, J.G.; QUINTING, J.F.; SEILER, C. (2019). The future of midlatitude cyclones. *Current Climate Change Reports*, 5(4): 407-420, 2019.

CELEMÍN, A. H. Meteorología práctica. *Edición del autor, Mar del Plata*, 1984.

CHANG, M.; HO, C. H.; PARK, M. S.; KIM, J.; AHN, M. H. Multiday evolution of convective bursts during western North Pacific tropical cyclone development and nondevelopment using geostationary satellite measurements. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(3): 1635-1649, 2017.

CHANG, M.; HO, C. H.; CHAN, J. C.; PARK, M. S.; SON, S. W.; KIM, J. The tropical transition in the western North Pacific: the case of tropical cyclone Peipah (2007). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(10): 5151-5165, 2019.

CHARNEY, J. G. The dynamics of long waves in a baroclinic westerly current. *Journal of Meteorology*, 4(5): 136-162, 1947.

COLLINS, W. J., BELLOUIN, N., DOUTRIAUX-BOUCHER, M., GEDNEY, N., HALLORAN, P., HINTON, T., HUGHES, J.; JONES, C. D.; JOSHI, M.; LIDDICOAT, S.; MARTIN, G.; O'CONNOR, F.; RAE, J.; SENIOR, C.; SITCH, S.; TOTTERDELL, I.; WILTSHIRE, A.; WOODWARD, S. Development and evaluation of an Earth-System model—HadGEM2. *Geoscientific Model Development*, 4(4): 1051-1075, 2011.

DA ROCHA, R. P.; REBOITA, M. S.; GOZZO, L. F.; DUTRA, L. M. M.; DE JESUS, E. M. Subtropical cyclones over the oceanic basins: a review. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1436(1): 138-156, 2019.

DAVIS, C. A.; BOSART, L. F. The TT problem: Forecasting the tropical transition of cyclones. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 85(11): 1657-1662, 2004.

DAVIS, C. A.; BOSART, L. F. The formation of hurricane Humberto (2001): The importance of extra-tropical precursors. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society: A journal of the atmospheric sciences, applied meteorology and physical oceanography*, 132(619): 2055-2085, 2006.

DEE, D. P.; UPPALA, S. M.; SIMMONS, A. J.; BERRISFORD, P.; POLI, P.; KOBAYASHI, S.; [ANDRAE, U.](#); [BALMASEDA, M.A.](#); [BALSAMO, G.](#); [BAUER, P.](#); [BECHTOLD, P.](#); [BELJAARS, A.C.M.](#); [VAN DE BERG, L.](#); [BIDLOT, J.](#); [BORMANN, N.](#); [DELSOL, C.](#); [DRAGANI, R.](#); [FUENTES, M.](#); [GEER, A.J.](#); [HAIMBERGER, L.](#); [HEALY, S.B.](#); [HERSBACH, H.](#); [HÓLM, E.V.](#); [ISAKSEN, L.](#); [KÅLLBERG, P.](#); [KÖHLER, M.](#); [MATRICARDI, M.](#); [MCNALLY, A.P.](#); [MONGE-SANZ, B.M.](#); [MORCRETTE, J.J.](#); [PARK, B.K.](#); [PEUBEY, C.](#); [DE ROSNAY, P.](#); [TAVOLATO, C.](#); [THÉPAUT, J.N.](#); VITART, F. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137(656):553-597, 2011.

DE JESUS, E. M.; DA ROCHA, R. P.; CRESPO, N. M.; REBOITA, M. S.; GOZZO, L. F. Multi-model climate projections of the main cyclogenesis hot-spots and associated winds over the eastern coast of South America. *Climate Dynamics*, 1-21, 2020.

DE JESUS, E. M.; DA ROCHA, R.P.; REBOITA, M.S.; CRESPO, N.M.; GOZZO, L.F. Future climate projections of subtropical cyclones in South Atlantic basin in an ensemble of global and regional simulations. Artigo em redação.

DIAS PINTO, J. R., REBOITA, M. S., & DA ROCHA, R. P. Synoptic and dynamical analysis of subtropical cyclone Anita (2010) and its potential for tropical transition over the South Atlantic Ocean. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(19):10-870, 2013.

DUNNE, J. P., JOHN, J. G., ADCROFT, A. J.; *et al.* GFDL's ESM2 global coupled climate-carbon earth system models. Part I: Physical formulation and baseline simulation characteristics. *Journal of climate*, 25(19): 6646-6665, 2012.

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

EMANUEL, K. A. The dependence of hurricane intensity on climate. *Nature*, 326(6112): 483-485, 1987.

EMANUEL, K.A. A scheme for representing cumulus convection in large-scale models. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 48(21): 2313-2329, 1991.

EMANUEL, K.A. Tropical cyclones. *Annual review of earth and planetary sciences*, 31(1): 75-104, 2003.

EVANS, J. L.; BRAUN, A. A climatology of subtropical cyclones in the South Atlantic. *Journal of Climate*, 25(21): 7328-7340, 2012.

FRANCO, B. C., DEFEO, O., PIOLA, A. R., BARREIRO, M., YANG, H., ORTEGA, L., GIANELLI, I.; CASTELLO, J.P.; VERA, C.; BURATTI, C.; PÁJARO, M.; PEZZI, L.P; MÖLLER, O. O. Climate change impacts on the atmospheric circulation, ocean, and fisheries in the southwest South Atlantic Ocean: a review. *Climatic Change*, 1-19, 2020.

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

GIORGETTA, M. A.; JUNGCLAUS, J.; REICK, C. H.; *et al.* Climate and carbon cycle changes from 1850 to 2100 in MPI-ESM simulations for the Coupled Model Intercomparison Project phase 5. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 5(3), 572-597, 2013.

GOZZO, L. F.; DA ROCHA, R. P.; REBOITA, M. S.; SUGAHARA, S. Subtropical cyclones over the southwestern South Atlantic: Climatological aspects and case study. *Journal of Climate*, 27(22): 8543-8562, 2014.

GOZZO, L. F.; DA ROCHA, R. P.; GIMENO, L.; DRUMOND, A. Climatology and numerical case study of moisture sources associated with subtropical cyclogenesis over the southwestern Atlantic Ocean. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 122(11): 5636-5653, 2017.

GRAY, W. M. Global view of the origin of tropical disturbances and storms. *Atmospheric Sciences Papers* (Colorado State University), 114: 112p, 1968.

HART, R. E. A cyclone phase space derived from thermal wind and thermal asymmetry. *Monthly weather review*, 131(4): 585-616, 2003.

HODGES, K.; COBB, A.; VIDALE, P. L. How well are tropical cyclones represented in reanalysis datasets?. *Journal of Climate*, 30(14): 5243-5264, 2017.

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

HUSSAIN, M. M.; MAHMUD, I. pyMannKendall: a python package for non parametric Mann Kendall family of trend tests. *Journal of Open Source Software*, 4(39): 1556, 2019.

JULLIEN, S.; MENKÈS, C. E.; MARCHESIELLO, P.; *ET AL.* Impact of tropical cyclones on the heat budget of the South Pacific Ocean. *Journal of physical oceanography*, 42(11): 1882-1906, 2012.

LAUTON, G.; ALMEIDA, M. M.; DORFSHÄFER, G. S.; LENTINI, C. A. D. Metocean modulators of the first recorded South Atlantic Hurricane: Catarina. *Geophysical Research Letters*, [S.I.], 2021.

MARTIUS, O.; RIVIÈRE, G. (2016). Rossby wave breaking: Climatology, interaction with low-frequency climate variability, and links to extreme weather events. In LI, J. SWINBANK, R.; GROTHAHN, R.; VOLKERT, H. (Eds.), *Dynamics and Predictability of Large-Scale, High-Impact Weather and Climate Events* (Special Publications of the International Union of Geodesy and Geophysics, pp. 69-78). Cambridge: Cambridge University Press.

MCTAGGART-COWAN, R.; BOSART, L. F.; DAVIS, C. A.; ATALLAH, E. H.; GYAKUM, J. R.; EMANUEL, K. A. Analysis of hurricane Catarina (2004). *Monthly Weather Review*, 134(11): 3029-3053, 2006.

MCTAGGART-COWAN, R.; DEANE, G. D.; BOSART, L. F.; DAVIS, C. A.; GALARNEAU JR, T. J. Climatology of tropical cyclogenesis in the North Atlantic (1948–2004). *Monthly Weather Review*, 136(4): 1284-1304, 2008.

MCTAGGART-COWAN, R.; GALARNEAU JR, T. J.; BOSART, L. F.; MOORE, R. W.; MARTIUS, O. A global climatology of baroclinically influenced tropical cyclogenesis. *Monthly weather review*, 141(6): 1963-1989, 2013.

PEZZA, A. B.; SIMMONDS, I. The first South Atlantic hurricane: Unprecedented blocking, low shear and climate change. *Geophysical Research Letters*, 32(15), 2005.

REBOITA, M. S. Ciclones extratropicais sobre o Atlântico Sul: Simulação climática e experimentos de sensibilidade (Tese de doutorado), Universidade de São Paulo (IAG/USP), 2008.

REBOITA, M. S.; DA ROCHA, R. P.; AMBRIZZI, T.; SUGAHARA, S. South Atlantic Ocean cyclogenesis climatology simulated by regional climate model (RegCM3). *Climate Dynamics*, 35(7-8): 1331-1347, 2010.

REBOITA, M. S.; KRUSCHE, N.; AMBRIZZI, T.; DA ROCHA, R. P. D. *Entendendo o Tempo e o Clima na América do Sul*, 2012.

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*, 45(7-8): 1929-1944, 2015.

REBOITA, M. S.; GAN, M. A.; ROCHA, R. P. D.; CUSTÓDIO, I. S. Ciclones em Superfície nas Latitudes Austrais: Parte I-Revisão Bibliográfica. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 32(2): 171-186, 2017.

REBOITA, M. S.; DA ROCHA, R. P.; DE SOUZA, M. R.; LLOPART, M. Extratropical cyclones over the southwestern South Atlantic Ocean: HadGEM2-ES and RegCM4 projections. *International Journal of Climatology*, 38(6): 2866-2879, 2018a.

REBOITA, M. S.; AMARO, T. R.; DE SOUZA, M. R. Winds: intensity and power density simulated by RegCM4 over South America in present and future climate. *Climate Dynamics*, 51(1), 187-205, 2018b.

REBOITA, M. S.; OLIVEIRA, D. M.; DA ROCHA, R. P.; DUTRA, L. M. M. Subtropical cyclone Anita's potential to tropical transition under warmer sea surface temperature scenarios. *Geophysical Research Letters*, 46(14): 8484-8489, 2019a.

REBOITA, M. S.; DA ROCHA, R. P.; OLIVEIRA, D. M. D. Key features and adverse weather of the named subtropical cyclones over the Southwestern South Atlantic Ocean. *Atmosphere*, 10(1): 6, 2019b.

REBOITA, M. S.; REALE, M.; DA ROCHA, R. P.; GIORGI, F.; GIULIANI, G.; COPPOLA, E.; NINO, R. B. L.; LLOPART, M.; TORRES, J. A.; CAVAZOS, T. Future Changes in the Wintertime Cyclonic Activity over the CORDEX-CORE Southern Hemisphere domains in a Multi-Model Approach. *Climate Dynamics*, 20:1-17, 2020.

REBOITA, M. S.; CRESPO, N. M.; DUTRA, L. M. M.; SILVA, B. A.; CAPUCIN, B. C.; DA ROCHA, R. P. Iba: the first pure tropical cyclogenesis over the western South Atlantic Ocean. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126, e2020JD033431, 2021.

SILVA, B.A.; REBOITA, M.S. Climatology of the Tropical Cyclone Genesis Potential Index in the Oceans Adjacent to South America. Aceito para publicação no periódico *Anuário do Instituto de Geociências da UFRJ*, 2021.

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

VAN VUUREN, D. P.; EDMONDS, J.; KAINUMA, M.; RIAHI, K.; THOMSON, A.; HIBBARD, K.; HURTT, G.C.; KRAM, T.; LAMARQUE, J.F.; MASUI, T.; MEINSHAUSEN, M.; NAKICENOVIC, N.; SMITH, S.J.; ROSE, S.K. The representative concentration pathways: an overview. *Climatic change*, 109(1), 5-31, 2011.

YANASE, W.; NIINO, H.; HODGES, K.; KITABATAKE, N. Parameter spaces of environmental fields responsible for cyclone development from tropics to extratropics. *Journal of Climate*, 27: 652– 671, 2014.

YUE, S.; PILON, P.; PHINNEY, B.; CAVADIAS, G. The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series. *Hydrological processes*, 16(9): 1807-1829, 2002.

V. CONCLUSÕES GERAL

Este estudo fornece, uma climatologia dos índices extremos de precipitação, tal como uma análise de suas tendências, uma análise climatológica do total ciclones e apenas os ciclones intensos, utilizando diferentes reanálises e, por fim, uma análise de projeções climáticas para cada tipo de ciclogênese e dos casos de TT. Com base nisso, os principais resultados obtidos são listados abaixo:

- existem tendências com significância estatística do decréscimo dos totais sazonais de precipitação, dos acumulados de 5 dias e de dias úmidos consecutivos e, o aumento dos dias secos consecutivos no norte da América do Sul e na região climatológica da ZCAS. Com relação a região da bacia da Prata são encontradas tendências mais expressivas no aumento do percentil de 95% e no número de eventos que ultrapassam esse limiar.
- há uma grande diferença na frequência do total de ciclones nas reanálises centenárias, principalmente no período anterior à 1970. A reanálise centenária do NCEP apresenta uma forte correlação positiva com o número de registros utilizados para assimilação dos dados
- para os ciclones intensos, as reanálises mais recentes mostram tendência positiva, mas somente as tendências do NCEP são estatisticamente significativas. O número de ciclones intensos têm aumentado entre 6 (ERA5) a 16 (NCEP1) ciclones por década
- a costa leste da América do Sul apresenta três regiões ciclogênicas: a costa sul/sudeste do Brasil (RG1) e sul/sudeste da Argentina (RG3) com maior frequência de ciclones no verão e a costa do extremo sul do Brasil e Uruguai (RG2) com maior frequência de ciclones no inverno;
- os ensembles projetam para 2020-2050 redução na frequência dos ciclones tropicais comparado ao presente e aumento no período de 2051-2080
- ambos *ensembles* apresentam menor frequência de TT do que de sistemas com gênese tropical e a maior variabilidade entre os parâmetros do CPS é obtida nas horas que antecedem a TT.

Com base nisso, os capítulos 1 e 2 complementam trabalhos acerca de tendências observados no clima presente para precipitação e atividade ciclônica, enquanto o capítulo 3 é

o primeiro estudo que apresenta casos de TT em projeções climáticas para Atlântico Sul. Sendo assim, a seguir são apresentadas recomendações de possíveis temas para estudos futuros, a fim de complementar o presente trabalho.

- análise similar à apresentada no capítulo 3, entretanto, partindo de projeções do *The Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6)*;
- avaliação dos diferentes tipos de ciclones e casos de TT utilizando diferentes reanálises;
- análises para o clima presente e futuro considerando os diferentes tipos de TT, forte e fraca.

VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS GERAIS

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 Sciences*, especial edition: Climate Science, 2018.

BARTÓK, B.; WILD, M.; FOLINI, D.; LÜTHI, D.; KOTLARSKI, S.; SCHÄR, C.; JEREZ, S.; IMECS, Z. Projected changes in surface solar radiation in CMIP5 global climate models and in EURO-CORDEX regional climate models for Europe. *Climate dynamics*, 49(7): 2665-2683, 2017.

BERRANG-FORD, L.; BIESBROEK, R.; FORD, J. D.; LESNIKOWSKI, A.; TANABE, A.; WANG, F. M.; CHEN, C.; HSU, A.; HELLMANN, J.J.; PRINGLE, P.; GRECEQUET, M.; AMADO, J.C.; HUQ, S.; LWASA, S.; HEYMANN, S. J. Tracking global climate change adaptation among governments. *Nature Climate Change*, 9(6): 440-449, 2019.

COELHO, C.S.; OLIVEIRA, C.; AMBRIZZI, T.; REBOITA, M.; CARPENEDO, C.; CAMPOS, J.; TOMAZIELLO, A.; PAMPUCH, L.; CUSTODIO, M.S.; DUTRA, L.; DA ROCHA, R.; REHBEIN, A. The 2014 Southeast Brazil Austral Summer Drought: Regional Scale Mechanisms and Teleconnections. *Climate Dynamics*, [S.I]:1-16, 2016.

DE JESUS, E. M.; DA ROCHA, R. P.; CRESPO, N. M.; REBOITA, M. S.; GOZZO, L. F. Multi-model climate projections of the main cyclogenesis hot-spots and associated winds over the eastern coast of South America. *Climate Dynamics*, 1-21, 2020.

DE JESUS, E. M.; DA ROCHA, R.P.; REBOITA, M.S.; CRESPO, N.M; GOZZO, L.F. Future climate projections of subtropical cyclones in South Atlantic basin in an ensemble of global and regional simulations. Artigo em redação.

GETTELMAN, A.; ROOD, R. B. Demystifying climate models: a user guide to Earth system models. *SpringerOpen*, [S.I], 2016

IPCC, 2007: 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 AND H.L. MILLER (eds.)]. *Cambridge University Press*, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [STOCKER, T.F., D. QIN, G.-K. PLATTNER, M. TIGNOR, S.K. ALLEN, J. BOSCHUNG, A. NAUELS, Y. XIA, V. BEX AND P.M. MIDGLEY (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

IRVING, D. B.; PENNY W.; MOISE, A. F. "Climate projections for Australia: a first glance at CMIP5." *Australian Meteorological and Oceanographic Journal* 62.4 (2012): 211-225.

IWABE, C. M. N.; REBOITA, M. S.; CAMARGO, R. Estudo de caso de uma situação atmosférica entre 12 e 19 de setembro de 2008, com algumas características semelhantes ao evento Catarina. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 26, n. 1, p. 67-84, 2011.

KAMWORAPAN, S.; SURUSSAVADEE, C. Evaluation of CMIP5 global climate models for simulating climatological temperature and precipitation for Southeast Asia. *Advances in Meteorology*, 2019.

KNUTTI, R.; SEDLÁČEK, J. Robustness and uncertainties in the new CMIP5 climate model projections. *Nature climate change*, 3(4): 369-373, 2013.

LATIF, M. Uncertainty in climate change projections. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 110, p. 1-7, 2011.

LI, Y.; WANG, T.; ZENG, Z.; PENG, S.; LIAN, X.; PIAO, S. Evaluating biases in simulated land surface albedo from CMIP5 global climate models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 121(11), 6178-6190, 2016.

LOVINO, M. A.; MÜLLER, O. V.; BERBERY, E. H.; MÜLLER, G. V. Evaluation of CMIP5 retrospective simulations of temperature and precipitation in northeastern Argentina. *International Journal of climatology*, 38, e1158-e1175, 2018.

MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A.; TOMASELLA, J.; OYAMA, M. D.; OLIVEIRA, G. S.; OLIVEIRA, R.; CAMARGO, H.; ALVES, L. M.; BROWN, I. F. The drought of Amazonia in 2005. *Journal of Climate*, v. 21, p. 495-516, 2008.

MARENGO, J. A.; TOMASELLA, J.; ALVES, L. M.; SOARES, W. R.; RODRIGUEZ, D. A. The drought of 2010 in the context of historical droughts in the Amazon region. *Geophysical Research Letters*, v. 38, p. 1-5, 2011.

MARENGO, J. A.; CUNHA, A. P. M.; NOBRE, C. A.; NETO, G. G. R.; MAGALHAES, A. R.; TORRES, R. R.; SAMPAIO, G.; ALEXANDRE, F.; ALVES, L.M.; CUARTAS, L.A.; DEUSDARÁ, K.R.L.; ÁLVALA, R. C. Assessing drought in the drylands of northeast Brazil under regional warming exceeding 4° C. *Natural Hazards*, 103(2) 2589-2611, 2020.

McTAGGART-COWAN, R.; BOSART, L.; DAVIS, C. A.; ATALLAH, E. H.; GYAKUM, J. R.; EMANUEL, K. A. Analysis of Hurricane Catarina (2004). *Monthly Weather Review*, v.134, p. 3029-3053, 2006.

MILLER, D. D.; OTA, Y.; SUMAILA, U. R., CISNEROS-MONTEMAYOR, A. M.; CHEUNG, W. W. Adaptation strategies to climate change in marine systems. *Global Change Biology*, 24(1):e1-e14, 2018.

MITCHELL, J. F. B. The “Greenhouse” effect and climate change. *Reviews of Geophysics*, 27(1), 115, 1989.

PBMC, 2016: Mudanças Climáticas e Cidades. Relatório Especial do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas [RIBEIRO, S.K., SANTOS, A.S. (Eds.)]. PBMC, COPPE – UFRJ. Rio de Janeiro, Brasil. 116p. ISBN: 978-85-285-0344-9

REBOITA, M.S.; MARRAFON, V.H.A.; LLOPART, M.; DA ROCHA, R.P. Cenários de mudanças climáticas projetados para o Estado de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Climatologia*, [S.I.], 2018.

REBOITA, M. S.; CRESPO, N. M.; DUTRA, L. M. M.; SILVA, B. A.; CAPUCIN, B. C.; DA ROCHA, R. P. Iba: the first pure tropical cyclogenesis over the western South Atlantic Ocean. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126, e2020JD033431, 2021.

TORRES, R. R.; MARENGO, J. A. Climate change hotspots over South America: from CMIP3 to CMIP5 multi-model datasets. *Theoretical and Applied Climatology*, 117(3): 579-587, 2014.

WANG, C.; ZHANG, L.; LEE, S. K.; WU, L.; MECHOSO, C. R. A global perspective on CMIP5 climate model biases. *Nature Climate Change*, 4(3):201-205, 2014.

ZHANG, X.; ALEXANDER, L.; HEGERL, G. C.; JONES, P.; TANK, A. K.; PETERSON, T. C.; TREWIN, B.; ZWIERS, F. W. Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2(6):1, 2011.