

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

Marcelo Rodrigues de Souza

**CICLONES SOBRE
O ATLÂNTICO SUDOESTE:**
clima presente e futuro

Itajubá

2016

Marcelo Rodrigues de Souza

**CICLONES SOBRE
O ATLÂNTICO SUDOESTE:**
clima presente e futuro

Dissertação de Mestrado
apresentada ao Programa de Pós-
Graduação em Meio Ambiente e
Recursos Hídricos, Universidade
Federal de Itajubá, como requisito
parcial para a obtenção do título de
Mestre em Meio Ambiente e
Recursos Hídricos

Área de concentração:
Meteorologia
Orientadora: Prof^a. Dr^a. Michelle
Simões Reboita

Itajubá
2016

AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela disponibilidade da bolsa de estudos que permitiu dedicação integral ao trabalho.

Ao International Centre for Theoretical Physics (ICTP), pelas simulações utilizadas que formam a base dessa pesquisa.

À Michelle Reboita, pelo incentivo, confiança, paciência, amizade e orientação. Sempre presente e atenciosa, escapa de todos os mitos da figura do orientador.

A todos os professores que me deixaram sementes.

À Alexandre Cordeiro, pela década de uma amizade que liberta e que acolhe o silêncio entre duas pessoas sem o peso indigesto da falta de palavras.

À Gabriele Vilas Boas, pelos devaneios sociológicos na casa do Vô. Pelas músicas parcialmente compostas, toscamente gravadas e sempre ridicularizadas.

À Barbara Limón, por aquilo de mais bonito que alguém pode cultivar. Metade poema, metade poesia.

À Carolina Romeo, pelo surgimento inesperado de uma companheira de madrugadas. Por todas as desconstruções culturais, discussões, recomendações de séries, filmes e aquelas brigas irônicas envoltas de um carinho sincero.

Aos amigos do mestrado, pelos trabalhos, estudos, conversas e tentativas frustradas de uma saída no final do dia. A gente tentava.

Aos meus pais, irmã e família. Amor imortal.

Não escravize seus inquilinos, Mantiqueira.

O que esperamos na ágora reunidos?

É que os bárbaros chegam hoje.

*Por que tanta apatia no senado?
Os senadores não legislam mais?*

É que os bárbaros chegam hoje.

*Que leis hão de fazer os senadores?
Os bárbaros que chegam as farão.*

*Por que o imperador se ergueu
tão cedo e de coroa solene se assentou
em seu trono, à porta magna da cidade?*

É que os bárbaros chegam hoje.

*Por que hoje os dois cônsules e os pretores
usam togas de púrpura, bordadas,
e pulseiras com grandes ametistas
e anéis com tais brilhantes e esmeraldas?*

*Por que hoje empunham bastões tão preciosos
de ouro e prata finamente cravejados?*

*É que os bárbaros chegam hoje,
tais coisas os deslumbram.*

*Por que não vêm os dignos oradores
derramar o seu verbo como sempre?*

*Por que subitamente esta inquietude?
(Que seriedade nas fisionomias!)*

*Por que tão rápido as ruas se esvaziam
e todos voltam para casa preocupados?*

*Porque é já noite, os bárbaros não vêm
e gente recém-chegada das fronteiras
diz que não há mais bárbaros.*

Sem bárbaros o que será de nós?

Ah! eles eram uma solução.

Konstantinos Kaváfis

RESUMO

A climatologia e as características médias dos ciclones atuantes sobre o Atlântico Sudoeste no período presente (1979-2005) e dois períodos futuros (2020-2050 e 2070-2098), dentro do cenário forçante RCP8.5, simuladas por um modelo climático regional (RegCM4) e um modelo global (HadGEM2-ES) são apresentadas. Dados de cinco reanálises foram utilizados para comparação e avaliação da capacidade dos modelos em reproduzir os padrões climatológicos dos ciclones, sendo elas: CFSR, ERA-Interim, ERA-40, NCEP-I e NCEP-II. Para a identificação e rastreamento dos ciclones foi utilizado um algoritmo baseado em mínimos de vorticidade relativa do vento a 925 hPa, selecionando todos os sistemas ciclônicos com vorticidade relativa inicial menor que $-1,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ e com ciclo de vida entre 1 a 10 dias. No período de 1979-2005, o RegCM4 simulou um total de 7627 ciclones, enquanto que o HadGEM2-ES simulou 7013 ciclones. Ambos superestimaram todas as reanálises, porém, com maior similaridade aos resultados obtidos pelas reanálises CFSR e ERA-Interim. O inverno foi a estação de maior ocorrência de ciclones em todos os conjuntos de dados. Em relação às características médias dos ciclones (duração, distância percorrida, velocidade, vorticidade relativa inicial e vorticidade relativa média total), os dois modelos reproduziram satisfatoriamente aquelas obtidas nas reanálises. As três sub-regiões de maior atividade ciclogênica discutidas na literatura (costa sudeste do Brasil, RG1; costa do Uruguai, RG2; e costa leste da Argentina, RG3) foram também identificadas nas simulações, com maior destaque para a RG3 (costa leste da Argentina), onde a densidade de ciclogêneses superou todas as demais sub-regiões, tanto em intensidade quanto em dimensão espacial. Quanto à atividade de ciclones projetada para o clima futuro, o RegCM4 e o HadGEM2-ES indicaram uma tendência negativa até o ano de 2098. Projetam-se quedas de cerca de 6,5% na média anual de ciclones para 2020-2050 em relação ao presente, pelo RegCM4, e de 3,6% pelo HadGEM2-ES. No período de 2070-2098 as reduções atingem 11,4% no modelo regional e 10,4% no modelo global. A variabilidade sazonal ao longo dos dois períodos futuros manteve o mesmo padrão daquela encontrada para o período presente, projetando maior ocorrência de ciclones durante o inverno e primavera, em ambos os modelos. Da mesma forma, o comportamento dos ciclones em relação às suas características médias não sofre alterações consideráveis dentro dos cenários futuros. A banda latitudinal entre 40°S e 57,5°S corresponde à parcela da região de estudo com a maior tendência de diminuição de densidade ciclogênica, em ambos os modelos.

Palavras-chave: Ciclones. Mudanças climáticas. RegCM4. HadGEM2-ES.

ABSTRACT

The climatology and mean characteristics of the cyclones that act upon the Southwest Atlantic in the present period (1979-2005) and in two future periods (2020-2050 and 2070-2098), in the RCP8.5 forcing scenario, were evaluated through simulations of the RegCM4 regional model and the HadGEM2-ES global model. Five reanalysis were used in order to compare and evaluate the skill of the models in reproducing' climatological patterns of the cyclones: CFSR, ERA-Interim, ERA-40, NCEP-I and NCEP-II. To identify and track the cyclones, an algorithm based on the minimum values of relative vorticity was used, selecting every cyclonic system with initial relative vorticity below or equal $-1,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ and life cycle between 1 and 10 days. In the 1979-2005 period, the RegCM4 simulated a total of 7627 cyclones, while the HadGEM2-ES simulated 7013 cyclones. Both superestimated all reanalysis, however, this results were more similar to the CFSR and ERA-Interim reanalysis. The winter was the season with the largest cyclone occurrence among all data sets. Regarding the mean characteristics of the cyclones (duration, travel distance, velocity, initial relative vorticity and total average vorticity), both models successfully reproduced those obtained in the reanalysis. The three subregions with largest cyclogenetic activity discussed in the literature (southeast coast of Brazil, RG1; coast of Uruguay, RG2; east coast of Argentina, RG3) were also identified in the simulations, with great emphasis on RG3 (east coast of Argentina), where the density of cyclogenesis is higher than all other subregions, both in intensity and spatial dimension. Concerning the cyclone activity projected for the future climate, the RegCM4 and the HadGEM2-ES indicated a negative tendency until the year of 2098. While RegCM4 projects a reduction of 6,5% in the cyclone annual mean for the 2020-2050 period, HadGEM2-ES predicts a 3,6% reduction in the same period. As for the 2070-2098 period, the reductions reach 11,4% in the regional model and 10,4% in the global model. The seasonal variability over the two future periods remains the same pattern that was found for the present period, projecting a larger occurrence of cyclones during the winter and spring in both models. Likewise, the behavior of cyclones in relation to their mean characteristics does not indicate considerable changes in the future scenarios. The latitudinal band between 40°S and $57,5^{\circ}\text{S}$ corresponds to the portion of the study area with the biggest negative trend in cyclogenetic density in both models.

Keywords: Cyclones. Climate change. RegCM4. HadGEM2-ES.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1** - Corte longitudinal dos sistemas de pressão na superfície e os campos de convergência e divergência em altos níveis no hemisfério sul. A situação representada é propícia ao desenvolvimento dos ciclones em superfície. (REBOITA, 2008)25
- Figura 2** – Domínio regional do projeto CORDEX para a região da América do Sul e adjacências31
- Figura 3** – Forçantes radiativa e incertezas associadas para os principais drivers climáticos. Valores à direita (W/m^2) foram estimados no ano de 2011, tendo como referência o ano de 1750. As letras na coluna da extrema direita correspondem ao grau de confiança de cada estimativa (VH = muito alto; H = alto; M = médio; L = baixo; VL = muito baixo). As três últimas barras em vermelho representam a forçante radiativa total imposta apenas por atividade antrópica, relativa ao ano de 1750. Fonte: IPCC (2013) ...33
- Figura 4** - Trajetórias de emissões de CO_2 (ppm) nos diferentes cenários de forçante radiativa. A linha preta representa a trajetória de emissão até o período presente. Fonte: IPCC (2013).34
- Figura 5** – Média anual da densidade ciclogénica (1975-1989) considerando os sistemas com $\zeta_{10} \leq 1 \times 10^{-5} s^{-1}$, obtidos através dos seguintes dados e modelos: a) NCEP; b) HadAM3; c) RegCM3. A densidade corresponde ao número de ciclones/ km^2 e foi multiplicada por 104. Fonte: Krüger et al. (2012)37
- Figura 6** – Frequência de ciclones em resposta às forçantes ozônio (cima), gases de efeito estufa (meio) e ambas (baixo). A coluna da esquerda se refere aos meses da estação de verão, enquanto a da direita faz referência aos meses de inverno. As regiões delimitadas em preto representam os resultados estatisticamente significativos ($p < 0,05$). A legenda apresenta intervalos de 0,1 ciclones/mês. Fonte: Grise et al. (2014)40
- Figura 7** – Vorticidade relativa ciclônica ($\times 10^{-5} s^{-1}$) obtida da reanálise ERA-Interim indicando as primeiras posições de um sistema ciclônico. a) 1° posição; b) 2° posição; c) 3° posição; d) 4° posição. As setas azuis indicam o ciclone em deslocamento.47
- Figura 8** – Domínios estabelecidos para o estudo e a topografia da região (em metros), onde o domínio de rastreamento e o de análise são representados pelas caixas preta e amarela, respectivamente. As caixas vermelhas representam as três principais sub-regiões ciclogénicas.50
- Figura 9** – Número total de ciclones no período 1979-2005 nos modelos e reanálises. Barras azuis representam todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$, barras cinzas representam apenas os sistemas com $\zeta \leq -2,5$53
- Figura 10** – Frequência anual absoluta de ciclones com $\zeta \leq -1,5$ no período de 1979-2005.54
- Figura 11** – Frequência anual absoluta de ciclones com $\zeta \leq -2,5$ no período de 1979-2005.55
- Figura 12** – Diferença percentual anual de ciclones com $\zeta \leq -1,5$ entre o RegCM4 e as reanálises, no período 1979-2005.57

Figura 13 - Diferença percentual anual de ciclones $\zeta \leq -1,5$ entre o HadGEM2-ES e as reanálises, no período 1979-2005.	58
Figura 14 – Média mensal de ciclones no período de 1979-2005, considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$	59
Figura 15 – Média mensal de ciclones no período de 1979-2005, considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -2,5$	60
Figura 16 – Média sazonal de ciclones no período de 1979-2005, considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$	61
Figura 17 – Média sazonal de ciclones no período de 1979-2005, considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -2,5$	61
Figura 18 – Frequência relativa (%) dos ciclones quanto à duração (dias) no período de 1979-2005 e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$	66
Figura 19 – Frequência relativa (%) dos ciclones quanto à distância percorrida total ($\times 10^2$ km) no período de 1979-2005 e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$	67
Figura 20 – Frequência relativa (%) dos ciclones quanto à velocidade média (m/s) no período de 1979-2005 e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$	68
Figura 21 – Frequência relativa (%) dos ciclones quanto à vorticidade relativa inicial ($\times 10^{-5} \text{s}^{-1}$) no período de 1979-2005, considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$	69
Figura 22 – Frequência relativa (%) dos ciclones quanto à vorticidade média total ($\times 10^{-5} \text{s}^{-1}$) no período de 1979-2005, considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$	70
Figura 23 – Densidade ciclogénica anual média ($\times 10^{-6}/\text{km}^2$) sobre o Atlântico Sudoeste durante o período 1979-2005, considerando todos os ciclones que se iniciaram com $\zeta \leq -1,5$	76
Figura 24 – Densidade ciclogénica média ($\times 10^{-6}/\text{km}^2$) na estação de verão sobre o Atlântico Sudoeste durante o período 1979-2005, considerando todos os ciclones que se iniciaram com $\zeta \leq -1,5$	77
Figura 25 – Densidade ciclogénica média ($\times 10^{-6}/\text{km}^2$) na estação de outono sobre o Atlântico Sudoeste durante o período 1979-2005, considerando todos os ciclones que se iniciaram com $\zeta \leq -1,5$	78
Figura 26 – Densidade ciclogénica média ($\times 10^{-6}/\text{km}^2$) na estação de inverno sobre o Atlântico Sudoeste durante o período 1979-2005, considerando todos os ciclones que se iniciaram com $\zeta \leq -1,5$	79
Figura 27 – Densidade ciclogénica média ($\times 10^{-6}/\text{km}^2$) na estação de primavera sobre o Atlântico Sudoeste durante o período 1979-2005, considerando todos os ciclones que se iniciaram com $\zeta \leq -1,5$	80
Figura 28 – a) média da densidade anual de todas as reanálises; b) diferença entre a média anual do RegCM4 com a média anual das reanálises; c) diferença entre a média anual do	

HadGEM2-ES com a média anual das reanálises; d) diferença entre a média anual do RegCM4 e a média anual do HadGEM2-ES82

Figura 29 – A linha superior representa as médias mensais de ciclones com origem nas três sub-regiões no período de 1979-2005, considerando todos os sistemas que se iniciam com $\zeta \leq -1,5$. A linha inferior representa o mesmo, porém considerando apenas os sistemas que se iniciam com $\zeta \leq -2,5$91

Figura 30 – A linha superior representa as médias sazonais de ciclones com origem nas três sub-regiões no período de 1979-2005, considerando todos os sistemas que se iniciam com $\zeta \leq -1,5$. A linha inferior representa o mesmo, porém considerando apenas os sistemas que se iniciam com $\zeta \leq -2,5$92

Figura 31 – Frequência relativa (%) dos ciclones quanto à duração (dias) nas três sub-regiões durante o período de 1979-2005, considerando todos os sistemas que se iniciaram com $\zeta \leq -1,5$93

Figura 32 – Frequência relativa (%) dos ciclones quanto à distância percorrida ($\times 10^2$ km) nas três sub-regiões durante o período de 1979-2005, considerando todos os sistemas que se iniciaram com $\zeta \leq -1,5$94

Figura 33 – Frequência relativa (%) dos ciclones quanto à velocidade média (m/s) nas três sub-regiões durante o período de 1979-2005, considerando todos os sistemas que se iniciaram com $\zeta \leq -1,5$95

Figura 34 – Frequência relativa (%) dos ciclones quanto à vorticidade relativa inicial ($\times 10^{-5} s^{-1}$) nas três sub-regiões durante o período de 1979-2005, considerando todos os sistemas que se iniciaram com $\zeta \leq -1,5$96

Figura 35 – Frequência relativa (%) dos ciclones quanto à vorticidade média total ($\times 10^{-5} s^{-1}$) nas três sub-regiões durante o período de 1979-2005, considerando todos os sistemas que se iniciaram com $\zeta \leq -1,5$97

Figura 36 – Série temporal da frequência anual de ciclones entre 1979 e 2098 no RegCM4, considerando todos os sistemas que se iniciam com $\zeta \leq -1,5$. A linha preta representa a média móvel de 5 anos. A linha vermelha representa a linha de tendência linear, com nível de confiança de 95%100

Figura 37 – Série temporal da frequência anual de ciclones entre 1979 e 2098 no HadGEM2-ES, considerando todos os sistemas que se iniciam com $\zeta \leq -1,5$. A linha preta representa a média móvel de 5 anos. A linha vermelha representa a linha de tendência linear, com nível de confiança de 95%.101

Figura 38 – Série temporal da frequência anual de ciclones entre 1979 e 2098 no RegCM4, considerando todos os sistemas que se iniciam com $\zeta \leq -2,5$. A linha preta representa a média móvel de 5 anos. A linha vermelha representa a linha de tendência linear, com nível de confiança de 95%.101

Figura 39 – Série temporal da frequência anual de ciclones entre 1979 e 2098 no HadGEM2-ES, considerando todos os sistemas que se iniciam com $\zeta \leq -2,5$. A linha preta

representa a média móvel de 5 anos. A linha vermelha representa a linha de tendência linear, com nível de confiança de 95%.
.....102

Figura 40 – Frequência relativa (%) de ciclogêneses por bandas de latitude no Atlântico Sudoeste em todos os períodos, simulados e projetados pelo RegCM4, considerando todos os sistemas que se iniciaram com $\zeta \leq -1,5$104

Figura 41 – Frequência relativa (%) de ciclogêneses por bandas de latitude no Atlântico Sudoeste em todos os períodos, simulados e projetados pelo HadGEM2-ES, considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$105

Figura 42 – Frequência relativa (%) de ciclogêneses por bandas de latitude no Atlântico Sudoeste em todos os períodos, simulados e projetados pelo RegCM4, considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -2,5$106

Figura 43 – Frequência relativa (%) de ciclogêneses por bandas de latitude no Atlântico Sudoeste em todos os períodos, simulados e projetados pelo HadGEM2-ES, considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -2,5$.
.....107

Figura 44 – Média sazonal de ciclones sobre o Atlântico Sudoeste em todos os períodos, simulado e projetado pelo RegCM4. a) $\zeta \leq -1,5$; b) $\zeta \leq -2,5$ 108

Figura 45 – Média sazonal de ciclones sobre o Atlântico Sudoeste em todos os períodos, simulados e projetados pelo HadGEM2-ES. a) $\zeta \leq -1,5$; b) $\zeta \leq -2,5$ 109

Figura 46 – Frequência relativa (%) dos ciclones no RegCM4 quanto à duração (dias) dos mesmos em todos os períodos e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$110

Figura 47 – Frequência relativa (%) dos ciclones no HadGEM2-ES quanto à duração (dias) dos mesmos em todos os períodos e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$.
.....110

Figura 48 – Frequência relativa (%) dos ciclones no RegCM4 quanto à distância percorrida ($\times 10^2$ km) dos mesmos em todos os períodos e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$111

Figura 49 – Frequência relativa (%) dos ciclones no HadGEM2-ES quanto à distância percorrida ($\times 10^2$ km) dos mesmos em todos os períodos e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$112

Figura 50 – Frequência relativa (%) dos ciclones no RegCM4 quanto à velocidade (m/s) dos mesmos em todos os períodos e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$113

Figura 51 – Frequência relativa (%) dos ciclones no HadGEM2-ES quanto à velocidade (m/s) dos mesmos em todos os períodos e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$.
.....113

Figura 52 – Frequência relativa (%) dos ciclones no RegCM4 quanto à vorticidade relativa inicial ($\times 10^{-5} \text{s}^{-1}$) dos mesmos em todos os períodos e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$114

Figura 53 – Frequência relativa (%) dos ciclones no HadGEM2-ES quanto à vorticidade relativa inicial ($\times 10^{-5} \text{s}^{-1}$) dos mesmos em todos os períodos e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$.	115
Figura 54 – Frequência relativa (%) dos ciclones no RegCM4 quanto à vorticidade média total ($\times 10^{-5} \text{s}^{-1}$) dos mesmos em todos os períodos e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$.	116
Figura 55 – Frequência relativa (%) dos ciclones no RegCM4 quanto à vorticidade média total ($\times 10^{-5} \text{s}^{-1}$) dos mesmos em todos os períodos e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$.	116
Figura 56 – Variabilidade sazonal da duração (dias) dos ciclones sobre o Atlântico Sudoeste, considerando todos os ciclones com $\zeta \leq -1,5$. a) RegCM4; b) HadGEM2-ES	119
Figura 57 – Variabilidade sazonal da distância percorrida (km) dos ciclones sobre o Atlântico Sudoeste, considerando todos os ciclones com $\zeta \leq -1,5$. a) RegCM4; b) HadGEM2-ES	119
Figura 58 – Variabilidade sazonal da velocidade média (m/s) dos ciclones sobre o Atlântico Sudoeste, considerando todos os ciclones com $\zeta \leq -1,5$. a) RegCM4; b) HadGEM2-ES	120
Figura 59 – Variabilidade sazonal da vorticidade relativa inicial ($\times 10^{-5} \text{s}^{-1}$) dos ciclones sobre o Atlântico Sudoeste, considerando todos os ciclones com $\zeta \leq -1,5$. a) RegCM4; b) HadGEM2-ES	121
Figura 60 – Variabilidade sazonal da vorticidade média total ($\times 10^{-5} \text{s}^{-1}$) dos ciclones sobre o Atlântico Sudoeste, considerando todos os ciclones com $\zeta \leq -1,5$. a) RegCM4; b) HadGEM2-ES	121
Figura 61 – Densidade ciclogênica anual média ($\times 10^{-6} / \text{km}^2$) sobre o Atlântico Sudoeste, considerando todos os ciclones que iniciaram com $\zeta \leq -1,5$. A linha superior corresponde ao RegCM4, onde a) 1979-2005; b) 2020-2050; c) 2070-2098. A linha inferior corresponde ao HadGEM2-ES, onde d) 1979-2005; e) 2020-2050; f) 2070-2098. Os valores entre 10,1 e 160 na escala de cores representam 2,5 a 40 ciclones por ano em uma área de $5^\circ \times 5^\circ$, aproximadamente.	124
Figura 62 – Diferenças da densidade anual média ($\times 10^{-6} / \text{km}^2$). A linha superior corresponde ao RegCM4, onde a) 2020-2050 menos 1979-2005; b) 2070-2098 menos 1979-2005. A linha inferior corresponde ao HadGEM2-ES, onde c) 2020-2050 menos 1979-2005; d) 2070-2098 menos 1979-2005. Foram considerados todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$.	125
Figura 63 – Densidade ciclogênica média ($\times 10^{-6} / \text{km}^2$) durante a estação de verão sobre o Atlântico Sudoeste, considerando todos os ciclones que iniciaram com $\zeta \leq -1,5$. A linha superior corresponde ao RegCM4, onde a) 1979-2005; b) 2020-2050; c) 2070-2098. A linha inferior corresponde ao HadGEM2-ES, onde d) 1979-2005; e) 2020-2050; f) 2070-2098.	127
Figura 64 – Densidade ciclogênica média ($\times 10^{-6} / \text{km}^2$) durante a estação de outono sobre o Atlântico Sudoeste, considerando todos os ciclones que iniciaram com $\zeta \leq -1,5$. A linha	

superior corresponde ao RegCM4, onde a) 1979-2005; b) 2020-2050; c) 2070-2098. A linha inferior corresponde ao HadGEM2-ES, onde d) 1979-2005; e) 2020-2050; f) 2070-2098.128

Figura 65 – Densidade ciclogénica média ($\times 10^{-6}/\text{km}^2$) durante a estação de inverno sobre o Atlântico Sudoeste, considerando todos os ciclones que iniciaram com $\zeta \leq -1,5$. A linha superior corresponde ao RegCM4, onde a) 1979-2005; b) 2020-2050; c) 2070-2098. A linha inferior corresponde ao HadGEM2-ES, onde d) 1979-2005; e) 2020-2050; f) 2070-2098.129

Figura 66 – Densidade ciclogénica média ($\times 10^{-6}/\text{km}^2$) durante a estação de primavera sobre o Atlântico Sudoeste, considerando todos os ciclones que iniciaram com $\zeta \leq -1,5$. A linha superior corresponde ao RegCM4, onde a) 1979-2005; b) 2020-2050; c) 2070-2098. A linha inferior corresponde ao HadGEM2-ES, onde d) 1979-2005; e) 2020-2050; f) 2070-2098.130

Figura 67 – Média sazonal de ciclones com origem na RG1 em todos os períodos, simulado e projetado pelo RegCM4 (a, b) e HadGEM2-ES (c, d). A coluna da esquerda representa os sistemas que se iniciam com $\zeta \leq -1,5$; a coluna da direita os sistemas com $\zeta \leq -2,5$132

Figura 68 – Frequência relativa (%) dos ciclones com origem na RG1 quanto à duração (dias), simulada e projetada pelo RegCM4 e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$135

Figura 69 – Frequência relativa (%) dos ciclones com origem na RG1 quanto à duração (dias), simulada e projetada pelo HadGEM2-ES e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$135

Figura 70 – Frequência relativa (%) dos ciclones com origem na RG1 quanto à distância percorrida ($\times 10^2$ km), simulada e projetada pelo RegCM4 e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$136

Figura 71 – Frequência relativa (%) dos ciclones com origem na RG1 quanto à distância percorrida ($\times 10^2$ km), simulada e projetada pelo HadGEM2-ES e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$136

Figura 72 – Frequência relativa (%) dos ciclones com origem na RG1 quanto à velocidade média (m/s), simulada e projetada pelo RegCM4 e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$137

Figura 73 – Frequência relativa (%) dos ciclones com origem na RG1 quanto à velocidade média (m/s), simulada e projetada pelo HadGEM2-ES e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$137

Figura 74 – Frequência relativa (%) dos ciclones com origem na RG1 quanto à vorticidade relativa inicial ($\times 10^{-5}\text{s}^{-1}$), simulada e projetada pelo RegCM4 e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$138

Figura 75 – Frequência relativa (%) dos ciclones com origem na RG1 quanto à vorticidade relativa inicial ($\times 10^{-5}\text{s}^{-1}$), simulada e projetada pelo HadGEM2-ES e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$138

Figura 76 – Frequência relativa (%) dos ciclones com origem na RG1 quanto à vorticidade média total ($\times 10^{-5} \text{s}^{-1}$), simulada e projetada pelo RegCM4 e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$.	139
Figura 77 – Frequência relativa (%) dos ciclones com origem na RG1 quanto à vorticidade média total ($\times 10^{-5} \text{s}^{-1}$), simulada e projetada pelo HadGEM2-ES e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$.	139
Figura 78 – Média sazonal de ciclones com origem na RG2 em todos os períodos, simulado e projetado pelo RegCM4 (a, b) e HadGEM2-ES (c, d). A coluna da esquerda representa os sistemas que se iniciam com $\zeta \leq -1,5$; a coluna da direita os sistemas com $\zeta \leq -2,5$.	140
Figura 79 – Frequência relativa (%) dos ciclones com origem na RG2 quanto à duração (dias), simulada e projetada pelo RegCM4 e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$.	144
Figura 80 – Frequência relativa (%) dos ciclones com origem na RG1 quanto à duração (dias), simulada e projetada pelo HadGEM2-ES e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$.	144
Figura 81 – Frequência relativa (%) dos ciclones com origem na RG2 quanto à distância percorrida ($\times 10^2 \text{ km}$), simulada e projetada pelo RegCM4 e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$.	145
Figura 82 – Frequência relativa (%) dos ciclones com origem na RG2 quanto à distância percorrida ($\times 10^2 \text{ km}$), simulada e projetada pelo HadGEM2-ES e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$.	145
Figura 83 – Frequência relativa (%) dos ciclones com origem na RG2 quanto à velocidade média (m/s), simulada e projetada pelo RegCM4 e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$.	146
Figura 84 – Frequência relativa (%) dos ciclones com origem na RG2 quanto à velocidade média (m/s), simulada e projetada pelo HadGEM2-ES e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$.	146
Figura 85 – Frequência relativa (%) dos ciclones com origem na RG2 quanto à vorticidade relativa inicial ($\times 10^{-5} \text{s}^{-1}$), simulada e projetada pelo RegCM4 e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$.	147
Figura 86 – Frequência relativa (%) dos ciclones com origem na RG1 quanto à vorticidade relativa inicial ($\times 10^{-5} \text{s}^{-1}$), simulada e projetada pelo HadGEM2-ES e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$.	147
Figura 87 – Frequência relativa (%) dos ciclones com origem na RG2 quanto à vorticidade média total ($\times 10^{-5} \text{s}^{-1}$), simulada e projetada pelo RegCM4 e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$.	148
Figura 88 – Frequência relativa (%) dos ciclones com origem na RG2 quanto à vorticidade média total ($\times 10^{-5} \text{s}^{-1}$), simulada e projetada pelo HadGEM2-ES e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$.	148

Figura 89 – Média sazonal de ciclones com origem na RG3 em todos os períodos, simulados e projetados pelo RegCM4 (a, b) e HadGEM2-ES (c, d). A coluna da esquerda representa os sistemas com $\zeta \leq -1,5$; a coluna da direita os sistemas com $\zeta \leq -2,5$	150
Figura 90 – Frequência relativa (%) dos ciclones com origem na RG3 quanto à duração (dias), simulada e projetada pelo RegCM4 e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$	153
Figura 91 – Frequência relativa (%) dos ciclones com origem na RG3 quanto à duração (dias), simulada e projetada pelo HadGEM2-ES e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$	153
Figura 92 – Frequência relativa (%) dos ciclones com origem na RG3 quanto à distância percorrida ($\times 10^2$ km), simulada e projetada pelo RegCM4 e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$	154
Figura 93 – Frequência relativa (%) dos ciclones com origem na RG3 quanto à distância percorrida ($\times 10^2$ km), simulada e projetada pelo HadGEM2-ES e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$	154
Figura 94 – Frequência relativa (%) dos ciclones com origem na RG3 quanto à velocidade média (m/s), simulada e projetada pelo RegCM4 e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$	155
Figura 95 – Frequência relativa (%) dos ciclones com origem na RG3 quanto à velocidade média (m/s), simulada e projetada pelo HadGEM2-ES e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$	155
Figura 96 – Frequência relativa (%) dos ciclones com origem na RG3 quanto à vorticidade relativa inicial ($\times 10^{-5} \text{s}^{-1}$), simulada e projetada pelo RegCM4 e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$	156
Figura 97 – Frequência relativa (%) dos ciclones com origem na RG3 quanto à vorticidade relativa inicial ($\times 10^{-5} \text{s}^{-1}$), simulada e projetada pelo HadGEM2-ES e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$	156
Figura 98 – Frequência relativa (%) dos ciclones com origem na RG3 quanto à vorticidade média total ($\times 10^{-5} \text{s}^{-1}$), simulada e projetada pelo RegCM4 e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$	157
Figura 99 – Frequência relativa (%) dos ciclones com origem na RG3 quanto à vorticidade média total ($\times 10^{-5} \text{s}^{-1}$), simulada e projetada pelo HadGEM2-ES e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$	157

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Reanálises utilizadas neste estudo e suas características. O período utilizado no trabalho é limitado até o ano de 2005.	44
Tabela 2 – Médias anuais de ciclones com $\zeta \leq -1,5$ e $\zeta \leq -2,5$, com os respectivos desvios padrões, obtidos nos modelos e reanálises no período 1979-2005.	55
Tabela 3 – Meses e estações de maior e menor ocorrência de ciclones entre reanálises e modelos, para os sistemas com $\zeta \leq -1,5$ e $\zeta \leq -2,5$	62
Tabela 4 – Características médias dos ciclones sobre o Atlântico Sudoeste no período de 1979-2005, considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$	64
Tabela 5 – Características médias dos ciclones sobre o Atlântico Sudoeste no período de 1979-2005, considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -2,5$	65
Tabela 6 – Meses e estações de maior e menor ocorrência de ciclones com origem na sub-região RG1, considerando ambos os limiares de vortacidade inicial.	84
Tabela 7 – Meses e estações de maior e menor ocorrência de ciclones com origem na sub-região RG2, considerando ambos os limiares de vortacidade inicial.	86
Tabela 8 – Meses e estações de maior e menor ocorrência de ciclones com origem na sub-região RG3, considerando ambos os limiares de vortacidade inicial.	89
Tabela 9 – Médias anuais de ciclones ao longo dos três períodos sobre o Atlântico Sudoeste e os respectivos desvios padrões.	100
Tabela 10 - Características médias dos ciclones no Atlântico Sudoeste em todos os períodos, simulados e projetados pelo RegCM4 e HadGEM2-ES.	117
Tabela 11 – Características gerais médias dos ciclones com gênese nas três sub-regiões do Atlântico Sudoeste em todos os períodos, simulados e projetados pelo RegCM4, considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$	158
Tabela 12 – Características gerais médias dos ciclones com gênese nas três sub-regiões do Atlântico Sudoeste em todos os períodos, simulados e projetados pelo HadGEM2-ES considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$	158
Tabela 13 – Características gerais médias dos ciclones com gênese nas três sub-regiões do Atlântico Sudoeste em todos os períodos, simulados e projetados pelo RegCM4 considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -2,5$	159
Tabela 14 – Características gerais médias dos ciclones com gênese nas três sub-regiões do Atlântico Sudoeste em todos os períodos, simulados e projetados pelo HadGEM2-ES considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -2,5$	159

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AR5	Five Assessment Report
BATS	Biosphere-atmosphere Transfer Scheme
CAM3	Community Atmospheric Model version 3
CFC	Clorofluorcarbono
CFSR	Climate Forecast System Reanalysis
CMIP5	Coupled Model Intercomparison Project Phase 5
CORDEX	Cordinated Regional climate Downscaling Experiment
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
ERA-40	ECMWF Reanalysis 40
ERA-Interim	ECMWF Reanalysis Interim
GEE	Gases de efeito estufa
GLCC	Global Land Cover Characterization
GrEC	Grupo de Estudos Climáticos da USP
HadAM3	Hadley Centre Atmospheric Model version 3
HadGEM2-ES	Hadley Centre Global Environmental Model version 2 Earth System
HCFC	Hidroclorofluorcarbono
ICTP	International Centre for Theoretical Physics
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
JBN	Jatos de Baixos Níveis
JRA-25	Japanese 25-year Reanalysis
MCG	Modelo climático global
MCR	Modelo climático regional
NASA-MERRA	NASA's Modern-Era Retrospective Analysis for Research
NCEP-I	National Centers for Environmental Prediction I
NCEP-II	National Centers for Environmental Prediction II
ODP	Oscilação Decadal do Pacífico
ppm	Partes por milhão
RCP	Representative Concentration Pathways
RegCM	Regional Climate Model
RegCM3	Regional Climate Model version 3
RegCM4	Regional Climate Model version 4
RG1	Sub-região próxima à costa sul-sudeste do Brasil
RG2	Sub-região próxima à desembocadura do rio da Prata
RG3	Sub-região próxima à costa leste da Argentina
SRES	Special Report Emission Scenarios
TSM	Temperatura de superfície do mar
USGS	United States Geological Survey
ζ_{925}	Vorticidade relativa à 925 hPa

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	19
2 OBJETIVO GERAL E ESPECÍFICOS.....	22
3 REFERENCIAL TEÓRICO.....	23
3.1 Sistemas ciclônicos	23
3.1.1 Ciclones extratropicais	23
3.1.2 Ciclones tropicais	25
3.1.3 Ciclones subtropicais ou híbridos.....	26
3.2 Modelos climáticos	27
3.3 Cenários de mudanças climáticas.....	30
3.4 Climatologia dos ciclones no Atlântico Sudoeste: presente e futuro	34
4 METODOLOGIA	43
4.1 Descrição dos modelos e reanálises	43
4.2 Algoritmo de identificação e rastreamento dos ciclones.....	45
4.3 Análise dos dados.....	48
4.3.1 Considerações primárias	48
4.3.2 Climatologia, características e densidade de ciclones	49
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	52
5.1 Clima Presente: Ciclones no Atlântico Sudoeste	52
5.1.1 Variabilidade interanual	54
5.1.2 Variabilidade mensal e sazonal	58
5.1.3 Características médias	62
5.1.4 Densidade ciclogênética.....	70
5.1.5 As três sub-regiões no clima presente: RG1, RG2 e RG3.....	82
5.2 Clima Futuro: Ciclones no Atlântico Sudoeste	98
5.2.1 Variabilidade interanual: futuro próximo (2020-2050).....	99
5.2.2 Variabilidade interanual: futuro distante (2070-2098).....	99
5.2.3 Frequência de ciclogêneses por bandas de latitude	103
5.2.4 Variabilidade sazonal: 2020-2050 e 2070-2098.....	107
5.2.5 Características médias	109
5.2.6 Densidade ciclogênética.....	122
5.2.7 As três sub-regiões no clima futuro: RG1, RG2 e RG3	131
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	160

7 REFERÊNCIAS	164
----------------------------	------------

1 INTRODUÇÃO

Os ciclones são sistemas atmosféricos de escala sinótica (dimensão horizontal de centenas a milhares de quilômetros) caracterizados pela presença de um núcleo de baixa pressão atmosférica com circulação horária no Hemisfério Sul e anti-horária no Hemisfério Norte (PETTERSEN, 1956). Estes fenômenos são importantes no sistema climático, uma vez que são responsáveis pelo transporte de calor e umidade entre diferentes latitudes, devido principalmente ao aquecimento diferencial da Terra promovido pela energia solar incidente (PEIXOTO; OORT, 1992).

Visto que os ciclones afetam o tempo e o clima, o conhecimento das características desses sistemas, no presente e futuro, se faz importante. Mudanças na climatologia e nas características dos ciclones no clima futuro podem refletir em alterações nas condições de tempo (ventos, marés de tempestade, extremos de precipitação e temperatura etc.) das áreas que exercem e/ou irão exercer influência. Além disso, os ciclones causam impactos diretos e indiretos à sociedade, tais como: danos materiais e financeiros nas atividades em zonas costeiras (SANDERS; GYAKUM, 1980; BITENCOURT et al., 2011; REBOITA et al., 2012); perturbações sobre ecossistemas e comunidades biológicas sensíveis positiva ou negativamente à atuação de tempestades (BROWN; DANIEL; GEORGE, 2010; MUMBY; VITOLO; STEPHENSON, 2011); alterações no transporte de calor e umidade entre as latitudes, acabando por influenciar no balanço energético da atmosfera (PEIXOTO; OORT, 1992; KRÜGER et al., 2012); entre outros.

Estudos climatológicos com enfoque no Hemisfério Sul têm mostrado uma grande frequência de ocorrência de ciclones no setor sudoeste do Atlântico Sul (HOSKINS; HODGES, 2005; MENDES et al., 2009; REBOITA et al., 2010; KRÜGER et al., 2012), onde as condições atmosféricas e oceânicas se mostram favoráveis à ciclogênese (processo inicial de desenvolvimento e intensificação de um ciclone). Alguns autores encontraram que a distribuição espacial ciclogênética nessa região abrange três subáreas principais, envolvendo a costa sul-sudeste do Brasil; a costa do Uruguai e extremo sul do Brasil; e a costa leste da Argentina (HOSKINS; HODGES, 2005; REBOITA et al., 2010; REBOITA et al., 2012).

Dentre as forçantes físicas que atuam no desenvolvimento desses fenômenos nessas sub-regiões, destacam-se: os fluxos de calor latente e sensível na interface oceano-atmosfera, que aumentam a instabilidade atmosférica e o aprofundamento da convecção do ar; o gradiente horizontal de temperatura, intensificando a instabilidade baroclínica; o efeito da topografia devido à presença da Cordilheira dos Andes, induzindo o aumento da vorticidade ciclônica à leste da barreira; e os distúrbios em médios e altos níveis da atmosfera, também responsáveis por favorecer o desenvolvimento de centros de baixa pressão em superfície (GAN; RAO, 1991; PIVA; MOSCATTI; GAN, 2008; REBOITA et al., 2012).

Em relação à influência das mudanças climáticas sobre a atividade dos ciclones, muitos estudos têm se utilizado dos cenários projetados para o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC). O quinto relatório do IPCC (AR5), publicado em 2013, apresentou novos cenários com base na alteração das forçantes radiativas e seus impactos no balanço radiativo global, denominados de *Representative Concentration Pathway* (RCP). Assim, são quatro os novos cenários delimitados: RCP8.5; RCP6.0; RCP4.5; e RCP2.6. O cenário RCP8.5 é o cenário projetado mais pessimista, e indica um aumento na forçante radiativa terrestre de 8.5 W/m² em 2100. Estes cenários são projetados até o ano de 2100 e têm como referência o ano de 1750. Dessa forma, tendo em vista estes diferentes cenários climáticos, projetam-se mudanças na climatologia dos ciclones em determinadas regiões do globo, inclusive dos sistemas atuantes no Atlântico Sul (GENGI; SUGI, 2003; LAMBERT; FYFE, 2006; OOUCHI et al., 2006; BENGTSSON et al., 2007; KRÜGER et al., 2012, GRIEGER et al., 2014; RATHMANN; YANG; KASS, 2014).

O estudo dos ciclones no clima futuro tem sido realizado tanto com modelos climáticos globais (MCG) quanto regionais (MCR). No entanto, como os MCG apresentam baixa resolução horizontal (100-300 km; MARENGO et al., 2010), o que os tornam menos eficientes na representação de processos de escala local e regional, os MCR são uma alternativa mais viável no estudo do clima de áreas limitadas (REBOITA et al., 2014).

O *Regional Climate Model* (RegCM) é um modelo regional que tem sido aplicado em estudos climáticos relacionados à simulação e projeção da temperatura, precipitação, ventos, sistema de monção (MARTINEZ-CASTRO et al., 2006; BASIT et al., 2012) e, também, em relação a atividade ciclônica no clima presente (REBOITA, 2008;

REBOITA et al., 2010) e futuro (LIONELLO; BOLDRIN; GIORGI, 2008; KRÜGER et al., 2012; GRIEGER et al., 2014).

Devido à relevância da compreensão dos padrões ciclogênicos no clima presente e futuro, este estudo tem como foco avaliar a climatologia e as características dos ciclones no Atlântico Sudoeste ($57,5^{\circ}\text{S}$ - $15,5^{\circ}\text{S}$ e 70°W - 21°W) projetada pelo RegCM4 aninhado ao modelo global HadGEM2-ES e pelo próprio HadGEM2-ES, no clima presente (1979-2005), e em dois períodos futuros: futuro próximo (2020-2050) e futuro distante (2070-2098), considerando o cenário RCP8.5.

Adicionalmente, para avaliar a capacidade do modelo em reproduzir os padrões climatológicos dos ciclones, o estudo utiliza dados de cinco conjuntos de reanálises como referência: CFSR, ERA-Interim, ERA-40, NCEP-I e NCEP-II. Nesse sentido, este estudo se mostra inédito para a área de abrangência e, portanto, uma importante fonte de resultados para futuros trabalhos.

A identificação objetiva dos ciclones é realizada através um método automático de identificação e rastreamento baseado em mínimos de vorticidade relativa (SUGAHARA 2000; REBOITA et al., 2010). É importante mencionar que esse estudo climatológico pode incluir ciclones extratropicais, subtropicais e tropicais, já que o algoritmo não faz distinção entre esses sistemas.

2 OBJETIVO GERAL E ESPECÍFICOS

O principal objetivo deste estudo é avaliar a climatologia de ciclones sobre o Atlântico Sudoeste no clima presente (1979-2005) e em dois períodos futuros: futuro próximo (2020-2050) e futuro distante (2070-2089), simulada pelo RegCM4 aninhado ao modelo global HadGEM2-ES e tendo como base o cenário climático RCP8.5. Como objetivos específicos têm-se:

- determinar a climatologia dos sistemas ciclônicos no Atlântico Sudoeste no clima presente (1979-2005) a partir do RegCM4, do modelo global HadGEM2-ES e de cinco conjuntos de reanálises: CFSR, ERA-Interim, ERA-40, NCEP-I e NCEP-II;
- comparar os resultados obtidos entre as diferentes reanálises;
- comparar os resultados das simulações do RegCM4 e HadGEM2-ES com os obtidos pelas reanálises, a fim de verificar e validar a destreza dos modelos em reproduzir os padrões ciclogénéticos sobre a região de estudo no clima presente e
- avaliar a climatologia e características dos ciclones no Atlântico Sudoeste projetados para o cenário RCP8.5 em dois períodos: futuro próximo (2020-2050) e futuro distante (2070-2089).

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Sistemas ciclônicos

Um sistema ciclônico pode ser considerado como um fenômeno atmosférico caracterizado pela movimentação circular de uma massa de ar em torno de um centro de baixa pressão em superfície. Dentre as principais forças atuantes ao longo do seu ciclo de vida, podem-se destacar: i) a força de Coriolis, responsável pela deflexão do escoamento de grande e média escala (e que origina o sentido da circulação do sistema), apresentando sentido horário no Hemisfério Sul e anti-horário no Hemisfério Norte; ii) a força gradiente de pressão, que condiciona a sua intensidade e deslocamento; iii) a força de atrito, capaz de retirar energia do sistema até a sua dissipação (REBOITA, 2008).

Dependendo dos mecanismos de formação e da faixa latitudinal de sua gênese, os ciclones podem ser divididos em três categorias principais: ciclones extratropicais, ciclones tropicais e ciclones subtropicais. Quando os ciclones são identificados objetivamente com algoritmos baseados em mínimos de pressão ou vorticidade relativa, a climatologia incluirá os três tipos de ciclones, a menos que sejam empregadas técnicas específicas para a filtragem de cada categoria.

3.1.1 Ciclones extratropicais

O primeiro modelo conceitual que buscou descrever o processo de formação e desenvolvimento dos ciclones extratropicais foi idealizado por Bjerknes (1919), o que posteriormente veio a ser denominado de Teoria da Frente Polar. Nesta teoria, postula-se que a interação entre uma massa de ar fria proveniente de altas latitudes e uma massa de ar quente tropical faz com que o ar frio desenvolva uma cunha sob o ar quente, favorecendo a ascensão deste em decorrência da diferença de densidade entre as massas de ar. Como consequência, a pressão exercida em superfície devido ao peso da coluna atmosférica é diminuída, originando o processo de convergência do ar em baixos níveis.

Mais tarde, Brunt (1930) mostrou que para haver redução da pressão em superfície seria necessário que uma circulação anticiclônica em altos níveis estivesse presente, de

modo a favorecer a divergência horizontal do ar, sustentando a convergência em superfície. Desta forma, em um determinado estado atmosférico onde a divergência em altos níveis fosse superior ao processo convergente do ar em baixos níveis, a redução da pressão em superfície seria favorecida.

Em outro estudo, Bjerknes e Holmboe (1944) mostraram que a divergência em altos níveis ocorre a leste dos cavados e a oeste nas cristas, enquanto que a convergência se instala a oeste dos cavados e a leste nas cristas. Assim, o favorecimento da ciclogênese em superfície ocorre quando há divergência a leste do cavado em níveis superiores (**Figura 1**). O contrário ocorre quando um sistema anticiclônico em baixos níveis se mantém espacialmente sob o setor oeste de um cavado. Esta configuração inibe o seu crescimento, uma vez que desfavorece a convergência em superfície.

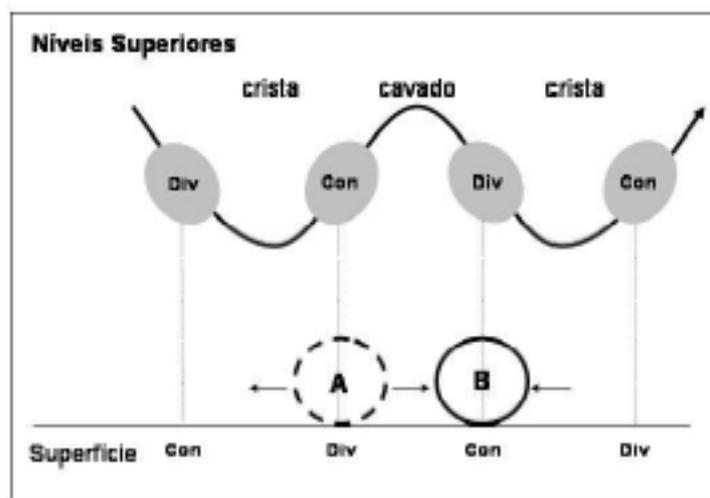


Figura 1 – Perfil vertical dos sistemas de pressão na superfície e os campos de convergência e divergência em altos níveis no Hemisfério Sul. A situação representada é propícia ao desenvolvimento dos ciclones em superfície. (REBOITA, 2008).

Pode-se definir quatro estágios principais ao longo do ciclo de vida dos ciclones extratropicais (BJERKNES; SOLBERG, 1922):

- i. Estágio de onda: momento em que ocorre o desenvolvimento de ondas frontais próximo à superfície, propiciando a interação entre a frente fria polar e a frente quente tropical.
- ii. Estágio de ciclone jovem: a frente fria avança em direção à frente quente, favorecendo o processo de convergência do ar e resultando em uma considerável queda na pressão atmosférica.

iii. Estágio de desenvolvimento máximo do ciclone: o sistema ciclônico atinge seu pico máximo de profundidade e atividade convectiva. Ocorre o processo de oclusão das frentes, em virtude de o avanço da frente fria tomar o lugar da frente quente, de modo a diminuir ainda mais a pressão atmosférica.

iv. Estágio de dissipação: o ciclone adentra o período de perda de energia em decorrência da atuação do atrito em superfície, perda de energia cinética e vorticidade. O processo que dá fim ao seu ciclo de vida é denominado de ciclólise.

3.1.2 Ciclones tropicais

Os ciclones tropicais são sistemas atmosféricos não-frontais, caracterizados por um centro de baixa pressão com ventos que aumentam de intensidade do núcleo para as extremidades do sistema. O seu desenvolvimento ocorre sobre regiões de baixo cisalhamento vertical de vento e em contato com superfícies oceânicas quentes, de onde extraem sua energia (EMANUEL, 1986).

O termo “ciclone tropical” provém do fato de serem sistemas ciclônicos cuja gênese se dá sob a influência de águas quentes dos oceanos tropicais (SANFORD et al., 1987), normalmente abrangendo a faixa latitudinal entre 5° e 20° em ambos os hemisférios.

Dependendo da região em que ocorrem e são observados, assim como da velocidade dos ventos associados ao sistema ciclônico, os sistemas tropicais apresentam variabilidade quanto a sua nomenclatura. Com ventos de intensidade superior a 119 km/h podem ser denominados de furacão (no Atlântico e nordeste do Pacífico); de tufão (sobre o noroeste do Pacífico); apenas de ciclone tropical (sudoeste do Pacífico e sudeste do oceano Índico; NEUMANN, 1993). Quando os ventos associados atingem velocidade de até 63 km/h, denominam-se de depressão tropical; e entre 65 km/h e 119 km/h, recebem o nome de tempestade tropical.

Dentre as principais condições atmosféricas e de superfície para a formação e intensificação dos ciclones tropicais, destacam-se (GRAY, 1968):

- distúrbios de escala sinótica em altos e médios níveis, favorecendo a convergência do ar em superfície;

- valores de temperatura da superfície do mar (TSM) em torno de 26,5°C, de modo a fornecer suficiente fluxo de calor e umidade para a coluna de ar adjacente;
- baixo cisalhamento vertical do vento, evitando a dispersão do calor e umidade e permitindo o máximo desenvolvimento da atividade convectiva e
- suficiente distância das latitudes equatoriais, para que o sistema seja influenciado pela força de Coriolis e desenvolva circulação ciclônica, resultante da interação desta força com a força gradiente de pressão que atua sobre o ciclone.

O processo de dissipação do ciclone tropical ocorre quando o sistema adentra regiões continentais, sofrendo mais fortemente o efeito do atrito em superfície e perdendo contato com a sua fonte primária de energia, a superfície oceânica quente. Ainda, a diminuição da TSM e a advecção de ar frio e seco ao sistema ciclônico também favorecem o seu enfraquecimento.

O primeiro ciclone tropical documentado no Atlântico Sul teve sua gênese em março de 2004, onde se desenvolveu primeiramente como um ciclone extratropical e tomou uma orientação leste-sudeste, afastando-se da América do Sul. No entanto, ao encontrar-se com um bloqueio atmosférico do tipo dipolo a leste do continente, o sistema assumiu um movimento em direção a oeste. Aliado às condições de TSM mais propícias e baixo cisalhamento vertical do vento na região, o ciclone entrou em um processo de transição tropical (MCTAGGART-COWAN et al., 2006). O ciclone tropical Catarina, como foi nomeado, foi um caso de ocorrência relativamente rara, devido às condições desfavoráveis para o desenvolvimento desse tipo de sistema na região (forte cisalhamento vertical do vento e TSM mais frias que em outras latitudes tropicais do globo).

3.1.3 Ciclones subtropicais ou híbridos

Guishard, Evans e Hart (2009) definem os ciclones subtropicais como sistemas ciclônicos que apresentam características tanto dos ciclones extratropicais quanto dos tropicais. Por essa razão são também denominados de ciclones híbridos.

Os ciclones subtropicais podem se desenvolver sobre uma extensa faixa latitudinal, normalmente entre as regiões de atuação dos ciclones tropicais e extratropicais

(aproximadamente entre 20° e 40°; GUISHARD; EVANS, 2009). Podem ocorrer em situação de alto cisalhamento vertical do vento e menores valores de TSM, quando comparados aos ciclones tropicais.

A intensidade dos ventos associados aumenta após um raio de 100 km ou mais do centro do ciclone e, geralmente, apresentam um núcleo quente fraco próximo a superfície, semelhante ao ciclone tropical, com diminuição da temperatura em altos níveis (GUISHARD; EVANS, 2009).

Gozzo et al. (2014) determinaram uma climatologia de ciclones subtropicais sobre a porção sudoeste do Atlântico Sul entre os anos de 1979 e 2011, através de dados das reanálises ERA-Interim e NCEP-I. Os resultados mostraram que as ciclogêneses foram mais frequentes na costa sul-sudeste do Brasil durante a estação de verão e secundariamente no outono.

3.2 Modelos climáticos

Modelos climáticos são ferramentas constituídas de equações matemáticas que traduzem os diversos processos atmosféricos, terrestres e oceânicos, com o principal objetivo de representar o comportamento do sistema climático atual e futuro frente às forçantes biogeoquímicas e físicas impostas (TRENBERTH, 1992).

A medida que o conhecimento dos elementos e processos climáticos evoluem e que o avanço da computação permite maior capacidade de processamento e armazenamento de dados, a destreza dos modelos em representar fenômenos e processos de menor escala espacial também aumenta (MARENGO et al., 2010). No entanto, Trenberth (2010) argumenta que quanto maior o número de processos, componentes e interações reconhecidas pelos modelos climáticos, também maior a assimilação de incertezas associadas aos novos elementos. Como o autor explica, quanto maior o acúmulo de conhecimento ao longo do tempo, maior o acúmulo de fatores e variáveis desconhecidas.

O estudo dos ciclones pode ser realizado através de modelos climáticos globais (MCG) ou regionais (MCR). Entretanto, devido à resolução horizontal empregada nos modelos globais ser acima de 100 km, estes se mostram ineficientes em representar os

processos de escala regional e local. Por isso, vários estudos têm utilizado modelos climáticos regionais.

Com relação aos estudos com MCG, Jung et al. (2006) analisaram a sensibilidade na simulação de ciclones extratropicais no Hemisfério Norte, durante o inverno (1982-2001), em relação ao aumento progressivo da resolução horizontal. Foi utilizado um modelo atmosférico global do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) e os resultados foram comparados com a reanálise ERA-40. Os autores encontraram que o ganho na resolução horizontal permitiu maior realismo na representação da climatologia dos ciclones extratropicais. A simulação com base na menor resolução ($1,875^\circ \times 1,875^\circ$) foi capaz de representar cerca de 60% do número total de ciclones observados para o Hemisfério Norte, enquanto que a simulação com a maior resolução horizontal ($0,7^\circ \times 0,7^\circ$) foi a que obteve resultados mais próximos aos da reanálise. Conforme os autores, tais diferenças são reflexos do grau de representação dos processos físicos e da orografia.

Desta forma, quando é necessário captar a influência de uma região com topografia complexa, áreas próximas à linha de costa ou com cobertura de superfície heterogênea, assim como processos e fenômenos que se desenvolvem em menor escala espacial, é necessária a utilização de modelos com melhor resolução espacial. Esta necessidade fez com que fossem desenvolvidos os modelos climáticos regionais de área limitada (cobrem áreas menores e específicas do globo), com maior resolução horizontal, utilizando condições iniciais e de contorno fornecidas pelos MCG ou de reanálises, oferecendo maior detalhamento local e regional (GIORGI, 1990).

Muitos estudos referentes ao clima e a climatologia de ciclones têm sido beneficiados pela utilização dos MCR (LIONELLO; GIORGI, 2007; MARENGO et al., 2010; REBOITA et al., 2010). Em um destes estudos, Reboita et al. (2010) encontraram considerável destreza do RegCM3 em simular a climatologia dos ciclones no clima presente no oceano Atlântico Sudoeste. A simulação realizada também confirmou a presença das três principais zonas ciclogênicas do Atlântico Sudoeste, próximas à costa leste da América do Sul.

Cabe ressaltar que a utilização de dados provenientes de reanálises em estudos climáticos, apesar das incertezas vinculadas, pode ser uma importante forma de avaliação da capacidade de simulação de um modelo, seja ele a nível global ou regional. Hodges,

Lee e Bengtsson (2011) fizeram uma comparação entre quatro reanálises (ERA-Interim, NASA-MERRA, NCEP-CFSR e JRA-25) a respeito da atividade de ciclones extratropicais em ambos os hemisférios. A ideia foi analisar o grau de similaridade entre os diferentes conjuntos de dados na representação dos ciclones e averiguar possíveis melhorias das reanálises mais recentes em relação às antigas. Os autores concluíram que os resultados obtidos em geral se mostraram bastante correlatos entre as reanálises, apresentando pequenas diferenças em regiões onde a complexidade da orografia é fator delimitante na simulação. A reanálise JRA-25, mais antiga entre os quatro conjuntos e de menor resolução, foi a que apresentou maior discrepância entre as reanálises, evidenciando a necessidade do contínuo aprimoramento desses conjuntos de dados a fim de maior representação da realidade e servir como ferramenta auxiliar na evolução das simulações e projeções dos modelos climáticos.

Com relação a versão mais atual do RegCM, o RegCM4 ainda conta com poucos trabalhos publicados. No entanto, Giorgi et al. (2012) demonstraram a partir de experimentos sob diferentes regimes climáticos em quatro áreas de estudo, pré-estabelecidas pelo projeto CORDEX (*Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment*), um aumento no desempenho de simulação pelo modelo comparado às versões anteriores. Outros autores, como Llopart (2014) e Segalin (2012), encontraram suficiente capacidade de simulação dos principais padrões, processos e variabilidade climática na América do Sul pelo modelo.

Por fim, o projeto CORDEX surge de forma a integrar e fornecer um quadro síntese acessível à comunidade científica a respeito dos resultados obtidos no uso dos modelos regionais em diferentes áreas do globo, assim como para facilitar a avaliação e o aprimoramento das melhores configurações para a simulação e projeção climática. Seus domínios e atuação abrangem a grande maioria das áreas continentais e oceanos adjacentes. A **Figura 2** representa o domínio estabelecido pelo projeto para a região da América do Sul, pertinente a este estudo.

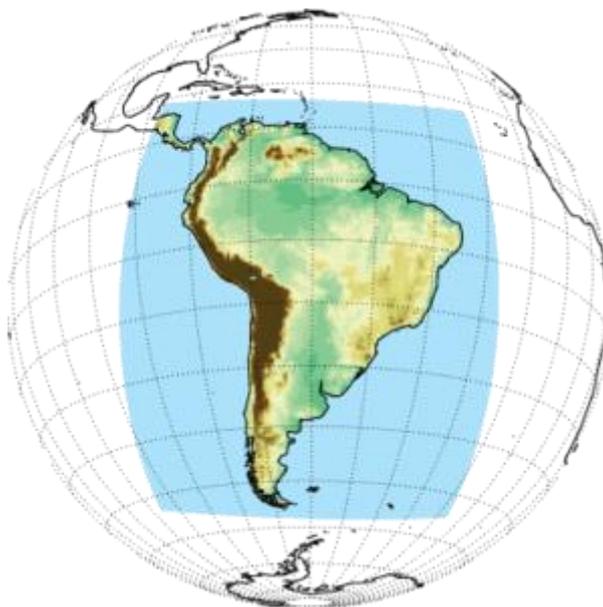


Figura 2 – Domínio regional do projeto CORDEX para a região da América do Sul e adjacências.

3.3 Cenários de mudanças climáticas

Para a compreensão das possíveis respostas do sistema climático às condições ambientais futuras é necessário abordar alguns fatores principais relativos às forçantes climáticas: a estimativa das emissões futuras de gases de efeito estufa; o desenvolvimento tecnológico ao longo do tempo; mudanças no uso e ocupação da terra; desenvolvimento econômico e social e o crescimento populacional.

Tendo em vista estes parâmetros, o quinto relatório do IPCC (AR5) foi elaborado com base em um novo modelo de cenários de forçantes climáticas denominados *Representative Concentration Pathway* (RCP). São quatro os cenários delimitados: RCP2.6; RCP4.5; RCP6.0; e RCP8.5. Cada cenário representa a forçante radiativa, medida em W/m^2 , projetada para o ano de 2100 (tendo como referência o ano de 1750) resultante da combinação de diferentes condicionantes climáticos atuantes sobre o balanço energético terrestre (IPCC, 2013).

Entende-se como forçante radiativa o impacto positivo ou negativo (em termos de perdas ou ganhos de energia) realizado por um composto químico ou *driver* climático sobre a energia retida no planeta, decorrente da radiação solar. Um valor positivo de

forçante radiativa gera uma tendência de aquecimento da superfície da Terra, enquanto que um valor negativo indica um resfriamento.

Desta forma, o cenário RCP8.5 representa uma perspectiva climática mais pessimista em relação ao aquecimento da superfície terrestre, com uma forçante radiativa de 8.5 W/m². O cenário RCP6.0 projeta uma forçante radiativa de 6 W/m² para o ano de 2100, e assim por diante. O cenário mais otimista corresponde ao cenário RCP2.6, caracterizado pelo menor valor de forçante radiativa projetado.

O dióxido e monóxido de carbono (CO₂; CO), o metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O), ozônio (O₃), aerossóis e as alterações no albedo em superfície e na irradiação solar incidente correspondem alguns dos principais compostos químicos e processos naturais e antropogênicos que alteram o balanço energético global (IPCC, 2013; **Figura 3**) utilizados na construção dos cenários delineados.

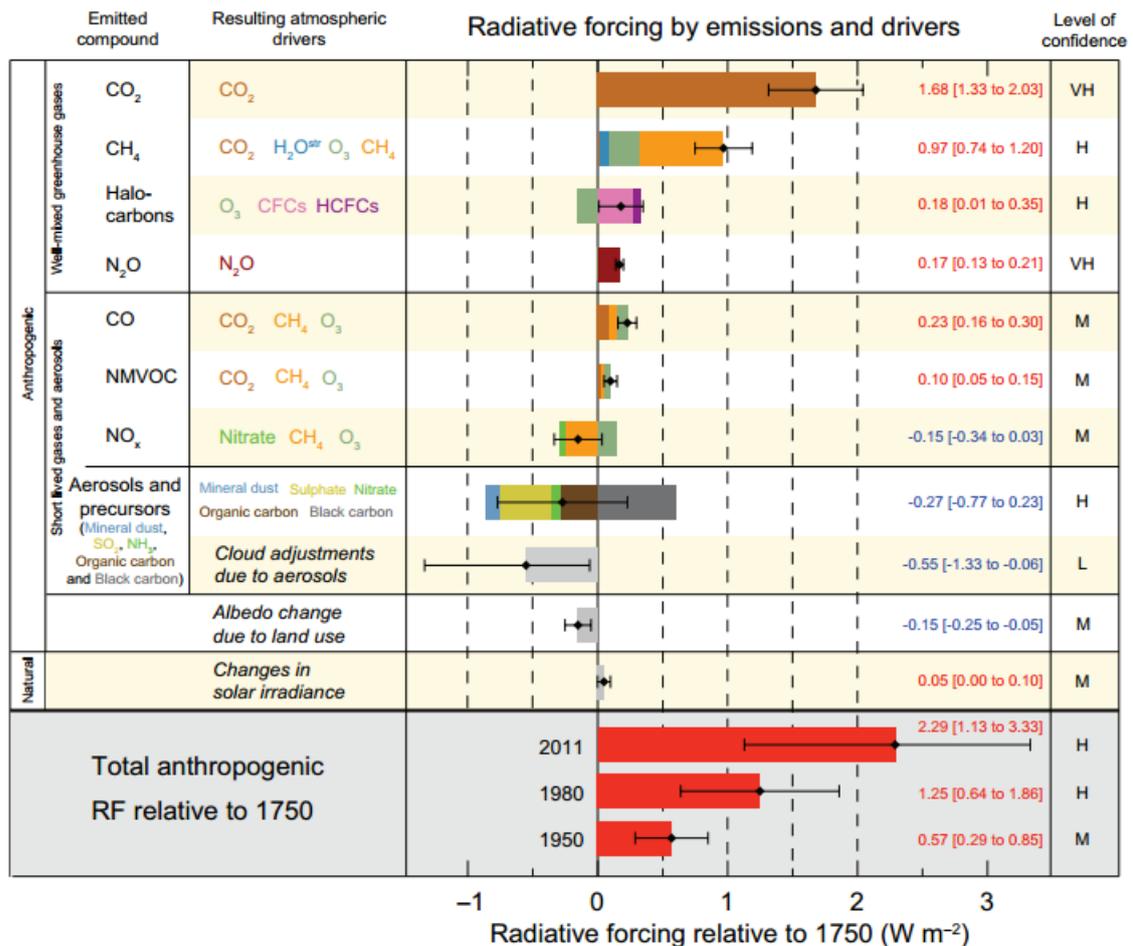


Figura 3 – Forçantes radiativa e incertezas associadas para os principais *drivers* climáticos. Valores à direita (W/m²) foram estimados no ano de 2011, tendo como referência o ano de 1750. As letras na coluna da extrema direita correspondem ao grau de confiança de cada estimativa (VH = muito alto; H = alto; M = médio; L = baixo; VL = muito baixo). As três últimas barras em vermelho representam a forçante radiativa total imposta apenas por atividade antrópica, relativa ao ano de 1750. Fonte: IPCC (2013)

Conforme mostra a **Figura 3**, a forçante radiativa para os gases persistentes da atmosfera é de aproximadamente 3 W/m², superior à forçante imposta pelos gases de vida curta, que é próxima à 0,18 W/m². Essa diferença se deve principalmente à contribuição do gás carbônico, que sozinho apresenta uma forçante radiativa de 1,68 W/m²; e ao metano, que acaba influenciando as concentrações de outros gases condicionantes ao clima e favorece o aquecimento da superfície terrestre com uma forçante de 0,97 W/m².

O gás ozônio apresenta naturalmente uma forçante radiativa negativa ao balanço energético terrestre. No entanto, o aumento da emissão de gases como os clorofluorcarbonetos (CFCs) e hidroclorofluorcarbonetos (HCFCs), que induzem a

redução da camada de ozônio, faz com que uma forçante radiativa positiva se sobreponha à negativa, levando à uma forçante final positiva de $0,18 \text{ W/m}^2$. Já a emissão de monóxido de carbono, um gás de permanência relativamente rápida na atmosfera, contribui de forma positiva à forçante radiativa total, enquanto que os óxidos de nitrogênio tendem ao contrário, uma vez que a presença destes acaba interferindo negativamente na concentração de gases que apresentam forçante radiativa positiva.

Em relação aos aerossóis e outras partículas emitidas para a atmosfera, incluindo a formação de nuvens decorrentes, pode-se dizer que estes favorecem o surgimento de uma forçante negativa, uma vez que contribuem para o aumento da reflexão da radiação solar incidente na atmosfera terrestre. A forçante radiativa para este grupo pode chegar a $-0,9 \text{ W/m}^2$.

Não menos importante, os diferentes usos da superfície terrestre também influenciam no valor final total da forçante radiativa atual em relação ao período estipulado. As características de reflexão de cada superfície se modificam conforme seu estado físico, seu uso e suas transformações com o tempo, de modo que podem apresentar altos, médios ou baixos valores de albedo, contribuindo com uma parcela para o aquecimento ou resfriamento da superfície terrestre. Ainda, outro fator a ser levado em consideração são as alterações na irradiação solar, no entanto, são muito pouco percebidas se comparadas aos demais condicionantes.

Em relação às trajetórias de emissões de CO_2 na atmosfera, dentro do cenário de forçante RCP2.6, projeta-se uma concentração de 425 partes por milhão (ppm) para o ano de 2100, sendo cerca de 25 ppm maior que a concentração do período presente (**Figura 4**). No cenário RCP4.5, a concentração de CO_2 para o mesmo ano atinge aproximadamente 550 ppm, enquanto que no cenário RCP 6.0 as emissões atingem um valor próximo de 660 ppm. Por fim, dentro do cenário de forçante radiativa mais pessimista RCP8.5, a concentração de dióxido carbônico atmosférico alcança quase 950 ppm até 2100.

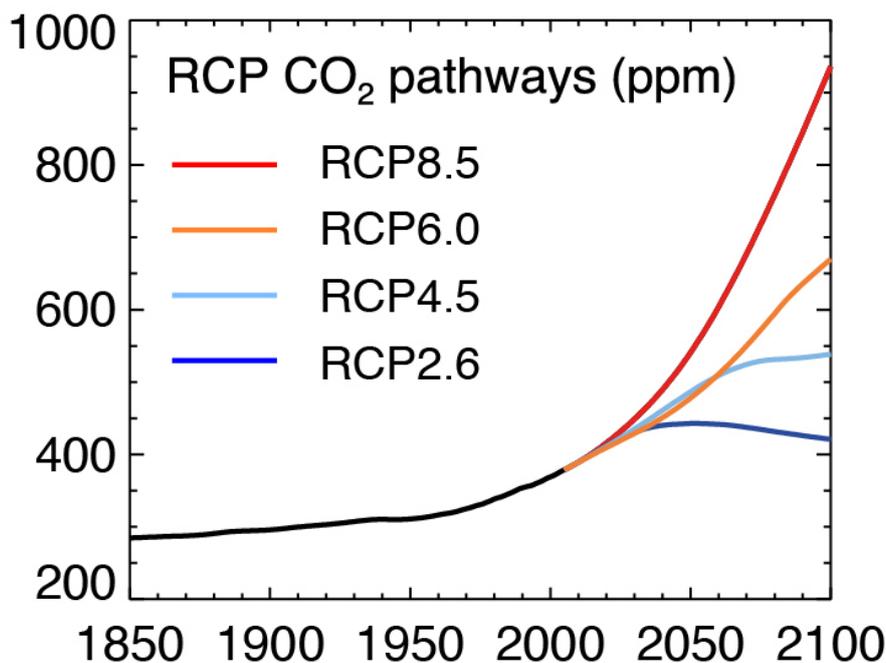


Figura 4 - Trajetórias de emissões de CO₂ (ppm) nos diferentes cenários de forçante radiativa. A linha preta representa a trajetória de emissão até o período presente. Fonte: IPCC (2013).

3.4 Climatologia dos ciclones no Atlântico Sudoeste: presente e futuro

Os primeiros trabalhos referentes à climatologia dos ciclones utilizavam mapas de pressão à superfície para a identificação e acompanhamento do ciclo de vida de cada sistema ao longo do tempo, seguido posteriormente pelo uso de imagens de satélite (REBOITA, 2008).

Gan e Rao (1990), com o objetivo de analisar a estação do ano mais propícia à ciclogênese sobre a América do Sul, estudaram quatro cartas de superfície por dia ao longo de dez anos. Entre 1979 e 1988, os autores analisaram 14600 cartas e observaram um total de 1091 casos de ciclogêneses, sendo que a estação de inverno superou todas as demais estações em relação à frequência de sistemas. Os resultados mostraram que a maior incidência de ciclones ocorreu na região do Uruguai e na região do Golfo de São Matias, Argentina. Nestas áreas se constatou maior frequência no inverno e verão, respectivamente. A variabilidade anual se mostrou bastante evidenciada, ocorrendo maior número de ciclogêneses durante anos de El Niño (1983 e 1987).

Por outro lado, Reboita et al. (2014) não mostraram diferenças significativas na ocorrência de ciclones na costa leste da América do Sul em eventos de El Niño e La Niña. No entanto, é interessante destacar que em períodos de El Niño a maior densidade de ciclones se concentraram em toda a extensão do extremo sul do Oceano Pacífico, assim como na região central do sul do Oceano Atlântico. Para as demais variabilidades de baixa frequência avaliadas no estudo (Modo Anular Sul e Dipolo do Oceano Índico) não foram encontradas diferenças significativas no número de ciclones em relação aos anos neutros.

Outro estudo, com intuito semelhante, realizado por Pezza, Simmonds e Renwick (2007), avaliaram a relação entre os ciclones extratropicais no Hemisfério Sul e a Oscilação Decadal do Pacífico (ODP). Os autores encontraram um menor número de ciclones, porém mais intensos, durante a fase positiva da oscilação, enquanto que a fase negativa proporcionou menor intensidade aos sistemas, porém maior frequência, principalmente sobre o extremo sul do Pacífico Sul.

Em relação as técnicas e métodos para o estudo da climatologia de ciclones, com o avanço da informática e da programação, esquemas automáticos para identificação e rastreamento dos ciclones foram sendo desenvolvidos, reduzindo consideravelmente o esforço e a demanda de tempo no estudo da climatologia da ciclogênese. Desta forma, Sinclair (1994) utilizou um esquema automático para avaliar a climatologia de ciclones sobre o Hemisfério Sul identificando as características principais dos ciclones desde a gênese e desenvolvimento, até o decaimento dos sistemas. Através de dados da vorticidade geostrófica na altura geopotencial de 1000 hPa, o autor detectou que, entre 1980 e 1986, os sistemas ciclônicos se desenvolveram predominantemente dentro das latitudes médias (35°S e 50°S), com tendência de deslocamento para o sudeste, em direção aos polos. Uma considerável parcela dos ciclones detectados pelo esquema apresentou decaimento em altas latitudes. Em relação à distribuição geográfica, a formação e o desenvolvimento das ciclogêneses ocorreram principalmente sobre a costa leste da Austrália e sobre a América do Sul, particularmente à sotavento da cordilheira dos Andes, em sua porção mais ao sul. O estudo também mostrou que a ciclogênese é favorecida por altos valores de TSM quando afastada do continente.

Mendes et al. (2009) propuseram uma climatologia dos ciclones extratropicais para o Atlântico Sul utilizando dados da reanálise NCEP-II, entre os anos de 1979 e 2003. Duas regiões centrais foram destaque entre os resultados encontrados: uma região

composta pelo norte da Argentina, costa uruguaia e sudeste do Brasil; e outra em área adjacente ao norte da Península Antártica. As estações de maior ocorrência de ciclogêneses foram o inverno e verão em ambas as regiões. A duração média dos sistemas alcançou três dias, com pouca variabilidade sazonal. No geral, a climatologia obtida foi bastante similar aos estudos mais relevantes da época.

Utilizando o modelo regional RegCM3, Reboita et al. (2010) aprofundaram a análise da climatologia dos ciclones sobre o Atlântico Sul dentro do período de 1990 e 1999. Através da utilização de dados da reanálise NCEP-II como condições iniciais e de fronteira no modelo regional, os sistemas ciclônicos foram rastreados a partir de um esquema automático capaz de detectar todos os eventos que se originaram com vorticidade relativa menor ou igual a $-1,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ e que apresentaram duração de pelo menos 24 horas. Os resultados demonstraram sensibilidade do modelo em representar os padrões ciclogênicos. No entanto, o ciclo anual dos sistemas foi melhor definido quando apenas os sistemas que se iniciaram mais intensos (vorticidade relativa igual ou inferior a $-2,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$) foram levados em conta na análise. A distribuição espacial simulada pelo RegCM3 mostrou que três áreas particulares são mais favoráveis à ocorrência da ciclogênese, sendo elas: costa sudeste da Argentina; costa do Uruguai, próximo à desembocadura do Rio da Prata; e a costa sudeste-sul do Brasil. Padrão similar foi encontrado por Krüger et al. (2012; **Figura 5**).

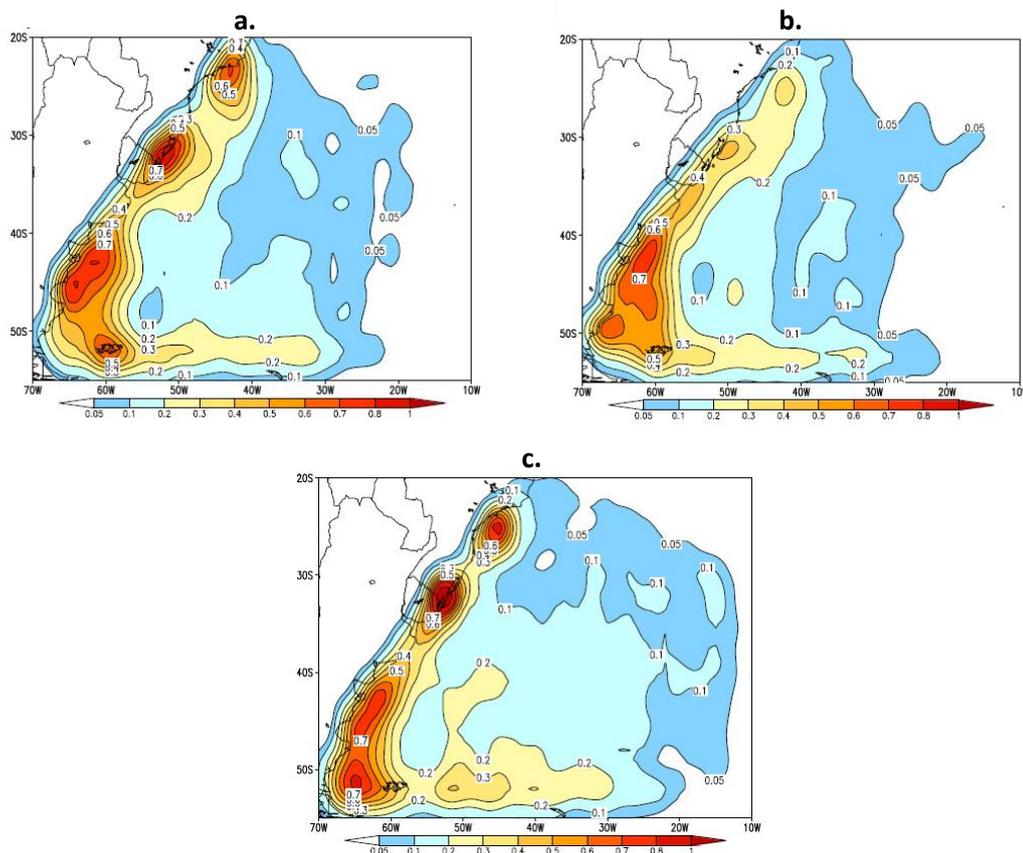


Figura 5 – Média anual da densidade ciclogênica (1975-1989) considerando os sistemas com $\zeta_{10} \leq 1 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$, obtidos através dos seguintes dados e modelos: a) NCEP-II; b) HadAM3; c) RegCM3. A densidade corresponde ao número de ciclones/ km^2 e foi multiplicada por 10^4 . Fonte: Krüger et al. (2012)

Alguns estudos apontam que a região da costa uruguaia e do sudeste-sul do Brasil são principalmente influenciadas pela presença de cavados em níveis superiores da troposfera que se deslocam do Pacífico em direção ao Atlântico (GAN, 1992; VERA et al., 2002). A influência de calor e umidade transportada pelo Jatos de Baixos Níveis (JBN) também tem sido relatada como importante mecanismo de favorecimento à ciclogênese na região, uma vez que contribuem para a intensificação da convergência do ar em superfície (SELUCHI; SAULO, 1998; VERA et al., 2002; REBOITA, 2008).

Nesse sentido, Saurral, Camilloni e Ambrizzi (2015) demonstraram que a representação da cordilheira dos Andes sob uma resolução espacial adequada, cuja complexidade da topografia exerce efeitos sobre a circulação atmosférica regional e age como canalizador dos JBN, é imprescindível para a simulação dos fluxos de umidade e convecção que vêm influenciar no desenvolvimento dos ciclones e outras condições meteorológicas em determinados setores da América do Sul. A disposição e a magnitude

espacial dos Andes criam uma barreira física aos ventos alísios que cruzam a bacia amazônica, reorientando-os em direção às latitudes subtropicais através de um escoamento à leste da cordilheira. Além disso, esta barreira causa o refortalecimento dos sistemas ciclônicos que se originam a leste do Pacífico, devido ao efeito de *stretching* no escoamento que cruza os Andes, aumentando a vorticidade relativa. Hoskins e Hodges (2005) argumentam ser esse um dos principais motivos do desenvolvimento da ciclogênese sobre a costa da Argentina, além da instabilidade baroclínica provocada pelo gradiente de temperatura horizontal sobre o oceano e dos fluxos de calor latente e sensível entre a superfície oceânica e a atmosfera.

A própria dimensão física dos ciclones extratropicais é bastante influenciada pelo conteúdo de umidade disponível na atmosfera durante o desenvolvimento desses sistemas. Através de uma série de experimentos baroclínicos controlados, Boot, Wang e Polvani (2013) propuseram avaliar essa dependência aumentando isoladamente e progressivamente a umidade atmosférica. Os autores encontraram que, tanto a partir de simulações em modelos de alta e de baixa resolução, ou seja, com diferentes capacidades de representação dos processos físicos atuantes, o aumento da umidade gerou valores mínimos de pressão mais intensos, maior intensidade nos ventos em superfície, precipitação e maior taxa de desenvolvimento dos sistemas. Dessa forma, não é vital a necessidade de alta resolução e destreza do modelo em reconhecer a importância dessa fonte de energia para a ciclogênese.

Em cenários futuros, as respostas da umidade frente ao aquecimento global podem ter papéis decisivos sobre os ciclones e diversos aspectos do clima. No entanto, apesar de serem projetados aumento na quantidade da umidade troposférica (GENG; SUGI, 2003; HELD; SODEN, 2006), a tendência de perda de intensidade do gradiente horizontal de temperatura entre as latitudes equatoriais e polares e o conseqüente enfraquecimento da baroclínia em superfície podem agir negativamente sobre a atividade ciclogênica (HELD; SODEN, 2006; BOOT; WANG; POLVANI, 2013). Assim, em parte devido a esse jogo de forças contrárias, é difícil estimar sem grandes incertezas a magnitude do impacto da umidade no desenvolvimento dos ciclones extratropicais no clima futuro.

Um outro estudo, realizado por Grise et al. (2014), mostrou que a alteração antrópica na concentração do ozônio troposférico na Antártica também é uma forçante sobre os ciclones extratropicais, principalmente em relação à frequência e a faixa

latitudinal de atuação dos sistemas. O estudo foi construído a partir de quatro experimentos simulados com o modelo *Community Atmosphere Model version 3* (CAM3), abordando os períodos antes do buraco de ozônio e durante o buraco de ozônio: (1) experimento controle onde as concentrações de ozônio e GEE tiveram como referência o período de 1960, anterior à depleção da camada de ozônio estratosférico; (2) experimento onde a concentração de ozônio alcançou os níveis do ano 2000 (período durante o buraco de ozônio) e a concentração dos GEE aos níveis do ano de 1960; (3) o contrário da condição anterior; (4) ambas as concentrações niveladas ao período de 2000.

Como resultados, os autores encontraram que a depleção do gás ozônio ao longo da segunda metade do século XX, associada a emissão antropogênica de CFCs, levou ao deslocamento dos ciclones do Hemisfério Sul em direção ao polo durante o verão. Não obstante, quando analisadas separadamente, a forçante imposta pelo ozônio na frequência dos sistemas se mostrou muito mais robusta que aquela imposta pelos gases de efeito estufa (**Figura 6**), apesar de bastante semelhantes qualitativamente.

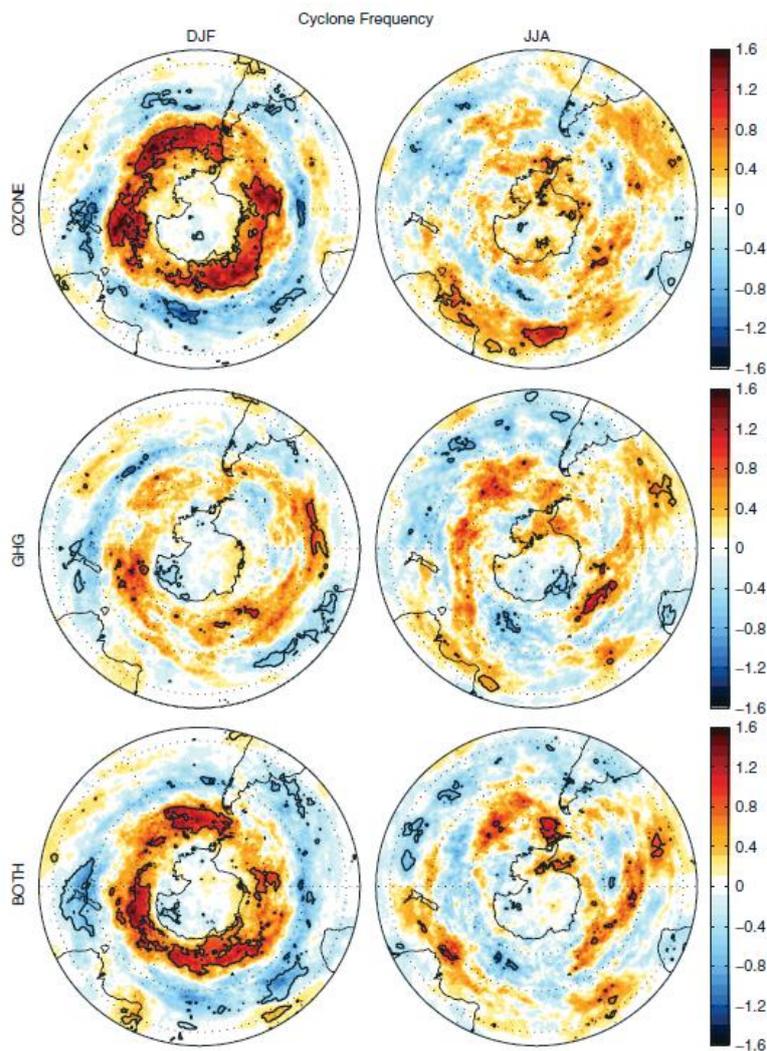


Figura 6 – Frequência de ciclones em resposta às forçantes ozônio (cima), gases de efeito estufa (meio) e ambas (baixo). A coluna da esquerda se refere aos meses da estação de verão, enquanto a da direita faz referência aos meses de inverno. As regiões delimitadas em preto representam os resultados estatisticamente significativos ($p < 0,05$). A legenda apresenta intervalos de 0,1 ciclones/mês. Fonte: Grise et al. (2014)

Utilizando um esquema automático de identificação e rastreamento de ciclogêneses baseado em dados de pressão média ao nível do mar, Reboita et al. (2014) analisaram a tendência anual e sazonal de ciclones extratropicais para todo o Hemisfério Sul, entre 1980 e 2012. Os resultados encontrados mostraram uma tendência positiva significativa da ciclogênese, quando considerada toda a região de análise, excluindo a estação de primavera. No entanto, o sinal de tendência apresentou variabilidade para diferentes oceanos do Hemisfério Sul: foi encontrada tendência negativa para a porção oeste do Pacífico Sul e positiva na porção leste; tendência positiva predominante sobre todo o Atlântico Sul; e tendência negativa no oceano Índico, próximo à Antártica, e

positiva em latitudes menores. O estudo estima que futuramente poderá ocorrer uma diminuição da frequência de ciclones em latitudes médias e aumento em altas, assim como modificações na intensidade dos sistemas, em função das mudanças climáticas.

Krüger et al. (2012), utilizando o modelo RegCM3 aninhado ao modelo global HadAM3, mostraram que para as famílias de cenários A2 e B2 do SRES durante o período de 2071-2085, projetam-se diminuições de 7,2% e 4,7% no número total de ciclones no Atlântico Sul, respectivamente, sendo que para os sistemas ciclônicos cuja gênese é mais intensa, tal redução é ainda superior: 20,9 % de redução dentro do cenário A2 e 11,3 % para o cenário B2. Tendência semelhante foi encontrada por Silva (2010), que detectou uma possível diminuição da ciclogênese ao longo da faixa de latitudes médias que se estende no Pacífico Sul e Atlântico Sul, porém um aumento em latitudes maiores. Dessa forma, em cenários futuros há a probabilidade de uma migração da atividade ciclogênica em direção aos polos.

Grieger et al. (2014) estudaram a climatologia no presente e futuro de ciclones extratropicais durante a estação de inverno, considerando o cenário SRES A1B. O estudo abrangeu o Hemisfério Sul ao longo de toda a área entre as latitudes 20°S e 90°S. Com base em um conjunto de modelos globais acoplados oceano-atmosfera, encontraram uma boa relação entre os resultados individuais dos modelos e os da reanálise ERA-40, assim como entre a média do conjunto e a reanálise. Em relação às projeções, os autores observaram uma diminuição do número total de ciclones no Hemisfério Sul e aumento na frequência dos sistemas mais intensos. Essa tendência estaria relacionada ao aquecimento da troposfera em altos níveis nos trópicos e a diminuição do gradiente horizontal de temperatura entre as baixas e altas latitudes, promovendo o deslocamento da atividade ciclogênica em direção aos polos (GRIEGER et al., 2014).

Lim e Simmonds (2009) também chegaram em resultados parecidos. Com o aquecimento da troposfera superior nos trópicos e inferior nos polos simulado por um modelo global, o aumento da estabilidade estática resultante tende a diminuir a baroclínia nas baixas e médias latitudes, afetando negativamente na frequência de ciclones sobre essa faixa. Em compensação, o deslocamento do gradiente meridional de temperatura para latitudes próximas ao polo favoreceu a ciclogênese nestas regiões. Os autores argumentam que os principais responsáveis pelo aumento de temperatura na troposfera superior, nos trópicos, e na troposfera inferior, nos polos, são, respectivamente, o aumento

de calor latente liberado e a maior absorção de radiação solar em superfície, em decorrência de um clima mais quente.

4 METODOLOGIA

4.1 Descrição dos modelos e reanálises

O modelo RegCM4 é resultado de três gerações anteriores desse modelo, sendo que o RegCM1 foi o primeiro modelo de área limitada desenvolvido para a simulação climática regional em qualquer região do globo. O RegCM4 é um modelo hidrostático, de área limitada, compressível e em coordenadas verticais sigma-pressão (GIORGI et al., 2012).

O HadGEM2-ES é um modelo global do sistema climático, pertencente à família de modelos HadGEM2 e elaborado pelo *UK Met Office Hadley Centre*. O HadGEM2-ES incorpora elementos da dinâmica de vegetação, processos biológicos marinhos, gelo marinho, química troposférica e ciclo do carbono em terra e no oceano (MARTIN et al., 2011), fazendo parte do conjunto de modelos globais utilizados pelo *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5* (CMIP5). Nesse contexto, o HadGEM2-ES foi executado com resolução horizontal de $1,25^\circ \times 1,875^\circ$ para a componente atmosférica (aproximadamente 140 km em médias latitudes), com 38 níveis verticais, e 1° de resolução horizontal para a componente oceânica, com 40 níveis verticais (JONES et al., 2011).

Neste estudo foi utilizada tanto a simulação do RegCM4 dirigido pelo HadGEM2-ES, quanto a simulação do próprio modelo global. O RegCM4 foi integrado com uma resolução horizontal de 50 km e 18 níveis sigma verticais. A topografia e cobertura de superfície foram extraídas do *United States Geological Survey* (USGS) e do *Global Land Cover Characterization* (GLCC). O domínio da simulação segue o do projeto CORDEX para o continente sul-americano (GIORGI et al., 2009), abrangendo a América do Sul e os oceanos adjacentes. Em relação às parametrizações de superfície e convecção incorporados pelo RegCM4, foram utilizados o *Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme* (BATS) e o esquema misto Emanuel-Grell (GRELL, 1993; EMANUEL; ZIVKOVIC-ROTHMAN, 1999), respectivamente. Este último é caracterizado como misto por possibilitar o acionamento de um esquema convectivo sobre o continente (Grell) e outro sobre o oceano (Emanuel). O esquema BATS (DICKINSON et al., 1993) traduz a interação física da vegetação/solo com a atmosfera.

A simulação com o RegCM4 faz parte do projeto CORDEX e foi executada no *International Centre for Theoretical Physics* (ICTP), Itália. Posteriormente, os resultados

foram transferidos para o Grupo de Estudos Climáticos da Universidade de São Paulo (GrEC) para os envolvidos no projeto CORDEX realizarem suas pesquisas.

Para se avaliar a climatologia e características dos ciclones sobre o Atlântico Sudoeste no período presente, foram utilizados cinco conjuntos de reanálises: CFSR; ERA-Interim; ERA-40; NCEP-I; e NCEP-II. As características principais desses conjuntos se encontram descritas na **Tabela 1**. Alguns estudos sobre a atividade ciclônica comparando diferentes reanálises (RAIBLE et al., 2008; HODGES et al., 2011) indicam que há particularidades consideráveis nos resultados dependendo do conjunto de dados utilizado. Dessa forma, a análise apresentada neste estudo servirá como um guia sobre o desempenho das reanálises utilizadas, além de servir como referência para a validação das simulações empregadas.

Por fim, foram avaliados o clima presente (1979-2005) e a projeção para o futuro próximo (2020-2050) e para o futuro distante (2070-2089), considerando as respostas dos modelos regional e global frente ao cenário de mudanças climáticas RCP8.5. Devido a uma falha da simulação do RegCM4 nos anos de 2083, 2084 e 2085, estes não foram incluídos na análise. Vale ressaltar que o ano de 1979 foi selecionado como limite inferior dos dados nesse estudo devido à introdução mais significativa de observações coletadas por satélites nas reanálises (BENGTSSON et al., 2004; HOSKINS; HODGES, 2005), até então baseadas majoritariamente nos dados dos próprios modelos globais. Hoskins e Hodges (2005) mostraram que essa diferença na origem dos dados das reanálises reflete consideravelmente no número e na intensidade dos ciclones simulados sobre o Hemisfério Sul, porém, o padrão espacial e o ciclo sazonal permanecem concordantes.

Tabela 1 – Reanálises utilizadas neste estudo e suas características. O período utilizado no trabalho é limitado até o ano de 2005.

Reanálise	Período	Resolução horizontal	Resolução vertical	Resolução Temporal	Referência
CFSR	1979-2011	0,5° x 0,5°	64 níveis de pressão	6 horas	Saha et al. (2010)
ERA-Interim	1979 - Presente	1,5° x 1,5°	37 níveis de pressão	6 horas	Dee et al. (2011)
ERA-40	1957 - 2002	2,5° x 2,5°	23 níveis de pressão	6 horas	Uppala et al. (2005)
NCEP-I (NCEP-NCAR)	1949 - Presente	2,5° x 2,5°	17 níveis de pressão	6 horas	Kalnay et al. (1996)
NCEP-II (NCEP-DOE)	1979 - Presente	2,5° x 2,5°	17 níveis de pressão	6 horas	Kanamitsu et al. (2002)

4.2 Algoritmo de identificação e rastreamento dos ciclones

Técnicas automáticas para a obtenção das estatísticas sobre o comportamento dos ciclones permitiram ultrapassar a limitação causada por métodos manuais de análise. A alta repetibilidade proporcionada pela automação permite diminuir a probabilidade de erro humano e tendenciosidades sobre os resultados. Tais métodos também possibilitam a obtenção de séries de dados muito maiores obtidas com menor esforço (SINCLAIR, 1994), ampliando as possibilidades de pesquisas relacionadas ao tema. Conforme discutido por Neu et al. (2013), o número total de ciclones obtidos dentro de uma análise climatológica é altamente função do tipo de método automático empregado.

No presente estudo, o algoritmo para identificação e rastreamento automático dos ciclones foi elaborado por Sugahara (2000) e adaptado por Reboita (2008), tendo como princípio a procura de centros mínimos de vorticidade relativa. Algumas das vantagens desse método de identificação, ao invés daqueles que identificam os ciclones através da pressão atmosférica, são: sistemas com movimentação circulatoria são melhor representados, já que a vorticidade mede a rotação de fluidos; permitem a identificação dos sistemas sem isóbaras fechadas, possibilitando o rastreamento dos ciclones desde a sua gênese; identificam mais facilmente processos de pequena escala; sofrem menor interferência de *background* atmosférico de grande escala; localizam a posição exata dos ciclones e servem como parâmetro para a intensidade dos sistemas (SINCLAIR, 1994; HOSKINS; HODGES, 2005; REBOITA et al., 2010).

Sendo assim, o método envolve três processos principais: primeiramente, o esquema identifica os valores mínimos de vorticidade relativa através da técnica do vizinho mais próximo. Compara-se o valor da vorticidade em cada ponto de grade com os seus 24 pontos circunvizinhos, sendo que o menor valor é considerado o centro do ciclone (depois de estabelecido um valor mínimo padrão ao algoritmo). Neste trabalho, os ciclones são identificados a partir dos mínimos de vorticidade relativa obtida com as componentes do vento ao nível de 925 hPa.

Posteriormente, interpola-se o campo de vorticidade para uma resolução mais detalhada, onde é novamente procurado os mínimos de vorticidade com o objetivo de alcançar maior exatidão na identificação da posição dos ciclones. Sugahara (2000) afirma que pode ocorrer uma diferença igual ou superior a 100 km entre os centros encontrados

na baixa e alta resolução do campo. O próximo passo realizado pelo algoritmo é detectar a posição dos centros no tempo posterior (depois do primeiro deslocamento da ciclogênese) e as posições subsequentes. As novas posições do sistema no espaço são identificadas pelo algoritmo a cada 6 horas.

Uma vez conhecida as posições dos sistemas em dois tempos consecutivos, determina-se a velocidade de deslocamento entre as duas posições, já que é conhecido o tempo e a distância entre as posições. A velocidade calculada do sistema é então usada para se estimar as posições futuras do sistema. Assim, toda nova posição é calculada através da velocidade estimada da ciclogênese entre os últimos dois passos de tempo, até que o sistema atinja a condição de ciclólise, onde o valor de vorticidade do sistema atinge um nível superior ao limiar pré-estabelecido ao algoritmo ou quando o ciclone apresenta duração maior que o estipulado. Todos os ciclones com vorticidade relativa menor ou igual a $-1,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ ($\zeta_{925} \leq -1,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$) e tempo de vida (da ciclogênese até a ciclólise) entre 1 a 10 dias ($1 \leq T \leq 10$) foram identificados pelo algoritmo e incluídos no estudo. A **Figura 7** exemplifica o início de um sistema ciclônico e as suas primeiras posições ao longo do seu desenvolvimento, sendo que o algoritmo pode identificar até 40 posições subsequentes (4 posições por dia, totalizando 10 dias) de um mesmo sistema ao longo do seu ciclo de vida.

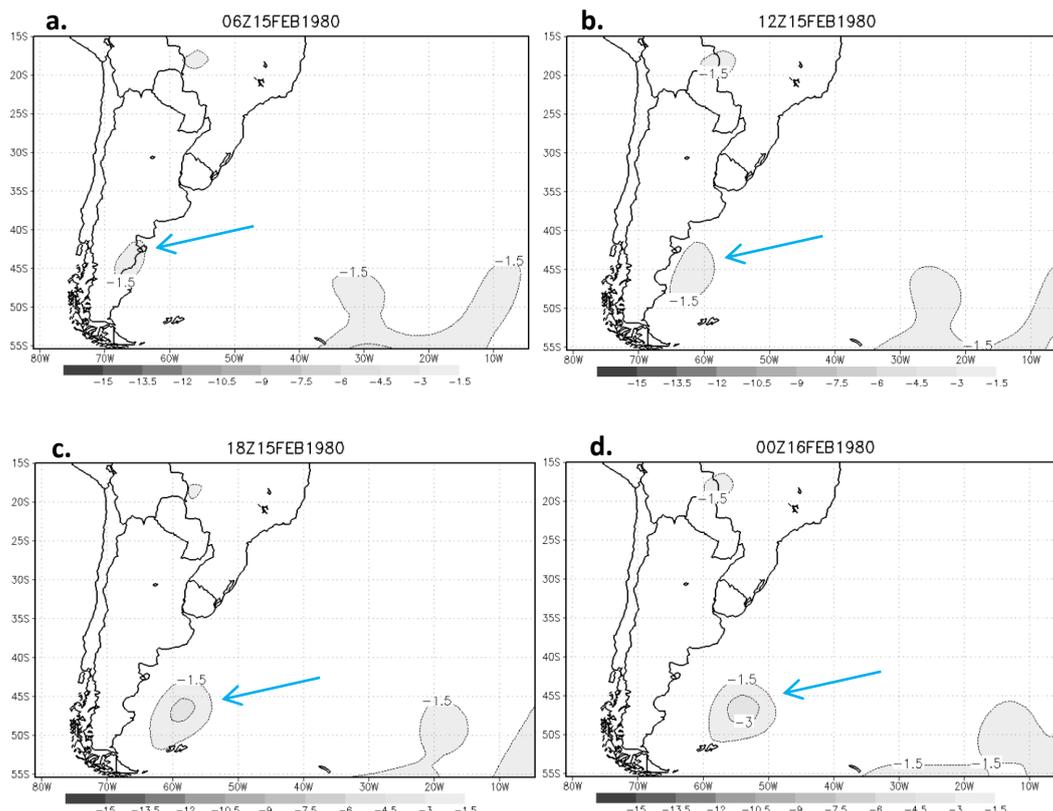


Figura 7– Vorticidade relativa ciclônica ($\times 10^{-5} \text{s}^{-1}$) obtida da reanálise ERA-Interim indicando as primeiras posições de um sistema ciclônico. a) 1° posição; b) 2° posição; c) 3° posição; d) 4° posição. As setas azuis indicam o ciclone em deslocamento.

Vale ressaltar que, anteriormente às etapas acima descritas, o campo de vorticidade foi suavizado a partir do método de Cressman (CRESSMAN, 1959; SINCLAIR, 1997), a fim de diminuir a presença de ruídos no campo da vorticidade (SINCLAIR, 1997). Além disso, o algoritmo utilizado é dotado de um sistema de filtragem, capaz de evitar que o algoritmo identifique duas ou mais vezes o mesmo sistema ciclônico. Uma vez que a vorticidade relativa é fortemente dependente da resolução horizontal dos dados (REBOITA, 2008; HODGES et al., 2011), foi necessário a homogeneização espacial de todas as reanálises, assim como dos modelos utilizados. Dessa forma, os campos de vento e, conseqüentemente, a vorticidade relativa foram interpolados para uma grade de $1,5^\circ \times 1,5^\circ$ através de uma interpolação bi-linear.

O produto final do algoritmo após o rastreamento dos ciclones fornece a data e a posição em coordenadas geográficas de cada sistema, assim como a vorticidade relativa em cada passo de tempo ao longo do ciclo de vida de cada ciclone. O domínio total de atuação do algoritmo correspondeu à área do Hemisfério Sul abrangida pelas coordenadas

15,5°S-57,5°S e 20°W-81°W, no entanto, a região de análise dos dados correspondeu a uma porção inferior dessa área, conforme explicado mais adiante.

Por fim, é importante mencionar que apesar das vantagens de se aplicar métodos automáticos de rastreamento para o estudo da climatologia de ciclones, alguns autores questionam os efeitos da aplicação destes algoritmos dentro de áreas limitadas (SHKOLNIK; EFIMOV, 2013; CÔTÉ et al., 2015). As consequências de isolar a atuação de um método automático dentro de uma grade regional geralmente são sentidas através da subestimação de algumas características dos ciclones, como a distância total percorrida, duração e as taxas de desenvolvimento e decaimento dos sistemas (CÔTÉ et al, 2015). Dessa forma, é imprescindível a consideração dessas questões, assim como a comparação dos resultados com outros estudos climatológicos dos ciclones sob diferentes metodologias.

4.3 Análise dos dados

4.3.1 Considerações primárias

O estudo da climatologia e das características gerais dos ciclones no Atlântico Sudoeste proposto neste trabalho considerou apenas aqueles sistemas identificados e rastreados entre as latitudes 57,5°S - 15,5°S e as longitudes 70°W - 21°W, de modo a excluir os sistemas que apresentaram origem sobre o Oceano Pacífico. Nenhum sistema sobre o continente foi rastreado devido às baixas térmicas, centros de baixa pressão desenvolvidos pelo intenso aquecimento em superfície.

Além disso, com fins de avaliar a influência dos valores de vorticidade relativa inicial (vorticidade na primeira posição de cada sistema) sobre a climatologia e características gerais dos ciclones, foram estabelecidos dois grupos com limiares de vorticidade relativa inicial distintos para a análise dos dados. Um primeiro grupo abrange todos os sistemas com vorticidade inicial menor ou igual a $-1,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ ($\zeta_{925} \leq -1,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$; daqui em diante denominados apenas de $\zeta \leq -1,5$). Esse grupo compreende todos os ciclones identificados pelo algoritmo dentro dos critérios já estabelecidos, sejam eles inicialmente fracos ou intensos (quanto mais negativo o valor da vorticidade, mais intenso o sistema; quanto menos negativo, mais fraco).

O segundo conjunto compreende os ciclones que se iniciam com vorticidade menor ou igual a $-2,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ ($\zeta_{925} \leq -2,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$; daqui em diante denominados apenas de $\zeta \leq -2,5$). Esses sistemas foram considerados, neste estudo, como sistemas inicialmente intensos (ou fortes). É muito importante frisar que o primeiro grupo de sistemas abrange o segundo grupo.

4.3.2 Climatologia, características e densidade de ciclones

Para avaliar o comportamento dos ciclones sobre o Atlântico Sudoeste no clima presente e futuro, foram computadas as climatologias de cinco reanálises e da simulação do modelo regional RegCM4 e do modelo global HadGEM2-ES. Foram calculadas as diferenças anuais entre modelos e reanálises, as médias anuais, sazonais e mensais dos ciclones (nos dois limiares de vorticidade inicial) em cada conjunto de dados e em cada período (presente, futuro próximo e futuro distante), além das frequências absoluta e relativa quanto à distância média percorrida pelos sistemas, o tempo de duração, a velocidade média, a vorticidade inicial e a vorticidade média total dos sistemas ao longo de todo o ciclo de vida.

As mesmas análises também foram aplicadas em três sub-regiões principais de ocorrência da ciclogênese sobre o Atlântico Sudoeste (REBOITA, 2008; REBOITA et al., 2010), definidas na literatura como RG1 (costa sul-sudeste do Brasil), RG2 (costa sul do Rio Grande do Sul e Uruguai) e RG3 (costa sudeste da Argentina). A **Figura 8** ilustra os domínios de rastreamento e identificação dos ciclones, o domínio de análise dos ciclones e as três sub-regiões ciclogénéticas.

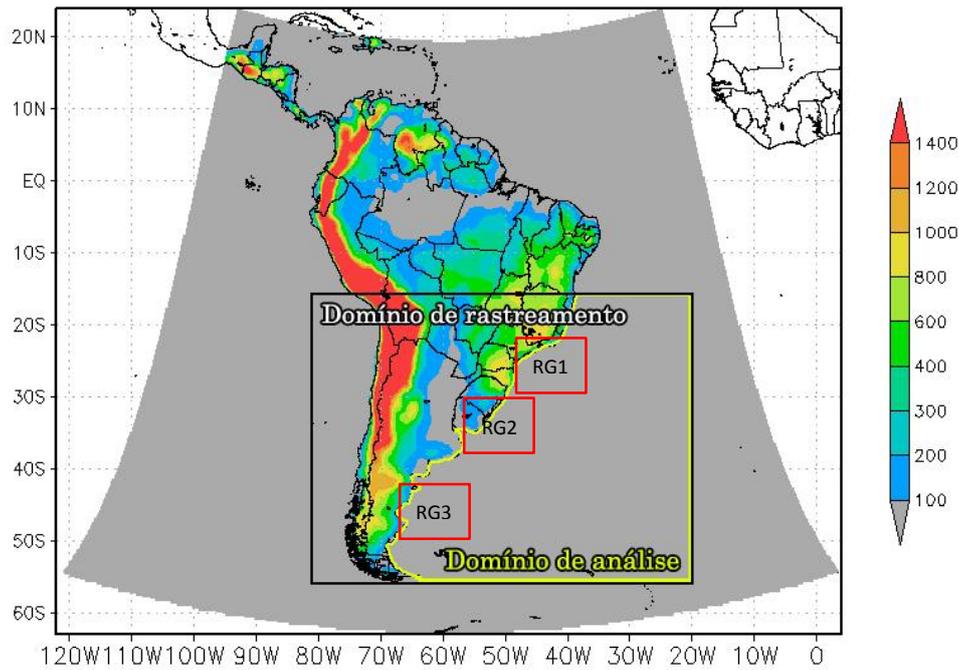


Figura 8 – Domínios estabelecidos para o estudo e a topografia da região (em metros), onde o domínio de rastreamento e o de análise são representados pelas caixas preta e amarela, respectivamente. As caixas vermelhas representam as três principais sub-regiões ciclogênicas.

A densidade espacial dos ciclones (na primeira posição dos sistemas) foi calculada através da razão do número de ciclogêneses por uma área de $3^\circ \times 3^\circ$, e multiplicada por 10^6 para fins de visualização gráfica. A distância total percorrida pelos ciclones foi estimada somando a distância entre cada passo no tempo de cada sistema, calculada pelo princípio da lei dos cossenos na trigonometria esférica (VAN BRUMMELEN, 2012; **Equação 1**), ao longo de todo o ciclo de vida.

$$D = \text{acos}(\sin \varphi_1 \cdot \sin \varphi_2 + \cos \varphi_1 \cdot \cos \varphi_2 \cdot \cos \Delta\lambda) \cdot R \quad (1)$$

onde:

D = distância entre duas coordenadas geográficas (km);
 φ_1 = latitude do ponto 1 (radianos);
 φ_2 = latitude do ponto 2 (radianos);
 $\Delta\lambda$ = diferença entre as longitudes (radianos);
 R = raio da Terra (km).

De modo a averiguar se ocorre a migração das ciclogêneses entre latitudes no Atlântico Sudoeste em cenário futuro de mudanças climáticas, foram extraídas as

frequências relativas dos ciclones em oito bandas de latitude ($15^{\circ}\text{S} - 20^{\circ}\text{S}$; $20^{\circ}\text{S} - 25^{\circ}\text{S}$; $25^{\circ}\text{S} - 30^{\circ}\text{S}$; $30^{\circ}\text{S} - 35^{\circ}\text{S}$; $35^{\circ}\text{S} - 40^{\circ}\text{S}$; $40^{\circ}\text{S} - 45^{\circ}\text{S}$; $45^{\circ}\text{S} - 50^{\circ}\text{S}$; e $50^{\circ}\text{S} - 55^{\circ}\text{S}$). Por último, foram realizadas análises de série temporal abrangendo todos os ciclones identificados entre 1979 e 2098 em ambos os modelos. Médias móveis simples de 5 anos foram traçadas com o objetivo de visualização de tendências.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Clima Presente: Ciclones no Atlântico Sudoeste

Considerando os sistemas que se iniciaram com $\zeta \leq -1,5$ ao longo de toda a região do Atlântico Sudoeste, delimitada pelas coordenadas 15,5°S-57,5°S e 21,5°W-70°W, o número total de ciclones identificados entre os anos de 1979 e 2005 variou de 5014 e 7627 sistemas.

Dos resultados obtidos apenas pelas reanálises, 6802 ciclones foram identificados na CFSR, com 49,7% (3383 ciclones) do seu número total caracterizados como sistemas inicialmente intensos ($\zeta \leq -2,5$; **Figura 9**). Na ERA-Interim houve um total de 6302 ciclones, sendo 48,7% (3066 ciclones) inicialmente intensos, enquanto que na ERA-40 se atinge um máximo de 5014 sistemas, com 44,6% (2236 ciclones) de gêneses intensas. As reanálises NCEP-I e NCEP-II identificaram 5239 e 5227 ciclones, respectivamente, sendo que 44,6% (2337 ciclones) dos ciclones obtidos na NCEP-I são inicialmente intensos e 41,2% (2154 ciclones) na NCEP-II.

É importante mencionar que os dados disponíveis pela reanálise ERA-40 correspondem ao período de 1979 a 2001. Dessa forma, o número total de sistemas nesta reanálise será evidentemente menor, uma vez que o número de anos é menor que aqueles das demais reanálises (1979-2005).

Em relação aos modelos regional e global, o RegCM4 simulou um total de 7627 ciclones ao longo dos 27 anos analisados. Destes, cerca de 56,9% (4343 ciclones) foram caracterizados como sistemas inicialmente intensos ($\zeta \leq -2,5$). O modelo apresentou maiores números totais de ciclones em relação à todas as reanálises, com superestimativas que variam de 12,1% (em relação à CFSR) até 52,1% (em relação à ERA-40), lembrando que nesse último há a influência do menor número amostral da reanálise. Sendo assim, se todas as reanálises abrangessem o mesmo número de anos, a tendência da ERA-40 seria de apresentar maiores números totais de ciclones quando comparados às reanálises NCEP-I e NCEP-II.

O modelo global HadGEM2-ES simulou 7013 sistemas ciclônicos, sendo 44,2% (3097 ciclones) deste total sistemas inicialmente intensos. Da mesma forma que o

RegCM4, o modelo superestimou todas as reanálises, com valores que superestimam em 3,1% (em relação à CFSR) até 39,9% (ERA-40).

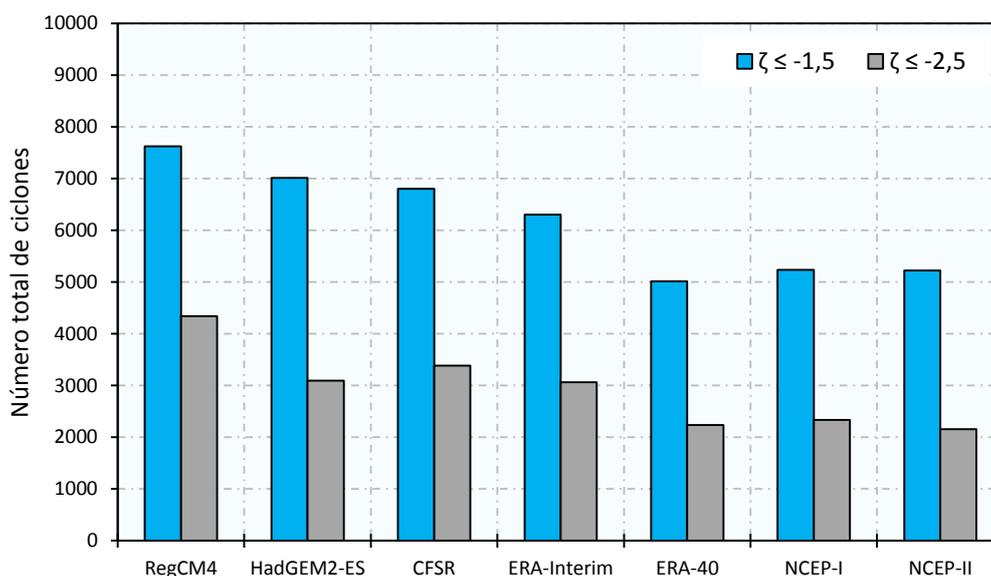


Figura 9 – Número total de ciclones no período 1979-2005 nos modelos e reanálises. Barras azuis representam todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$, barras cinzas representam apenas os sistemas com $\zeta \leq -2,5$.

Em suma, ambos os modelos registraram números totais de ciclones com maiores semelhanças às reanálises CFSR e ERA-Interim, que são os conjuntos de dados de maior resolução espacial utilizados, mas com maiores diferenças em relação aos conjuntos ERA-40 (esta diferença tem maior ligação com o menor número de anos amostrados), NCEP-I e NCEP-II.

A resolução espacial do modelo em que cada reanálise é construída é um elemento frequentemente citado na justificativa das discrepâncias em número e intensidade dos ciclones sob diferentes conjuntos de dados, uma vez que variáveis e processos físicos atuantes em menor escala são dependentes da grade resolutiva do modelo e irão influenciar nos resultados obtidos através dos métodos de identificação e rastreamento dos ciclones aplicados (WANG; SWAIL; ZWIERS, 2006; REBOITA, 2008; ULBRICH et al., 2009; HODGES et al., 2011; STRACHAN et al., 2013; WANG et al., 2013; GOZZO et al., 2014). No entanto, cabe ressaltar que a qualidade, assim como os métodos de assimilação dos dados coletados, também interfere no grau de realismo oferecido pelas reanálises (TRIGO, 2006; STRACHAN et al., 2013; GOZZO et al., 2014).

5.1.1 Variabilidade interanual

O gráfico da variabilidade interanual de ciclones que se iniciaram com o limiar de $\zeta \leq -1,5$ (**Figura 10**) indica que o RegCM4 registrou o maior número de ciclones por ano entre todos os conjuntos de dados, com exceção de cinco anos em que o modelo HadGEM2-ES (1980, 1994 e 1996) e a reanálise CFSR (1980, 1991 e 2003) superaram esse padrão.

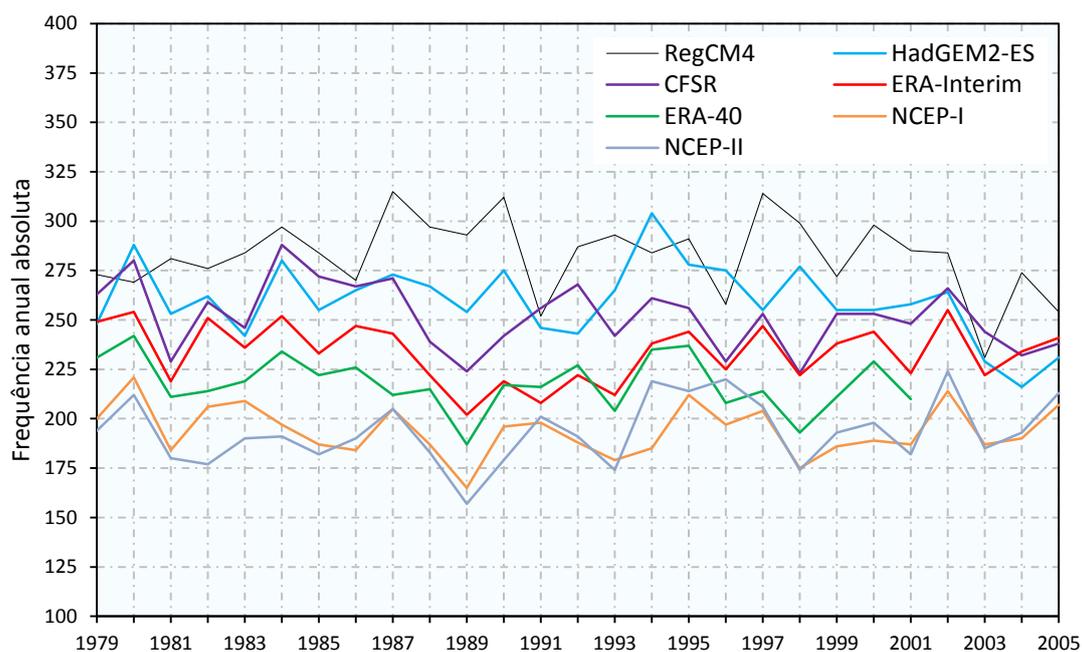


Figura 10 – Frequência anual absoluta de ciclones com $\zeta \leq -1,5$ no período de 1979-2005.

Os anos com a menor frequência de ciclones simulados pelo RegCM4 e HadGEM2-ES são os de 2003 (231 ciclones) e 2004 (216 ciclones), respectivamente. Já os maiores valores ocorreram no ano de 1987 para o RegCM4 (315 sistemas), e 1994 para o HadGEM2-ES (304 sistemas). Em relação as reanálises, o ano de 1989 coincide como o de menor frequência para todos os conjuntos. A maior ocorrência variou entre os anos de 1980 e 1984 para todas as reanálises, excetuando para a NCEP-II (1996).

Considerando apenas aqueles sistemas que se iniciam com $\zeta \leq -2,5$ (**Figura 11**), o RegCM4 superestima todos os demais conjuntos de dados ao longo de todo o período, alcançando um valor máximo no ano de 1990 (194 ciclones) e mínimo em 2003 (130 ciclones). Esse alto número de ciclones inicialmente intensos, em comparação com os

demais conjuntos, é um dos fatores que faz o RegCM4 superestimar o número total de ciclones com $\zeta \leq -1,5$ ao longo de todo o período.

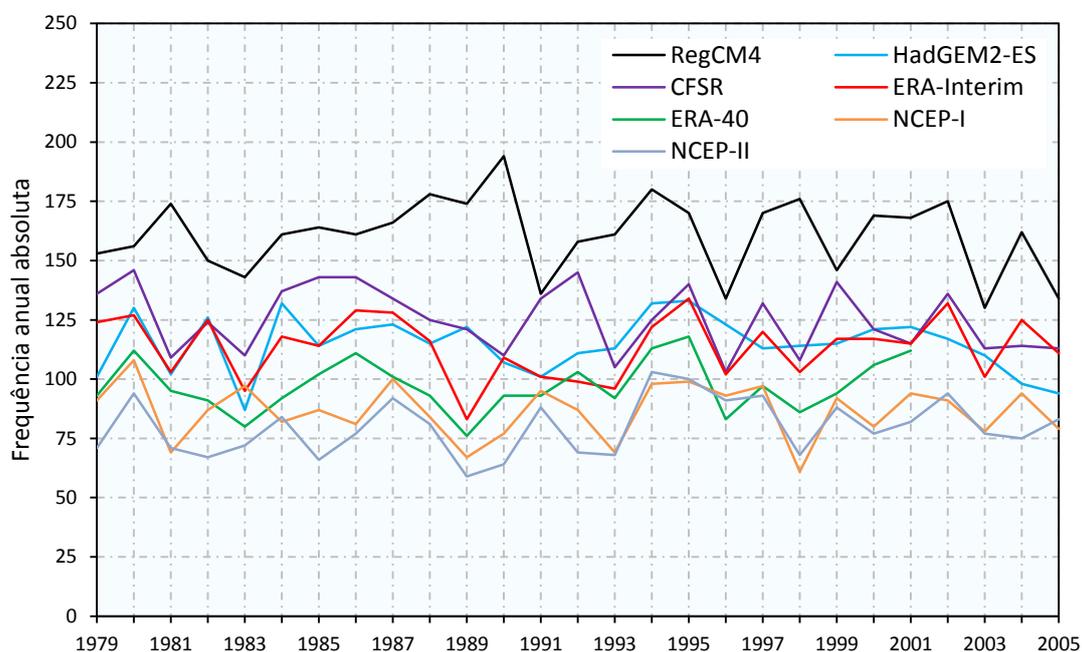


Figura 11 – Frequência anual absoluta de ciclones com $\zeta \leq -2,5$ no período de 1979-2005.

Por sua vez, o HadGEM2-ES simulou uma variabilidade interanual mais próxima da obtida pela ERA-Interim, subestimando o número total de ciclones observado na CFSR ao longo de vários anos, com exceção em 1982, 1989, 1993, 1994, 1996, 1998, 2000, 2001 e 2005. O modelo global obteve ocorrência máxima em 1995 (133 ciclones), e valor mínimo em 1983 (87 ciclones). Por fim, as médias anuais do número de ciclones e seus respectivos desvios padrões de cada conjunto de dados se encontram dispostas na

Tabela 2.

Tabela 2 – Médias anuais de ciclones com $\zeta \leq -1,5$ e $\zeta \leq -2,5$, com os respectivos desvios padrões, obtidos nos modelos e reanálises no período 1979-2005.

	Média anual de ciclones ($\zeta \leq -1,5$)	Média anual de ciclones ($\zeta \leq -2,5$)
RegCM4	282,5 ± 19,4	160,9 ± 15,9
HadGEM2-ES	259,7 ± 19,0	114,7 ± 12,0
CFSR	251,9 ± 17,1	125,3 ± 13,8
ERA-Interim	233,4 ± 14,9	113,6 ± 13,0
ERA-40	218,0 ± 13,6	97,2 ± 11,1
NCEP-I	194,0 ± 12,9	86,6 ± 11,5
NCEP-II	193,6 ± 16,4	79,8 ± 11,9

Reboita (2008) obteve uma média anual similar, em relação a esse estudo, de ciclones que se iniciaram com $\zeta \leq -1,5$ simulados pelo modelo RegCM3. Entre os anos de 1990 e 1999, a autora encontrou uma média de $276 \pm 11,6$ ciclones por ano no modelo regional e $278,7 \pm 11,1$ ciclones na reanálise NCEP-II, contrastando com a média encontrada pela mesma reanálise nesse estudo ($193,6 \pm 16,4$ ciclones por ano). Essa diferença pode estar relacionada à maior área geográfica abrangida pela autora, se estendendo até a longitude de 10°E , permitindo que mais ciclones fossem detectados pelo algoritmo utilizado.

As **Figuras 12 e 13** ilustram a diferença anual do número de ciclones obtidos pelos dois modelos em relação àqueles obtidos pelas reanálises, em porcentagem. Dessa forma, facilita-se a observação das sub ou superestimativas de ciclones para cada ano entre 1979 e 2005 em cada reanálise.

O RegCM4 superestimou o número de ciclones em todos os anos comparado a todas as reanálises, apresentando uma única exceção quando comparado com a reanálise CFSR durante o ano de 1980, onde houve uma subestimativa de 4,3%. Ainda em relação à reanálise CFSR, esse conjunto foi o que apresentou menores diferenças percentuais quanto ao número de ciclones por ano simulado pelo modelo regional, atingindo uma superestimação máxima de 31,7% durante o ano de 1998.

As diferenças entre o modelo regional e as reanálises ERA-Interim e ERA-40 se apresentaram mais robustas, com picos máximos mútuos nos anos de 1989 e 1998, atingindo mais de 50% de superestimativa em relação ao ERA-40. Por fim, as maiores diferenças anuais foram encontradas quando comparado com as reanálises NCEP-I e NCEP-II, onde quase metade de todos os anos que compõem o período de estudo mostraram valores de superestimativa de ciclones iguais ou maiores a 50%. Além disso, superestimativas altas também ocorreram nos anos de 1989 e 1998, onde os valores atingiram 85,4% e 68,9%, respectivamente.

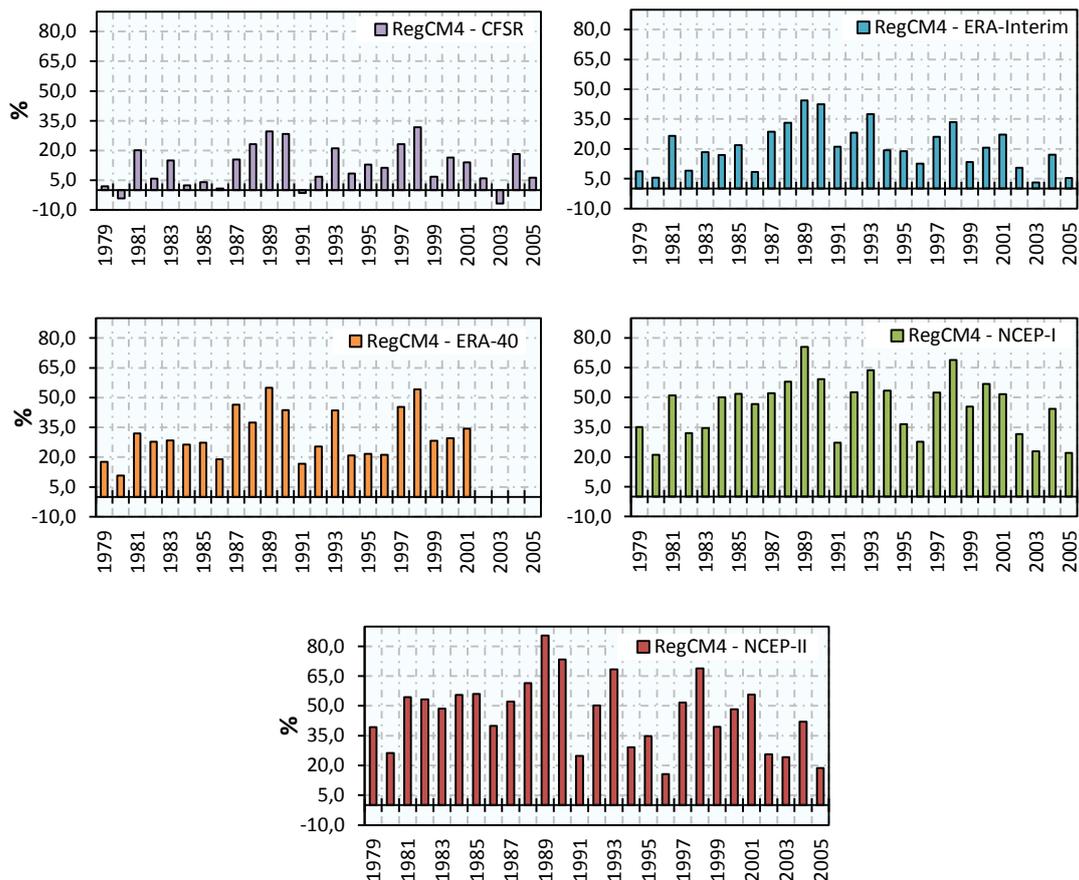


Figura 12 – Diferença percentual anual de ciclones com $\zeta \leq -1,5$ entre o RegCM4 e as reanálises, no período 1979-2005.

Apesar de apresentar diferenças percentuais menores quando comparado ao RegCM4, o HadGEM2-ES também compartilha de padrão semelhante ao obtido pelo modelo regional em relação às reanálises. No entanto, o modelo global subestima a reanálise CFSR em doze anos do período amostral, atingindo um valor máximo de subestimativa no ano de 1992 (-9,7%). As diferenças quanto às demais reanálises seguem características bastante similares daquelas obtidas pelo RegCM4, com maior frequência de valores mais altos nos anos de 1989 e 1998.

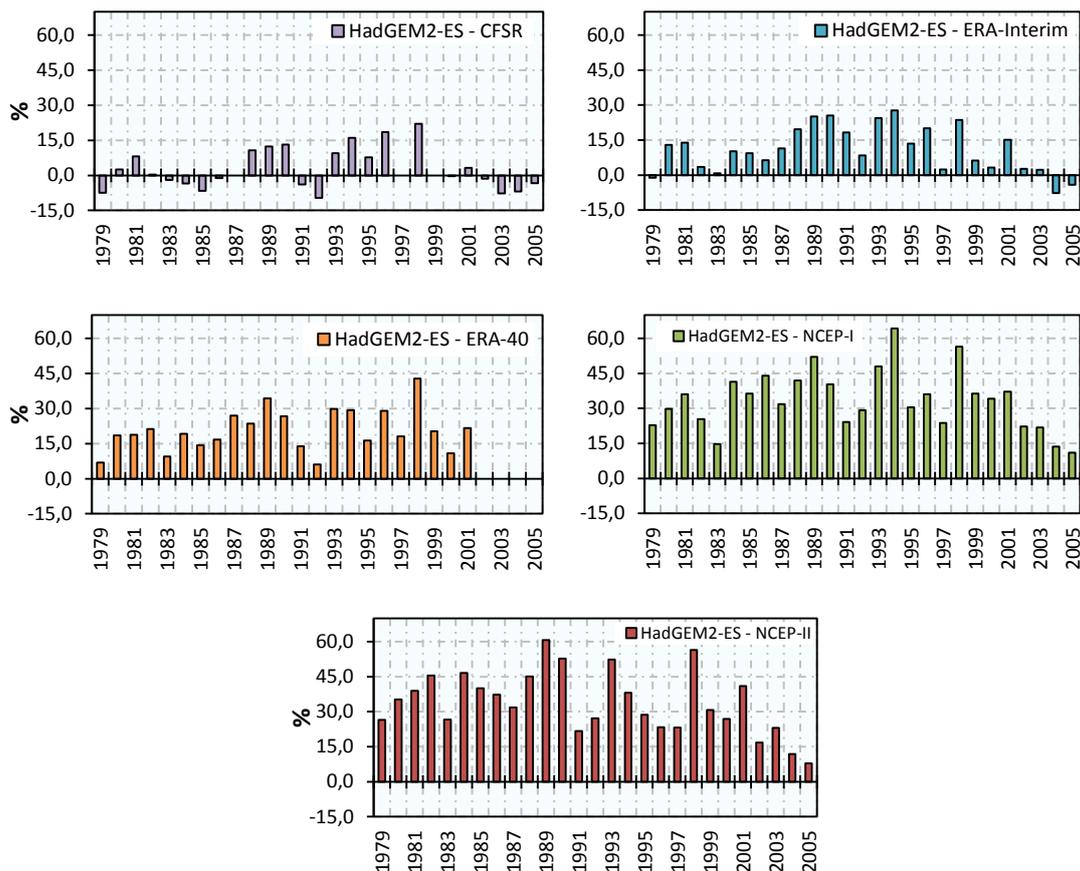


Figura 13 - Diferença percentual anual de ciclones $\zeta \leq -1,5$ entre o HadGEM2-ES e as reanálises, no período 1979-2005.

5.1.2 Variabilidade mensal e sazonal

Quando se considera a variabilidade mensal de todos os sistemas detectados ($\zeta \leq -1,5$; **Figura 14**) os meses de fevereiro e março foram aqueles com as menores médias mensais para todos os conjuntos, com destaque para o mês de fevereiro, onde todas as reanálises tiveram seus valores mínimos. Março foi o mês de menor média de ciclones em ambos os modelos RegCM4 e HadGEM2-ES. Gan e Rao (1991) encontraram os meses de novembro, dezembro, janeiro e fevereiro como os de menores médias mensais para o período de 1979-1988, resultados similares ao presente estudo, enquanto que Reboita (2010) apresentou menor média em novembro pelo modelo RegCM3, e em fevereiro na reanálise NCEP-II. Este último corrobora com o resultado encontrado nesse estudo.

Em relação aos meses de maior ocorrência de ciclones, o mês de julho alcançou a maior média para a ERA-Interim, ERA-40 e NCEP-I, enquanto que as reanálises CFSR

e NCEP-II obtiveram maiores valores durante junho. Os modelos RegCM4 e HadGEM2-ES apresentaram ambos os picos no mês de agosto, contrastando com o encontrado por Reboita (2010) e Gan e Rao (1991), que obtiveram o mês de maio como tendo a maior média mensal.

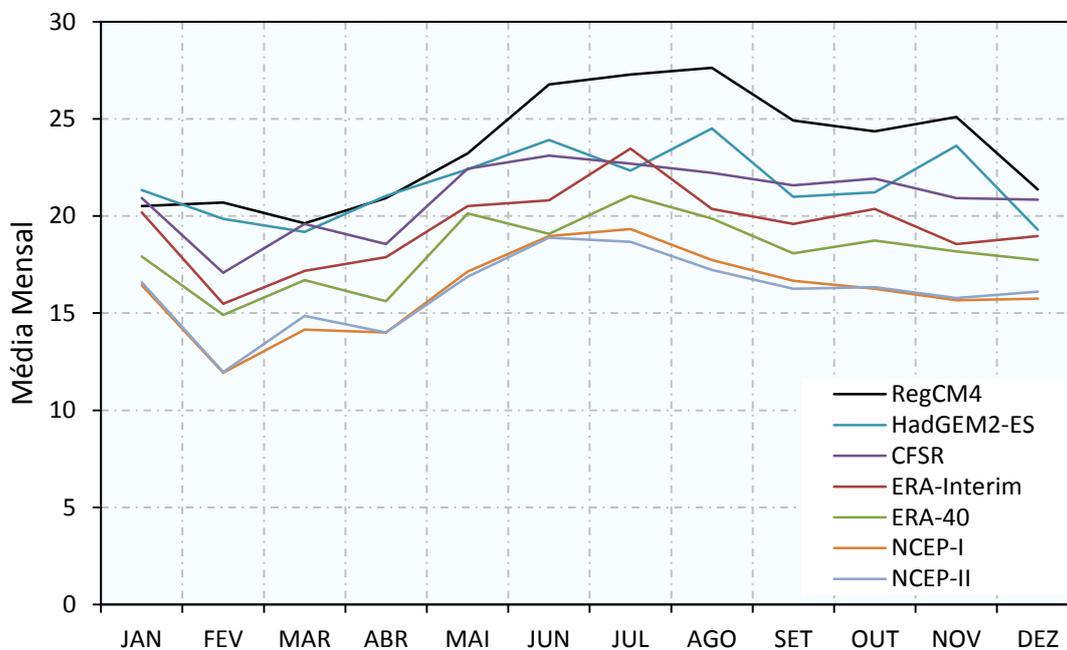


Figura 14 – Média mensal de ciclones no período de 1979-2005, considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$.

Quando o limiar de vorticidade inicial é definido para $\zeta \leq -2,5$ (**Figura 15**), as médias mensais variam de $4,0 \pm 1,9$ (NCEP-I) a $16,9 \pm 2,7$ (RegCM4) ciclones. As menores médias se concentraram durante o mês de fevereiro para todos os conjuntos de dados, exceto para o RegCM4, que apresentou valor mínimo em março. Julho foi o mês com a maior média de ocorrência de ciclones em todos os conjuntos, excetuando para o HadGEM2-ES, com maior valor durante o mês de junho. Estes resultados vão ao encontro daqueles obtidos por Reboita (2010), onde maio, junho e julho foram os meses de maior ocorrência de ciclones inicialmente intensos.

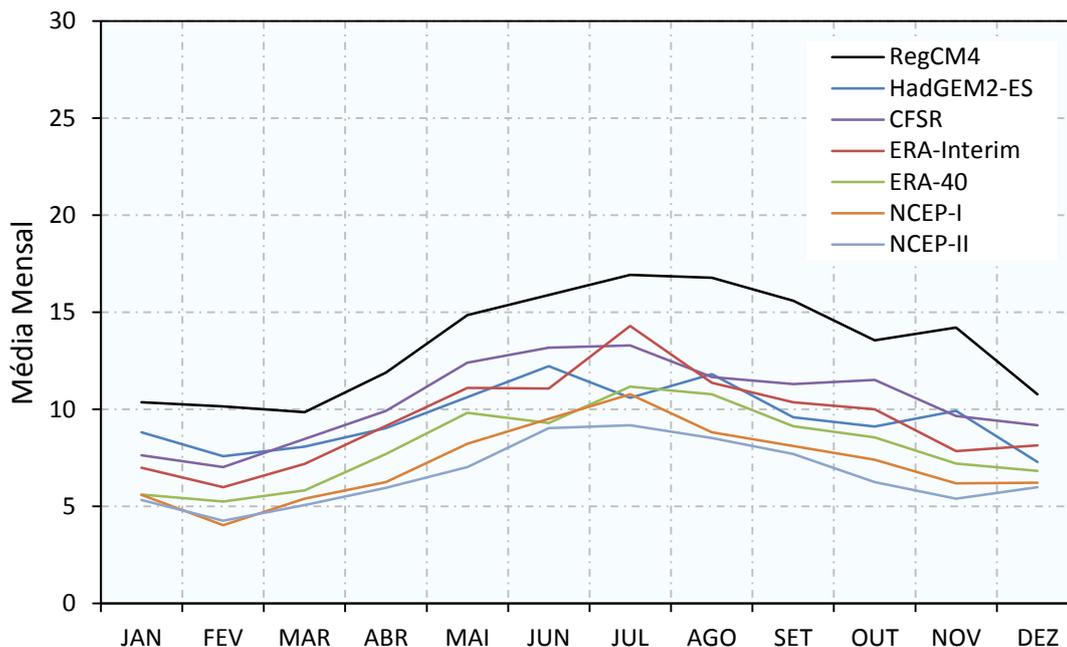


Figura 15 – Média mensal de ciclones no período de 1979-2005, considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -2,5$.

Partindo para uma análise do perfil sazonal dos ciclones atuantes na região de estudo, foi possível confirmar a tendência já observada na variabilidade mensal apresentada em todos os conjuntos. Em ambos os limiares de vorticidade inicial, os ciclones ocorrem notavelmente com maior frequência na estação de inverno, concordando com Sinclair (1994) e Hoskins e Hodges (2005), e, secundariamente, durante a primavera (**Figuras 16 e 17**). As estações de verão e outono se mostraram com médias bastante similares e são aquelas com os menores valores sazonais, sendo reflexo do menor número de ciclones identificados durante os meses de fevereiro e março em todos os conjuntos.

Distintamente, Reboita et al. (2010) observaram maior ocorrência de ciclones durante o verão no RegCM3 e durante o outono na reanálise NCEP-II, enquanto que em ambos as menores frequências ocorrem na primavera. Gan e Rao (1991) encontraram que a estação de maior ocorrência de ciclones foi o inverno, enquanto que o verão representou a estação com a menor frequência, corroborando com o presente estudo. Krüger et al. (2012) simularam a climatologia de ciclones sobre o Atlântico Sul durante o período de 1979-1985 com o modelo RegCM3 aninhado ao modelo global HadAM3 e obtiveram maiores médias sazonais durante a primavera e inverno, enquanto que as menores médias se concentraram no outono e verão. No entanto, vale salientar que o estudo citado abordou

todos os sistemas com vorticidade relativa inicial de $-1,0 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$, limiar mais amplo que o utilizado no presente trabalho.

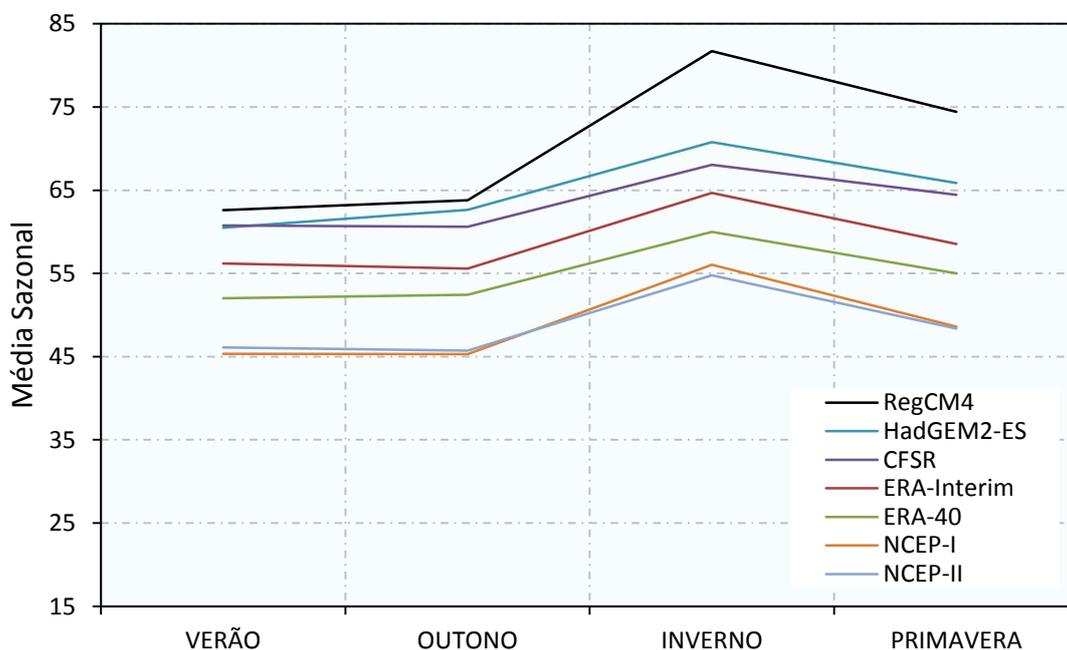


Figura 16 – Média sazonal de ciclones no período de 1979-2005, considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$.

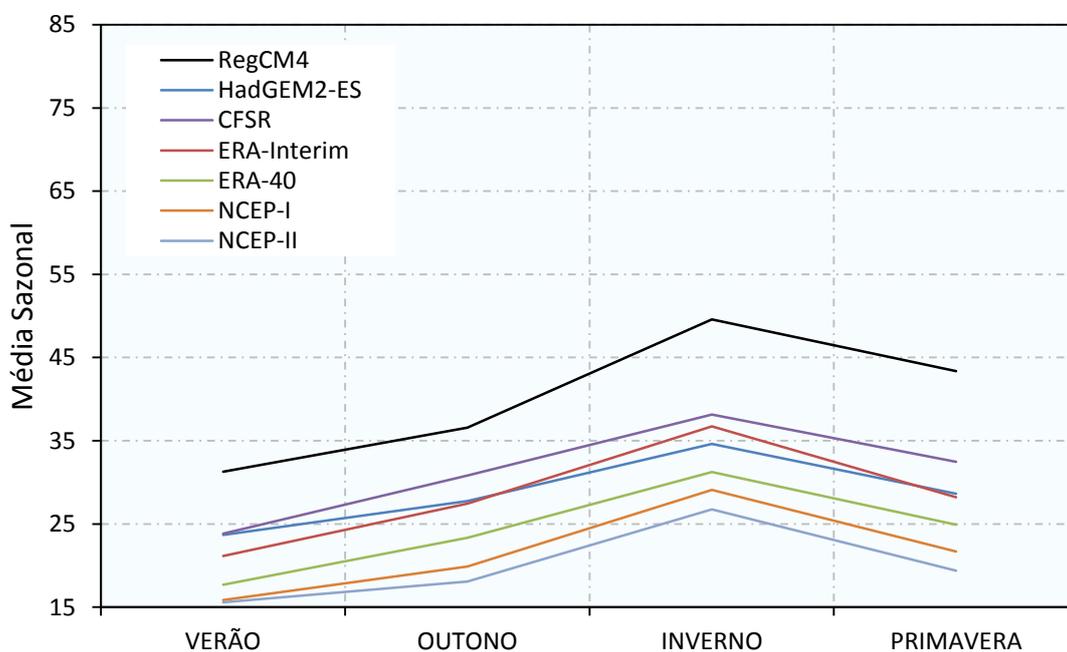


Figura 17 – Média sazonal de ciclones no período de 1979-2005, considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -2,5$.

Por último, uma observação interessante a ser feita se deve à presença de um salto brusco da média sazonal obtida pelo RegCM4 durante a estação de inverno, quando se

considera a análise sazonal abrangendo todos os ciclones identificados, se distanciando principalmente do modelo global HadGEM2-ES no número de ciclones durante essa estação. Isso se deve ao observado de que, tanto o HadGEM2-ES quanto a reanálise CFSR, apresentaram menores diferenças entre as estações (menor variabilidade sazonal) em relação aos outros conjuntos e, principalmente, em relação ao RegCM4, que obteve um considerável aumento na média durante a estação de inverno (maior variabilidade sazonal). A **Tabela 3** resume os meses e estações de maior e menor frequências de ciclones ao longo das reanálises e modelos, em ambos os limiares de vortacidade.

Tabela 3 – Meses e estações de maior e menor ocorrência de ciclones entre reanálises e modelos, para os sistemas com $\zeta \leq -1,5$ e $\zeta \leq -2,5$.

	Mês		Estação		
	$\zeta \leq -1,5$	Maior ocorrência	Menor ocorrência	Maior ocorrência	Menor ocorrência
RegCM4		agosto	março	inverno	verão e outono
HadGEM2-ES		agosto	março e dezembro	inverno	verão e outono
CFSR		junho	fevereiro	inverno	verão e outono
ERA-Interim		julho	fevereiro	inverno	verão e outono
ERA-40		julho	fevereiro	inverno	verão e outono
NCEP-I		julho	fevereiro	inverno	verão e outono
NCEP-II		julho e junho	fevereiro	inverno	verão e outono
	$\zeta \leq -2,5$	Maior ocorrência	Menor ocorrência	Maior ocorrência	Menor ocorrência
RegCM4		julho	fevereiro e março	inverno	verão
HadGEM2-ES		junho	dezembro	inverno	verão
CFSR		julho e junho	fevereiro	inverno	verão
ERA-Interim		julho	fevereiro	inverno	verão
ERA-40		julho	fevereiro	inverno	verão
NCEP-I		julho	maio	inverno	verão
NCEP-II		julho	fevereiro	inverno	verão

5.1.3 Características médias

A **Tabela 4** detalha algumas das características médias gerais dos ciclones (duração, distância percorrida, velocidade, vortacidade inicial e vortacidade média total) para a região do Atlântico Sudoeste, obtidas pelas reanálises e modelos.

Considerando todos os sistemas com limiar de $\zeta \leq -1,5$, nota-se que os conjuntos de dados apresentaram duração média dos ciclones variando entre 2,1 e 2,5 dias, com desvios-padrões entre $\pm 1,2$ e 1,4 dias, respectivamente. Os modelos RegCM4 e HadGEM2-ES apresentaram os maiores valores de duração média, (2,3 e 2,5 dias,

respectivamente) mostrando que simulam ciclones com ciclo de vida mais extensos que as reanálises. Estes resultados se apresentaram ligeiramente inferiores aos obtidos por Reboita (2008), que encontrou duração média de 2,7 dias no RegCM3 e 2,6 dias no NCEP-II (porém, a área de estudo desta autora era mais extensa). Krüger et al. (2012), considerando todos os ciclones com $\zeta \leq -1,0$, obteve médias de 2,9 dias para o RegCM3 e HadAM3, e média de 2,8 dias para a reanálise NCEP-II.

A distância média percorrida em quilômetros pelos ciclones variou de 2431,8 km (NCEP-I) a 2624,4 km (RegCM4), sendo que todos os conjuntos apresentaram valores bastante próximos, porém, mais uma vez os modelos obtiveram as maiores médias em relação às reanálises. Krüger et al. (2012) encontrou uma distância média de 1943,0 km no RegCM3 e 2165,4 km no HadAM3, atingindo, portanto, valores cerca de 500 a 700 km menores em relação a este estudo. Essa diferença está relacionada, provavelmente, aos diferentes limiares de vorticidade relativa inicial utilizados, ocorrendo maior número de ciclones inicialmente fracos no trabalho citado, diminuindo a probabilidade no alcance de maiores distâncias totais percorridas pelos sistemas. Por outro lado, Reboita (2008) utilizou o mesmo limiar de vorticidade inicial ($\zeta \leq -1,5$) e simulou ciclones com distâncias médias percorridas mais próximas ao presente estudo, sendo 2350,9 km no RegCM4 e 2421,1 km na NCEP-II.

A velocidade média dos sistemas apresentou valor mínimo de 13,8 m/s (HadGEM2-ES) e um valor máximo de 15,4 m/s (CFSR, ERA-Interim e NCEP-I), com desvios padrões variando entre $\pm 5,1$ e $5,2$ m/s. Aqui, os modelos regional e global se mostraram simulando, em média, ciclones com menor velocidade, atingindo velocidades de 14,9 m/s e 13,8 m/s, respectivamente. Tais valores se mostraram superiores aos obtidos por Krüger et al. (2012) e Reboita (2008), que variaram entre 9,3 e 10,8 m/s de velocidade média.

Em relação à vorticidade relativa inicial média, os valores oscilaram entre $-3,0 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ e $-2,6 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$. O modelo regional RegCM4 apresentou a média mais negativa (maior intensidade), sendo reflexo de ter sido o conjunto com a maior porcentagem de sistemas que se iniciaram com $\zeta \leq -2,5$, cerca de 56,9%. O HadGEM2-ES obteve média de $2,7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, enquanto que as reanálises NCEP-I e NCEP-II obtiveram as médias menos negativas de vorticidade relativa inicial. Reboita (2008) apresentou uma média de $2,4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ no RegCM3 e $2,5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ na NCEP-II, demonstrando que o RegCM4 utilizado nesse estudo simula ciclones ligeiramente mais intensos.

A última coluna da tabela exhibe os valores da vorticidade relativa média total, ou seja, a média da vorticidade ao longo de todo o ciclo de vida dos ciclones e não apenas na sua gênese. Assim, observa-se que os valores menos negativos (menos intensos) se encontram nas reanálises NCEP-I e NCEP-II, tendo ambas médias de $-3,4 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$, sendo os valores mais próximos aos encontrados por Reboita (2008). As médias mais negativas obtidas pelas reanálises ocorrem na CFSR e Era-Interim, ambas com vorticidade média total de $-3,8 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$. Os modelos RegCM4 e HadGEM2-ES apresentaram valores médios de $-3,7 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ e $-3,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$, respectivamente.

Tabela 4 – Características médias dos ciclones sobre o Atlântico Sudoeste no período de 1979-2005, considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$.

$\zeta \leq -1,5$	Duração (dias)	Distância percorrida (km)	Velocidade (m/s)	Vorticidade inicial ($\times 10^{-5} \text{s}^{-1}$)	Vorticidade média total ($\times 10^{-5} \text{s}^{-1}$)
RegCM4	2,3	2624,4	14,9	-3,0	-3,7
HadGEM2-ES	2,5	2570,1	13,8	-2,7	-3,5
CFSR	2,2	2548,3	15,4	-2,8	-3,8
ERA-Interim	2,1	2484,1	15,4	-2,8	-3,8
ERA-40	2,1	2470,5	15,3	-2,7	-3,6
NCEP-I	2,1	2458,9	15,4	-2,6	-3,4
NCEP-II	2,1	2431,8	15,1	-2,6	-3,4

É importante considerar que todas as diferenças dos valores das características médias entre os estudos aqui citados podem ser, além das particularidades dos modelos utilizados, devidas também às diferentes áreas de análise abrangidas, que acabam por selecionar ciclones originários de outras regiões e, portanto, submetidos a outros condicionantes energéticos, desenvolvendo outras características.

As mesmas características gerais são dispostas na **Tabela 5** para os sistemas inicialmente intensos ($\zeta \leq -2,5$). Há uma pequena diminuição, entre 4,3% a 9,1%, da duração média dos ciclones em todos os conjuntos de dados, em relação ao limiar de $\zeta \leq -1,5$. O mesmo ocorre para a distância percorrida, onde em cinco dos sete conjuntos apresentaram queda na média da variável, oscilando entre 0,7% e 1,8% de diminuição em relação ao limiar de vorticidade anterior.

Uma vez que a porcentagem de diminuição do valor médio da duração dos ciclones é consideravelmente superior à porcentagem de diminuição da distância percorrida, é esperado que a velocidade dos sistemas aumente, como foi observado. Esse aumento

variou entre 2,7% e 5,2% ao longo das reanálises e modelos, apresentando valor mínimo de 14,5 m/s (HadGEM2-ES) e máximo de 16,2 m/s (ERA-Interim).

A vorticidade relativa inicial média variou de $3,4 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ (NCEP-II) a $3,8 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ (RegCM4), enquanto que a vorticidade relativa média total ao longo de todo o desenvolvimento e dissipação dos ciclones oscilou entre $-3,9 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ (NCEP-I e NCEP-II) e $-4,3 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ (ERA-Interim).

Tabela 5 – Características médias dos ciclones sobre o Atlântico Sudoeste no período de 1979-2005, considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -2,5$.

$\zeta \leq -2,5$	Duração (dias)	Distância percorrida (km)	Velocidade (m/s)	Vorticidade inicial ($\times 10^{-5} \text{s}^{-1}$)	Vorticidade média total ($\times 10^{-5} \text{s}^{-1}$)
RegCM4	2,2	2597,9	15,3	-3,8	-4,2
HadGEM2-ES	2,3	2522,8	14,5	-3,6	-4,0
CFSR	2,0	2502,8	16,1	-3,7	-4,2
ERA-Interim	2,0	2454,7	16,2	-3,7	-4,3
ERA-40	2,0	2473,0	16,1	-3,6	-4,1
NCEP-I	2,0	2442,2	16,1	-3,5	-3,9
NCEP-II	2,0	2438,4	15,8	-3,4	-3,9

Sabendo que a média tende a esconder os valores extremos das variáveis, podendo causar a perda de informações relevantes, foram construídos histogramas das características gerais dos ciclones encontradas nos modelos e reanálises. A **Figura 18** representa o comportamento dos ciclones ($\zeta \leq -1,5$) em relação à sua duração nas reanálises e modelos. No geral, mais de 50% de todos os sistemas identificados nos conjuntos de dados apresentaram gênese, desenvolvimento e declínio dentro de 1 e 2 dias, com exceção do HadGEM2-ES que atingiu uma porcentagem de 47,3% dos seus ciclones dentro desse intervalo de duração. Secundariamente, entre 23% e 25% dos sistemas obtiveram ciclo de vida de 2 a 3 dias. Por último, ciclones com duração de 5 a 10 dias corresponderam a menos de 10% do total de ciclones encontrados em cada uma das reanálises e modelos.

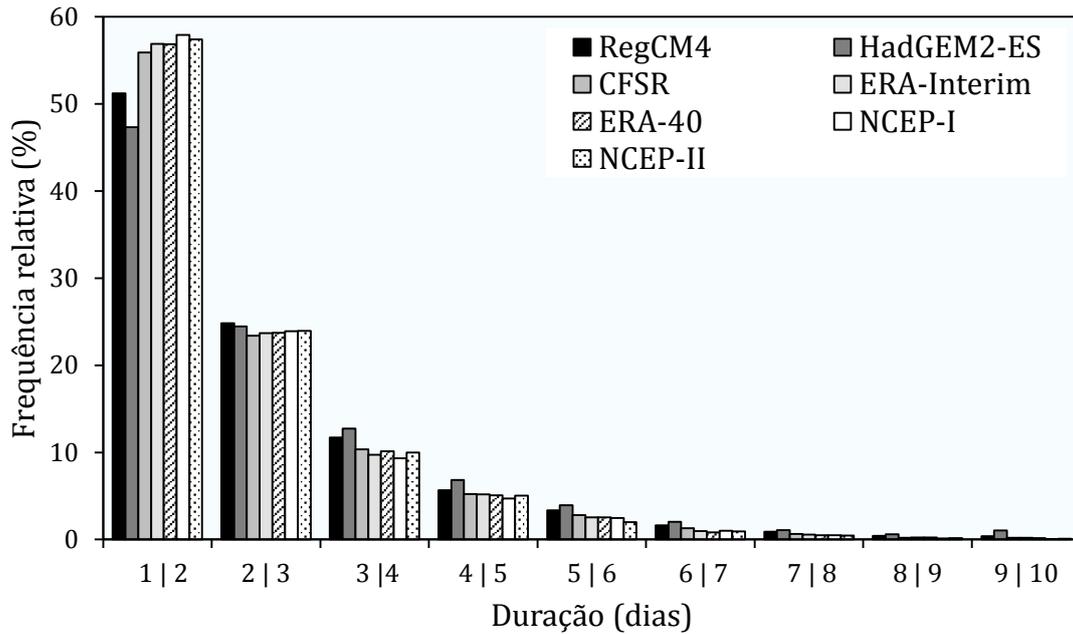


Figura 18 – Frequência relativa (%) dos ciclones quanto à duração (dias) no período de 1979-2005 e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$.

A variabilidade encontrada dos ciclones quanto à distância que percorrem até a sua dissipação é alta, alcançando um mínimo de 148,8 km até próximo de 11000 km. Porém, para melhor representação gráfica da distribuição de frequências, foram criadas classes separadas de frequência apenas para as distâncias entre o valor zero até 5000 km. Valores superiores foram representados por uma única classe geral, já que ocorrem em porcentagem muito pequena. Assim, a **Figura 19** indica que mais de 50% de todos os ciclones, em todos os conjuntos de dados, apresentaram valores de distância percorrida dentro do intervalo de 1500 a 3000 km. Todas as reanálises e modelos mantiveram um padrão comum entre si para as diferentes classes da variável.

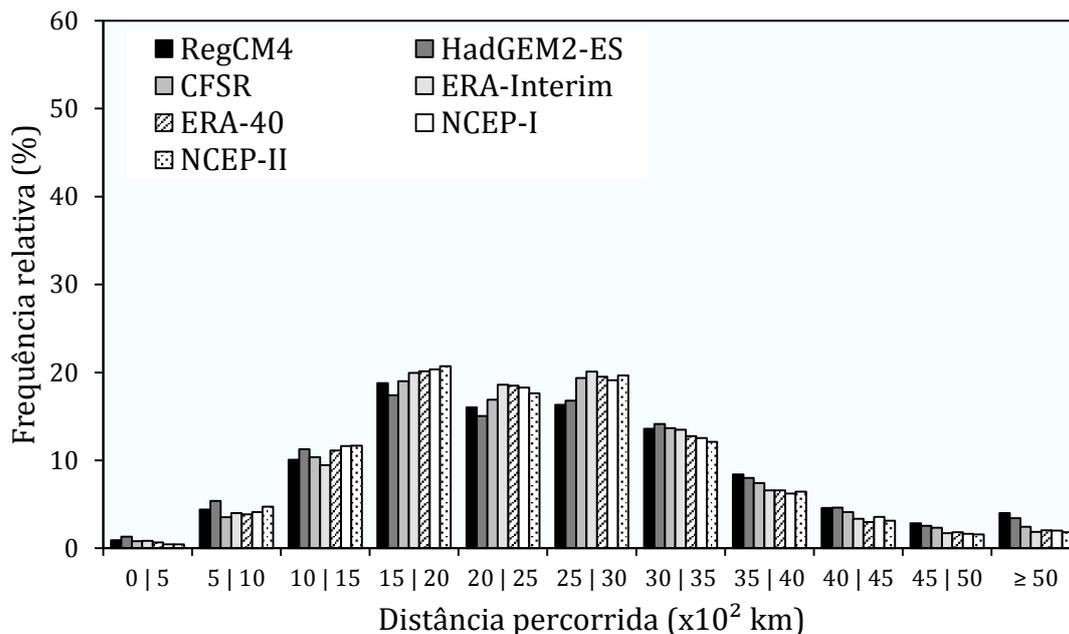


Figura 19 – Frequência relativa (%) dos ciclones quanto à distância percorrida total ($\times 10^2$ km) no período de 1979-2005 e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$.

Em relação a velocidade dos ciclones, mais de 60% deles apresentaram entre 10 e 20 m/s como velocidade média ao longo do ciclo de vida, em todos os conjuntos de dados (**Figura 20**). Outros dois grupos de classes se mostraram presentes com maior frequência: entre 14% e 20% dos ciclones tiveram 5 a 10 m/s como velocidade média, e entre 10% e 17% variaram entre 20 e 25 m/s. Uma porção muito desprezível de sistemas atingiram velocidades médias maiores que 30 m/s. Interessante notar que o modelo global HadGEM2-ES apresentou frequências relativas de velocidade até próximo de 15 m/s maiores que todos os demais conjuntos, porém, menores que todos estes quando em classes de velocidade iguais ou superiores a 15 m/s, demonstrando maior capacidade em simular ciclones de baixa velocidade.

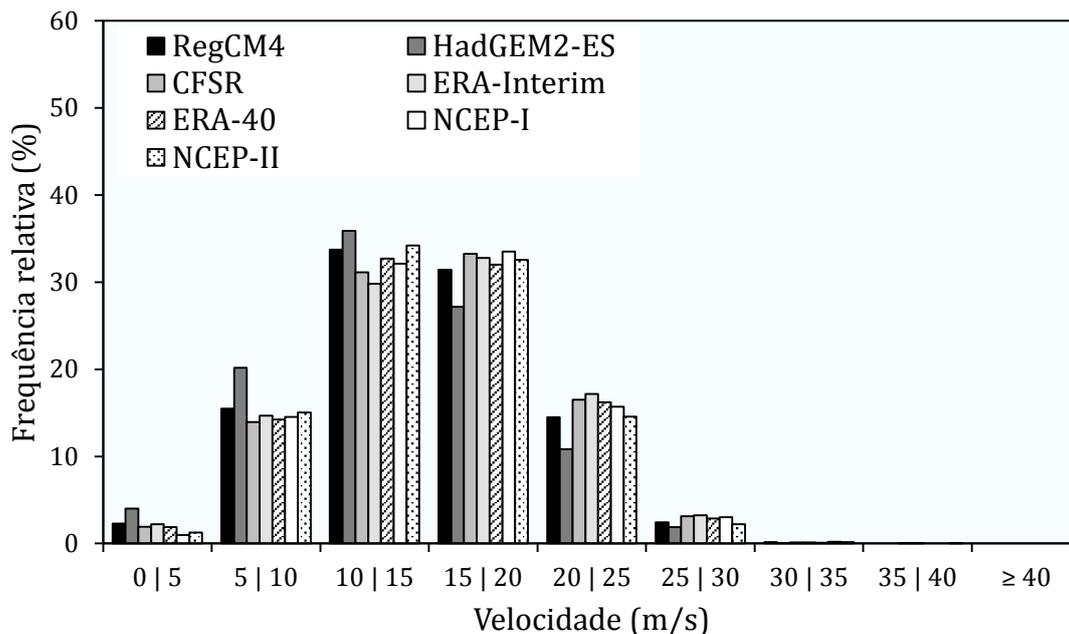


Figura 20 – Frequência relativa (%) dos ciclones quanto à velocidade média (m/s) no período de 1979-2005 e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$.

Entre 50% e 60%, aproximadamente, de todos os ciclones identificados nos modelos e reanálises apresentaram gêneses com vorticidade relativa inicial entre $-1,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ e $-2,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ (**Figura 18**). O RegCM4 apresentou as menores frequências, em relação aos outros conjuntos, de sistemas que tiveram sua gênese com vorticidade entre $-1,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ e $-2,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$. No entanto, conforme a vorticidade relativa inicial se torna mais negativa a partir de $-3 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$, o modelo adquire maior expressividade em relação aos demais conjuntos. Isso demonstra que, entre todos os grupos de dados, o modelo regional é aquele que apresentou a maior capacidade de simular ciclones com alta intensidade inicial.

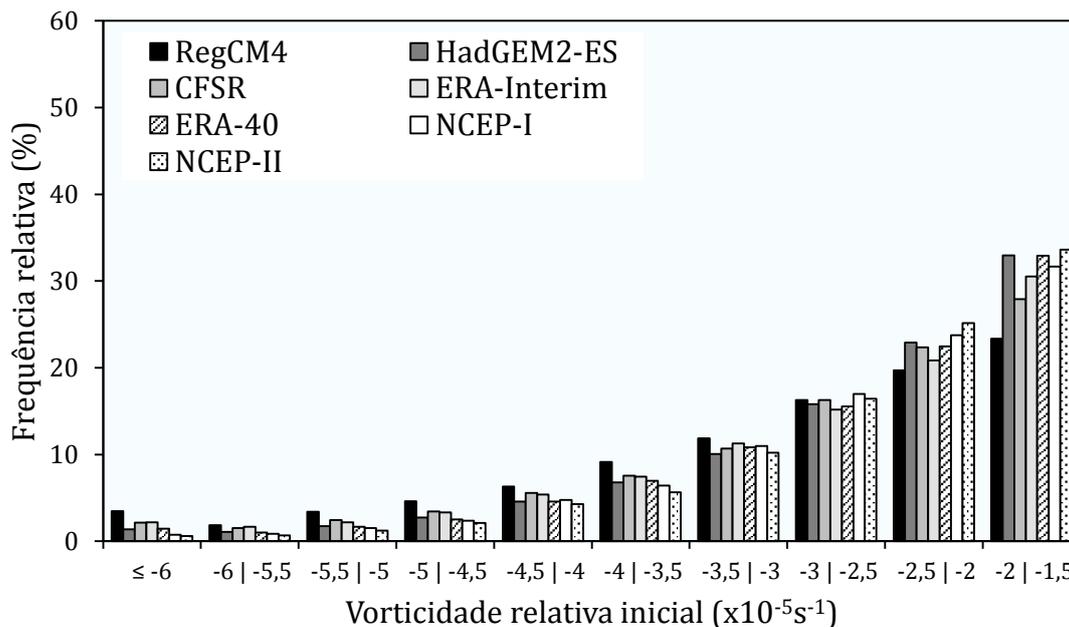


Figura 21 – Frequência relativa (%) dos ciclones quanto à vorticidade relativa inicial ($\times 10^{-5} s^{-1}$) no período de 1979-2005, considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$.

Quanto à vorticidade relativa média total dos ciclones, foi observada uma variação considerável no número de classes em que os sistemas se distribuíram, tanto nas reanálises quanto nos modelos (**Figura 19**). Entre 17% e 21% apresentaram entre $-4,0 \times 10^{-5} s^{-1}$ e $-5,0 \times 10^{-5} s^{-1}$ de vorticidade média total ao longo do ciclo de vida. Entre 18% e 20% dos sistemas variaram de $-2,5 \times 10^{-5} s^{-1}$ a $-3,0 \times 10^{-5} s^{-1}$. Entre 17% e 19%, apresentaram valores de $-3,0 \times 10^{-5} s^{-1}$ a $-3,5 \times 10^{-5} s^{-1}$. Entre 13,9% e 14,5%, de $-3,5 \times 10^{-5} s^{-1}$ a $-4,0 \times 10^{-5} s^{-1}$, e entre 12% e 17,2% do total de ciclones apresentaram valores de $-2,0 \times 10^{-5} s^{-1}$ a $-2,5 \times 10^{-5} s^{-1}$ como vorticidade média total. As demais classes, no geral, não caracterizaram mais do que 10% do número total de ciclones.

Sendo assim, os histogramas apresentados confirmaram a tendência mostrada pela tabela de características médias, que indicaram não haver diferenças consideráveis entre os ciclones rastreados nos modelos e reanálises. Tanto as médias quanto as frequências relativas das variáveis formaram padrões bastante próximos entre os conjuntos de dados.

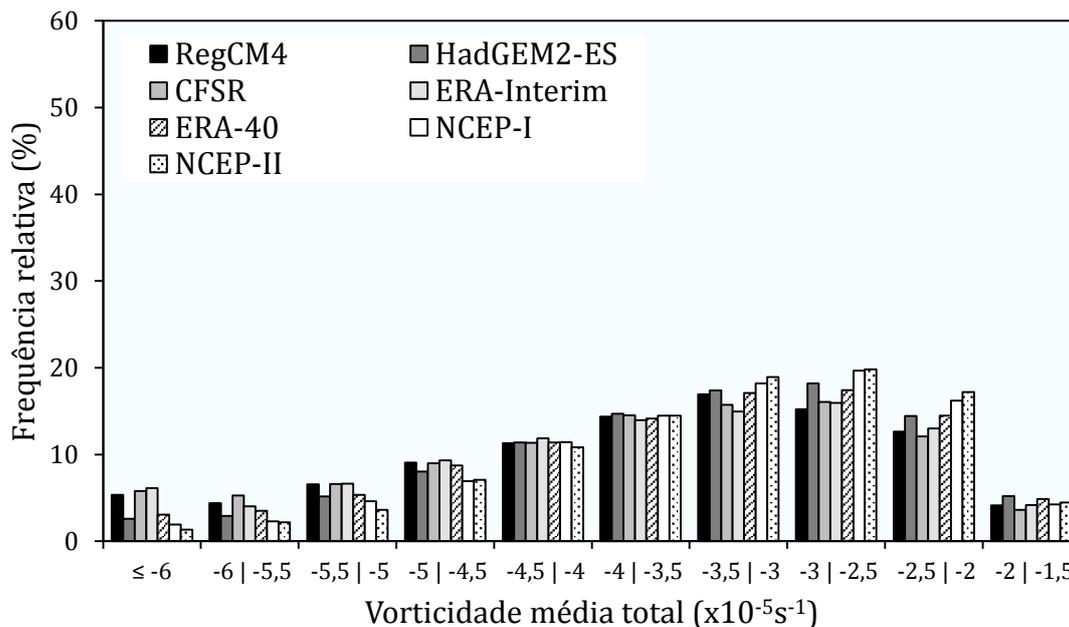


Figura 22 – Frequência relativa (%) dos ciclones quanto à vorticidade média total ($\times 10^{-5} s^{-1}$) no período de 1979-2005, considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$.

5.1.4 Densidade ciclogênica

Conforme a literatura aponta, existem três sub-regiões preferenciais de ocorrência da ciclogênese sobre o sudoeste do Atlântico Sul (HOSKINS; HODGES, 2005; REBOITA, 2008; REBOITA et al., 2010; KRÜGER, 2009; KRÜGER et al., 2012). As **Figuras 23, 24, 25, 26 e 27** representam mapas de densidade que permitem visualizar a distribuição espacial anual e sazonal das ciclogêneses, considerando o limiar de $\zeta \leq -1,5$, e entender como se configuram as três sub-regiões próximas à costa sudeste do continente sul-americano.

De forma geral, as ciclogêneses nessa região se concentram predominantemente ao longo de toda a porção oceânica adjacente à costa sudeste da América do Sul, entre as latitudes $23^{\circ}S$ e $57,5^{\circ}S$. Os mapas de densidade anuais revelaram os três núcleos ciclogênicos com diferentes graus de definição (**Figura 23**), são eles:

a) RG1: Situa-se próximo à costa da região sudeste do Brasil, entre as latitudes aproximadas de 22° - $29^{\circ}S$. É o núcleo ciclogênico com a menor definição espacial e com os menores valores de densidade. Krüger et al. (2012) também obteve os menores valores de densidade para essa sub-região através da simulação dos modelos RegCM3,

HadAM3 e pela reanálise NCEP-II, durante o período de 1975-1989. O mesmo padrão foi encontrado por Reboita (2008) para o período de 1990-1999.

Neste estudo, a densidade anual nessa sub-região é mais nítida nos modelos RegCM4, HadGEM2-ES e na reanálise CFSR, em detrimento dos demais conjuntos em que a RG1 não está bem definida. Dessa forma, os modelos regional e global superestimam a densidade anual de ciclogêneses nessa área.

Durante a estação de verão, o RegCM4 simulou na RG1 uma densidade ciclogênica ligeiramente inferior às outras reanálises (**Figura 24**), com exceção da obtida pela ERA-40, em que se mostraram bastante concordantes no valor e na dimensão espacial da densidade. Já o modelo global HadGEM2-ES, para a mesma estação, apresentou concordância com todas as reanálises nos quesitos posicionamento do núcleo, valor da densidade e dimensão espacial, com uma única exceção em relação ao ERA-40, onde há uma pequena superestimativa (em cerca de 8×10^{-6} ciclones/km²).

Existe uma baixa densidade de ciclones durante a estação de outono em todas as reanálises nos limites da RG1, não ultrapassando cerca de 8×10^{-6} a 10×10^{-6} ciclones/km² (**Figura 25**). Tanto o RegCM4 quanto o HadGEM2-ES reproduziram tais condições, corroborando com as reanálises.

Em relação à estação de inverno, todas as reanálises indicam a ausência de um núcleo bem definido dentro das coordenadas que abrangem a sub-região (**Figura 26**). O HadGEM2-ES é o modelo que melhor simula essa situação, comparativamente ao RegCM4. Este acaba por superestimar consideravelmente a densidade ciclogênica na área.

Durante a primavera, observou-se que o RegCM4 corrobora com a reanálise CFSR quanto à posição do núcleo e valor da densidade (**Figura 27**). No entanto, superestima as demais reanálises. Já o modelo HadGEM2-ES simula a densidade semelhantemente às reanálises ERA-Interim e NCEP-II, mas subestima a CFSR e superestima os conjuntos ERA-40 e NCEP-I.

Por fim, a primavera foi a estação de maior densidade de ciclogêneses simulada pelo RegCM4 dentro dos limites da RG1, enquanto que o outono obteve os menores valores. O HadGEM2-ES, assim como todas as reanálises, reproduziu maior densidade durante as estações de verão e primavera, tendo o outono e inverno como as estações de

menor densidade. Esses resultados se mostraram de acordo com o simulado por Reboita (2008), que encontrou maior densidade de ciclogêneses durante a primavera e verão na RG1, porém, ligeiramente distintos do encontrado por Krüger (2009), onde o outono e a primavera foram as estações de maior densidade.

Os principais fatores que favorecem o desenvolvimento das ciclogêneses sobre essa sub-região ainda são pouco conhecidos. Reboita et al. (2010) argumentam que parte da umidade proveniente da bacia Amazônica transportada pelos jatos de baixos níveis (JBN) é escoada através da configuração topográfica da Cordilheira dos Andes até a bacia do rio da Prata, atuando como uma fonte energética importante para a atividade convectiva e o surgimento dos ciclones nesta região. O mesmo argumento também é suportado por Sinclair (1996) e Vera et al. (2002).

b) RG2: Abrange a região próxima à desembocadura do rio da Prata e rente à costa do Uruguai e do estado brasileiro do Rio Grande do Sul, entre as latitudes de 30°-37°S, aproximadamente. A RG2 é caracterizada por núcleo ciclogênético com definição moderada, variável com a estação do ano e apresentando valores de densidade médios em relação às demais sub-regiões.

Tanto o modelo RegCM4 quanto o HadGEM2-ES subestimam a densidade anual de ciclogêneses ao longo da sub-região em relação às reanálises, que mostram um núcleo bem definido, mas de densidade moderada a baixa (**Figura 23**).

Durante a estação de verão, a densidade de ciclones simulada pelo RegCM4 corrobora com as obtidas pelas reanálises CFSR, ERA-Interim e NCEP-I, mas superestima a ERA-40 e NCEP-II (**Figura 24**). O modelo HadGEM2-ES apresentou estrutura de densidade semelhante às reanálises em geral, porém com subestimativas em relação à todas as reanálises, exceto à ERA-40.

No outono, a RG2 no RegCM4 se mostrou menos densa do que todas as reanálises, enquanto que o HadGEM2-ES simulou um padrão relativamente mais próximo desses grupos, apesar de subestimar a CFSR, ERA-Interim e ERA-40 (**Figura 25**).

Em relação à estação de inverno, o RegCM4 simula um núcleo de ciclogêneses consideravelmente mais afastado da costa, em direção sudeste, do que o obtido pelas reanálises (**Figura 26**). Além disso, o modelo subestimou a densidade encontrada em todas as reanálises em aproximadamente 5×10^{-6} ciclones/km². Já a simulação realizada

pelo HadGEM2-ES encontrou dois pequenos núcleos de densidade: um núcleo em posição semelhante àqueles providos pelas reanálises ($\approx 34^{\circ}\text{S}$) e outro núcleo próximo, mas deslocado para nordeste ($\approx 30^{\circ}\text{S}$). De qualquer forma, o modelo global reproduziu melhor a densidade ciclogénica na sub-região RG2.

Por último, na estação de primavera, o RegCM4 reproduziu satisfatoriamente o núcleo de ciclogêneses encontrado pelas reanálises, apesar de subestimar em pequeno grau a maioria delas, exceto a ERA-40 (**Figura 27**). O HadGEM2-ES apresentou estrutura semelhante ao encontrado pelo modelo no inverno: dois pequenos núcleos próximos subestimando as densidades observadas nas reanálises.

De maneira geral, as estações de primavera e inverno foram aquelas que obtiveram a maior densidade de ciclogêneses, em ambos os modelos e em todas as reanálises, dentro dos limites da RG2, concordando com Reboita et al. (2010). Os menores valores ocorreram principalmente durante a estação de verão, mas também no outono, em todos os conjuntos de dados. Esses resultados contrastam com os obtidos por Krüger (2009), que identificou maior densidade média de ciclones durante o outono e verão. No entanto, é importante mencionar que o autor utilizou um limiar de vorticidade inicial diferente deste estudo, considerando todos os sistemas que se iniciam com $\zeta \leq -1,0$.

Reboita (2008) mostrou que as ciclogêneses nesta região sofrem a influência de cavados transientes em médios e altos níveis, que se deslocam desde o Oceano Pacífico até o Atlântico. Estes cavados transientes interagem com o cavado estacionário gerado pela topografia dos Andes localizado próximo à costa do Uruguai e sul do Brasil, e, associado à alta instabilidade baroclínica característica da região (intensificada pelo gradiente horizontal de temperatura devido à confluência das correntes das Malvinas e do Brasil), principalmente no inverno, favorecem o surgimento e a intensificação das anomalias ciclônicas em superfície (GAN; RAO, 1991; VERA et al., 2002; REBOITA, 2008; REBOITA et al., 2010).

c) RG3: Situa-se na região da costa sudeste da Argentina, entre as latitudes próximas de 42° - 50°S . É o núcleo ciclogénico com a maior definição e com os maiores valores de densidade encontrados.

Todas as reanálises mostraram um núcleo bem desenvolvido dentro das coordenadas da RG3, no entanto, a CFSR, ERA-Interim e ERA-40 apresentaram as

maiores densidades, com destaque para a ERA-Interim (**Figura 23**). Ambos os modelos foram capazes de reproduzir esse núcleo, mas com diferenças expressivas quanto ao valor e configuração espacial da densidade. O núcleo simulado pelo RegCM4 foi o mais próximo do padrão obtido pelas reanálises, enquanto que o HadGEM2-ES simulou um núcleo muito mais robusto e condensado, superestimando em mais de 40×10^{-6} ciclones/km² todas as reanálises.

Durante a estação de verão, o RegCM4 simulou a densidade de ciclogêneses no RG3 de maneira mais semelhante a reanálise CFSR do que em relação às demais, porém, apresentou seu núcleo deslocado para norte (**Figura 24**). Já o HadGEM2-ES reproduziu um núcleo ciclogênético circular, de alta intensidade e na mesma posição que os demais conjuntos, mas superestimando a densidade em todas as reanálises.

Analisando apenas as reanálises, a estação de outono se configurou com núcleos de maior densidade nas reanálises CFSR, ERA-Interim e ERA-40 (**Figura 25**). O modelo RegCM4 simulou uma condição bastante semelhante a estes conjuntos, mas superestimou a NCEP-I e NCEP-II. O HadGEM2-ES reproduziu a posição do núcleo, mas superestimou consideravelmente todas as reanálises quanto ao valor da densidade.

Em relação à estação de inverno, o RegCM4 simulou a distribuição de densidade semelhante à disposta pelas reanálises, porém, superestimou a intensidade da maioria, com exceção da ERA-Interim (**Figura 26**). O HadGEM2-ES apresentou, novamente, um núcleo circular rente à costa da Argentina e com maior densidade em relação às reanálises.

Por fim, a estação de primavera se caracterizou por baixa densidade nas reanálises NCEP-I e NCEP-II, semelhantemente ao encontrado no outono (**Figura 27**). Nas demais reanálises foi encontrado um núcleo bem definido com densidade ciclogênética moderada (22×10^{-6} a 30×10^{-6} ciclones/km²). O modelo regional simulou dois núcleos separados, sendo um localizado próximo a 49°S e outro próximo de 43°S, subestimando as reanálises CFSR, ERA-Interim e ERA-40. Quanto ao HadGEM2-ES, este modelo simulou um único núcleo em formato de elipse bastante denso, superestimando todos os demais conjuntos.

Resumidamente, o domínio delimitado pela sub-região RG3 apresentou presença constante de uma densidade média a alta de ciclogêneses ao longo de todas as estações. De qualquer forma, o inverno e primavera foram as estações com as maiores densidades, tanto nos modelos quanto nas reanálises, enquanto que o outono foi o período de

ocorrência dos menores valores. Reboita (2008) encontrou maior densidade média durante o inverno e o outono na simulação do modelo RegCM3, enquanto que Krüger (2009) simulou maior densidade de ciclones no outono e primavera, com o mesmo modelo.

Os condicionantes mais importantes para o desenvolvimento dos ciclones nessa região são bastante similares àqueles que atuam sobre a RG2. No entanto, um grande número de ciclogêneses se formam pelo efeito de sotavento induzido pela Cordilheira do Andes, que acaba por favorecer o aumento da vorticidade ciclônica à leste da barreira (REBOITA, 2008).

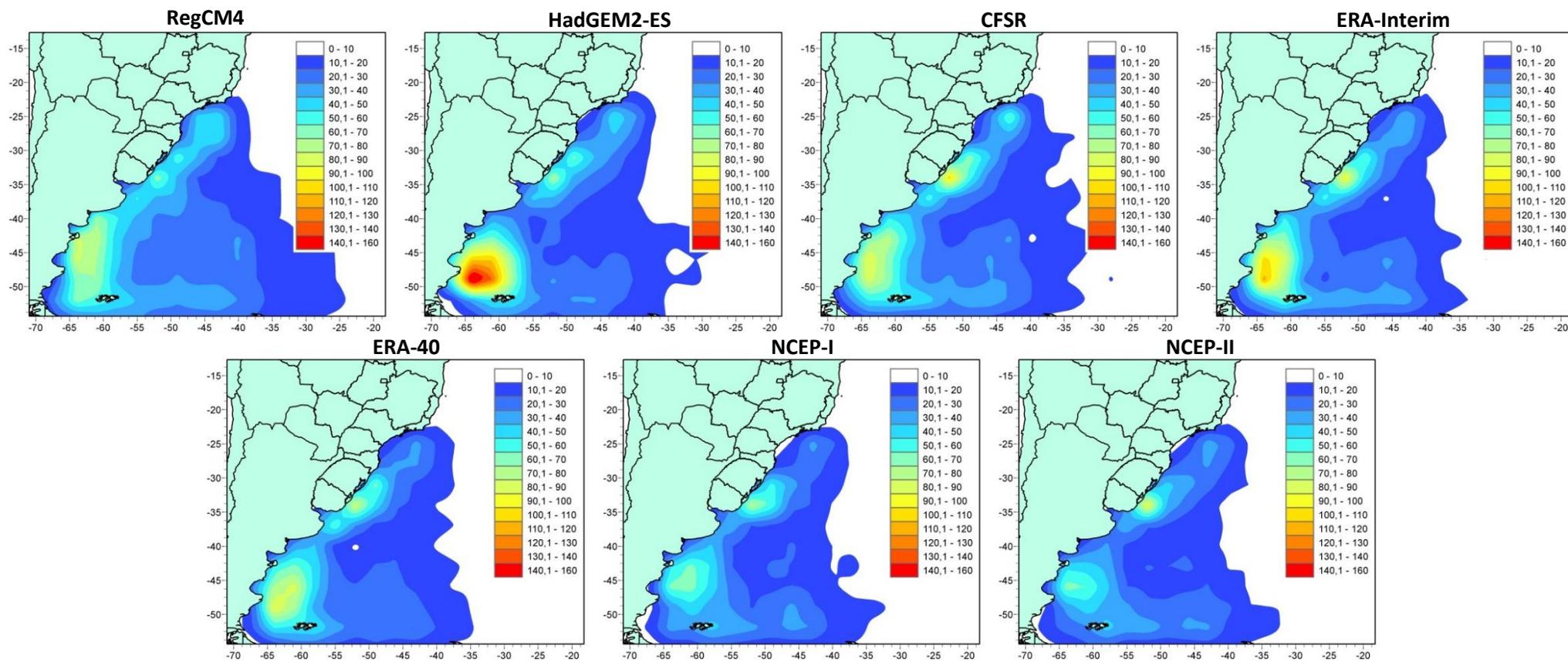


Figura 23 – Densidade ciclogênica anual média ($\times 10^6/\text{km}^2$) sobre o Atlântico Sudoeste durante o período 1979-2005, considerando todos os ciclones que se iniciaram com $\zeta \leq -1,5$.

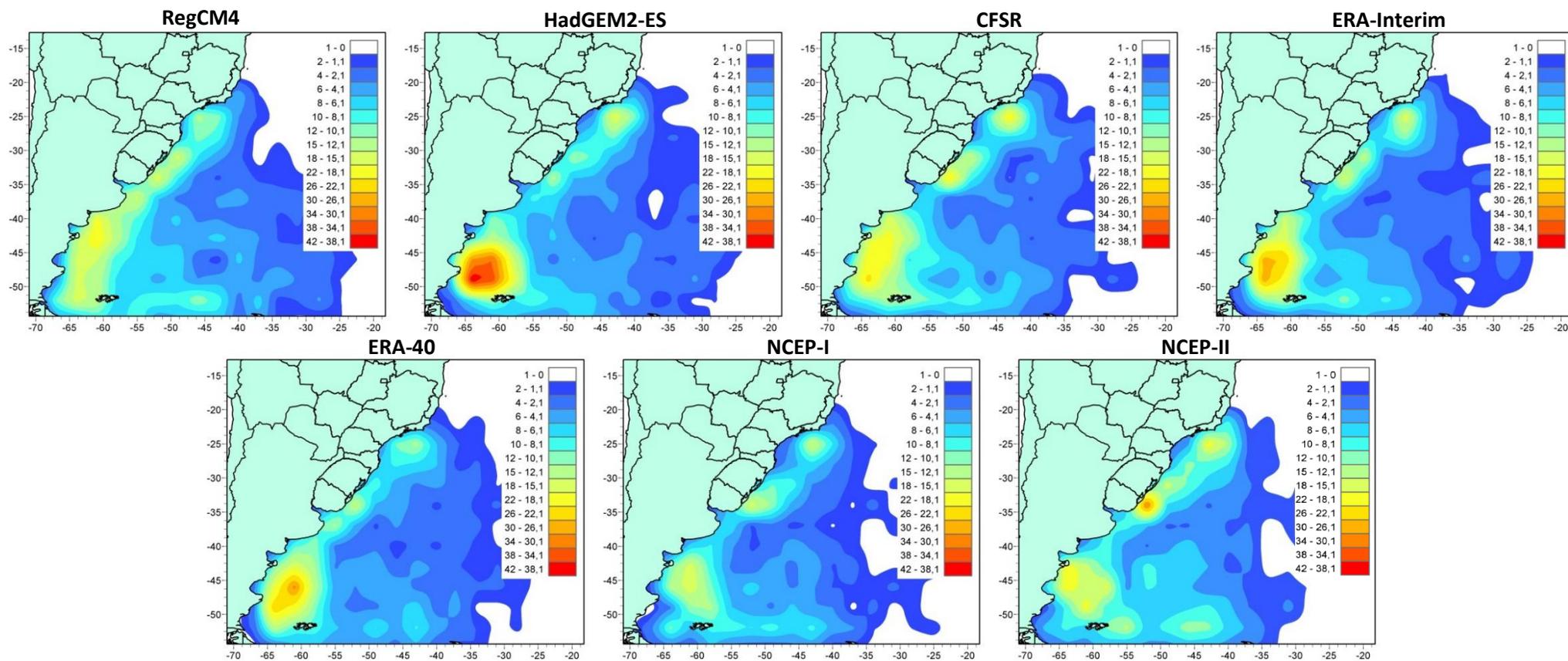


Figura 24 – Densidade ciclogénica média ($\times 10^6/\text{km}^2$) na estação de verão sobre o Atlântico Sudoeste durante o período 1979-2005, considerando todos os ciclones que se iniciaram com $\zeta \leq -1,5$.

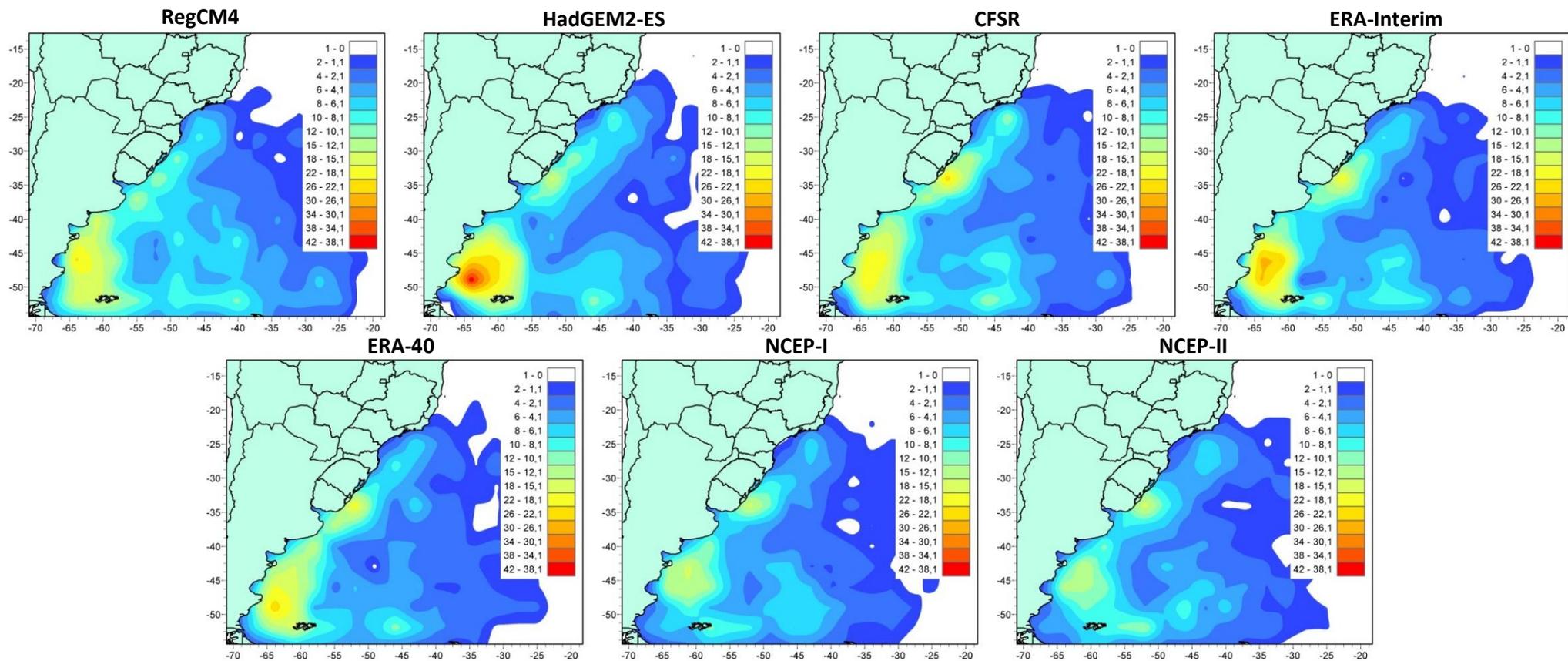


Figura 25 – Densidade ciclogénica média ($\times 10^{-6}/\text{km}^2$) na estação de outono sobre o Atlântico Sudoeste durante o período 1979-2005, considerando todos os ciclones que se iniciaram com $\zeta \leq -1,5$.

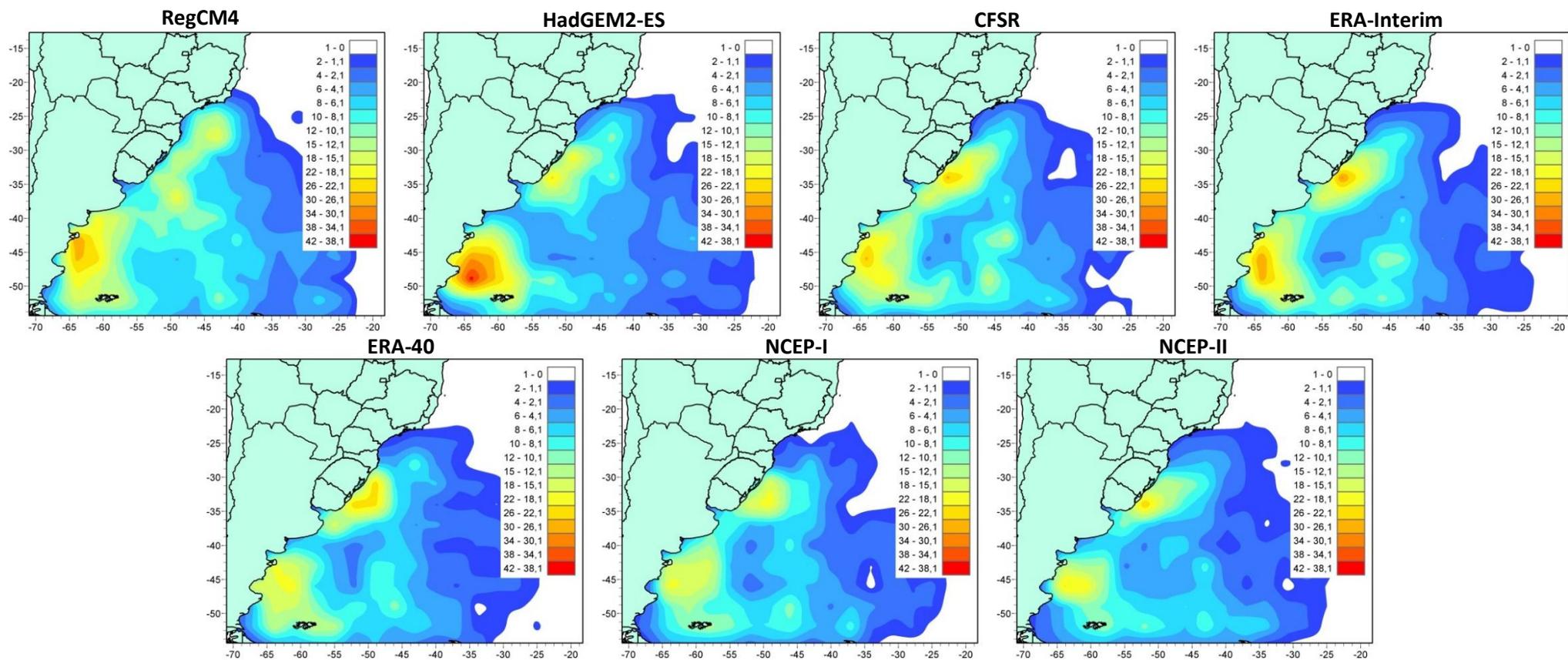


Figura 26 – Densidade ciclogénica média ($\times 10^{-6}/\text{km}^2$) na estação de inverno sobre o Atlântico Sudoeste durante o período 1979-2005, considerando todos os ciclones que se iniciaram com $\zeta \leq -1,5$.

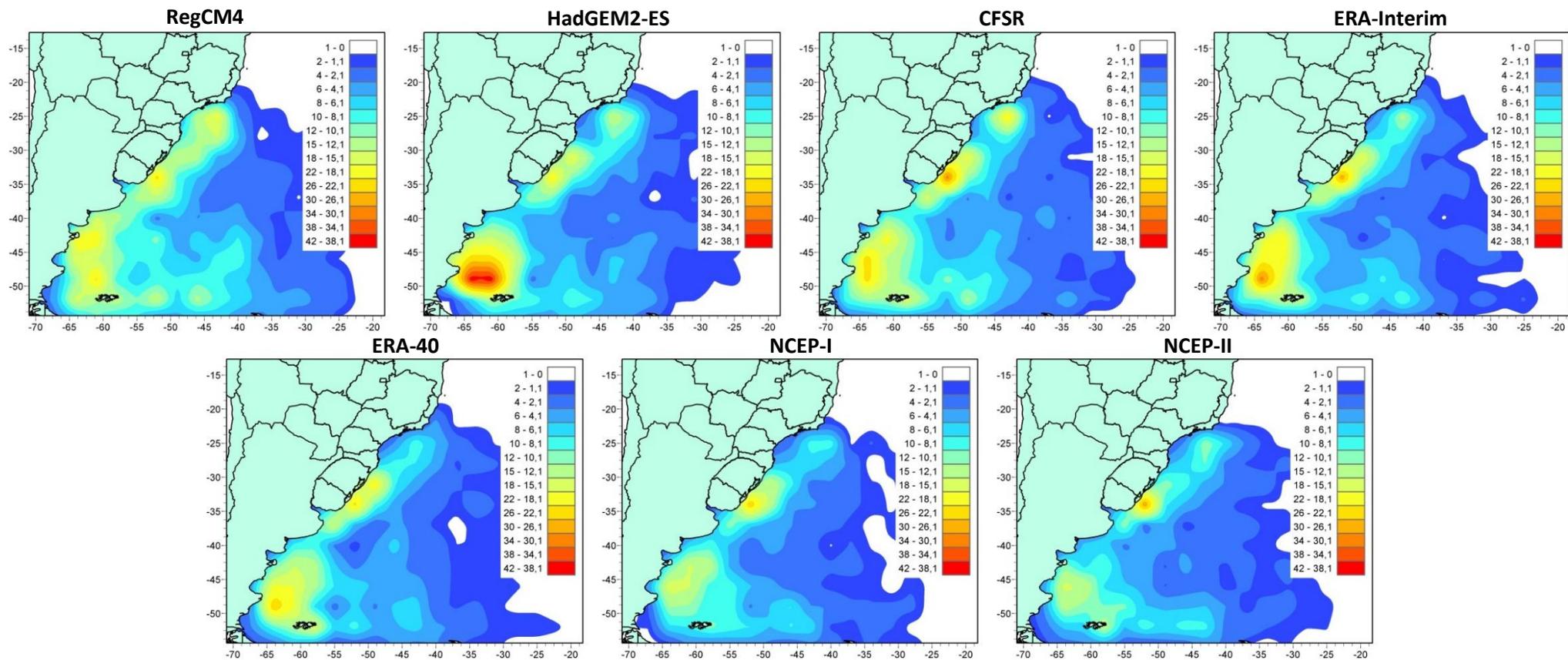


Figura 27 – Densidade ciclogénica média ($\times 10^{-6}/\text{km}^2$) na estação de primavera sobre o Atlântico Sudoeste durante o período 1979-2005, considerando todos os ciclones que se iniciaram com $\zeta \leq -1,5$.

A **Figura 28a** representa a média da densidade média anual obtida em cada uma das cinco reanálises. Quando extraída a diferença entre a densidade média anual simulada pelo RegCM4 e a média da densidade anual de todas as reanálises, nota-se que o modelo regional tendeu a superestimar a densidade de ciclones sobre a RG1 e também na porção norte da RG3. A sub-região RG2 é subestimada pelo RegCM4 em aproximadamente $2,9 \times 10^{-6}$ ciclones/km² a $24,1 \times 10^{-6}$ ciclones/km² (**Figura 28b**). Por outro lado, o HadGEM2-ES superestima em até 70×10^{-6} ciclones/km² a média de densidade das reanálises em toda a extensão da sub-região RG3 e parte da RG1, mas subestima a RG2 (**Figura 28c**). Esses resultados demonstram que ambos os modelos apresentam uma tendência semelhante na simulação das ciclogêneses sobre a RG1 e RG2, mas diferem em maior intensidade quanto à RG3.

Por fim, a **Figura 28d** indica que o RegCM4 simula uma densidade média anual de ciclogêneses muito inferior ao do HadGEM2-ES ao longo da extensão da RG3, porém superior na parcela da mesma sub-região localizada entre as latitudes 40°S e 45°S; ligeiramente inferior em relação à RG2; e consideravelmente superior sobre a RG1.

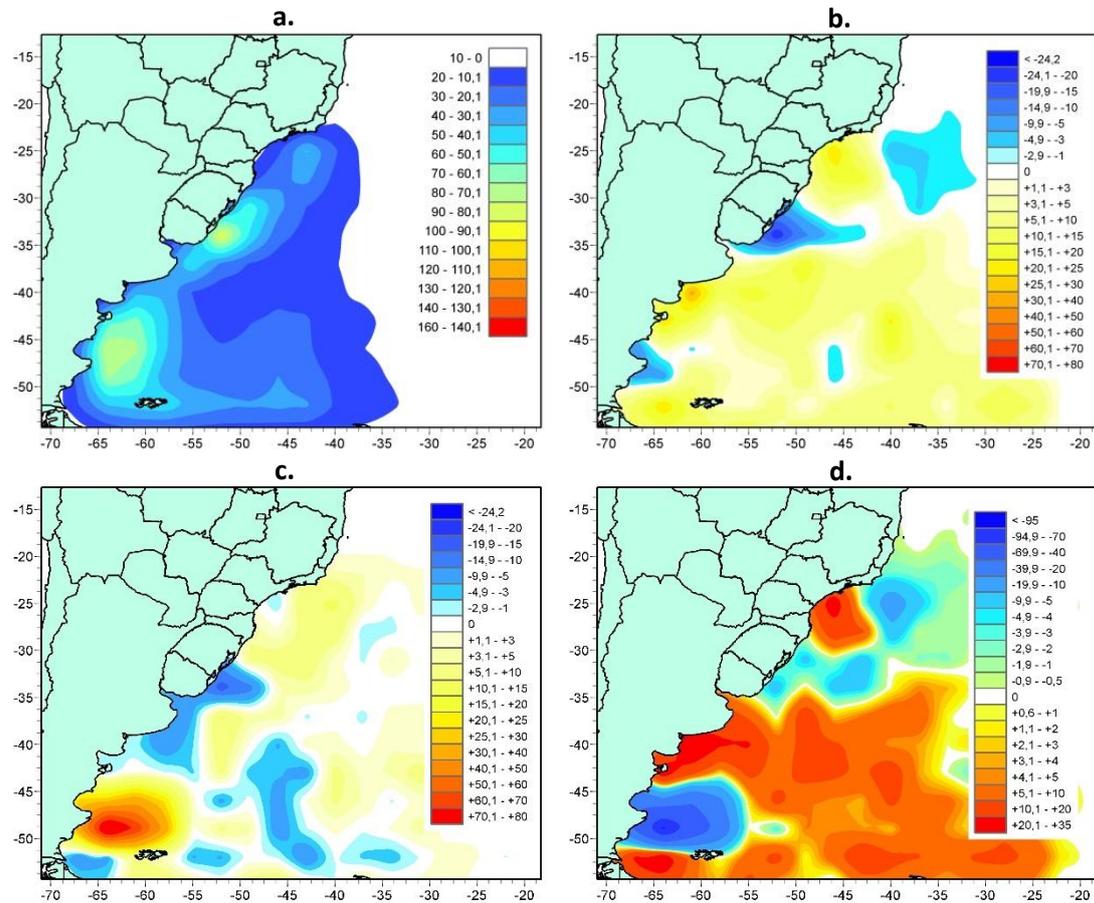


Figura 28 – a) média da densidade anual de todas as reanálises ($\times 10^{-6}/\text{km}^2$); b) diferença entre a média anual do RegCM4 com a média da densidade anual das reanálises ($\times 10^{-6}/\text{km}^2$); c) diferença entre a média anual do HadGEM2-ES com a média da densidade anual das reanálises ($\times 10^{-6}/\text{km}^2$); d) diferença entre a média anual do RegCM4 e a média anual do HadGEM2-ES ($\times 10^{-6}/\text{km}^2$).

5.1.5 As três sub-regiões no clima presente: RG1, RG2 e RG3

Nesta seção, o comportamento mensal e sazonal dos ciclones que se iniciam com $\zeta \leq -1,5$ e $\zeta \leq -2,5$, assim como as características médias desses sistemas nas três principais sub-regiões de ocorrência ao longo da costa leste da América do Sul são apresentados e discutidos. Cada sub-região foi abordada separadamente, como o disposto a seguir.

5.1.5.1 RG1: variabilidade sazonal e mensal

Considerando todos os sistemas inicialmente fracos e intensos ($\zeta \leq -1,5$), o modelo global HadGEM2-ES segue o mesmo padrão de variabilidade mensal que aqueles obtidos

por todas as reanálises utilizadas nesse estudo (**Figura 29a**). O modelo apresentou uma queda no valor da média entre janeiro e julho, seguido de uma ascensão até o início do ciclo anual, com uma queda pontual no mês de outubro. Isso faz com que as estações de maior ocorrência de ciclones na região, tanto para o modelo global quanto para as reanálises, sejam a primavera e o verão (**Figura 30a; Tabela 6**).

Já a variabilidade simulada pelo RegCM4 seguiu um padrão de declínio a partir de janeiro, concordante com às reanálises e com o modelo global durante os cinco primeiros meses (janeiro a maio), porém, ao longo dos meses de inverno o modelo superestima todos os conjuntos, duplicando a média obtida no mês de maio e se estendendo até janeiro (**Figura 29a**). Esse comportamento particular faz com que as estações de maior média no número de ciclones sejam a primavera e inverno, diferindo dos demais conjuntos (**Figura 30a**). Esses resultados concordam em parte com o encontrado por Reboita (2008), que simulou maior média nas estações de verão e primavera.

Alterando o limiar para $\zeta \leq -2,5$, a média mensal obtida pelo RegCM4 ao longo do ano diminui de 71,2% até 100%, a depender do mês em questão (**Figura 29d**). Apesar disso, o padrão de variabilidade permanece o mesmo, uma vez que ocorre a diminuição dos valores da média nos meses de fevereiro, março e abril seguida pela ascensão nos meses de inverno e uma constância até janeiro. Assim, a variabilidade sazonal permanece a mesma daquela anteriormente descrita (**Figura 30d**). Por outro lado, nota-se uma perda na definição da sazonalidade em relação ao HadGEM2-ES e às reanálises. As diferenças entre os meses e estações do ano são tão pequenas que se mostram insuficientes para se caracterizar algum período do ano como preferencial para a ocorrência dos ciclones (**Figuras 29d e 30d**). De qualquer forma, os valores absolutos mostram médias sazonais ligeiramente maiores na primavera e menores durante o inverno.

Tabela 6 – Meses e estações de maior e menor ocorrência de ciclones com origem na sub-região RG1, considerando ambos os limiares de vorticidade inicial.

RG1				
Mês			Estação	
$\zeta \leq -1,5$	Maior ocorrência	Menor ocorrência	Maior ocorrência	Menor ocorrência
RegCM4	novembro	Abril	inverno e primavera	verão e outono
HadGEM2-ES	janeiro e dezembro	Maio	verão e primavera	outono e inverno
CFSR	janeiro e dezembro	Julho	verão e primavera	outono e inverno
ERA-Interim	janeiro e dezembro	Junho	verão e primavera	outono e inverno
ERA-40	janeiro	julho e agosto	verão e primavera	outono e inverno
NCEP-I	janeiro	Julho	verão e primavera	outono e inverno
NCEP-II	janeiro	Julho	verão e primavera	outono e inverno
$\zeta \leq -2,5$	Maior ocorrência	Menor ocorrência	Maior ocorrência	Menor ocorrência
RegCM4	janeiro e novembro	Março	primavera	outono
HadGEM2-ES	março	Maio	primavera	inverno
CFSR	maio	Abril	primavera	inverno
ERA-Interim	outubro	Março	primavera	inverno
ERA-40	outubro	Março	primavera	outono
NCEP-I	outubro e dezembro	Abril	verão e primavera	inverno
NCEP-II	janeiro	março e abril	primavera	outono

5.1.5.2 RG1: características médias

A duração dos sistemas com origem na RG1 seguiu o mesmo padrão obtido para todo o domínio de análise do Atlântico Sudoeste: maior frequência relativa de ciclones com ciclo de vida de 1 a 2 dias, seguido de um declínio constante na porcentagem das classes de maior duração (**Figura 31a**). No entanto, a RG1 se mostrou uma área com maior contribuição dos sistemas que perduram por até 5 a 6 dias, se comparada ao domínio total.

Cerca de 61,3% a 66,1% de todos os ciclones identificados pelas reanálises e pelo RegCM4 tiveram ciclo de vida igual ou superior a 2 dias, enquanto que o HadGEM2-ES elevou essa porcentagem para até 75% dos seus ciclones simulados. Vale ressaltar ainda que, apesar de o modelo global ter sido o conjunto que apresentou a menor frequência relativa de sistemas com duração de até 3 dias, foi o que mais contribuiu com sistemas durando acima de 4 dias, tendo, inclusive, atingido a alta porcentagem de 4,5% com ciclo de vida de 9 a 10 dias.

Assim como a duração, as distâncias percorridas pelos ciclones apresentaram uma disposição das frequências ao longo dos intervalos de classes levemente mais distribuída ao longo dos valores extremos, quando comparado à mesma estatística aplicada ao domínio geral de análise (**Figura 32a**).

Em geral, aproximadamente 40% a 60% de todos os sistemas, entre reanálises e modelos, apresentaram uma distância percorrida de 1500 a 3000 km entre a gênese e a ciclólise do ciclone, com maior contribuição (17,1% a 26,5%) daqueles que percorreram distâncias entre 2000 a 2500 km.

Em relação à velocidade média, se observou que as maiores frequências relativas foram deslocadas uma classe para a esquerda quando comparadas à distribuição da variável no domínio geral de atuação dos ciclones (**Figura 33a**). Dessa forma, a maior parte dos sistemas que se originam dentro dos limites da RG1 apresentaram velocidade de 5 a 15 m/s, com maior contribuição (37,1% a 43,0%) daqueles que variaram de 5 a 10 m/s. Isso significa que os ciclones originários na sub-região RG1, simulados e observados por todos os conjuntos de dados, são, em sua grande maioria, mais lentos que a média geral de todo o domínio sudoeste do Atlântico Sul.

Entre 70% a 90% dos ciclones da RG1 tiveram como característica serem inicialmente fracos, onde a vorticidade relativa na primeira posição do sistema não atinge o valor de $-2,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ (**Figura 34a**). O modelo RegCM4 foi o único dos conjuntos em que há uma contribuição um pouco maior de ciclones inicialmente mais intensos, porém, bastante distante do padrão de distribuição da vorticidade alcançado na análise de todo o domínio de estudo. De acordo com o histograma apresentado, pode ser considerada nula a existência de sistemas cujas gêneses se caracterizem por valores de vorticidades menores que $-5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$.

Em relação a vorticidade média ao longo de todo o ciclo de vida, a **Figura 35a** mostra uma distribuição de frequências com maior contribuição dos ciclones com vorticidade média total entre $-2 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ e $-3,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$. Ou seja, além de serem mais fracos na primeira posição, quando comparados aos sistemas do domínio total do estudo, os ciclones com origem na RG1 apresentam menor vorticidade média total, concordando com o encontrado por Reboita (2008).

5.1.5.3 RG2: variabilidade sazonal e mensal

Na RG2, região próxima a desembocadura do rio da Prata, o ciclo anual simulado pelo HadGEM2-ES e aqueles observados nas reanálises sobre esta região mostraram uma sazonalidade marcada pela predominância de ciclones ($\zeta \leq -1,5$) na estação de inverno e secundariamente durante a primavera, sendo julho o mês de maior ocorrência em todos esses conjuntos (**Figuras 29b e 30b; Tabela 7**). Já o RegCM4 apresentou uma variabilidade um pouco menos proeminente, com um pico máximo durante o mês de outubro e tendo a estação de primavera como a mais favorável.

Analisando apenas os sistemas inicialmente intensos ($\zeta \leq -2,5$), percebe-se que a sazonalidade e o padrão de variabilidade mensal se mantém praticamente o mesmo tanto para os modelos quanto para as reanálises, apresentando as estações de inverno e primavera como períodos de valores máximos da ocorrência de ciclones (**Figuras 29e e 30e**). Reboita (2008) também encontrou a estação de primavera como aquela com a maior média sazonal simulada pelo RegCM3, em ambos os limiares de vortacidade. No entanto, o inverno apresentou a menor média pelo modelo regional, já pela reanálise NCEP-II, a autora obteve a estação de inverno como a estação mais favorável.

Tabela 7 – Meses e estações de maior e menor ocorrência de ciclones com origem na sub-região RG2, considerando ambos os limiares de vortacidade inicial.

RG2				
Mês			Estação	
$\zeta \leq -1,5$	Maior ocorrência	Menor ocorrência	Maior ocorrência	Menor ocorrência
RegCM4	outubro	março	inverno e primavera	verão e outono
HadGEM2-ES	julho e outubro	março	inverno e primavera	verão e outono
CFSR	julho	fevereiro	inverno e primavera	verão e outono
ERA-Interim	julho	janeiro e fevereiro	inverno e primavera	verão e outono
ERA-40	julho	janeiro	inverno e primavera	verão e outono
NCEP-I	julho	março	inverno e primavera	verão e outono
NCEP-II	julho	março	inverno e primavera	verão e outono
$\zeta \leq -2,5$	Maior ocorrência	Mocorrência	Maior ocorrência	Menor ocorrência
RegCM4	julho, outubro e novembro	abril	inverno e primavera	verão e outono
HadGEM2-ES	julho, outubro e novembro	fevereiro	inverno e primavera	verão e outono
CFSR	julho	janeiro e março	inverno e primavera	verão e outono
ERA-Interim	julho	janeiro	inverno e primavera	verão e outono
ERA-40	julho	janeiro e março	inverno e primavera	verão e outono
NCEP-I	julho	janeiro e março	inverno e primavera	verão e outono
NCEP-II	julho	março	inverno e primavera	verão e outono

5.1.5.4 RG2: características médias

As frequências relativas da duração dos ciclones com origem na RG2 se distribuem de maneira menos concentrada (**Figura 31b**) que aquelas encontradas para todo o domínio do estudo. Entre 34,0% e 42,8% dos sistemas encontrados apresentaram ciclo de vida de até 2 dias, consideravelmente inferior à porcentagem de 51,2% a 58,0% obtida quando se considera os ciclones no domínio total ao longo do Atlântico Sudoeste. A única exceção para ambos os casos em relação à essa variação de frequências foi obtida pelo HadGEM2-ES, que apresentou menor quantidade de ciclones caracterizados por essa duração.

As distâncias percorridas mais frequentes variaram entre 2500 e 3000 km, chegando a ultrapassar 35% do total de ciclones com origem na área (**Figura 32b**). Esse aumento na contribuição relativa da classe em relação ao obtido no domínio geral gerou uma redução, por consequência, na frequência relativa tanto dos ciclones que percorreram entre 500 e 2500 km (13,6% a 20,5%) quanto daqueles que alcançaram distâncias entre 3000 a 3500 km (aproximadamente 20%) ao longo do ciclo de vida. De qualquer maneira, este padrão caracterizado por ser favorável a ocorrência de ciclones com média duração é semelhante ao observado na área total do estudo.

A velocidade média dos ciclones com origem nos domínios da RG2 seguiu a mesma distribuição apresentada ao longo do domínio total, apresentando como única diferença relevante a menor frequência relativa de ciclones que atingem velocidade média entre 15 e 20 m/s (**Figura 33b**). De forma geral, mais de 60% de todos os ciclones apresentaram uma velocidade média oscilando entre 10 e 20 m/s. Além disso, uma observação interessante é a de que o modelo HadGEM2-ES mostrou maior tendência em simular ciclones de baixa velocidade (5 a 15 m/s) do que o RegCM4 e demais conjuntos. No entanto, aparentou menor capacidade na simulação de ciclones com velocidade média mais alta (≥ 15 m/s).

Em relação à vorticidade relativa inicial dos sistemas, a RG2 apresentou menor porcentagem de ciclones inicialmente fracos ($-1,5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ a $2,49 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$; **Figura 34b**) em comparação com o domínio geral. De qualquer forma, cerca de 45% a 55% de todos os ciclones na RG2 apresentaram vorticidade relativa inicial entre $-1,5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ a $-2,5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, isso significa que aproximadamente metade de todos os ciclones originários na área

possuem gênese com vorticidade relativa mais negativa que $-2,5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$. Focando apenas nos ciclones simulados pelo RegCM4 dentro da sub-região RG2, é possível observar que o modelo simulou um número menor de sistemas que se iniciaram com vorticidade de $-3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ a $-6 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$, quando comparados com o domínio total do estudo, no entanto, a porcentagem cresce no intervalo de $-2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ a $-1,5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$.

Quanto à vorticidade média total dos sistemas, a RG2 apresentou um comportamento praticamente idêntico ao geral na distribuição de frequências dos ciclones (**Figura 35b**). De modo geral, ambos os modelos conseguiram reproduzir o padrão obtido pelas reanálises.

5.1.5.5 RG3: variabilidade sazonal e mensal

A sub-região RG3, adjacente à costa leste da Argentina, foi a que apresentou a menor diferença nos valores médios entre as estações, ou seja, aquela de sazonalidade menos definida. No entanto, cabe ressaltar que foi a região em que as médias mensais e, conseqüentemente, as médias sazonais se mostraram mais elevadas ao longo do ciclo anual (**Figuras 29c e 30c; Tabela 8**).

O modelo RegCM4 foi o único dos conjuntos de dados em que foi observado uma preferência mais nítida dos ciclones pela estação de inverno, apesar de todos eles sustentarem em menor grau tal padrão. Os dois limiares de vorticidade relativa inicial indicaram a preferência pelo inverno. Reboita (2008) encontrou esse mesmo padrão apenas quando considerado somente os sistemas inicialmente intensos, de outro modo não há uma variabilidade sazonal bem definida.

O HadGEM2-ES superestimou todas as reanálises ao longo dos meses, atingindo uma superestimação mínima de 8,7% no mês de março em relação ao ERA-Interim e máxima de 180,4% em fevereiro em relação às reanálises NCEP-I e NCEP-II.

Tabela 8 – Meses e estações de maior e menor ocorrência de ciclones com origem na sub-região RG3, considerando ambos os limiares de vorticidade inicial.

RG3				
Mês			Estação	
$\zeta \leq -1,5$	Maior ocorrência	Menor ocorrência	Maior ocorrência	Menor ocorrência
RegCM4	junho	março	Inverno	verão
HadGEM2-ES	junho	março	Inverno	verão e outono
CFSR	junho	abril	Inverno	verão e outono
ERA-Interim	janeiro e junho	fevereiro	Inverno	outono e primavera
ERA-40	julho e dezembro	abril	Inverno	outono
NCEP-I	julho	fevereiro	Inverno	verão e outono
NCEP-II	julho	fevereiro	Inverno	outono
$\zeta \leq -2,5$	maior ocorrência	menor ocorrência	maior ocorrência	menor ocorrência
RegCM4	julho e junho	março e dezembro	Inverno	verão e outono
HadGEM2-ES	junho	março e dezembro	Inverno	primavera
CFSR	junho	novembro e fevereiro	Inverno	outono
ERA-Interim	junho	janeiro e fevereiro	Inverno	verão
ERA-40	junho	janeiro	Inverno	verão
NCEP-I	junho	fevereiro	Inverno	verão
NCEP-II	junho	março	Inverno	outono

5.1.5.6 RG3: características médias

O comportamento dos ciclones com gênese na sub-região RG3 mostrou uma predominância de sistemas com duração de até 2 dias (**Figura 31c**) e apontou seguir o mesmo padrão encontrado para os ciclones no domínio total do Atlântico Sudoeste. Um ciclo de vida de 2 a 3 dias foi característica em cerca de aproximadamente 30% dos sistemas, porcentagem compartilhada entre ambos os modelos e pelas reanálises. No mais, um valor restante próximo de 10% apresentaram ciclo de vida maior que 4 dias.

Os intervalos de distâncias percorridas mais frequentes foram os de 2500 a 3500 km, perfazendo aproximadamente 40% do total (**Figura 32c**). Esse resultado contrasta com os encontrados ao longo do domínio geral, onde ciclones com percursos totais de 1500 a 2000 km e 2500 a 3000 km foram mais presentes.

Outra informação relevante extraída da distribuição de frequências é a de que o modelo regional superestimou todas as reanálises na simulação de sistemas com

distâncias percorridas maiores que 5000 km. Fato esse não reproduzido pelo modelo global.

Mais de 65% dos ciclones rastreados nos modelos e reanálises atingiram velocidade média de 10 a 20 m/s (**Figura 33c**). Secundariamente, ciclones com 20 a 25 m/s de velocidade média perfizeram cerca de 10,6% a 19,6% da frequência total, variando entre os conjuntos de dados. Essas estatísticas elucidam um pequeno aumento na contribuição de sistemas com velocidade média maior que 10 m/s, em relação ao encontrado em todo o Atlântico Sudoeste.

Quanto à vorticidade relativa inicial dos sistemas, houve uma diminuição da porcentagem de ciclones que se originaram com vorticidade de $-3,5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ a $-6 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ na simulação do RegCM4, em comparação com o domínio total (**Figura 34c**). Além disso, o NCEP-I apresentou uma alta diferença na frequência relativa de ciclones com $-1,5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ a $2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ de vorticidade inicial comparado aos demais conjuntos, no entanto, a reanálise compensou com um salto na porcentagem dos sistemas caracterizados com vorticidade entre $-3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ a $-7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$. Em geral, ciclones inicialmente fracos (entre $-1,5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ e $-2,49 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) compuseram cerca de 50 a 70% de todas as ocorrências na RG3, enquanto que a porcentagem restante foi composta de sistemas de gênese mais intensa ($\leq -2,5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$).

O comportamento da vorticidade média relativa total não apresentou nenhuma mudança notável em relação ao domínio total de análise, evidenciando maior porcentagem de ciclones cuja vorticidade varia de $-4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ a $-5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ (**Figura 35c**).

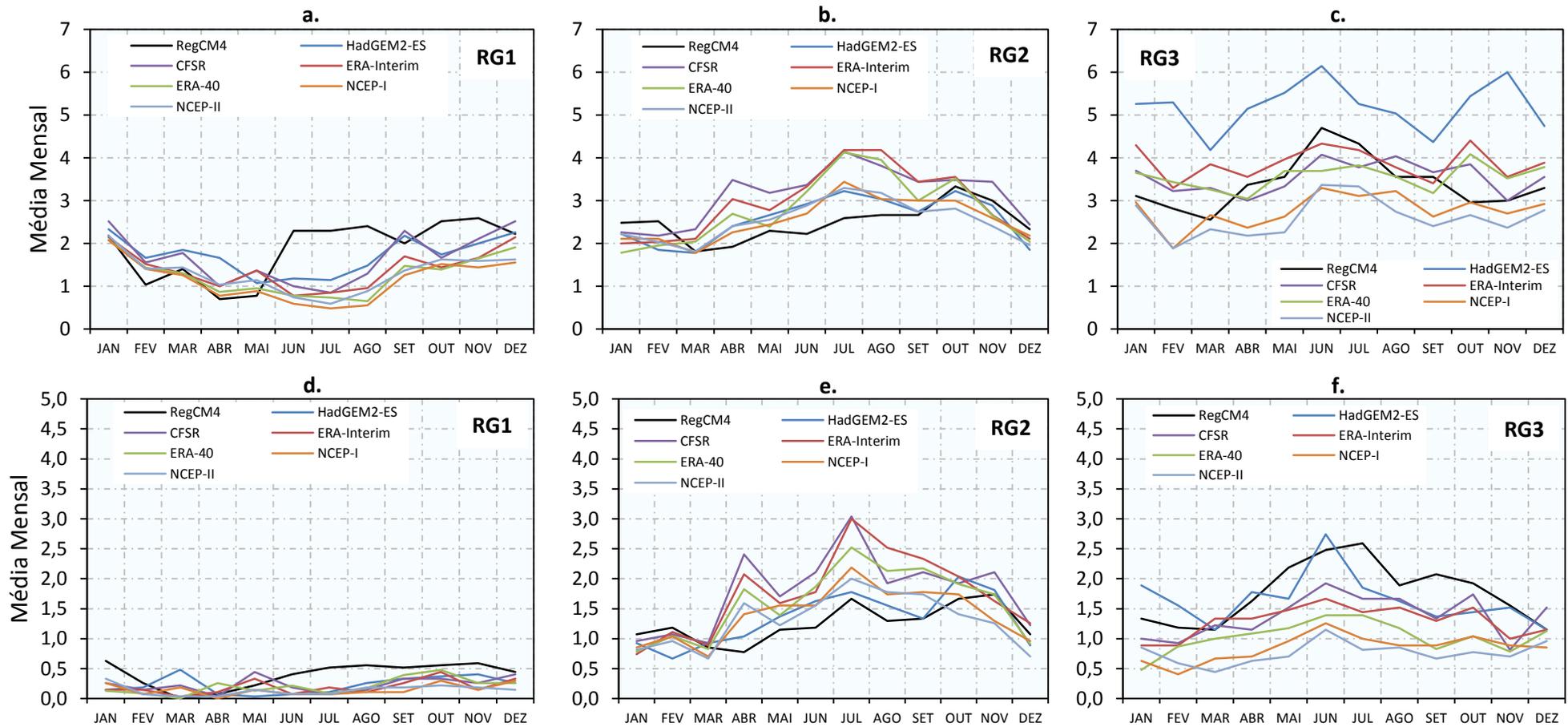


Figura 29 – A linha superior representa as médias mensais de ciclones com origem nas três sub-regiões no período de 1979-2005, considerando todos os sistemas que se iniciam com $\zeta \leq -1,5$. A linha inferior representa o mesmo, porém considerando apenas os sistemas que se iniciam com $\zeta \leq -2,5$.

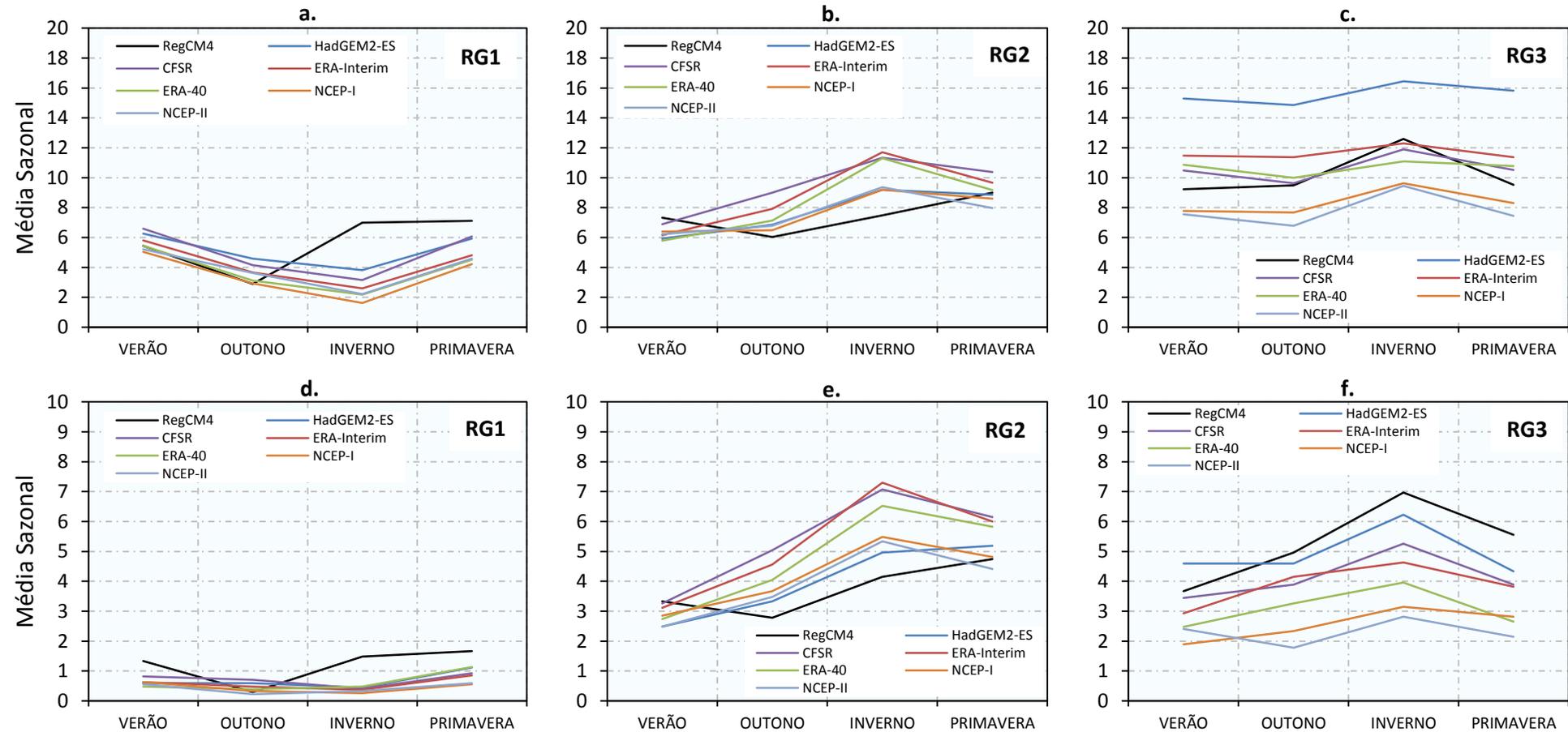


Figura 30 – A linha superior representa as médias sazonais de ciclones com origem nas três sub-regiões no período de 1979-2005, considerando todos os sistemas que se iniciam com $\zeta \leq -1,5$. A linha inferior representa o mesmo, porém considerando apenas os sistemas que se iniciam com $\zeta \leq -2,5$.

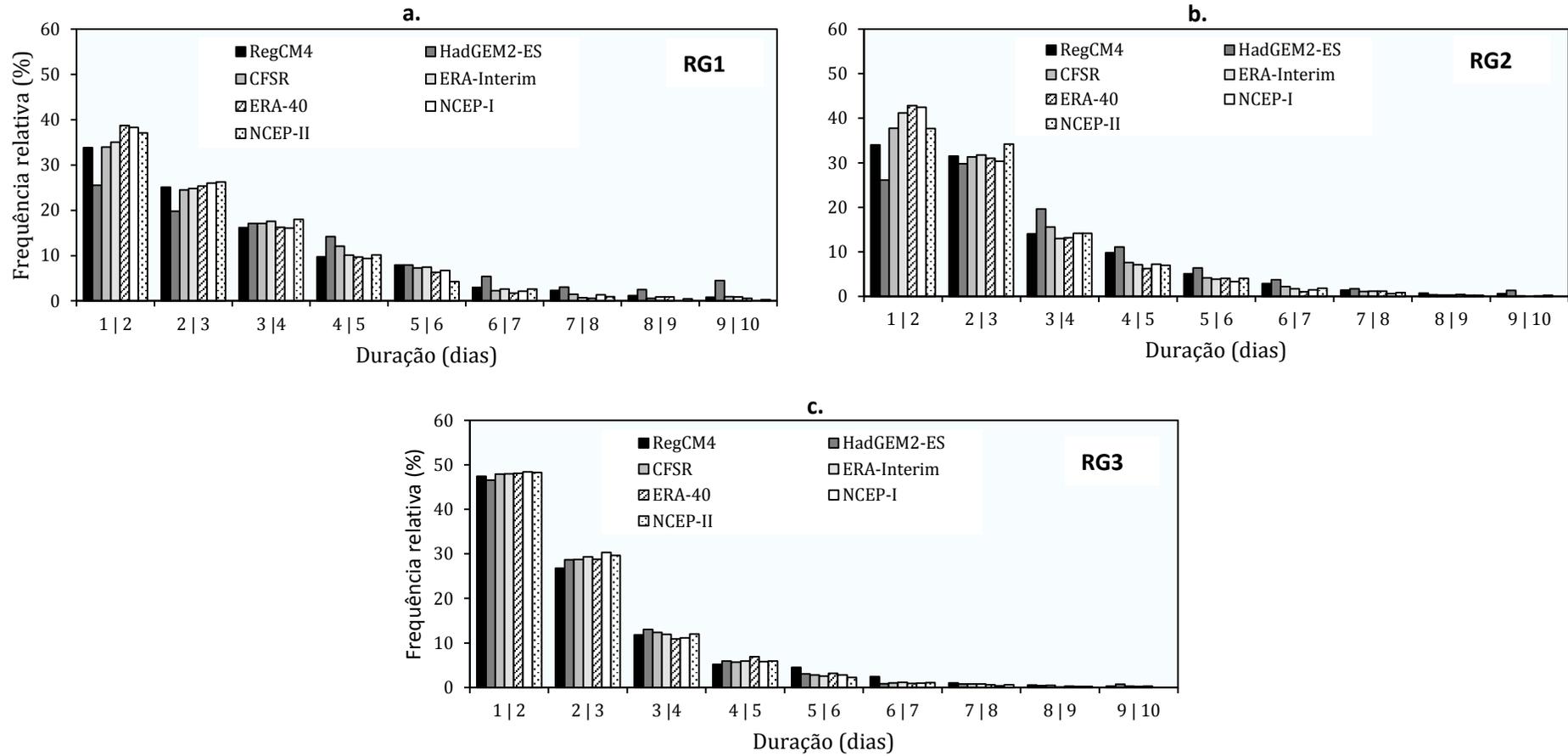


Figura 31 – Frequência relativa (%) dos ciclones quanto à duração (dias) nas três sub-regiões durante o período de 1979-2005, considerando todos os sistemas que se iniciaram com $\zeta \leq -1,5$.

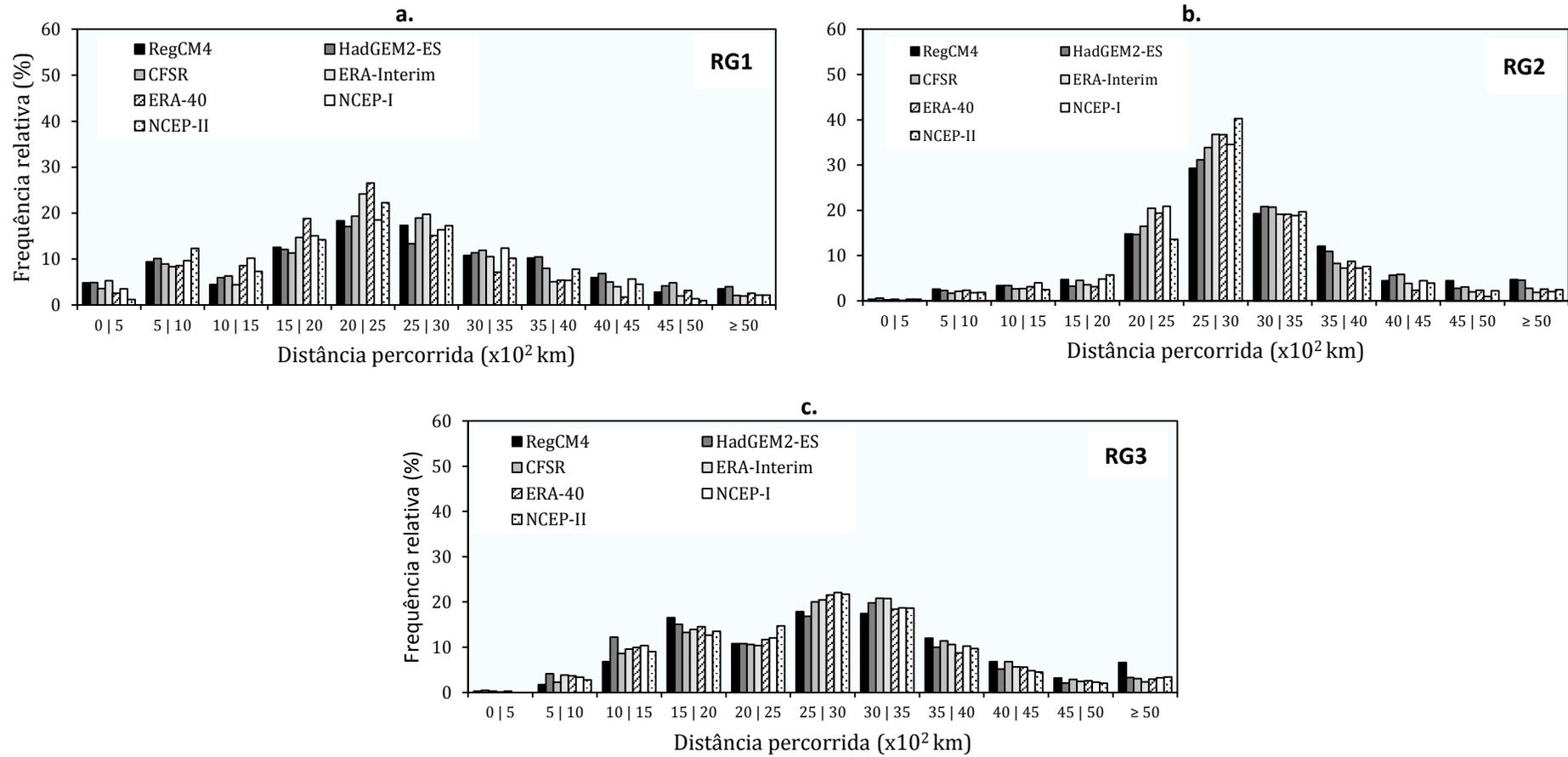


Figura 32 – Frequência relativa (%) dos ciclones quanto à distância percorrida (x10² km) nas três sub-regiões durante o período de 1979-2005, considerando todos os sistemas que se iniciaram com $\zeta \leq -1,5$.

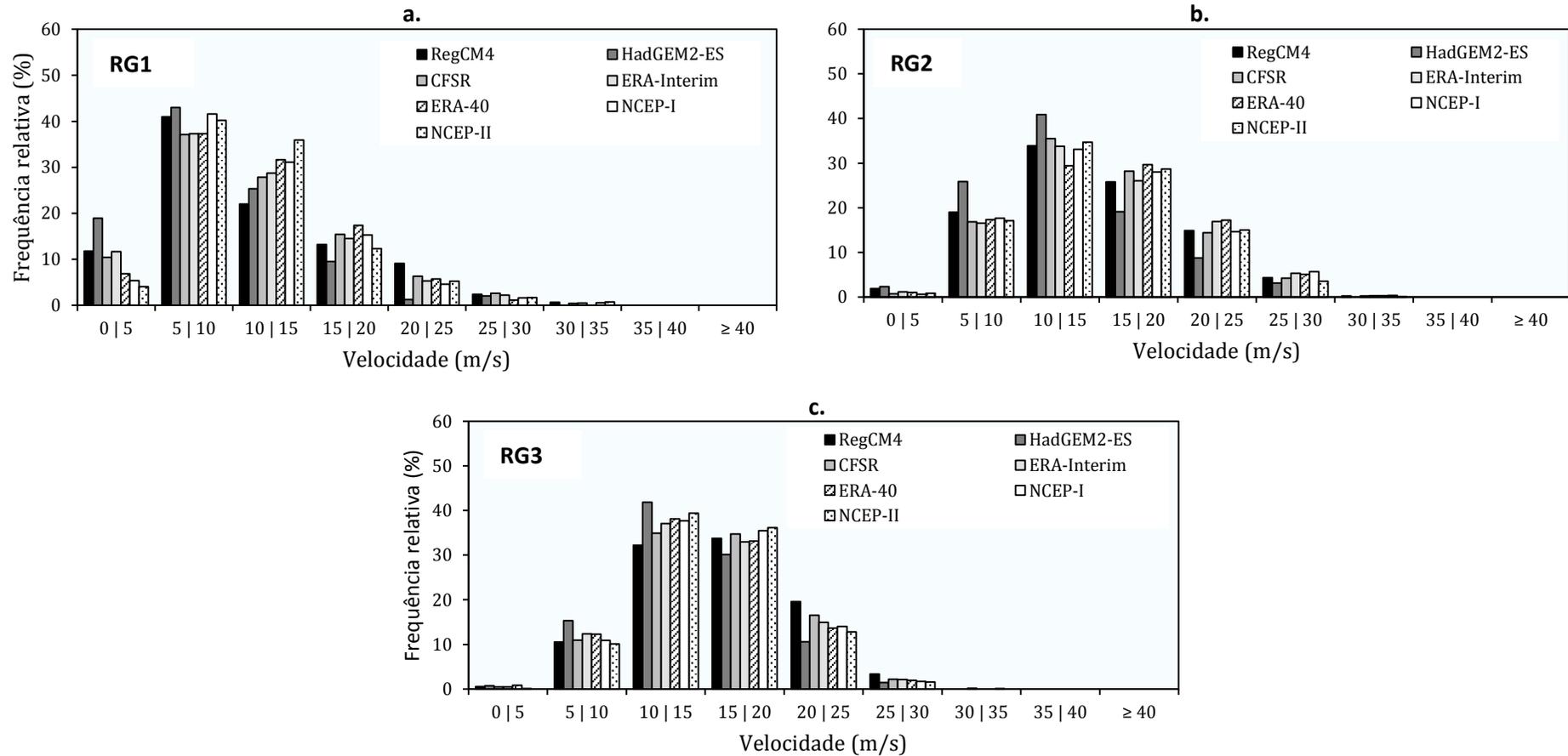


Figura 33 – Frequência relativa (%) dos ciclones quanto à velocidade média (m/s) nas três sub-regiões durante o período de 1979-2005, considerando todos os sistemas que se iniciaram com $\zeta \leq -1,5$.

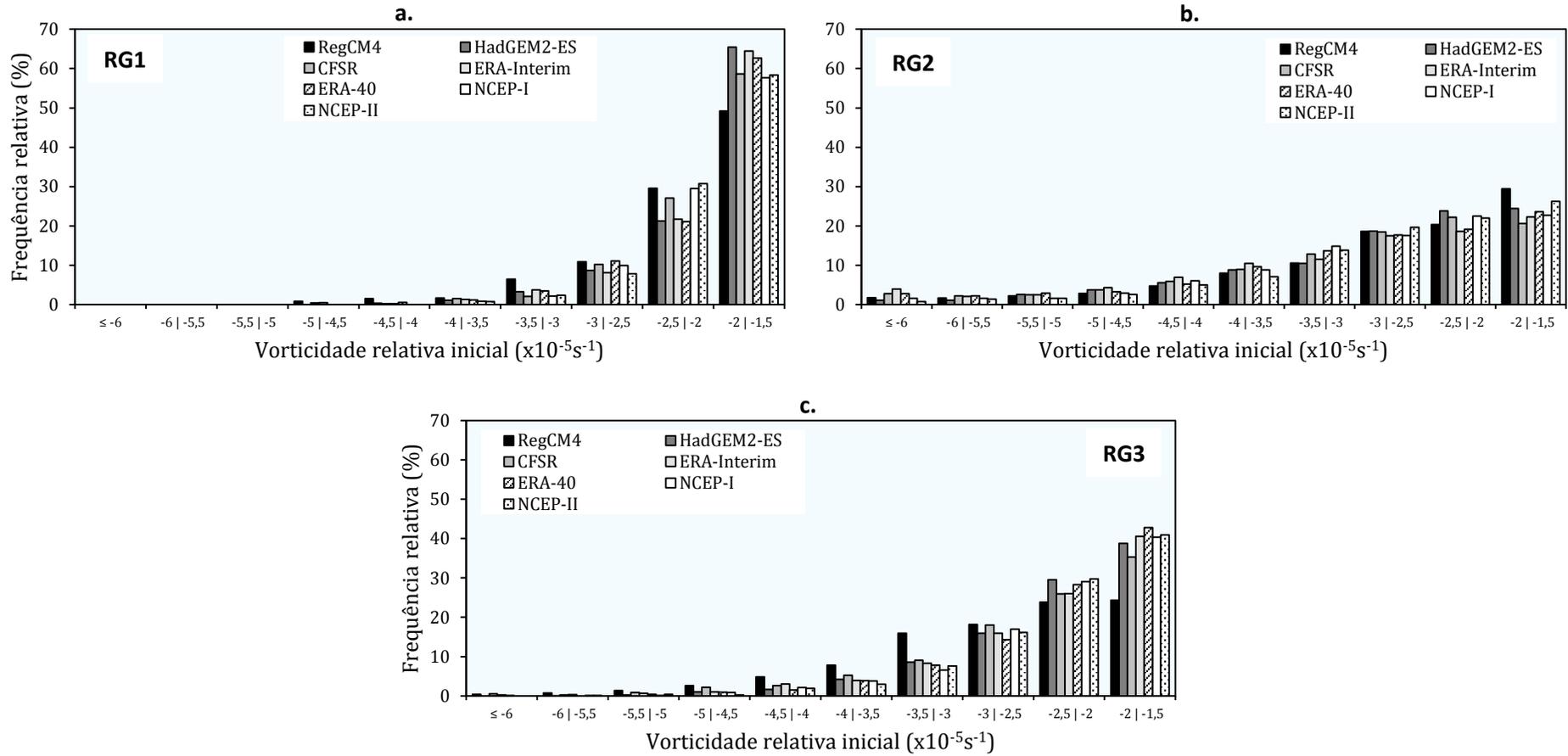


Figura 34 – Frequência relativa (%) dos ciclones quanto à vorticidade relativa inicial ($\times 10^{-5} s^{-1}$) nas três sub-regiões durante o período de 1979-2005, considerando todos os sistemas que se iniciaram com $\zeta \leq -1,5$.

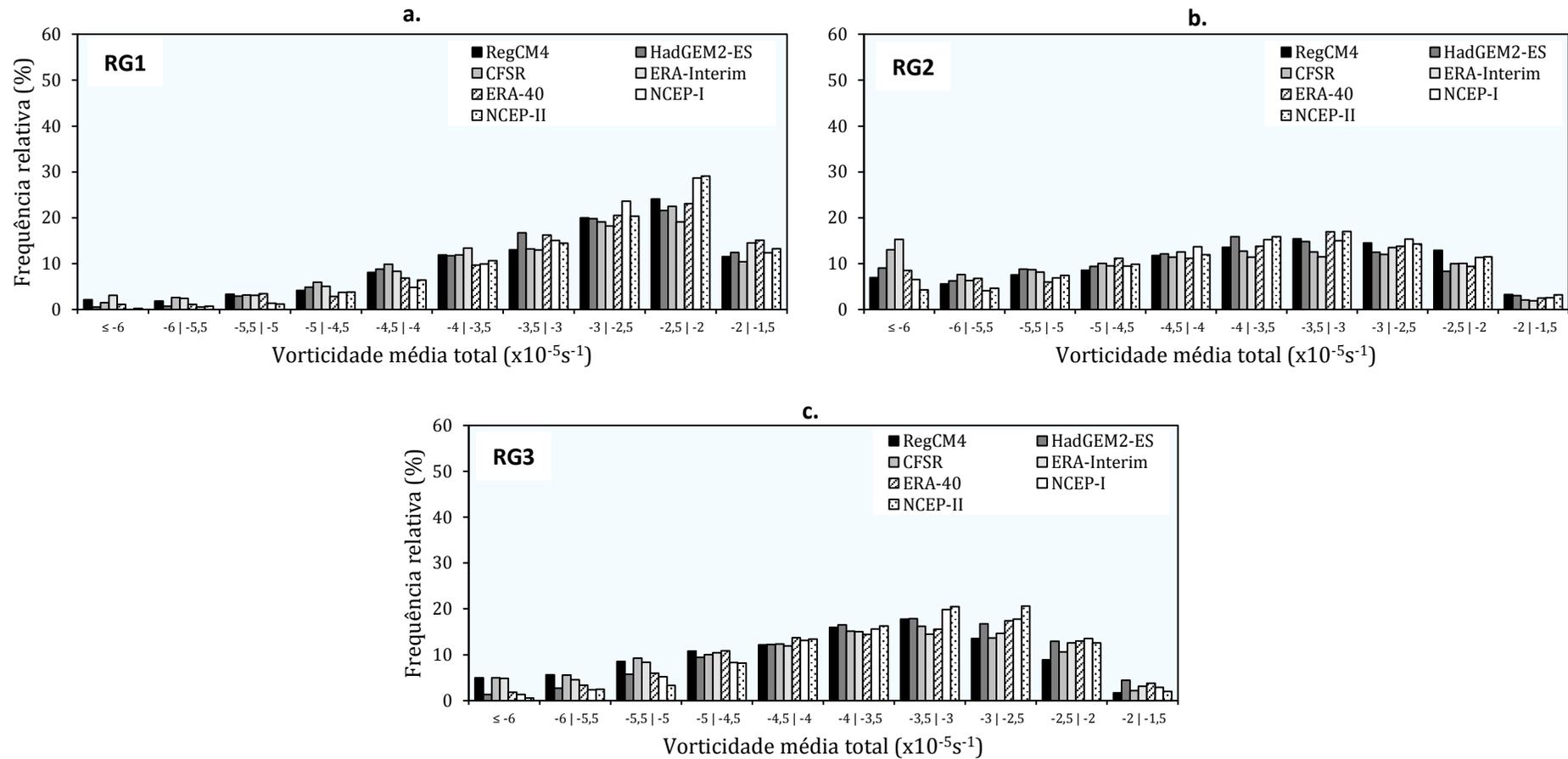


Figura 35 – Frequência relativa (%) dos ciclones quanto à vorticidade média total ($\times 10^{-5} \text{s}^{-1}$) nas três sub-regiões durante o período de 1979-2005, considerando todos os sistemas que se iniciaram com $\zeta \leq -1,5$.

Em um resumo geral, a RG3 apresentou as maiores porcentagens de ciclones com duração de 1 a 2 dias, ou seja, mais efêmeros, em comparação com as demais sub-regiões. A RG2 foi a região com a menor variabilidade quanto à distância percorrida dos ciclones, apresentando a maior concentração de sistemas que percorreram entre 2000 a 3500 km entre as regiões. A maior porcentagem de ciclones com curta distância percorrida (entre a mínima distância encontrada e 1500 km) ocorreu na RG1, sendo cerca de 20%

Os maiores valores de velocidade foram mais frequentes nos ciclones originários da RG3, enquanto que os menores na RG1. Esse fato ajuda a esclarecer as maiores porcentagens de ciclones da RG3 com grandes distâncias percorridas, mesmo sendo caracterizados, quase majoritariamente, por durações baixas.

A maior porcentagem de ciclones inicialmente intensos ($\zeta \leq -2,5$) ocorreu na RG2, caracterizando quase 60% do total de sistemas. A RG1 deu origem aos sistemas inicialmente mais fracos, seguida de uma condição intermediária, em comparação com estas duas regiões, na RG3.

Por fim, esse mesmo padrão hierárquico entre RG1, RG2 e RG3 foi observado quanto à vorticidade média total. Tal comportamento pode ser explicado pelo fato de que ciclones inicialmente mais intensos atingem valores mais negativos de vorticidade ao longo do ciclo de vida do que aqueles inicialmente fracos, uma vez que já partem de valores inicialmente mais negativos, resultando em maior frequência de ciclones com vorticidade média total mais negativa. Não obstante, o mesmo ocorre para a situação contrária.

5.2 Clima Futuro: Ciclones no Atlântico Sudoeste

Nessa sessão serão discutidas a climatologia e características dos ciclones no Atlântico Sudoeste e nas três sub-regiões em dois períodos futuros (2020-2050 e 2070-2098), obtidas através das projeções do modelo regional RegCM4 e do HadGEM2-ES, ambos considerando o cenário de forçante radiativa RCP8.5. Serão também abordadas, para os mesmos períodos, a densidade anual e sazonal das ciclogêneses, assim como a ocorrência percentual projetada destas por bandas de latitude.

5.2.1 Variabilidade interanual: futuro próximo (2020-2050)

Considerando ambos os ciclones inicialmente intensos e fracos ($\zeta \leq -1,5$), o RegCM4 projeta para o período de 2020-2050 uma média de $264,2 \pm 16,1$ ciclones por ano (**Tabela 9**), cerca de 6,5% inferior à média obtida no período 1979-2005. Já o HadGEM2-ES global projeta para o mesmo período uma média de $250,3 \pm 12,0$ ciclones anuais, sendo 3,6% menor que a média do presente.

Aplicando o limiar de $\zeta \leq -2,5$, o RegCM4 apresenta média anual de $146,0 \pm 12,8$ ciclones, cerca de 9,3% menor que a obtida pelo período presente, enquanto que o HadGEM2-ES tem como média $107,4 \pm 9,1$ ciclones anuais, 6,3% inferior à média do presente (**Tabela 9**). Assim, ambos os modelos e limiares de vorticidade relativa indicam uma redução no número médio de ciclones por ano durante o período de 2020-2050, sob o cenário RCP8.5, sendo que, para os ciclones inicialmente intensos, projetam-se as maiores quedas na média anual.

5.2.2 Variabilidade interanual: futuro distante (2070-2098)

Para o período de 2070-2098, o RegCM4 projeta uma média de $250,4 \pm 19,9$ ciclones por ano, englobando sistemas inicialmente fracos e intensos (**Tabela 9**). Esse valor equivale a 11,4% menos que a média do período presente simulado pelo mesmo modelo. Já o HadGEM2-ES apresenta média anual de $232,6 \pm 14,9$ ciclones, valor 10,4% menor que a média do presente.

Analisando as mesmas estatísticas com base no limiar $\zeta \leq -2,5$, o RegCM4 apresentou uma média anual de $134,1 \pm 14,4$ ciclones, cerca de 16,7% menor que no presente, enquanto que o HadGEM2-ES atingiu média de $102,2 \pm 9,3$ ciclones anuais, um valor 10,9% inferior à média do presente (**Tabela 9**).

Tabela 9 – Médias anuais de ciclones ao longo dos três períodos sobre o Atlântico Sudoeste e os respectivos desvios padrões.

Período	Média anual $\zeta \leq -1,5$	Média anual $\zeta \leq -2,5$
RegCM4 1979-2005	282,5 ± 19,4	160,9 ± 15,9
RegCM4 2020-2050 RCP8.5	264,2 ± 16,1	146,0 ± 12,8
RegCM4 2070-2098 RCP8.5	250,4 ± 19,9	134,1 ± 14,4
HadGEM2-ES 1979-2005	259,7 ± 19,0	114,7 ± 12,0
HadGEM2-ES 2020-2050 RCP8.5	250,3 ± 12,0	107,4 ± 9,1
HadGEM2-ES 2070-2098 RCP8.5	232,6 ± 14,9	102,2 ± 9,1

Nos dois períodos futuros se observa uma maior sensibilidade do modelo regional RegCM4 quanto à diminuição da frequência de ciclones sobre o Atlântico Sudoeste, quando comparado ao modelo global. As **Figuras 36 e 37** permitem visualizar a tendência negativa da frequência de ciclones que se iniciam com $\zeta \leq -1,5$ sobre o Atlântico Sudoeste, ao longo de todo o período de 1979 a 2098. O RegCM4 projeta um declínio mais acentuado (coeficiente angular de -0,37, para todo o período) que o HadGEM2-ES (coeficiente angular de -0,29), confirmando a maior sensibilidade do modelo regional frente aos cenários de mudanças climáticas no que tange a atividade de ciclones.

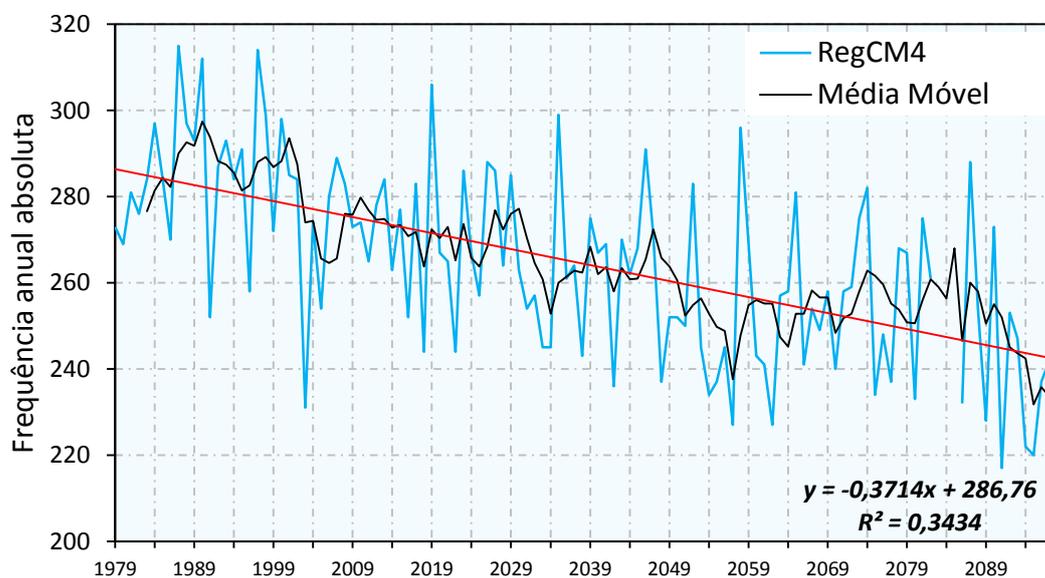


Figura 36 – Série temporal da frequência anual de ciclones entre 1979 e 2098 no RegCM4, considerando todos os sistemas que se iniciam com $\zeta \leq -1,5$. A linha preta representa a média móvel de 5 anos. A linha vermelha representa a linha de tendência linear, com nível de confiança de 95%.

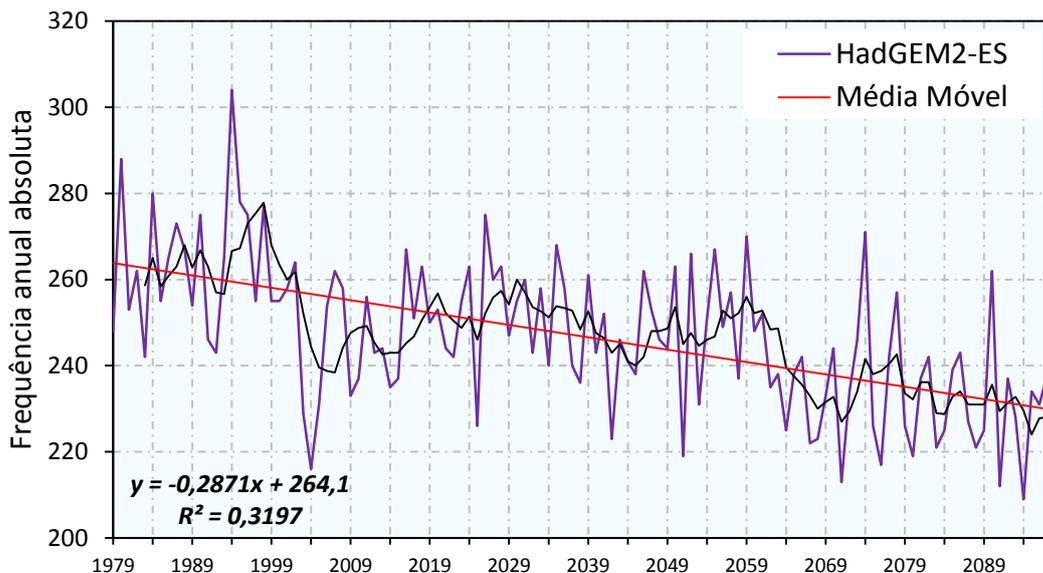


Figura 37 – Série temporal da frequência anual de ciclones entre 1979 e 2098 no HadGEM2-ES, considerando todos os sistemas que se iniciam com $\zeta \leq -1,5$. A linha preta representa a média móvel de 5 anos. A linha vermelha representa a linha de tendência linear, com nível de confiança de 95%.

Tal qual apresentada nas figuras anteriores, a tendência observada para os ciclones inicialmente intensos se mostrou mais negativa na projeção do RegCM4 (**Figura 38**; coeficiente angular de -0,29), em comparação ao projetado pelo HadGEM2-ES (**Figura 39**; coeficiente angular de -0,14).

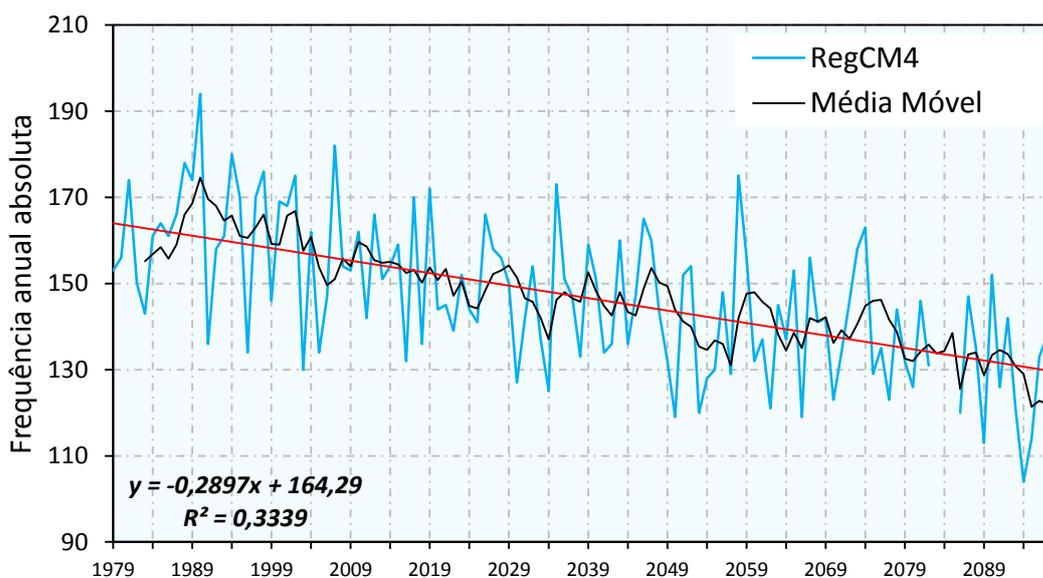


Figura 38 – Série temporal da frequência anual de ciclones entre 1979 e 2098 no RegCM4, considerando todos os sistemas que se iniciam com $\zeta \leq -2,5$. A linha preta representa a média móvel de 5 anos. A linha vermelha representa a linha de tendência linear, com nível de confiança de 95%.

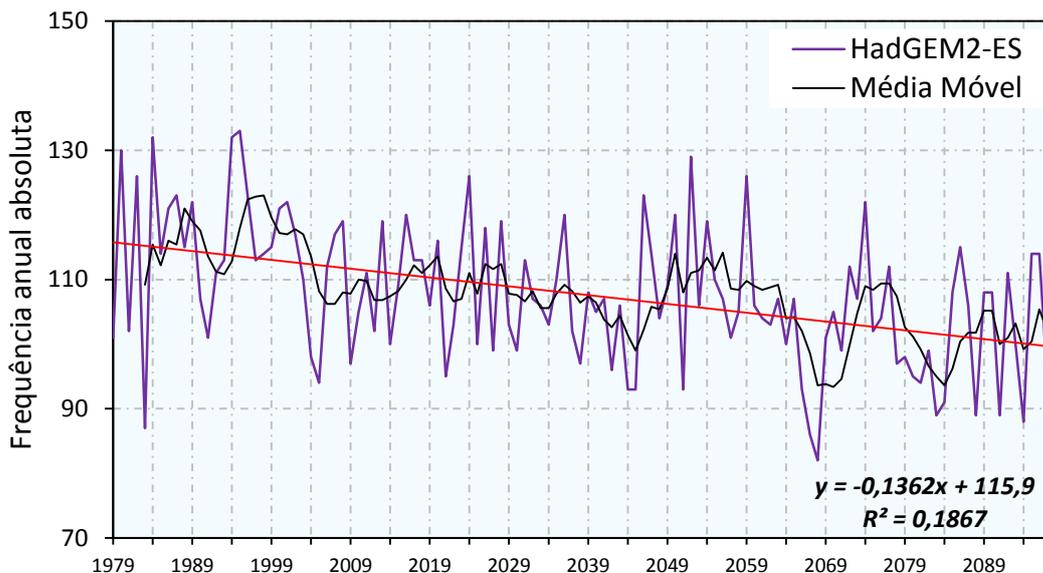


Figura 39 – Série temporal da frequência anual de ciclones entre 1979 e 2098 no HadGEM2-ES, considerando todos os sistemas que se iniciam com $\zeta \leq -2,5$. A linha preta representa a média móvel de 5 anos. A linha vermelha representa a linha de tendência linear, com nível de confiança de 95%.

Vários estudos também têm relatado quedas na ocorrência de ciclones em condições climáticas futuras (SINCLAIR; WATTERSON, 1999; GENG; SUGI, 2002; FYFE, 2003; LAMBERT; FYFE, 2006; LIM; SIMMONDS, 2009; KRÜGER, 2009; SILVA, 2010; GRIEGER et al., 2014). Fyfe (2003) projetou uma diminuição de até 30% no número de ciclones entre 40°S e o Oceano Antártico até o final do século atual, decorrentes do aumento das emissões de GEE. Segundo o autor, essa tendência negativa estaria relacionada com a migração da zona de instabilidade baroclínica para altas latitudes no Hemisfério Sul, proporcionando o deslocamento das ciclogêneses em direção ao Pólo Sul.

A partir de justificativas semelhantes, Grieger et al. (2014) detectaram uma diminuição na frequência de ciclones ao longo do Hemisfério Sul e aumento dos sistemas inicialmente intensos. Este último resultado não foi encontrado neste trabalho. O aquecimento da troposfera em altos níveis nas latitudes tropicais e a diminuição do gradiente horizontal de temperatura entre as baixas e altas latitudes favoreceriam a migração dos ciclones em direção ao polo e diminuiria a ocorrência desses em latitudes médias. Lim e Simmonds (2009) explicam que os principais responsáveis pelo aumento de temperatura na troposfera superior ao longo dos trópicos, e pelo aquecimento na troposfera inferior nos polos são, respectivamente, o aumento do calor latente liberado

em uma condição de aquecimento global e a maior absorção de radiação solar em superfície.

Em um outro estudo com maior enfoque sobre o Atlântico Sul, Krüger (2009) projetou a climatologia de ciclones no período de 2071-2085 dentro das famílias de cenários climáticos A2 e B2 e mostrou que há uma redução de 7,2% e 4,2 no número total de ciclogêneses, respectivamente, quando considerados todos os ciclones com vorticidade relativa inicial $\zeta \leq -1,0$. Os sistemas inicialmente intensos ($\zeta \leq -2,5$) sofreram maiores reduções, atingindo uma porcentagem de cerca de 20,9% na família de cenário A2 e 11,3% na B2.

5.2.3 Frequência de ciclogêneses por bandas de latitude

Com o objetivo de verificar tendências de mudanças futuras na frequência relativa de ciclogêneses em diferentes bandas de latitude ao longo da região delimitada de estudo, foram estabelecidas 8 faixas latitudinais entre as latitudes 15°S e 55°S do Atlântico Sudoeste e analisadas a ocorrência das ciclogêneses em cada uma delas durante o clima presente e futuro, nos dois modelos. É importante mencionar que esse método não permite concluir a existência ou inexistência de migrações das ciclogêneses para latitudes acima de 55°S, apenas na área de abrangência do estudo sobre o Atlântico Sudoeste.

Considerando todos os sistemas ($\zeta \leq -1,5$), no modelo RegCM4 as maiores diferenças na frequência relativa dos ciclones entre os períodos futuros e o presente ocorre nas bandas de latitude 30°S-35°S e 50°S-55°S (**Figura 40**). Durante o período de 2020-2050, projeta-se um aumento de 1,0% na frequência relativa de ciclogêneses com origem entre as latitudes 30°S-35°S e uma diminuição de 0,8% entre as latitudes de 50°S-55°S.

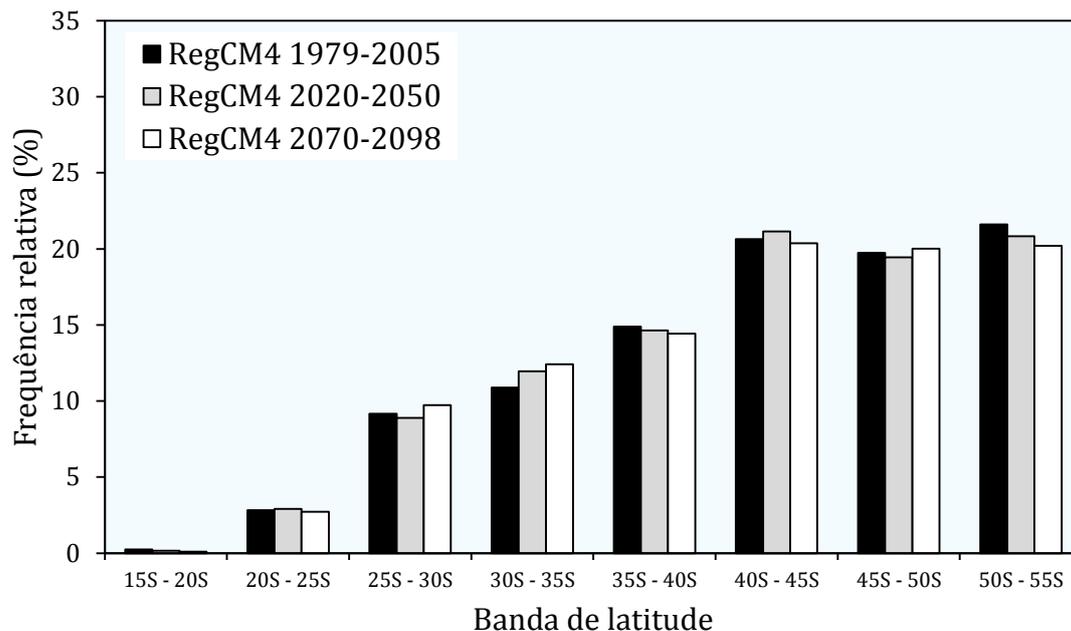


Figura 40 – Frequência relativa (%) de ciclogêneses por bandas de latitude no Atlântico Sudoeste em todos os períodos, simulados e projetados pelo RegCM4, considerando todos os sistemas que se iniciaram com $\zeta \leq -1,5$.

No HadGEM2-ES, a região do Atlântico Sudoeste compreendida entre as latitudes 40°S-45°S apresenta as maiores mudanças no futuro (**Figura 41**). Durante o período de 2020-2050, há uma diminuição de 0,7% na frequência relativa de ciclogêneses em relação ao presente, enquanto que entre 2070-2098 essa queda é de 1,7%. Não obstante, é importante mencionar também um aumento de 1,6% na frequência relativa de ciclogêneses durante o período de 2070-2098, dentro da banda 30°S-35°S.

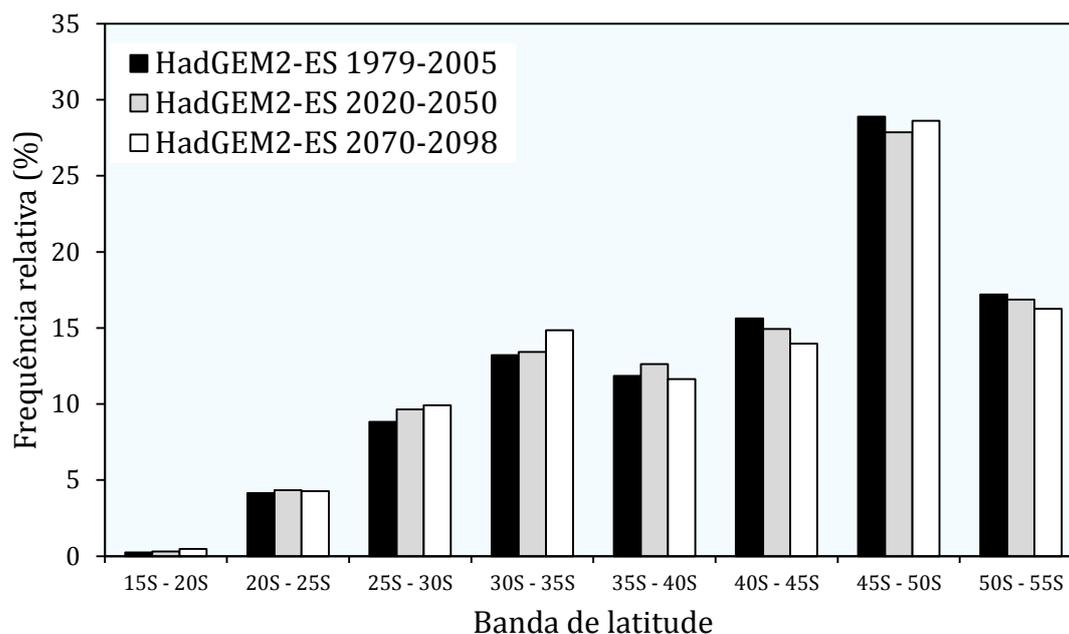


Figura 41 – Frequência relativa (%) de ciclogêneses por bandas de latitude no Atlântico Sudoeste em todos os períodos, simulados e projetados pelo HadGEM2-ES, considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$.

Quando analisado apenas os ciclones inicialmente intensos ($\zeta \leq -2,5$), o RegCM4 projeta apenas duas mudanças de maior relevância: uma ocorre na banda de latitude 30°S-35°S, onde no período futuro de 2070-2098 há um aumento de 1,2% na ocorrência de ciclogêneses (**Figura 42**); a outra mudança é projetada para o mesmo período, mas entre as latitudes 40°S-45°S, em que há uma diminuição de 0,8%, aproximadamente.

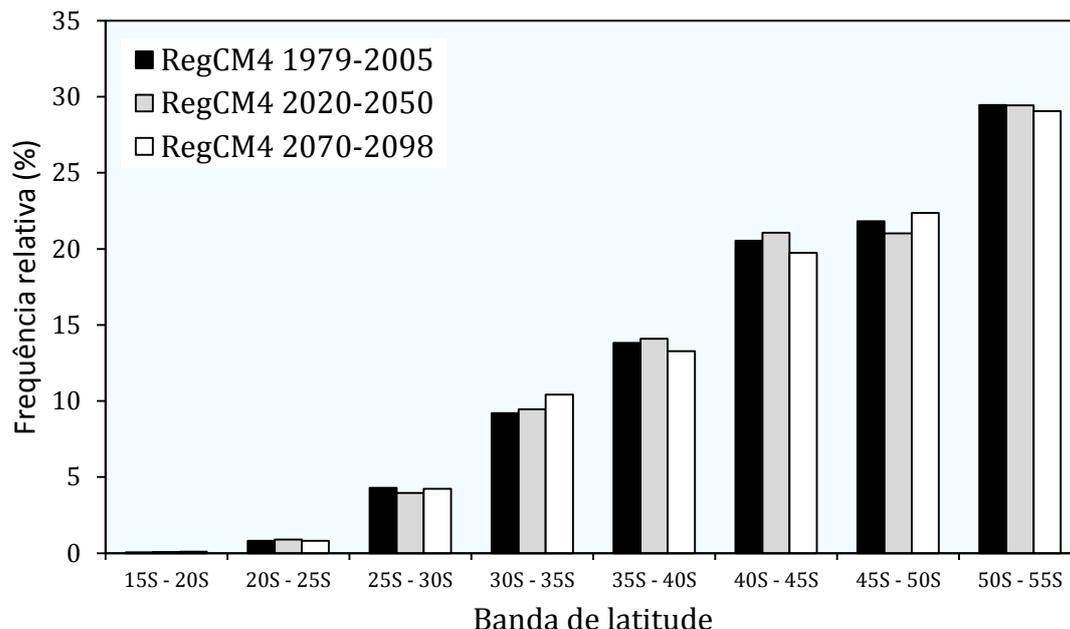


Figura 42 – Frequência relativa (%) de ciclogêneses por bandas de latitude no Atlântico Sudoeste em todos os períodos, simulados e projetados pelo RegCM4, considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -2,5$.

Por fim, em relação ao HadGEM2-ES as maiores mudanças projetadas em relação ao clima presente são as seguintes (**Figura 43**):

- aumento de 0,9% na frequência relativa de ciclogêneses na banda de latitude de 25°S-30°S durante os anos de 2020-2050;
- aumento de 2,2% na mesma banda, porém no período futuro distante (2070-2098);
- aumento de 3,0% entre as latitudes 30°S-35°S, durante o período de 2070-2098;
- aumento de 1,8% entre as latitudes 35°S-40°S, durante o período de 2020-2050;
- diminuição de 2,3% na banda de 40°S-45°S, durante o período de 2020-2050;
- diminuição de 3% na mesma banda, no período de 2070-2098;
- diminuição de 1,4% na banda de 45°S-50°S, durante o período de 2070-2098.

De maneira geral, as maiores porcentagens de queda projetadas na frequência relativa de ciclogêneses sobre o Atlântico Sudoeste concentram-se entre as latitudes 40°S

e 55°S, concordando com o encontrado por Fyfe (2003), que projetou maior diminuição de ciclones entre 40°S e o norte do Oceano Antártico.

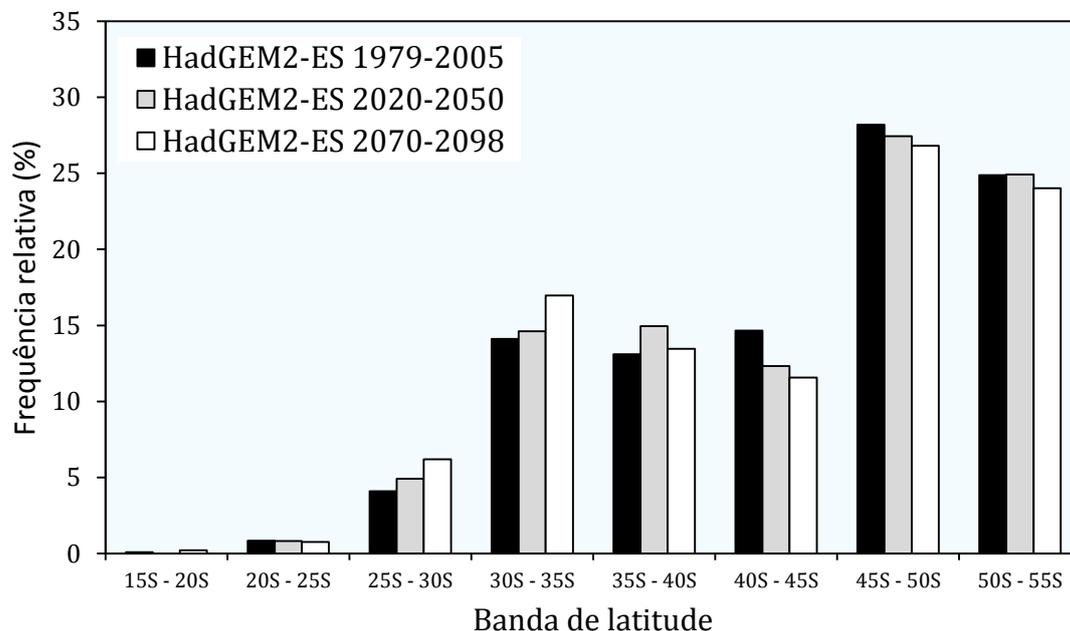


Figura 43 – Frequência relativa (%) de ciclogêneses por bandas de latitude no Atlântico Sudoeste em todos os períodos, simulados e projetados pelo HadGEM2-ES, considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -2,5$.

5.2.4 Variabilidade sazonal: 2020-2050 e 2070-2098

A variabilidade sazonal dos ciclones no Atlântico Sudoeste projetada para o cenário RCP8.5 ao longo dos períodos 2020-2050 e 2070-2098 manteve o mesmo padrão daquele encontrado para o período de 1979-2005, em ambos os modelos.

Considerando todos os ciclones ($\zeta \leq -1,5$) projetados no RegCM4, tanto o período de 2020-2050 quanto o de 2070-2098 apresentaram menores médias de ocorrência de ciclones durante a estação de verão (**Figura 44a**). O período 2020-2050 apresentou uma média de $58,1 \pm 7,9$ ciclones (-7,2% em relação à média da estação no período 1979-2005). Já o período de 2070-2098 alcançou uma média no verão de $54,5 \pm 6,1$ sistemas (-13,0%)

O inverno foi a estação predominante nos dois períodos, apresentando média de $76,0 \pm 11,4$ sistemas (-7,0%) no período 2020-2050. O período 2070-2098 alcançou o valor médio de $72,3 \pm 9,3$ ciclones (-11,5%).

Este padrão sazonal não se altera quando calculadas as mesmas médias com o limiar $\zeta \leq -2,5$. Durante o período de 2020-2050, a média de inverno no RegCM4 passa para $46,4 \pm 9,5$ sistemas (-6,5%) (**Figura 44b**). Já a estação de verão atingiu uma média de $28,1 \pm 6,0$ ciclones (-10,2%). No período de 2070-2098 a média do inverno cai para $41,9 \pm 7,8$ sistemas (-15,5%), enquanto que o verão atinge uma média de $25,3 \pm 6,3$ ciclones (-19,1%).

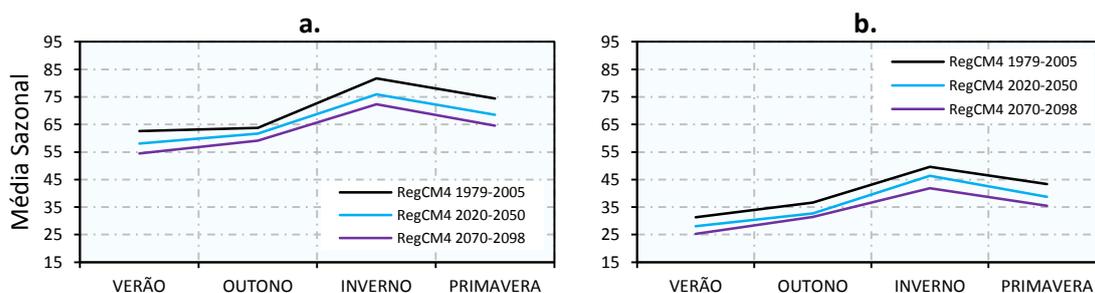


Figura 44 – Média sazonal de ciclones sobre o Atlântico Sudoeste em todos os períodos, simulado e projetado pelo RegCM4. a) $\zeta \leq -1,5$; b) $\zeta \leq -2,5$

Abrangendo os sistemas inicialmente fracos e intensos ($\zeta \leq -1,5$), o HadGEM2-ES também simulou maior frequência de ciclones durante o inverno e menor frequência no verão (**Figura 45a**). No intervalo de 2020-2050, a média no inverno atingiu um valor de $68,6 \pm 8,8$ ciclones (-3,1%). No segundo intervalo, 2070-2098, a média foi de $62,8 \pm 6,6$ ciclones (-11,3%). A estação de verão obteve média de $57,8 \pm 5,8$ ciclones (-4,5%) durante 2020-2050, enquanto que no período 2070-2098 a média foi de $20,0 \pm 4,6$ ciclones (-15,6%).

Quando considerado apenas os sistemas que se iniciam com $\zeta \leq -2,5$ no período de 2020-2050, o HadGEM2-ES apresentou média durante o inverno de $33,1 \pm 6,4$ ciclones (-4,4%; **Figura 45b**), enquanto que a projeção para 2070-2098 indica uma média de $31,4 \pm 4,9$ sistemas (-9,3%). Já na estação de verão, a média no período de 2020-2050 atingiu o valor de $22,2 \pm 4,9$ sistemas (-6,2%), enquanto que para o 2070-2098, essa média decresce para $20,0 \pm 4,6$ ciclones (-15,6%).

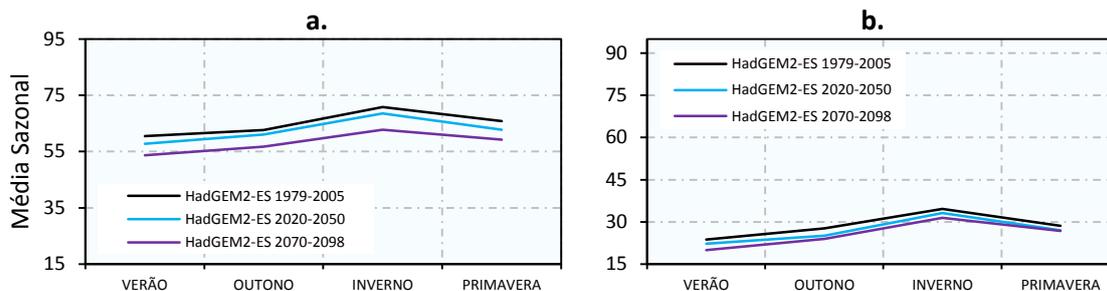


Figura 45 – Média sazonal de ciclones sobre o Atlântico Sudoeste em todos os períodos, simulados e projetados pelo HadGEM2- ES. a) $\zeta \le -1,5$; b) $\zeta \le -2,5$

De maneira geral, as estações com as maiores porcentagens de redução em ambos os modelos e limiares de vorticidade inicial, tanto no período de 2020-2050 quanto no período de 2070-2098, foram o verão e o inverno. Resultado parcialmente semelhante foi obtido por Krüger (2009), que encontrou maior queda no número de ciclones durante o inverno, na família do cenário climático mais pessimista A2.

5.2.5 Características médias

As **Figuras 46 a 55** representam o comportamento dos ciclones em relação às suas características gerais simulado e projetado pelos dois modelos no domínio total do Atlântico Sudoeste.

O RegCM4 não apresentou mudanças consideráveis em relação ao presente na frequência das classes de duração dos ciclones em nenhum dos períodos futuros (**Figura 46**). O mesmo ocorreu na projeção do HadGEM2-ES (**Figura 47**). Mais de 70% de todos os ciclones em ambos os modelos apresentam ciclo de vida de até 3 dias nos três períodos estudados. A **Tabela 10** confirma esses resultados, indicando médias constantes de 2,3 dias de duração no RegCM4 e 2,5 dias no HadGEM2-ES, ambos em todos os períodos.

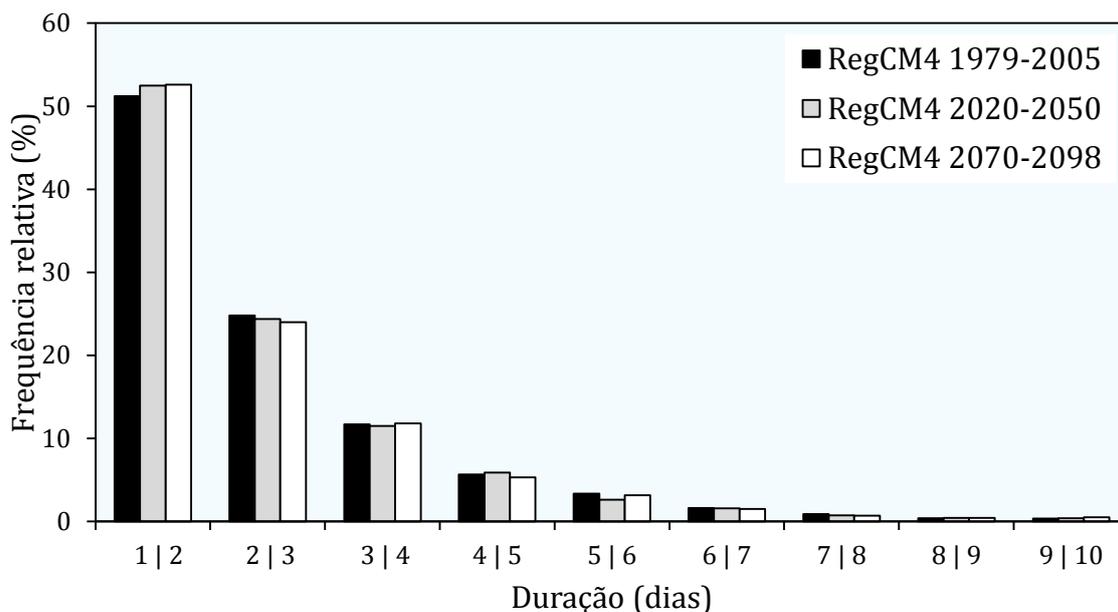


Figura 46 – Frequência relativa (%) dos ciclones no RegCM4 quanto à duração (dias) dos mesmos em todos os períodos e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$.

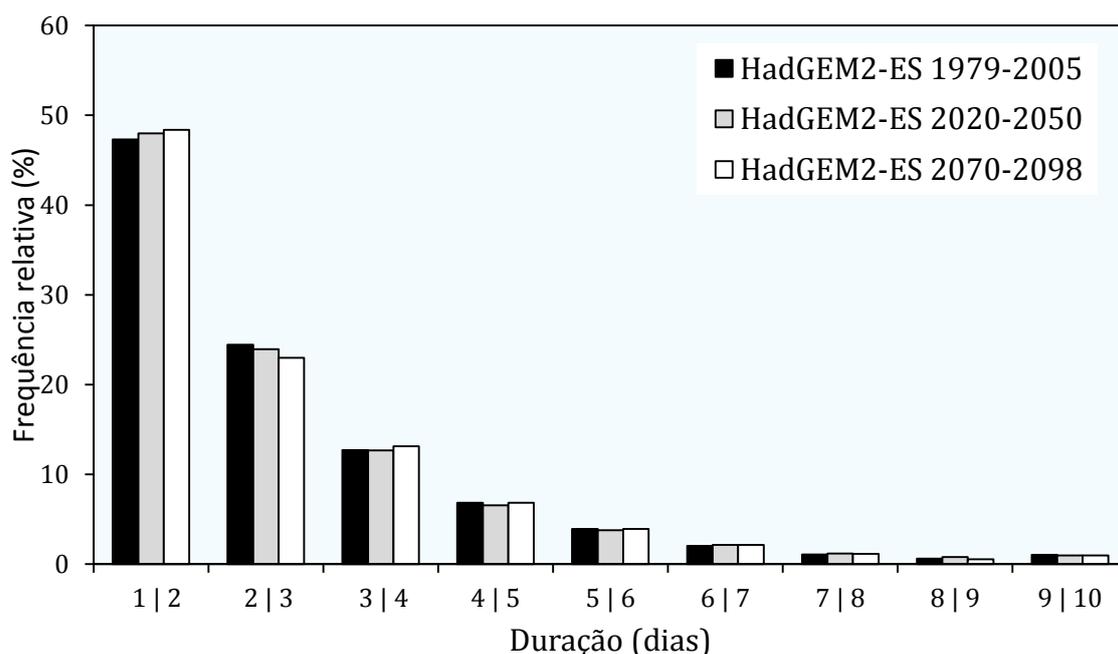


Figura 47 – Frequência relativa (%) dos ciclones no HadGEM2-ES quanto à duração (dias) dos mesmos em todos os períodos e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$.

A distância percorrida também não sofreu mudanças consistentes. No RegCM4, a maior diferença ocorreu no período 2020-2050 onde foi projetada uma diminuição de 1,4% na porcentagem relativa de ciclones com distância percorrida total entre 1500 e 2000 km (**Figura 48**). No restante, todas as classes se mantiveram relativamente

constantes, com pouco mais de 50% dos ciclones atingindo entre 1500 e 3000 km ao longo do ciclo de vida.

O mesmo comportamento foi projetado pelo HadGEM2-ES (**Figura 49**). A maior alteração ocorreu no período 2070-2098, onde a frequência relativa de ciclones com distância percorrida de 2500 a 3000 km caiu cerca de 0,8% em relação ao presente.

No RegCM4, a média da variável para cada período futuro foi de 2601,9 km em 2020-2050 (-0,9% em relação à média do presente) e 2578,0 km em 2070-2098 (-1,8%; **Tabela 10**). Já o HadGEM2-ES apresentou média de 2580,0 km em 2020-2050 (+0,4%) e 2566,4 km em 2070-2098 (-0,1%).

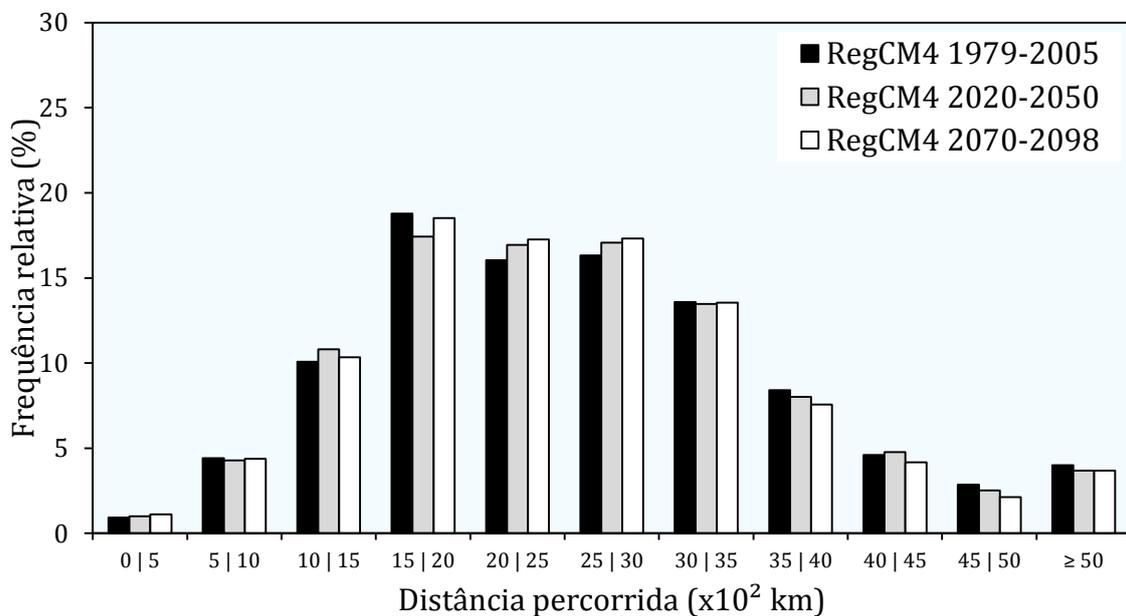


Figura 48 – Frequência relativa (%) dos ciclones no RegCM4 quanto à distância percorrida (x10² km) dos mesmos em todos os períodos e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$.

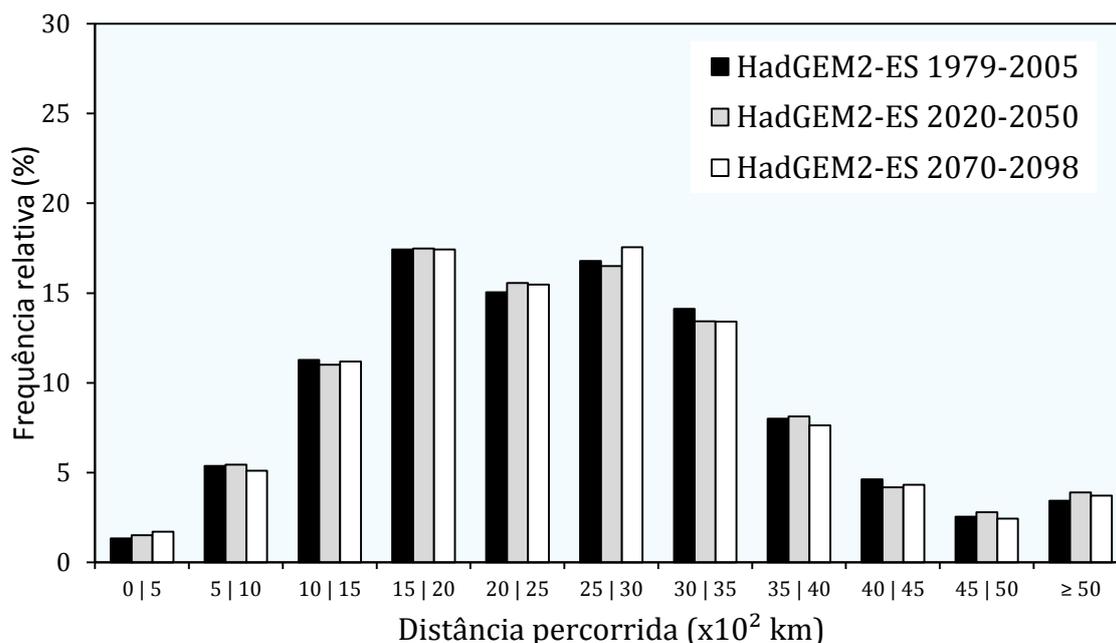


Figura 49 – Frequência relativa (%) dos ciclones no HadGEM2-ES quanto à distância percorrida (x10² km) dos mesmos em todos os períodos e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$.

Em relação a velocidade dos sistemas, também não foram projetadas aumentos e/ou diminuições consideráveis em relação ao presente. O RegCM4 mantém frequência relativa de aproximadamente 65% dos ciclones com velocidade entre 10 a 20 m/s (**Figura 50**). De qualquer forma, o modelo também indicou uma diminuição de 1,0% dos ciclones com velocidade entre 10 e 15 m/s durante o período de 2020-2050 e 1,0% daqueles com 15 a 20 m/s no período de 2070-2098.

O HadGEM2-ES mantém nos dois períodos futuros a maior porcentagem de ciclones com 10 a 15 m/s de velocidade (~35%) em relação às demais classes (**Figura 51**). A maior diferença projetada pelo modelo foi de uma diminuição de 1,8% na porcentagem dos ciclones com velocidade entre 10 a 15 m/s no período de 2070-2098.

A média da velocidade no HadGEM2-ES projetada para 2020-2050 foi de 13,8 m/s, sendo a mesma do período presente (**Tabela 10**). Em 2070-2098, a média aumentou cerca de 0,7%, atingindo 13,9 m/s. O RegCM4 obteve média de 15,0 m/s em 2020-2050, sendo 0,7% menor que no presente, e média de 14,9 m/s em 2070-2098.

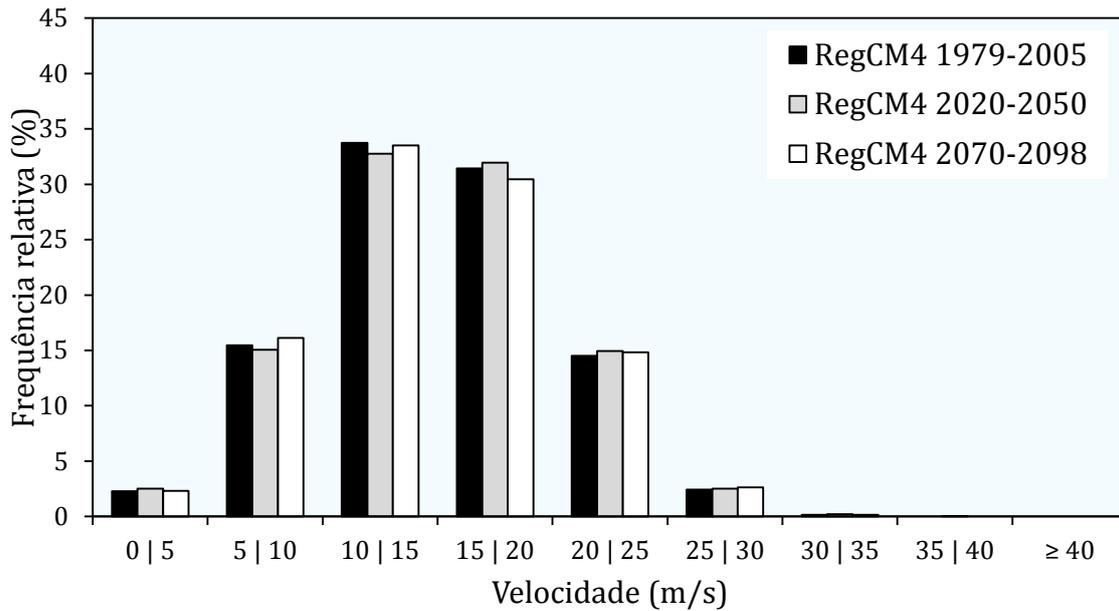


Figura 50 – Frequência relativa (%) dos ciclones no RegCM4 quanto à velocidade (m/s) dos mesmos em todos os períodos e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$.

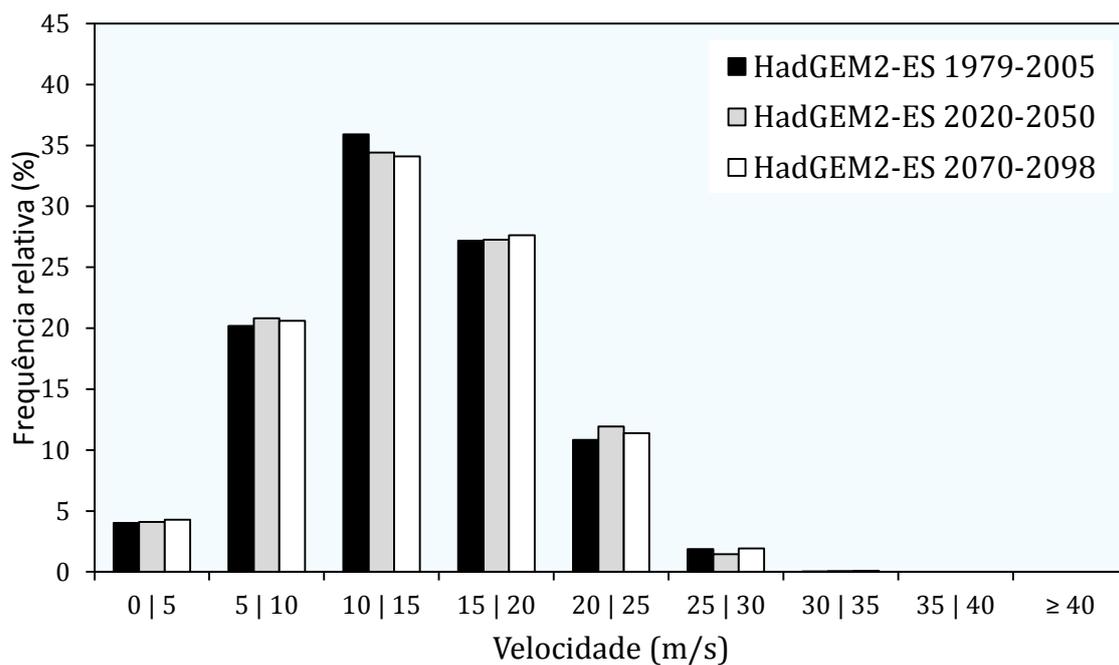


Figura 51 – Frequência relativa (%) dos ciclones no HadGEM2-ES quanto à velocidade (m/s) dos mesmos em todos os períodos e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$.

A disposição das frequências relativas da vorticidade relativa inicial dos ciclones também não sofreu mudanças relevantes. Cerca de 60% dos sistemas no RegCM4 em todos os períodos apresentaram vorticidade relativa inicial de $-1,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ a $-3 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ (**Figura 52**), enquanto que no HadGEM2-ES a porcentagem foi de 71% (**Figura 53**). As

maiores diferenças foram projetadas dentro da classe de vorticidade $-1,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ a $2 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ (+1,8%), para o período de 2070-2098 do RegCM4, e dentro da classe $-2,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ a $3 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ (-1,9%), no período de 2020-2050 no HadGEM2-ES. Não foram indicadas mudanças na média da vorticidade relativa inicial em relação ao presente em nenhum período futuro e em nenhum modelo (**Tabela 10**).

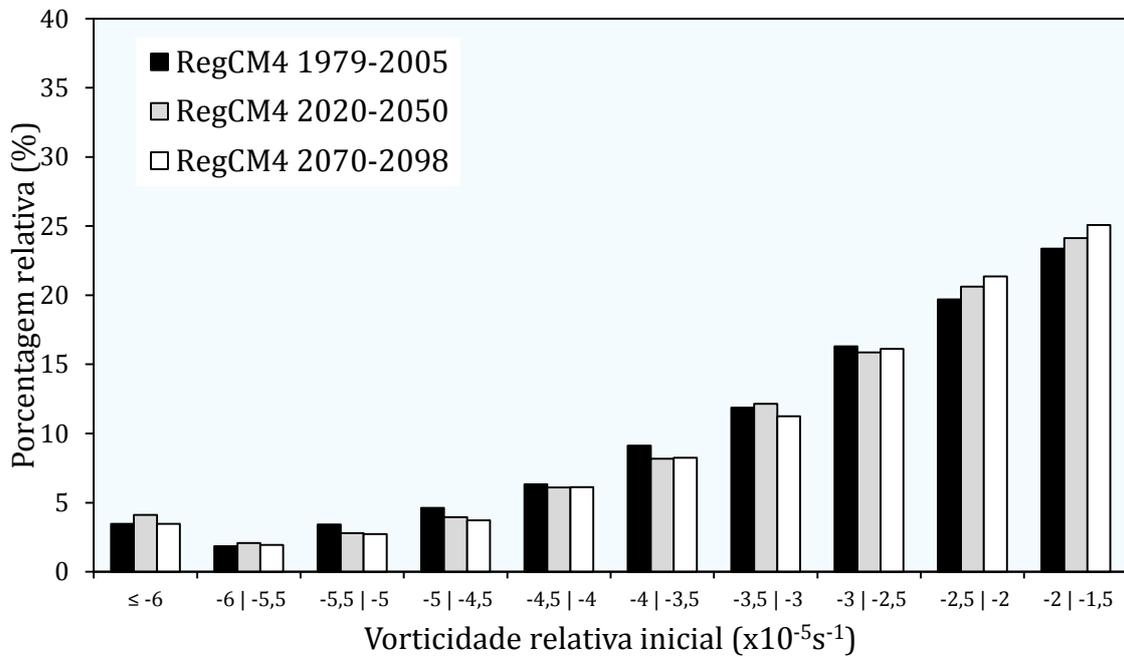


Figura 52 – Frequência relativa (%) dos ciclones no RegCM4 quanto à vorticidade relativa inicial ($\times 10^{-5} \text{s}^{-1}$) dos mesmos em todos os períodos e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$.

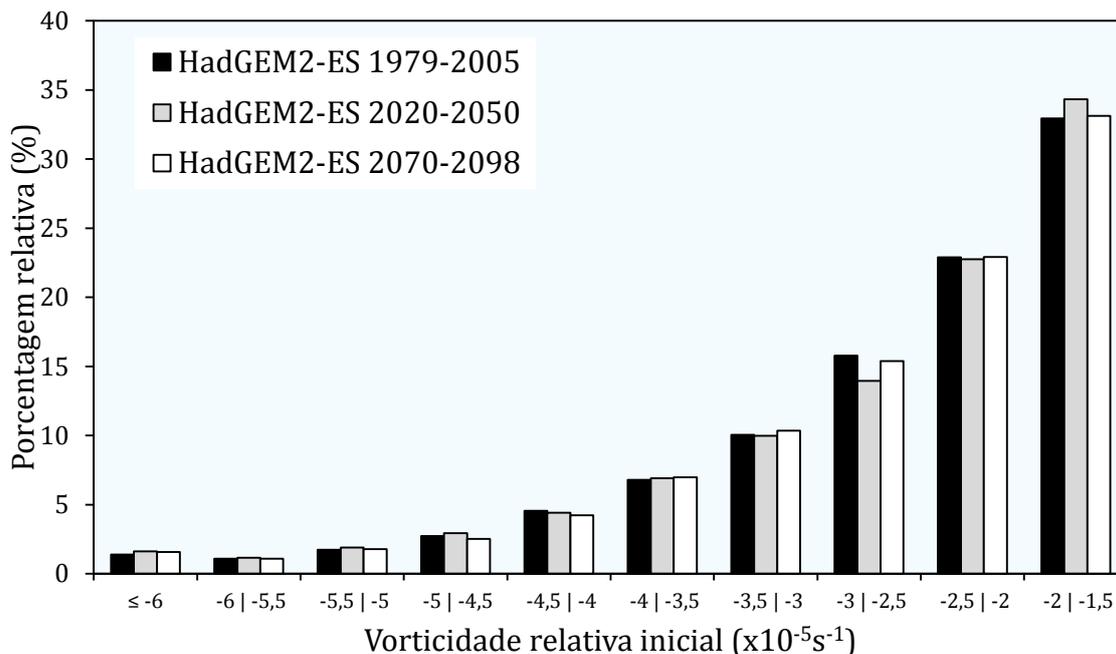


Figura 53 – Frequência relativa (%) dos ciclones no HadGEM2-ES quanto à vorticidade relativa inicial ($\times 10^{-5} \text{s}^{-1}$) dos mesmos em todos os períodos e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$.

Por fim, quando analisada a vorticidade média total dos ciclones, o RegCM4 projeta uma diminuição de 2,7% no valor da média para o período 2070-2098. Em relação à esta variável, o modelo regional obteve uma tendência de aumento na porcentagem de ciclones com vorticidade média total entre $-1,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ e $-3 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ em ambos os períodos, e diminuição na frequência relativa daqueles entre $-4 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ e $-6 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ (**Figura 54**). Os maiores acréscimos ocorreram entre os ciclones com $-2,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ a $3 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ de vorticidade média total no período de 2020-2050 (+2,2%) e 2070-2098 (+2,0%), assim como no intervalo de vorticidade de $-2 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ a $-2,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$, entre os anos de 2070-2098 (+2,2%).

Já no HadGEM2-ES, as mudanças na distribuição das frequências foram mais amenas (**Figura 55**). Entre 2070-2098, os ciclones com vorticidade média total de $-3,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ a $-4 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ foram cerca de 1,2% relativamente menos frequentes em relação ao presente, sendo esta a maior mudança projetada pelo modelo. Não há alteração na média da vorticidade média total em nenhum período futuro (**Tabela 10**).

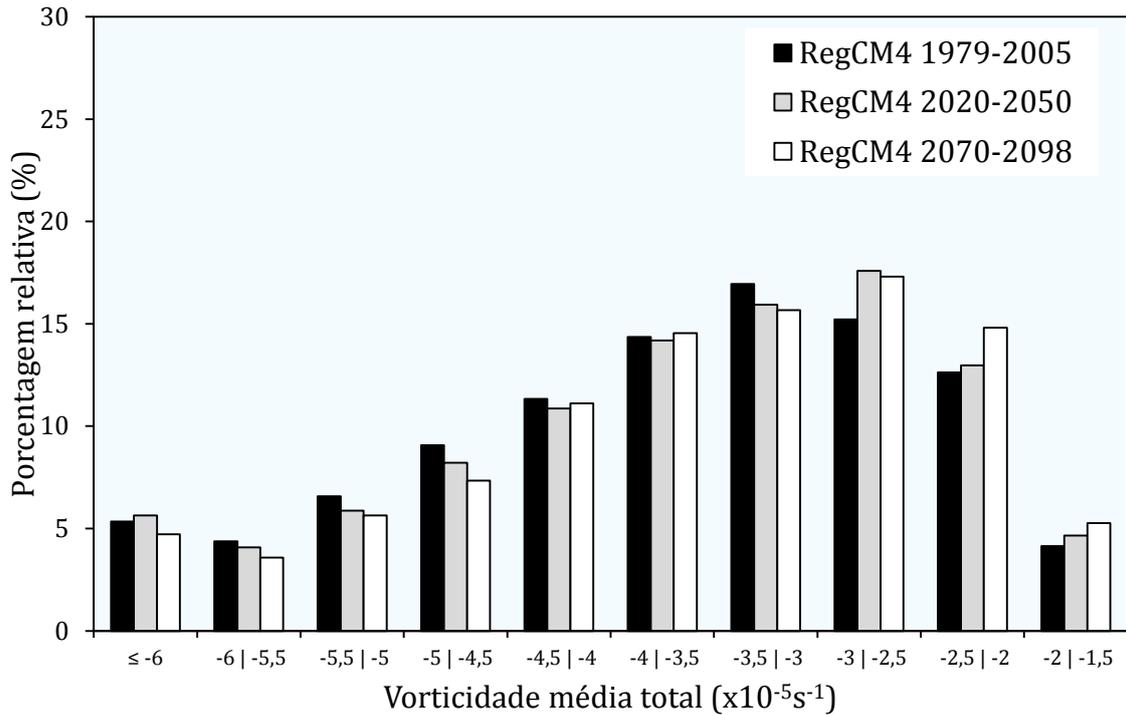


Figura 54 – Frequência relativa (%) dos ciclones no RegCM4 quanto à vorticidade média total ($\times 10^{-5} \text{s}^{-1}$) dos mesmos em todos os períodos e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$.

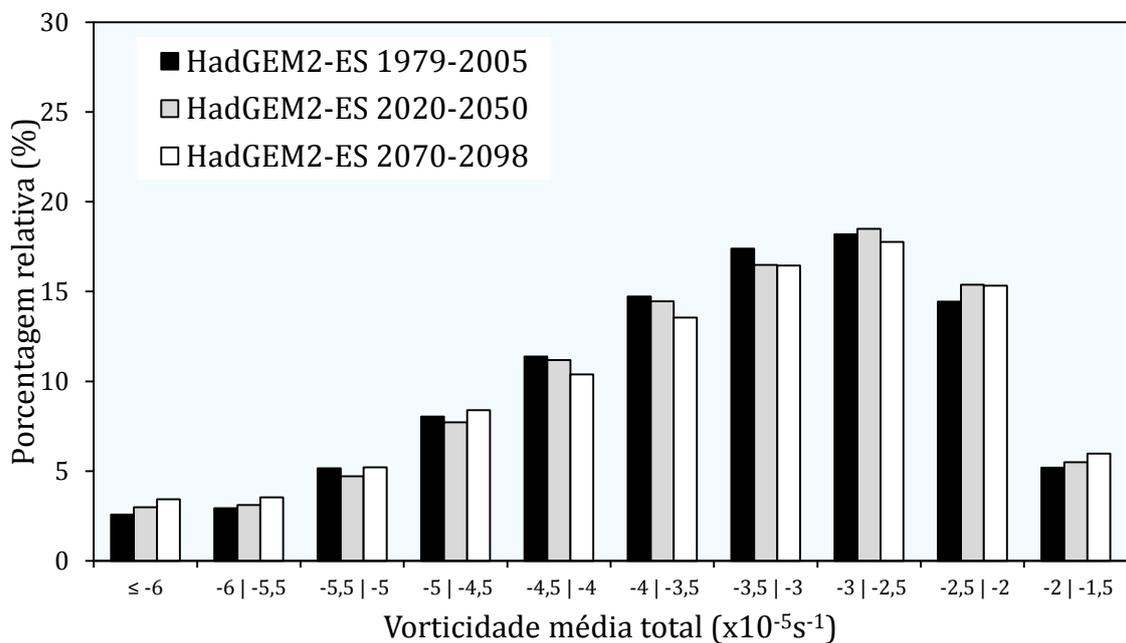


Figura 55 – Frequência relativa (%) dos ciclones no RegCM4 quanto à vorticidade média total ($\times 10^{-5} \text{s}^{-1}$) dos mesmos em todos os períodos e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$.

Tabela 10 - Características médias dos ciclones no Atlântico Sudoeste em todos os períodos, simulados e projetados pelo RegCM4 e HadGEM2-ES.

Período $\zeta \leq -1,5$	Duração (dias)	Distância percorrida (km)	Velocidade (m/s)	Vorticidade inicial ($\times 10^{-5} s^{-1}$)	Vorticidade média total ($\times 10^{-5} s^{-1}$)
RegCM4 1979-2005	2,3	2624,4	14,9	-3,0	-3,7
RegCM4 2020-2050	2,3	2601,9	15,0	-3,0	-3,7
RegCM4 2070-2098	2,3	2578,0	14,9	-3,0	-3,6
HadGEM2-ES 1979-2005	2,5	2570,1	13,8	-2,7	-3,5
HadGEM2-ES 2020-2050	2,5	2580,0	13,8	-2,7	-3,5
HadGEM2-ES 2070-2098	2,5	2566,4	13,9	-2,7	-3,5
Período $\zeta \leq -2,5$	Duração (dias)	Distância percorrida (km)	Velocidade (m/s)	Vorticidade inicial ($\times 10^{-5} s^{-1}$)	Vorticidade média total ($\times 10^{-5} s^{-1}$)
RegCM4 1979-2005	2,2	2597,9	15,3	-3,8	-4,2
RegCM4 2020-2050	2,2	2586,9	15,4	-3,9	-4,1
RegCM4 2070-2098	2,2	2567,5	15,3	-3,8	-4,1
HadGEM2-ES 1979-2005	2,3	2522,8	14,5	-3,6	-4,0
HadGEM2-ES 2020-2050	2,4	2598,4	14,6	-3,6	-4,0
HadGEM2-ES 2070-2098	2,3	2560,2	14,8	-3,6	-4,0

Em resumo, considerando todos os sistemas ($\zeta \leq -1,5$), não foram projetadas mudanças na duração média dos ciclones em nenhum modelo e em nenhum dos dois períodos futuros. No entanto, quando analisados apenas os sistemas inicialmente intensos ($\zeta \leq -2,5$), o HadGEM2-ES projeta para o período de 2020-2050 uma duração média de 2,4 dias, sendo 4,3% superior à média de 2,3 dias simulada para o presente.

Em relação à distância percorrida média, o RegCM4 projeta maiores mudanças do que o HadGEM2-ES, porém, quando considerados apenas os ciclones inicialmente intensos, essa relação se inverte, projetando-se porcentagens de alterações maiores no HadGEM2-ES.

A maior mudança na velocidade média dos sistemas ocorre na projeção do HadGEM2-ES para o período de 2070-2098 abrangendo apenas os sistemas intensos, no entanto, essa mudança não ultrapassa 2% em relação ao presente, aumentando de 14,5 m/s de velocidade média para 14,8 m/s.

Por fim, não há nenhuma alteração projetada que corresponda a uma porcentagem maior que 2,6% na média da vorticidade relativa inicial e nenhuma maior que 2,8% na vorticidade média total projetada pelos dois modelos, em nenhum período futuro. Assim como apresentado neste estudo, Krüger (2009) também não encontrou mudanças

consideráveis em nenhuma das características dos ciclones sob condições futuras de mudanças climáticas ao longo desse século.

5.2.5.1 Variabilidade sazonal

Uma outra análise a respeito das características gerais dos ciclones está relacionada à variabilidade sazonal das médias de cada variável. Dessa forma, pode-se entender em quais estações ocorrem a maior concentração dos ciclones com maiores e menores valores de cada característica (duração, distância percorrida, velocidade média, vorticidade relativa inicial e vorticidade média total).

As **Figuras 56 a 60** permitem apontar que ambos os modelos encontraram o inverno como a estação com a maior média de distância percorrida e velocidade, assim como médias mais negativas de vorticidade relativa inicial e vorticidade média total (lembrando que quanto mais negativo o valor, maior a vorticidade do sistema). Por outro lado, a estação de verão foi caracterizada pelas maiores médias de duração e valores menos negativos de vorticidade relativa inicial e vorticidade média total.

No que diz respeito exclusivamente à duração dos sistemas, o RegCM4 apresentou como maiores mudanças em relação ao presente quedas de 4,5% na média do verão entre os anos de 2020-2050 e 3,6% na média do outono (**Figura 56a**). De maneira geral e tendo como referência o período do presente, em 2020-2050 a média sazonal da duração dos ciclones diminui no verão, no inverno e primavera, aumentando no outono. Em 2070-2098 a média cai no outono, inverno e primavera e aumenta no verão.

O modelo HadGEM2-ES projetou diferenças mais modestas em relação ao período presente, tendo como maior mudança, uma queda de cerca de 3,4% na média do inverno em 2070-2098 (**Figura 56b**). No geral, entre os anos de 2020-2050 a média da duração projetada diminui no inverno e aumenta nas estações restantes. Em 2070-2098 a média cai no verão e no inverno, aumentando no outono e primavera.

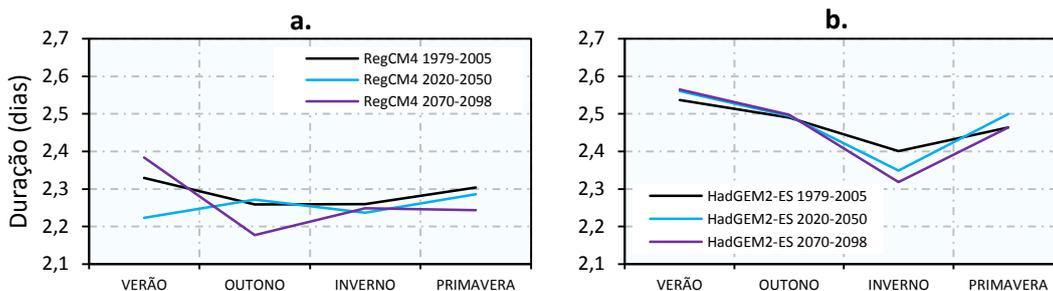


Figura 56 – Variabilidade sazonal da duração (dias) dos ciclones sobre o Atlântico Sudoeste, considerando todos os ciclones com $\zeta \leq -1,5$. a) RegCM4; b) HadGEM2-ES

Em relação à distância percorrida projetada pelo RegCM4, a maior queda na média em comparação ao presente ocorre na estação de verão (**Figura 57a**). Em 2020-2050, há uma diminuição de 3,4% da média de distância percorrida, enquanto que em 2070-2098, essa porcentagem é de 2,2%. Durante o outono se projeta um pequeno aumento na média de 1,6%, no período de 2020-2050. Resumidamente, em 2020-2050 a média da distância percorrida diminui no verão e na primavera, aumentando no outono e inverno. Em 2070-2098 a média sazonal cai em todas as estações, quando comparada com o presente.

Já para o HadGEM2-ES, em 2020-2050 a média da distância diminui nas estações de outono e inverno e aumenta no verão e primavera, enquanto que em 2070-2098 a média cai no verão e no inverno, aumentando no outono e primavera (**Figura 57b**). A maior mudança projetada na média ocorre na estação de inverno, onde há diminuição de cerca de 1,9% em 2070-2098.

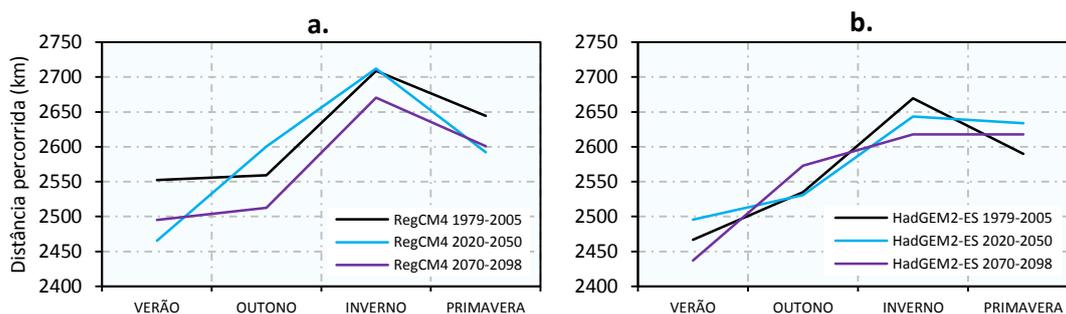


Figura 57 – Variabilidade sazonal da distância percorrida (km) dos ciclones sobre o Atlântico Sudoeste, considerando todos os ciclones com $\zeta \leq -1,5$. a) RegCM4; b) HadGEM2-ES

No RegCM4, a média sazonal da velocidade durante os anos de 2020-2050 diminui apenas na primavera, aumentando nas demais estações (**Figura 58a**). Em 2070-2098, a média cai no verão, se mantendo praticamente a mesma no inverno e primavera, mas

aumentando no outono. Não obstante, a média sazonal da velocidade apresentou quedas de 2,1% no verão, durante o período de 2070-2098, e de 1,9% no outono em 2020-2050.

O HadGEM2-ES indicou que em 2020-2050, a média sazonal da velocidade se mantém praticamente igual em todas as estações (**Figura 58b**). Em 2070-2098, a média cai no verão e aumenta no outono e inverno, mantendo a mesma média do presente na primavera. A maior mudança em relação ao presente se apresenta entre os anos de 2070-2098, com um aumento de 1,4% na média do outono.

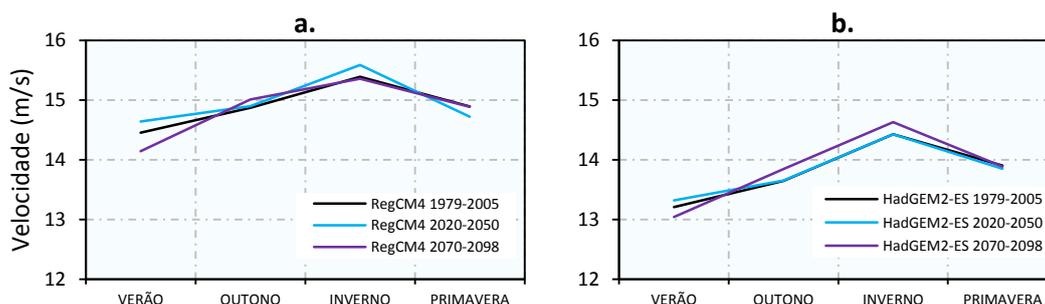


Figura 58 – Variabilidade sazonal da velocidade média (m/s) dos ciclones sobre o Atlântico Sudoeste, considerando todos os ciclones com $\zeta \leq -1,5$. a) RegCM4; b) HadGEM2-ES

Quanto à vorticidade relativa inicial, o RegCM4 projetou, como mudança mais relevante, uma diminuição de 5,0% na média do verão em 2070-2098 (**Figura 59a**). No geral, o modelo indicou que em 2020-2050, a média sazonal da vorticidade relativa inicial diminui apenas no inverno, com aumento nas demais estações. Em 2070-2098, a média aumenta em todas as estações

Com relação ao projetado pelo HadGEM2-ES, em 2020-2050, a média aumenta apenas no outono e diminui no inverno e primavera, se mantendo praticamente a mesma no verão (**Figura 59b**). Durante os anos de 2070-2098, a média aumenta no verão e outono e diminui no inverno, se mantendo a mesma na primavera. A maior queda ocorre na média de inverno, sendo cerca de 2,3% em ambos os períodos futuros.

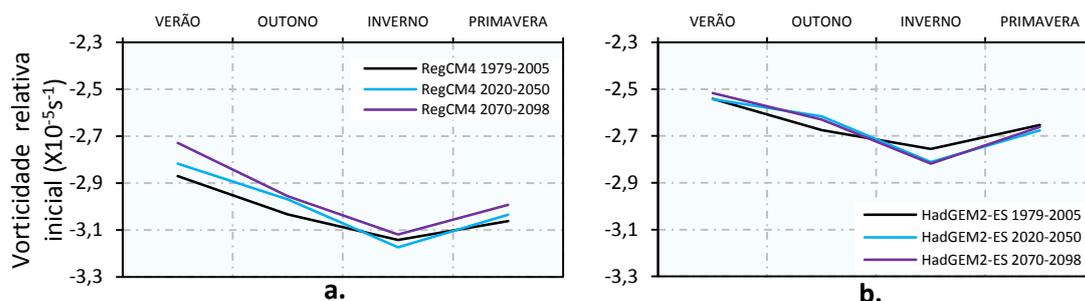


Figura 59 – Variabilidade sazonal da vorticidade relativa inicial ($\times 10^{-5} \text{s}^{-1}$) dos ciclones sobre o Atlântico Sudoeste, considerando todos os ciclones com $\zeta \leq -1,5$. a) RegCM4; b) HadGEM2-ES

Por fim, o RegCM4 projetou que em 2020-2050 a média sazonal da vorticidade média total aumenta em todas as estações, exceto no inverno (**Figura 60a**). Em 2070-2098, a média aumenta em todas as estações. O modelo apresentou uma diminuição considerável de 7,4% na média de verão em 2070-2098. Entre os anos de 2020-2050, essa mesma média cai cerca de 3,3%.

O HadGEM2-ES projeta uma diminuição de 2,2% na média do outono em 2020-2050 e um aumento de 2,3% na média do inverno em 2070-2098 (**Figura 60b**). Entre 2020-2050, o modelo global projeta diminuição na média sobre o verão, inverno e primavera, e aumento no outono. Em 2070-2098, a média aumenta no verão e outono, diminuindo no inverno e primavera.

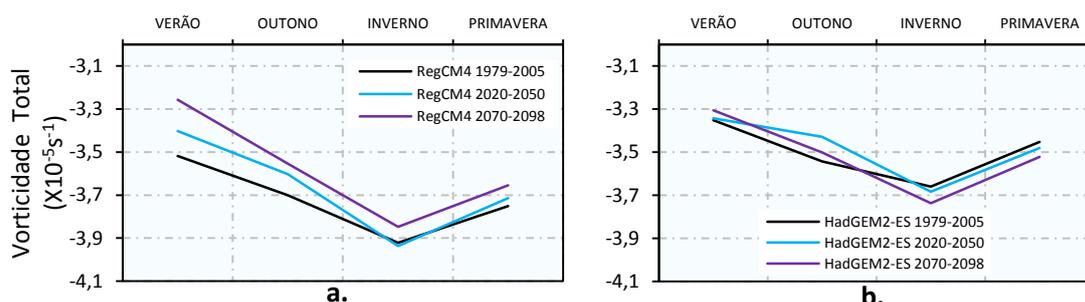


Figura 60 – Variabilidade sazonal da vorticidade média total ($\times 10^{-5} \text{s}^{-1}$) dos ciclones sobre o Atlântico Sudoeste, considerando todos os ciclones com $\zeta \leq -1,5$. a) RegCM4; b) HadGEM2-ES

Em resumo, os dois modelos simularam e projetaram padrões concordantes entre si de variabilidade sazonal em todas as características estudadas, ocorrendo uma única

exceção quanto à variabilidade da duração dos ciclones, onde os modelos se contrastam em relação à estação de menor média nos dois períodos futuros.

5.2.6 Densidade ciclogénica

A **Figura 61a-f** representa a transformação gradual da densidade anual no período presente para os dois períodos futuros nas projeções do RegCM4 e HadGEM2-ES. No entanto, uma vez que as diferenças entre os períodos futuro e presente são de grandeza bastante pequena quando comparada à escala total da densidade anual, na ordem de unidades até um máximo de duas dezenas (as diferenças positivas não passam de 15×10^{-6} ciclones/km², e as negativas não passam de 20×10^{-6} ciclones/km²), essas diferenças se tornam mais nítidas através da **Figura 62a-d**.

Durante o período de 2020-2050, o RegCM4 projetou maiores diferenças negativas do que positivas, quando se considera todo o Atlântico Sudoeste (**Figura 62a**). A área com as maiores quedas na densidade se concentra entre as latitudes 40°S e 57,5°S. Esse fato pode estar ligado ao processo de migração dos ciclones dessa região para latitudes superiores, conforme relatado por outros estudos (FYFE, 2003; LIM; SIMMONDS, 2009; GRIEGER et al., 2014)

A sub-região RG1, projetada pelo RegCM4, apresentou predominantemente queda na densidade ao longo de todo os seus limites, enquanto que o HadGEM2-ES projeta uma contribuição considerável de valores positivos sobre a porção mais adjacente à costa dos estados brasileiros de São Paulo e do Paraná (**Figura 62c**).

Para a RG2, o RegCM4 projeta um aumento na densidade sobre a porção adjacente à costa do Uruguai e do estado brasileiro de Rio Grande do Sul, além de um núcleo de diminuição próximo às coordenadas 37°S e 50°W. No HadGEM2-ES, esse núcleo é ausente, porém, projeta-se um núcleo negativo adjacente à costa da divisa do Uruguai com o Rio Grande do Sul. Um aumento na densidade na região próxima à desembocadura do rio da Prata é indicado pelo modelo.

Em relação às mudanças de densidade na RG3, o modelo global projetou uma diminuição mais intensa do que a projetada pelo modelo regional. No HadGEM2-ES, um núcleo mais negativo e alongado se localizou próximo às coordenadas 49°S e 64°W,

enquanto que no RegCM4 foi projetado um aumento na densidade na porção adjacente à costa da Argentina, próximo à longitude de 66°W. Além disso, o modelo regional apresentou um núcleo positivo nas coordenadas 43°S e 61°W.

Comparando a densidade anual projetada pelo RegCM4 para 2070-2098 com o presente (**Figura 62b**), nota-se que a banda latitudinal de maior diminuição da densidade compreende a faixa entre 40°S e 57,5°S, com destaque para a região próxima à costa do extremo sul argentino. Dessa forma, a sub-região RG3 se mostra negativamente afetada.

O mesmo período projetado pelo HadGEM2-ES indicou condição semelhante na RG3, porém, com diminuições em maior intensidade (**Figura 62d**). Além disso, a diminuição próxima ao extremo sul da Argentina se mostra relativamente menor que a projetada pelo modelo regional.

A RG2, entre os anos de 2070-2098, apresentou um estado intermediário no RegCM4, com pontos particulares onde se projeta aumento na densidade (faixa estreita adjacente à costa do Uruguai e do Rio Grande do Sul) e pontos onde a diminuição é dominante (região mais afastada da costa, próxima às coordenadas 37°S e 50°W). Na projeção do HadGEM2-ES, a porção da RG2 próxima à costa do Rio Grande do Sul é predominada pelo aumento da densidade, chegando a atingir o valor mais alto da escala, um aumento entre 10×10^{-6} a 15×10^{-6} ciclones/km². Em sua porção mais ao sul, próximo à desembocadura do rio da Prata, projeta-se uma pequena diminuição na densidade.

Por último, sobre a sub-região RG1 se projetou um aumento na densidade adjacente à costa dos estados brasileiros de Santa Catarina, Paraná e São Paulo, e uma diminuição na mesma banda de latitude, porém afastada da costa, próximo à 43°W. No HadGEM2-ES, tais diferenças são mais amenas, com maior predominância de diminuição.

Em resumo, o RegCM4 projeta uma maior diminuição na densidade média anual da ciclogênese do que o HadGEM2-ES, em ambos os períodos futuros. Não obstante, há maior queda no período de 2070-2098 do que em 2020-2050, tanto na dimensão espacial quanto na intensidade, com exceção do período de 2020-2050 projetado pelo HadGEM2-ES, onde a intensidade dos núcleos em que há a diminuição da densidade de ciclogêneses foi ligeiramente superior daquela projetada para 2070-2098.

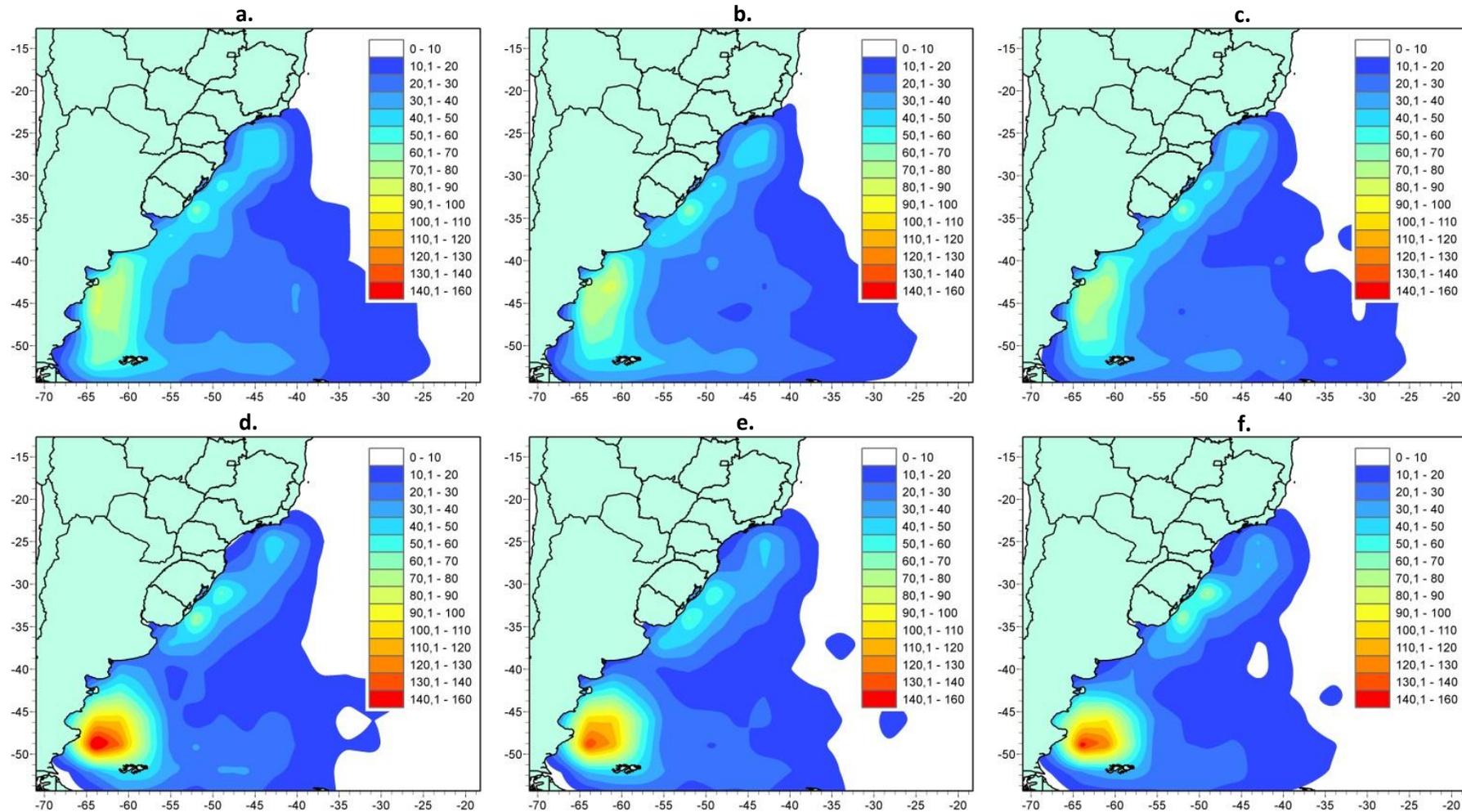


Figura 61 – Densidade ciclogênica anual média ($\times 10^{-6}/\text{km}^2$) sobre o Atlântico Sudoeste, considerando todos os ciclones que iniciaram com $\zeta \leq -1,5$. A linha superior corresponde ao RegCM4, onde a) 1979-2005; b) 2020-2050; c) 2070-2098. A linha inferior corresponde ao HadGEM2-ES, onde d) 1979-2005; e) 2020-2050; f) 2070-2098. Os valores entre 10,1 e 160 na escala de cores representam 2,5 a 40 ciclones por ano em uma área de $5^\circ \times 5^\circ$, aproximadamente.

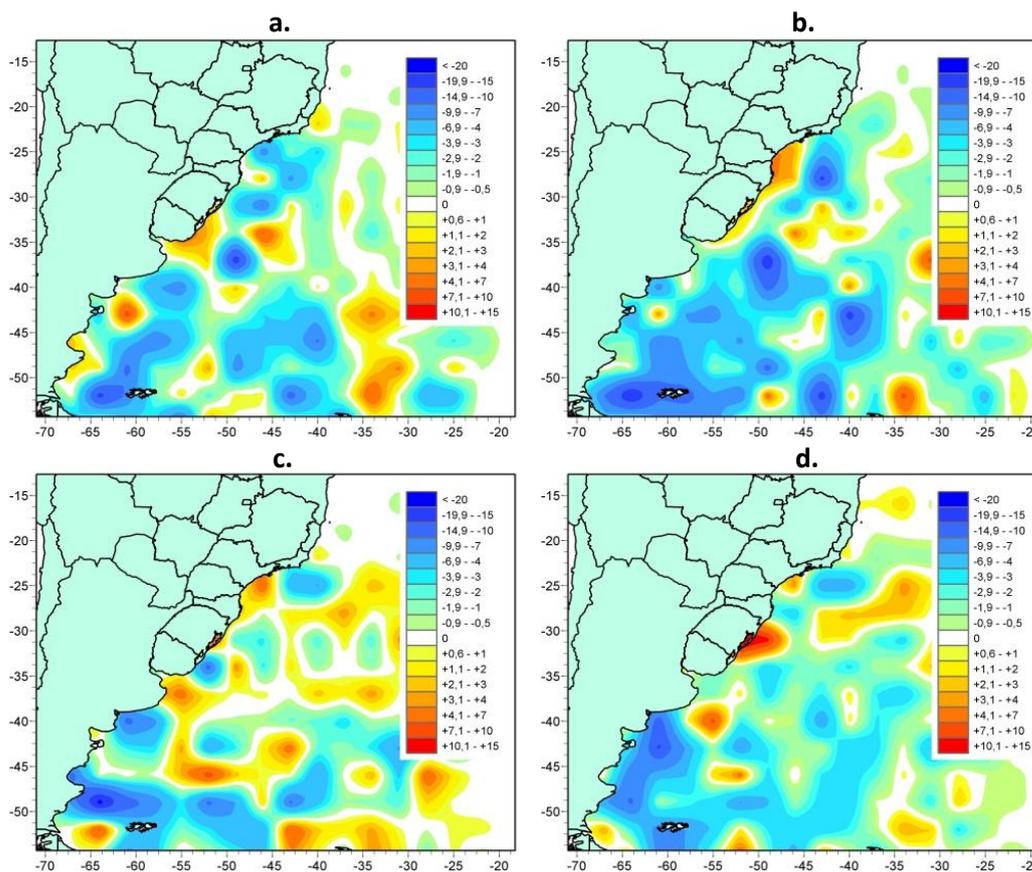


Figura 62 – Diferenças da densidade anual média ($\times 10^{-6}/\text{km}^2$). A linha superior corresponde ao RegCM4, onde a) 2020-2050 menos 1979-2005; b) 2070-2098 menos 1979-2005. A linha inferior corresponde ao HadGEM2-ES, onde c) 2020-2050 menos 1979-2005; d) 2070-2098 menos 1979-2005. Foram considerados todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$.

As **Figuras 63 a 66** ilustram a densidade da ciclogênese nas quatro estações do ano e suas configurações projetadas para os períodos futuros. A seguir serão descritas as mudanças sazonais mais notáveis produzidas pelos modelos ao longo do Atlântico Sudoeste.

Na estação de verão, o RegCM4 projeta para 2020-2050 uma diminuição da densidade na porção sul da sub-região RG3 e um aumento no núcleo da RG2, adjacente à costa uruguaia (**Figura 63b**). Não foi observado nenhuma tendência considerável sobre a RG1. Em 2070-2098, projeta-se uma diminuição na banda de latitude entre 50°S e $57,5^{\circ}\text{S}$ (**Figura 63c**). Além disso, o modelo indica uma queda generalizada na densidade da região central do Atlântico Sudoeste. Por outro lado, sugere-se uma pequena tendência positiva sobre o núcleo localizado na RG3 e na RG1.

O HadGEM2-ES projeta para o verão uma redução do núcleo ciclogênético na RG3 em 2020-2050 e 2070-2098, além de uma diminuição na densidade da RG1 nos dois períodos (**Figuras 63e-f**).

Durante o outono, as maiores diferenças projetadas entre 2020-2050 pelo RegCM4 foram um aumento da densidade na porção norte da RG3 e na RG2 (**Figura 64b**). Em 2070-2098, o modelo sugere um aumento na RG2 e diminuição na RG1 (**Figura 64c**). Já no HadGEM2-ES, projetou-se tendências negativas na RG3 e RG2, tanto em 2020-2050 quanto em 2070-2098 (**Figuras 64e-f**).

Em relação ao inverno, o modelo regional projeta para 2020-2050 e 2070-2098 menores valores de densidade em todas as três sub-regiões, sendo que o mesmo ocorre no projetado pelo HadGEM2-ES (**Figuras 65a-f**).

Por fim, na primavera o modelo RegCM4 indicou uma queda na densidade do setor sul da RG3, na região geral da RG2 e na porção central do Atlântico Sudoeste entre os anos de 2020-2050 (**Figura 66b**). A RG1 não evidenciou mudanças consideráveis nesse período. Durante 2070-2098, a diminuição na densidade foi generalizada em todas as sub-regiões, assim como na região central do domínio (**Figura 66c**).

O HadGEM2-ES também sugeriu tendências negativas para a RG3, em ambos os períodos futuros (**Figuras 66e-f**). Em 2020-2050, as sub-regiões RG2 e RG1 se mantiveram relativamente constantes (**Figura 66e**). No entanto, em 2070-2098, o modelo global projetou aumentos nos núcleos ciclogênicos da RG2 e RG1 (**Figura 66f**).

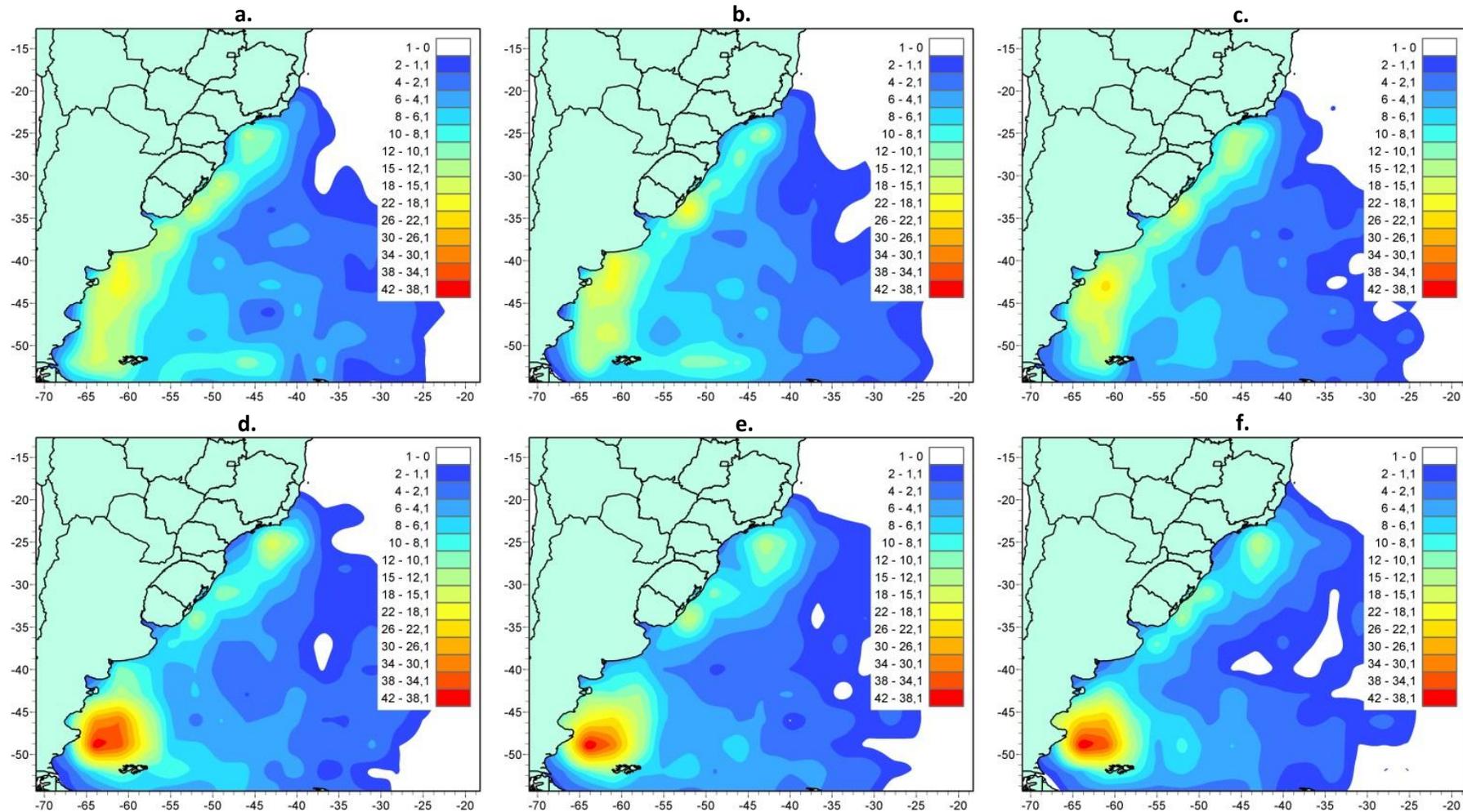


Figura 63 – Densidade ciclogênica média ($\times 10^{-6}/\text{km}^2$) durante a estação de verão sobre o Atlântico Sudoeste, considerando todos os ciclones que iniciaram com $\zeta \leq -1,5$. A linha superior corresponde ao RegCM4, onde a) 1979-2005; b) 2020-2050; c) 2070-2098. A linha inferior corresponde ao HadGEM2-ES, onde d) 1979-2005; e) 2020-2050; f) 2070-2098.

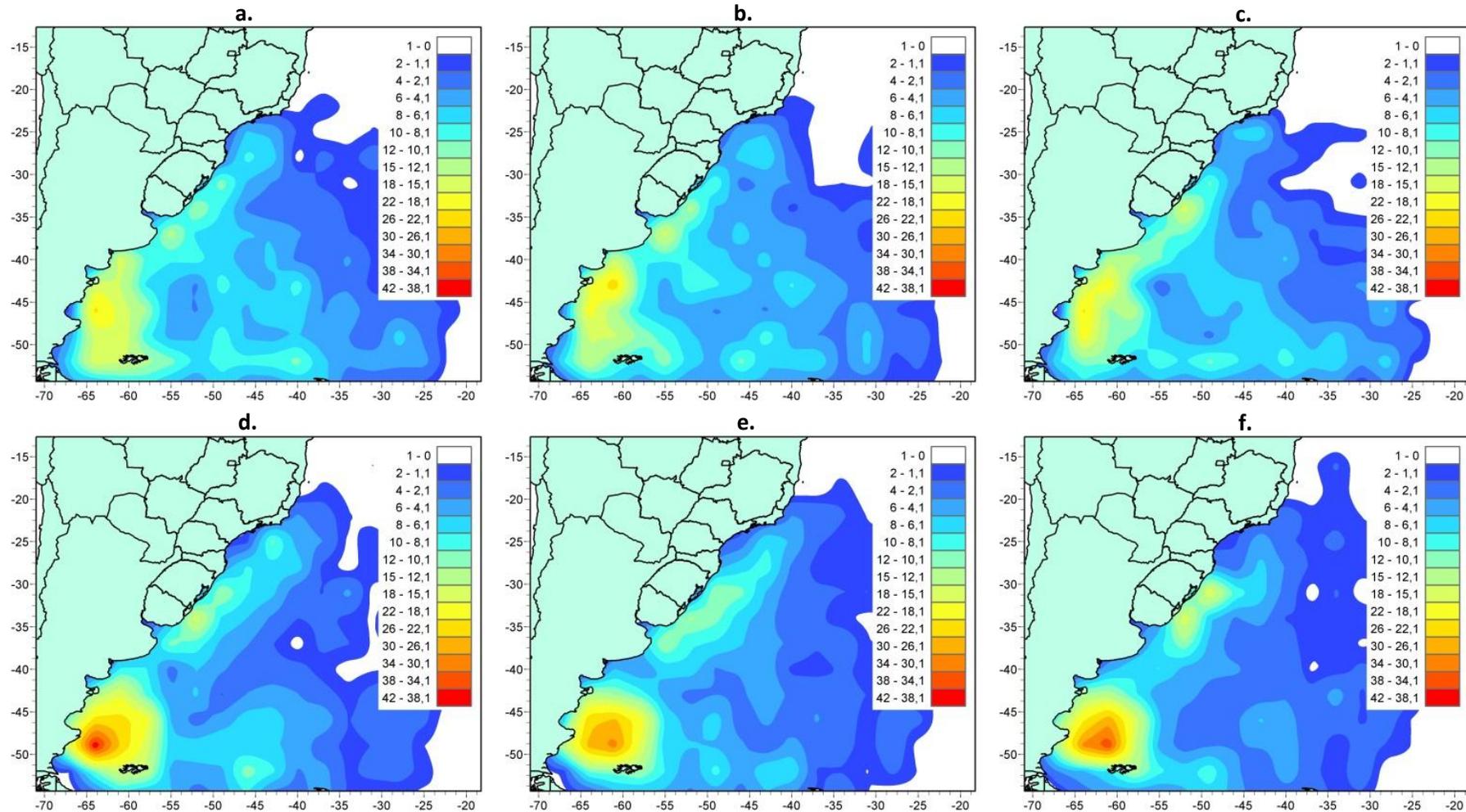


Figura 64 – Densidade ciclogênica média ($\times 10^{-6}/\text{km}^2$) durante a estação de outono sobre o Atlântico Sudoeste, considerando todos os ciclones que iniciaram com $\zeta \leq -1,5$. A linha superior corresponde ao RegCM4, onde a) 1979-2005; b) 2020-2050; c) 2070-2098. A linha inferior corresponde ao HadGEM2-ES, onde d) 1979-2005; e) 2020-2050; f) 2070-2098.

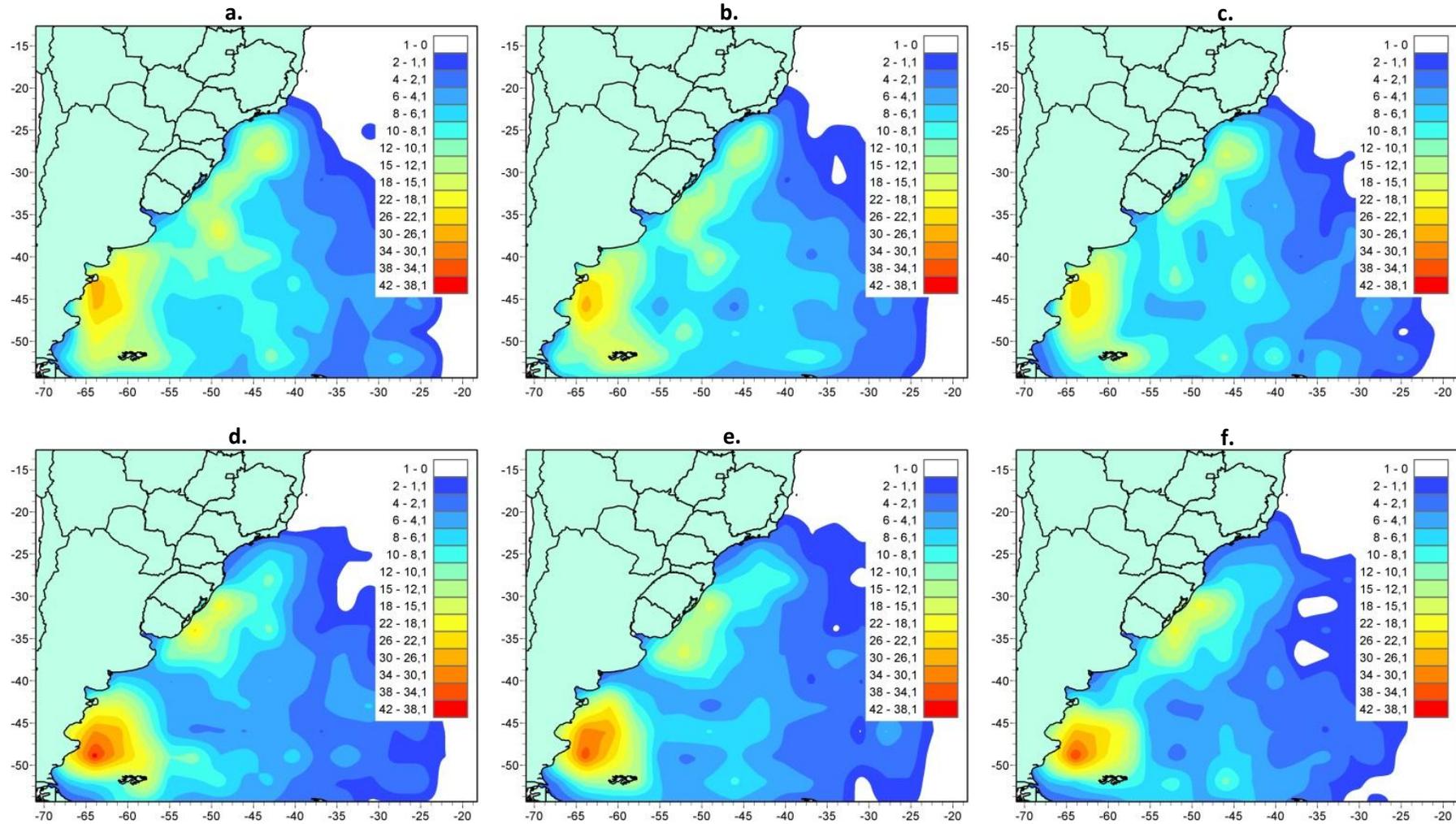


Figura 65 – Densidade ciclogênica média ($\times 10^{-6}/\text{km}^2$) durante a estação de inverno sobre o Atlântico Sudoeste, considerando todos os ciclones que iniciaram com $\zeta \leq -1,5$. A linha superior corresponde ao RegCM4, onde a) 1979-2005; b) 2020-2050; c) 2070-2098. A linha inferior corresponde ao HadGEM2-ES, onde d) 1979-2005; e) 2020-2050; f) 2070-2098.

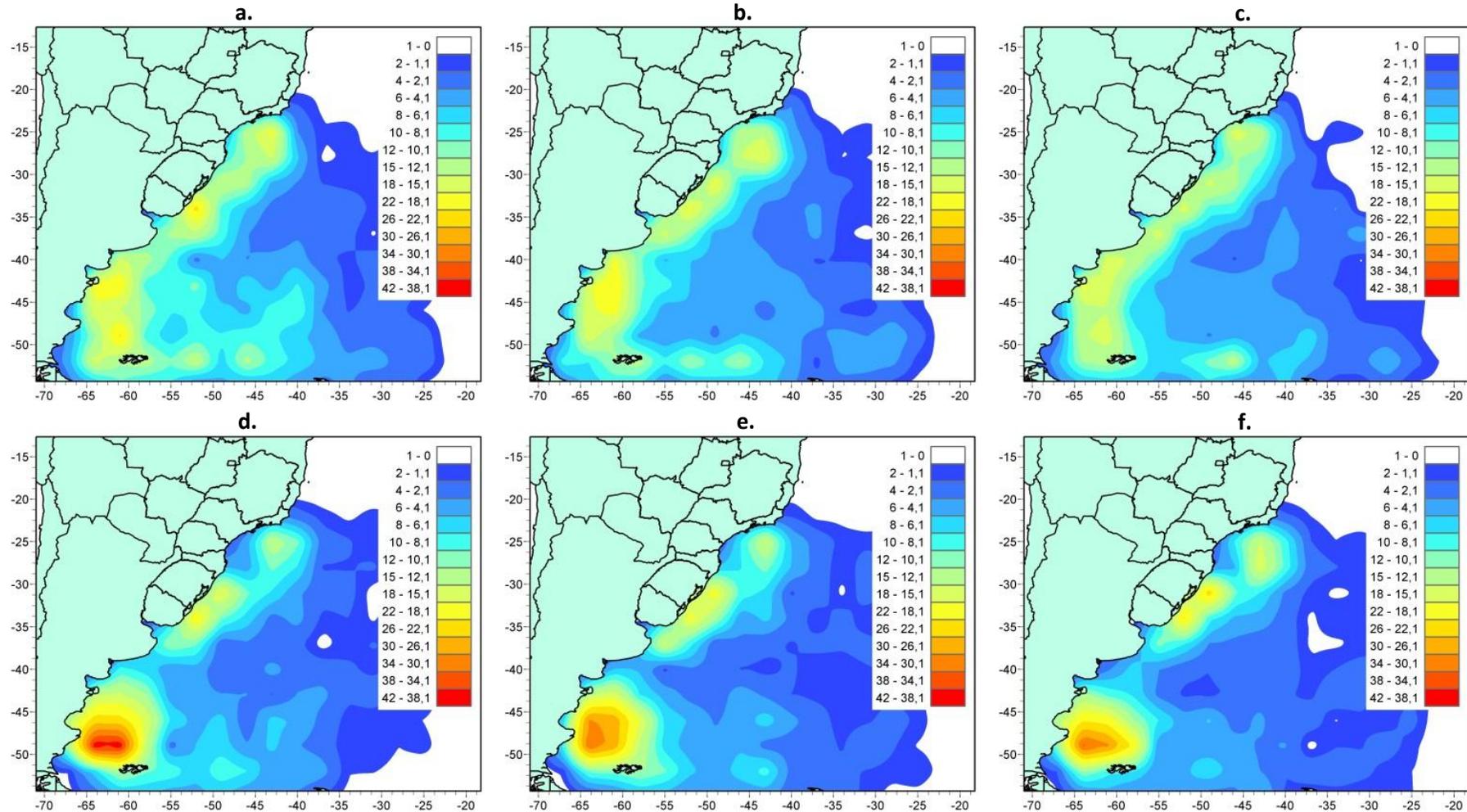


Figura 66 – Densidade ciclogênica média ($\times 10^{-6}/\text{km}^2$) durante a estação de primavera sobre o Atlântico Sudoeste, considerando todos os ciclones que iniciaram com $\zeta \leq -1,5$. A linha superior corresponde ao RegCM4, onde a) 1979-2005; b) 2020-2050; c) 2070-2098. A linha inferior corresponde ao HadGEM2-ES, onde d) 1979-2005; e) 2020-2050; f) 2070-2098.

5.2.7 As três sub-regiões no clima futuro: RG1, RG2 e RG3

5.2.7.1 RG1: variabilidade sazonal

Na RG1, a estação mais favorável a ocorrência de ciclones nos períodos de 2020-2050 e 2070-2098 foi a primavera (**Figura 67a**). Em comparação ao presente, o período de 2020-2050 apresentou uma diminuição de 26,7% na média de ciclones durante o inverno e um aumento de 8,3% durante o outono. Em 2070-2098, a alteração mais considerável acontece no inverno, onde a média cai 18,1%.

Na projeção do HadGEM2-ES para 2020-2050, houve uma diminuição de 16,4% na média da estação de outono e aumento de 12,5% no inverno (**Figura 67c**). O período de 2070-2098 mostrou uma alta queda de 44,4% na média do outono e aumento de 12,9% durante a primavera.

Apesar dos valores das médias em todas as estações, e principalmente no outono, serem muito baixas quando são considerados apenas os ciclones mais intensos ($\zeta \leq -2,5$) com gênese na RG1, a projeção do RegCM4 obteve valores bastante altos em relação à aumentos e diminuições percentuais nas médias sazonais (**Figura 67b**). A média de ciclones na estação de outono aumenta em 52,4% ao longo do período de 2020-2050 e 29,8% em 2070-2098. Por outro lado, há uma diminuição de 34,7% em 2020-2050 durante o verão e de 30,8% em 2070-2098 na primavera.

No HadGEM2-ES também ocorre valores consideravelmente baixos nas médias sazonais, demonstrando a escassa presença de ciclones inicialmente intensos na região (**Figura 67d**). O maior aumento na média ao longo do período de 2020-2050 ocorre no inverno, cerca de 110,5% em relação ao presente. A maior queda ocorre na primavera, chegando a quase 35%. Entre os anos de 2070-2098 há um aumento de 80,4% no verão e 70,7% no inverno. No entanto, na estação de outono há uma diminuição de cerca de 47,6%.

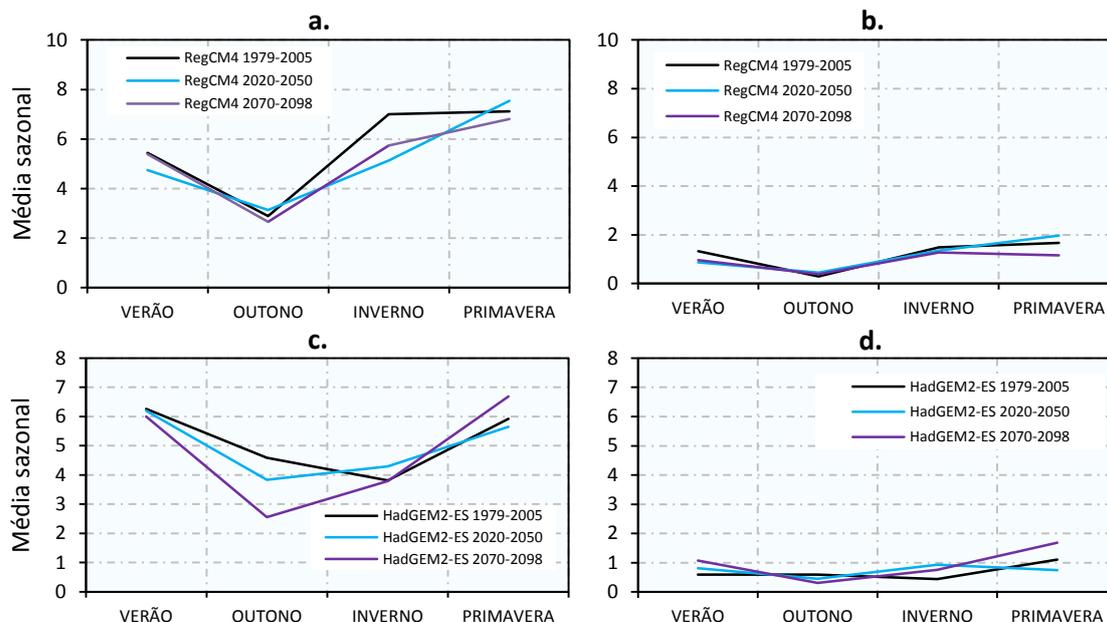


Figura 67 – Média sazonal de ciclones com origem na RG1 em todos os períodos, simulado e projetado pelo RegCM4 (a, b) e HadGEM2-ES (c, d). A coluna da esquerda representa os sistemas que se iniciam com $\zeta \leq -1,5$; a coluna da direita os sistemas com $\zeta \leq -2,5$.

5.2.7.2 RG1: características médias

Na RG1, o RegCM4 projeta nos dois períodos futuros a mesma porcentagem de ciclones com duração de até 3 dias que a obtida pelo presente, cerca de 58% do total (**Figura 68**). A máxima diferença entre o clima futuro e presente ocorre na frequência de ciclones com duração entre 4 e 5 dias, durante o período de 2020-2050 (+3,0% em relação ao clima presente).

Já o HadGEM2-ES apresentou aproximadamente 50% dos ciclones com duração de 1 a 3 dias, cerca de 5% a mais que o simulado pelo presente (**Figura 69**). Isso se deve principalmente ao fato de que durante o período de 2020-2050, o modelo projetou um aumento de 4,3% na frequência relativa dos sistemas com 1 a 2 dias de duração.

Em relação à média, todos os períodos no RegCM4 apresentaram média de duração de 3 dias (**Tabela 11**), enquanto que o HadGEM2-ES indicou média de 3,4 dias no período de 2020-2050 (-8,1% em relação ao presente) e 3,5 dias entre 2070-2098 (-5,4%; **Tabela 12**).

A distância percorrida pelos ciclones mostrou pequenas alterações em ambos os modelos e períodos. O RegCM4 projetou no período de 2070-2098, um aumento de 2,6%

na porcentagem de ciclones que percorrem entre 2000 e 2500 km e um aumento de mesmo valor entre aqueles que percorrem de 3000 a 3500 km, durante o período de 2020-2050 (**Figura 70**).

No HadGEM2-ES, estas mesmas classes de distância percorrida sofreram as maiores alterações projetadas (**Figura 71**). Entre os anos de 2020-2050, o modelo indicou aumento de 2,3% na frequência de ciclones que percorrem de 2000 a 2500 km, enquanto que no período de 2070-2098, projeta-se aumento de 2,3% nos sistemas que percorrem de 3000 a 3500 km.

O RegCM4 projetou médias de 2526,0 km para 2020-2050 (-1,7%) e 2467,8 km para 2070-2098 (-4,0%; **Tabela 11**). No HadGEM2-ES, as médias projetadas foram de 2478,2 km no período de 2020-2050 (-4,3%) e 2584,8 km para o período de 2070-2098 (-0,2%; **Tabela 12**).

Em termos da velocidade média dos sistemas, o RegCM4 projetou uma queda de 8,2% na frequência de ciclones que alcançam entre 10 a 15 m/s de velocidade média, durante o período de 2020-2050 (**Figura 72**). Além disso, indicou também um aumento de 4,8% entre aqueles com velocidade média de 5 a 10 m/s, para os anos de 2070-2098. Cerca de 72,5% de todos os ciclones na RG1 apresentaram velocidade média entre 5 a 15 m/s durante o período de 2070-2098 (+4,2% em relação ao presente) e 62% durante 2020-2050 (-5,2%).

Quanto ao HadGEM2-ES, o modelo projetou mudanças em menor intensidade em ambos os períodos (**Figura 73**). Em 2020-2050 ocorre aumento de 3,1% nos ciclones com velocidade média de 20 a 25 m/s, enquanto que em 2070-2098 se projeta diminuição de 3,7% na frequência de ciclones com velocidade de até 5 m/s. Cerca de 65% de todos os ciclones apresentam, durante 2020-2050, velocidade entre 5 e 15 m/s (-2,4% em relação à média do presente) e 72% entre o mesmo intervalo de velocidade (+4,1%) durante 2070-2098.

Em relação às médias, o RegCM4 apresentou para o período de 2020-2050 uma média de 11,4 m/s (+0,9%) e 11,0 m/s no período de 2070-2098 (-2,7%; **Tabela 11**). Já o HadGEM2-ES obteve médias de 9,6 m/s em ambos os períodos futuros (+2,1%; **Tabela 12**).

No que se refere à vorticidade relativa inicial dos ciclones projetados pelo RegCM4, a maior diferença obtida em comparação com o presente ocorre entre os ciclones com vorticidade inicial de $-1,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ a $-2 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$, com um aumento de 6,4% durante o período de 2070-2098 (**Figura 74**). No mais, cerca de 77,7% de todos os sistemas no período de 2020-2050 apresentaram vorticidade inicial variando entre $-1,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ e $-2,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ (-1,2% em relação ao presente). Entre os anos de 2070-2098, tal porcentagem foi de 81,9% (+3,0%).

O HadGEM2-ES projeta uma alteração máxima de 9,7% a mais na frequência de ciclones com vorticidade inicial de até $-2 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$, entre os anos de 2070-2098 (**Figura 75**). Além disso, projetam-se aumentos de 5,0% e 3,8% na porcentagem de ciclones entre $-1,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ e $-2,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ de vorticidade inicial no período de 2020-2050 e 2070-2098, respectivamente.

A média da vorticidade inicial obtida pelo RegCM4 para os anos de 2020-2050 foi de $-2,2 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$, permanecendo a mesma do presente (**Tabela 11**). Já para o período de 2070-2098, a média cai atingindo o valor de $-2,1 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ (-4,5%). O HadGEM2-ES projetou média de $-2,0 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ nos anos de 2020-2050, sendo também a mesma simulada para o presente. O período de 2070-2098 obteve média de $-2,1 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ (+5,0%).

Por fim, a distribuição de frequência de ciclones quanto à vorticidade média total projetada pelo RegCM4 mostrou, como alteração mais relevante, um aumento de 6,4% em relação ao presente na porcentagem de sistemas com vorticidade total entre $-1,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ e $-2 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$, durante o período de 2070-2098 (**Figura 76**). Esta mesma mudança não foi projetada pelo modelo global, no entanto, o HadGEM2-ES indicou uma diminuição de 3,7% na porcentagem de ciclones com vorticidade média total variando entre $-4 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ e $-5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ (**Figura 77**).

No que diz respeito às médias, o RegCM4 projeta para o período de 2020-2050 uma média de $-3,2 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ (+3,2% em relação à média do presente) e $-3,0 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ para o período de 2070-2098 (-3,2%; **Tabela 11**). O HadGEM2-ES obtém média de $-3,0 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ para os anos de 2020-2050 (-3,2%) e $-3,1 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ para os anos de 2070-2098 (mesmo valor do presente; **Tabela 12**).

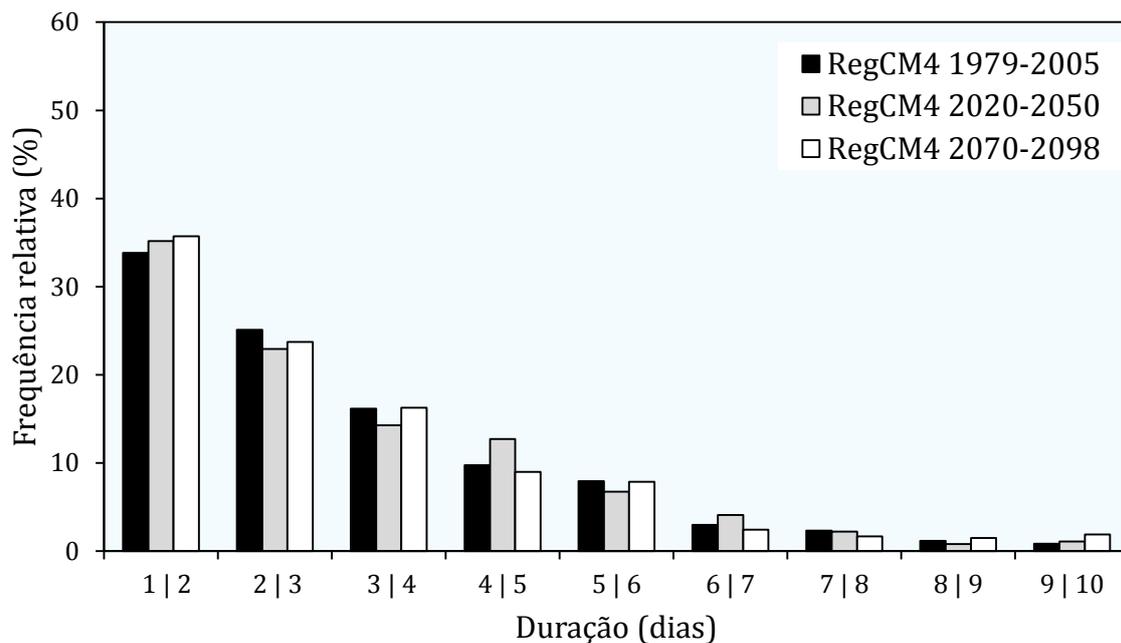


Figura 68 – Frequência relativa (%) dos ciclones com origem na RG1 quanto à duração (dias), simulada e projetada pelo RegCM4 e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$.

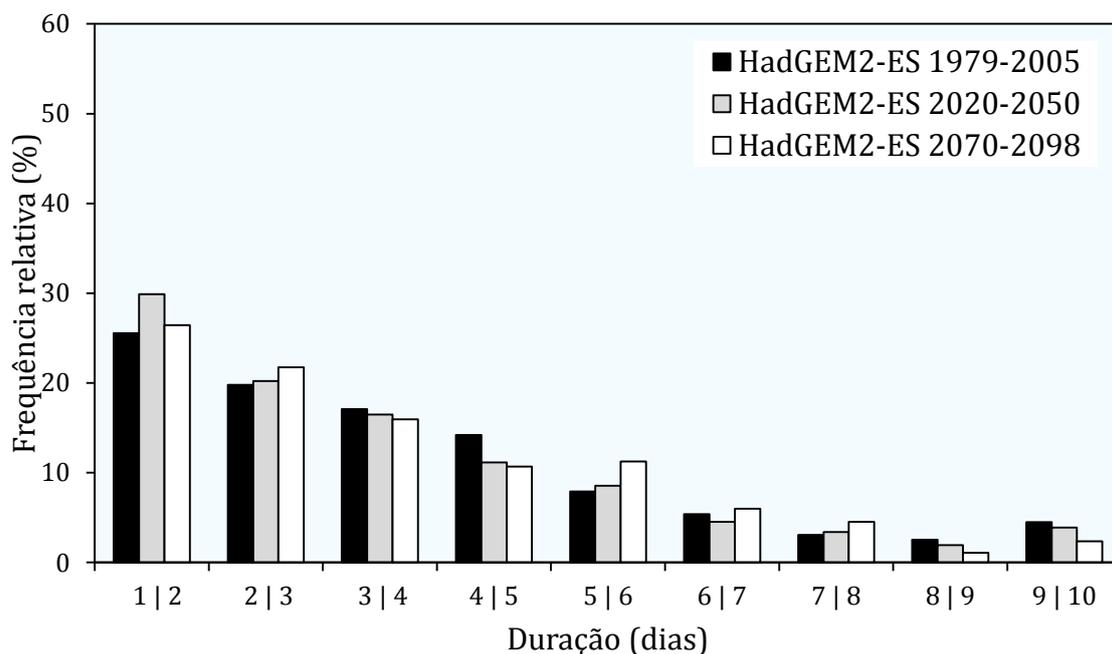


Figura 69 – Frequência relativa (%) dos ciclones com origem na RG1 quanto à duração (dias), simulada e projetada pelo HadGEM2-ES e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$.

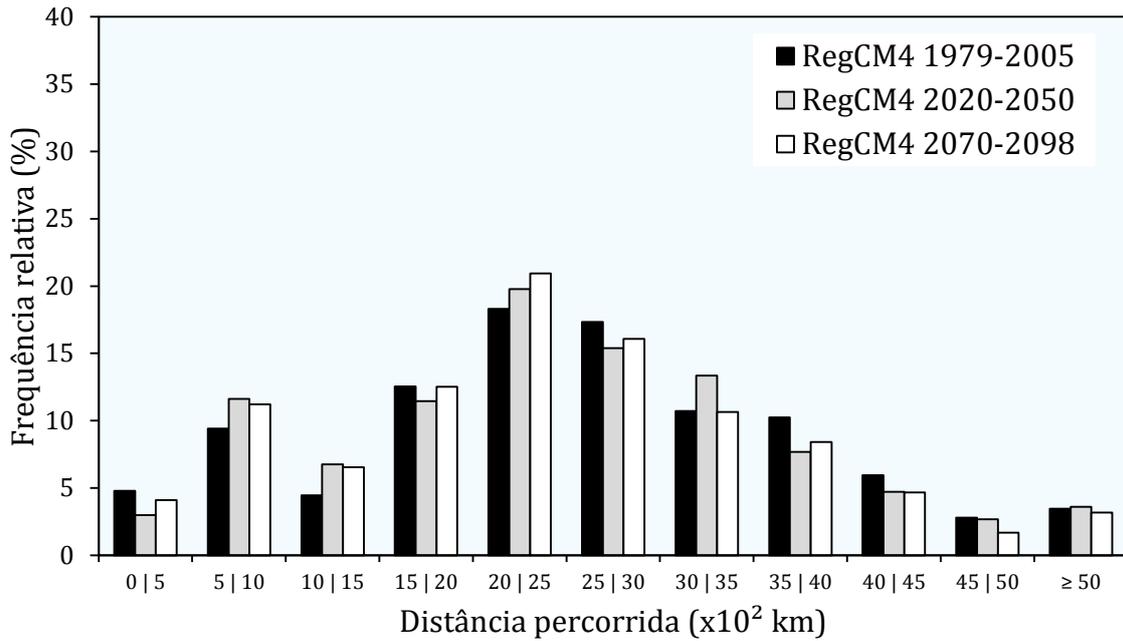


Figura 70 – Frequência relativa (%) dos ciclones com origem na RG1 quanto à distância percorrida (x10² km), simulada e projetada pelo RegCM4 e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$.

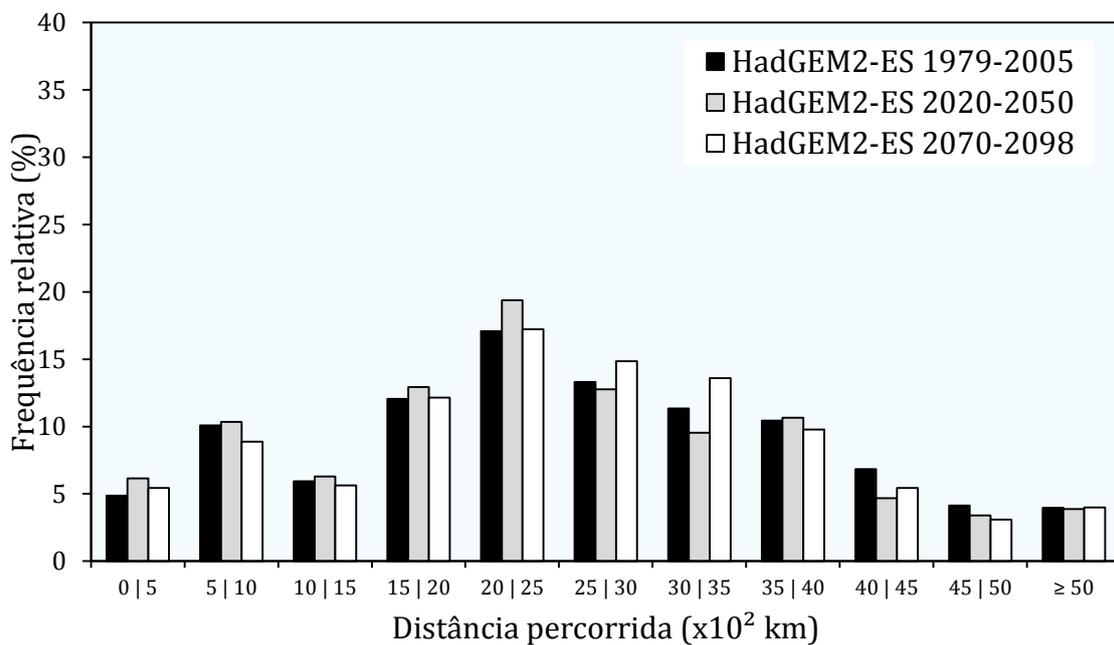


Figura 71 – Frequência relativa (%) dos ciclones com origem na RG1 quanto à distância percorrida (x10² km), simulada e projetada pelo HadGEM2-ES e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$.

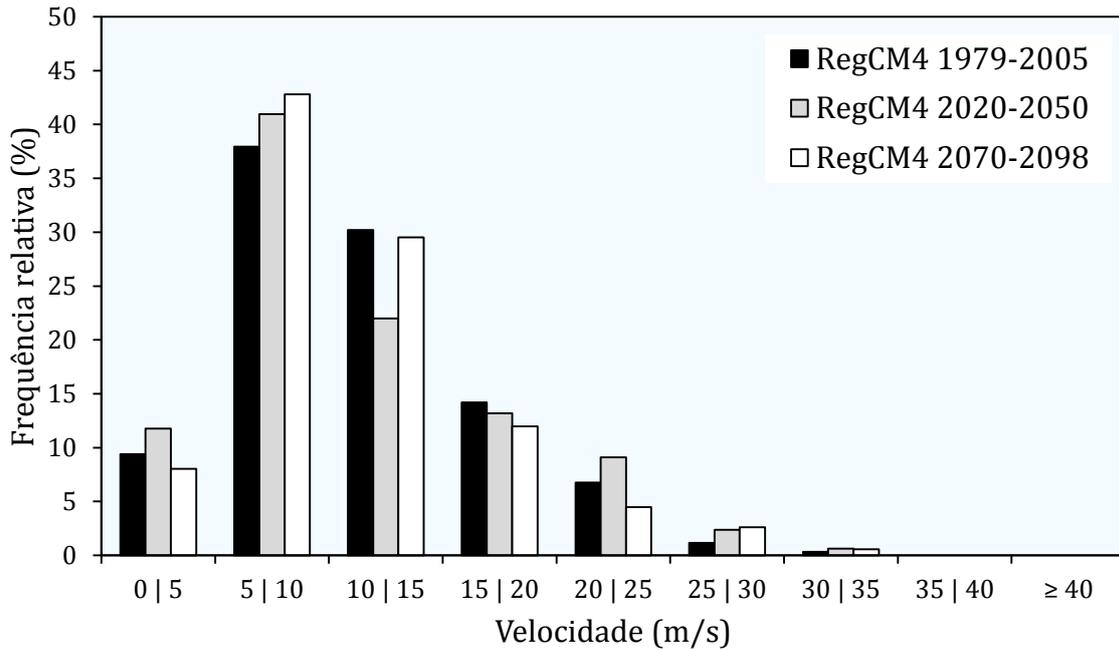


Figura 72 – Frequência relativa (%) dos ciclones com origem na RG1 quanto à velocidade média (m/s), simulada e projetada pelo RegCM4 e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$.

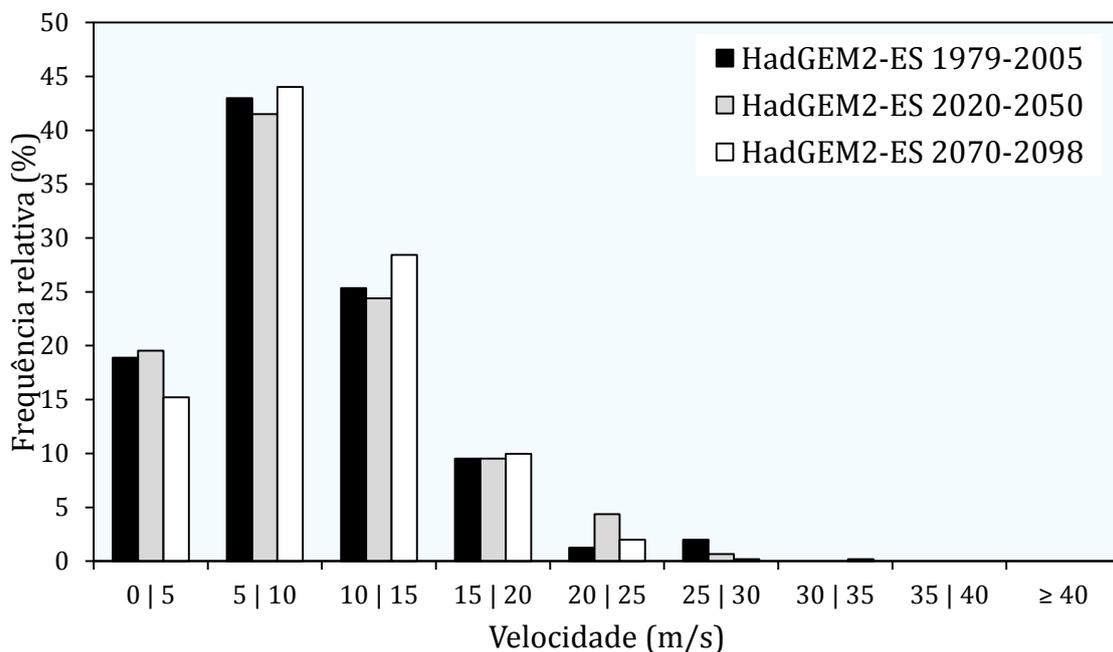


Figura 73 – Frequência relativa (%) dos ciclones com origem na RG1 quanto à velocidade média (m/s), simulada e projetada pelo HadGEM2-ES e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$.

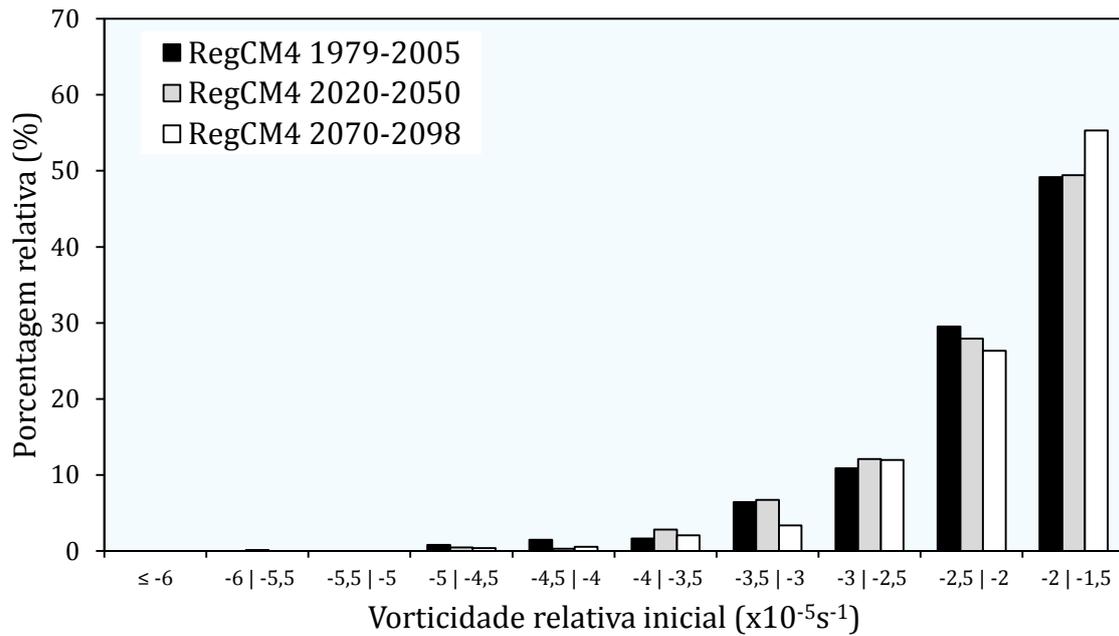


Figura 74 – Frequência relativa (%) dos ciclones com origem na RG1 quanto à vorticidade relativa inicial ($\times 10^{-5} s^{-1}$), simulada e projetada pelo RegCM4 e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$.

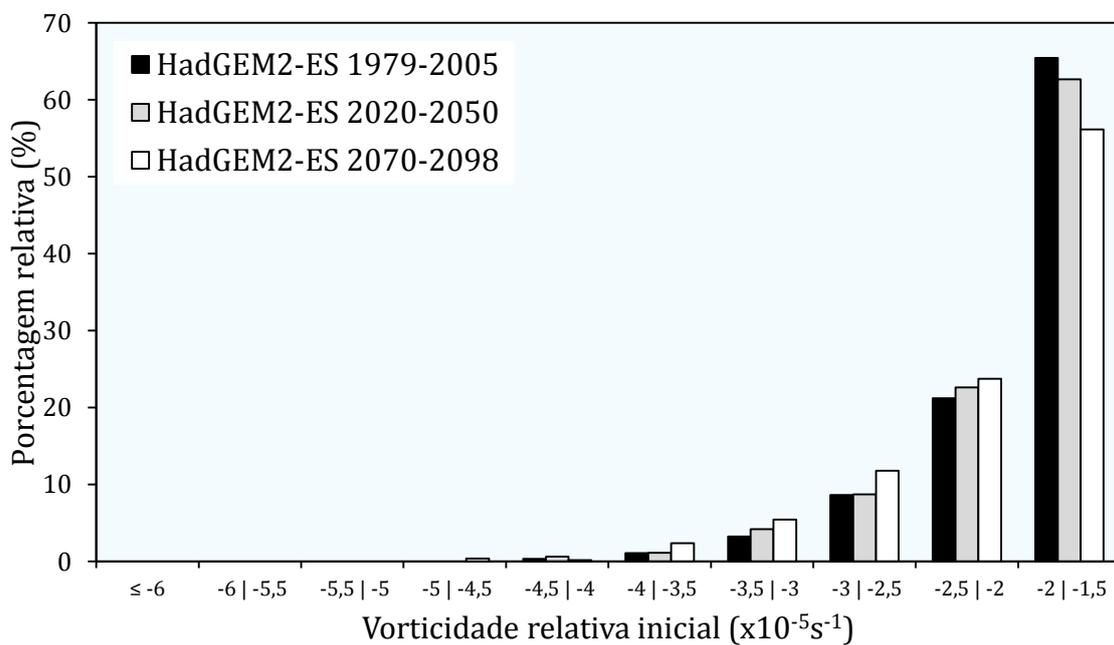


Figura 75 – Frequência relativa (%) dos ciclones com origem na RG1 quanto à vorticidade relativa inicial ($\times 10^{-5} s^{-1}$), simulada e projetada pelo HadGEM2-ES e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$.

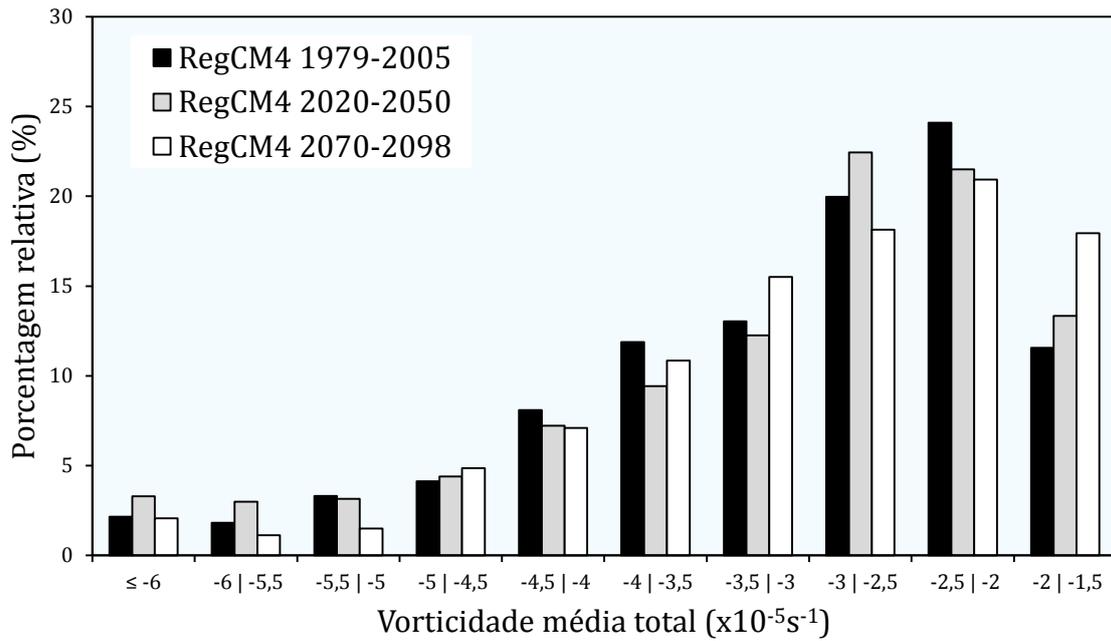


Figura 76 – Frequência relativa (%) dos ciclones com origem na RG1 quanto à vorticidade média total ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$), simulada e projetada pelo RegCM4 e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$.

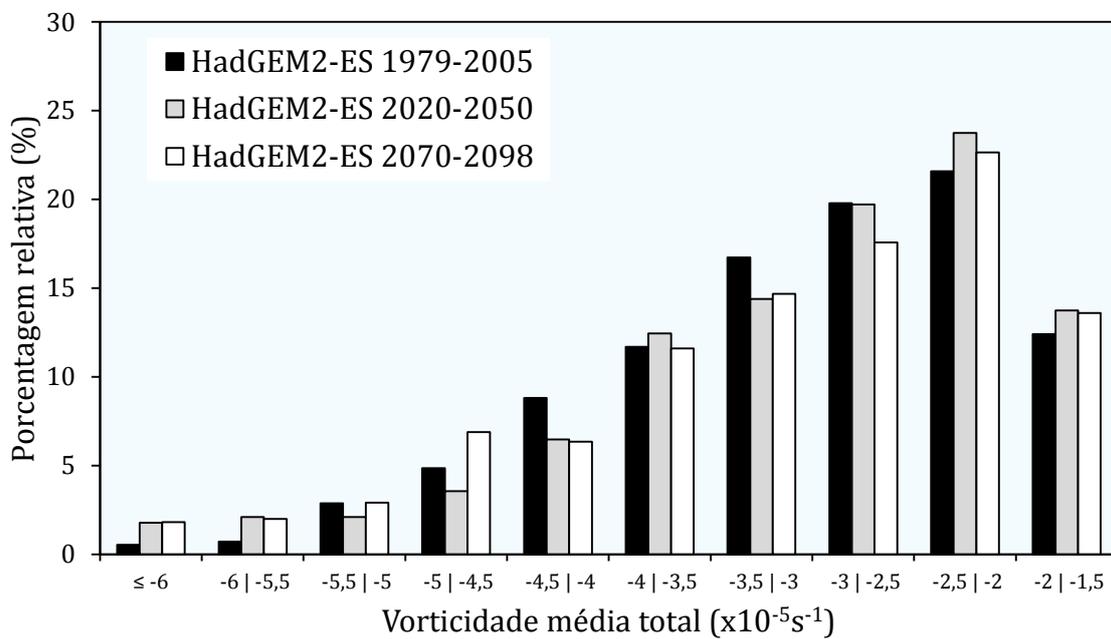


Figura 77 – Frequência relativa (%) dos ciclones com origem na RG1 quanto à vorticidade média total ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$), simulada e projetada pelo HadGEM2-ES e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$.

5.2.7.3 RG2: variabilidade sazonal

A sub-região RG2 foi aquela com as menores diferenças nas médias sazonais em relação ao período presente (**Figura 78a**). Considerando todos os ciclones, as quedas mais relevantes no valor da média ocorreram na estação de inverno entre os anos de 2020-2050 e no período 2070-2098, atingindo cerca de 7,7% no verão.

Quando analisados apenas os ciclones inicialmente intensos, as mudanças encontradas nos dois períodos futuros são maiores (**Figura 78b**). No cenário projetado para 2020-2050, nota-se uma queda de 19,7% e 22,2% na média do verão e outono, respectivamente. Já para o cenário de 2070-2098, a média de inverno e outono diminuem cerca de 13,8% e 12,8%.

A mesma análise para os ciclones com $\zeta \leq -1,5$ projetados pelo HadGEM2-ES indica uma diminuição de 13,3% no inverno durante o período de 2020-2050 mas um aumento de 6,1% no verão (**Figura 78c**). O período de 2070-2098 se mostrou praticamente igual, em termos de médias sazonais, ao do presente.

Considerando apenas os ciclones com $\zeta \leq -2,5$, o inverno no período de 2020-2050 apresentou média 9,0% inferior ao presente (**Figura 78d**). Já os anos de 2070-2098 foram mais notáveis por um aumento de 12,6% durante o inverno e queda de 7,6% na primavera.

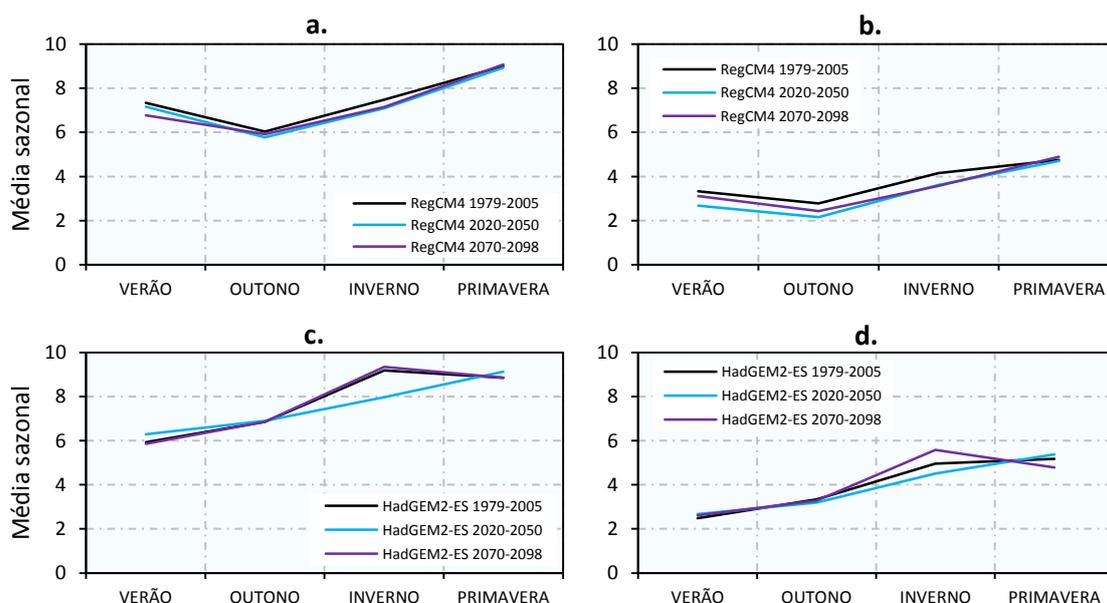


Figura 78 – Média sazonal de ciclones com origem na RG2 em todos os períodos, simulado e projetado pelo RegCM4 (a, b) e HadGEM2-ES (c, d). A coluna da esquerda

representa os sistemas que se iniciam com $\zeta \leq -1,5$; a coluna da direita os sistemas com $\zeta \leq -2,5$.

5.2.7.4 RG2: características médias

Na RG2, sub-região próxima à costa do Uruguai e Rio Grande do Sul, a maior diferença projetada pelo RegCM4 na frequência relativa dos ciclones em função da duração foi devido à uma queda de 1,1% na porcentagem de sistemas que duram de 5 a 6 dias, durante o período de 2020-2050 (**Figura 79**). Cerca de 65,5% e 63,8% de todos os ciclones originários da região apresentam duração de 1 a 3 dias nos períodos 2020-2050 (+0,3% em relação ao presente) e 2070-2098 (-1,7%), respectivamente.

A projeção realizada pelo HadGEM2-ES indica um aumento máximo de 1,5% na porcentagem de ciclones com até 2 dias de vida durante os anos de 2070-2098 e uma diminuição de 1,5% sobre os sistemas com 2 a 3 dias de duração, nos anos de 2020-2050 (**Figura 80**). Da mesma forma que o encontrado no RegCM4, os ciclones mais frequentes são aqueles com duração de 1 a 3 dias, atingindo cerca de 55,7% no período de 2020-2050 (-0,2%) e 56,5% no período de 2070-2098 (+0,6%).

A média da duração projetada pelo RegCM4 foi de 2,7 dias em 2020-2050 (-3,6%) e 2,8 dias em 2070-2098 (mesmo valor do presente; **Tabela 11**). O HadGEM2-ES apresentou média de 3,1 dias em 2020-2050 (mesmo valor do presente) e 3,0 dias em 2070-2098 (-3,2%; **Tabela 12**).

Dentre as modificações mais consideráveis em relação à distância percorrida projetadas para os períodos futuros, o RegCM4 evidenciou uma diminuição de 2,9% na porcentagem de ciclones com distância percorrida entre 3500 e 4000 km no período de 2070-2098, além de um aumento, no mesmo período, de 2,0% entre aqueles que percorrem entre 2500 e 3000 km (**Figura 81**). No período de 2020-2050, projeta-se que cerca de 62,5% de todos os ciclones da região perfazem uma distância de 2000 a 3500 km (-0,8% em comparação ao presente), enquanto que no período de 2070-2098, essa porcentagem foi de 65,2% (+1,9%).

A projeção do HadGEM2-ES indicou como mudança mais expressiva um aumento de 2,5% na frequência relativa dos ciclones com distância percorrida entre 3000 e 3500 km (**Figura 82**). No geral, cerca de 65,7% dos sistemas nos anos de 2020-2050 percorrem

distância entre 2000 e 3500 km (-0,9%). Já entre os anos de 2070-2098, essa porcentagem é de 67,0% (+0,4%).

As médias projetadas pelo RegCM4 foram de 2974,5 km, para o período de 2020-2050 (-3,1%), e 2982,2 km para o período de 2070-2098 (-2,0%; **Tabela 11**). O HadGEM2-ES projetou média de 3096,3 km entre os anos de 2020-2050 (+2,3%), e média de 3121,4 km entre 2070-2098 (+3,1%; **Tabela 12**).

No que concerne à velocidade, o RegCM4 indicou para 2070-2098 um aumento de 3,1% na porcentagem de sistemas com velocidade média de 5 a 10 m/s, e uma diminuição, para o mesmo período, de 2,7% naqueles com velocidade de 15 a 20 m/s (**Figura 83**). Em termos totais, cerca de 80,6% dos ciclones entre os anos de 2020-2050 apresentam velocidade média de 5 a 20 m/s (+2,0%). Em 2070-2098, a mesma porcentagem é de 79,8% (+1,1%).

Quanto ao HadGEM2-ES, o modelo projetou um aumento de 2,7% na frequência de ciclones com velocidade média entre 15 e 20 m/s, no período de 2070-2098 (**Figura 84**). Além disso, uma diminuição mais expressiva de 3,8% foi projetada para 2020-2050 entre os ciclones com velocidade de 10 a 15 m/s. Do total de ciclones, 85,2% se caracterizam por alcançar velocidade média entre 5 a 20 m/s, no período de 2020-2050 (-0,6%). Já para o período 2070-2098, essa porcentagem é de 85,4% (-0,4%).

Por fim, as médias obtidas pelo RegCM4 quanto à velocidade foram de 14,3 m/s para os dois períodos futuros (-3,4%; **Tabela 11**), enquanto que o HadGEM2-ES projetou média de 13,6 m/s para ambos os períodos (+2,3%; **Tabela 12**).

Na análise da distribuição de frequências dos ciclones em relação à vorticidade relativa inicial, o RegCM4 projetou como mudança mais relevante um aumento de 5,3% na porcentagem de sistemas com vorticidade de $-2 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ a $-2,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$, durante os anos de 2020-2050 (**Figura 85**). Aproximadamente 68,5% de todos os ciclones projetados no período de 2020-2050 apresentaram vorticidade relativa inicial variando entre $-1,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ e $-3 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ (+2,9%). Entre os anos de 2070-2098, a porcentagem para os mesmos limites de vorticidade relativa inicial foi de 70,9% (+2,4%).

O HadGEM2-ES, por sua vez, projetou no período de 2020-2050 um aumento de 3,3% nos ciclones com vorticidade relativa inicial de $-3 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ a $-3,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$, além de uma diminuição para o mesmo período de 3,6% naqueles que variam entre -2,5 a -3

(**Figura 86**). De forma inferior ao modelo regional, o HadGEM2-ES projeta uma percentagem de 63,5% dos ciclones com vorticidade relativa inicial entre $-1,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ e $-3 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ (-3,6%), durante os anos de 2020-2050, e 65,0% para os anos de 2070-2098 (-2,0%).

Em relação às médias, o HadGEM2-ES projetou uma vorticidade relativa inicial média de $-2,8 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ para ambos os períodos (mesmo valor simulado no presente; **Tabela 12**). Média bastante próxima foi projetada pelo RegCM4 nos dois períodos: $-2,7 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ (-3,6%; **Tabela 11**).

Enfim, quanto à vorticidade média total, o RegCM4 apresentou maiores diferenças ao longo do período de 2020-2050, onde se projetou quedas de 2,8% e 2,7% na percentagem de ciclones com vorticidade média total de $-6 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ a $-5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$, e $-5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ a $-4 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$, respectivamente (**Figura 87**).

O HadGEM2-ES projetou uma diminuição mais considerável, cerca de 4,1%, durante o período de 2070-2098, entre os ciclones com vorticidade média total de $-3 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ a $-3,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ (**Figura 88**). Por outro lado, projeta-se um aumento de 1,4% na percentagem de ciclones variando entre $-2,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ e $-3 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$, durante os anos de 2020-2050.

O modelo global indicou médias de $-4,0 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ para o período de 2020-2050 (mesmo valor do presente) e $-4,2 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ para 2070-2098 (+5,0%; **Tabela 12**). O modelo regional projetou média de $-3,7 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ para os anos de 2020-2050 (-5,1%) e $-3,8 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ para 2070-2098 (-2,6%; **Tabela 11**).

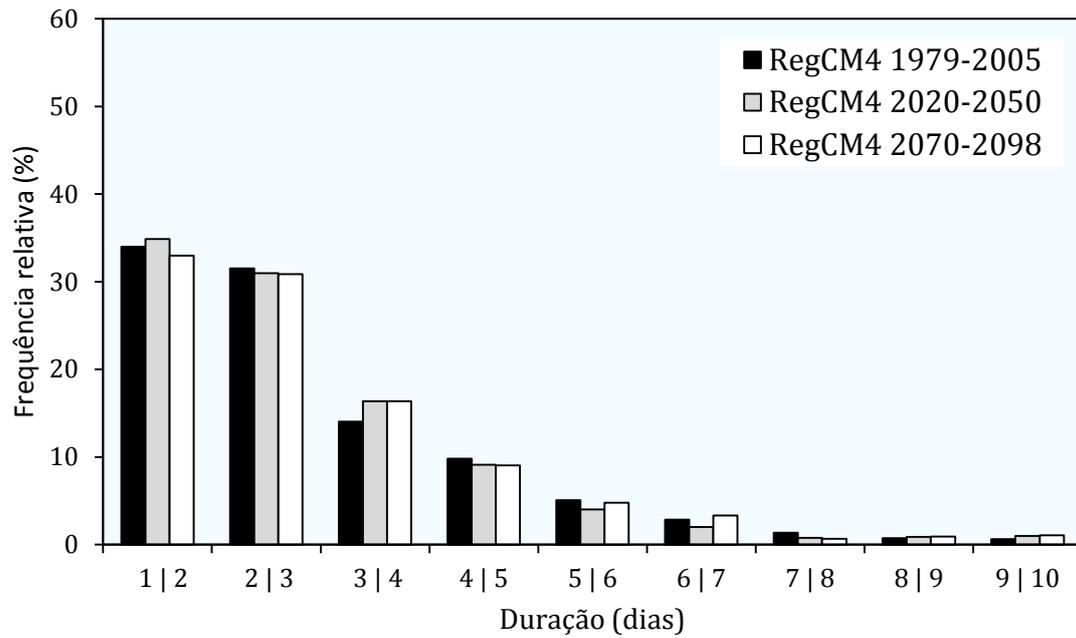


Figura 79 – Frequência relativa (%) dos ciclones com origem na RG2 quanto à duração (dias), simulada e projetada pelo RegCM4 e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$.

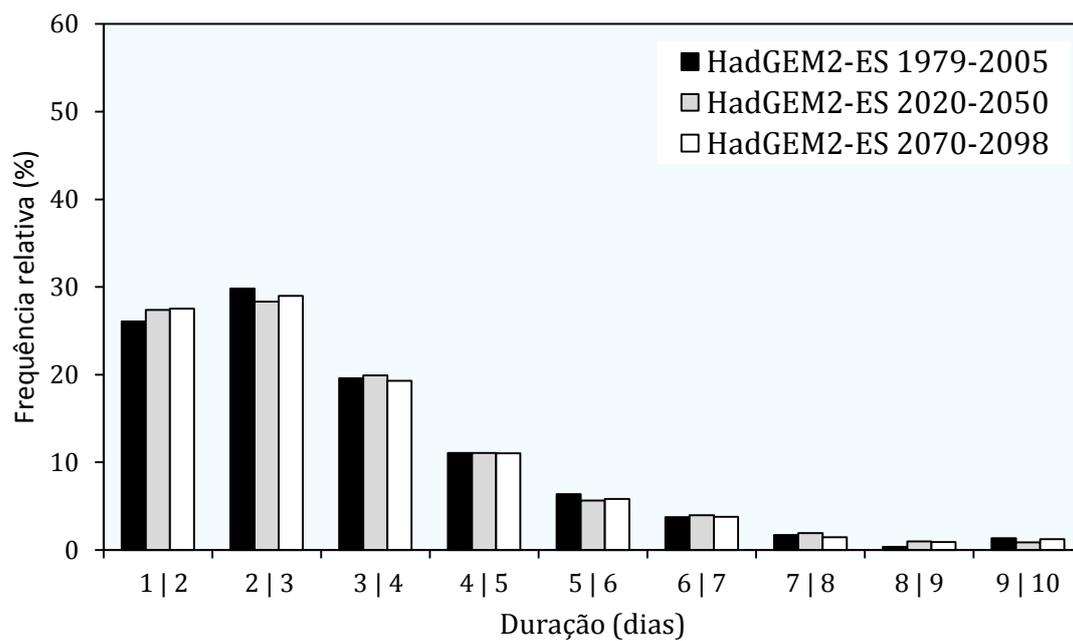


Figura 80 – Frequência relativa (%) dos ciclones com origem na RG1 quanto à duração (dias), simulada e projetada pelo HadGEM2-ES e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$.

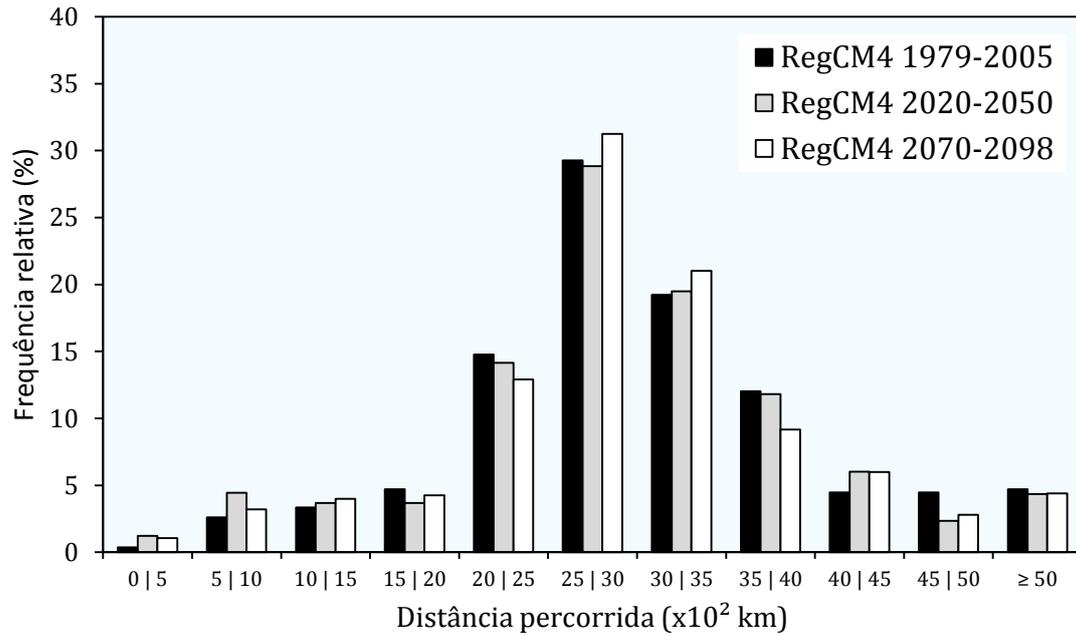


Figura 81 – Frequência relativa (%) dos ciclones com origem na RG2 quanto à distância percorrida (x10² km), simulada e projetada pelo RegCM4 e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$.

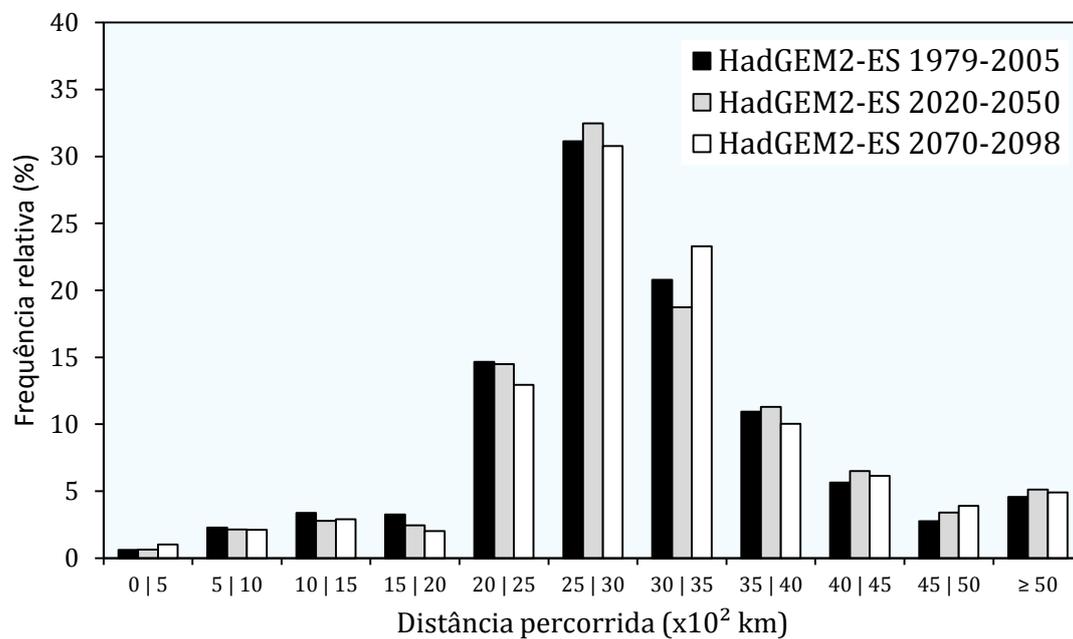


Figura 82 – Frequência relativa (%) dos ciclones com origem na RG2 quanto à distância percorrida (x10² km), simulada e projetada pelo HadGEM2-ES e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$.

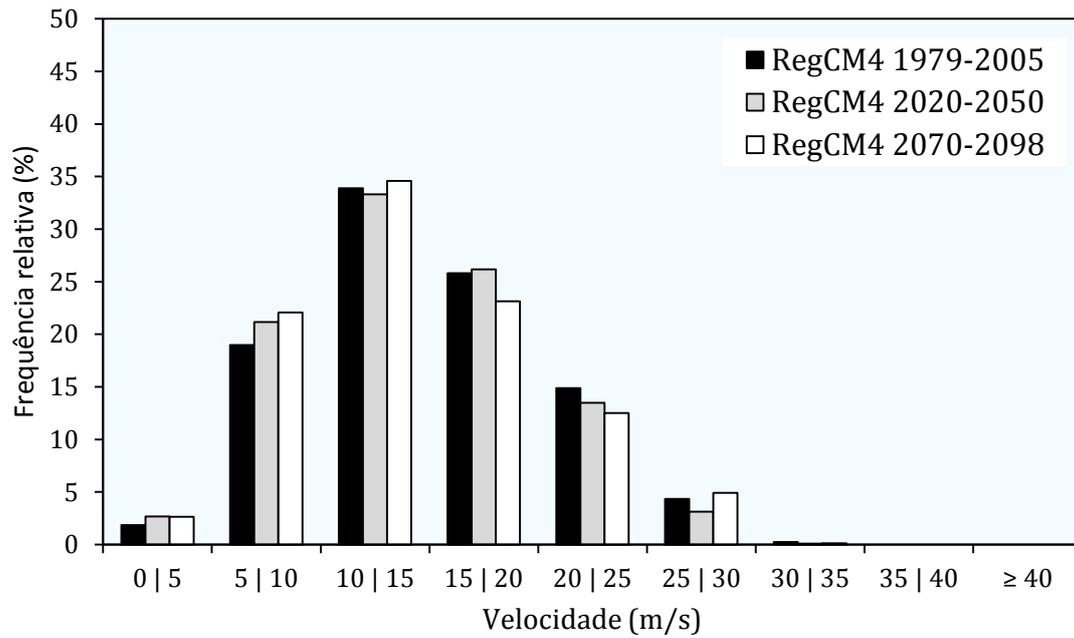


Figura 83 – Frequência relativa (%) dos ciclones com origem na RG2 quanto à velocidade média (m/s), simulada e projetada pelo RegCM4 e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$.

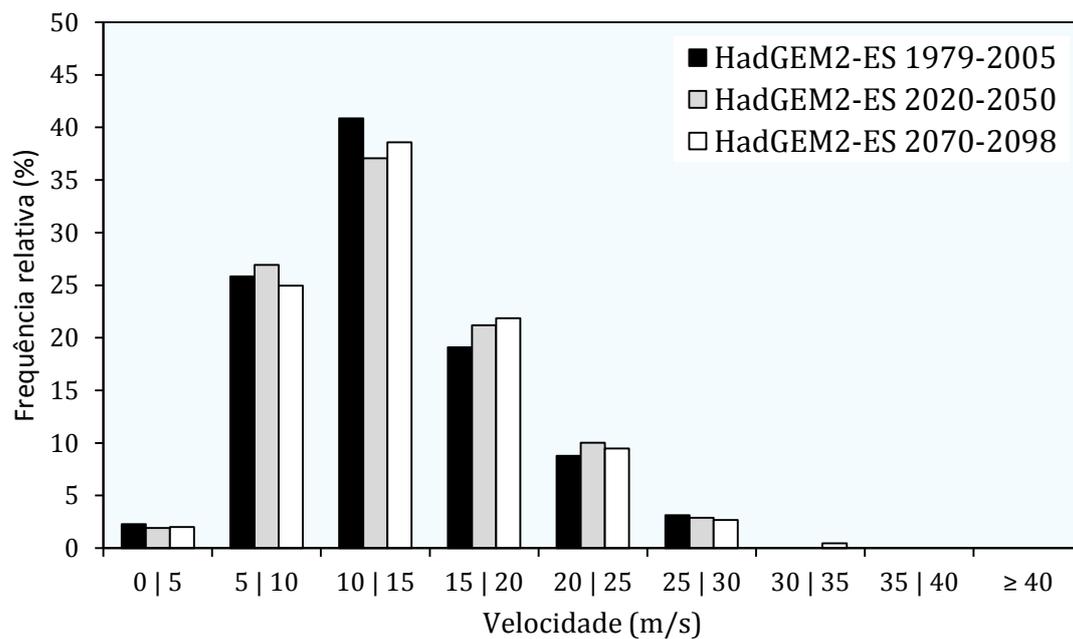


Figura 84 – Frequência relativa (%) dos ciclones com origem na RG2 quanto à velocidade média (m/s), simulada e projetada pelo HadGEM2-ES e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$.

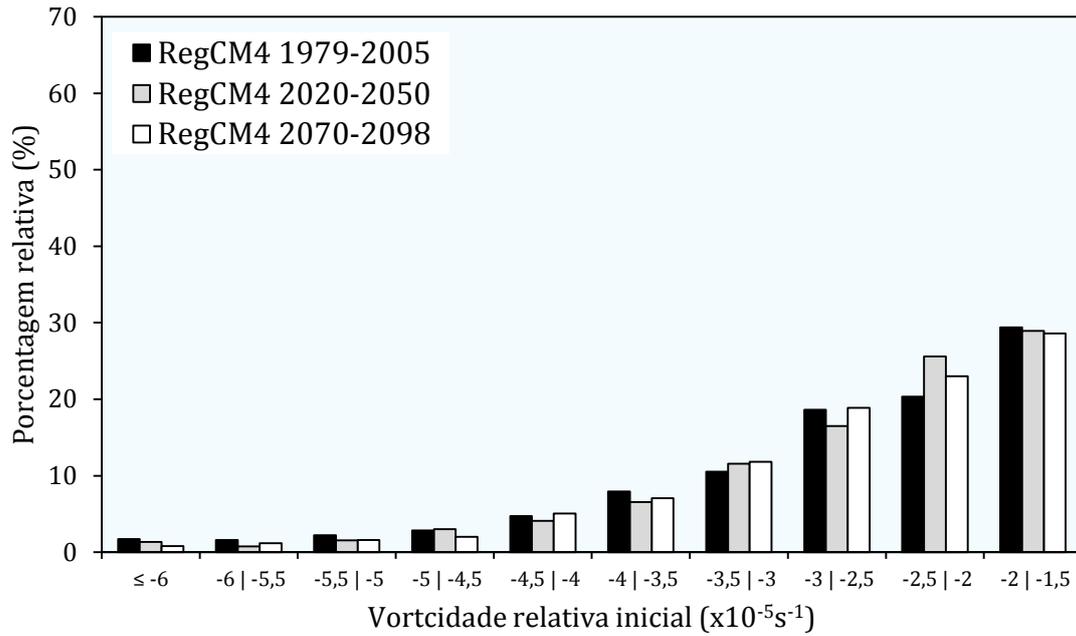


Figura 85 – Frequência relativa (%) dos ciclones com origem na RG2 quanto à vorticidade relativa inicial ($\times 10^{-5} \text{s}^{-1}$), simulada e projetada pelo RegCM4 e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$.

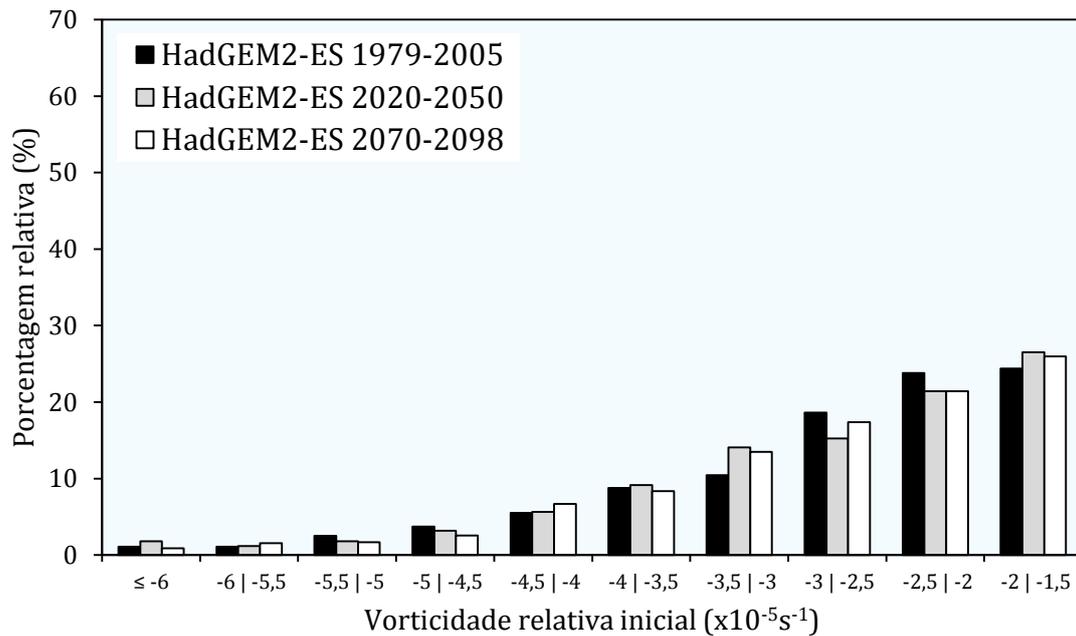


Figura 86 – Frequência relativa (%) dos ciclones com origem na RG1 quanto à vorticidade relativa inicial ($\times 10^{-5} \text{s}^{-1}$), simulada e projetada pelo HadGEM2-ES e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$.

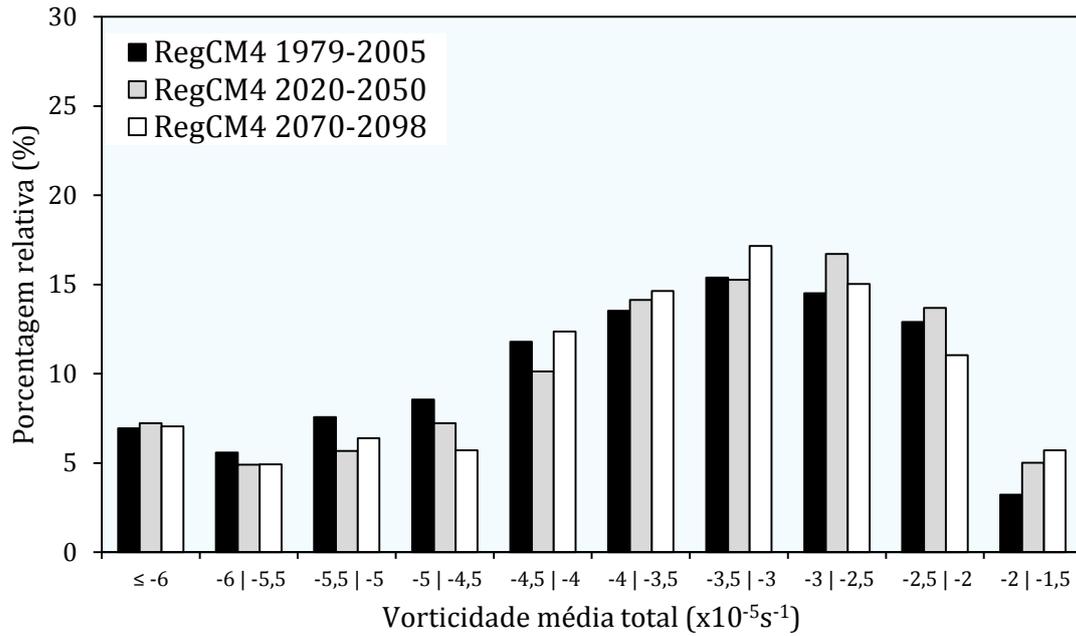


Figura 87 – Frequência relativa (%) dos ciclones com origem na RG2 quanto à vorticidade média total ($\times 10^{-5} \text{s}^{-1}$), simulada e projetada pelo RegCM4 e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$.

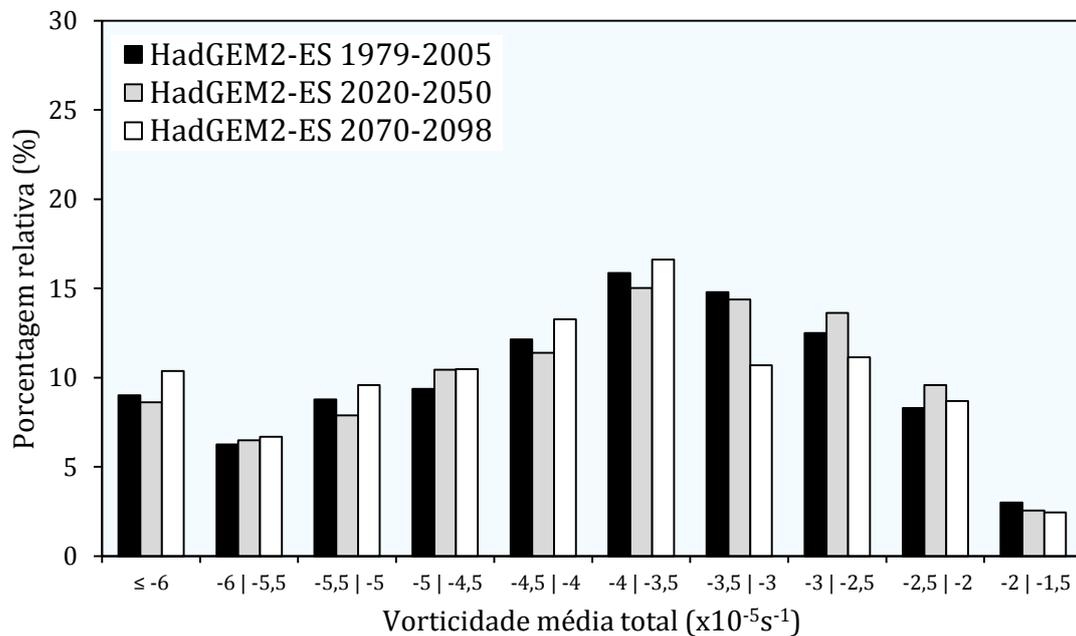


Figura 88 – Frequência relativa (%) dos ciclones com origem na RG2 quanto à vorticidade média total ($\times 10^{-5} \text{s}^{-1}$), simulada e projetada pelo HadGEM2-ES e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$.

5.2.7.5 RG3: variabilidade sazonal

Por fim, a sub-região RG3 apresentou mudanças consideráveis na média sazonal, mas não tão intensas quanto a RG1. Considerando todos os sistemas ($\zeta \leq -1,5$), o RegCM4 apresentou queda de 10,8% na média do verão e 6,5% no inverno durante o período de 2020-2050 (**Figura 89a**). No período posterior, as quedas mais notáveis foram de 9,9% na média da primavera e 13,3% no inverno.

O HadGEM2-ES projetou quedas no período 2020-2050 de 9,2% nas médias do outono e primavera, enquanto que entre os anos de 2070-2098 as médias do inverno e primavera caíram cerca de 14,2% e 15,8%, respectivamente (**Figura 89c**).

Na análise para os sistemas inicialmente intensos ($\zeta \leq -2,5$), a projeção do RegCM4 indica queda de 19,9% e 16,8% na média da primavera e outono, respectivamente, para o período de 2020-2050 (**Figura 89b**). Entre 2070-2098 há uma maior diminuição também nessas estações, sendo cerca de 30,3% no outono e 24,5% na primavera. No verão ocorre um aumento de 5,9% na média de ciclones.

O HadGEM2-ES projetou uma diminuição de 22,2% na média para a estação de inverno no período de 2020-2050, assim como quedas de 15% e 14,4% no verão e primavera (**Figura 89d**). Para o cenário de 2070-2098, as maiores quedas no valor da média ocorrem nas estações do inverno (33,5%), primavera (20,4%) e verão (18,2%).

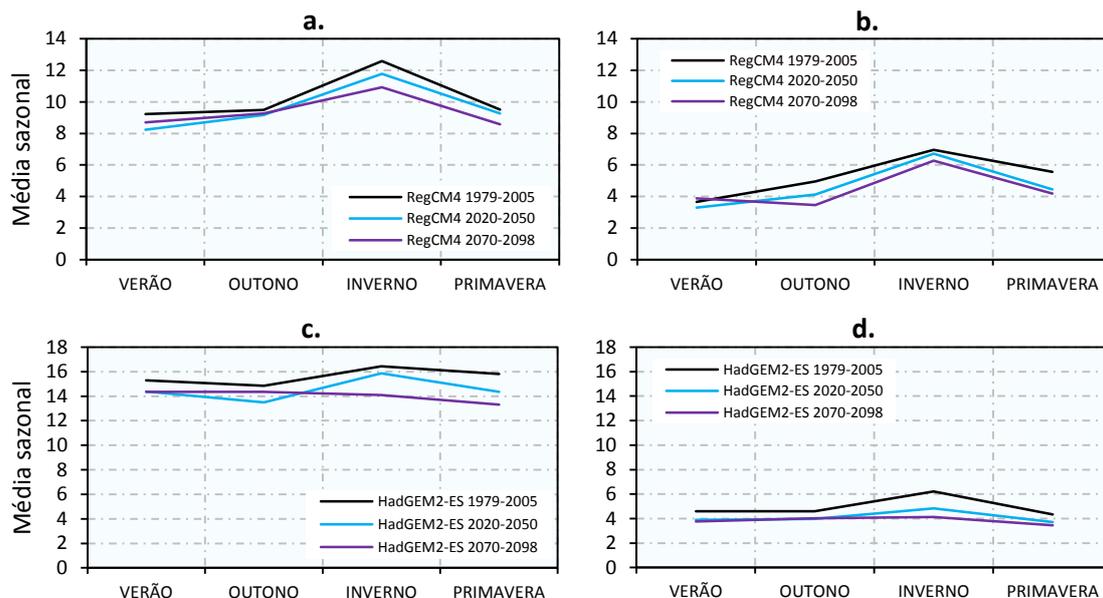


Figura 89 – Média sazonal de ciclones com origem na RG3 em todos os períodos, simulados e projetados pelo RegCM4 (a, b) e HadGEM2-ES (c, d). A coluna da esquerda representa os sistemas com $\zeta \leq -1,5$; a coluna da direita os sistemas com $\zeta \leq -2,5$.

5.2.7.6 RG3: características médias

Na RG3, sub-região vizinha à costa sudeste da Argentina, o modelo RegCM4 projetou durante os anos de 2070-2098 um aumento de 2,8% na porcentagem de ciclones com duração entre 3 e 4 dias (**Figura 90**). De todos os sistemas originários da região durante o período de 2020-2050, cerca de 74,4% apresentam duração de até 3 dias (+0,2% em relação ao presente). No período posterior, 2070-2098, esses ciclones perfazem um total de 73,9% (-0,3%).

O HadGEM2-ES teve como diferenças mais relevantes uma queda de 4,8%, entre os anos de 2070-2098, na porcentagem de ciclones com duração entre 2 a 3 dias, além de um aumento de 2,4% naqueles com 1 a 2 dias de duração (**Figura 91**). Aproximadamente 75,2% dos ciclones no período de 2020-2050 apresentam ciclo de vida de até 3 dias (mesmo valor do presente), enquanto que no período de 2070-2098, essa porcentagem foi de 72,8% (-2,4%).

As médias obtidas através do projetado pelo RegCM4 foram de 2,4 dias para os anos de 2020-2050 (mesmo valor do presente), e 2,3 dias para 2070-2098 (-4,2%; **Tabela 11**). O HadGEM2-ES apresentou média de 2,3 dias para 2020-2050 (-4,2%) e 2,4 dias para os anos de 2070-2098 (mesmo valor do presente; **Tabela 12**).

No que se refere à distância percorrida, o RegCM4 projetou uma diminuição de 2,2% na frequência relativa de ciclones que percorrem distâncias de 1500 a 2000 km, entre os anos de 2020-2050, além de um aumento de 1,8% nos sistemas com 2000 a 25000 km de distância percorrida, entre os anos de 2070-2098 (**Figura 92**).

Já o HadGEM2-ES projetou, como mudanças futuras mais relevantes, um aumento nos anos de 2020-2050 de 1,7% entre aqueles que percorrem 2500 a 3000 km, e diminuição de 3,0% na porcentagem dos ciclones com 3000 a 3500 km de distância percorrida (**Figura 93**).

No período de 2020-2050, o RegCM4 projeta um valor médio de 2961,1 km (-0,6%), enquanto que para o período de 2070-2098 a média cai para 2910,5 km (-1,9%; **Tabela 11**). No HadGEM2-ES, a média é de 2679,6 km no primeiro período futuro (-0,4%) e 2651,7 km para o período mais distante (-1,4%; **Tabela 12**).

Em relação à velocidade, o RegCM4 projetou um aumento de 2,3% entre os ciclones com velocidade de 10 a 15 m/s, durante os anos de 2070-2098 (**Figura 94**). Não obstante, uma diminuição de 1,9% é indicada para os anos de 2020-2050 na porcentagem de ciclones com velocidade entre 20 e 25 m/s. Cerca de 68,5% de todos os sistemas durante 2020-2050 apresentam velocidade média variando entre 10 a 20 m/s (+2,5% em relação ao presente). No período de 2070-2098, essa porcentagem é de 67,4% (+1,4%).

O HadGEM2-ES projeta um aumento de 2,5% e 2,8% nos ciclones com velocidade entre 5 a 10 m/s, entre os anos de 2020-2050 e 2070-2098, respectivamente (**Figura 95**). Uma diminuição em 2070-2098 de 2,9% também é projetada para a classe de velocidade de 15 a 20 m/s. Cerca de 68,6% de todos os sistemas alcançam velocidade média entre 10 a 20 m/s, durante o período de 2020-2050 (-3,4%). Enquanto que a porcentagem é de 67,6% para o período de 2070-2098 (-4,4%).

O modelo regional apresentou como média para 2020-2050 um valor de 15,9 m/s (-1,2%) e 16,0 m/s para 2070-2098 (-0,6%; **Tabela 11**). Já o modelo global, apresentou média de 14,3 m/s para 2020-2050 (-0,7%) e 14,2 m/s para 2070-2098 (-1,4%; **Tabela 12**).

No que tange à vorticidade relativa inicial, O RegCM4 projetou duas quedas mais consideráveis em ambos os períodos de estudo (**Figura 96**). Uma queda de 3,8% ocorreu na porcentagem de ciclones com vorticidade relativa inicial de $-3 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ a $-3,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$,

durante o período de 2020-2050 e uma queda de 3,4% na mesma variação de vorticidade em 2070-2098. Além disso, dois aumentos também foram projetados, sendo um aumento durante os anos de 2020-2050 de 3,0% nos ciclones com vorticidade relativa inicial de $-2 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ a $-2,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ e um aumento de 3,8% na mesma classe de vorticidade durante 2070-2098. Em 2020-2050, projeta-se uma porcentagem de 69,6% de ciclones com vorticidade relativa inicial entre $-1,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ e $-3 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ (+2,9%), enquanto que em 2070-2098 a porcentagem sobe para 72,0% (+5,3%).

Por outro lado, o HadGEM2-ES projetou um aumento de 3% na frequência relativa de ciclones com vorticidade relativa inicial de $-1,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ a $-2 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ em 2070-2098, e uma diminuição de 2,1% entre aqueles com vorticidade de $-2,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ a $-3 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$, nos anos de 2020-2050 (**Figura 97**). Cerca de 85,3% de todos os ciclones apresentam vorticidade inicial $-1,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ a $-3 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$, durante 2020-2050 (+0,8%). Já em 2070-2098, essa porcentagem sobe para 88,1% (+3,5%).

O RegCM4 projetou média de $-2,7 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ em ambos os períodos futuros (mesmo valor do presente; **Tabela 11**). O HadGEM2-ES apresentou média futura de $-2,3 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ para todos os períodos (mesmo valor do presente; **Tabela 12**).

Por fim, a análise da vorticidade média total indicou algumas mudanças consideráveis. O RegCM4 projetou um aumento de 5,2% na porcentagem de ciclones com vorticidade média total variando entre $-2 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ e $-2,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$, nos anos de 2070-2098 (**Figura 98**). Além disso, projetou-se também uma diminuição de 3% nos ciclones com intensidade média total de $-3,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ a $-4 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$, ao longo do período de 2070-2098.

Em relação ao HadGEM2-ES, este projetou como mudanças mais relevantes, uma diminuição em 2070-2098 de 3,8% na porcentagem de ciclones com vorticidade média total de $-3,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ a $-4 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$, além de um aumento em 2070-2098 de 3,2% nos ciclones que variam entre $-2 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ a $-2,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ (**Figura 99**).

O RegCM4 projetou uma média de $-3,8 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ em 2020-2050 (-2,6%) e média de $-3,7 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ em 2070-2098 (-5,1%; **Tabela 11**). Já o HadGEM2-ES projetou média de $-3,5 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ em 2020-2050 (mesmo valor do presente) e $-3,4 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ em 2070-2098 (-2,9%; **Tabela 12**).

Por fim, as **Tabelas 13** e **14** apresentam as mesmas médias das características nas três sub-regiões e para os três períodos estudados, porém, considerando apenas os ciclones que se iniciaram com $\zeta \leq -2,5$.

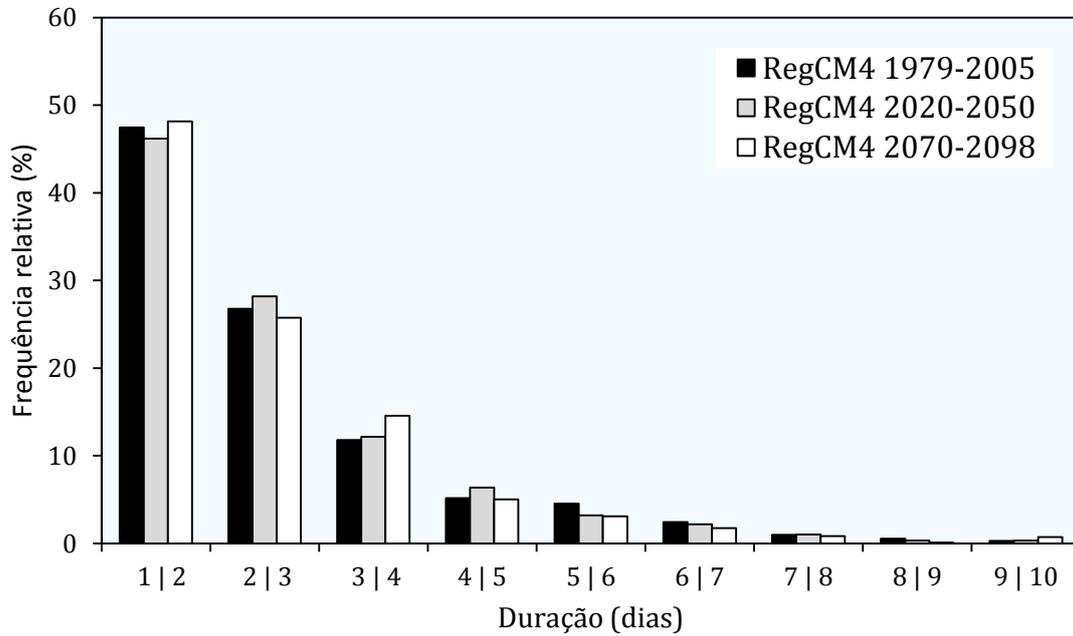


Figura 90 – Frequência relativa (%) dos ciclones com origem na RG3 quanto à duração (dias), simulada e projetada pelo RegCM4 e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$.

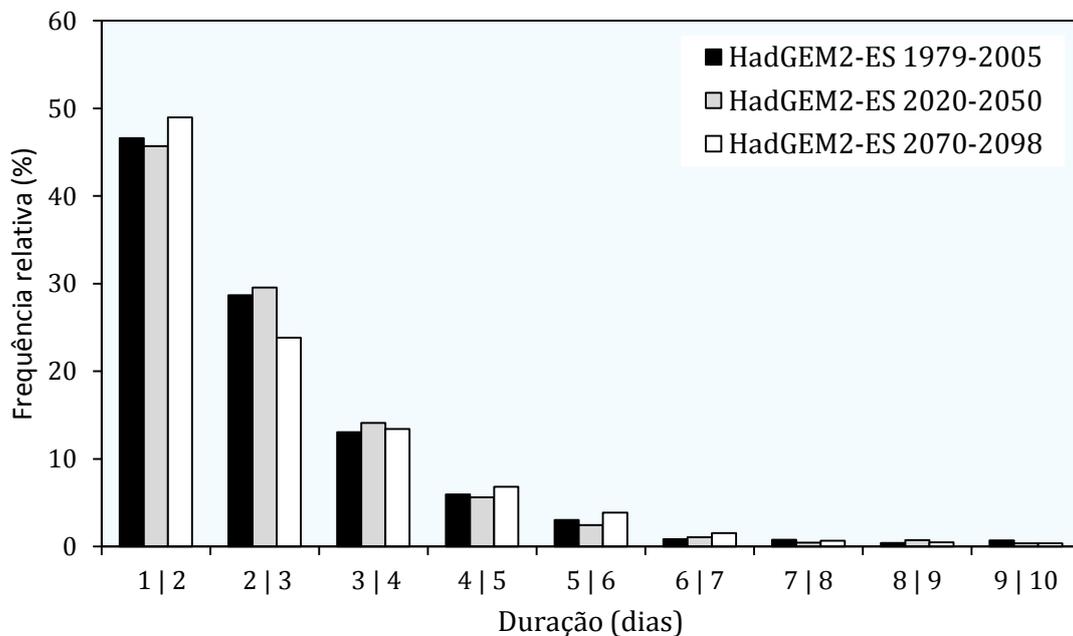


Figura 91 – Frequência relativa (%) dos ciclones com origem na RG3 quanto à duração (dias), simulada e projetada pelo HadGEM2-ES e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$.

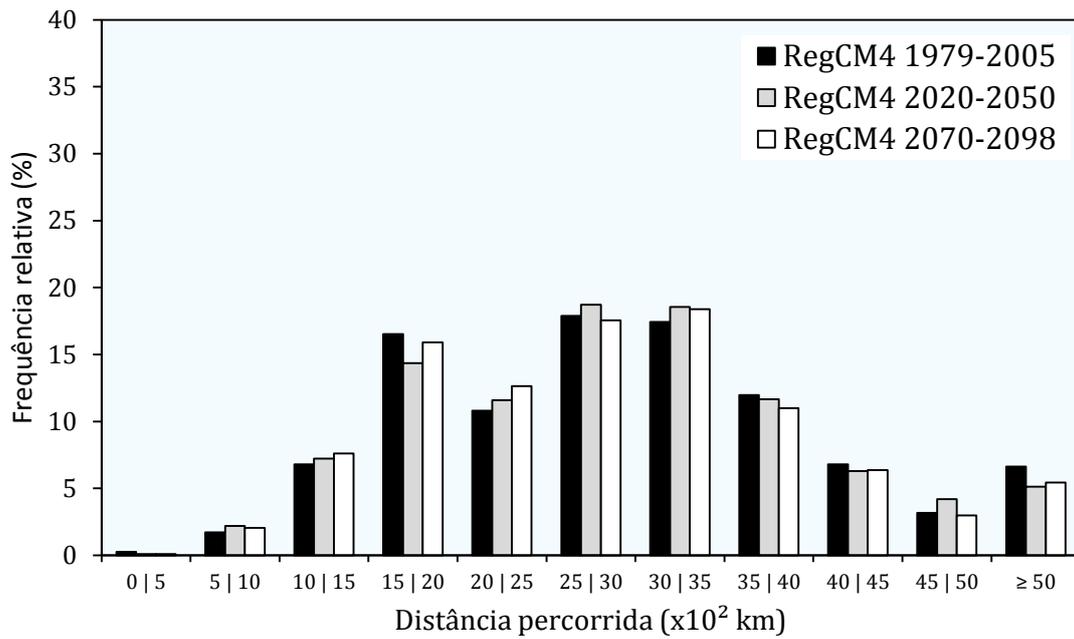


Figura 92– Frequência relativa (%) dos ciclones com origem na RG3 quanto à distância percorrida (x10² km), simulada e projetada pelo RegCM4 e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$.

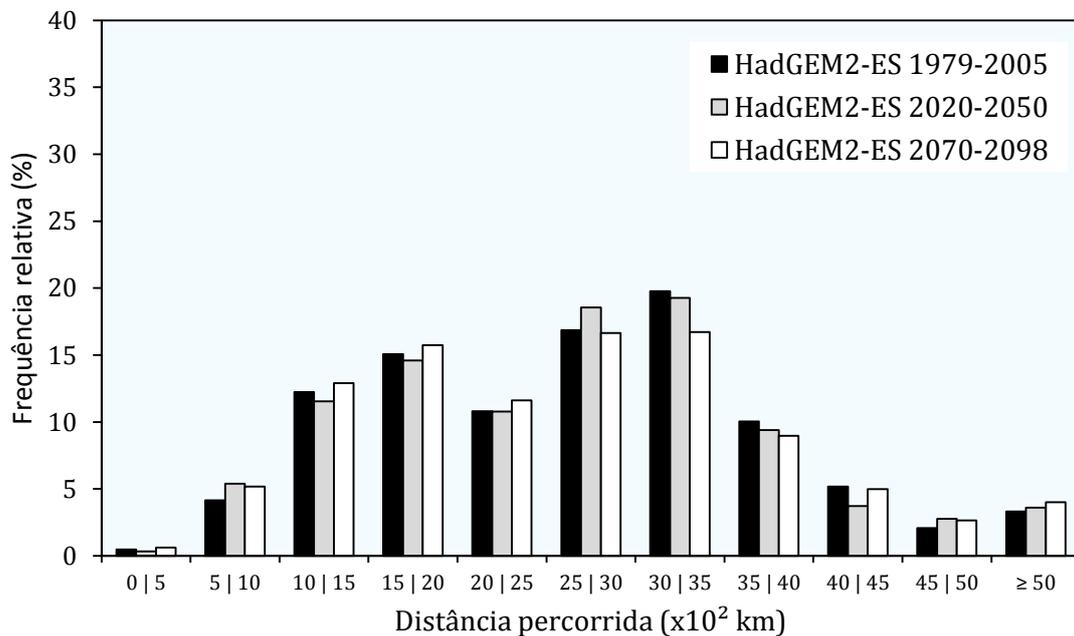


Figura 93 – Frequência relativa (%) dos ciclones com origem na RG3 quanto à distância percorrida (x10² km), simulada e projetada pelo HadGEM2-ES e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$.

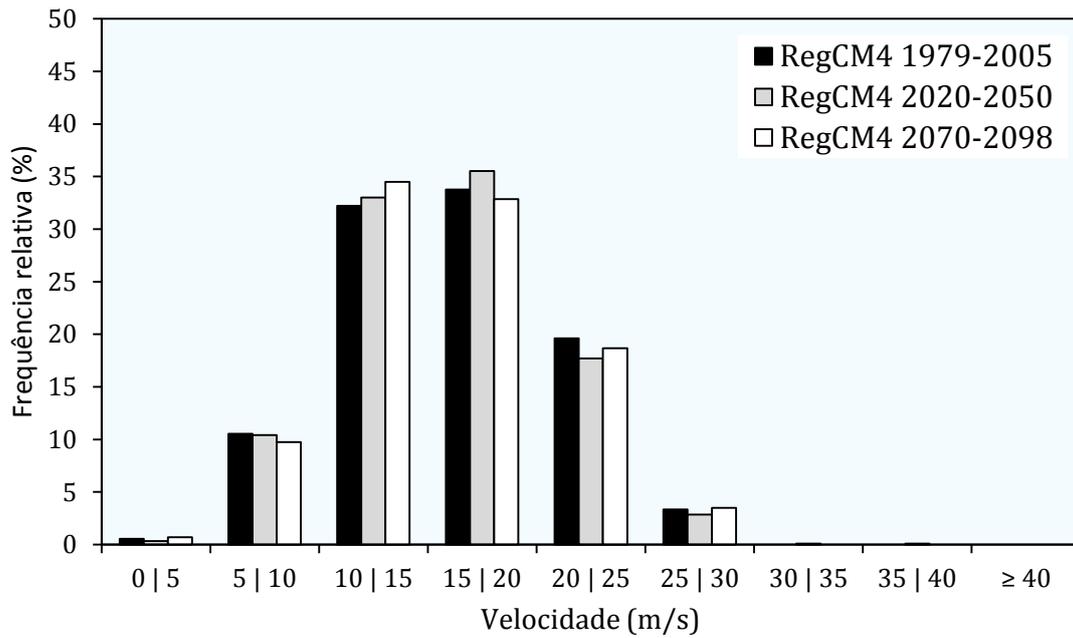


Figura 94 – Frequência relativa (%) dos ciclones com origem na RG3 quanto à velocidade média (m/s), simulada e projetada pelo RegCM4 e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$.

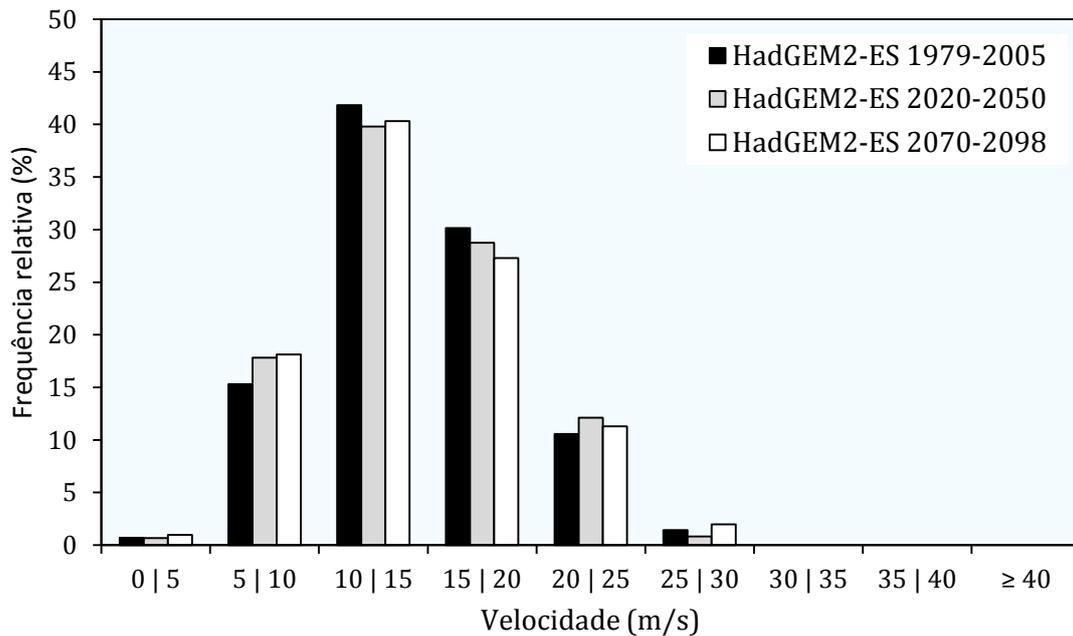


Figura 95 – Frequência relativa (%) dos ciclones com origem na RG3 quanto à velocidade média (m/s), simulada e projetada pelo HadGEM2-ES e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$.

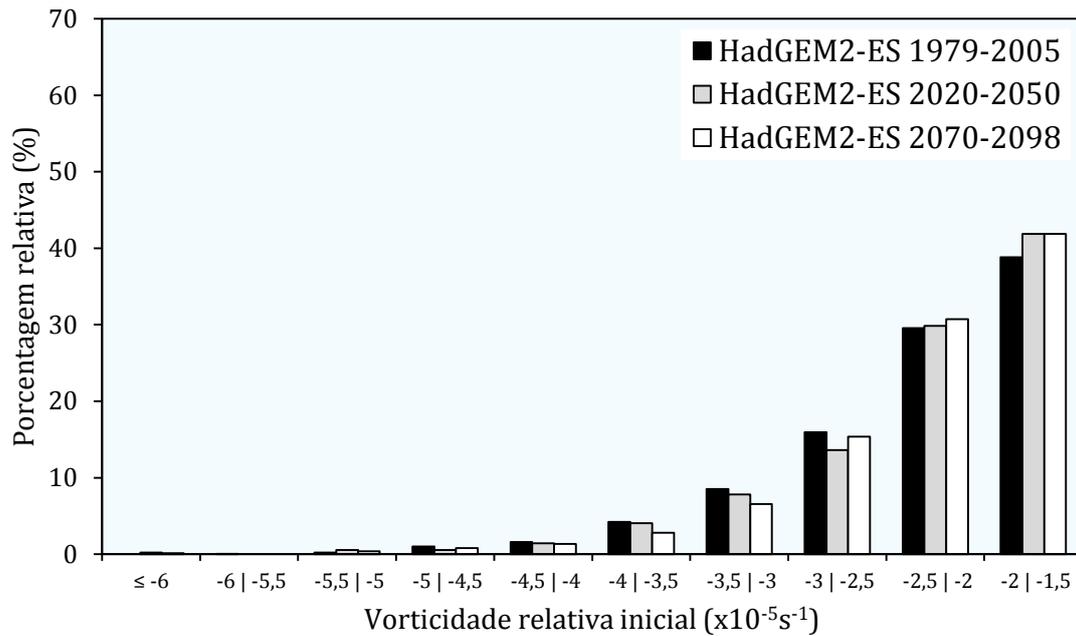


Figura 96 – Frequência relativa (%) dos ciclones com origem na RG3 quanto à vorticidade relativa inicial ($\times 10^{-5} s^{-1}$), simulada e projetada pelo RegCM4 e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$.

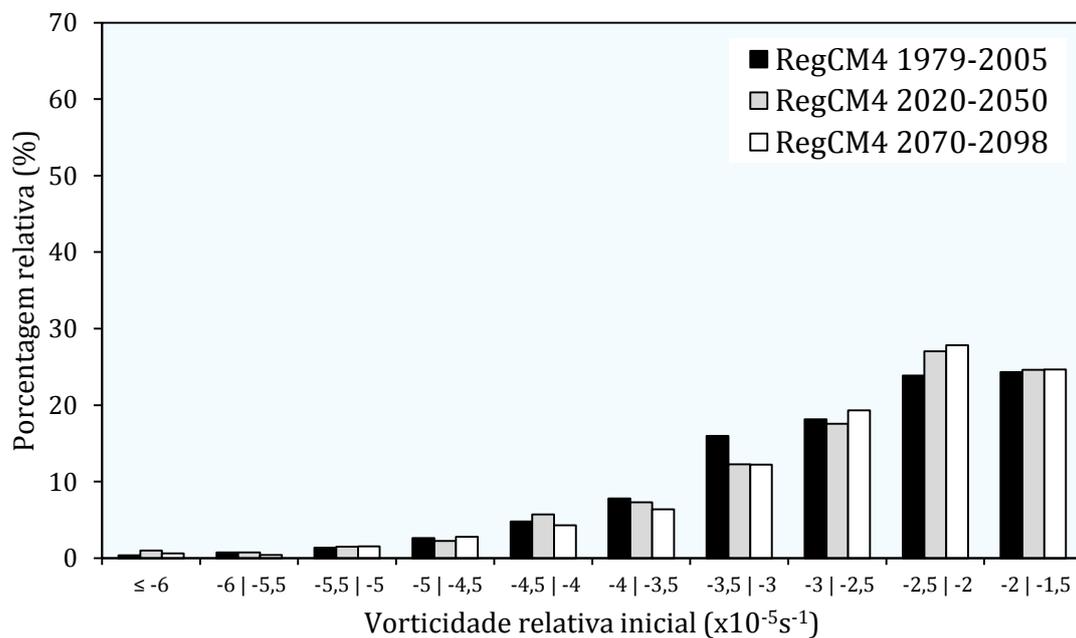


Figura 97 – Frequência relativa (%) dos ciclones com origem na RG3 quanto à vorticidade relativa inicial ($\times 10^{-5} s^{-1}$), simulada e projetada pelo HadGEM2-ES e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$.

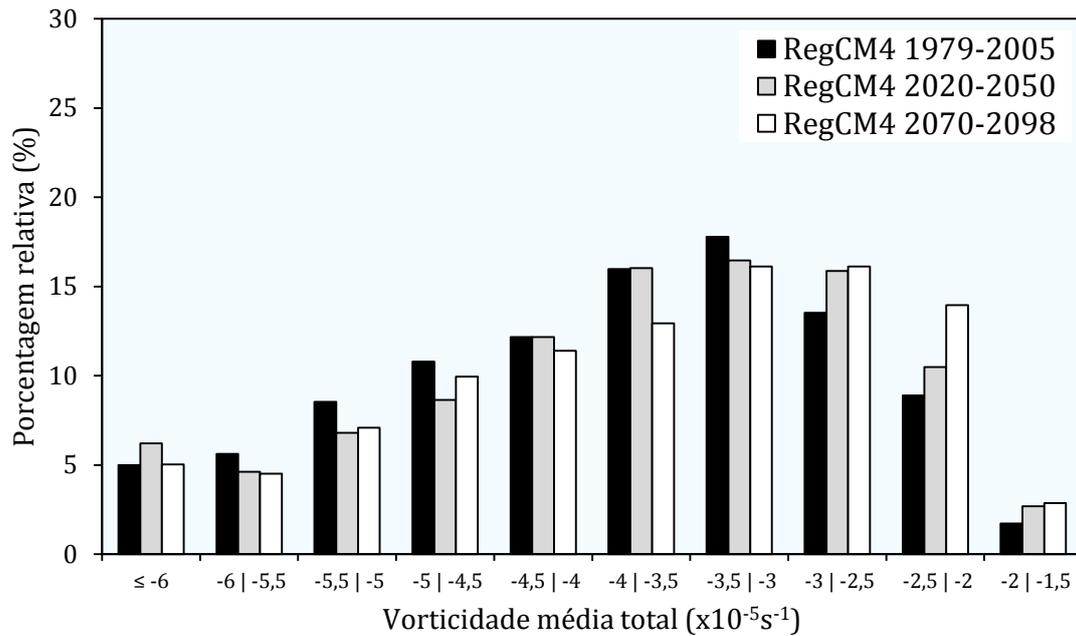


Figura 98 – Frequência relativa (%) dos ciclones com origem na RG3 quanto à vorticidade média total ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$), simulada e projetada pelo RegCM4 e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$.

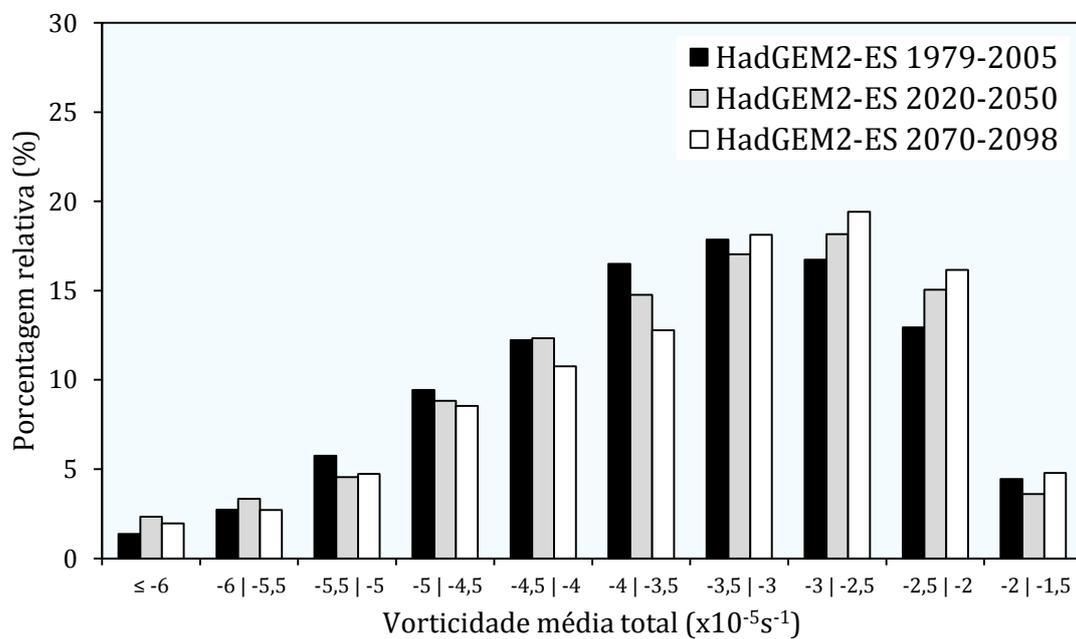


Figura 99 – Frequência relativa (%) dos ciclones com origem na RG3 quanto à vorticidade média total ($\times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$), simulada e projetada pelo HadGEM2-ES e considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$.

Tabela 11 – Características gerais médias dos ciclones com gêneses nas três sub-regiões do Atlântico Sudoeste em todos os períodos, simulados e projetados pelo RegCM4, considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$.

	$\zeta \leq -1,5$	Duração (dias)	Distância percorrida (km)	Velocidade (m/s)	Vorticidade inicial ($\times 10^{-5} s^{-1}$)	Vorticidade média total ($\times 10^{-5} s^{-1}$)
RG1	RegCM4 1979-2005	3,0	2570,7	11,3	-2,2	-3,1
	RegCM4 2020-2050 RCP8.5	3,0	2526,0	11,4	-2,2	-3,2
	RegCM4 2070-2098 RCP8.5	3,0	2467,8	11,0	-2,1	-3,0
		Duração (dias)	Distância percorrida (km)	Velocidade (m/s)	Vorticidade inicial ($\times 10^{-5} s^{-1}$)	Vorticidade média total ($\times 10^{-5} s^{-1}$)
RG2	RegCM4 1979-2005	2,8	3042,3	14,8	-2,8	-3,9
	RegCM4 2020-2050 RCP8.5	2,7	2947,5	14,3	-2,7	-3,7
	RegCM4 2070-2098 RCP8.5	2,8	2982,2	14,3	-2,7	-3,8
		Duração (dias)	Distância percorrida (km)	Velocidade (m/s)	Vorticidade inicial ($\times 10^{-5} s^{-1}$)	Vorticidade média total ($\times 10^{-5} s^{-1}$)
RG3	RegCM4 1979-2005	2,4	2968,1	16,1	-2,7	-3,9
	RegCM4 2020-2050 RCP8.5	2,4	2951,1	15,9	-2,7	-3,8
	RegCM4 2070-2098 RCP8.5	2,3	2910,5	16,0	-2,7	-3,7

Tabela 12 – Características gerais médias dos ciclones com gêneses nas três sub-regiões do Atlântico Sudoeste em todos os períodos, simulados e projetados pelo HadGEM2-ES considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -1,5$.

	$\zeta \leq -1,5$	Duração (dias)	Distância percorrida (km)	Velocidade (m/s)	Vorticidade inicial ($\times 10^{-5} s^{-1}$)	Vorticidade média total ($\times 10^{-5} s^{-1}$)
RG1	HadGEM2-ES 1979-2005	3,7	2590,8	9,4	-2,0	-3,1
	HadGEM2-ES 2020-2050 RCP8.5	3,4	2478,2	9,6	-2,0	-3,0
	HadGEM2-ES 2070-2098 RCP8.5	3,5	2584,8	9,6	-2,1	-3,1
		Duração (dias)	Distância percorrida (km)	Velocidade (m/s)	Vorticidade inicial ($\times 10^{-5} s^{-1}$)	Vorticidade média total ($\times 10^{-5} s^{-1}$)
RG2	HadGEM2-ES 1979-2005	3,1	3027,3	13,3	-2,8	-4,0
	HadGEM2-ES 2020-2050 RCP8.5	3,1	3096,3	13,6	-2,8	-4,0
	HadGEM2-ES 2070-2098 RCP8.5	3,0	3121,4	13,6	-2,8	-4,2
		Duração (dias)	Distância percorrida (km)	Velocidade (m/s)	Vorticidade inicial ($\times 10^{-5} s^{-1}$)	Vorticidade média total ($\times 10^{-5} s^{-1}$)
RG3	HadGEM2-ES 1979-2005	2,4	2690,0	14,4	-2,3	-3,5
	HadGEM2-ES 2020-2050 RCP8.5	2,3	2679,6	14,3	-2,3	-3,5
	HadGEM2-ES 2070-2098 RCP8.5	2,4	2651,7	14,2	-2,3	-3,4

Tabela 13 – Características gerais médias dos ciclones com gêneses nas três sub-regiões do Atlântico Sudoeste em todos os períodos, simulados e projetados pelo RegCM4 considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -2,5$.

$\zeta \leq -2,5$		Duração (dias)	Distância percorrida (km)	Velocidade (m/s)	Vorticidade inicial ($\times 10^{-5} s^{-1}$)	Vorticidade média total ($\times 10^{-5} s^{-1}$)
RegCM4 1979-2005		2,8	2486,5	11,9	-3,1	-3,8
RG1	RegCM4 2020-2050 RCP8.5	3,0	2611,4	12,3	-3,1	-3,7
	RegCM4 2070-2098 RCP8.5	3,3	2792,0	11,9	-3,0	-3,7
		Duração (dias)	Distância percorrida (km)	Velocidade (m/s)	Vorticidade inicial ($\times 10^{-5} s^{-1}$)	Vorticidade média total ($\times 10^{-5} s^{-1}$)
RegCM4 1979-2005		2,8	3075,2	14,7	-3,6	-4,4
RG2	RegCM4 2020-2050 RCP8.5	2,8	2994,8	14,3	-3,5	-4,3
	RegCM4 2070-2098 RCP8.5	2,9	3054,7	14,1	-3,5	-4,3
		Duração (dias)	Distância percorrida (km)	Velocidade (m/s)	Vorticidade inicial ($\times 10^{-5} s^{-1}$)	Vorticidade média total ($\times 10^{-5} s^{-1}$)
RegCM4 1979-2005		2,4	2913,6	16,0	-3,4	-4,3
RG3	RegCM4 2020-2050 RCP8.5	2,4	2945,7	16,0	-3,5	-4,4
	RegCM4 2070-2098 RCP8.5	2,3	2881,6	16,4	-3,4	-4,2

Tabela 14 – Características gerais médias dos ciclones com gêneses nas três sub-regiões do Atlântico Sudoeste em todos os períodos, simulados e projetados pelo HadGEM2-ES considerando todos os sistemas com $\zeta \leq -2,5$.

$\zeta \leq -2,5$		Duração (dias)	Distância percorrida (km)	Velocidade (m/s)	Vorticidade inicial ($\times 10^{-5} s^{-1}$)	Vorticidade média total ($\times 10^{-5} s^{-1}$)
HadGEM2-ES 1979-2005		4,0	2782,7	8,8	-3,0	-3,5
RG1	HadGEM2-ES 2020-2050 RCP8.5	3,5	2553,4	9,8	-3,0	-3,7
	HadGEM2-ES 2070-2098 RCP8.5	3,2	2362,0	9,9	-3,0	-3,5
		Duração (dias)	Distância percorrida (km)	Velocidade (m/s)	Vorticidade inicial ($\times 10^{-5} s^{-1}$)	Vorticidade média total ($\times 10^{-5} s^{-1}$)
HadGEM2-ES 1979-2005		3,0	2999,4	13,6	-3,6	-4,5
RG2	HadGEM2-ES 2020-2050 RCP8.5	3,2	3126,8	13,3	-3,6	-4,6
	HadGEM2-ES 2070-2098 RCP8.5	3,1	3147,7	13,6	-3,5	-4,7
		Duração (dias)	Distância percorrida (km)	Velocidade (m/s)	Vorticidade inicial ($\times 10^{-5} s^{-1}$)	Vorticidade média total ($\times 10^{-5} s^{-1}$)
HadGEM2-ES 1979-2005		2,3	2664,2	15,0	-3,2	-4,1
RG3	HadGEM2-ES 2020-2050 RCP8.5	2,4	2777,5	14,9	-3,2	-4,2
	HadGEM2-ES 2070-2098 RCP8.5	2,3	2673,0	15,2	-3,1	-4,0

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Esse estudo discutiu os principais aspectos da climatologia de ciclones sobre o Atlântico Sudoeste no clima presente, aqui representado pelo período de 1979-2005, e também em duas perspectivas de clima futuro sob o cenário de mudanças climáticas RCP8.5: futuro próximo (2020-2050) e futuro distante (2070-2098). Para isso, foram utilizadas as simulações do modelo regional RegCM4 aninhado ao modelo global HadGEM2-ES. Não obstante, também foram avaliadas as climatologias a partir da simulação do próprio modelo HadGEM2-ES (período presente e futuro) e de cinco reanálises no presente: CFSR, ERA-Interim, ERA-40, NCEP-I e NCEP-II, como fontes de comparação aos modelos.

Durante o período definido como presente (1979-2005), foram identificados ao longo dos modelos e reanálises um número total de 5014 a 7627 sistemas ciclônicos que se iniciaram com $\zeta \leq -1,5$. A reanálise CFSR identificou 6802 ciclones, sendo 49,7% correspondentes aos inicialmente intensos. A ERA-Interim obteve 6302 ciclones, com 48,7% inicialmente intensos, enquanto que a ERA-40 obteve um total de 5014 sistemas, sendo 44,6% inicialmente intensos. Por último, as reanálises NCEP-I e NCEP-II identificaram 5239 e 5227 ciclones, respectivamente, sendo 44,6% e 41,2% deles inicialmente intensos. O modelo RegCM4 simulou para o período um número total de 7627 ciclones, com cerca de 56,9% de sistemas inicialmente intensos, já o modelo global HadGEM2-ES simulou 7013 ciclones, sendo 44,2% deles, sistemas inicialmente intensos. Dessa forma, esse estudo encontrou que ambos os modelos superestimaram o número total de ciclones encontrados pelas reanálises no clima presente, se mostrando mais próximos das reanálises de maior resolução espacial (CFSR e ERA-Interim).

A média anual simulada pelo RegCM4 no período presente foi de $282,4 \pm 19,4$ ciclones, considerando todos os sistemas. Este valor foi ligeiramente superior ao obtido pelo HadGEM2-ES, que foi de $259,7 \pm 19,0$ ciclones por ano. Esses resultados se mostraram próximos ao obtido por Reboita (2008), que encontrou para o período entre 1990 e 1999, uma média anual de $276 \pm 11,6$ ciclones no modelo RegCM3.

A variabilidade mensal em todos os conjuntos mostrou que os meses de maior ocorrência de ciclones foram julho e agosto, contribuindo para que a estação de inverno

seja a mais favorável ao desenvolvimento dos ciclones. Fevereiro foi o mês de menor atividade ciclônica, assim como as estações de verão e outono.

Em relação às características médias dos ciclones que se iniciaram com $\zeta \leq -1,5$, o ciclo de vida desde a ciclogênese até a ciclólise dos sistemas oscilou entre 2,1 e 2,5 dias em média, tendo o HadGEM2-ES simulado o maior valor médio entre todos os conjuntos de dados. A distância percorrida variou de 2431,8 km no NCEP-II até 2624,4 km no RegCM4. A velocidade média atingiu 13,8 m/s no HadGEM2-ES até 15,4 m/s na CFSR, ERA-Interim e NCEP-I. O RegCM4 simulou uma velocidade média dos ciclones de 14,9 m/s. Quanto à vorticidade relativa inicial, o modelo regional obteve o valor médio mais negativo (mais intenso), cerca de $-3,0 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$. O HadGEM2-ES simulou uma média de $-2,7 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$. Por fim, a vorticidade média ao longo de todo o ciclo de vida dos sistemas variou entre $-3,4 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$ a $-3,8 \times 10^{-5} \text{s}^{-1}$. As diferenças encontradas entre as médias encontradas nesse estudo e aquelas obtidas por Reboita (2008) e Krüger et al. (2012) estão relacionadas principalmente com as particularidades dos modelos e reanálises utilizadas, a área geográfica abrangida e aos limiares de vorticidade utilizados. De qualquer forma, todos esses resultados se mostraram consideravelmente similares, evidenciando a capacidade dos modelos em reproduzir o comportamento geral dos ciclones sobre o Atlântico Sudoeste no clima presente.

Ambos os modelos simularam as três sub-regiões ciclogênicas predominantes do Atlântico Sudoeste, identificadas nos estudos de Hoskins e Hodges (2005), Reboita (2008) e Krüger et al. (2012). No entanto, os modelos utilizados nesse estudo simularam as sub-regiões RG1 e RG2 com um pequeno deslocamento para norte. A RG3, sub-região adjacente à costa leste da Argentina, apresentou a maior densidade anual de ciclogêneses em relação às demais sub-regiões. Durante as estações de inverno e primavera se encontraram os maiores valores de densidade ao longo de todo o Atlântico Sudoeste.

Na RG1, a primavera e o verão foram as estações com a maior densidade e média sazonal de ciclones em todos os conjuntos de dados, excetuando no RegCM4, onde o inverno foi mais predominante que o verão. Na RG2 e RG3, as estações mais favoráveis foram a primavera e o inverno, em todos os modelos e reanálises.

Uma vez avaliada a climatologia e o comportamento dos ciclones no clima presente, esse estudo teve como principal preocupação a projeção desses fenômenos atmosféricos dentro de um contexto futuro de mudança climática, especificamente sob o cenário

RCP8.5. Durante o período de 2020-2050, o RegCM4 projeta uma redução de 6,5% na média anual de ciclones em relação ao presente, enquanto que o HadGEM2-ES projeta uma queda de 3,6%. Esses resultados são referentes ao limiar de $\zeta \leq -1,5$. A tendência negativa projetada na média anual é maior para os ciclones inicialmente intensos, sendo cerca de 9,3% no RegCM4 e 6,3% no HadGEM2-ES. Durante o período de 2070-2098 essas mesmas porcentagens aumentam, atingindo 11,4% no RegCM4 e 10,4% no HadGEM2-ES, considerando todos os ciclones, e 16,7% no RegCM4 e 10,9% no HadGEM2-ES, quando se considera apenas os sistemas inicialmente intensos. Em resumo, o RegCM4 projeta um declínio mais acentuado que o HadGEM2-ES, confirmando a maior sensibilidade do modelo regional frente aos cenários de mudanças climáticas, quando se trata da atividade de ciclones sobre o Atlântico Sudoeste.

A variabilidade sazonal ao longo dos dois períodos futuros manteve o mesmo padrão daquele encontrado para o período de 1979-2005 (maior ocorrência de ciclones durante o inverno e primavera), em ambos os modelos e limiares de vorticidade inicial, sofrendo apenas diminuições nos valores das médias de ciclones em todas as estações. Da mesma forma, o comportamento dos ciclones em relação às suas características médias não sofreu alterações consideráveis dentro dos cenários futuros.

Em relação à densidade média anual ciclogênica ao longo do Atlântico Sudoeste, o RegCM4 projeta uma maior diminuição geral do que o HadGEM2-ES, em ambos os períodos futuros. Não obstante, nos dois modelos há uma maior queda da densidade anual no período de 2070-2098 do que em 2020-2050, tanto em dimensão espacial quanto em intensidade. A única exceção ocorre no período de 2020-2050 projetado pelo HadGEM2-ES, onde a intensidade dos núcleos com tendência negativa da densidade de ciclogêneses foi ligeiramente superior daquela projetada para 2070-2098. A faixa latitudinal entre 40°S e 57,5°S se concentram as maiores tendências negativas para a densidade média anual de ciclogêneses ao longo dos dois períodos futuros.

Não se projetou nenhuma mudança maior que 3,0% na frequência relativa de ciclogêneses dentro das oito bandas de latitude analisadas do Atlântico Sudoeste (15°S-20°S; 20°S-25°S; 25°S-30°S; 30°S-35°S; 35°S-40°S; 40°S-45°S; 45°S-50°S; 50°S-55°S) entre o clima presente e o clima futuro. De maneira geral, dentro da faixa latitudinal entre 40°S e 55°S se projetam as maiores diminuições no percentual de ciclogêneses, todavia,

não é possível concluir se essa tendência é devido à migração dos sistemas para latitudes próximas ao polo, uma vez que este estudo não abrangeu latitudes superiores à 57,5°S.

Por fim, tendo em vista os resultados e discussões apresentados e levantados neste estudo, algumas questões merecem maior atenção e análise em futuros trabalhos relacionados à atividade dos ciclones sobre o Atlântico Sudoeste:

- a) Avaliar os processos e características físicas em médios e altos níveis da atmosfera dentro de cenários de mudanças climáticas, de modo a compreender a sua relação com as mudanças na frequência dos ciclones em superfície projetadas pelos modelos.
- b) Avaliar o reflexo da alteração nos fluxos de calor latente e sensível, devido ao aquecimento global, sobre o desenvolvimento e características dos ciclones na região.
- c) Ampliar a extensão latitudinal de análise dos ciclones na região, a fim de avaliar a existência de migrações das ciclogêneses entre as latitudes 40°S e aquelas próximas ao polo.

7 REFERÊNCIAS

BASIT, A.; SHOAI, S. R.; IRFAN, N.; AVILA, R. Simulation of monsoon precipitation over South-Asia using RegCM3. **Meteorology**, v. 2012, 14p., 2012.

BENGTSSON, L.; HAGEMANN, S.; HODGES, K. I. Can climate trends be calculated from reanalysis data? **Journal of Geophysical Research**, v. 109, 8p., 2004.

BENGTSSON, L.; HODGES, K. I.; ESCH, M.; KEENLYSIDE, N.; KORNBLUEH, L.; LUO, J.; YAMAGATA, T. How may tropical cyclones change in a warmer climate? **Tellus**, v. 59, p. 539-561, 2007.

BITENCOURT, D.; GAN, M. A.; ACEVEDO, O.; FUENTES, M. V.; MUZA, M.; RODRIGUES, M. L.; QUADRO, M. F. Relating winds along the Southern Brazilian coast to extratropical cyclones. **Meteorological Applications**, Hoboken, v. 18, p. 223-229, 2011.

BJERKNES, J. On the structure of moving cyclones. **Geof. Publ.**, v. 1, p. 1-8, 1919.

BJERKNES, J.; SOLBERG, H. Life cycle of cyclones and the Polar Front Theory of atmospheric circulation. **Geof. Publ.**, v. 3, p. 3-18, 1922.

BJERKNES, J.; HOLMBOE, J. On the theory of cyclones. **Journal of Meteorology**, v. 1, p. 1-22, 1944.

BOOTH, J. F.; WANG, S.; POLVANI, L. Midlatitude storms in a moister world: Lessons from idealized baroclinic life cycle experiments. **Climate Dynamics**, v. 41, p. 787-802, 2013.

BROWN, K. M.; DANIEL, W.; GEORGE, G. The effect of hurricane Katrina on the mussel assemblage of the Pearl River, Louisiana. **Aquatic Ecology**, Dordrecht, v. 44, p. 223-231, 2010.

BRUNT, D. Some problems of modern meteorology: I. The present position of the theories on the origin of cyclonic depressions. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, Hoboken, v.56, p. 345-350, 1930.

BUZZI, A., e co-autores. A unified theory of orographic influences upon cyclogenesis. **J. Meteorol. Atmos. Phys.**, v. 36, p. 91-107, 1987.

CÔTÉ, J., JABLONOWSKI, C.; BAUER, P.; WEDI, N. Numerical Methods of the Atmosphere and Ocean, in: Seamless Prediction of the Earth System: from Minutes to Months, World Meteorological Organization, p. 101-124, 2015.

CRESSMAN, G. P. An operational objective analysis system. **Monthly Weather Review**, Boston, v. 7, p. 367-374, 1959.

DEE, D. P.; e co-autores. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, Hoboken, v. 137, p. 553-597, 2011.

DICKINSON, R. E.; HENDERSON-SELLERS, A.; KENNEDY, P. J. Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) version 1E as coupled to the NCAR Community Climate Model. Tech. Rep. TN-387+STR, NCAR, Boulder, Colorado, 72 p., 1993.

EMANUEL, K. A. An Air-Sea Interaction Theory for Tropical Cyclones. Part I: Steady-State Maintenance". **Journal of the Atmospheric Sciences**, Boston, v. 43, p. 585-604, 1986.

EMANUEL, K. A.; ZIVKOVIC-ROTHMAN, M. Development and Evaluation of a Convection Scheme for Use in Climate Models. **Journal of the Atmospheric Sciences**, Boston, v. 56, p. 1766-1782, 1999.

EVANS, J. L.; BRAUN, A. A Climatology of Subtropical Cyclones in the South Atlantic. **Journal of Climate**, Boston, v. 25, p. 7328-7340, 2012.

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

GAN, M. A.; RAO, V. B. Surface cyclogenesis over South America. **Monthly Weather Review**, Boston, v. 119, p. 293-302, 1991.

GAN, M. A. Ciclogêneses e ciclones sobre a América do Sul. 1992. Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1992.

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

GUISHARD, M. P., EVANS, J. L. Atlantic subtropical storms. Part I: Diagnostic Criteria and Composite Analysis. **Monthly Weather Review**, Boston, v. 137, p. 2065-2080, 2009.

GUISHARD, M. P., EVANS, J. L.; HART, R. Atlantic subtropical storms. Part II: Climatology. **Journal of Climate**, Boston, v. 22, p. 3574-2594, 2009.

GIORGI, F. Simulation of regional climate using a limited area model nested in a general circulation model. **Journal of Climate**, Boston, v. 3, p. 941-963, 1990.

GIORGI F.; JONES, C.; ASRAR, G. R. Addressing climate information needs at the regional level: the CORDEX framework. **Bulletin of the American Meteorological Society**, Boston, v. 58, p. 175-183, 2009.

GIORGI, F.; COPPOLA, E.; SOLMON, F.; MARIOTTI, L.; SYLLA, M. B.; BI, X.; ELGUINDI, N.; DIRO, G. T.; NAIR, V.; GIULIANI, G. RegCM4: model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains. **Climate Research**, Oldendorf, v. 52, p. 7-29, 2012.

GOZZO, L. P.; da ROCHA, R. P.; REBOITA, M. S.; SUGAHARA, S. Subtropical cyclones over the Southwestern South Atlantic: climatological aspects and case study. **Journal of Climate**, v. 27, p. 8543-8562, 2014.

GRAY, W. M. Global view of the origin of tropical disturbances and storms. **Monthly Weather Review**, Boston, v.96, n. 10, p. 669-700, 1968.

GRELL, G. A. Prognostic evaluation of assumptions used by cumulus parameterizations, **Monthly Weather Review.**, Boston, v. 121, p. 764-787, 1993.

GRIEGER., J.; LECKEBUSCH, G.C.; DONAT, M. G.; SCHUSTER, M.; ULBRICH, U. Southern Hemisphere winter cyclone activity under recent and future climate conditions in multi-model AOGCM simulations. **International Journal of Climatology**, v. 34, p. 3400-3416, 2014.

GRISE, K. M.; SON, S.; CORREA, G. J. P.; POLVANI, L. M. The response of extratropical cyclones in the Southern Hemisphere to stratospheric ozone depletion in the 20th century. **Atmospheric Science Letters**, v. 15, p. 29-36, 2014.

HELD, I. M.; SODEN, B. J. Robust responses of the hydrological cycle to global warming. **Journal of Climate**, v. 19, p. 5686-5699, 2006.

HODGES, K. I.; LEE, R. W.; BENGTSSON, L. A comparison of extra-tropical cyclones in recent Re-analyses; ERA-INTERIM, NASA-MERRA, NCEP-CFSR and JRA25. **Journal of Climate**, Boston, v. 24, p. 4888-4906, 2011.

HOSKINS, B. J.; HODGES, K. I. A new perspective on southern hemisphere storm tracks. **Journal of Climate**, Boston, v. 18, p. 4108-4129, 2005.

JONES, C. D. The HadGEM2-ES implementation of CMIP5 centennial simulations. **Geoscientific Model Development**, Gottingen, v. 4, p. 543-570, 2011.

JUNG, T., GULEV, S. K.; RUDEVA, I.; SOLOVIOV, V. Sensitivity of extratropical cyclone characteristics to horizontal resolution in the ECMWF model. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, v. 132, p. 1839-1857, 2006.

KALNAY, E., e co-autores. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. **Bulletin of the American Meteorological Society**, Boston, v. 77, p. 437-471, 1996.

KANAMITSU, M., e co-autores. NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2). **Bulletin of the American Meteorological Society**, Boston, v. 83, p. 1631-1643, 2002.

KRÜGER, L. F. Projeções climáticas das ciclogêneses no Atlântico Sul utilizando os modelos HadAM3 e RegCM3. 2009. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

KRÜGER, L. F.; ROCHA, R. P.; REBOITA, M. S.; AMBRIZZI, T. RegCM3 nested in HadAM3 scenarios A2 and B2: projected changes in extratropical cyclogenesis, temperature and precipitation over the South Atlantic Ocean. **Climatic Change**, Dordrecht, v. 113, p. 599-621, 2012.

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

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

LIONELLO, P.; GIORGI, F. Winter precipitation and cyclones in the Mediterranean region: future climate scenarios in a regional simulation. **Advances in Geosciences**, Gottingen, v. 12, p. 153-158, 2007.

LIONELLO, P.; BOLDRIN, U.; GIORGI, F. Future changes in cyclone climatology over Europe as inferred from a regional climate simulation. **Climate Dynamics**, New York, v. 30, p. 657-671, 2008.

LLOPART, M. P. Impacto da representação solo-planta-atmosfera em simulações climáticas regionais para a América do Sul. 2014. Tese (Doutorado em Meteorologia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

MARENGO, J. A.; AMBRIZZI, T.; ROCHA, R. P.; ALVES, L. M.; CUADRA, S. V.; VALVERDE, M. C.; TORRES, R. R.; SANTOS, D. C.; FERRAZ, S. E. T. Future change of climate in South America in the late twenty-first century: intercomparison of scenarios from three regional climate models. **Climate Dynamics**, New York, v. 35, p. 1073-1097, 2010.

MARTIN, G. M.; e co-autores. The HadGEM2 family of Met Office Unified Model climate configurations. **Geoscientific Model Development**, Gottingen, v. 4, p. 723-757, 2011.

MARTINEZ-CASTRO, D.; da ROCHA, R. P.; BEZANILLA-MORLOT, A.; ALVAREZ-ESCUADERO, L.; REYES-FERNANDEZ, J. P.; SILVA-VIDAL, Y.; ARRITT, R. W. Sensitivity studies of the RegCM4 simulation of summer precipitation, temperature and local wind field in the Caribbean Region. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 86, p.5-22, 2006.

MCTAGGART-COWAN, R.; BOSART, L. F. Analysis of Hurricane Catarina (2004). **Monthly Weather Review**, Boston, v. 134, p. 3029-3053, 2006.

MENDES, D.; SOUZA, E. P.; MARENGO, J. A.; MENDES, M. C. D. Climatology of extratropical cyclones over the South American–southern oceans sector. **Theoretical and Applied Climatology**, Wien, v. 100, p. 239-250, 2009.

MUMBY, P. J.; VITOLO, R.; STEPHENSON, D. B. Temporal clustering of tropical cyclones and its ecosystem impacts. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, Washington, v. 108, p. 17626-17630, 2011.

NEU, U.; e co-autores. IMILAST: A community effort to intercompare extratropical cyclone detection and tracking algorithms. **Bulletin of the American Meteorological Society**, Boston, v. 94, p. 529-547, 2013.

NEUMANN, C. J. Global guide to tropical cyclone forecasting. World Meteorological Organization, 1993.

OOUCHI, K., YOSHIMURA, J.; YOSHIMURA, H.; MIZUTA, R.; KUSUNOKI, S.; NODA, A. Tropical cyclone climatology in a global-warming climate as simulated in a 20-km-mesh global atmospheric model: Frequency and intensity analysis, **Journal of the Atmospheric Sciences**, Boston, v. 84, p. 259-276, 2006.

PEIXOTO, J. P.; OORT, A. H. **Physics of Climate**. American Institute of Physics, 1992. 520 p.

PETTERSEN, S. **Weather Analysis and Forecasting**. New York, 2ed., 1956. 428 p.

PEZZA, A. B.; SIMMONDS, I. RENWICK, J. A. Southern hemisphere cyclones and anticyclones: recent trends and links with decadal variability in the Pacific Ocean. **International Journal of Climatology**, v. 27, p. 1403-1419, 2007.

PIVA, E. D.; MOSCATI, M. C. L.; GAN, M. A. Papel dos fluxos de calor latente e sensível em superfície associado a um caso de ciclogênese na costa leste da América do Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 23, n. 4, p. 450-476, 2008.

RAIBLE, C. C.; DELLA-MARTA, P. M.; SCHWIERZ, C.; WERNLI, H.; BLENDER, R. Northern Hemisphere extratropical cyclones: a comparison of detection and tracking methods and different reanalyses. **Monthly Weather Review**, v. 136, p. 880-897, 2008.

RATHMANN, N. M; YANG, S.; KASS, E. Tropical cyclones in enhanced resolution CMIP5 experiments. **Climate Dynamics**, v. 42, p. 665-681, 2014.

REBOITA, M. S. Ciclones extratropicais sobre o Atlântico Sul: simulação climática e experimentos de sensibilidade. 2008. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

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

REBOITA, M. S.; KRUSCHE, N.; AMBRIZZI, T.; da ROCHA, R. P. Entendendo o tempo e o clima na América do Sul. **Terrae Didactica**, Campinas, v. 8, p. 34-50, 2012.

REBOITA, M. S.; ROCHA, R. P.; AMBRIZZI, T.; GOUVEIA, C. D. Trend and teleconnection patterns in the climatology of extratropical cyclones over the Southern Hemisphere. **Climate Dynamics**, New York, 2014.

REBOITA, M. S.; ROCHA, R. P.; DIAS, C. G.; YNOUE, R. Y. Climate projections for South America: RegCM3 driven by HadCM3 and ECHAM5. **Advances in Meteorology**, New York, v. 14, p. 117-132, 2014.

SAHA, S.; e co-autores. The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 91, p. 1015-1057, 2010.

SANDERS, F.; GYAKUM, J. R. Synoptic-dynamic climatology of the "bomb". **Monthly Weather Review**, Boston, v. 108, p. 1589-1606, 1980.

SANFORD, T. B.; BLACK, P. G.; HAUSTERN, J. R.; FEENEY, J. W.; FORRISTALL, G. Z.; PRICE, J. F. Ocean response to a hurricane. Part I: Observation. **Journal of Physical Oceanography**, Boston, v. 17, n. 11, p. 2065-2083, 1987.

SAURRAL, I. R.; CAMILLONI, A. I.; AMBRIZZI, T. Links between topography, moisture fluxes pathways and precipitation over South America. **Climate Dynamics**, v. 45, p. 777-789, 2015.

SEGALIN, B. Características dos sistemas convectivos de mesoescala nas simulações climáticas do RegCM4. 2012. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

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

SHKOLNIK, I. M.; EFIMOV, S. V. Cyclonic activity in high latitudes as simulated by a regional atmospheric climate model: added value and uncertainties. **Environmental Research Letters**, v. 8, 12p., 2013.

SILVA, L. D. Storm-track na América do Sul e vizinhanças: climatologia, variabilidade e mudanças climáticas. 2010. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2010.

SINCLAIR, M. R. An objective cyclone climatology for the Southern Hemisphere. **Monthly Weather Review**, Boston, v. 122, p. 2239-2256, 1994.

SINCLAIR, M. R.; WATTERSON, I. G. Objective assessment of extratropical weather systems in simulated climates. **Journal of Climate**, Boston, v. 12, p. 3467-3485, 1999.

SINCLAIR, M. R. Objective identification of cyclones and their circulation intensity, and climatology. **Weather and Forecasting**, Boston, v. 12, p. 595-612, 1997.

STRACHAN, J.; VIDALE, P. L.; HODGES, K.; ROBERTS, M.; DEMORY, M. Investigating Global Tropical Cyclone Activity with a Hierarchy of AGCMs: The Role of Model Resolution. **Journal of Climate**, v. 26, p. 133-152, 2013.

SUGAHARA, S. Variação anual da frequência de ciclones no Atlântico Sul. In: **XI Congresso Brasileiro de Meteorologia**, Rio de Janeiro, RJ, 2000.

TRENBERTH, K. E. Climate System Modeling. **Cambridge University Press**. 787 p., 1992.

TRIGO, I. F. Climatology and Interannual Variability of StormTracks in the Euro-Atlantic Sector: a Comparison between ERA-40 and NCEP/NCAR Reanalysis. **Climate Dynamics**, v. 26, p.127-143, 2006.

ULBRICH, U.; LECKEBUSH, G. C.; PINTO, J. G. Extra-tropical cyclones in the present and future climate: a review. **Theoretical and Applied Climatology**, Wien, v. 96, p. 117-131, 2009.

UPPALA, S. M., e co-autores. The ERA-40 re-analysis. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, Hoboken, v. 131, p. 2961-3012, 2005.

VAN BRUMMELEN, G. **Heavenly Mathematics: The Forgotten Art of Spherical Trigonometry**. Princeton, Princeton University Press, 2012. 208 p.

VERA, C. S.; VIGLIAROLO, P. K.; BERBERY, E. H. Cold season synoptic-scale waves over subtropical South America. **Monthly Weather Review**, Boston, v.130, p. 684-699, 2002.

WANG, X. L.; SWAIL, V. R.; ZWIERS, F. W. Climatology and changes of extratropical cyclone activity: comparison of ERA-40 with NCEP-NCAR Reanalysis for 1958-2001. **Journal of Climate**, v. 10, p. 3145-3166, 2006.

WANG, X. L.; FENG, Y.; COMPO, G. P.; SWAIL, V. R.; ZWIERS, F. W.; ALLAN, R. J.; SARDESHMULCH, P. D. Trends and low frequency variability of extratropical cyclone activity in the ensemble of twentieth century reanalysis. **Climate Dynamics**, v. 40, p. 2775-2800, 2013.